ÉVFOLYAM
Volume

XII

2009

GEOMATIKAI KÖZLEMÉNYEK

Publications in Geomatics

SZERKESZTŐK
Editors

ZÁVOTI J, BÁNYAI L, PAPP G

HU ISSN 1419-6492

MTA GGKI

MTA GEODÉZIAI ÉS GEOFIZIKAI KUTATÓINTÉZET
SOPRON

Geomatikai Közlemények

Publications in Geomatics

kiadja a

MTA GEODÉZIAI ÉS GEOFIZIKAI KUTATÓINTÉZET

9400 Sopron, Csatkai E. u. 6-8. Pf. 5.
tel.: 99 - 508-340 fax.: 99 - 508-355
E-mail: geomatika@ggki.hu

felelős kiadó:

Závoti József
igazgató

szerkesztő:

Závoti József, Bányai László és Papp Gábor

technikai szerkesztő:

Szlávy Anna

készült a
LŐVÉR PRINT Kft. nyomdájában
9400 Sopron, Ady Endre u. 5.
tel.: 99 - 329-977

megjelent 150 példányban
Sopron, 2007

HU ISSN 1419-6492

GEOMATIKAI KÖZLEMÉNYEK XII.

„Minden nemzet a maga
nyelvén lett tudós,
de idegenen sohasem.”

(Bessenyei György)

A kiadványt támogatta a Soproni Tudós Társaság.

TARTALOMJEGYZÉK

Geomatematika – Geomathematics

Kádár István, Karsay Ferenc 9
A geodéziai és a kartográfiai helymeghatározás szintézise a Shannon-görbe alapján
The synthesis of the geodetic and the cartographical positioning after the Shannon-diagram

Battha László, Závoti József 19
Az előmetszési probléma és a 2D hasonlósági transzformáció
The intersection problem and the 2D similarity transformation

Jancsó Tamás 27
Durva hibák szűrése térbeli hasonlósági transzformációnál
Gross error detection at the spatial similarity transformation

Zaletnyik Piroska, Paláncz Béla 35
Térbeli affin transzformáció szimbolikus megoldása 3 ismert pontra
Symbolic solution of the 3D affine transformation in case of 3 known points

Laky Sándor 47
Differenciális evolúciós algoritmus alkalmazása geodéziai hálózatok kiegyenlítésére
Geodetic network adjustment using differential evolution algorithm

Nagy Imre 57
Pályaszámítási módszerek összehasonlítása
Comparing methods for orbit computation

Műszervizsgálatok és fejlesztések – Instrument tests and developments

Orbán Aladár, Horváth Attila, Gyimóthy Attila, Bánfi Frigyes 63
Felsőrendű digitális szintezőműszerek vizsgálata a Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetben
Investigation of precise digital levelling instruments in the Geodetic and Geophysical Research Institute

Völgyesi Lajos, Égető Csaba, Laky Sándor, Tóth Gyula, Ultmann Zita 71
Eötvös-inga felújítása és tesztmérések a budapesti Mátyás- Hegyi-barlangban
Reconstruction of a torsion balance, and test measurements in the Mátyás cave in Budapest

Papp Gábor, Battha László, Bánfi Frigyes 83
CCD kamerás okulár-rendszer LACOSTE-ROMBERG G típusú graviméterekhez
CCD ocular system for the LACOSTE-ROMBERG G meters

Nehézségi erőtér – Gravity field

Csapó Géza, Tóth Gyula, Laky Sándor, Völgyesi Lajos 91
Kísérleti mérések Eötvös-ingával és graviméterekkel – az Eötvös-inga mérések eredményei geodéziai célú hasznosításának vizsgálata céljából
Test measurements by torsion balance and gravimeters in view of geodetic application of torsion balance data

Dobróka Mihály, Völgyesi Lajos 101
A nehézségi erőtér 3D potenciálfüggvényének inverziós előállítása
Inversion reconstruction of 3D gravity potential based on torsion balance measurements

Földváry Lóránt, Mészáros Péter 109
Az Antarktisz tömegátrendeződéseinek vizsgálata GRACE geopotenciális modellek alapján
Analysis of mass redistribution in Antarctica based on GRACE gravity models

Völgyesi Lajos 119
A geoid időbeli változása
Time variation of the geoid

Tóth Gyula 131
A HGTUB2007 új magyarországi kombinált kvázigeoid megoldás
New Hungarian combined quasigeoid solution HGTUB2007

Bányai László, Gyimóthy Attila 141
A hazai geodéziai hálózatok és geoid modellek vizsgálata koordináta transzformációk alkalmazásával
Investigation of the Hungarian geodetic networks and geoid solutions by means of coordinate transformations

GNSS alkalmazások és egyéb helymeghatározás – GNSS applications and other positioning techniques

Busics György 151
AZ ETRS89 és a HD72 vonatkoztatási rendszerek közötti méretarányteny ező kérdése
The scale factor between ETRS89 and HD72 reference systems

Frey Sándor, Moór Attila 163
„Pontállandósítás” az égen – milyen kvazárok alkalmasak az égi vonatkoztatási rendszer kijelölésére?
Defining the celestial reference points – which quasars are the best suited?

Horváth Tamás 169
A GNSSnet.hu szolgáltatás jelene és jövője
The GNSSnet.hu service at present and in the future

Kenyeres Ambrus, Figurski M, Grenerczy Gyula 179
GPS mérések újrafeldolgozása: nemzetközi és hazai eredmények
Reprocessing of GPS measurements: results from the World and Hungary

Rózsa Szabolcs, Dombai Ferenc, Németh Péter, Ablonczy Dávid 187
Integrált vízgőztartalom becslése GPS adatok alapján
Estimation of integrated water vapour (IWV) from GPS observations

Ferencz Viktória 197
Geodéziai GPS a vasúti vágányhálózat újfelmérésében
Using high accuracy GNSS systems for automated railroad tracking

Krausz Nikol, Barsi Árpád 205
Épületen belüli helymeghatározás RFID technológiával
Indoor navigation with RFID

Barsi Árpád, Lovas Tamás, Krausz Nikol 211
Forgalommal szembehajtó jármű detektálása RFID segítségével
Detecting Ghost Driver by RFID

Geodinamika, mozgás- és deformációvizsgálat – Geodynamics and deformation analysis

Kiszely Márta 217
A Kárpát-medence és környéke földrengéseinek statisztikai elemzése
Statistical investigations of local earthquakes in the Carpathian Basin and surrounding area

Siki Zoltán, Homolya András 227
Paksi Atomerőmű II. blokk lokalizációs torony deformáció mérése
Deformation measurement of the localization tower of the second block in the Hungarian Nuclear Power Plant

Újvári Gábor, Bányai László, Mentes Gyula, Gyimóthy Attila, Holler Ildikó 233
A dunaszekcsői csuszamlás mozgásviszonyai
Movements of the Dunaszekcső landslide

Eperné-Pápai Ildikó, Mentes Gyula 241
Környezeti paraméterek hatása az extenzométeres mérésekre
Environmental parameter effects on extensometric measurements

Fotogrammetria és távérzékelés – Photogrammetry and remote sensing

Czimber Kornél 249
Új, általános célú képosztályozó kifejlesztése nagyfelbontású, textúrával rendelkező digitális képek feldolgozására
Development of a new, general image classifier to process high-resolution, textured digital images

Fekete Károly, Mélykúti Gábor, Schrott Péter 259
Közelfotogrammetriai kamerák minősítése átlagos képkoordináta középhiba-tárgytávolság függvénnyel
Qualification of Close Range Photogrammetry Cameras Using Average Image Coordinate RMS error vs. Object Distance Function

Varga Emese, Hegedűs István, Földváry Lóránt, Fekete Károly 265
Mérési pontok optimalizációja egy arc fotogrammetriai kiértékelése számára
Optimalization of measurement points in case of a photogrammetric processing

Verőné Wojtaszek Malgorzata 273
Földhasznosítás változásának követése távérzékeléssel a Velencei-tó vízgyűjtőjében
Land use change detection by Remote Sensing in the Lake Velence catchment area

Lovas Tamás, Berényi Attila, Barsi Árpád, Dunai László 281
Földi lézerszkennerek alkalmazhatósága mérnöki szerkezetek deformáció mérésében
Applying terrestrial laserscanning in deformation measurements of engineering structures

Brolly Gábor, Király Géza, Márkus István 291
Faállományok magassági modelljeinek előállítása távérzékelési eljárásokkal
Derivation of Crown Height Models by Remote Sensing Techniques

Kertész Imre, Lovas Tamás, Barsi árpád 301
Úthálózat felmérése Budapesten kamerás mobil térképező rendszerrel
Road detection in Budapest with mobile mapping system

Tóth Gyula 309
A HGTUB2007 új magyarországi kombinált kvázigeoid megoldás
New Hungarian combined quasigeoid solution HGTUB2007

Tóth Zoltán 319
Képfeldolgozási algoritmusok a légifelvételek automatikus kiértékelésében
Computer vision algorithms in geoinformatics

Térinformatika – Geoinformatics

Ládai András Dénes 327
Térinformatika a külszíni bányászatban
Geoinformatical applications in quarry

Kugler Zsófia 337
Terepmodell pontosságának hatása permanens hidraulikai modell számításában
Terrain uncertainty analysis for hydraulic calculations

Nagy Gábor 345
Korszerű grafikus eszközök lehetőségei a domborzatmodellek térhatású megjelenítésében
Using advanced graphic cards in 3D visualisation of the elevation models

Király G, Náhlik András 349
Gímszarvasok mozgásának térinformatikai elemzése és modellezése GPS-nyakörv által szolgáltatott, valamint kiegészítő adatok alapján
GIS analysis of the movement of red deer based on GPS collars' and ancillary data

Oberle Zoltán 359
Budapesti ASMI (állandó szórópontú műholdradar interferometria) adatok internetes információs rendszerének kiépítése
Development of a web-based information system of the Persistent Scatterers Radar Interferometry (PS-InSAR) data base for Budapest

Juhász Attila 367
Az idő kezelésének lehetőségei a hadtörténeti GIS rekonstrukciókban
Managing the time issue in military historical GIS

Márkus Béla, Eleiche Mohamed 377
Standalone Framework for Mobile GIS
A mobil GIS önálló környezete

A GEODÉZIAI ÉS A KARTOGRÁFIAI HELYMEGHATÁROZÁS SZINTÉZISE A SHANNON-GÖRBE ALAPJÁN

Kádár István[*], *Karsay Ferenc*[**]

Synthesis of geodetic and cartographical positioning on the basis of the Shannon-diagram *- The goal of the authors is: integration of the X, Y, Z coordinate-triplet which is basically important for geodetic computations and producing a decimal vector arithmetic without components in order to carry out parallel computations. Our examples are: accomplishment of 2D and 3D vector digits as well as of decimal vector number systems.*

Keywords: Shannon-diagram, data and number representation, data compression, integration of the spatial coordinates, planning of vector digits, dimension independent space-points and -contents, spatial clocks, geovectors

A szerzők célkitűzése: a helymeghatározásban és a geodéziai számításokban alapvető fontosságú X, Y, Z koordináta-hármasok egyesítése és összetevők nélküli decimális vektor-aritmetika létrehozása párhuzamos számítás céljából. Példákat mutatunk be 2D és 3D vektor-számjegyek és decimális vektor-számrendszerek létrehozására.

Kulcsszavak: Shannon-görbe, adat- és számábrázolás, adattömörítés, térbeli koordináták integrálása, vektor-számjegyek tervezése, dimenzió-független térpontok és tértartamok, térórák, geovektorok

1 Bevezetés

A geodézia és a kartográfia – lényegében informatikai szakterület. Bár különböző megjelenítési formákat használnak, de a helymeghatározás mindegyikük számára egyaránt nélkülözhetetlen, közös feladat. Ha egyetlen mondattal próbálnánk az ehhez alkalmazott módszerüket jellemezni, akkor a geodézia azt mondja meg, hogy „mi, hol van", míg a kartográfia arra a fordított kérdésre ad választ, hogy „hol, mi van". Ezeket tézisnek és antitézisnek tekintve, célszerűnek látunk egy olyan szintézist kidolgozni, amely a számítógépben is még közelebb hozza ezt a két testvér-szakterületet egymáshoz. A szintézis például az lehetne, amikor mind az objektumok, mind a helyek halmazát ismerve, keressük, hogy melyik objektumhoz melyik hely tartozik.

Amit jelenleg mind helymeghatározáshoz, mind geodéziai számításokhoz használunk, az koordináta-geometria/aritmetika. Amit javasolunk, az vektor-geometria/aritmetika és raszter-geometria/aritmetika egymással ill. egymáshoz integrálva. Ma még el sem képzelhető se a helymeghatározás, se a geodéziai számítás koordináták nélküli kényszerkapcsolat nélkül. Pedig a vektorszámokkal történő helymeghatározás és a vektor-aritmetikával végzett geodéziai számítás ugyanilyen szoros kapcsolatot tarthat szakmánk említett kettős feladata között. A csaknem minden tekintetben korszakalkotónak tekinthető GPS-rendszer remélhetőleg outputjában is rövidesen csatlakozni fog korszerűsítési elképzeléseinkhez.

Korábbi tanulmányainkban (Halmos et al. 1976, 1977, Kádár 1992, Kádár és Karsay 2007a, 2007b) bemutattunk már néhány olyan *térbeli számrendszert*, amelyek mind helymeghatározáshoz, mind vektor-aritmetikai számításokhoz egyaránt használhatók. Azóta már sikerült kidolgozni olyanokat is, amelyekben mind az alapszám, mind az alaki értékek *decimálisak,* ezért sokkal közelebb állnak a megszokottakhoz.

2 Mit mondhat a Shannon-görbe számunkra?

Claude Shannonnak (1948) az 1. ábránkon eredetiben bemutatott grafikonja két lehetőséget tartalmazó eseményterekre érvényes. Azért hivatkozunk rá, mert mind a geodéziai, mind a kartográfiai

[*]*NYME Geoinformatika Kar,*
8000 Székesfehérvár, Pirosalma u. 1-3.
E-mail: i.kadar@geo.info.hu

[**]*ELTE Térképtudományi és Geoinformatikai Tanszék*
Budapest XI. kerület, Pázmány P. sétány 1a.
E-mail: karsay.ferenc@fibermail.hu

helymeghatározás részére fontos ismeretet tud nyújtani. Nevezetesen azt – amit eddig még egyik szakterületünknek sem sikerült hasznosítania – hogy a legegyszerűbb adattípusunk, a *koordináta-jegyzék,* illetve a *pontvázlat H* átlagos információtartalma a *pontsűrűségtől is* függ. Sőt, ha a pontok számától, mint természetes független változótól eltekintünk, vagyis csak az *egy pontra eső információ* mennyiségét (- a *fajlagos* információt -) tekintjük, akkor ez *egyedül a pontsűrűségtől függ*.

Ahhoz, hogy ezt az ábrától függetlenül is beláthassuk, legelőször az ábra felett látható képletet szükséges értelmezni. A *H* – az entrópiának (az információhiánynak, ill. bizonytalanságnak) a betűjele, a *p* – a valódi (fekete) pontoknak, a *q = 1 - p* pedig a virtuális (fehér) pontoknak a valószínűsége (relatív gyakorisága). Utóbbiakat úgy lehet elképzelni, hogy a pontvázlat fehér háttere ugyanolyan méretű pixelekre van már felbontva, mint amilyen méretűek a valódi fekete pontok pixelei. Mivel a fekete pontok nem mások, mint geodéziai, ill. kartográfiai pontok, ezért a *p* változó egyben a megszokott *pontsűrűséget* is jelenti. A *H* függvény jobboldala tulajdonképpen egy súlyozott közép (várható érték) *p* és *q* súlyokkal. Mivel azonban *p+q=1,* a súlyozott közép nevezőjét nem szükséges kiírni. Amiket súlyozunk, azok a fekete, illetve a fehér pontok *egyedi* entrópiái. Amit a súlyozásból kapunk az a fekete-fehér ponthalmaz *átlagos* entrópiája. Végül az egyedi entrópiák *p*-nek, illetve *q*-nak kettesalapú logaritmusai, pozitív előjelekkel véve. Ebben az esetben *H* értékét bitekben kapjuk meg (lásd ábrát). Tízes alapú logaritmus használata esetén a fajlagos átlagos entrópia (vagyis az információhiány) a minimálisan szükséges decimális számjegyek számát mutatja.

Visszatérve a Shannon-ábra mondanivalójához – *H*-nak egyedül a pontsűrűségtől való függőségére – ez számunkra azért meglepő ismeret, mert a geodéziában a szokásos pontjegyzéknél a koordináták hossza, vagyis bármelyik sorában található számjegyek száma nem a pontsűrűségtől, hanem a területtől függ. Nevezetesen az ország (vagy más értelmezési tartomány) területének 10-es alapú logaritmusával egyenlő (egészre felkerekítése után). De a pontsűrűségnek ebbe a dologba látszólag nincs semmi beleszólása. Ezért már-már kételkedni kezdtünk a Shannon-görbe helyességében. Létezik azonban erre egy független ellenőrzési lehetőség is.

Ehhez tekintsük a 2a és a 2b ábrákat. Utóbbi szemlátomást a Shannon-görbével azonos, de mégis van közöttük két különbség.

$$H = -(p \log p + q \log q)$$

is plotted in Fig. 7 as a function of p.

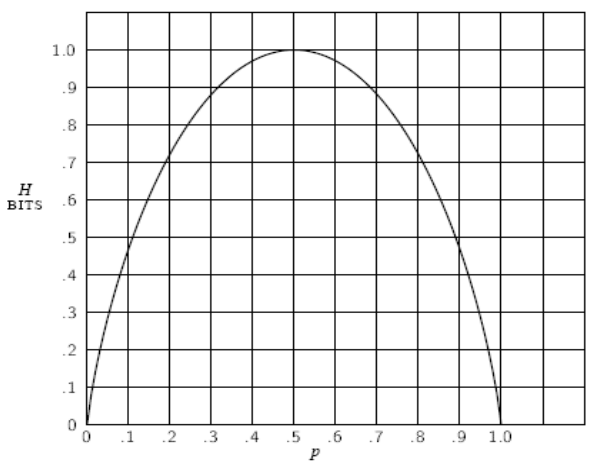
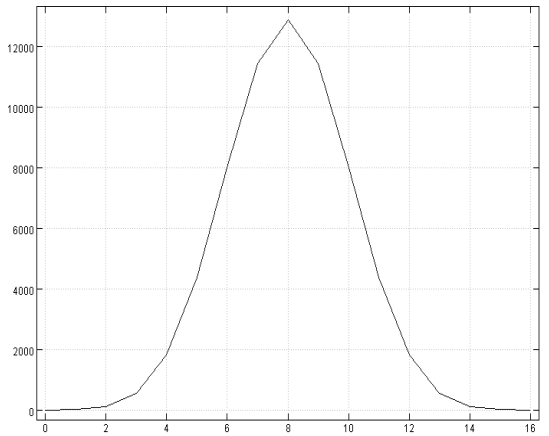


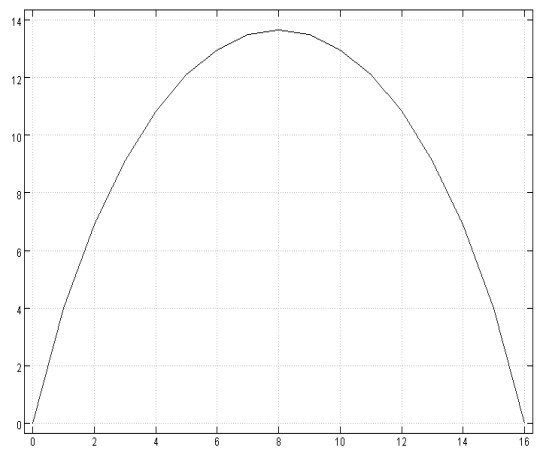
Fig. 7—Entropy in the case of two possibilities with probabilities p and $(1 - p)$.

1. ábra. A Shannon-görbe eredeti feliratával



PLOT $\binom{16}{0}\ \binom{16}{1}\ \binom{16}{2}\ \binom{16}{3}\ \binom{16}{4}\ \binom{16}{5}\ \binom{16}{6}\ \binom{16}{7}\ \binom{16}{8}\ \binom{16}{9}\ \binom{16}{10}\ \binom{16}{11}\ \binom{16}{12}\ \binom{16}{13}\ \binom{16}{14}\ \binom{16}{15}\ \binom{16}{16}$

2a. ábra. A Pascal-háromszög 16. sorában lévő binomiális együtthatók értékei a valódi (fekete) pontok számának függvényében



PLOT log 2 $\binom{16}{0}\ \binom{16}{1}\ \binom{16}{2}\ \binom{16}{3}\ \binom{16}{4}\ \binom{16}{5}\ \binom{16}{6}\ \binom{16}{7}\ \binom{16}{8}\ \binom{16}{9}\ \binom{16}{10}\ \binom{16}{11}\ \binom{16}{12}\ \binom{16}{13}\ \binom{16}{14}\ \binom{16}{15}\ \binom{16}{16}$

2b. ábra. A 2a. ábrán látható görbe alakjának változása, amikor az ordinátákat 2-es alapú logaritmusaikkal helyettesítjük

A 2b ábra nem az egy pontra eső, hanem a teljes ponthalmaz entrópiáját kellene, hogy mutassa, vagyis az 1. ábrán lévő értékek 16-szorosát. A maximális értéknek ezért 16 bitnek kellene lennie. Ez az első különbség. A grafikon számozása azonban csak 13.6-et mutat, mely pontosan egyezik a hozzátartozó binomiális együttható értékének logaritmusával. Ez a második különbség, de mégsem hiba! Ugyanis a binomiális együtthatókkal két független változót lehet megadni, tehát több információt, mint a Shannon görbéhez, ahol csak egyet. A p és q ugyanis nem függetlenek egymástól. Ezért mivel a fekete pontok számát nem tartalmazza (csak a viszonyukat), H képlete valójában *mind a 16 binomiális együttható összegének*, azaz 2^{16}-nak, veszi logaritmusát, ami pontosan 16. Vagyis valóban nagyobb entrópiát ad meg, mint ami a 2b ábrán látható (a 8-cal rögzített) egyetlen binomiális együttható értéke.

El kell gondolkoznunk azon, hogy egy ponthalmaz esetében a pontok sűrítése során a minimálisan szükséges memória-igény (vagyis az entrópia) *a pontok számával egyenes arányban tart-e a végtelen felé* (mint ahogy azt a koordináta-jegyzék szerkezete esetén természetes), *vagy pedig homlokegyenest ellenkezőleg - a zérus felé* (amint azt Shannon görbéje mutatja).

Két félreértési lehetőséget azonban még feltétlenül tisztázni kívánunk.

Az egyik az, hogy mi itt csak az ún. *helyzeti információt* vizsgáljuk, vagyis feltételezzük, hogy egymástól megkülönböztethetetlen (azonosítóval, pl. pontszámmal nem rendelkező) pontokkal van dolgunk. Mivel a pontok sűrítése során a (a minimális lefedőfához tartozó) koordináta-különbségek egyre rövidebbek lesznek. Elvileg eljuthatunk odáig, hogy csupa helymeghatározó adatokra (azaz még koordináta-különbségekre) se legyen szükség. Viszont *ezek végpontjainak azonosítói* (pl. a pontszámok) elvileg – ha nem is egyenes arányban, csak logaritmikusan – *végtelen hosszúakká* válhatnak.

A másik megjegyzésünk az, hogy *alappont-hálózatok* esetében – ha a fekete és a fehér raszterpontok viszonyára gondolunk - a *pontsűrűség* olyan kicsiny, hogy inkább *pontritkaságról* lehetne beszélni, ennél fogva a memória-igény meghatározásánál teljesen figyelmen kívül hagyható.

2.1 A Shannon-képlet alkalmazása egyetlen pont bizonytalanságának kereséséhez

Tételezzük fel, hogy ismerjük annak a tetszőleges alakú alakzatnak n területét, azaz pontosabban, a lehetséges ponthelyek számát, amelyekben a pont tényleges helyét keressük. Legyen a terület most n=16. Ekkor a $H = -(p*\log p)+(q*\log q)$ képlet p=1/16 és q=15/16 értékekkel a 0.33729 eredményt szolgáltatja. Kérdés, hogy mit keres az 1. táblázatban a többi 15 érték? A megválaszoláshoz a bevezetésben már említett *„hol, mi van”* kartográfiai típusú lekérdezésekre van szükség. Mivel statisztikai értelemben a keresett pont egyenlő valószínűséggel bárhol lehet, ezért a kérdést legfeljebb 15-ször szükséges feltenni. Mindegy, hogy milyen sorrendben keresünk, de ha a pontot megtaláltuk, természetesen tovább már nem kell keresnünk. Az első kérdést mindenkor fel kell tenni, tehát ennek valószínűsége 16/16. A második kérdésé már csak 15/16 és így tovább, az utolsóé zérus. Vigyáznunk kell arra, hogy mivel a lehetséges ponthelyek száma a keresgélés során egyre szűkül, p és q értékét – H újraszámításához – megfelelően változtatni kell. A táblázatba az egymás után kapott H értékeket a hozzájuk tartozó valószínűséggel megszorozva írtuk be. Ezeket az ún. *feltételes bizonytalanságokat* összaadva, végül kereken 4 bitet kapunk eredményül. Ellenőrzésül többféle lehetőség adódik.

1. Binomiális együtthatóból: (16 az 1 fölött) = 16, melynek logaritmusa szintén 4,
2. Koordinátákkal rögzítve a pontot, kétjegyű, azaz 2-bites X és Y-ra van szükség, összegük 4,
3. Lehetőségek számát tekintve, majd ennek a kettes logaritmusát véve megint 4.

Célunk ezzel az egyetlen példával csak a kartográfiai és a geodéziai gondolkodás egyenértékűségét érzékeltetni az információtartalom vonatkozásában, eltekintve most a számítás hatékonyságától.

Megjegyezzük, hogy ha a pontkeresés előtt még nem tudjuk, mennyi pontot fogunk találni, akkor természetesen nem szükséges feltételes bizonytalanságokat számolni, hanem csak egyszerűen az első feltétel nélküli bizonytalanság n-szeresét venni. Ez jelen esetben 16*0.33729 = 5.397 bit.

3 A decimális vektorszámjegyek értelmezése

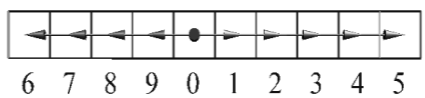
Már – vagy még – testünk morfológiai adottságaihoz képest is nagyon le vagyunk maradva: a 10 újunk is inkább tekinthető ma már síkbeli vagy térbeli számjegyvektorokat illusztráló, legjobban kezünk ügyébe eső eszköznek, mint a számegyenesen fekvő skaláris számjegyek modellezésére. Már csak ezért is ideje lenne alkalmazott matematikai fogalom-világunkat ilyen irányba is fejleszteni. De komolyabbra fordítva a szót, van ennek más indítéka is. Noha az egyaránt 10-es alappal és

1. táblázat. A H átlagos helyzeti bizonytalanság mértékeinek számítása
1 pontot tartalmazó 16 területű értelmezési tartomány esetében

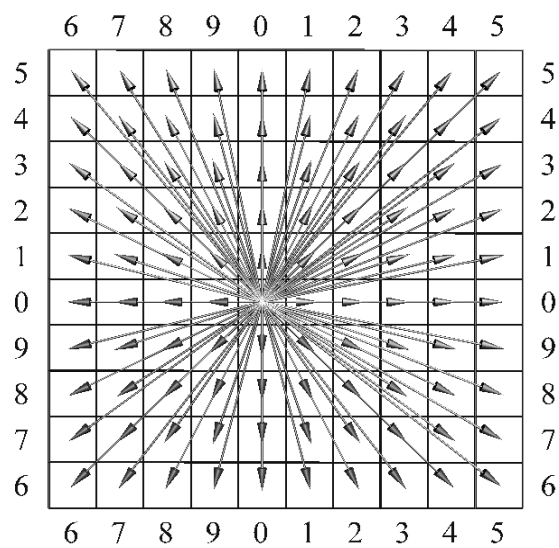
0.33729	0.331274	0.324828	0.317885
0.310363	0.302154	0.293122	0.283083
0.271782	0.258857	0.243758	0.225603
0.20282	0.17218	0.125	0

10-féle számjeggyel dolgozó decimális számrendszer használható magasabb dimenziókba is minden változtatás nélkül (a számítógép is ezt teszi, amikor területet vagy térfogatot értelmez), de azt is megtehetjük, hogy mind az alapszámot, mind az alaki értékek számát 10-ről 100-ra vagy 1000-re változtatjuk. Olyan ez, mint amikor egy bináris jelsorozatot kettes vagy hármas csoportokra bontva 4-es vagy 8-as számrendszerben olvasunk ki vagy értelmezünk. Megdöbbentő felismerés, hogy őseink ezt már akkor megcselekedték, amikor a terület- és térfogat-számítás mai szerkezetét megálmodták. De mivel akkor még csak a japánok és a kínaiak rendelkeztek olyan elszántsággal, hogy ki merjék mondani: *„mit nekünk akár tízezer különböző karakter (ne várjuk meg a számítógépes karakter-generálás feltalálását! ☺) megcsináljuk kézzel”* – és az elhatározást tett követte. Európában azonban másként gondolkoztak és cselekedtek. Valakinek az az ötlete támadt, hogy „*a terület- és térfogat-számításhoz szükséges 100, ill. 1000-féle alaki érték helyett használjuk azoknak 000 és 999 közé eső sorszámait*”. Ezzel ki lehet küszöbölni a nemnégyzet-, ill. nemkocka-alakú mértékegységekre (például a köbméter és a köbkilométer között lévőkre) utaló helyiértékeket a számpolinómból. „*Azért, hogy egy-egy adott helyiértéken belül a többjegyű sorszámmal megadott alakiértékek miatt ne legyen anarchia, használjuk ideiglenesen a váltószám fogalmát*”. És így él ez az *„ideiglenes”* megoldás már folyamatosan többszáz éve.

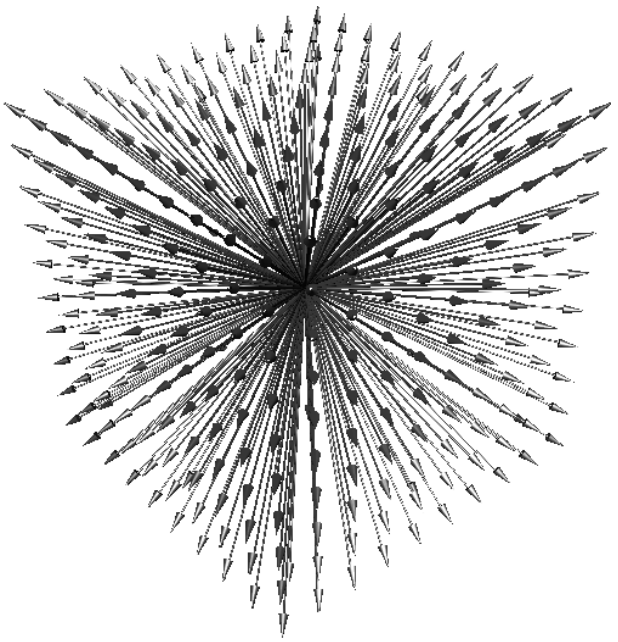
A fenti ábrasorozattal megpróbáltuk rekonstruálni, hogy mi is történt annak-idején, amikor a szükségesnek, de túlságosan soknak látszó síkbeli vagy térbeli alaki értékek helyett 2- illetve 3-jegyű sorszámokat vezettek be. Ezeket a 100 és 1000 váltószám megalkotásával próbálták a számrendszer-váltás tényének eltakarására felhasználni. Az ábrákon a nyilak a vektor-, a négyzetek és a kockák pedig a skalár-értelmezést kívánják tükrözni. Vagyis itt mellesleg a skalár/vektor integrálást, valamint a geodézia és a kartográfia szintézisét elősegítő közös rendszer-modellt is láthatjuk. A sorszámozás kialakításánál mi már nem követtük el azt a hibát, amit annak idején a negatív előjel bevezetésével elkövettek. Az előttünk álló feladat: a többjegyű sorszámokhoz egy-egy megfelelő karaktert (vektorszámjegyet) rendelni, hogy azokkal helyettesíthetők legyenek.



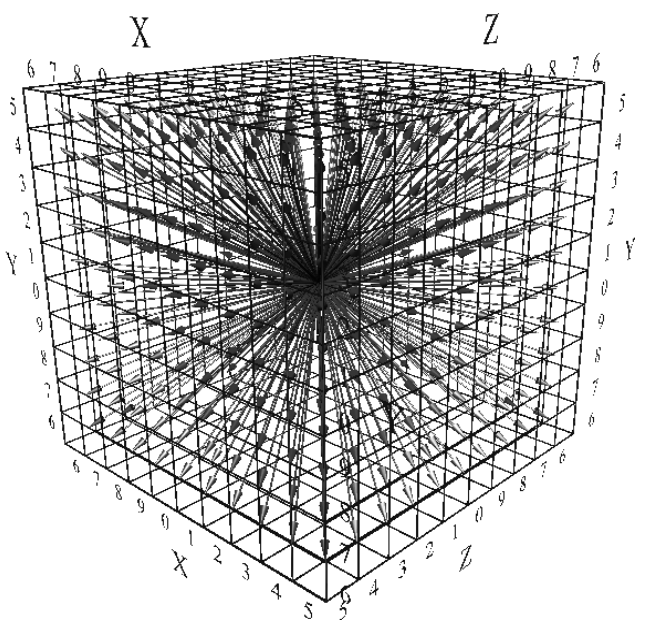
3. ábra. 10 db egyenesbeli decimális vektorszámjegy



4. ábra. 100 db síkbeli decimális vektorszámjegy
(számjegy-azonosítók kétjegyű számok: 00 - 99)



5. ábra. 1000 db térbeli decimális vektorszámjegy



6. ábra. A térbeli decimális skalár- és vektorszámjegyek integrálása
(számjegy-azonosítók háromjegyű számok: 000 – 999, sorrend XYZ)

Ehhez ma már az eléggé elterjedt *MS Windows XP* rendszer is hathatós segítséget képes nyújtani: az *Eudcedit* (End User Defined Character Editor) rendszerfüggvény indításával (Start/Futtatás) jelentkező nagyfelbontóképességű (64x64 pixel) karaktergenerátor Súgója részletesen tartalmazza a tennivalókat. A *Charmap* nevű másik rendszerfüggvény Súgója pedig a már elkészített karakterek, illetve vektorszámjegyek alkalmazási módozatait ismerteti.

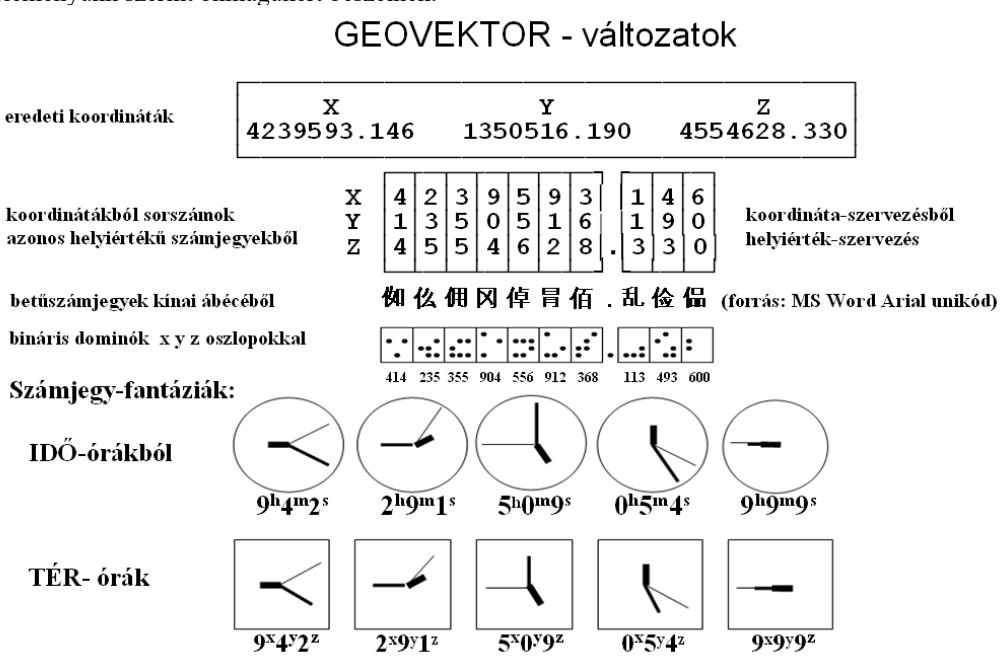
3.1 Kapcsolat a koordináták és a vektorszámok között

A 7. ábrán látható montázs egy példaként választott koordináta-hármas vektoros változatait kísérli meg bemutatni többféleképpen választott alaki értékek esetében.

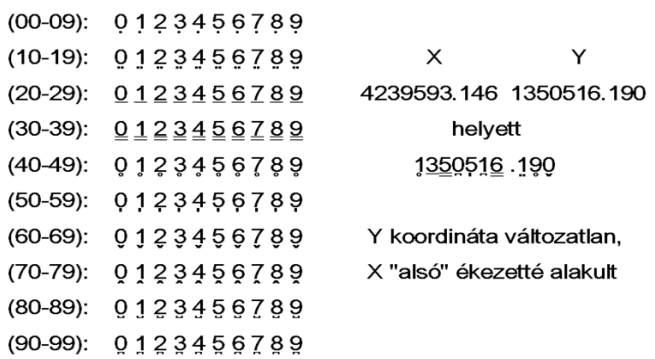
Az első esetben csupán a koordináták számjegyeit írtuk át más sorrendbe, hogy ezzel - mintegy előkészítésül - a még ismeretlen alakú számjegyvektoroknak legalább a sorszámait előre rögzíteni tudjuk. Ha szorosan egymás után, egyetlen sorba írnánk fel a sorszámokat, akkor észrevehetnénk, hogy pontosan ugyanolyan szerkezetet kapunk, mintha nem is térbeli helymeghatározásról, hanem egy számszerűen megadott térfogatról lenne szó (*10-es alapszám és 1000 különböző lehetőség közül választott alakiérték, vagyis 1000-es váltószám*). Nem hasonlít ez véletlenül az *időpont* és az *időtartam* közötti formális viszonyhoz? Dehogynem, csak most 3D *térpontról* és ugyanilyen dimenziójú *tértartamról* van szó. Igaz lesz ez a hasonlóság két dimenzióban is? A feleletet az olvasóra hagyjuk.

A második esetben a legtermészetesebb módon úgy gondoltuk, hogy bármennyire szokatlanul és furcsán tessék is ez az első választásunk, a ma még csupán ezt az egyetlen rendelkezésre álló lehetőséget vagyunk kénytelenek kipróbálni: 1000 különböző kínai karaktert, mint vektorszámjegyet, noha jól tudjuk, hogy ezeket még az anyaországban sem számításra, csak írásra használják. Azt is tudjuk, hogy számítógépünk e két dolog közül egyikre se fogja használni. Úgy fogja tekinteni, mint egy 1000 szóból álló szótárt, melyből a 3-jegyű sorszámok segítségével *harmadannyi* karakterből álló jelsorozatra fogja lefordítani *mind a térbeli, mind a síkbeli helyet*, de ha akarjuk, a *térfogatot* vagy a *területet* is. Vagyis az adatábrázolás – a megjelenítés - korszerűsítése az elsődleges cél, amivel részletesen már a (Kádár et al 2006)-ban is foglalkoztunk. Az ideális alak számunkra bizonyára nem kínai betűkből fog állni, ez még csak az „első fecske". Azonban az MS Word-ben már látszik a „bokor" is, a „fa" még várat magára. De azt tanultuk a költőtől, hogy „ami még nincs - azé a jövő". A 8. ábra karaktereire felkívánkozó felső indexekkel képzeletben rögtön az ideális 1000-féle decimális számjegy-családhoz is eljuthatunk, esetleg az is lehet, hogy valamilyen ma még megvalósíthatatlan álom – például a karakterek változó színe vagy változó stílusa – indexek nélkül is elérhetővé teszi a megkülönböztetést.

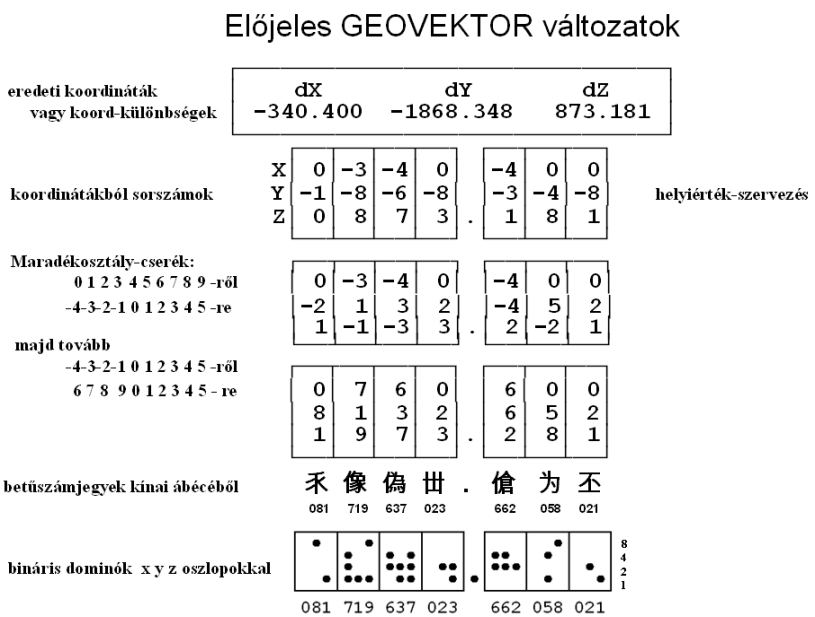
Vágyálmok helyett, melyet „kezünkbe hasztalan szorítunk", még két reálisnak látszó lehetőséget is kipróbáltunk. Ezekre példákat a 8. ábrán kívül az alábbi 9. és 10. ábrákon is láthatunk, melyek véleményünk szerint önmagukért beszélnek.



7. ábra. Előjelnélüli koordináta-hármasok vektorváltozatai



8. ábra. 100 db decimális számjegy 2D helymeghatározáshoz
(Forrás: MS Word, Arial Unicode fontok)

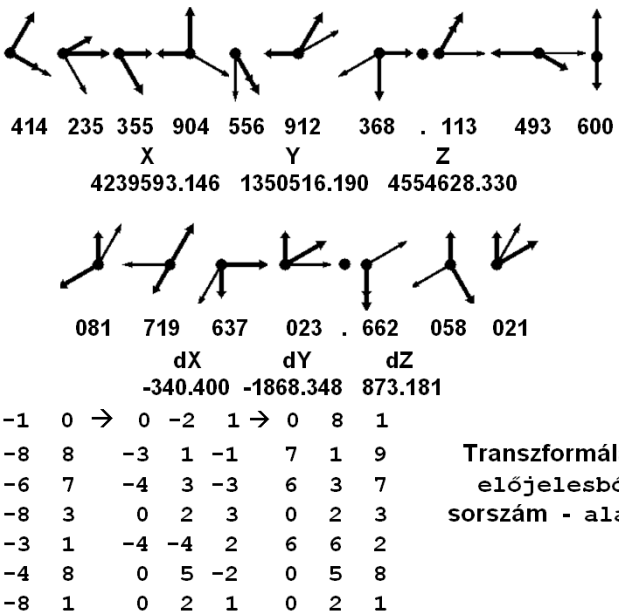


9. ábra. Előjeles koordináta-hármasok vektorváltozatai

4 Összefoglalás

Claude Shannon 1948-as tanulmányának 7. ábráját tekintve (1. ábra), szakterületünkre - közelebbről a helymeghatározásra vonatkoztatva - olyan megállapításokat tehetünk, melyek a geodéziának és a kartográfiának az eddigieknél még szorosabb kapcsolatához vezetnek el. Ez az ábra arra hívta fel figyelmünket, hogy a megszokott geodéziai helymeghatározás mellett egy másik – kartográfiainak nevezhető – rendszer is létezik. Ezért a nagyon leegyszerűsített raszter-vektor szemlélet helyett, mely lényegében a különbségeket emeli ki e két szakterület között, egy olyan szintézist is szükséges létrehozni, mely e kétféle helymeghatározást egy közös térbeli számrendszer segítségével egyesíti.

Az informatika – különösen a térinformatika – számára egyébként is nélkülözhetetlennek látszanak már az olyan koordináta nélküli 2D és 3D számrendszerek is, melyek alaki értékekként vektorszámjegyeket használnak. Ugyanis a skaláris időtartam és a vektoros időpont általánosítását jelentő tértartam és térpont megkülönböztetését szintaxisuk azonossága ellenére értelmező programjuk el tudja dönteni. Azaz egyedül értelmezés kérdése, hogy egy integrált helymeghatározó rendszerben az egyébként megkülönböztethetetlen számadatok kartográfiai vagy geodéziai helyet adnak-e meg (6. ábra).



10. ábra. Geovektorok óraszámlapokból kialakított térbeli vektorszámjegyekkel (saját elképzelés)

Ábrasorozaton mutattuk be, hogy milyen egyszerűen valósítható meg egy adott előjeles vagy előjel nélküli koordináta-hármasról egyetlen ún. *geovektorra* áttérni. Az első esetben csupán a koordináták számjegyeit írtuk át más sorrendbe, hogy a keresett vektorszámjegyeknek legalább a sorszámait előre rögzíteni tudjuk. Ez után egy 1000 vektorszámjegyből álló karakterkészletet szükséges megválasztani, hogy ebből az előbb kapott sorszámokkal az adott koordináta-hármasokat helyettesítő geovektort kiindexelhessük. Karakterkészletként először kínai karaktereket használtunk, mivel ezer különböző betű más forrásból nem állt renelkezésünkre. Amikor tudomásunkra jutott, hogy a Windows XP segítségével saját karakterkészletet is lehet generálni, arra késztetett bennünket, hogy ennek legalább a tervezésével érdemes foglalkozni. Így jutottunk el a bináris dominókhoz, majd a térórák lehetőségéhez, végül a mind alul-, mind felül-indexelt decimális számjegyek gondolatához.

A téma iránt érdeklődők figyelmébe ajánljuk a következő tanulmányokat, melyekből mi is sokat tanultunk: Bell és Mason (1990), Hestenes (1992), Hmelnik (1969), Holmes (1978), Rangsunvigit, Punthong és Surarerks (On-line fundamental arithmetic algorithms for three-dimensional vector system. Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand, www.cp.eng.chula.ac.th/~elite/index.php?p=pubDetail&id=43), Shannon (1948), Surarerks A, Rangsunvigit S (2006): Three-dimensional vector representation system. Chulalongkorn University Bangkok, 10330, Thailand.

Reméljük azt is, hogy tanulmányunkkal egy lépéssel tovább jutottunk azon a megkezdett úton, amelyen Szarka (1961), Homoródi (1961), Halmos (1976, 1977), Detrekői (1991), Kádár et al. (1996), Kádár I és Busics Gy (1998) és Somogyi (2004) elindultak a vektoralgebra és aritmetika alkalmazásának hazai elterjesztése irányába.

Hivatkozások

Bell SBM, Mason DC (1990): Tesseral quaternions for the octtree, The Computer Journal, 33; 5, 386-397.

Detrekői Á (1991): Kiegyenlítő számítások. Bp. Tankönyvkiadó.

Halmos F, Kádár I, Karsay F (1976): Satellita geodéziai és egyéb geodéziai feladatok megoldása közvetlen vektor-mátrix aritmetikával feladat-orientált számrendszerekben. Kozmikus geodéziai szemináriumok. Budapest. MTESZ Központi Asztronautikai Szakosztálya I. kötet. 81-134.

Halmos F, Kádár I, Karsay F (1977): The Solution of Satellite Geodetical and Other Geodetical Problems with Direct Vector and Matrix Arithmetics in Problem-Oriented Number-Systems. Mitteilungen aus dem Institut für Theoretische Geodaesie der Universitaet Bonn 48. 1-82.

Hestenes, D (1992): MV/C coordinate virus. 2. in: Mathematical viruses. 1-13.

Hmelnik SzI (1969): Kodirovanie vektorov, Kibernetika, Kiev, 5, 54-57.

Holmes N (1978) Representation for complex numbers. IBM Journal of Research and Development. 4, 429-430.

Homoródi L (1961): Szarka Zoltán: A mátrixszámítás kiegyenlítő számítási alkalmazásai. Szakirodalom, Geodézia és Kartográfia, 304-305.

Kádár I (1992): A helymeghatározás természetes mértékei. Geodézia és Kartográfia 6, 417-424.

Kádár I, Busics Gy, Papp E (1996): GPS data integration by simulated vector arithmetics in J. J User Conference, Toronto, Ontario, June 24-25. 1-18.

Kádár I, Busics Gy (1998): Új utak keresése a helymeghatározásban. *Geomatikai Közlemények* I, 89-108.

Kádár I, Karsay F (2007a): Adatábrázolási kísérleteink a térbeli hasonlósági transzformáció példáján. Geomatikai Közlemények X, 7-24.

Kádár I, Karsay F (2007b): Életképesnek és megvalósíthatónak látszó geoinformatikai fantáziák. in: Földméréstől a geoinformatikáig – 45 éves a GEO. Székesfehérvár, 178-194.

Shannon CE (1948): A mathematical theory of communication. Bell System Tech. J. 27, 379-423,623-656.

Somogyi J (2004): Geometriai algebra: A XXI. század matematikusainak, fizikusainak és mérnökeinek új egységes matematikai nyelve. Geomatikai Közlemények VIII, 13-20.

Szarka Z (1961): A mátrixszámítás kiegyenlítő számítási alkalmazásai. Felsőoktatási Jegyzetellátó V. Budapest.

AZ ELŐMETSZÉSI PROBLÉMA ÉS A 2D HASONLÓSÁGI TRANSZFORMÁCIÓ

Battha László[*], *Závoti József*[*]

The intersection problem and the 2D similarity transformation *- In a basic problem of geodesy the directions from points with known coordinates to an unknown (new) point are measured, and then the resulting angles are used to compute the coordinates of the new point. The relations between angles and lengths lead to a system of nonlinear equations of the form* $f_i = 0$, *(*i *=1, 2, 3), where each* f_i *is a second degree polynomial of the unknown coordinates* x_1,x_2,x_3. *Two different direct (non-iterative) solutions are discussed: one is based on the Sylvester-resultant, the other on the Gröbner-basis. We show that in the general case both methods lead to the same equations in one variable and of fourth degree, but in a special case the equations obtained by the Sylvester-resultant are of second degree. Two sets of measurement data are used to demonstrate the effectiveness of the algorithms: one was obtained by precise calculations, the other was obtained by adding errors to the first. We show that the direct solution of the 2D similarity transformation leads to the a result as applying the Gröbner-basis.*

Keywords: 3D-resection, 2D similarity transformation, polynomial, resultant, Gröbner-basis

A geodézia alapfeladatai közé tartoznak azok a számítások, melyek során adott koordinátákkal rendelkező pontokból irányméréseket végezve egy ismeretlen (új) pontra a kapott szögekből meghatározzuk az új pont koordinátáit. A szögek és távolságok közötti összefüggésekből adódó nemlineáris egyenletek f_i=0 *(*i=1,2,3) *alakúak, ahol mindegyik* f_i *a meghatározandó* x_1,x_2,x_3 *koordináták másodfokú polinomja. Két direkt (iteráció-mentes) megoldást mutatunk be: az egyik a rezultáns Sylvester-féle alakját alkalmazza, a másik a Gröbner-bázist. Megmutatjuk, hogy az általános esetben mindkét módszer ugyanazokhoz a negyedfokú egyismeretlenes egyenletekhez vezet, de egy speciális esetben a rezultáns alkalmazásával kapott egyenletek negyedfokú helyett másodfokúak. Mérési adatokként egy pontos számításokkal nyert adatrendszert, valamint ennek hibákkal torzított változatát használva bemutatjuk az algoritmusok hatékonyságát. Megmutatjuk, hogy 2D hasonlósági transzformáció közvetlen megoldása ugyanarra az eredményre vezet, mint a Gröbner-bázis alkalmazása.*

Kulcsszavak: térbeli előmetszés, 2D hasonlósági transzformáció, polinom, rezultáns, Gröbner-bázis

1 Bevezetés

A geodézia legfontosabb problémáit (pl. hasonlósági transzformáció, relatív és abszolút tájékozás, stb.) a mai napig többnyire lineáris modellek segítségével oldjuk meg, amihez lényegében elegendő a mátrixműveletek ismerete. A megoldandó feladatok azonban alapvetően nemlineáris egyenletekre vezethetők vissza, és ezek linearizált felírása és megoldása eleve elhanyagolást, beépített hibát tartalmaz.

Napjaink népszerű matematikai programcsomagjai (Mathematica, MatLab, Maple) viszont lehetővé teszik, hogy a nemlineáris feladatokat eredeti alakjukban oldjuk meg a beépített nagybonyolultságú függvények segítségével, így ma már az is megállapítható, milyen pontosságvesztést okoznak a linearizált modellek és megoldások. Tanulmányunkban a geodéziai előmetszések problémájával és a 2D hasonlósági transzformáció megoldásával foglalkozunk.

A 2D előmetszési feladat esetében a $P_0P_1P_2$ háromszögben (1. ábra) a sinus-tétel alapján írhatjuk:

$$\frac{b}{S_{12}} = \frac{\sin\psi_{21}}{\sin\left[180^\circ - (\psi_{12}+\psi_{21})\right]} \quad \Rightarrow \quad b = S_{12}\frac{\sin\psi_{21}}{\sin(\psi_{12}+\psi_{21})} \tag{1.1}$$

[*]*MTA GGKI, 9400 Sopron, Csatkai u. 6-8.*
E-mail: zavoti@ggki.hu, battha@ggki.hu

Adottak a ψ_{12}, ψ_{21} szögek és az S_{12} távolság, keresendő a P_0 pont (x_0, y_0) koordinátái. A koordinátarendszer kezdőpontját a P_1 pontban, az x tengelyt P_1P_2 egyenesen felvéve, egyszerűen adódik a megoldás:

$$\frac{x_0}{b} = \cos\psi_{12} \qquad \Rightarrow \qquad x_0 = S_{12}\frac{\cos\psi_{12}\sin\psi_{21}}{\sin(\psi_{12}+\psi_{21})} \tag{1.2}$$

$$\frac{y_0}{b} = \sin\psi_{12} \qquad \Rightarrow \qquad y_0 = S_{12}\frac{\sin\psi_{12}\sin\psi_{21}}{\sin(\psi_{12}+\psi_{21})} \tag{1.3}$$

A 3D feladat (2. ábra) esetében nem adható meg közvetlenül explicit alakban a megoldás, ehhez Awange et al. (2003), valamint Jancsó (2004) tanulmányát felhasználva két lépésben juthatunk el.

2 Az egyenletrendszer felállítása

Paláncz et al. (2008) tanulmány tárgyalja az előmetszés megoldását a Dixon rezultánssal. Ebben a dolgozatban javaslatot teszünk az előmetszés Sylvester rezultánssal történő megoldására.
$P_1\ P_2\ P_3$: ismert geodéziai pontok, P_0 meghatározandó pont. A $P_0P_iP_j$ háromszögekre alkalmazva a cosinus-tételt:

$$\begin{aligned} x_1^2 - 2S_{12}\cos(\psi_{12})x_1 - x_2^2 + S_{12}^2 &= 0 \\ x_2^2 - 2S_{23}\cos(\psi_{23})x_2 - x_3^2 + S_{23}^2 &= 0 \\ x_3^2 - 2S_{31}\cos(\psi_{31})x_3 - x_1^2 + S_{31}^2 &= 0 \end{aligned} \quad . \tag{2.1}$$

Bevezetjük az

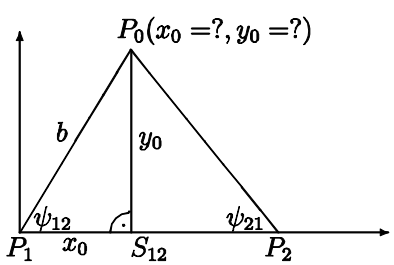
$$\begin{aligned} b_1 &:= -2S_{12}\cos(\psi_{12}) & a_0 &:= S_{12}^2 \\ b_2 &:= -2S_{23}\cos(\psi_{23}) & b_0 &:= S_{23}^2 \\ b_3 &:= -2S_{31}\cos(\psi_{31}) & c_0 &:= S_{31}^2 \end{aligned} \tag{2.2}$$

jelöléseket. Így a megoldandó egyenletrendszer:

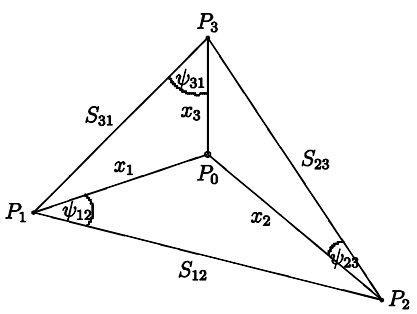
$$f_1 := x_1^2 + b_1x_1 - x_2^2 + a_0 = 0 \tag{2.3}$$

$$f_2 := x_2^2 + b_2x_2 - x_3^2 + b_0 = 0 \tag{2.4}$$

$$f_3 := x_3^2 + b_3x_3 - x_1^2 + c_0 = 0 \tag{2.5}$$



1. ábra. Síkbeli előmetszés



2. ábra. Térbeli előmetszés

3 A megoldás első lépése

A $b_3 \neq 0$ esetben a három egyenletet összeadjuk:

$$b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + a_0 + b_0 + c_0 = 0, \tag{3.1}$$

majd ebből az x_3 változót kifejezzük és (2.4) képletbe helyettesítjük. Az így kapott (2.4) és (2.3) összefüggésben már csak az x_1 és x_2 határozatlanok szerepelnek. Ha a baloldalakat az x_2 határozatlan polinomjainak tekintjük (melynek együtthatói x_1 változó polinomjai), felírhatjuk a két polinom rezultánsának Sylvester-féle alakját (ezt még szorozva b_3^4 együtthatóval)

$$g_1 := d_4x_1^4 + d_3x_1^3 + d_2x_1^2 + d_1x_1 + d_0 = 0 \tag{3.2}$$

(A Sylvester-féle alak definíciója megtalálható pl. (Fuchs 1967) egyetemi jegyzetben.) Az együtthatók:

$$d_4 = b_1^4 - 2b_1^2b_2^2 + b_2^4 - 2b_1^2b_3^2 - 2b_2^2b_3^2 + b_3^4 \quad , \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned} d_3 = {} & 4a_0b_1^3 + 4b_0b_1^3 - 4a_0b_1b_2^2 - 4b_0b_1b_2^2 - 2b_1^3b_2^2 + 2b_1b_2^4 - 4a_0b_1b_3^2 - 4b_0b_1b_3^2 \\ & - 2b_1^3b_3^2 + 2b_1b_3^4 + 4b_1^3c_0 - 4b_1b_2^2c_0 - 4b_1b_3^2c_0 \quad , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_2 = {} & 6a_0^2b_1^2 + 12a_0b_0b_1^2 + 6b_0^2b_1^2 - 2a_0^2b_2^2 - 4a_0b_0b_2^2 - 2b_0^2b_2^2 - 6a_0b_1^2b_2^2 - 4b_0b_1^2b_2^2 \\ & + 2a_0b_2^4 + b_1^2b_2^4 - 2a_0^2b_3^2 - 4a_0b_0b_3^2 - 2b_0^2b_3^2 - 6a_0b_1^2b_3^2 - 6b_0b_1^2b_3^2 + 2b_0b_2^2b_3^2 \\ & + 2b_1^2b_2^2b_3^2 + 2a_0b_3^4 + 2b_0b_3^4 + b_1^2b_3^4 - b_2^2b_3^4 + 12a_0b_1^2c_0 + 12b_0b_1^2c_0 - 4a_0b_2^2c_0 - 4b_0b_2^2c_0 \\ & + 4b_1^2b_2^2c_0 - 4a_0b_3^2c_0 - 4b_0b_3^2c_0 - 4b_1^2b_3^2c_0 + 4b_2^2b_3^2c_0 + 6b_1^2c_0^2 - 2b_2^2c_0^2 - 2b_3^2c_0^2 \quad , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_1 = {} & 4a_0^3b_1 + 12a_0^2b_0b_1 + 12a_0b_0^2b_1 + 4b_0^3b_1 - 6a_0^2b_1b_2^2 - 8a_0b_0b_1b_2^2 - 2b_0^2b_1b_2^2 + 2a_0b_1b_2^4 \\ & - 6a_0^2b_1b_3^2 - 12a_0b_0b_1b_3^2 - 6b_0^2b_1b_3^2 + 4a_0b_1b_2^2b_3^2 + 2b_0b_1b_2^2b_3^2 + 2a_0b_1b_3^4 + 2b_0b_1b_3^4 \\ & - b_1b_2^2b_3^4 + 12a_0^2b_1c_0 + 24a_0b_0b_1c_0 + 12b_0^2b_1c_0 - 8a_0b_1b_2^2c_0 - 4b_0b_1b_2^2c_0 - 8a_0b_1b_3^2c_0 \\ & - 8b_0b_1b_3^2c_0 + 4b_1b_2^2b_3^2c_0 + 12a_0b_1c_0^2 + 12b_0b_1c_0^2 - 2b_1b_2^2c_0^2 - 2b_1b_3^2c_0^2 + 4b_1c_0^3 \quad , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_0 = {} & a_0^4 + 4a_0^3b_0 + 6a_0^2b_0^2 + 4a_0b_0^3 + b_0^4 - 2a_0^3b_2^2 - 4a_0^2b_0b_2^2 - 2a_0b_0^2b_2^2 + a_0^2b_2^4 - 2a_0^3b_3^2 \\ & + 6a_0^2b_0b_3^2 - 6a_0b_0^2b_3^2 - 2b_0^3b_3^2 + 2a_0^2b_2^2b_3^2 + 2a_0b_0b_2^2b_3^2 + a_0^2b_3^4 + 2a_0b_0b_3^4 + b_0^2b_3^4 \\ & - a_0b_2^2b_3^4 + 4a_0^3c_0 + 12a_0^2b_0c_0 + 12a_0b_0^2c_0 + 4b_0^3c_0 - 4a_0^2b_2^2c_0 - 4a_0b_0b_2^2c_0 - 4a_0^2b_3^2c_0 \\ & + 8a_0b_0b_3^2c_0 - 4b_0^2b_3^2c_0 + 4a_0b_2^2b_3^2c_0 + 6a_0^2c_0^2 + 12a_0b_0c_0^2 + 6b_0^2c_0^2 - 2a_0b_2^2c_0^2 - 2a_0b_3^2c_0^2 \\ & - 2b_0b_3^2c_0^2 + 4a_0c_0^3 + 4b_0c_0^3 + c_0^4 \quad . \end{aligned}$$

Ugyanígy kapunk negyedfokú egyenleteket x_2 és x_3 ismeretlenre: az $1 \to 2 \to 3 \to 1$ és $a_0 \to b_0 \to c_0 \to a_0$ cseréket végrehajtva kapjuk bármelyik egyenletből a következőt.

Ugyanezeket a polinomokat megkaphatjuk úgy is, hogy $\{f_1 f_2 f_3\}$ Gröbner-bázisából kiválasztjuk az egyváltozós polinomokat, pl. Mathematica 5.1-ben az

$$g_i = \text{GroebnerBasis}\left[\{f_1, f_2, f_3\}, \{x_i\}\right] \tag{3.4}$$

utasítással adódik g_i (i =1, 2, 3). Gröbner bázisokat tárgyalja pl. (Becker és Weispfenning 1998).

A $b_3 = 0$ esetében leegyszerűsödik a feladat: (2.5) formulából $-x_3^2 = -x_1^2 + c_0$, és ezt (2.4) összefüggésbe helyettesítve kapjuk

$$\begin{aligned} f_1 &:= x_1^2 + b_1 x_1 - x_2^2 + a_0 = 0 \\ f_2 &:= -x_1^2 + x_2^2 + b_2 x_2 + b_0 + c_0 = 0 \end{aligned} \quad . \tag{3.5}$$

Az f_1 és f_2 kifejezést x_2 polinomjainak tekintve a rezultánsuk:

$$\begin{aligned} h_1 &= \begin{vmatrix} -1 & 0 & x_1^2 + b_1 x_1 + a_0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & x_1^2 + b_1 x_1 + a_0 \\ 1 & b_2 & -x_1^2 + b_0 + c_0 & 0 \\ 0 & 1 & b_2 & -x_1^2 + b_0 + c_0 \end{vmatrix} = \\ &= a_0^2 + (b_0 + c_0)^2 + \left[2(b_0 + c_0) - b_2^2\right] a_0 + \left[2(a_0 + b_0 + c_0) - b_2^2\right] b_1 x_1 + \left(b_1^2 - b_2^2\right) x_1^2 \end{aligned} \quad . \tag{3.6}$$

Tehát most előnyösebb g_1 helyett h_1 használata!

A $g_1 = 0$ negyedfokú (vagy $b_3 = 0$ esetben a $h_1 = 0$ másodfokú) egyenlet valós gyökei közül az előzetes információk (előjel, közelítő érték) alapján kiválasztható a valódi megoldás.

4 A megoldás második lépése

Az első lépésből adódó x_1, x_2, x_3, felhasználásával felírhatjuk az ismeretlen P_0 pont (X, Y, Z) koordinátáit szolgáltató egyenletrendszert:

$$x_1^2 = (X_1 - X)^2 + (Y_1 - Y)^2 + (Z_1 - Z)^2 \quad , \tag{4.1}$$

$$x_2^2 = (X_2 - X)^2 + (Y_2 - Y)^2 + (Z_2 - Z)^2 \quad , \tag{4.2}$$

$$x_3^2 = (X_3 - X)^2 + (Y_3 - Y)^2 + (Z_3 - Z)^2 \quad . \tag{4.3}$$

A (4.1)-(4.2) illetve a (4.2)-(4.3) különbségeket képezve az alábbi lineáris egyenletrendszert kapjuk:

$$X \cdot \boldsymbol{U} + Y \cdot \boldsymbol{V} + Z \cdot \boldsymbol{W} = \boldsymbol{K} \quad , \tag{4.4}$$

ahol

$$\boldsymbol{U} = 2\begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ X_3 - X_2 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{V} = 2\begin{bmatrix} Y_2 - Y_1 \\ Y_3 - Y_2 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{W} = 2\begin{bmatrix} Z_2 - Z_1 \\ Z_3 - Z_2 \end{bmatrix} \quad , \tag{4.5}$$

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} \left(x_1^2 - X_1^2 - Y_1^2 - Z_1^2\right) - \left(x_2^2 - X_2^2 - Y_2^2 - Z_2^2\right) \\ \left(x_2^2 - X_2^2 - Y_2^2 - Z_2^2\right) - \left(x_3^2 - X_3^2 - Y_3^2 - Z_3^2\right) \end{bmatrix} \quad . \tag{4.6}$$

Az $\boldsymbol{U}, \boldsymbol{V}, \boldsymbol{W}$ vektorok közül azt a kettőt választjuk ki, melyek vektoriális szorzatának (a koordinátáikból képezett determinánsnak) az abszolút értéke maximális; ez a numerikus stabilitás miatt lényeges. Az ezekhez tartozó ismeretleneket kifejezzük a harmadik ismeretlen függvényében; ehhez csupán egy lineáris egyenletrendszert kell megoldani. Az így kapott kifejezéseket (4.1) képletbe helyettesítve a harmadik ismeretlenre másodfokú egyismeretlenes egyenletet kapunk.

A két megoldás közül könnyen kiválasztható a megfelelő, ugyanis egymásnak a $P_1 P_2 P_3$ síkra vonatkozó tükörképei.

5 Számpélda

A $P_1(-1,0,0),\ P_2(1,0,0),\ P_3\left(0,\sqrt{3},0\right)$ adott pontokhoz és

$$P_0\left(0,\frac{1}{\sqrt{3}},h\right)\quad (h=1) \tag{5.1}$$

meghatározandó ponthoz kiszámítjuk a szögeket:

$$\psi_{12}=\psi_{23}=\psi_{31}=ArcCos\left[\sqrt{\frac{3}{7}}\right]=0.857072\ \ rad. \tag{5.2}$$

Mivel $P_1P_2P_3$ egy szabályos háromszög csúcsai, és P_0 e háromszög szimmetria-tengelyén helyezkedik el, a g_i rezultánsok mindegyike ugyanaz a negyedfokú polinom:

$$g_i=-39.190476+31.548072x_i+3.142857x_i^2-6.110100x_i^3+x_i^4\ \ . \tag{5.3}$$

Az előzetes információk alapján kiválasztjuk a második gyököt, majd megoldjuk a (4.1 - 4.2 - 4.3) egyenletrendszert:

$$X=-1.88738\cdot10^{-15},\quad Y=0.57735,\quad Z=\pm1\ \ . \tag{5.4}$$

Az eljárás hatékonyságát úgy demonstrálhatjuk, ha mérési hibákat adunk a kiinduló adatokhoz: $P_1(-1,0,0),\ P_2(1,0,0),\ P_3\left(0.02,\sqrt{3},0\right)$. A pontos P_iP_0 irányok helyett a P_iH_i irányokat „mérjük”, vagyis a P_i pontból P_0 helyett H_i-t irányozzuk meg ($r=0.05$, $h=1$):

$$\begin{array}{ccc} H_1 & H_2 & H_3 \\ \left(0,\frac{1}{\sqrt{3}}-r,h\right) & \left(\frac{r\sqrt{3}}{2},\frac{1}{\sqrt{3}}+\frac{r}{2},h\right) & \left(-\frac{r\sqrt{3}}{2},\frac{1}{\sqrt{3}}+\frac{r}{2},h\right) \end{array} \tag{5.5}$$

(Az irányegyenesek döféspontjai a $z=h$ síkon egy r sugarú körre illeszkednek.) Az ezekre az irányokra adódó szögek

$$\psi_{12}=0.846588,\ \ \psi_{23}=0.850674,\ \ \psi_{31}=0.84207 \tag{5.6}$$

A rezultánsok:

$$\begin{aligned} g_1&=-35.840961+29.103874x_1+3.289011x_1^2-6.039846x_1^3+x_1^4 \\ g_2&=-35.955007+28.691896x_2+3.716955x_2^2-6.109747x_2^3+x_2^4 \\ g_3&=-36.339231+29.814847x_3+2.920097x_3^2-5.961538_3^3+x_3^4 \end{aligned} \tag{5.7}$$

A gyökök és a (4.1 - 4.2 - 4.3) egyenletrendszer megoldása:

$$x_1=1.50921,\qquad x_2=1.50932,\qquad x_3=1.50889$$

$$X=-0.00008625,\quad Y=0.577789,\qquad Z=0.971616$$

6 2D hasonlósági transzformáció

A fenti algebrai technikával kezelhető a síkbeli hasonlósági transzformáció direkt megoldása is.

Jóllehet, Awange, Grafarend (2003) és Závoti (2005) tanulmányok a 3D hasonlósági transzformáció direkt megoldását is tárgyalták, külön érdekességet nyújt a 2D hasonlósági feladat, mert ebben az esetben a direkt módszer Gröbner bázis nélkül is megoldható, így egybevethető a két megoldás. Hasonló eljárással találkozhatunk Awange, Grafarend (2002) tanulmányban, ahol a szerzők a linearizált legkisebb négyzetek módszerét a nemlineáris Gauss-Jacobi kombinatorikus megoldással vetették össze a 7 paraméteres dátum-transzformáció kapcsán.

A 4 paraméteres, 2D (Helmert) hasonlósági transzformáció Závoti (1999) tanulmánya alapján az alábbi egyenlettel adható meg:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = s\boldsymbol{R}\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix}, \qquad i = 1, 2, 3, \ldots, n \tag{6.1}$$

ahol $\{x_i, y_i\}$ és $\{X_i, Y_i\}$ ($i = 1, 2, 3, \ldots, n$) ugyanazon pontok koordinátái a két koordináta rendszerben, s az ismeretlen méretarány tényező, X_0, Y_0 az ismeretlen eltolási értékek, $\boldsymbol{R}$ a forgatási mátrix. Az elforgatás φ szögével az $\boldsymbol{R}$ forgatási mátrixot a következőképp írhatjuk fel:

$$\boldsymbol{R} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} . \tag{6.2}$$

Az $\boldsymbol{R}$ elforgatási mátrix előállítható egy ferdén szimmetrikus $\boldsymbol{S}$ mátrix felhasználásával:

$$\boldsymbol{R} = (\boldsymbol{I}_2 - \boldsymbol{S})^{-1}(\boldsymbol{I}_2 + \boldsymbol{S}) , \tag{6.3}$$

ahol $\boldsymbol{I}_2$ kétdimenziós egységmátrix és

$$\boldsymbol{S} = \begin{pmatrix} 0 & -c \\ c & 0 \end{pmatrix} . \tag{6.4}$$

Mivel

$$\begin{pmatrix} 1 & c \\ -c & 1 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \dfrac{1}{1+c^2} & \dfrac{-c}{1+c^2} \\ \dfrac{c}{1+c^2} & \dfrac{1}{1+c^2} \end{pmatrix} , \tag{6.5}$$

ezért a fenti $\boldsymbol{R}$ forgatási mátrixot explicit kifejezhetjük az alábbi módon:

$$\frac{1}{1+c^2}\begin{pmatrix} 1-c & \\ c & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1-c & \\ c & 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{1+c^2}\begin{pmatrix} 1-c^2 & -2c \\ 2c & 1-c^2 \end{pmatrix} . \tag{6.6}$$

A ferdén szimmetrikus mátrix segítségével a forgatási mátrix elemeinek felhasználásával a forgatási szög szögfüggvényeire kapjuk:

$$\begin{aligned} \sin\varphi &= \frac{2c}{1+c^2} \\ \cos\varphi &= \frac{1-c^2}{1+c^2} \\ tg\varphi &= \frac{2c}{1-c^2} \end{aligned} . \tag{6.7}$$

A (6.7) összefüggések utolsó tagja miatt kikötjük, hogy $c \neq \pm 1$.

A (6.1) összefüggés alapján írhatjuk:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} = s\left(\boldsymbol{I}_2 - \boldsymbol{S}\right)^{-1}\left(\boldsymbol{I}_2 + \boldsymbol{S}\right)\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} \quad . \tag{6.8}$$

Az $\left(\boldsymbol{I}_2 - \boldsymbol{S}\right)$ mátrixszal balról szorozzuk végig a fenti egyenletet:

$$\begin{pmatrix} 1 & c \\ -c & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} = s\begin{pmatrix} 1-c \\ c & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & c \\ -c & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} \quad . \tag{6.9}$$

A 4 paraméter meghatározásához pontosan 4 egyenlet felírására van szükség. Két pont koordinátáinak behelyettesítésével éppen annyi egyenlet adódik, ahány ismeretlen van. 2 pontpár koordinátáinak (6.9) összefüggésbe történő helyettesítésével és rendezésével adódik:

$$\begin{aligned} f_1 &:= sX_1 \;\; - scY_1 + X_0 + cY_0 - x_1 - cy_1 = 0 \\ f_2 &:= scX_1 \; + \; sY_1 - cX_0 + Y_0 + cx_1 - y_1 = 0 \\ f_3 &:= sX_2 \; - scY_2 + X_0 + cY_0 - x_2 - cy_2 = 0 \\ f_4 &:= scX_2 + sY_2 - cX_0 + Y_0 + cx_2 - y_2 = 0 \end{aligned} \quad . \tag{6.10}$$

Az (6.1) összefüggésben szereplő eltolási paraméterek kiküszöböléséhez képezzük a következő különbségeket:

$$\begin{aligned} f_{13} &:= f_1 - f_3 = sX_{12} - scY_{12} - x_{12} - cy_{12} = 0 \\ f_{24} &:= f_2 - f_4 = scX_{12} + sY_{12} + cx_{12} - y_{12} = 0 \end{aligned} \quad , \tag{6.11}$$

ahol $X_{ij} = X_i - X_j$, $Y_{ij} = Y_i - Y_j$, és $x_{ij} = x_i - x_j$, $y_{ij} = y_i - y_j \qquad i, j \in \{1,2\}, \quad i \neq j$.

A Mathematica programcsomag Gröbner bázisba transzformáló rutinja a (6.11) egyenletrendszer s paraméterére az alábbi másodfokú polinomot adja:

$$-x_{12}^2 - y_{12}^2 \quad + s^2\left(X_{12}^2 + \; Y_{12}^2\right) \quad . \tag{6.12}$$

Az ismeretlenekre a következő megoldásokat kapjuk (a méretarányra csak a pozitív gyököt tekintjük):

$$\begin{aligned} s &= \sqrt{\frac{x_{12}^2 + y_{12}^2}{X_{12}^2 + Y_{12}^2}} \\ c_1 = \frac{-x_{12} + sX_{12}}{y_{12} + sY_{12}}, &\qquad c_2 = \frac{y_{12} - sY_{12}}{x_{12} + sX_{12}} \end{aligned} \quad . \tag{6.13}$$

A (6.11) egyenletek felhasználásával formailag két gyököt kapunk, de a (6.12) összefüggés alapján azonosságra jutunk.

Abban a szerencsés helyzetben vagyunk, hogy a Helmert transzformáció ismeretlen paramétereit közvetlenül is megkaphatjuk. A (6.1) összefüggést írjuk fel 2 pont koordináta-párjaira:

$$\begin{aligned} g_1 &:= s\cos\varphi X_1 - s\sin\varphi Y_1 + X_0 = x_1 \\ g_2 &:= s\sin\varphi X_1 + s\cos\varphi Y_1 \; + Y_0 = y_1 \\ g_3 &:= s\cos\varphi X_2 - s\sin\varphi Y_2 + X_0 = x_2 \\ g_4 &:= s\sin\varphi X_2 + s\cos\varphi Y_2 \; + Y_0 \; = y_2 \end{aligned} \quad . \tag{6.14}$$

Az X_0 és Y_0 eltolási paramétereket az előző módon eliminálhatjuk:

$$\begin{aligned} g_{13} &:= g_1 - g_3 = s\cos\varphi X_{12} - s\sin\varphi Y_{12} = x_{12} \\ g_{24} &:= g_2 - g_4 = s\sin\varphi X_{12} + s\cos\varphi Y_{12} = y_{12} \end{aligned} \quad . \tag{6.15}$$

A fenti egyenletekből az ismeretlen paramétereket legegyszerűbben a következő módon határozhatjuk meg. Vezessük be az alábbi jelöléseket: $a = s\cos\varphi, \quad b = s\sin\varphi$.

A g_{13} és g_{24} egyenleteket az a és b ismeretlenekre megoldva, kapjuk:

$$\begin{aligned} a &= \frac{x_{12}X_{12} + y_{12}Y_{12}}{X_{12}^2 + Y_{12}^2} \\ b &= \frac{-x_{12}Y_{12} + y_{12}X_{12}}{X_{12}^2 + Y_{12}^2} \end{aligned} \quad . \tag{6.16}$$

Ezt követően elemi átalakításokkal jutunk az ismeretlen paraméterekhez:

$$\begin{aligned} s &= \sqrt{\frac{x_{12}^2 + y_{12}^2}{X_{12}^2 + Y_{12}^2}} \\ tg\varphi &= \frac{y_{12}X_{12} - x_{12}Y_{12}}{x_{12}X_{12} + y_{12}Y_{12}} \end{aligned} \quad . \tag{6.17}$$

A Mathematica programcsomag segítségével könnyen verifikálhatjuk, hogy a (6.13) képletben a Gröbner bázis segítségével kapott c értékkel a (6.7) összefüggésben szereplő $tg\varphi$ függvényre is a fenti kifejezés adódik.

7 Összefoglalás

A térbeli előremetszés nemlineáris feladatának megoldását visszavezettük egyváltozós polinomok gyökeinek meghatározására. A polinomok együtthatói a mérésekből adódó szögértékek trigonometrikus függvényei, ezeket explicit szimbolikus alakban meghatároztuk.

Megadtunk egy algoritmust a 2D hasonlósági transzformáció nemlineáris egyenletrendszerének megoldására a forgatási mátrix parametrizálásával, amely eljárás sem nem iteratív, sem nem követeli meg a megfigyelési egyenletek linearizálását. A Gröbner bázisra való áttérés a 2D transzformáció skála paraméterének meghatározására másodfokú polinom-egyenletet szolgáltatott.

Köszönetnyilvánítás. E tanulmány a T61800 nyilvántartás számú OTKA pályázat támogatásával készült.

Hivatkozások

Awange JL, Grafarend E (2002): Linearized Least Squares and nonlinear Gauss-Jacobi combinatorial algorithm applied to the 7 parameter datum transformation C7(3) problem. Zeitschrift für Vermessungswesen, 127, 109-116.

Awange JL, Grafarend E (2003): Closed form solution of the overdetermined nonlinear 7 parameter datum transformation Allgemeine Vermessungsnachrichten, 4, 130-149.

Awange JL, Grafarend E, Fukuda Y (2003): Closed form solution of the triple three-dimensional intersection problem Zeitschrift für Vermessungswesen, 128, 395-401.

Becker T, Weispfenning VL (1998): Gröbner bases. Graduate Texts in Mathematics 141. Springer-Verlag.

Fuchs L (1967): Bevezetés az algebrába és a számelméletbe. ELTE egyetemi jegyzet.

Jancsó T (2004): Durva hibaszűrés a fotogrammetriai hátrametszés kiegyenlítése előtt- kezdőérték megadása nélkül. Geomatikai Közlemények, VII, 181-195.

Paláncz B, Zaletnyik P, Awange JL, Grafarend E (2008): Dixon resultant's solution of systems of geodetic polynomial Equations. Journal of Geodesy 82; 8, 505-511.

Závoti J (1999): A geodézia korszerű matematikai módszerei. Geomatikai Közlemények II, 1-149.

Závoti J (2005): A 7 paraméteres 3D transzformáció egzakt megoldása. Geomatikai Közlemények, VIII, 53-60.

DURVA HIBÁK SZŰRÉSE TÉRBELI HASONLÓSÁGI TRANSZFORMÁCIÓNÁL

Jancsó Tamás[*]

Gross error detection in the spatial similarity transformation *- In the spatial similarity transformation even three common points result in an over-determined system of equations. During the solution the gross-errors are distributed using the least-squares method. With an alternative adjustment method we can avoid the distribution of the gross errors. For this purpose we need a process based on the weighted mean calculation. This method gives the same result as the adjustment method based on iterations, in the same time the points having gross errors can be detected before the adjustment. For the detection we need a null-hypothesis comparison of the expected and calculated root-mean-square errors. The root-mean-square errors are calculated from the spatial similarity transformation which is based on groups combining three points from the combination of common points.*

Keywords: gross error detection, spatial similarity transformation, adjustment

A térbeli hasonlósági transzformációkor már három közös pont esetén is túlhatározott egyenletrendszert lehet felírni. Ennek megoldása során a durva hibák szétoszlanak a legkisebb négyzetek módszerének alkalmazásakor. Egy alternatív kiegyenlítési módszerrel megakadályozható a durva hibák szétterjedése. Ehhez a súlyozott középérték-képzésre alapuló számítást kell végezni. Az eljárás egyenértékű eredményt ad az iterációval végzett kiegyenlítéssel, ugyanakkor a durva hibával terhelt pontok még a kiegyenlítés előtt felderíthetők. A felderítéshez a várható és a számított középhibák null-hipotézisre épülő összehasonlítására van szükség statisztikai módszerekkel. A középhibákat a közös pontokból kombinációval képzett három pontból álló csoportok alapján végzett térbeli hasonlósági transzformációkból kapjuk.

Kulcsszavak: durvahiba-szűrés, térbeli hasonlósági transzformáció, kiegyenlítés

1 Bevezetés

A térbeli hasonlósági transzformáció feladata klasszikus feladatnak számít a geodéziában, fotogrammetriában (Albertz és Kreiling 1989). Hagyományos megoldás során a közös pontokra felírt egyenletrendszert a legkisebb négyzetek módszerével iterációs úton oldják meg. A fokokozatos közelítés során a durva hibával terhelt pontok hatással vannak a teljes transzformációra, az egyes pontokhoz köthető hibák eloszlanak, kiegyenlítődnek a többi pontra. A szakirodalomban alternatív megoldást jelent a Gröbner bázissal végzett kiegyenlítés (Awange 2002, 2003, Závoti 2005). A módszer gyakorlati alkalmazását korlátozza, hogy a Gröbner bázis előállításához külső matematikai szoftvereket (pl. Mathematica, Matlab) kell alkalmazni, vagyis nem készíthetők önálló szoftveres megoldások a Gröbner bázis generálásának feladata nélkül. Alternatív megoldás lehet a Jacobi-féle középértékképzésen alapuló kiegyenlítés. Ennek pontos menetét Závoti és Jancsó (2006) cikkben írtuk le. Jelen cikk ennek a metódusnak a folytatása és kiterjesztése a durva hibákkal terhelt pontok felderítésére.

2 A kiegyenlítés összefoglalása

A Jacobi-féle középértékkel végzett kiegyenlítés egyenértékű eredményt szolgáltat a legkisebb négyzetek módszerével. Ezt már maga Gauss is bizonyította, és amit Grafarend és Awange (2005) részletesen tárgyalnak munkájukban. Ezt a metodikát a hazai szakirodalom is átvette (Tamás 1936, Haáz 1942), de ez a módszertan hosszú évtizedekre elfeledetté vált, és a térbeli transzformációkra nem alkalmazták.

[*]*NYME GEO, 8000 Székesfehérvár, Pirosalma u. 1-3.*
E-mail: jt@geo.info.hu

A módszer lényege, hogy a túlhatározott egyenletrendszerből minden kombinációban fölös mérést nem tartalmazó egyenletrendszereket képzünk, vagyis a feladatot visszavezetjük a minimálisan szükséges egyenletekre. A következő lépés, hogy a kombinációval létrejött egyenletrendszereket egyenként megoldjuk és minden megoldáshoz egy súlymátrixot rendelünk. A megoldás során közvetlen, iterációk nélküli megoldásra törekedünk. A súlymátrixok felállításához az explicit hibaterjedés törvényeit alkalmazzuk, vagyis az egyenletrendszerekben szereplő mért mennyiségek középhibáira építve parciális deriválással meghatározzuk az ismeretlenek várható középhibáit, pontosabban a variancia-kovariancia mátrixait. Ezekből a mátrixokból már levezethetők a súlymátrixok.

Miután minden kombinációhoz megkaptuk a megoldás vektorokat és súlymátrixokat, az ismeretlenek kiegyenlített értékeit a súlyozott középérték adja.

Tekintsük át röviden az elmondottak a térbeli hasonlósági transzformáció példáján. Az alapképlet a következő:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = m \cdot \boldsymbol{R}_{\Phi\Omega K} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_O \\ Y_O \\ Z_O \end{bmatrix} . \qquad (1)$$

Három közös pont esetén 9 egyenletből álló egyenletrendszer írható fel, melyben az ismeretlenek száma 7 ($m, \Phi, \Omega, K, X_O, Y_O, Z_O$), vagyis túlhatározott az egyenletrendszer. Képezzünk minden kombinációban 7 egyenlet a 9 egyenletből, így 36 db 7 egyenletből álló egyenletrendszerhez jutunk. Szakirodalomból ugyanakkor ismert (Kraus 1998, McGlone 2004), hogy a térbeli hasonlósági transzformáció paramétereinek meghatározása kettébontható. Először egy sík Helmert transzformációt számítunk, ahol a meghatározandó paraméterek m, X_O, Y_O, K lesznek. Ennek megoldásához két vízszintes koordinátával rendelkező pontra (vagy általánosan fogalmazva egy koordinátasíkban fekvő két pontra) van szükség. A másik három paraméter (Z_O, Φ, Ω) meghatározásához 3 db magassági pontra (vagy általánosan megfogalmazva a korábbi koordináta síkra merőleges harmadik koordinátatengely szerinti koordinátákra) van szükség. A fotogrammetriai gyakorlatban tehát legalább két vízszintes és három magassági pont szükséges a 7 egyenlet felírásához. Általános esetben, amikor nincs kitüntetett vízszintes sík, illetve magasság mi magunk dönthetjük el, hogy melyik koordinátasíkot választjuk, ahol két közös pontot jelölünk ki, ekkor a harmadik tengelyen pedig 3 db pont koordinátáját kell kiválasztanunk. Így többféle kombinációban is felírható a minimálisan szükséges 7 egyenlet. Ugyanakkor nem megengedett, hogy egy kiegyenlítésen belül a két közös pont koordináta síkját változtassuk, ugyanis szigorúan véve ekkor geometriai értelemben más-más paramétereket határozunk meg. Például, ha az *XY* sík helyett az *XZ* síkot választom a két közös pont megadásához, akkor a K forgatási szög *Y* tengely körüli forgatást ír le, viszont az *XY* sík esetében a K szög *Z* tengely körüli forgatást jelöl. Ennek figyelembevételével és azzal a választással élve, hogy az *XY* síkot választjuk a két közös pont síkjának a létrejött 36 db egyenletrendszerből csak hármat használhatunk fel. A megmaradt három egyenletrendszer egyenként nem oldható meg közvetlenül, mert az egyenletek nem lineárisak. A fő problémát a forgatási mátrixot felépítő Φ, Ω, K forgatási szögek meghatározása okozza, melyek az irány-koszinuszokat határozzák meg az $\boldsymbol{R}$ forgatási mátrixban:

$$\boldsymbol{R}_{\Phi\Omega K} = \begin{bmatrix} \cos\Omega\cos K & -\cos\Omega\sin K & \sin\Omega \\ \sin\Phi\sin\Omega\cos K + \cos\Phi\sin K & -\sin\Phi\sin\Omega\sin K + \cos\Phi\cos K & -\sin\Phi\cos\Omega \\ -\cos\Phi\sin\Omega\cos K + \sin\Phi\sin K & \cos\Phi\sin\Omega\sin K + \sin\Phi\cos K & \cos\Phi\cos\Omega \end{bmatrix} . \qquad (2)$$

Emiatt át kell alakítani az alapképletet az $\boldsymbol{R} = (\boldsymbol{I}_3 - \boldsymbol{S})^{-1}(\boldsymbol{I}_3 + \boldsymbol{S})$ azonosság felhasználásával, ahol I_3 egy 3x3 elemből álló egységmátrix, $\boldsymbol{S}$ pedig egy ferdén szimmetrikus mátrix:

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} 0 & -c & b \\ c & 0 & -a \\ -b & a & 0 \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Ekkor a Φ, Ω, K szögek helyett az a,b,c független forgatási paramétereket kell meghatároznunk és maga az R mátrix a következő alakot ölti:

$$\boldsymbol{R} = \frac{1}{1+a^2+b^2+c^2} \begin{bmatrix} 1+a^2-b^2-c^2 & 2(ab-c) & 2(ac+b) \\ 2(ab+c) & 1-a^2+b^2-c^2 & 2(bc-a) \\ 2(ac-b) & 2(bc+a) & 1-a^2-b^2+c^2 \end{bmatrix}. \tag{4}$$

Ezek után redukáljuk a koordinátákat mindkét pontrendszerben a súlypontokra, majd a behelyettesítés, rendezés után az alapképlet a következőre módosult:

$$\begin{bmatrix} 1 & c & -b \\ -c & 1 & a \\ b & -a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{si} \\ Y_{si} \\ Z_{si} \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} 1 & -c & b \\ c & 1 & -a \\ -b & a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{si} \\ y_{si} \\ z_{si} \end{bmatrix}. \tag{5}$$

Ha megvizsgáljuk az egyenleteket, akkor látható, hogy az m méretarány-tényező miatt még mindig nem-lineáris egyenletrendszerrel állunk szemben. Annak érdekében, hogy iteráció nélkül határozzuk meg az ismeretleneket, a meghatározást bontsuk 3 részre, elsőként határozzuk meg az m méretarány-tényezőt az egyenletrendszertől független módszerrel, majd a kapott megoldást behelyettesítve határozzuk meg az a,b,c paramétereket lineáris egyenletekből, majd visszatérve az eredeti alapképlethez határozzuk meg az eltolási paramétereket (X_O, Y_O, Z_O).

Az m méretarány-tényező meghatározását a transzformációs képletektől függetlenül meghatározhatjuk távolságok aránya alapján, vagyis a korábban említett 3 db 7 egyenletből álló egyenletrendszerhez a következő méretarány-tényezők tartoznak:

$$m_1 = \frac{\sum \sqrt{3 \cdot \left(X_{s1}^2 + Y_{s1}^2 + Z_{s1}^2\right) + 3 \cdot \left(X_{s2}^2 + Y_{s2}^2 + Z_{s2}^2\right) + X_{s3}^2 + Y_{s3}^2 + Z_{s3}^2}}{\sum \sqrt{3 \cdot \left(x_{s1}^2 + y_{s1}^2 + z_{s1}^2\right) + 3 \cdot \left(x_{s2}^2 + y_{s2}^2 + z_{s2}^2\right) + x_{s3}^2 + y_{s3}^2 + z_{s3}^2}}, \tag{6a}$$

$$m_2 = \frac{\sum \sqrt{3 \cdot \left(X_{s1}^2 + Y_{s1}^2 + Z_{s1}^2\right) + 3 \cdot \left(X_{s3}^2 + Y_{s3}^2 + Z_{s3}^2\right) + X_{s2}^2 + Y_{s2}^2 + Z_{s2}^2}}{\sum \sqrt{3 \cdot \left(x_{s1}^2 + y_{s1}^2 + z_{s1}^2\right) + 3 \cdot \left(x_{s3}^2 + y_{s3}^2 + z_{s3}^2\right) + x_{s2}^2 + y_{s2}^2 + z_{s2}^2}}, \tag{6b}$$

$$m_3 = \frac{\sum \sqrt{3 \cdot \left(X_{s3}^2 + Y_{s3}^2 + Z_{s3}^2\right) + 3 \cdot \left(X_{s2}^2 + Y_{s2}^2 + Z_{s2}^2\right) + X_{s1}^2 + Y_{s1}^2 + Z_{s1}^2}}{\sum \sqrt{3 \cdot \left(x_{s3}^2 + y_{s3}^2 + z_{s3}^2\right) + 3 \cdot \left(x_{s2}^2 + y_{s2}^2 + z_{s2}^2\right) + x_{s1}^2 + y_{s1}^2 + z_{s1}^2}}. \tag{6c}$$

A méretarány-tényezők meghatározása és behelyettesítése után mindhárom egyenletrendszer lineárissá válik a,b,c paraméterekre nézve. Például az első variációra a következő $\boldsymbol{AX} + \boldsymbol{L} = \boldsymbol{V}$ alakú javítási egyenletrendszer írható fel:

$$
\begin{aligned}
&a\cdot 0+b\cdot\left(m_1 z_{s1}+Z_{s1}\right)+c\cdot\left(-m_1 y_{s1}-Y_{s1}\right)+m_1 x_{s1}-X_{s1}=v_1\\
&a\cdot\left(-m_1 z_{s1}-Z_{s1}\right)+b\cdot 0+c\cdot\left(m_1 x_{s1}+X_{s1}\right)+m_1 y_{s1}-Y_{s1}=v_2\\
&a\cdot\left(m_1 y_{s1}+Y_{s1}\right)+b\cdot\left(-m_1 x_{s1}-X_{s1}\right)+c\cdot 0+m_1 Z_{s1}-Z_{s1}=v_3\\
&a\cdot 0+b\cdot\left(m_1 z_{s2}+Z_{s2}\right)+c\cdot\left(-m_1 y_{s2}-Y_{s2}\right)+m_1 x_{s2}-X_{s2}=v_4\\
&a\cdot\left(-m_1 z_{s2}-Z_{s2}\right)+b\cdot 0+c\cdot\left(m_1 x_{s2}+X_{s2}\right)+m_1 y_{s2}-Y_{s2}=v_5\\
&a\cdot\left(m_1 y_{s2}+Y_{s2}\right)+b\cdot\left(-m_1 x_{s2}-X_{s2}\right)+c\cdot 0+m_1 z_{s2}-Z_{s2}=v_6\\
&a\cdot\left(m_1 y_{s3}+Y_{s3}\right)+b\cdot\left(-m_1 x_{s3}-X_{s3}\right)+c\cdot 0+m_1 z_{s3}-Z_{s3}=v_7
\end{aligned}
\quad . \tag{7}
$$

Miután meghatároztuk az a,b,c paramétereket, visszatérhetünk az eredeti transzformációs képletünkhöz, melyből az eltolási paramétereket már könnyen kifejezhetjük mindhárom kombinációra:

$$
\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} - \frac{m}{1+a^2+b^2+c^2} \begin{bmatrix} 1+a^2-b^2-c^2 & 2(ab-c) & 2(ac+b) \\ 2(ab+c) & 1-a^2+b^2-c^2 & 2(bc-a) \\ 2(ac-b) & 2(bc+a) & 1-a^2-b^2+c^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} . \tag{8}
$$

Végeredményképpen három megoldás-vektort kapunk:

$$
\boldsymbol{L}_j^T = \left[m_j, a_j, b_j, c_j, X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}\right] . \tag{9}
$$

Ezeknek a megoldás-vektoroknak a súlyozott középértéke szolgáltatja a kiegyenlített értékeket:

$$
\boldsymbol{X} = \left(\sum_{j=1}^{3} \boldsymbol{P}_j \right)^{-1} \times \sum_{j=1}^{3} \left(\boldsymbol{P}_j \boldsymbol{L}_j \right) . \tag{10}
$$

A képletben szereplő súlymátrixokat az explicit hibaterjedés alapján a következő egyenletből számítjuk (McGlone 2004):

$$
\boldsymbol{C}_{xj} = \boldsymbol{J}_{xj}^{-1} \boldsymbol{J}_{yj} \boldsymbol{C}_y \boldsymbol{J}_{yj}^{T} \left(\boldsymbol{J}_{xj}^{-1} \right)^T \rightarrow \boldsymbol{P}_j = c^2 \left(\boldsymbol{C}_{xj} \right)^{-1} . \tag{11}
$$

3 A durvahiba-szűrés algoritmusa

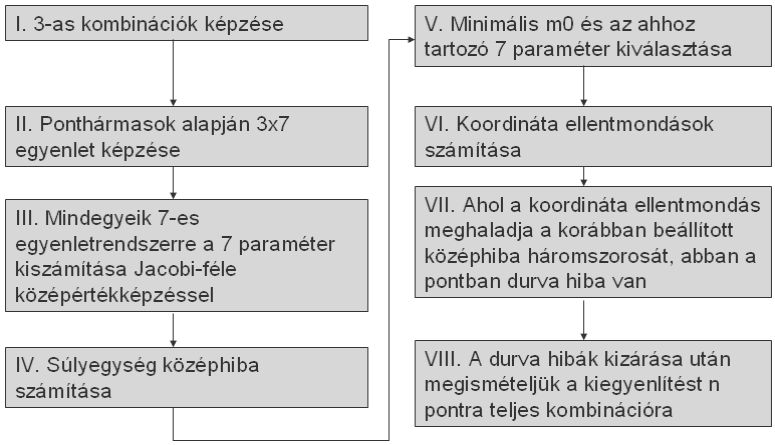
A durva hibák felderítésének folyamatát az 1. ábrán lévő diagram foglalja össze. A durva hibák felderítésének lényeges momentuma, hogy minden hármas kombinációban kiszámoljuk m_0 súlyegység-középhiba értékét és megkeressük a legkisebbet:

$$
m_0 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{3} \boldsymbol{V}_j^T \boldsymbol{P}_j \boldsymbol{V}_j}{3 \cdot 7 - 7}} . \tag{12}
$$

A legkisebb m_0 nem haladhatja meg az előzetesen felállított c értékét F statisztikai próba szerint (Detrekői 1991):

$$
\begin{aligned}
&H_0 : m_0 = c\\
&\sqrt{F_{0.95\%,3,3}} = 3{,}05\\
&H_1 : m_0 \le 3{,}05 \cdot c
\end{aligned}
\quad . \tag{13}
$$

Ezek után a legkisebb m_0 -hoz tartozó hármas kombinációt etalonnak tekintjük és ez alapján számítjuk a koordináta ellentmondásokat.



1. ábra. Durvahiba-szűrés menete

Ahol a koordináta ellentmondás meghaladja a korábban beállított középhiba háromszorosát, abban a pontban durva hiba van.

A durva hibák kizárása után megismételjük a kiegyenlítést n pont teljes kombinációra. Vagyis az egyenletrendszerek száma a következő lesz:

$$j = C_n^{(2)} \cdot C_n^{(3)} \ . \tag{14}$$

Példaként tételezzük fel, hogy a megmaradt pontok száma $n = 4$. Ekkor a következő hármas kombinációk képezhetők: (1,2,3), (1,2,4), (1,3,4), (2,3,4). Minden hármas kombinációban 9 egyenlet írható fel, ezekből 3-féle kombinációban képezhetünk 7-7 egyenletet figyelembe véve azt, hogy a 7 egyenletben 2 vízszintes és 3 magassági pontnak kell lennie.

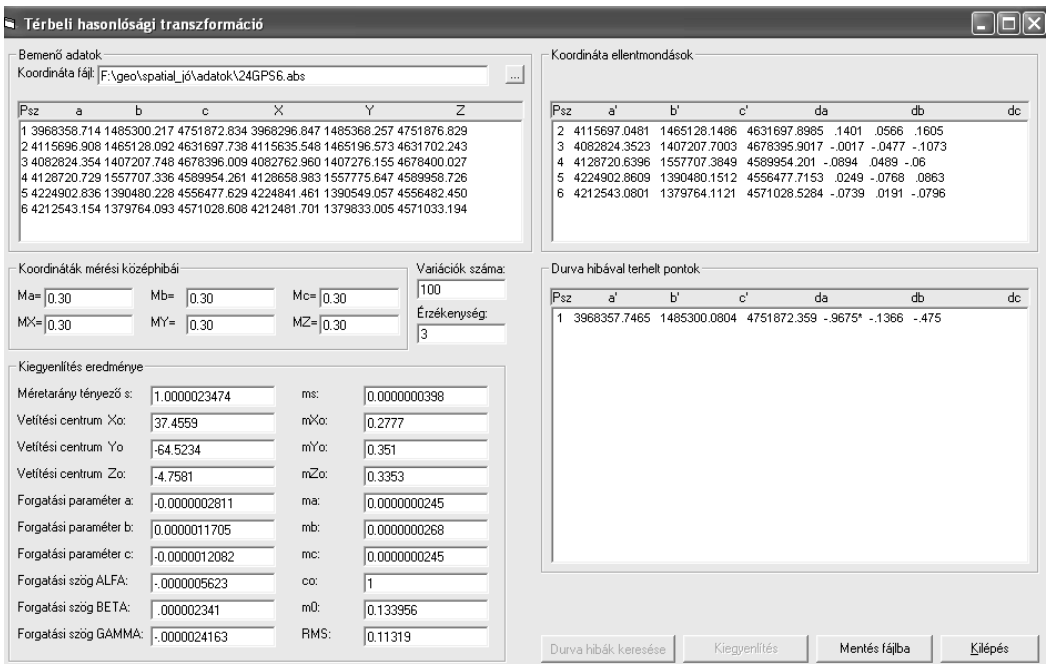
3.1 Gyakorlati példa

Az itt leírt eljárás számítópépes implementációja elkészült. A tesztelés során (2. és 3. ábra) bebizonyosodott, hogy egyszerre több pont is kiszűrhető egy lépésben. A kapott transzformációs paraméterek megegyeztek az iterációs eljárásban számítottakkal.

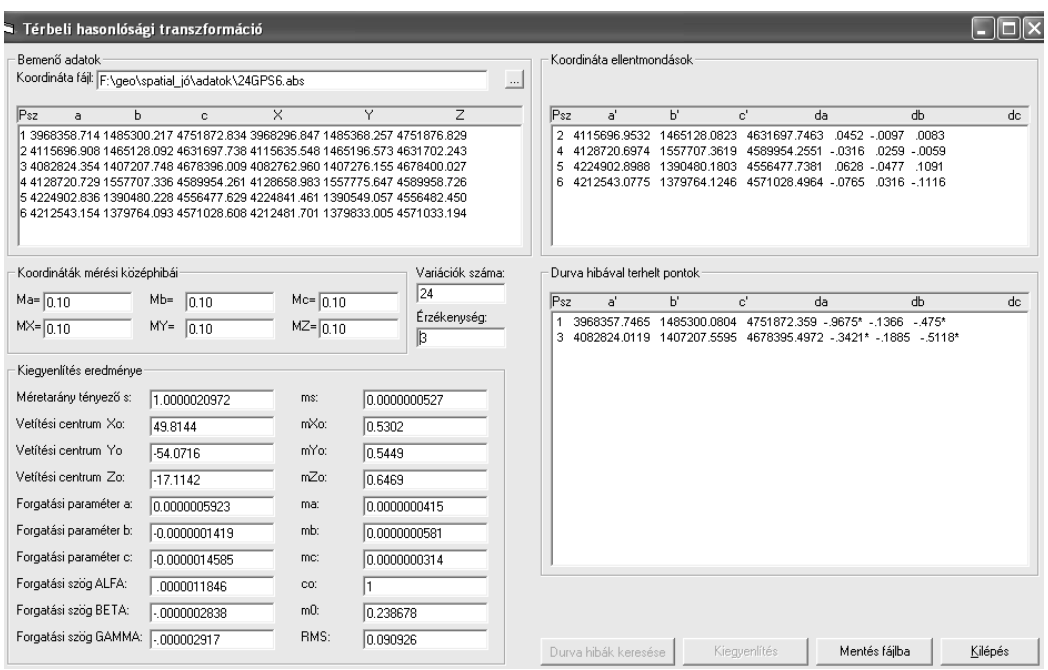
Az első példában (2. ábra) csak egy durva hibával terhelt pont van. A hibák nagyságát a da, db, dc oszlopok mutatják. Látható, hogy egy helyen az 1-es pontnál (da = - 0.9675 m) a megengedett 30 cm-es hiba háromszorosát is túllépte a számított hiba.

Miután a durva hibával terhelt pontot a program kiszűrte a megmaradt pontok alapján megtörténik a kiegyenlítés és a koordináta ellentmondások számítása.

Második példánkban (3. ábra) ugyanarra a ponthalmazra szigorúbb hibahatárt (0.1m) adtunk meg. Ekkor a durva hibával terhelt pontok száma kettőre növekedik (3. ábra), vagyis a korábbi 1-es pont hibája mellett megjelenik a 3-as pontnál a megengedett hiba háromszorosa. Ha megnézzük a 2. ábrán, hogy a 3-as ponthoz milyen koordináta ellentmondások tartoznak látható, hogy ezek az értékek kisebbek és nem egyeznek meg a 3. ábrán a hibaszűréskor számított koordináta hibákkal. Ennek magyarázata az, hogy a 2. ábrán a ki nem szűrt 3-as pont részt vesz a kiegyenlítésben és annak hibája a legkisebb négyzetek módszere szerint eloszlik, a 3. ábrán a 3-as pont hibája pedig direkt analitikus statisztikai módszerrel számított, vagyis ott még a kiegyenlítés nem történt meg, így annak hibája nem kenődött szét más pontokra.



2. ábra. Példa durvahiba-szűrésre. Hibás pontok száma:1



3. ábra. Példa durvahiba-szűrésre. Hibás pontok száma:3

A táblázatból látható, hogy a korábbi 1-es számú pont itt is hibás és a hiba mértéke megegyezik a 2. ábrán mutatottal, vagyis a durva hiba nem kenődött szét, annak értéke egyértelműen az adott pontot minősíti.

4 Összefoglalás

Az ismertetett módszer a durva hibák kiszűrését valósítja meg a térbeli hasonlósági transzformációra. Ugyanakkor a módszert lehetne alkalmazni térbeli affin transzformációra is. Általános esetben elmondható, hogy a bemutatott módszer alkalmazható minden olyan feladatnál, ahol a következő feltételek teljesülnek:

1. A feladat közvetlenül megoldható a minimálisan szükséges egyenletek alapján.
2. A mérések középhibái előzetesen számíthatók.

Összegzésképpen további négy fontos megállapítás tehető:

1. A kombinatorikai robbanás problémát okozhat. Pl. 24 pontnál a kombinációk száma: 558624.
2. A kiegyenlítés eredménye megegyezik az iterációval végzett meghatározással.
3. A koordináták mérési középhibáit a lehető legpontosabban kell meghatározni. Ennek pontossága közvetlenül befolyásolja a durvahiba-szűrés hatékonyságát és pontosságát.
4. 4. Egyszerre több durva hiba is felderíthető.

Köszönetnyilvánítás. Köszönöm Dr. Busics György kollégámnak a mintaadatokat, aki egyúttal felhívta a figyelmet a feladat fontosságára is.

Hivatkozások

Albertz J, Kreiling W (1989):Photogrammetrisches Taschenbuch, Wichmann, Karlsruhe, 2. Auflage, 58-60.

Awange JL, Grafarend EW (2002): Linearized Least Squares and nonlinear Gauss-Jacobbi combinatorical algorithm applied to the 7 parameter datum transformation C_7 (3) problem. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 127, 109-116.

Awange JL, Grafarend EW (2003): Closed form solution of the overdetermined nonlinear 7 parameter datum transformation. *Allgemeine Vermessungsnachrichten*, 4, 130-149.

Awange JL, Grafarend EW (2005): Solving Algebraic Computational Problems in Geodesy and Geoinformatics, Springer Verlag, 57-75.

Detrekői Á (1991): Kiegyenlítő számítások. Tankönyvkiadó, Budapest.

Haáz IB (1942): A normálegyenletek megoldása középértékképzéssel. Geodéziai Közlemények, XVIII (3), 111-117.

Kraus K (1998): Fotogrammetria, Tertia Kiadó, Budapest

McGlone JC (2004): Manual of Photogrammetry, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland (USA), Fith Edition, 72.

Tamás Z (1936): A koordinátakiegyenlítés új megoldása. Geodéziai Közlemények, XII (5-8), 86-101.

Závoti J (2005): A 7 paraméteres 3D transzformáció egzakt megoldása, Geomatikai közlemények VIII, 53-60.

Závoti J, Jancsó T (2006): The solution of the 7 parameter datum transformation problem with and without the Groebner basis, Acta Geodetica Geophisica Hungarica, 41(1), 11-14.

TÉRBELI AFFIN TRANSZFORMÁCIÓ SZIMBOLIKUS MEGOLDÁSA HÁROM ISMERT PONTRA

Zaletnyik Piroska[*]*, Paláncz Béla*[**]

Symbolic solution of the 3D affine transformation in case of three known points *- The 9-parameter 3D affine transformation is the generalization of the 7-parameter Helmert transformation where instead of one scale parameter three different scales are used according to the three coordinate axes. In this study the symbolic solution of this transformation is given in case of the minimally required three known points. From the 9-variable nonlinear system of nine algebraic equations, a quadratic univariate polynomial is deduced, the positive real roots of which give the solution of the transformation problem. Different methods are demonstrated and the analytical form of the solutions for the nine parameters is given. The main advantage of this result is that we do not need linearization or initial guess values of the nine parameters, which is necessary in the case of the traditional solution of the nonlinear equation system. To put it plainly, we do not need numerical procedure at all. The result can be useful in the solution of the N-point case also, using Gauss-Jacobi combinatorial method, or using this solution as initial value for a local numerical solver.*

Keywords: coordinate transformation, 9-parameter transformation, affine, computer algebra, Dixon resultant, Gröbner basis

A 7 paraméteres Helmert-féle térbeli hasonlósági transzformáció általánosításának, a 9 paraméteres térbeli affin transzformáció paramétereinek előállítására szolgáló szimbolikus megoldási módszert mutatunk be. Visszavezetve a kilenc ismeretlenes kilenc egyenletrendszerből álló algebrai egyenlet-rendszer megoldását egyetlen egyváltozós másodfokú algebrai polinom zérushelyeinek a meghatározására. Az analitikus megoldás előállítására több megoldási módszert is bemutatunk és megadjuk analitikus alakban a kilenc paraméter meghatározására szolgáltató egyenleteket a minimálisan szükséges három ismert pont esetében. A szimbolikus megoldás előnye, hogy a hagyományos megoldásokkal szemben nincs szükség linearizálás alkalmazására vagy kezdőérték meghatározására. Magyarán, nincs szükség numerikus megoldási eljárásra. A három pontra kapott eredmény jól használható az N ismert pontra vonatkozó megoldások előállítása során, akár Gauss-Jacobi kombinatorikus módszer alkalmazásával, akár kezdőértékként, valamilyen numerikus megoldási módszert használva.

Kulcsszavak: koordinátatranszformáció, 9 paraméteres transzformáció, affin, számítógépes algebra, Dixon rezultáns, Gröbner bázisok

1 Bevezetés

A geodéziában igen fontos feladat a koordinátatranszformáció, melynek sokféle módszere alakult ki az idők folyamán. A koordináta-rendszerek dimenziója szerint lehetnek kétdimenziós síkbeli vagy háromdimenziós térbeli transzformációk, lehet globális vagy lokális, helyi transzformáció, de az alkalmazott paraméterek számát illetően is többféle transzformációs modellt ismerünk. Jó áttekintést találhatunk ezekről az Ádám et al. (2004) könyvben.

A legelterjedtebb koordinátatranszformáció a hasonlósági vagy Helmert transzformáció, térbeli koordináták esetében 7 paraméterrel (3 eltolás, 3 elforgatás és egy méretarány tényező). A hasonlósági transzformáció paramétereinek a meghatározására több modell is ismert. A leggyakoribb, hogy a 7 paraméteres transzformáció felírásakor számos egyszerűsítéssel élnek, - pl. feltételezik a forgatási szögek kis értékeit és a méretarány tényező csekély mértékű eltérését az egytől - amelyek azután a modell linearizálását eredményezik. Mindezekről magyar nyelven Halmos (1980) cikkében találhatunk egy összefoglaló leírást.

[*]*BME, Általános- és Felsőgeodézia Tsz., 1111, Budapest, Műegyetem rkp. 3.*
MTA-BME Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport
E-mail: zaletnyikp@hotmail.com
[**]*BME, Fotogrammetria és Térinformatika Tsz., 1111, Budapest, Műegyetem rkp. 3.*
E-mail: palancz@epito.bme.hu

Bizonyos esetekben a hagyományos térbeli 7 paraméteres hasonlósági transzformáció nem nyújt kielégítő pontosságot a két rendszer közötti nagymértékű torzulások miatt. A maradék eltérések csökkentése érdekében ezért hétnél több paraméteres modelleket is szoktak alkalmazni.

A 9 paraméteres térbeli affin transzformáció a 7 paraméteres transzformáció általánosítása, amikor az egyetlen méretarány tényező helyett 3 különböző méretarány tényezőt alkalmaznak a 3 koordinátatengely irányában. Späth (2004) a maradék eltérések vektorának numerikus minimalizálásával határozta meg a 9 paramétert, Papp és Szűcs (2005) a 7 paraméteres Burša-Wolf modellt terjesztette ki 9 paramétere. Watson (2006) kimutatta, hogy a Gauss-Newton módszer illetve változatai hatékonyan alkalmazhatóak a 9 paraméteres transzformációra is, a változók szétválasztásával és a forgatási szögekre önállóan alkalmazott iterációval, miközben a többi paraméter a legkisebb négyzetek módszerével számítható a linearizálást követően. Megemlítendő még, hogy a 9 paraméteres térbeli affin transzformáció néhány GPS használók számára kifejlesztett koordinátatranszformációs szoftverben is alkalmazásra kerül (lásd. Mathes 2002, Fröhlich és Bröker: Trafox version 2.1 - 3d-kartesische Helmert-Transforation, http://www.koordinatentransformation.de/data/trafox.pdf).

A következőkben a 9 paraméteres térbeli affin transzformáció megoldására mutatunk be néhány új módszert, amelyek a számítógépes algebra nyújtotta lehetőségek felhasználásával kerültek kidolgozásra. A módszerek legnagyobb előnye a korábbiakhoz képest, hogy bármekkora forgatási szögekre, méretarány tényezőre alkalmazhatóak, mivel nem tartalmaznak egyszerűsítéseket, elhanyagolásokat, sem az egyenletek linearizálását, így nem igénylik a paraméterek értékeinek egy közelítő, előzetes becslését sem. Nincs szükség numerikus módszer alkalmazására, a megoldás explicit módon adott.

A cikkben 3 közös pont ismeretében adunk több megoldási módszert a transzformáció nemlineáris algebrai problémájára: a Dixon rezultáns – Kapur-Saxena-Yang (Dixon KSY) és Early Discovery Factors (Dixon-EDF) eljárásait illetve Gröbner bázisok alkalmazását vizsgálva.

2 Algebrai egyenletrendszerek megoldása számítógépes algebra felhasználásával

A földtudományokban igen gyakoriak a nemlineáris, algebrai egyenletrendszerre vezető problémák. Ilyen például a GPS-szel történő helymeghatározás, előmetszés, hátrametszés és természetesen az ebben a cikkben is vizsgált koordinátatranszformáció is. Számos ilyen nemlineáris feladat algebrai megoldására találhatunk példát a geodéziai szakirodalomban: Bancroft (1985), Grafarend és Shan (1996), Kleusberg (2003), Zaletnyik et al. (2008) és Awange és Grafarend (2005). Ez utóbbi különböző módszereket ismertet a fenti feladatok megoldására, mint például Gröbner bázisok, Sylvester rezultáns és multipolinomiális rezultáns (Macaulay és Strumfels formula) használata. Kifejezetten koordináta transzformációra, a 7 paraméteres Helmert-féle térbeli hasonlósági transzformáció szimbolikus megoldására is találunk példákat, mind nemzetközi, mind hazai publikációkban (Awange és Grafarend 2003, Awange et al. 2004, Závoti 2005, Závoti és Jancsó 2006, Zaletnyik 2008).

A számítógépes algebrai módszerek lényege, hogy a többváltozós algebrai egyenletrendszerek megoldásakor, ahol az egyenletek (n) és a változók (m) száma egyenlő egymással ($m=n$), a változók és így természetesen az egyenletek számát is igyekeznek m-ről 1-re csökkenteni. Ezután a kapott egyismeretlenes, de rendszerint magas fokszámú algebrai polinom, mint egyenlet már numerikusan egyszerűen megoldható, azaz gyökei numerikusan meghatározhatók.

Ezen az elven alapulnak az itt alkalmazásra kerülő módszerek (Gröbner bázis, Dixon rezultáns) alkalmazása is. Természetesen mindkét eljárásnak vannak előnyei és hátrányai is. Bizonyos esetekben a Gröbner bázisok a hatékonyabbak, más esetekben pedig a Dixon rezultáns. Általában mindkét módszerrel ugyanarra az eredményre jutunk, de lényeges különbségek lehetnek a számítási időigény tekintetében. A dolgot még bonyolíthatja, hogy mind a Gröbner bázisok mind a Dixon rezultáns előállítása is különböző algoritmusokkal lehetséges, pl. Buchberger ill. Gröbner-walk algoritmus a Gröbner bázisok előállítására (Quoc-Nam Tran 2000), a Dixon rezultáns esetében pedig a Kapur-Saxena-Yang algoritmus (Kapur et al 1994), és Lewis EDF algoritmusa (Lewis 2002, 2008).
A kutatásaink során 3 módszert vizsgáltunk: Dixon rezultánst Kapur-Saxena-Yang módszerével és az EDF módszerrel, illetve Gröbner bázisokat, aminél a Gröbner-walk algoritmust alkalmaztuk. Ezeket a megoldásokat mutatjuk be röviden a térbeli affin transzformáció esetében.

3 Térbeli affin transzformáció

3.1 A transzformáció hagyományos felírása

A Helmert-féle 7 paraméteres térbeli hasonlósági transzformáció általánosítása a 9 paraméteres térbeli affin transzformáció. Térbeli affin transzformáció esetében a három eltolási paraméter (X_0, Y_0, Z_0), három tengely körüli forgatás (α, β, γ) mellett 3 méretarány tényező (m_1, m_2, m_3) kerül alkalmazásra a három koordinátatengely irányában, szemben a hasonlósági transzformáció egyetlen méretarány tényezőjével.

A 9 paraméteres affin transzformáció alkalmazásával kisebb maradék ellentmondásokat kaphatunk, mint a 7 paraméteres hasonlósági esetében (Papp és Szűcs 2005).
A transzformáció matematikai alakja P_i pontra felírva:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \underset{[3x3]}{\boldsymbol{M}} \underset{[3\times3]}{\boldsymbol{R}} \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}, \tag{1}$$

ahol (X_i, Y_i, Z_i) illetve (x_i, y_i, z_i) a P_i pont koordinátái az első és a második referencia rendszerben, $\boldsymbol{R}$ a forgatási mátrix, (X_0, Y_0, Z_0) a három eltolási paraméter, $\boldsymbol{M}$ pedig a méretarány tényezőket tartalmazó diagonál mátrix:

$$\boldsymbol{M} = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{pmatrix} \tag{2}$$

A forgatási mátrixot hagyományosan három egymást követő tengely körüli forgatással adjuk meg:

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{R_1}(\alpha)\, \boldsymbol{R_2}(\beta)\, \boldsymbol{R_3}(\gamma)\,. \tag{3}$$

A forgatások:

$$\boldsymbol{R_1}(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}, \boldsymbol{R_2}(\beta) = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix}, \boldsymbol{R_3}(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{4}$$

azaz

$$\boldsymbol{R}(\alpha,\beta,\gamma) = \begin{pmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \cos\beta\sin\gamma & -\sin\beta \\ \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \sin\alpha\cos\beta \\ \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\cos\beta \end{pmatrix}. \tag{5}$$

3.2 Átalakítások az algebrai alakban történő felíráshoz

A tengely körüli forgatási szögek használata nagyon szemléletes, de felírásuk nehézkes, matematikailag nehezen kezelhetők.

Az $\boldsymbol{R}$ forgatási mátrix előállítható egy ferdén szimmetrikus $\boldsymbol{S}$ mátrix segítségével is (Somogyi 1969, Awange és Grafarend 2005):

$$\boldsymbol{S} = \begin{pmatrix} 0 & -c & b \\ c & 0 & -a \\ -b & a & 0 \end{pmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{R} = (\boldsymbol{I_3} - \boldsymbol{S})^{-1}(\boldsymbol{I_3} + \boldsymbol{S}), \tag{7}$$

ahol $\boldsymbol{I_3}$ egy 3x3-as egységmátrix, azaz kifejtve

$$\boldsymbol{R} = \begin{pmatrix} \frac{1+a^2-b^2-c^2}{1+a^2+b^2+c^2} & \frac{2(ab-c)}{1+a^2+b^2+c^2} & \frac{2(b+ac)}{1+a^2+b^2+c^2} \\ \frac{2(ab+c)}{1+a^2+b^2+c^2} & \frac{1-a^2+b^2-c^2}{1+a^2+b^2+c^2} & \frac{2(-a+bc)}{1+a^2+b^2+c^2} \\ \frac{2(-b+ac)}{1+a^2+b^2+c^2} & \frac{2(a+bc)}{1+a^2+b^2+c^2} & \frac{1-a^2-b^2+c^2}{1+a^2+b^2+c^2} \end{pmatrix}. \tag{8}$$

A ferdén szimmetrikus mátrix segítségével felírt forgatási mátrix elemeinek felhasználásával a forgatási szögek is kiszámíthatóak az (5) szerinti felírás alapján:

$$\alpha = \arctan\frac{r_{23}}{r_{33}}, \quad \beta = \arctan\frac{-r_{13}}{\sqrt{r_{11}^2 + r_{12}^2}}, \quad \gamma = \arctan\frac{r_{12}}{r_{11}}, \tag{9}$$

ahol $r_{i,j}$ –k a (8) formula szerint felírt forgatási mátrix elemei.

Az egyszerűbb egyenletek felírása miatt a szimbolikus megoldáshoz vezessük be a következő változókat:

$$\sigma_1 = \frac{1}{m_1}, \quad \sigma_2 = \frac{1}{m_2}, \quad \sigma_3 = \frac{1}{m_3}, \quad \underset{[3x3]}{\boldsymbol{\Omega}} = \underset{[3x3]}{\boldsymbol{M}}^{-1}, \tag{10}$$

azaz

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix}. \tag{11}$$

A fenti változók segítségével és a ferdén szimmetrikus $\boldsymbol{S}$ mátrix felhasználásával felírt forgatási mátrixszal az (1) egyenlet megadható a következő alakban:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \boldsymbol{\Omega}^{-1} \cdot (\boldsymbol{I_3} - \boldsymbol{S})^{-1}(\boldsymbol{I_3} + \boldsymbol{S}) \cdot \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \tag{12}$$

Mindkét oldalt $(\boldsymbol{I_3} - \boldsymbol{S}) \cdot \boldsymbol{\Omega}$ taggal balról beszorozva, majd nullára rendezve kapjuk:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = (\boldsymbol{I_3} - \boldsymbol{S}) \cdot \boldsymbol{\Omega} \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} - (\boldsymbol{I_3} + \boldsymbol{S}) \cdot \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} - (\boldsymbol{I_3} - \boldsymbol{S}) \cdot \boldsymbol{\Omega} \cdot \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}, \tag{13}$$

végül behelyettesítve $\boldsymbol{\Omega}$ és $\boldsymbol{S}$ mátrixokat, P_i pontra a következő 3 egyenletet írhatjuk fel (mátrixos alakban):

$$\begin{pmatrix}0\\0\\0\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1 & c & -b\\ -c & 1 & a\\ b & -a & 1\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\sigma_1 & 0 & 0\\ 0 & \sigma_2 & 0\\ 0 & 0 & \sigma_3\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}x_i\\ y_i\\ z_i\end{pmatrix}$$
$$-\begin{pmatrix}1 & -c & b\\ c & 1 & -a\\ -b & a & 1\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}X_i\\ Y_i\\ Z_i\end{pmatrix}-\begin{pmatrix}1 & c & -b\\ -c & 1 & a\\ b & -a & 1\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\sigma_1 & 0 & 0\\ 0 & \sigma_2 & 0\\ 0 & 0 & \sigma_3\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}X_0\\ Y_0\\ Z_0\end{pmatrix} \tag{14}$$

4 A 3-pont probléma

A 9 paraméter (a, b, c, σ_1, σ_2, σ_3, X_0, Y_0, Z_0) meghatározásához 9 egyenlet felírására van szükség. Egy közös pont felhasználásával, melynek a térbeli derékszögű koordinátái mindkét rendszerben ismertek, 3 egyenlet írható fel a (14) szerint, tehát az összes paraméter meghatározásához legalább 3 közös pontra szükség van. Ekkor 9 egyenletet tudunk felírni. Nevezzük f_i-vel a nullára rendezett egyenleteket. Ezek az egyenletek a 9 ismeretlenre nézve algebrai, nemlineáris egyenletek, mivel az ismeretlenek szorzatai is szerepelnek bennük (15).

$$\begin{aligned}
f_1 &= -X_1 + cY_1 - bZ_1 + x_1\sigma_1 - X_0\sigma_1 + cy_1\sigma_2 - cY_0\sigma_2 - bz_1\sigma_3 + bZ_0\sigma_3\\
f_2 &= -cX_1 - Y_1 + aZ_1 - cx_1\sigma_1 + cX_0\sigma_1 + y_1\sigma_2 - Y_0\sigma_2 + az_1\sigma_3 - aZ_0\sigma_3\\
f_3 &= bX_1 - aY_1 - Z_1 + bx_1\sigma_1 - bX_0\sigma_1 - ay_1\sigma_2 + aY_0\sigma_2 + z_1\sigma_3 - Z_0\sigma_3\\
f_4 &= -X_2 + cY_2 - bZ_2 + x_2\sigma_1 - X_0\sigma_1 + cy_2\sigma_2 - cY_0\sigma_2 - bz_2\sigma_3 + bZ_0\sigma_3\\
f_5 &= -cX_2 - Y_2 + aZ_2 - cx_2\sigma_1 + cX_0\sigma_1 + y_2\sigma_2 - Y_0\sigma_2 + az_2\sigma_3 - aZ_0\sigma_3\\
f_6 &= bX_2 - aY_2 - Z_2 + bx_2\sigma_1 - bX_0\sigma_1 - ay_2\sigma_2 + aY_0\sigma_2 + z_2\sigma_3 - Z_0\sigma_3\\
f_7 &= -X_3 + cY_3 - bZ_3 + x_3\sigma_1 - X_0\sigma_1 + cy_3\sigma_2 - cY_0\sigma_2 - bz_3\sigma_3 + bZ_0\sigma_3\\
f_8 &= -cX_3 - Y_3 + aZ_3 - cx_3\sigma_1 + cX_0\sigma_1 + y_3\sigma_2 - Y_0\sigma_2 + az_3\sigma_3 - aZ_0\sigma_3\\
f_9 &= bX_3 - aY_3 - Z_3 + bx_3\sigma_1 - bX_0\sigma_1 - ay_3\sigma_2 + aY_0\sigma_2 + z_3\sigma_3 - Z_0\sigma_3
\end{aligned} \tag{15}$$

A (15) nemlineáris algebrai egyenletrendszer megoldására különböző módszereket alkalmazhatunk. Néhány általunk is alkalmazott módszert láthatunk az 1. ábrán.

Az 1. ábrán vázolt módszerek közül ebben a cikkben a szimbolikus megoldási módszereket ismertetjük.

5 Egyenletek egyszerűsítése a szimbolikus megoldáshoz

A (15) egyenletrendszer tanulmányozva észrevehetjük, hogy a következő hat különbségképzéssel kiküszöbölhetőek az X_0, Y_0, Z_0 eltolási paraméterek:

$$
\begin{aligned}
g_1 &= f_1 - f_7 = -X_1 + X_3 + (x_1 - x_3)\sigma_1 + c\left(Y_1 - Y_3 + (y_1 - y_3)\sigma_2\right) + b\left(-Z_1 + Z_3 + (-z_1 + z_3)\sigma_3\right)\\
g_2 &= f_4 - f_7 = -X_2 + X_3 + (x_2 - x_3)\sigma_1 + c\left(Y_2 - Y_3 + (y_2 - y_3)\sigma_2\right) + b\left(-Z_2 + Z_3 + (-z_2 + z_3)\sigma_3\right)\\
g_3 &= f_2 - f_8 = -Y_1 + Y_3 + c\left(-X_1 + X_3 + (-x_1 + x_3)\sigma_1\right) + (y_1 - y_3)\sigma_2 + a\left(Z_1 - Z_3 + (z_1 - z_3)\sigma_3\right)\\
g_4 &= f_5 - f_8 = -Y_2 + Y_3 + c\left(-X_2 + X_3 + (-x_2 + x_3)\sigma_1\right) + (y_2 - y_3)\sigma_2 + a\left(Z_2 - Z_3 + (z_2 - z_3)\sigma_3\right)\\
g_5 &= f_3 - f_9 = -Z_1 + Z_3 + b\left(X_1 - X_3 + (x_1 - x_3)\sigma_1\right) + a\left(-Y_1 + Y_3 + (-y_1 + y_3)\sigma_2\right) + (z_1 - z_3)\sigma_3\\
g_6 &= f_6 - f_9 = -Z_2 + Z_3 + b\left(X_2 - X_3 + (x_2 - x_3)\sigma_1\right) + a\left(-Y_2 + Y_3 + (-y_2 + y_3)\sigma_2\right) + (z_2 - z_3)\sigma_3
\end{aligned}
\tag{16}
$$

A megmaradt hat egyenlet már csak hat ismeretlent tartalmaz (a, b, c, σ_1, σ_2, σ_3).

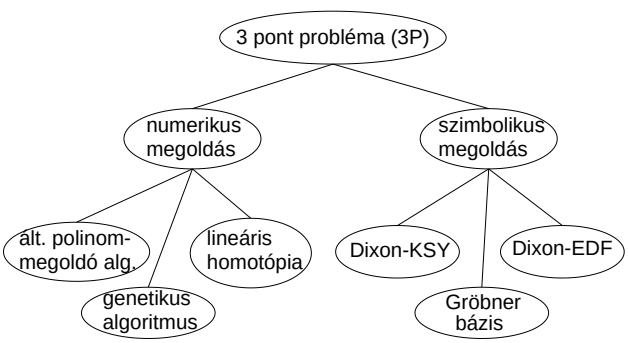
Az egyenletrendszer felírása tovább egyszerűsíthető néhány új állandó bevezetésével a koordináták különbségeire, melyeket a későbbiekben relatív koordinátáknak nevezünk:

$$
\left.
\begin{aligned}
X_{ij} = X_i - X_j, Y_{ij} = Y_i - Y_j, Z_{ij} = Z_i - Z_j\\
x_{ij} = x_i - x_j, y_{ij} = y_i - y_j, z_{ij} = z_i - z_j
\end{aligned}
\right\} \rightarrow i, j \in \{1,2,3\}, i \neq j
\tag{17}
$$

Az új relatív koordinátákkal az egyenletrendszer együtthatóinak felírása tovább egyszerűsödik:

$$
\begin{aligned}
g_1 &= -X_{13} + x_{13}\sigma_1 + cY_{13} + cy_{13}\sigma_2 - bZ_{13} - bz_{13}\sigma_3\\
g_2 &= -X_{23} + x_{23}\sigma_1 + cY_{23} + cy_{23}\sigma_2 - bZ_{23} - bz_{23}\sigma_3\\
g_3 &= -Y_{13} - cX_{13} - cx_{13}\sigma_1 + y_{13}\sigma_2 + aZ_{13} + az_{13}\sigma_3\\
g_4 &= -Y_{23} - cX_{23} - cx_{23}\sigma_1 + y_{23}\sigma_2 + aZ_{23} + az_{23}\sigma_3\\
g_5 &= -Z_{13} + bX_{13} + bx_{13}\sigma_1 - aY_{13} - ay_{13}\sigma_2 + z_{13}\sigma_3\\
g_6 &= -Z_{23} + bX_{23} + bx_{23}\sigma_1 - aY_{23} - ay_{23}\sigma_2 + z_{23}\sigma_3
\end{aligned}
\tag{18}
$$

A szimbolikus megoldások esetében ennek az egyenletrendszernek a megoldását keressük.



1. ábra Néhány megoldási módszer a 3-pont problémára

6 Megoldás Dixon rezultánssal, Kapur-Saxen-Yang módszerével

A nemlineáris algebrai egyenletek megoldására szolgáló Dixon rezultáns 1908-ból származik. Dixon általánosította Cayley formuláját a Bezout módszerre vonatkozóan, két algebrai egyenlet megoldásáról három egyenletre. A módszer újabb általánosítását Kapur et al. (1994) adta meg.

Nézzük meg a módszer alapelvét két változóra bemutatva. Legyen $f(x)$ és $g(x)$ két polinom, x független változóval. Legyen *deg* egyenlő f és g maximális fokszámával, a pedig legyen egy segédváltozó. Ekkor a következő összefüggést, amely egy szimmetrikus polinom x-re és a-ra és fokszáma

egyenlő (*deg*-1)-gyel, *f* és *g* Dixon polinomjának nevezzük:

$$\delta(x,a)=\frac{1}{x-a}\begin{vmatrix} f(x) & g(x) \\ f(a) & g(a) \end{vmatrix}. \tag{19}$$

$\delta(x,a)$ értéke *f* és *g* közös zérushelyeinél mindig nulla lesz, függetlenül *a*-tól. Ebből következik, hogy a $\delta(x,a)$ kifejezésben, a polinomok közös gyökeinél az *a* minden hatványának együtthatója (a^i) egyenlő nullával.

Ezt a feltételt felírhatjuk mátrixos alakban, ahol az ***M*** mátrix oszlopaiban a^i együtthatói szerepelnek. Az egyenletrendszernek csak akkor lesz a triviálistól eltérő megoldása, ha az ***M*** mátrix *D* determinánsa zérus. *D*-t az *f* és *g* polinomok Dixon rezultánsának nevezik, ***M*** pedig a megfelelő Dixon mátrix. Az előbbiekből következik, hogy a Dixon rezultáns zérus értéke szükséges feltétel az *f* és *g* közös zérushelyének létezésére. A módszer részletesebb leírását és néhány geodéziai példára történő alkalmazását mutatja be Paláncz et al. (2008).

A térbeli affin transzformáció esetében, a 6 egyenletből álló (18) egyenletrendszer megoldása Kapur et al. (1994) módszerével csak több lépésen keresztül volt lehetséges (Zaletnyik 2008):

1) A 6 nemlineáris egyenletből Dixon rezultáns használatával kiküszöbölhetők az *a, b, c* paraméterek, így marad 3 algebrai egyenlet, amiben már csak σ_1, σ_2, σ_3 ismeretlenek (a három méretarány tényező reciprokai) szerepelnek.
2) A 3 méretarány tényező reciprokát tartalmazó egyenletrendszer a Dixon rezultáns használatával tovább egyszerűsíthető két egyenletből álló, 2 méretarány tényező reciprokát, mint ismeretlent tartalmazó egyenletrendszerré.
3) A megmaradt 2 egyenletből szintén Dixon rezultáns alkalmazásával kiküszöbölhető az egyik ismeretlen és egy egyváltozós polinomot kapunk σ_1-re.

$$\begin{aligned} &W_0+W_1\sigma_1+W_2\sigma_1^2+W_3\sigma_1^3+W_4\sigma_1^4+W_5\sigma_1^5+W_6\sigma_1^6+W_7\sigma_1^7+W_8\sigma_1^8+W_9\sigma_1^9 \\ &+W_{10}\sigma_1^{10}+W_{11}\sigma_1^{11}+W_{12}\sigma_1^{12}+W_{13}\sigma_1^{13}+W_{14}\sigma_1^{14}+W_{15}\sigma_1^{15}+W_{16}\sigma_1^{16}+W_{17}\sigma_1^{17} \\ &+W_{18}\sigma_1^{18}+W_{19}\sigma_1^{19}+W_{20}\sigma_1^{20}+W_{21}\sigma_1^{21}+W_{22}\sigma_1^{22}+W_{23}\sigma_1^{23}+W_{24}\sigma_1^{24}+W_{25}\sigma_1^{25} \\ &+W_{26}\sigma_1^{26}+W_{27}\sigma_1^{27}+W_{28}\sigma_1^{28}+W_{29}\sigma_1^{29}=0 \end{aligned} \tag{20}$$

A kapott egyváltozós polinom 29-ed fokú σ_1-re, és több valós, nem negatív gyöke van.

A megoldást leegyszerűsíti az a tény, hogy a megmaradt ismeretlen az egyik méretarány tényező reciproka, amire az ismert pontok koordinátái alapján jó közelítő értéket tudunk adni (Zaletnyik 2008). A kezdeti érték meghatározása után pedig a másodrendű konvergenciát biztosító Newton-Raphson módszer alkalmazásával megkereshetjük az algebrai polinom megfelelő zérushelyét σ_1-re.

7 Megoldás Dixon rezultánssal, EDF módszerrel

A Dixon mátrix determinánsának kiszámítása, felírása nehézségekbe ütközhet, ha túl nagy méretű a mátrixunk. Ez okozta a problémát az affin transzformáció Dixon KSY módszerével történő közvetlen megoldásánál is. Általában azonban nincs is szükség feltétlenül a determináns kifejtésére, elég, ha szorzótényezőkre bontva felírjuk. Könnyebbé teszi a számítást, ha elemi átalakításokkal egyszerűsítjük a mátrixot és szorzótényezőket emelünk ki belőle, lehetőség szerint lecsökkentve ezzel a mátrix méretét is.

Erre dolgozott ki egy heurisztikus eljárást Robert H. Lewis (2002, 2008), „az *Early Discovery of Factors"* módszerét és ezt a módszert alkalmazza a Lewis által kifejlesztett *Fermat* elnevezésű számítógépes algebrai rendszer.

Robert Lewis professzorral együttműködve, a *Fermat* számítógépes algebrai rendszer alkalmazásával, Dixon-EDF módszerrel is meghatározásra került a σ_1-re vonatkozó egyváltozós polinom.

Ezzel a módszerrel a 6 ismeretlenes egyenletrendszerből közvetlenül meghatározható ez a polinom, szorzat alakban.

Az eredményt ebben az esetben a következő formában kapjuk meg:

$$\prod_{i=1}^{5} \varphi_i(\sigma_1)^{K_i} \tag{21}$$

Ahol $\varphi_i(\sigma_1)$-k alacsony fokszámú polinomok, de a K_i kitevők igen nagy pozitív számok is lehetnek, ezért kifejtve akár több millió tagból is állhat a szorzatként kapott polinom!

Ebben az esetben a kapott 5 tényező ($\varphi_i(\sigma_1)$) a következő:

$$\begin{aligned}
\varphi_1 &= y_{13}\, z_{23} - y_{23}\, z_{13} \\
\varphi_2 &= Z_{13}\, z_{23} - Z_{23}\, z_{13} \\
\varphi_3 &= x_{13}\, y_{23}\, \sigma_1 - x_{23}\, y_{13}\, \sigma_1 + X_{13}\, y_{23} - X_{23}\, y_{13} \\
\varphi_4 &= x_{13}^2\, y_{23}\, z_{23}\, \sigma_1^2 - x_{13}\, x_{23}\, y_{13}\, z_{23}\, \sigma_1^2 - x_{13}\, x_{23}\, y_{23}\, z_{13}\, \sigma_1^2 + x_{23}^2\, y_{13}\, z_{13}\, \sigma_1^2 \\
&\quad - Z_{13}^2\, y_{23}\, z_{23} - Y_{13}^2\, y_{23}\, z_{23} - X_{13}^2\, y_{23}\, z_{23} + Z_{13}\, Z_{23}\, y_{13}\, z_{23} \\
&\quad + Y_{13}\, Y_{23}\, y_{13}\, z_{23} + X_{13}\, X_{23}\, y_{13}\, z_{23} + Z_{13}\, Z_{23}\, y_{23}\, z_{13} + Y_{13}\, Y_{23}\, y_{23}\, z_{13} \\
&\quad + X_{13}\, X_{23}\, y_{23}\, z_{13} - Z_{23}^2\, y_{13}\, z_{13} - Y_{23}^2\, y_{13}\, z_{13} - X_{23}^2\, y_{13}\, z_{13} \\
\varphi_5 &= Z_{13}\, x_{13}\, x_{23}\, z_{23}\, \sigma_1^2 - Z_{23}\, x_{13}^2\, z_{23}\, \sigma_1^2 - Z_{13}\, x_{23}^2\, z_{13}\, \sigma_1^2 + Z_{23}\, x_{13}\, x_{23}\, z_{13}\, \sigma_1^2 \\
&\quad + X_{13}\, Z_{13}\, x_{23}\, z_{23}\, \sigma_1 - 2\, X_{13}\, Z_{23}\, x_{13}\, z_{23}\, \sigma_1 + X_{23}\, Z_{13}\, x_{13}\, z_{23}\, \sigma_1 \\
&\quad + X_{13}\, Z_{23}\, x_{23}\, z_{13}\, \sigma_1 - 2\, X_{23}\, Z_{13}\, x_{23}\, z_{13}\, \sigma_1 + X_{23}\, Z_{23}\, x_{13}\, z_{13}\, \sigma_1 \\
&\quad - X_{13}^2\, Z_{23}\, z_{23} + X_{13}\, X_{23}\, Z_{13}\, z_{23} + X_{13}\, X_{23}\, Z_{23}\, z_{13} - X_{23}^2\, Z_{13}\, z_{13}
\end{aligned} \tag{22}$$

A szorzótényezők közül ki kell választani a helyes (pozitív, valós) megoldást szolgáltató polinomot. Több pozitív, valós megoldás esetén a korábban már alkalmazott kezdeti érték segíthet a helyes megoldás kiválasztásában. Ez σ_1-re a φ_4 polinom lesz a (22) képletei közül. Mivel ez egy másodfokú polinom, a megoldás megadható analitikus alakban is.

Ugyanígy meghatározhatóak a σ_2 és σ_3 megoldását szolgáltató másodfokú polinomok is.

8 Megoldás Gröbner bázisokkal

A Gröbner bázisok módszerét nemlineáris többváltozós egyenletrendszerek megoldására Wolfgang Gröbner javasolta 1949-ben. Tanítványa Bruno Buchberger dolgozta ki részletesen 1965-ben, és nevezte el az alkalmazott formulát tanáráról Gröbner bázisnak (közben, mint az a matematikában gyakori, tőlük függetlenül 1964-ben Hironaka is alkalmazta ugyanazt).

A Gröbner bázisokat a nemlineáris, többváltozós egyenletrendszerek „legnagyobb közös osztói”-nak is nevezik. A Buchberger által kidolgozott eljárás analóg a lineáris egyenletrendszerek Gauss eliminációs megoldásával. Ma ez az egyik legismertebb módszer nemlineáris többváltozós egyenletrendszerek megoldására. Mivel a megoldás során polinomosztás kerül alkalmazásra, fontos az osztás sorrendjének, a monomiál sorrendnek a megadása. Különböző sorrendek más eredményt szolgáltathatnak, mivel többváltozós esetben a polinomosztás nem egyértelmű, függ az osztók sorrendjétől.

A 6 ismeretlenes egyenletrendszer közvetlen megoldása az általunk alkalmazott *Mathematica* rendszerbe implementált redukált Gröbner bázisok alkalmazásával első közelítésben nem sikerült, Daniel Lichtblau professzor, a Wolfram Research kutatója, hívta fel a figyelmünket, hogy a monomiál sorrend változtatásával megoldható a probléma. A *Mathematica* számítógépes algebrai rendszerben az alábbi formulával végül egy lépésben sikerült megoldani a feladatot σ_1 változóra.

$\sigma_1 = GroebnerBasis\ [\{g_1,g_2,g_3,g_4,g_5,g_6\},\ \sigma_1,\ \{a,b,c,\sigma_2,\sigma_3\},\ MonomialOrder \rightarrow EliminationOrder]$

Gröbner bázisok alkalmazásával egyetlen lépésben mind σ_1-re, mind σ_2-re, illetve σ_3-ra egy-egy másodfokú polinomot kapunk, amely megegyezik a Dixon-EDF módszerrel a jó megoldást szolgáltató polinomokkal.

Így egy teljesen egzakt megoldás adható a térbeli affin transzformációra 3 közös pont ismerete esetén.

9 Eredmények - megoldások a 9 paraméterre analitikus alakban

A σ_1, σ_2, σ_3-ra kapott szimbolikus megoldások:

$$\begin{aligned}\sigma_1 = \Big[& X_{23}^2 y_{13} z_{13} + y_{13} Y_{23}^2 z_{13} + X_{13}^2 y_{23} z_{23} + Y_{13}^2 y_{23} z_{23} + y_{23} Z_{13}^2 z_{23} \\ & - X_{13} X_{23}(y_{23} z_{13} + y_{13} z_{23}) - Y_{13} Y_{23}(y_{23} z_{13} + y_{13} z_{23}) - y_{23} z_{13} Z_{13} Z_{23} \\ & - y_{13} Z_{13} z_{23} Z_{23} + y_{13} z_{13} Z_{23}^2 \Big]^{1/2} \\ & / \left[(x_{23} y_{13} - x_{13} y_{23})(x_{23} z_{13} - x_{13} z_{23})\right]^{1/2}\end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned}\sigma_2 = \Big[& -X_{13}^2 x_{23} z_{23} + X_{13} X_{23}(x_{23} z_{13} + x_{13} z_{23}) + x_{23}(Y_{13} Y_{23} z_{13} - Y_{13}^2 z_{23} - Z_{13}^2 z_{23} \\ & + z_{13} Z_{13} Z_{23}) - x_{13}\left(X_{23}^2 z_{13} + Y_{23}^2 z_{13} - Y_{13} Y_{23} z_{23} - Z_{13} z_{23} Z_{23} + z_{13} Z_{23}^2\right)\Big]^{1/2} \\ & / \left[-(x_{23} y_{13} - x_{13} y_{23})(-y_{23} z_{13} + y_{13} z_{23})\right]^{1/2}\end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}\sigma_3 = \Big[& X_{13}^2 x_{23} y_{23} - X_{13} X_{23}(x_{23} y_{13} + x_{13} y_{23}) \\ & + x_{23}\left(Y_{13}^2 y_{23} - y_{13} Y_{13} Y_{23} + y_{23} Z_{13}^2 - y_{13} Z_{13} Z_{23}\right) \\ & + x_{13}\left(X_{23}^2 y_{13} - Y_{13} y_{23} Y_{23} + y_{13} Y_{23}^2 - y_{23} Z_{13} Z_{23} + y_{13} Z_{23}^2\right)\Big]^{1/2} \\ & / \left[(x_{23} z_{13} - x_{13} z_{23})(y_{23} z_{13} - y_{13} z_{23})\right]^{1/2}\end{aligned} \tag{25}$$

A σ_1, σ_2, σ_3 ismeretében a (18) egyenletrendszer lineáris lesz, így a, b, c is könnyen kifejezhető:

$$\begin{aligned}a = & -[-X_{23}Y_{13} + X_{13}Y_{23} + (X_{23}y_{13} - X_{13}y_{23})\sigma_2 + \sigma_1(-x_{23}Y_{13} + x_{13}Y_{23} + (x_{23}y_{13} - x_{13}y_{23})\sigma_2)]/ \\ & [X_{23}Z_{13} - X_{13}Z_{23} + (X_{23}z_{13} - X_{13}z_{23})\sigma_3 + \sigma_1(x_{23}Z_{13} - x_{13}Z_{23} + (x_{23}z_{13} - x_{13}z_{23})\sigma_3)] \\ b = & -[-Y_{23}Z_{13} + Y_{13}Z_{23} + (Y_{23}z_{13} - Y_{13}z_{23})\sigma_3 + \sigma_2(-y_{23}Z_{13} + y_{13}Z_{23} + (y_{23}z_{13} - y_{13}z_{23})\sigma_3)]/ \\ & [-X_{23}Y_{13} + X_{13}Y_{23} + (-X_{23}y_{13} + X_{13}y_{23})\sigma_2 + \sigma_1(-x_{23}Y_{13} + x_{13}Y_{23} + (-x_{23}y_{13} + x_{13}y_{23})\sigma_2)] \\ c = & -[X_{23}Z_{13} - X_{13}Z_{23} + (X_{23}z_{13} - X_{13}z_{23})\sigma_3 + \sigma_1(-x_{23}Z_{13} + x_{13}Z_{23} + (-x_{23}z_{13} + x_{13}z_{23})\sigma_3)]/ \\ & [-Y_{23}Z_{13} + Y_{13}Z_{23} + (-Y_{23}z_{13} + Y_{13}z_{23})\sigma_3 + \sigma_2(-y_{23}Z_{13} + y_{13}Z_{23} + (-y_{23}z_{13} + y_{13}z_{23})\sigma_3)]\end{aligned} \tag{26}$$

A σ_1, σ_2, σ_3 és a, b, c ismeretében meghatározhatóak az eltolási paraméterek is, a transzformáció eredeti alakjába (1) visszahelyettesítve ezeket:

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} - \boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{R}\cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} - \boldsymbol{\Omega}^{-1}\cdot\boldsymbol{R}\cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1/\sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sigma_3 \end{pmatrix} \cdot$$
$$\cdot \frac{1}{1+a^2+b^2+c^2} \cdot \begin{pmatrix} 1+a^2-b^2-c^2 & 2(ab-c) & 2(b+ac) \\ 2(ab+c) & 1-a^2+b^2-c^2 & 2(-a+bc) \\ 2(-b+ac) & 2(a+bc) & 1-a^2-b^2+c^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \tag{27}$$

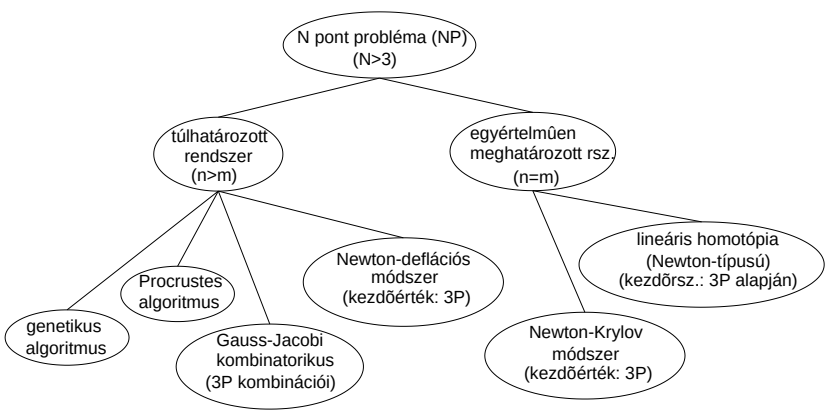
10 Összefoglalás, az eredmények további hasznosítási lehetőségei

Több különböző módszert vizsgáltunk meg a 9 paraméteres térbeli affin transzformáció szimbolikus megoldására. Két algoritmust a Dixon módszerre és egyet a Gröbner bázisok alkalmazására. A 3 módszer közül ebben az esetben a Gröbner bázisok alkalmazása volt a legsikeresebb, ami a legegyszerűbb, legelegánsabb megoldást szolgáltatta egyetlen másodfokú polinomot eredményezve mindhárom méretarány tényező reciprokára vonatkozóan. A Dixon EDF módszer első és másodfokú tényezők szorzatát adta eredményül. Ebben az esetben ki kellett választani a helyes megoldást szolgáltató tényezőt, ami egyébként megegyezik a Gröbner bázisokkal kapott alakkal. A legbonyolultabb megoldást a Dixon KSY módszer szolgáltatta egy 29-ed fokú polinomot adva.

A cikkben igyekeztünk röviden bemutatni néhányat az algebrai egyenletrendszerek megoldási módszerei közül, a térbeli affin transzformáció példáján keresztül. Ezeket sok geodéziai feladatnál lehet alkalmazni és sokszor célszerű több módszert is megvizsgálni egy-egy feladatnál, mert a különböző típusú feladatok esetén más és más módszer használata lehet célravezetőbb. A 7 paraméteres térbeli hasonlósági transzformáció esetében például a Dixon rezultáns (KSY algoritmusa) bizonyult hatékonyabbnak, szemben a Gröbner bázisokkal (Paláncz et al. 2008).

A jelen esetben leghatékonyabbnak bizonyuló Gröbner bázisok eredményeit felhasználva megadtuk a 9 paraméteres affin transzformáció 9 paraméterének meghatározására szolgáló egyenleteket analitikus alakban, a minimálisan szükséges 3 közös pont ismeretében.

Természetesen a geodéziai gyakorlatban mindig vannak fölös méréseink, többnyire túlhatározott egyenletrendszereket kell megoldani. Ennek a túlhatározott egyenletrendszernek a megoldásában is sokat segíthet az itt megadott 3-pont probléma szimbolikus megoldása. Az eredeti túlhatározott egyenletrendszert megoldhatjuk például a Gauss-Jacobi kombinatorikus módszerrel, ahol az összes kombinációban meghatározzuk a 3-pont problémát és ezek súlyozott átlaga lesz az eredmény (Awange és Grafarend 2005), vagy alkalmazhatunk valamilyen Newton-típusú lokális módszert,



2. ábra Az *N*-pont probléma néhány megoldási lehetősége (*n* a független egyenletek száma, *m* az ismeretlenek száma, *N* az azonos pontok száma, *3P* pedig a 3-pont probléma megoldása)

kezdeti értéknek használva a 3-pont probléma eredményét. Illetve át is alakíthatjuk az eredeti túlhatározott egyenletrendszert egy egyértelműen meghatározott rendszerré, négyzetre emelve a célfüggvényt és változók szerint deriválva azt (Zaletnyik 2008), majd ezt is megoldhatjuk akár egy Newton típusú módszerrel vagy lineáris homotópiát alkalmazva (Paláncz B.: Introduction to Linear Homotopy. http://library.wolfram.com/infocenter/MathSource/7119/). Végezetül a 2. ábrán bemutatjuk a továbblépést jelentő *N*-pont probléma néhány lehetséges megoldási módszerét.

Köszönetnyilvánítás. A szerzők szeretnék megköszönni Robert Lewis professzornak a Fordham Egyetemről és Daniel Lichtblau professzornak a Wolfram Research kutatójának a közreműködését. Előbbinek a probléma sikeres megoldását a Dixon EDF módszerrel a *Fermat* rendszerrel, utóbbinak a tanácsát a Gröbner bázisok megfelelő alkalmazására vonatkozóan a *Mathematica* rendszerben.

Hivatkozások

Ádám J, Bányai L, Borza T, Busics Gy, Kenyeres A, Krauter A, Takács B (2004): Műholdas helymeghatározás, Műegyetemi Kiadó, Budapest.

Awange JL, Grafarend EW (2003): Closed form solution of the overdetermined nonlinear 7 parameter datum transformation. Allgemeine Vermessungs Nachrichten, 110, 130-148.

Awange JL, Grafarend EW, Fukuda Y (2004): Exact solution of the nonlinear 7-parameter datum transformation by Groebner basis, Bolletino di Geodesia e Scienze Affini, 2, 117-127.

Awange JL, Grafarend EW (2005): Solving Algebraic Computational Problems in Geodesy and Geoinformatics, Springer, Berlin.

Bancroft S (1985): An algebraic solution of the GPS equations, IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems AES-21, 56-59.

Grafarend EW, Shan J (1996): Closed-form solution of the nonlinear pseudoranging equations (GPS), Artificial Satellites, Planetary Geodesy 31, 133-147

Halmos F (1980): Geodéziai hálózatok közötti transzformációk matematikai modelljei. Geodézia és Kartográfia, 2, 97-104.

Kapur D, Saxena T, Yang L (1994): Algebraic and geometric reasoning using Dixon resultants. In: ACM ISSAC 94. Oxford, England, July 1994, 99-107.

Kleusberg A (2003): Analytical GPS navigation solution. In Grafarend EW., Krumm FW. and Schwarze VS. (eds) Geodesy the Challenge of the 3rd Millennium, Springer, Heidelberg, 93-96.

Lewis R H (2002): Using the Dixon resultant on big problems. in CBMS Conference, Texas A&M University.

Lewis R H (2008): Heuristics to Accelerate the Dixon Resultant. Mathematics and Computers in Simulation, 77(4), 400-407.

Mathes A (2002): EasyTrans Pro-Edition, Professionelle Koordinatentransformation für Navigation, Vermessung und GIS, ISBN 978-3-87907-367-2, CD-ROM mit Benutzerhandbuch.

Paláncz B, Zaletnyik P, Awange JL, Grafarend EW (2008): Dixon resultant's solution of nonlinear systems of geodetic equations, Journal of Geodesy, 82, 505-511.

Papp E, Szűcs L (2005): Földi és műholdas hálózatok transzformációja, Geomatikai Közlemények, VIII, 85-92.

Quoc-Nam Tran (2000): A fast algorithm for Gröbner basis conversion and its applications, Journal of Symbolic Computation, 30(4), 451-467.

Somogyi J (1969): A forgatási mátrix elemeinek meghatározása közvetlen úton, Geodézia és Kartográfia, 4, 264-267.

Späth H (2004): A numerical method for determining the spatial Helmert transformation in case of different scale factors, Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 129, 255-257.

Watson GA (2006): Computing Helmert transformations, J. of Computational and Applied Mathematics, 197, 387-395.

Zaletnyik P, Paláncz B, Awange JL, Grafarend EW (2008): Application of Computer Algebra Systems to Geodesy, In: M. G. Sideris: Observing our Changing Earth, Springer-Verlag, 803-808.

Zaletnyik P (2008): Koordináta transzformációk megoldása számítógépes algebra és neurális hálózatok felhasználásával, PhD disszertáció, BME, Építőmérnöki Kar.

Závoti J (2005): A 7 paraméteres 3D transzformáció egzakt megoldása, Geomatikai Közlemények, VIII, 53-60.

Závoti J, Jancsó T (2006): The Solution of the 7-parameter Datum Transformation Problem with- and without the Groebner Basis, Acta Geod. Geoph. Hung., 41(1), 87–100.

DIFFERENCIÁLIS EVOLÚCIÓS ALGORITMUS ALKALMAZÁSA GEODÉZIAI HÁLÓZATOK KIEGYENLÍTÉSÉRE

*Laky Sándor**

Geodetic network adjustment using differential evolution algorithm *- Evolutionary algorithms are numerical methods for solving multivariate optimization problems. Mimicking the natural evolution of populations, they mutate and combine possible solution vectors to give birth to a next generation of solution vectors that drives the population closer to the global optimum of the objective function (besides satisfying the given conditional equations). Geodetic application of evolutionary-related algorithms is not completely novel: for example, they have been used to optimize the surveying of GPS networks, and to solve the first order network design problem. In this work differential evolution, a relatively new algorithm is proposed as a solution to the free network adjustment problem.*

Keywords: evolutionary algorithm, differential evolution, network adjustment

Az evolúciós algoritmusok többváltozós optimumszámítási feladatok megoldására kidolgozott numerikus módszerek. Lényegük, hogy a keresési térben felvett különböző megoldásvektorokat oly módon mutáljuk és keresztezzük, hogy az egyes iterációk után az új megoldásvektorok a célfüggvény értékét – a feltételi egyenletek teljesítése mellett – átlagosan egyre közelebb vigyék az optimumhoz. Az evolúciós algoritmusokkal rokon eljárások alkalmazására a geodézia területén már korábban is volt példa (pl. GPS hálózatok észlelési tervének optimalizálása, vagy geodéziai hálózatok elsőrendű tervezése). Dolgozatunkban egy viszonylag új eljárásnak, a differenciális evolúciós algoritmusnak alkalmazási lehetőségét mutatjuk be geodéziai szabadhálózatok kiegyenlítésével kapcsolatban.

Kulcsszavak: evolúciós algoritmus, differenciális evolúció, hálózatkiegyenlítés

1 Bevezetés

Az evolúciós algoritmusok (Bäck és Hoffmeister 1991) olyan sztochasztikus optimalizációs eljárások, amik biológiai közösségek fejlődésének utánzásával törekednek a szélsőértékek feltérképezésére. Fejlődésük az 1950-es években indult útjára, gyakorlati alkalmazásuk pedig a számítógépek elterjedésével együtt teljesedett ki. Az alapvető változatok a természetes evolúció eszköztárából a természetes kiválasztódást, a mutációt, és a keresztezést alkalmazzák. (Egyes, az evolúciós algoritmusokkal rokon algoritmusok még tovább mennek a biológiai elvek matematikai alkalmazásában, például hangyarajok élelemkeresési szokásait veszik alapul.) Általánosságban jellemző rájuk továbbá, hogy az optimalizálandó célfüggvénnyel kapcsolatban különösebb feltételeket (pl. linearitás, folytonosság, differenciálhatóság) nem támasztanak, és hatékonyan alkalmazhatók a globális szélsőérték, vagy több helyi szélsőérték egyidejű megkeresésére.

Dolgozatunkban a differenciális evolúciós (Storn és Prince 1997) algoritmus egy lehetséges geodéziai alkalmazását vizsgáljuk meg. Ez egy evolúciós algoritmusokkal rokon eljárás, azonban a mutációt a hagyományos eljárásokhoz képest másképp értelmezi. Az algoritmus részletes leírását a 2.3 részben közöljük.

A geodéziai alkalmazás lehetőségét egy teljesen mindennapi példán, egy geodéziai szabadhálózat kiegyenlítésén mutatjuk be. A példa tekinthető „állatorvosi lónak”, hiszen segítségével az algoritmus alkalmazásának több előnyére is rávilágíthatunk:

1. Az algoritmus nemlineáris célfüggvény esetén is alkalmazható, ami jelen esetben azt eredményezi, hogy a távolságmérés és az iránymérés közvetítő egyenletei eredeti formájukban alkalmazhatók.
2. Globális optimumkeresést végzünk lokális optimumkeresés helyett. Ez, és az 1. pontban megfogalmazott tulajdonság együtt azt eredményezi, hogy nincs szükség előzetes értékek

**MTA-BME Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport*
BME Általános és Felsőgeodézia Tanszék
1521 Budapest, Pf. 91., e-mail: laky.sandor@freemail.hu

felvételére. Mint azt a későbbiekben látni fogjuk, technikai okokból fel kell azonban venni egy intervallumot, amin belül keressük a paraméterek értékeit; illetve geodéziai szabadhálózatok esetén minimum három paraméterre szükséges előzetes értékek felvétele, azonban ezeknek pontossága – a hagyományos eljárásokkal ellentétben – nem befolyásolja a módszer konvergenciáját.

3. A célfüggvénynek nem kell differenciálhatónak lennie. Ez a gyakorlatban jelentheti egyrészt azt, hogy a célfüggvénynek nem kell matematikailag differenciálhatónak lennie (azaz rendelkezhet szakadásokkal, törésekkel), másrészt azt is, hogy a célfüggvényt megfogalmazhatjuk egy algoritmus formájában is (azaz nem kell zárt matematikai formulával megadnunk). Vizsgálataink során ezt a tulajdonságot a legkisebb négyzetek mellett más lehetséges kiegyenlítési normák bevezetésével szemléltetjük.

Az evolúciós algoritmusokkal rokon eljárások alkalmazására a geodézia területén további példákat adnak például (Saleh és Dare 2001), (Berné és Baselga 2004).

2 A vizsgálat elvi háttere

Az alábbiakban áttekintjük a vizsgálat során alkalmazott elveket és eljárásokat: a vegyeshálózat kiegyenlítésének nemlineáris közvetítő és javítási egyenleteit (Detrekői 1991), az alkalmazott kiegyenlítési normákat, a differenciális evolúciós algoritmust (Storn és Prince 1997), és ennek speciális adaptációját szabadhálózatok kiegyenlítésére.

2.1 Közvetítő és javítási egyenletek

Az „A” álláspontról a „B” irányzott pontra menő irányértéket (I_{AB}) a két pont koordinátái (Y_A, X_A, Y_B, X_B) és az álláspont a tájékozási szög (z_A) ismeretében az ismert módon számíthatjuk[1]:

$$I_{AB} = \operatorname{arctg}\frac{Y_B - Y_A}{X_B - X_A} - z_A \ . \tag{1}$$

Az irány mért értékének (L_{IAB}) ismeretében az iránymérésre vonatkozó javítás (v_{IAB}):

$$v_{IAB} = \operatorname{arctg}\frac{Y_B - Y_A}{X_B - X_A} - z_A - L_{IAB} \ . \tag{2}$$

A két pont közötti távolság (t_{AB}) számítása:

$$t_{AB} = \sqrt{(Y_B - Y_A)^2 + (X_B - X_A)^2} \ . \tag{3}$$

A távolság mért értékének (L_{tAB}) ismeretében a távolságmérésre vonatkozó javítás (v_{tAB}):

$$v_{tAB} = \sqrt{(Y_B - Y_A)^2 + (X_B - X_A)^2} - L_{tAB} \ . \tag{4}$$

2.2 Alkalmazott kiegyenlítési normák

Hálózat kiegyenlítésekor célunk az ismeretlen paraméterek (a pontok Y_i, X_i koordinátái, valamint a z_i tájékozási szögek) meghatározása oly módon, hogy az egyes mérések javításai (v_i) által alkotott $\boldsymbol{v}$ javításvektor valamely normája minimális legyen.

A geodézia gyakorlatában általánosan elterjedt eljárások a javításvektor L2 normáját, azaz a javításvektor elemeinek négyzetösszegét minimalizálják. A különböző pontossággal végzett mérések matematikai kezelhetősége végett bevezetjük a súlyokat, amik a normális eloszlásúnak feltételezett

[1] A dolgozat során végig az EOV-ban megszokott módon balsodrású koordináta-rendszert alkalmazunk, és az irányszögeket az X tengely pozitív ágától az óramutató járásával megegyező irányban mérjük.

mérések varianciájával fordítottan arányos mennyiségek (p_i). Méréseinket itt egymástól függetlennek tekintjük, így a mérési eredmények közötti kovarianciákat zérusnak vesszük. Ekkor a minimalizálandó célfüggvény az $f(\boldsymbol{p}, \boldsymbol{v}) = \Sigma\, p_i \cdot v_i^2$ összeg, azaz a javítások súlyozott négyzetösszege.

Annak szemléltetésére, hogy a dolgozatban felvázolt módszer könnyedén alkalmazható más normák esetén is, illetve hogy olyan esetben is alkalmazható, amikor a vektornormát egy zárt matematikai formulával nem, csak algoritmikusan megadható $\boldsymbol{R}^n \rightarrow \boldsymbol{R}^1$ leképzéssel helyettesítjük, a számításokat az alábbi célfüggvényekre végezzük el.

– L2 norma (legkisebb négyzetek, az előzőekben részletezve):

$$f_2(\boldsymbol{p}, \boldsymbol{v}) = \Sigma\, p_i \cdot v_i^2 \rightarrow min\ . \tag{5}$$

– L1 norma (a javítások abszolút értékeinek súlyozott összegét minimalizáljuk):

$$f_1(\boldsymbol{p}, \boldsymbol{v}) = \Sigma\, p_i \cdot |v_i| \rightarrow min\ . \tag{6}$$

– L∞ norma (a javítások súlyozott abszolút értékeinek maximumát minimalizáljuk):

$$f_\infty(\boldsymbol{p}, \boldsymbol{v}) = max\{p_i \cdot |v_i|\} \rightarrow min\ . \tag{7}$$

– Medián szerinti kiegyenlítés (a javítások súlyozott abszolút értékeinek mediánját minimalizáljuk):

$$f_M(\boldsymbol{p}, \boldsymbol{v}) = \text{medián}\{p_i \cdot |v_i|\} \rightarrow min\ . \tag{8}$$

Megjegyezzük, hogy a (8) képletben megfogalmazott célfüggvény nem tekinthető vektornormának, mivel ehhez szükséges feltételek közül kettőt is megsért (pozitív definitás, háromszög-egyenlőtlenség teljesítése).

2.3 Differenciális evolúciós algoritmus

Célunk tehát az ismeretlen Y_i, X_i, z_i paraméterek értékeinek meghatározása az (5) – (8) célfüggvények valamelyikének minimalizálása mellett. A hálózati pontok számát jelölje n, a meghatározandó paraméterek számát pedig jelölje p (ez esetünkben a hálózati pontok számának háromszorosa), a paramétereket magában foglaló vektort jelölje $\boldsymbol{x}$:

$$\boldsymbol{x} = [Y_1\ X_1\ z_1\ Y_2\ X_2\ z_2\ \ldots\ Y_n\ X_n\ z_n]\ . \tag{9}$$

Első lépésként határoljuk le a keresési teret. Minden Y_i, X_i és z_i paraméterre meghatározzuk az elfogadható maximális és minimális értékeket. Az így lehatárolt intervallumoknak nem kell azonban „szűknek" lenniük, elegendő ha a munkaterületet észak-dél illetve kelet-nyugat irányban lehatároljuk, illetve a tájékozási szögek esetén használhatjuk a $[0..2\pi)$ tartományt:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x_{min}} &= [Y_{min}\ X_{min}\ 0\ Y_{min}\ X_{min}\ 0\ \ldots\ Y_{min}\ X_{min}\ 0]\ , \\ \boldsymbol{x_{max}} &= [Y_{max}\ X_{max}\ 2\pi\ Y_{max}\ X_{max}\ 2\pi\ \ldots\ Y_{max}\ X_{max}\ 2\pi]\ . \end{aligned} \tag{10}$$

A keresési tér lehatárolása után előállíthatjuk a kezdeti populációt. A kezdeti populáció olyan $\boldsymbol{x_i}$ megoldásvektorok halmaza, amely megoldásvektorokat véletlenszerűen vettünk fel úgy, hogy a keresési teret egyenletesen fedjük le. Egy ilyen lehetséges megoldásvektort (biológiai analógiával) egyednek nevezünk. A populációban az egyedek száma n_P.

$$\boldsymbol{x_i} = [Y_{i1} \sim U(Y_{min}, Y_{max})\quad X_{i1} \sim U(X_{min}, X_{max})\quad z_{i1} \sim U(0, 2\pi)\quad Y_{i2} \sim U(Y_{min}, Y_{max})\ \ldots] \tag{11}$$

Ezután kezdődik az iteratív megoldás. A populációt minden iteráció végén egy új generáció váltja fel. Célunk, hogy az újabb generációkban a célfüggvény egyes egyedekre vett értékeinek átlaga egyre jobban megközelítse annak globális optimumát (azaz nem biztos, hogy az evolúció során minden egyed a kezdetektől fogva a globális optimum felé fejlődik, de az egész populáció összességében a felé tart). Ennek eléréséhez rendelkezésünkre áll a mutáció, a keresztezés, és a természetes kiválasztódás.

Első lépésként minden egyes egyednek előállítjuk egy mutáns párját. A differenciális evolúciós algoritmus a mutáció fogalmát a hagyományos evolúciós algoritmusokhoz képest kicsit eltérően értelmezi. Az i-edik egyed mutáns párját három véletlenszerűen kiválasztott, egymással nem megegyező egyedből állítjuk elő. Legyen ezeknek az egyedeknek a sorszáma r_1, r_2 és r_3:

$$r_1 \sim \mathrm{U}(1, n_p);\ r_2 \sim \mathrm{U}(1, n_p);\ r_3 \sim \mathrm{U}(1, n_p);\ r_1 \neq r_2 \neq r_3;$$
$$\boldsymbol{v_i} = \boldsymbol{x_{r1}} + f \cdot (\boldsymbol{x_{r2}} - \boldsymbol{x_{r3}}) . \tag{12}$$

Látható tehát (12) alapján, hogy végső soron a $\boldsymbol{v_i}$ mutáns három véletlenszerűen kiválasztott $\boldsymbol{x_i}$ egyed lineáris kombinációjaként áll elő. A lineáris kombináció f szorzótényezőjét nevezzük mutációs faktornak, értéke a (0..1] intervallumba esik.

Ezután következik a keresztezési lépés: $\boldsymbol{v_i}$ mutánst az $\boldsymbol{x_i}$ egyeddel keresztezve kapjuk az $\boldsymbol{u_i}$ utódjelöltet. Azt, hogy az utódjelöltben egy paraméter helyére melyik szülőből kerül át az érték, egy 0 és 1 közötti egyenletes eloszlású véletlen szám határozza meg. Ha ez a szám meghaladja a felvett kereszteződési valószínűséget (CR), akkor az adott paraméter az $\boldsymbol{x_i}$ egyedben felvett értéket kapja, ha nem, akkor az $\boldsymbol{v_i}$-ben felvett értéket. A minimálisan szükséges kereszteződés elérése végett a véletlenszerűen kiválasztott r-edik paraméter mindenképpen a mutánsból kerül át (j-vel itt a paraméter sorszámát jelöltük, $j \in [1..p]$):

$$r_{CRij} \sim \mathrm{U}(0, 1);\ r_i \sim \mathrm{U}(1, p);\ u_{ij} = \begin{cases} v_{ij} & \text{ha} \quad r_{CRij} \leq CR \quad \text{vagy} \quad r_i = j \\ x_{ij} & \text{ha} \quad r_{CRij} > CR \quad \text{és} \quad r_i \neq j \end{cases} . \tag{13}$$

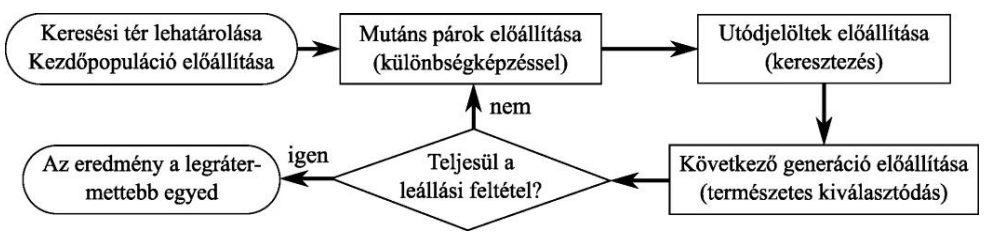
A keresztezéssel kapcsolatban felmerülhet egy probléma: mi történjen, ha az $\boldsymbol{u_i}$ utódjelölt kívül esik az $[\boldsymbol{x_{min}}..\boldsymbol{x_{max}}]$ tartományon? A szakirodalomban számos lehetőséget találhatunk ennek a helyzetnek kezelésére. Alkalmazzuk most az alábbi módszert: amennyivel az érték túllépi a megengedett határértéket, annyival a megengedett minimális érték fölé vagy maximális érték alá helyezzük vissza:

$$u_{ij} = \begin{cases} u_{ij} & \text{ha} \quad u_{ij} \in [x_{minj}..x_{maxj}] \\ x_{minj} + \left(u_{ij} - x_{maxj}\right) & \text{ha} \quad u_{ij} > x_{maxj} \\ x_{maxj} - \left(x_{minj} - u_{ij}\right) & \text{ha} \quad u_{ij} < x_{minj} \end{cases} . \tag{14}$$

Ha biztosítottuk, hogy az utódjelöltek is a keresési tartományon belül helyezkedjenek el, következhet az egyedek és az utódjelöltek versenye (természetes kiválasztódás). A versenyző felek közül a rátermettebbek kerülhetnek át a következő generációba. A rátermettség matematikai mértéke jelen esetben az (5) – (8) célfüggvények valamelyikének értéke az egyedek illetve az utódjelöltek helyén kiszámítva: először (2) és (4) alkalmazásával számítjuk a mérések javításait $\boldsymbol{x_i}$ illetve $\boldsymbol{u_i}$ paramétervektorok esetén, majd mindkét esetben kiértékeljük a célfüggvényt. Amelyik esetben a célfüggvény értéke közelebb van az optimumhoz (esetünkben: kisebb), azt visszük tovább a következő generációba.

Ezeket a számításokat minden egyedre elvégezve kezdődhet a következő iteráció. Az iteráció leállásának feltételét több módon is megfogalmazhatjuk. Esetünkben azt a megközelítést alkalmaztuk, hogy ha az optimumhoz legközelebbi egyednél a célfüggvény értéke, és az összes egyedre számítva a célfüggvény átlagos értéke egymástól már csak egy kicsiny ε mértékben tér el, akkor az iteráció leállhat. Ekkor az egyedek már olyan közel kerültek egymáshoz, hogy további mutációval és keresztezéssel már nem érhető el számottevő javulás. A folyamat végén a paraméterek elfogadott értékei az optimumhoz legközelebbi egyed esetén felvett értékek lesznek.

A fentiekben leírt differenciális evolúciós algoritmus (1. ábra) a hagyományos evolúciós algoritmusokhoz képest több előnyt is kínál. Az egyik, hogy a mutációs lépés során az egyedek közötti különbségeket használjuk fel, így nem szükséges valamilyen önkényes eloszlás felvétele a mutációhoz.



1. ábra. A differenciális evolúciós algoritmus folyamata

A másik, hogy a folyamat önszabályozó: amíg az egyedek szórása a keresési térben nagy, addig a differenciák is nagyok lesznek, így az optimum keresése széleskörű, ám ahogy az egyedek egyre közelebb kerülnek az optimumhoz, a különbségek is kisebbek lesznek, így az effektív keresési tér beszűkül.

Megjegyezzük, hogy a differenciális evolúciónak több változata is létezik, a fentiekben a legalapvetőbb „DE/rand/1/bin" eljárást mutattuk be. A jelölés magyarázata:

- „DE" = „Differential Evolution": az eljárás angol megnevezése.
- „Rand" = „random": véletlenszerűen kiválasztott egyedekkel végezzük a mutációt.
- „1": a mutációt egyszeres különbségképzéssel végeztük.
- „Bin" = „binomial": a keresztezés jellegére utal. Egymástól függetlenül, azonos valószínűségek mellett hol az $\boldsymbol{x}_i$ egyedből, hol az $\boldsymbol{v}_i$ mutánsból veszünk át egy-egy paramétert, így a mutánsból átvett paraméterek száma binomiális eloszlást követ.

2.4 A differenciális evolúciós algoritmus adaptálása szabadhálózatok kiegyenlítésére

A fentiekben bemutatott eljárás elviekben már önmagában is alkalmas lehetne szabadhálózatok kiegyenlítésére: a helytelen alakú és méretű hálózatváltozatok kiküszöbölése után már csak olyan változatok maradnak a populációban, amik a célfüggvényt mind ugyanolyan jól teljesítik. Az iterációk végeztével végül egy változat kerül ki végső megoldásként, ám ennek elhelyezése továbbra is véletlenszerű marad, és a gyakorlatban a kiegyenlítés számítási ideje drasztikusan megnő.

Célszerű valami olyan feltétel beiktatása, ami a hálózat elhelyezését is figyelembe veszi a számítások során. Ha a hálózati pontokra (vagy a hálózati pontok némelyikére) rendelkezésünkre állnak megfelelő előzetes koordináták, akkor több lehetőségünk adódik.

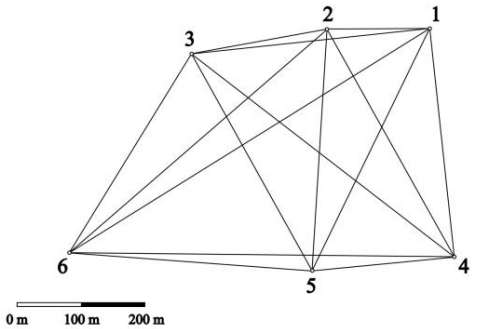
Beiktathatunk egy másodlagos célfüggvényt, ami kifejezi, hogy a kiegyenlítés utáni koordináták valamilyen norma szerint optimálisan közelítsék meg az előzetes koordinátákat. Ekkor a probléma multiobjektív („több célfüggvényes") optimalizációs feladattá válik. Szerencsére azonban esetünkben a célfüggvények nem dolgoznak egymás ellen: az összes, az eredeti célfüggvényre nézve optimális megoldáslehetőség közül csak egy olyan van, ami a másodlagos célfüggvényre nézve is optimális. Ez lehetővé teszi számunkra, hogy a feladatot a továbbiakban ismertetett egyszerűbb módszerrel is megoldhassuk. Megjegyezzük, hogy a differenciális evolúciós eljárás multiobjektív eljárássá fejlesztésére több, egymástól eltérő megoldás is született már, ilyen például a DEMO algoritmus (Robič és Filipič 2005).

A másik lehetőség, hogy az eljárás során valamelyik lépésben úgy befolyásoljuk az egyedek továbbfejlődését, hogy a paraméterek értékei a lehető legjobban közelítsék meg az előzetes értékeket. Esetünkben ezt úgy érjük el, hogy az utódjelölt előállítása után az általa meghatározott hálózatot egy merevtest-szerű átalakítással (súlyponti eltolás, súlypont körüli elforgatás) az előzetes értékekre rátranszformáljuk. Ez az átalakítás nem érinti a célfüggvény értékét, hiszen a hálózat geometriája nem változik meg, azonban a hálózat elhelyezését megköti.

3 Gyakorlati alkalmazási példa

A továbbiakban az előző részben leírt algoritmust fogjuk alkalmazni egy konkrét geodéziai szabadhálózat kiegyenlítésére (2. ábra). Vizsgálatunk tárgya a BME Általános és Felsőgeodézia Tanszékének sóskúti geodéziai mikrohálózata (Dede és Szűcs 2000). A vizsgálat céljai:

- Annak megmutatása, hogy a differenciális evolúciós algoritmus a 2.4 részben leírt kiegészítésekkel alkalmas geodéziai szabadhálózatok kiegyenlítésére.
- Egy hatékony paraméterkombináció (n_p, f, CR) meghatározása a lehető legkisebb futási idő elérésére, a konvergencia robusztusságának elvesztése nélkül.
- Az (5) – (8) célfüggvények vizsgálata durvahibától mentes esetben, nagy fölösmérés-szám esetén.
- A célfüggvények vizsgálata durvahibás esetben, nagy fölösmérés-szám esetén.
- A célfüggvények vizsgálata durvahibás esetben, kis fölösmérés-szám esetén.



2. ábra. A sóskúti geodéziai mikrohálózat elrendezése

A vizsgálathoz a méréseket a sóskúti hálózat legutóbbi, 2008-as újramérése (Babcsány, személyes közlés) biztosította. Az észlelés minden pontról két távcsőállásban, két fordulóban történt. Az irányértékek kiszámítása után a két forduló irány- és távmérési eredményeit kiközepeltük, így összesen 30 iránymérési és 30 távmérési adat állt rendelkezésünkre. Az eredmények a feldolgozás előtt már átestek a durvahiba-szűrésen.

A mérések a priori középhibáit a méréskor használt Leica TCA 1800 típusú műszer gyári adatai alapján vettük fel: az iránymérések középhibája így ±1″ lett, a távmérések középhibája pedig $\pm(1\text{ mm} + 2\ ^{mm}/_{km})$. A mérések súlyozása ezen a priori középhibák alapján történt: az (5) célfüggvény esetén a súlyok a középhiba négyzetével, míg a (6) – (8) célfüggvények esetén a középhibával voltak fordítottan arányosak.

A szabadhálózat elhelyezésének megkötése végett egy régebbi meghatározásból származó koordináták méterre kerekített értékeit vettük fel előzetes értékeknek.

3.1 Implementáció

Az algoritmus megvalósítása C nyelven készült, Linux operációs rendszeren (az egész vizsgálat alatt kizárólag szabadon hozzáférhető, nyílt forrású szoftvereket alkalmaztunk).

A program elkészítése során törekedtünk a mai modern többmagos processzorokban rejlő lehetőségek kiaknázására, ezért az algoritmus legszámításigényesebb részét, az egyes egyedekre a célfüggvény értékének kiszámítását, több párhuzamosan futó szál végzi. A modern operációs rendszerek lehetővé teszik, hogy egy programon belül a szálak végrehajtása a magok között a terhelés függvényében futás közben is átadódhasson, így ezzel a továbbiakban több teendő nincsen. A szálak között az adatátvitel nem probléma, mivel a programon belül ugyanazokat a memóriaterületeket minden szál felhasználhatja. A párhuzamosan futó szálak működésének összehangolását, illetve a megosztott memóriaterületekhez való hozzáférés szabályozását szemaforokkal oldottuk meg.

A program elkészítése során a szálakat a libpthread függvénykönyvtárral kezeltük (ez a szabvány POSIX szálkezelési API egy linuxos implementációja), véletlen számok generálásához a libgsl függvénykönyvtárat használtuk (GNU Scientific Library), a grafikus kimenetet pedig a libg2 függvénykönyvtár segítségével állítottuk elő.

A többszálú végrehajtást 2 és 4 maggal rendelkező processzorokon teszteltük, mindkét esetben – a vártnak megfelelően – nagymértékű sebességnövekedést tapasztaltunk az egyszálú végrehajtáshoz képest.

3.2 Az algoritmus paramétereinek meghatározására

A szakirodalomban a differenciális evolúciós algoritmus paramétereire (n_p – a populáció egyedszáma, f – mutációs faktor, CR – keresztezési valószínűség) találunk ökölszabályként alkalmazható értékeket, amik a feladatok nagy részénél megfelelő szintű robusztusságot biztosítanak a folyamat számára (azaz a folyamat nagy valószínűséggel a globális optimumhoz fog konvergálni, és nem

valamelyik lokális szélsőértékhez). Ezek az értékek: $n_p = 10 \cdot p$ (p a paraméterek száma); $f = 0.8$; $CR = 0.9$.

Célul tűztük ki annak vizsgálatát, hogy ezen értékeknél jobbakat tudunk-e találni a konkrét probléma megoldására. A vizsgálatok során a koordináták megengedett értéke $Y_i \in$ [-50..650] méter, $X_i \in$ [-50..400] méter; a konvergencia kritériuma $\varepsilon = 10^{-3}$ volt. Mivel paramétereink száma $p = 18$, ezért esetünkben $n_p = 180$ egyedszám mellett kerestük f és CR használható értékeit (3. ábra). A vizsgálatok során az (5) célfüggvényt használtuk. A nyertes paraméterkombináció végül $f = 0{,}5$; $CR = 0{,}8$ lett.

Ezután kerestük az előbb megtalált f és CR paraméterek mellett az egyedszám minimális szükséges értékét. Az iterációk számát tekintve az $n_p = 90$-nél kezdődő vizsgált tartomány nagyjából egyenletes eredményeket hozott, azonban ne feledjük el, hogy bár az iterációk száma nagyjából azonos, a megnövekedett egyedszám iterációnként megnövekedett számítási feladatot is jelent, így a futási idő szempontjából célszerű minél kisebb egyedszámot alkalmazni. A kiválasztott egyedszám végül $n_p = 36$ lett.

A szemléltetés végett a 4. ábrán látható a konvergencia folyamata $n_p = 1800$; $f = 0.5$; $CR = 0.8$ paraméterkombináció mellett (itt a megnövelt egyedszám csak a látványosság miatt szükséges). Látható, ahogy a rendszer bizonytalan kezdeti „útkeresése” után a 2500. iteráción túl a konvergencia látványosan beindul.

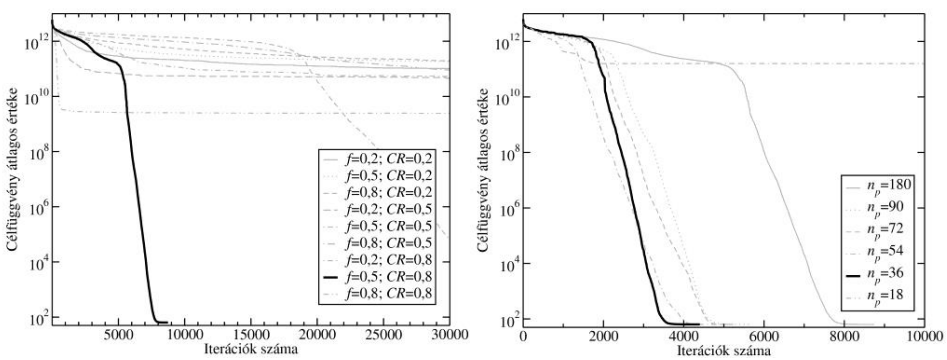
3.3 A kiegyenlítés eredménye

Mint azt a 3. rész elején említettük, a különböző célfüggvények mellett célunk a durvahibás, és a kis fölösmérés-számmal rendelkező esetek vizsgálata is. A durvahibás esetet egy mesterséges durvahiba beiktatásával állítottuk elő: az 1-2 irányt rontottuk el 1°-al. A fölösmérés-szám csökkentését az álláspontok számának csökkentésével oldottuk meg. Először minden mérést megtartva a fölösmérés-szám 42 volt. Csak az 1, 2 és 3 pontokról végzett méréseket felhasználva ez 12-re csökkent, míg csak az 1 és 3 pontokról végzett méréseket felhasználva 2-re.

Összefoglalva: a négy kiegyenlítési norma, három fölösmérés-szám és a durvahibás vagy durvahibától mentes eseteket figyelembe véve összesen 24 kombinációt vizsgáltunk.

A kiegyenlítés eredményének vizsgálatakor kétféle eredmény segítségével hasonlítottuk össze az egyes eseteket: néztük egyrészt a pontok koordinátáinak kiegyenlített értékeit, másrészt a koordináták 95%-os konfidencia-intervallumainak méretét.

A kiegyenlítésből kapott koordináták viszonyítási alapjának a legkisebb négyzetek módszerével 42-es fölösmérés-szám mellett és durvahiba nélkül kapott eredményeket tekintettük. Minden más vizsgált esetben kiszámoltuk a kapott ponthelyek ettől való átlagos távolságát. A konfidencia-intervallumok vizsgálatakor az Y és X koordináták 95%-os konfidencia-intervallumait átlagoltuk. Az eredményeket az 1. és 2. táblázat tartalmazza.



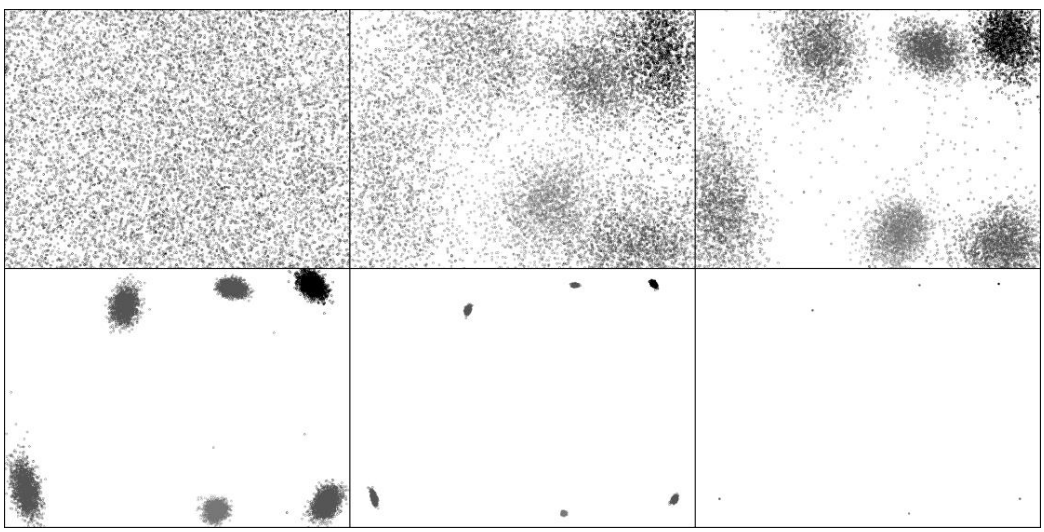
3. ábra. Konvergencia az iterációk számának függvényében. Balra különböző f és CR paraméterkombinációk mellett, rögzített $n_p = 180$ egyedszámmal. Jobbra különböző egyedszámok mellett, rögzített $f = 0{,}5$; $CR = 0{,}8$ paraméterek mellett. A „Célfüggvény átlagos értéke” a célfüggvény értéke egy-egy generáción belül az összes egyedre kiszámolva majd átlagolva

1. táblázat. Átlagos ponthely-távolságok (méterben). Viszonyítási alap: L2 norma, fölösmérés-szám 42, durvahiba-mentes

Fölös-mérés	Durvahiba-mentes				Durvahibás			
	L2	L1	L∞	Medián	L2	L1	L∞	Medián
42	0.000	0.000	0.002	0.001	0.338	0.000	1.159	0.001
12	0.001	0.001	0.001	0.001	0.386	0.002	1.183	0.001
2	0.002	0.002	0.002	0.002	0.836	1.554	1.203	0.002

2. táblázat. A koordináták átlagos 95%-os konfidencia-intervallumai (milliméterben)

Fölös-mérés	Durvahiba-mentes				Durvahibás			
	L2	L1	L∞	Medián	L2	L1	L∞	Medián
42	±1	±1	±4	±4	±1	±1	±770	±3
12	±2	±2	±4	±5	±2	±2	±971	±4
2	±3	±3	±4	±12	±2	±3	±776	±12



4. ábra. A konvergencia folyamata, balról jobbra, fentről lefele haladva: a hálózati pontok elhelyezkedése 1, 2500, 2700, 3000, 3500 és 5000 iteráció után. Az algoritmus paraméterei: n_p = 1800; f = 0,5; CR = 0,8 (az egyedszám az ábrák szemléletessé tétele végett lett megnövelve)

Az 1. és 2. táblázatok adatait szemrevételezve megállapíthatjuk, hogy a hagyományosan elterjedt L2 norma szerinti kiegyenlítés az elvárásoknak megfelelően teljesített: durvahiba-mentes esetekben a paraméterek értékeit alacsony fölösmérés-szám mellett is torzítatlanul és kis szórással (hiszen ebben az esetben a minimalizált mennyiség tulajdonképpen maga a súlyegység középhibája) határozta meg, míg a durvahibás esetekre a vártnak megfelelően igen érzékenynek mutatkozott. Durvahibától mentes esetekben hasonlóan szép eredményeket produkált az L1 norma, a durvahibás esetben, nagyobb fölösmérés-számok mellett pedig megmutatkozott, hogy robusztusságára ebben az esetben számíthatunk.

Az L∞ norma szerinti kiegyenlítés a konfidencia-intervallumok tekintetében már a durvahiba-mentes esetekben is rosszabbul teljesít az előző kettőnél, azonban viselkedése igazán a durvahibás esetekben érdekes.

Végül pedig a medián szerinti kiegyenlítés a durvahibás esetekben bizonyult igazán használhatónak. Igaz a fölösmérés-szám csökkenésével a módszer szórása romlott, ám ez torzítatlanságára szinte semmi hatással nem volt. Valamely, a durvahibákra érzékeny normával párban alkalmazva így hatékony módszer lehet a durvahibák kiszűrésére.

4 Összefoglalás

Dolgozatunkban bemutattuk egy evolúciós algoritmusokkal rokon eljárás, a differenciális evolúciós algoritmus egy geodéziai alkalmazását. Természetesen a hálózatkiegyenlítés csak egy a lehetséges alkalmazási területek közül, az algoritmus bármely olyan problémára megoldást jelenthet, ahol a matematikai modellt leíró egyenletek linearizálása instabilitást eredményezhet, vagy a megfelelő előzetes értékek nem állíthatók elő nagy biztonsággal; esetleg a legkisebb négyzetek helyett más kiegyenlítési normára van szükségünk, vagy ezen problémák kombinációja lép fel.

Példaként említenénk a módszer további sikeres alkalmazását szatellitageodéziai műholdak nyers mérési idősoraiban fellépő szabályos hibajelenségek leíró függvényének illesztésére, ahol a függvény összetettsége miatt a linearizáció nem vezetett célra, a magas zajszint miatt pedig az előzetes értékek becslése vált igen bizonytalanná.

Konkrét alkalmazási példán keresztül bemutattuk az algoritmus paramétereinek hatását a kiegyenlítés konvergenciájára, a különböző normák szerint végzett kiegyenlítések pedig alkalmat adtak egyes alternatív kiegyenlítési normák viselkedésének megfigyelésére alacsony fölösmérésszám és durvahiba fellépése esetén. A gyakorlati életben kevésbé gyakran alkalmazott kiegyenlítési normák közül robusztusságát tekintve kiemelkedően jó teljesítményt nyújtott a medián szerinti kiegyenlítés, ami a hagyományos L2 norma szerinti kiegyenlítés mellett a durvahiba-szűrés hatékony eszköze is lehet (a medián szerinti kiegyenlítést sikeresen alkalmaztuk például Eötvös-inga mérések durvahibás leolvasás-értékeinek megkeresésére).

Gyakorlati megfontolásból igyekeztünk a módszer számításigényét az algoritmus paramétereinek megfelelő megválasztásával minimalizálni. A kapott paraméterkészlet mellett a hatpontos hálózat kiegyenlítéséhez a célfüggvényt kb. 160 000 alkalommal kellett kiértékelni. Érdekességképpen megemlítjük, hogy ha a feladatot egy egzakt (nem sztochasztikus) módszerrel, a Gauss-Jakobi kombinatorikus algoritmussal (Awange 2002) szerettük volna megoldani, akkor az kb. $3 \cdot 10^{14}$ darab 18 egyenletes nemlineáris egyenletrendszer megoldására vezetett volna.

Köszönetnyilvánítás. Köszönettel tartozom *Babcsány Jánosnak* és *Dr. Rózsa Szabolcsnak* (BME Általános és Felsőgeodézia Tanszék) a sóskúti geodéziai mikrohálózat 2008. évi mérési eredményeinek rendelkezésemre bocsátásáért.

Hivatkozások

Bäck T, Hoffmeister F (1991): Global Optimization by Means of Evolutionary Algorithms. Random Search as a Method for Adaption and Optimization of Complex Systems. Krasnojarsk Space Technology University, 17-21.

Storn R, Price K (1997): Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. Journal of Global Optimization 11, 341-359.

Saleh HA, Dare P (2001): Effective Heuristics for the GPS Survey Network of Malta: Simulated Annealing and Tabu Search Techniques. Journal of Heuristics 7, 533–549.

Berné JL, Baselga S (2004): First-order design of geodetic networks using the simulated annealing method. Journal of Geodesy 78, 47–54.

Detrekői Á (1991): Kiegyenlítő számítások. Tankönyvkiadó, Budapest.

Robič T, Filipič B (2005): DEMO: Differential Evolution for multiobjective optimization. Proceedings of the 3rd International Conference on Evolutionary Multicriterion Optimization (EMO 2005), 520-533.

Dede K, Szűcs L (2000): Geodéziai mérések a sóskúti hálózatban. Geomatikai Közlemények III, 125-132.

Awange J L (2002): Gröbner bases, multipolynomial resultants and the Gauss-Jacobi combinatorial algorithms – adjustment of nonlinear GPS/LPS observations. Doktori disszertáció, Stuttgarti Egyetem, Geodéziai Intézet

PÁLYASZÁMÍTÁSI MÓDSZEREK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

*Nagy Imre**

Comparing orbit computation methods *- Nowadays, artificial satellites are applied very often in Earth sciences. Knowing the orbit of the satellite is indispensable to process the data from the satellite. This requires more precise methods for orbit computation. High accuracy orbit computation methods are also necessary to planning the orbits of the satellites.*
This paper compares some orbit computation methods by the help of three satellites. The chosen satellites are different in their orbital eccentricity, since orbits with low, medium and high eccentricity should by handled in different ways.

Keywords: celestial mechanics, orbit computation, regularization

Napjainkban, a földtudományokban egyre gyakrabban kerül sor mesterséges holdak alkalmazásra. A műholdakról származó adatok feldolgozásához azonban sokszor elengedhetetlen a mérést végző mesterséges égitest pályájának pontos ismerete. Ehhez minél pontosabb pályaszámítási módszerekre van szükség. A mesterséges holdak pályájának megtervezéséhez szintén elengedhetetlenek a nagypontosságú pályaszámítási módszerek.
Jelen munkánkban néhány pályaszámítási módszert hasonlítunk össze három műhold segítségével. Az összehasonlításhoz kiválasztott mesterséges holdak pályájuk lapultságában térnek el jelentős mértékben, mivel pályaszámítás szempontjából lényeges különbség van a kis, közepes és nagy excentricitású pályák között.

Kulcsszavak: égi mechanika, pályaszámítás, regularizáció

1 Bevezetés

Az űrkutatásban leggyakrabban kör alakú vagy kis excentricitású pályáján keringő műholdakat használnak. Ezeket a pályákat nagy pontossággal lehet modellezni numerikus eszközökkel. Példának említhetjük a LAGOES–1 gravimetriai műholdat, amelynek mozgásából sikerült kimutatni a Föld infravörös sugárzásának a hatását is (Rubincam 1987). Napjaink gravimetriai műholdjai ennél is nagyobb pontosságú méréseket és így modellezést tesznek lehetővé, illetve a mérési pontosság fokozása végett egyúttal szükségessé is (Thomas 1999). A pálya nagypontosságú ismerete azonban nem csak a tudományos kutatásokhoz szükséges ma már, hanem a mindennapi életben is nélkülözhetetlenné vált a műholdas helymeghatározás elterjedése révén.

A műholdak egy másik csoportja kisebb-nagyobb excentricitású, azaz elnyúltabb pályán kering. Ilyen pályára jellemzően csillagászati és távközlési műholdak kerülnek, például az orosz Molnyija sorozat tagjai vagy a rádiócsillagászati műholdak (pl. HALCA, Radioastron). Utóbbiak esetén különösen fontos a pálya, illetve a helyzet nagypontosságú ismerete. Ezek a mesterséges holdak ugyanis a földi rádiótávcsövekkel összekapcsolva végeznek ún. űr-VLBI észleléseket, amihez a használt rádióhullámok hullámhosszánál pontosabban kell ismerni a műszerek egymástól való távolságát.

A nagy excentricitású pályák numerikus modellezése bonyolult feladat, mivel a perigeum közelében az űreszköz sebessége nagy lesz, és mind nagysága, mind pedig iránya gyorsan változik. Ha csak egy kis hibát követünk el ilyenkor a hely vagy a sebesség nagyságának illetve irányának számításában, az nagymértékben csökkentheti a vizsgált időszakra a modellezés pontosságát. A problémát az okozza, hogy a mesterséges holdak mozgását alapjában meghatározó egyenlet

$$\ddot{\boldsymbol{r}} = -\frac{\mu}{r^3}\boldsymbol{r} \tag{1}$$

az $r = 0$ pontban szinguláris. (Itt $\boldsymbol{r}$ a mesterséges hold geocentrikus helyvektora, és μ a geocentrikus gravitációs állandó.) A problémára részben megoldását jelent a lépésköz csökkentése, de ennek ára

*MTA-BME Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport
BME Általános és Felsőgeodézia Tanszék
1521 Budapest, Pf. 91., E-mail: imre@sci.fgt.bme.hu

van. A kis lépésköz ugyanis a számolási idő növekedésével jár, hiszen a kettő között fordított arányosság áll fenn. Ezt részben kiküszöböli, ha váltakozó lépésközű integrátort használunk. Ennél komolyabb probléma, hogy a számítógépek számábrázolási sajátosságai miatt értelmetlen egy bizonyos határ alá csökkenteni a lépésközt, mert nem hogy növekedne a pontosság, hanem még romlik is. A problémára az igazi megoldást a mozgásegyenletben megjelenő szingularitások kiküszöbölése, a regularizálás jelenti.

A továbbiakban egy regularizációs eljárás kerül ismertetésre, majd összehasonlítjuk az eljárás által szolgáltatott eredményeket a mozgásegyenletek közvetlen integrálásával kapottakkal. Ehhez három mesterséges égitest lesz segítségünkre: a magnetoszféra-kutató Interball–1 (e=0,92), és –2 (e=0,56) valamint a GPS hálózat IIR-M-5 (SVN57/PRN29) jelű műholdja (e=0,003).

2 A mozgásegyenletek regularizálása

A regularizációval a szinguláris differenciálegyenlet regulárissá alakítható. A transzformáció két részből, időtranszformációból és koordináta-transzformációból áll. A kettő közül az első a fontosabb. Az irodalom több eljárást ismer, pl. Kustaanheimo–Stiefel-eljárás (részleteket ld. pl. Érdi 1996). Vizsgálataink során egy újabb keletű módszert alkalmaztunk, a Zare-eljárást (Zare et al. 1996). A módszer alkalmazásáról ld. még Nagy és Érdi (2007), Nagy (2004).

A Föld körül keringő műhold mozgásegyenlete

$$\ddot{\boldsymbol{r}} + \frac{\mu}{r^3}\boldsymbol{r} = \boldsymbol{F} \ , \tag{2}$$

ahol μ a geocentrikus gravitációs konstans, $\boldsymbol{r}$ a geocentrikus helyvektor, és $\boldsymbol{F}$ a perturbáló erő. Esetünkben a legjelentősebb hatás a geopotenciál homogén gömbtől való eltérése, a Nap és a Hold gravitációs tere, amelyeket figyelembe véve $\boldsymbol{F}$ a következő alakot ölti:

$$\boldsymbol{F} = \nabla R \ , \tag{3}$$

$$R = R_{Föld} + R_{Nap} + R_{Hold} \ , \tag{4}$$

$$R_{Föld} = \frac{\mu}{r}\sum_{l=2}^{\infty}\sum_{m=0}^{l}\left(\frac{r_0}{r}\right)^l P_l^m(\sin\varphi)\left[C_{lm}\cos(m\lambda) + S_{lm}\sin(m\lambda)\right] \ , \tag{5}$$

$$R_{Nap} = Gm_{Nap}\left(\frac{1}{\rho_{Nap}} - \frac{\boldsymbol{r}\boldsymbol{r}_{Nap}}{r_{Nap}^3}\right) \ , \tag{6}$$

$$R_{Hold} = Gm_{Hold}\left(\frac{1}{\rho_{Hold}} - \frac{\boldsymbol{r}\boldsymbol{r}_{Hold}}{r_{Hold}^3}\right), \tag{7}$$

ahol r_0 a Föld átlagos egyenlítői sugara, λ a műhold földrajzi hosszúsága, φ a geocentrikus földrajzi szélessége, P az asszociált Legendre-függvény, m_{Nap} a Nap tömege, ρ_{Nap} a műhold és a Nap távolsága, $\boldsymbol{r}_{Nap}$ a Nap geocentrikus helyvektora, m_{Hold} a Hold tömege, ρ_{Hold} a műhold és a Hold távolsága, $\boldsymbol{r}_{Hold}$ a Hold geocentrikus helyvektora, G az univerzális gravitációs állandó. Az így kapott egyenletet kell regularizálni.

Az idő transzformálására a

$$\frac{dt}{ds} = r^{\alpha} \tag{8}$$

kifejezés szolgál, ahol s az új független változó. Az α szokásos értékei 0, 1, 3/2, 2, a továbbiakban az α = 1 értéket használjuk. Az új független változót bevezetve a mozgásegyenletekből levezethető az ún. módosított Laplace-integrál:

$$\boldsymbol{\lambda} = \left(2h + \frac{\mu}{r} \right) \boldsymbol{r} - \frac{\boldsymbol{r}\boldsymbol{r}'}{r^2} \boldsymbol{r}' \ , \tag{9}$$

ahol a vessző az *s* szerinti deriválást jelöli. Magának a térbeli résznek a regularizációja a módosított Laplace-integrál segítségével történik. Így adódik a

$$\boldsymbol{r}'' - 2h\boldsymbol{r} = -\boldsymbol{\lambda} + r^2 \boldsymbol{F} \tag{10}$$

egyenlet, ahol *h* a Kepler-energia, vagyis a mesterséges hold mozgási és helyzeti energiájának összege. Perturbált esetben, azaz ha $\boldsymbol{F}$ nem nulla, a *h* és $\boldsymbol{\lambda}$ nem állandó, ezért célszerű bevezetni a *h* helyett a h_0 kezdeti Kepler-energiát:

$$\boldsymbol{r}'' = 2h_0 \boldsymbol{r} - \boldsymbol{\lambda} + \boldsymbol{Q} \ , \tag{11}$$

ahol

$$\boldsymbol{Q} = 2(h - h_0)\boldsymbol{r} + r^2 \boldsymbol{F} \ . \tag{12}$$

Az egyenletbe ily módon bekerült módosított Laplace-integrál és Kepler-energia nem állandó, így szükségünk lesz még az *s* szerinti deriváltjaikra is:

$$h' = \boldsymbol{r}'\boldsymbol{F} \ , \tag{13}$$

$$\boldsymbol{\lambda}' = 2(\boldsymbol{r}'\boldsymbol{F})\boldsymbol{r} - (\boldsymbol{r}\boldsymbol{F})\boldsymbol{r}' - (\boldsymbol{r}\boldsymbol{r}')\boldsymbol{F} \ . \tag{14}$$

A Zare-eljárás nagy előnye, hogy a mozgás paraméterezésére bevezetett *s* változó, és a *t* idő közötti átszámításra egy egyszerű összefüggést használ:

$$\tau = t - \frac{\boldsymbol{r}\boldsymbol{r}'}{2h_0 r} + \frac{\mu}{2h_0} s \ . \tag{15}$$

Természetesen ez τ időelem sem állandó perturbált esetben, *s* szerinti deriváltja az alábbi alakban írható:

$$\tau' = -\frac{\boldsymbol{Q}\boldsymbol{r}}{2h_0 r} \ . \tag{16}$$

Érdemes megfigyelni, hogy mivel *Q* perturbálatlan esetben nulla, az időelem ekkor állandó lesz, vagyis az *s*-ből a *t* néhány egyszerű művelettel kiszámolható, nem szükséges hozzá differenciálegyenletet megoldani.

Végezetül foglaljuk össze az integrálandó egyenletrendszert:

$$\boldsymbol{r}'' = 2h_0 \boldsymbol{r} - \boldsymbol{\lambda} + \boldsymbol{Q} \ , \tag{17}$$

$$\boldsymbol{\lambda}' = 2(\boldsymbol{r}'\boldsymbol{F})\boldsymbol{r} - (\boldsymbol{r}\boldsymbol{F})\boldsymbol{r}' - (\boldsymbol{r}\boldsymbol{r}')\boldsymbol{F} \ , \tag{18}$$

$$h' = \boldsymbol{r}'\boldsymbol{F} \ , \tag{19}$$

$$\tau' = -\frac{\boldsymbol{Q}\boldsymbol{r}}{2h_0 r} \ . \tag{20}$$

Ez, mint látható, egy 11-edrendű differenciálegyenlet-rendszer, melynek integrálásához (hasonlóan a regularizálatlan esethez) egy hetedrendű Runge–Kutta–Nystrom–Fehlberg integrátort használtunk. Az integrálás változó lépésközzel történik. Az egyes lépések nagyságát a nyolcadrendű tag, mint hibabecslő tag alapján számolja a program. A perturbációk közül a geopotenciál hatását a gömbfüggvények szerinti sorfejtés 12-ed rendjéig vettük számításba. A Hold koordinátáit az ELP 2000 85 elmélet (Chapront-Touzé és Chapront 1988) egyenleteiből számoljuk, a Napét VSOP 87 elméletből (Bretagnon és Francou 1988).

3 A regularizált és a regularizálatlan esetek összehasonlítása

A vizsgálatokhoz három mesterséges holdat használtunk, melyeknek kezdeti pályaelemi az 1. táblázatban láthatók.

A GPS holdaknál a számunkra szükséges adatok, a pályaelemek elengedhetetlenek a helymeghatározáshoz. A másik két mesterséges hold a Föld magnetoszféráját vizsgálta széles nemzetközi együttműködésben, így mérési eredményeit valamint a pillanatnyi helyzetére vonatkozó adatokat bárki számára elérhetővé tették a szondák honlapján (http://arc.iki.rssi.ru/interball). Az Inerball–1 esetében mind a regularizálatlan, mind pedig a regularizált egyenletek integrálása kielégítő eredményre vezetett. A két módszerrel kapott pályák között minimálisnak mondható különbség adódik. Sokkal jelentősebb a megfigyelt pályától való eltérés. Ennek oka alighanem a szondák helyzetének viszonylag pontatlan meghatározása, illetve a vizsgálat során általunk figyelembe nem vett perturbációk (pl. elektromágneses fékeződés) hatása. Utóbbit valószínűsíti, hogy a megfigyelt pálya fél nagytengelye, ha kis mértékben is, de folyamatosan csökken a műhold élete folyamán. Az eltérés ellenére a kezdeti adatokból általunk számolt pálya az Interball–1 esetén a valóságostól mindössze 14 óra eltéréssel jelzi előre a műhold kb. öt éves élettartamának végét.

Hasonló csökkenést az Interball–2 esetén nem figyelhetünk meg, viszont itt a pályamenti helyzetben a periódusidő felével egyező késés mutatkozik a szonda aktív életének vége felé, a 900. nap körül. Ekkora hiba már lehetetlenné teszi a helyzet bármiféle előrejelzését. Ugyanakkor, ha a pályaelemek közül pl. a fél nagytengely változását nézzük, az azonos fázishelyzetű pontok között az eltérés mindössze 3-4 km körül alakul. Tekintve, hogy a mesterséges hold helyzete 30-40 km hibával ismert, ez jó egyezésnek mondható, és reálisan nem várható el a koordináták jövőbeli alakulásának előrejelzése.

A GPS műholdra sajnos nem sikerült hosszú, legalább hónapokat átfogó adatsort találni.

A gyakorlati alkalmazás szempontjából lényeges kérdés a módszerek sebessége. A 2. táblázatban 2000 napra történő integrálások futási idejei láthatók. Mint látható, a regularizáció mindhárom űreszköz esetén jelentős gyorsulást eredményezett. Az Interball–1 esetén a futási idő regularizálás nélkül 161 másodperc, míg regularizálva csupán 50 másodperc, tehát a gyorsulás 3,2-szeres. Az Interball–2 esetén a regularizálatlan egyenletek integrálása 1533 másodpercet vett igénybe, míg a regularizáltaké 675 másodpercet, így itt a gyorsulás közel 2,3-szeres. Némileg meglepő módon a GPS műhold esetén is jelentős 2,6-szeres gyorsulást tapasztalhatunk. Ennek az az oka, hogy a mozgás paraméterezése nagyobb lépésközöket tesz lehetővé regularizált esetben.

A számítási sebesség növekedése kétségtelen, ám önmagában nem sokat ér, ha mindez a pontosság rovására megy. Mivel egy valóságos mesterséges hold pályája a különböző perturbációk miatt sok különböző frekvenciájú változást tartalmaz, a számított és a valódi pálya összehasonlítása nem egyszerű feladat. Ehelyett az összehasonlítást inkább perturbációmentes esetben végeztük el, mivel ilyenkor a pályaelemek időben állandók. A kezdeti értékektől való esetleges eltérés tehát jól jellemzi a módszer megbízhatóságát. Az eltéréseket a 3. táblázat mutatja regularizáció nélküli esetre.

1. táblázat. A vizsgálathoz használt mesterséges holdak kezdeti pályaelemei

Pályaelem	GPS IIR-M-5	Interball-2	Interball-1
Pályáraállás ideje	2007. december 20.	1996. augusztus 29.	1995. augusztus 3.
Fél nagytengely	26 559.506 km	16 335.822 km	103 276.495 km
Excentricitás	0.00343	0.56170	0.93053
Pályahajlás	55.015°	62.809°	62.821°
Felszállócsomó hossza	281.464°	287.977°	314°
Pericentrum ergumentuma	162.714°	8.3°	309.936°

2. táblázat. 2000 napra történő integrálások futási idejei regularizálással és anélkül

	GPS IIR-M-5	Interball–2 (e = 0.56)	Interball–1 (e = 0.9)
Regularizálás nélkül	563 s	1533 s	161 s
Regularizálással	214 s	675 s	50 s

3. táblázat. A pályaelemek kezdeti értékektől való eltérései regularizáció nélküli esetben

Változás a pályaelemekben	GPS IIR-M-5	Interball-2	Interball-1
Fél nagytengely	57 m ($2.2\cdot10^{-4}$ %)	140 m ($8.6\cdot10^{-4}$ %)	54 m ($5.3\cdot10^{-5}$ %)
Excentricitás	$1.6\cdot10^{-6}$ ($4.7\cdot10^{-4}$ %)	$7.2\cdot10^{-6}$ ($1.3\cdot10^{-3}$ %)	$7.7\cdot10^{-8}$ ($8.3\cdot10^{-6}$%)
Pályahajlás	$<10^{-9}$	$<10^{-9}$	$<10^{-9}$
Pericentrum argumentuma	$2.6\cdot10^{-4}$° ($9.4\cdot10^{-5}$ %)	$8\cdot10^{-4}$° ($2.8\cdot10^{-4}$ %)	$3.8\cdot10^{-5}$° ($1.2\cdot10^{-5}$ %)
Felszálló csomó hossza	$<10^{-9}$	$<10^{-9}$	$<10^{-9}$

A táblázatból hiányoznak a regularizált esetben tapasztalt eltérések. Ennek az az oka, hogy ekkor eltérés csak a fél nagytengelyekben adódik. A GPS műhold esetében ez az eltérés mindössze 0.092 mm, ami a kezdeti értéknek mindössze $3.5\cdot10^{-10}$ %-a, az Interball–2 esetében 4.1 mm, ami $2.5\cdot10^{-8}$ %-os relatív hibának felel meg, az Interball–1 pályájánál pedig 5.6 mm az eltérés, így a relatív hiba mindössze $5.5\cdot10^{-9}$ %.

4 Összefoglalás

Három mesterséges hold pályáját modelleztük numerikus módszerek segítségével. A műholdak pályájának excentricitása 0, 0.56 és 0.92 volt, vagyis kicsi, közepes és nagy. A modellezés a newtoni mozgásegyenletek közvetlen integrálásával és a Zare-féle regularizációs eljárás segítségével történt.Az űreszközöket érő hatások modellezésére figyelembe vettük a geopotenciál homogén gömb potenciáljától való eltérését 12-ed rendig, valamint a Hold és a Nap gravitációs hatását. Azt tapasztaltuk, hogy a regularizáció jelentősen gyorsítja a számításokat minden esetben, miközben a számítások pontosságát is fokozza. A gyorsulás változó, de legalább 2,3-szeres, illetve maximum 3,2-szeresnek találtuk. A pontosság vizsgálata nem volt lehetséges a számított és a mért helyzetek összevetésével, mivel az elérhető adatok pontossága, és így a kezdőadatok pontossága ehhez nem volt elég, illetve megfelelő adatok hiányában nem tudtunk számításba venni nem konzervatív perturbációkat, mint például légköri vagy elektromágneses fékeződés. A problémát megkerülendő a pontosság meghatározásához a perturbációk nélküli eseteket használtuk, mivel ekkor a pályaelemeknek időben állandóknak kellene lennie. Azt találtuk, hogy a regularizáció minden esetben jelentősen, 4-5 nagyságrenddel csökkentette a hibát.

Hivatkozások

Bretagnon P, Francou G (1988): Planetary theories in rectangular and spherical variables, Astronomy and Astrophysics 202, 309-315.

Chapront-Touzé M, Chapront J (1988): ELP2000-85: Semi-analytical lunar ephemeris adequate for historical times, Astronomy and Astrophysics 190, 342-352.

Érdi B (1996): Égi mechanika. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.

Nagy I (2004): Numerical investigations of the orbit of Interball-1, Publications of the Astronomy Department of the Eötvös University, 14, 277-284.

Nagy I, Érdi B (2007): Numerical investigation of the orbit of Interball-1, Astronomische Nachrichten, 328, 793-796.

Rubincam DP (1987): Lageos Orbit Decay Due to Infrared Radiation From Earth, NASA Technical Memorandum 87804.

Thomas JB (1999): An Analysis of Gravity-Field Estimation Based on Intersatellite Dual-1-Way Biased Ranging, JPL 98-15, Pasadena.

Zare K, Szebehely V, Liu JJF (1996): A set of regular and uniform elements for satellites of high eccentricity and multiday period, American Astronautical Society Publications 96-137.

FELSŐRENDŰ DIGITÁLIS SZINTEZŐMŰSZEREK VIZSGÁLATA A GEODÉZIAI ÉS GEOFIZIKAI KUTATÓINTÉZETBEN

Orbán Aladár[*]*, Horváth Attila*[*]*, Gyimóthy Attila*[*]*, Bánfi Frigyes*[*]

Investigation of precise digital levelling instruments in the Geodetic and Geophysical Research Institute *– In this study the development of different levelling instruments are shortly summarized together with the increasing error budget due to this development.The laser interferometric rod calibration system developed in our institute is introduced and the test investigations are compared to the results of another foreign laboratory. A simplified system calibration arrangement is also introduced, which is used to compare different instruments. By this method a systematic difference between our Leica Na3003 and DNA 03 was determined. Even in the case of instruments of the same type significant differences were found, which draw the attention to the investigations of the receiver adjustments as well. In connection with the re-measurement of the first order levelling network of Hungary a suitable instrument investigation procedure was proposed, which can reduce the budget of the re-measurement.*

Keywords: calibration, digital levelling instrument, simplified system calibration

Tanulmányunkban röviden összefoglaltuk a szintező műszerek fejlődését és a fejlődéshez kapcsolódó újabb hibaforrásokat. A szakirodalom alapján bemutattuk a különböző vizsgálati módszereket és a német nyelvterületen végrehajtott átfogó vizsgálat fontosabb eredményeit. Bemutattuk a kódlécek kalibrálására kialakított rendszerünket, és a teszteredményeket összehasonlítottuk a külföldi mérések eredményeivel. Egyszerűsített vizsgálati módszert vezettünk be a rendszerkalibrálás pótlására, amellyel különböző műszerek összehasonlító vizsgálatát végeztük el. Meghatároztuk a Leica NA 3003 és a Leica DNA 03 műszereink mérési eredményei közti szabályos eltérést. Az azonos típusú műszerek esetében is találtunk a mérési sorozatok között szignifikáns különbségeket, ami a műszerek minőségi állapotának ellenőrzésére is felhívja a figyelmet. A magyarországi felsőrendű hálózat újraszintezésével kapcsolatban javaslatot teszünk a műszerek hazai vizsgálatára, ami a kalibrálási költségek csökkentéséhez is vezethet.

Kulcsszavak: kalibráció, digitális szintező műszer, egyszerűsített rendszer kalibrálás

1 Bevezetés

Intézetünk alapító okirata kiemelt feladatként határozta meg a geodéziai műszerek vizsgálatát, geodinamikai megfigyelő rendszerek fejlesztését és kalibrációját, ami jelenleg is a Geodéziai és Méréstechnikai Osztály egyik fő profilja (Mentes 2001).

Az MTA GGKI létesítésekor (1953) a korszerűnek tekinthető, speciálisan tervezett műszervizsgáló csarnokunknak is jelentős szerep jutott a MOM (Magyar Optikai Művek) – akkoriban világviszonylatban is jelentősnek számító – teodolit, giró-teodolit és szintező műszer fejlesztési programjaiban és a prototípusok tesztelésében is. A speciális műszervizsgáló berendezések kifejlesztése mellett (libella mérleg, szabályzó-kollimátor, terepi léckomparátor, lézeres léckomparátor, mágneses tér szimulátor stb.) jelentős tudományos cikkek és disszertációk is készültek (Orbán 1970, 1982, 1987, Orbán és Bánfi 1988, Halmos 1971, Alpár 1966).

Az ismert politikai és gazdasági változások a MOM sajnálatos leépüléséhez vezettek. Intézetünk számára azonban csakhamar új faladatok adódtak, többek között a geodéziai műszerek kalibrálási módszereinek kidolgozása terén. Módszereink etikátlan eltulajdonítása után hamarosan újabb feladatként jelentkezett az EOMA, az Egységes Országos Magassági Hálózat újramérésébe való bekapcsolódás, és különösen az itt használatos új szabatos digitális szintező műszerek és kódlécek kalibrálása. A kódlécek kötelező - jelenleg csak külföldön végrehajtható - vizsgálata a mérésben

[*]*MTA GGKI, 9400 Sopron, Csatkai u. 6-8.*
E-mail: horvath@ggki.hu

résztvevő vállalatokra nagy anyagi terhet ró. Az MTA Geodéziai Tudományos Bizottság az újramérésekkel és a feldolgozással kapcsolatban adhoc bizottságot hozott létre, ahol intézetünk egyéb feladatok mellett vállalta a műszerekkel kapcsolatos problémák feltárását és olcsóbb, alternatív vizsgálati lehetőségek kidolgozását is.

Az alábbi anyagban először röviden összefoglaljuk a szintező műszerekkel kapcsolatos hibaforrások fejlődését, bemutatjuk a külföldön kifejlesztett kalibrálási eljárásokat és az ezzel kapcsolatos fontosabb tanulmányok eredményeit (Orbán et al. 2009, Virág 2002), majd az intézetünkben eddig végzett előzetes vizsgálatokról számolunk be.

2 A szintező műszerek vizsgálata

2.1 A műszerek hibaforrásai

A hagyományos szabatos libellás és kompenzátoros szintezőműszerek olyan kiváló műszaki alkotásoknak tekinthetők, amelyek pontosságát a mai modern digitális berendezések sem tudták felülmúlni. A modern műszerek ugyan jóval gyorsabb és kényelmesebb mérést tesznek lehetővé, valamint nem igényelnek olyan nagy mérnöki koncentrációt, mint a régebbi műszerek, de az új műszaki elemek alkalmazása nagy mennyiségű újabb hibaforráshoz vezetett, amelyeknek hatását csak hosszas vizsgálatok -és tapasztalat-szerzés útján lehet megismerni. Ezért is válik egyre fontosabbá jól felszerelt műszervizsgáló laboratóriumok létrehozása és fenntartása, kalibrálásban jártas szakemberek alkalmazásával és a külföldi kutatásokba való bekapcsolódással.

A felsőrendű libellás szintezőműszerek legfőbb hibaforrása a libella hőérzékenysége volt, ezért a méréseknél műszerernyőt kellett alkalmazni. Más hibaforrások hatását konstrukciós úton, vagy a műszer szabályozásával lehetett viszonylag egyszerű módon kiküszöbölni/csökkenteni. Ilyenek voltak:

- a fekvőtengely külpontossága,
- az optikai mikrométer nagyítási (RUN) hibája és
- a libella keresztbenállása.

A kompenzátoros berendezések megjelenésével a műszer hőérzékenysége csökkent, a mérés kényelmesebb és gyorsabb lett, de felléptek a kompenzátor hibái:

- a horizontferdeség,
- a mágneses terek hatása és
- a kompenzátorok rezgésérzékenysége.

Közös hibaként jelentkezett mind a libellás, mind a kompenzátoros szintezésnél, hogy a műszerekhez tartozó invárlécek osztási pontossága nem mindig volt megfelelő (Foppe et al. 2005).

A modern digitális szintező műszerek megjelenésével a hibaforrások csak tovább bővültek. Egyrészt ezek is kompenzátoros műszerek, így örökölték azok korábbi összes hibáját, s ehhez jöttek még a digitális képfeldolgozás hibaforrásai. A teljesség igénye nélkül a következő járulékos hibákra hívjuk fel a figyelmet (Rüger és Brunner 2000):

- a lécmegvilágítás hatása,
- a hiányos léckép hatása,
- a ciklikus hiba - veszélyes távolságok hatása (Staiger és Witte 2005),
- az optikai elrajzolás hibája,
- a lécosztás károsodásának hatása,
- a lécre vetülő árnyékok és fények hatása (Worschitz 2005) és
- még sok egyéb hibaforrás, mint pl. az, hogy az elektromos működtetés saját belső hőt is termel, továbbá, hogy a laboratóriumi méréseknél a műszer kevésbé érzékeny a hideg fényre, ami a mérési pontosságot rontja, stb.
- Az újabb hibaforrásoknak megfelelően lényegesen bonyolultabbak lettek a műszervizsgálati és léc-kalibrálási módszerek is, amelyek egy része nagy költséggel felszerelt vizsgáló laboratóriumot igényel.

2.2 A kalibrációs módszerek összehasonlítása

A szakirodalom alapján ismertté vált (Schauerte és Heister 2005), hogy a legalaposabb vizsgálatot német nyelvterületen öt intézmény kalibráló laboratóriumának együttműködése keretében hajtották végre (RFW U Bonn, BU München, TU München, ETH Zürich és TU Graz). A vizsgálatokhoz egy Trimble DiNi és egy Leica DNA 03 műszert vittek körbe saját léceikkel együtt, hogy összehasonlíthassák az intézmények kalibrálási pontosságát. Ugyan többnyire eltérő eljárásokat alkalmaztak, de megállapították, hogy az eljárások mindegyike kellő pontosságú vizsgálati eredményre vezetett a lécméter (lécméretarány) meghatározása terén. Ezen kívül a legfontosabb megállapítások a következők voltak:

- Az invár szalag hőérzékenységének vizsgálata nagyon bonyolult, a terepi hőmérsékletmérés és a hőtágulási korrekció alkalmazása igen bizonytalan, ezért a gyakorlatban az elméleti hőtágulási együttható használata is elegendő lenne (0,75 ppm /˚C).
- A hagyományos értelemben vett léckomparálásra, *léckalibrálásra* tulajdonképpen sincs is szükség, mivel újabban a kódléceket már interferométer segítségével osztják, így az osztóberendezés és a vizsgálóberendezés lényegében azonos pontosságú (néhány mikron). Az évenkénti léckalibrálás azonban mégis célszerű elvégezni azért, hogy ellenőrizzék a lécméter változását (pl. a szalag feszítőerejének megváltozása miatt) és ha szükséges, a szalag hőtágulási együtthatóját.
- A lécméter változása vízszintesen és függőlegesen elhelyezett léccel is vizsgálható. Az utóbbi elméletileg helyesebb (a két megközelítésből csak néhány mikron eltérés adódik).
- A legkedvezőbb kalibrációs eljárás az un. *rendszerkalibrálás*, ahol a függőlegesen emelhető lécek magasságváltozását magával a vizsgálandó szintezőműszerrel mérik különböző távolságokról (van érték), a lécek pontos emelési értékét pedig lézer-interferométerrel határozzák meg (kell érték). Az így meghatározott lécmétert megkülönböztetésképpen *rendszer lécméternek* nevezték, de levezethető a mérési eredményekből olyan műszerre jellemző korrekciós tényező is, amelyeket beépítenek a szintezés javítási képletébe. A külföldi vizsgálatok szerint ennek a műszertől függő korrekciónak az értéke elérheti a 0.15 mm-t is. Ez rámutat többek között arra is, hogy hiába kifogástalan a léc gyári osztása, ha a leképzés és a feldolgozás hibái miatt ilyen mérési hibák is előfordulhatnak (Heister et al. 2005). Egyes vélemények szerint célszerű lenne elvégezni mind a léckalibrálást, mind a rendszerkalibrálást. A léckalibrálás pontossága ugyanis néhány mikrométer nagyságrendű, amellyel a lécméter határozható meg pontosabban, a néhány század mm-es pontosságú rendszerkalibrálással viszont magának a magasságmérésnek a várható pontossága kalkulálható.

3 Az intézetünkben végrehajtott vizsgálatok

3.1 Léckomparálás

A hagyományos léckomparálás céljára már korábban kialakított vízszintes lézer-interferométeres mérőrendszerünket a kódlécek tulajdonságaihoz kellett igazítanunk, a korábbi automatikus mérést egyelőre nem tudjuk alkalmazni.

Szerencsére az összes osztás vizsgálatára az előző 2.1 fejezet következtetései alapján már nincs is szükség, ezért csakis a vékony osztásvonalak helyzeti pontosságát és az ebből számítható lécmétert vizsgáltuk. Bár a nálunk alkalmazott koincidenciás-mikroszkópos irányzás (1. ábra) kényelmetlen és nagy gyakorlatot is igényel, a meghatározott lécméter a német vizsgálatokkal gyakorlatilag egyforma eredményt hozott. (A léceket előzőleg a müncheni egyetemen kalibrálták).

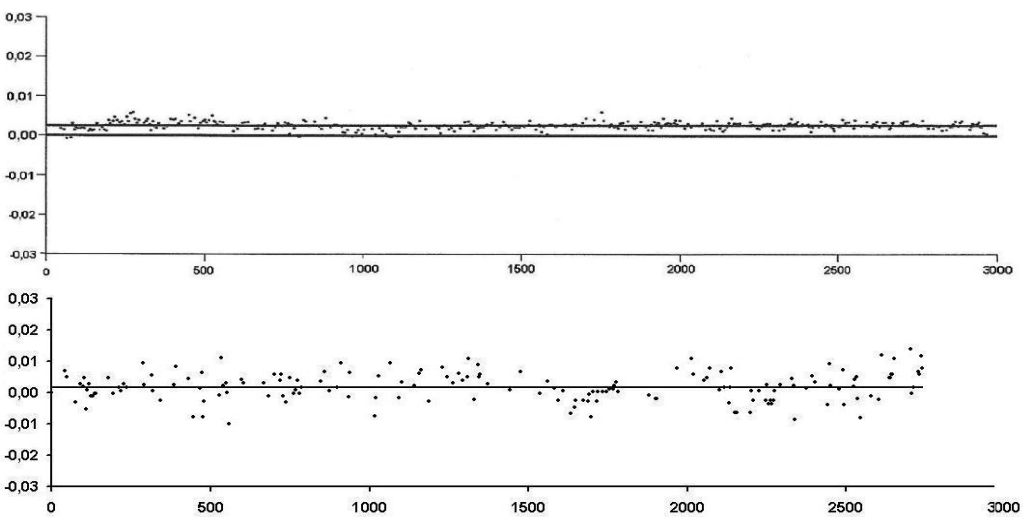
A 2. ábrán bemutatjuk a NEDO GPCL3 no. 9717 számú lécünk TU müncheni és soproni vizsgálatának az eredményeit. Az ábrán látható pontok a vizsgált kódosztások helyzeti hibáit, a „kell ” értéktől való eltéréseit mutatják. A „kell” értékek azáltal adódnak, hogy az egyes kódosztások szélei, függetlenül a kódosztások szélességétől, mindig a 2.025 mm-s távolság egész-számú többszöröseinek távolságában fekszenek egymástól a léc teljes hossza mentén. A pontokhoz tartozó kiegyenlí-

tő egyenes meredeksége adja a lécméter értékét. Ez a meredekség a müncheni vizsgálatok alapján 0.09 ppm értékkel, a soproni vizsgálatok alapján 0.15 ppm értékkel jellemezhető. Annak ellenére, hogy a mi vizsgáló berendezésünk a münchenihez viszonyítva egyelőre provizórikusnak tekinthető, ami a mérési eredményeknek a 2. ábrán látható szórásából is nyilvánvaló – a pontosság növeléséhez a CCD kamerák beszerzését most szorgalmazzuk – a két lécméter értéke meglepően egyezik. Különösen igaznak tűnik ez akkor, ha figyelembe vesszük, hogy a jól felszerelt öt külföldi kalibráló laboratóriumban meghatározott lécméretarányok az irodalmi adatok alapján átlagban 3-4 ppm értékben is eltérnek egymástól annak ellenére, hogy a méretarány meghatározására vonatkozó megismételt méréseik relatív szórása minden laboratóriumban és bármely eljárást alkalmazva is 0.5 ppm alatti érték volt (Schauerte és Heister 2005).

Az általunk végzett eddigi vizsgálatokból a fentiek alapján arra lehet következtetni, hogy ha a léceket a nemzetközileg elfogadott laboratóriumok egyikében már megvizsgáltattuk, akkor a lécméter további esetleges változása már Sopronban is ellenőrizhető. Csak szignifikáns eltérés esetén kell a léceket ismét külföldön megvizsgálni.



1 ábra. A kódlécek vízszintes elhelyezésű vizsgálata



2. ábra. A müncheni (felső ábra, lécméter 0.09 ppm) és a soproni (alsó ábra, lécméter 0.15 ppm) léckalibrálás eredményeinek összehasonlítása (mm)

3.2 Egyszerűsített rendszerkalibrálás

Az előzőekben említett rendszerkalibrálás kiépítéséhez jelentős fejlesztésre és nagyobb összegre lenne szükségünk. Ennek hiányában az alapelv vizsgálatához és a különböző műszerek összehasonlításához a laboratóriumunk adottságait kihasználva egy tesztpályát alakítottunk ki (3. ábra), ahol maximálisan d=25 m távolságon belül tudunk egyszerűsített rendszervizsgálatot végrehajtani. A lépcsős tesztpályán elhelyezett csapok magasságát nagy pontossággal bemértük, így ezek helyettesítik a lécek interferométeres pontosságú emelését.

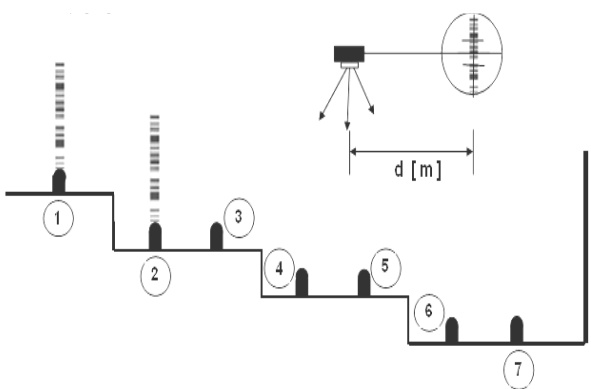
A csapok helyes (kell) magasságkülönbségeit a Grazban és az intézetünkben is kalibrált, hagyományos osztású Kern invarlécünkkel és a Zeiss NI002, HA-1 és Zeiss 004 típusú szabatos szintezőműszerekkel határoztuk meg. A szintezőműszerek optikai mikrométerét hitelesített, üveglépték segítségével kalibráltuk. A mérés a legrövidebb irányzási távolságból történt, ugyanis korábbi vizsgálataink alapján tudtuk, hogy így biztosítható a szélső pontossági igény (0.01 mm). Az említett műszerek pontosan egyforma magasságban álltak, tehát a léceken ugyanazokat az osztásvonalakat irányoztuk. Az irányzott osztásvonalak távolságát később interferométerrel külön is meghatároztuk, ami által a mért magasságkülönbségek további ellenőrzés alá kerültek.

A vizsgálandó digitális szintezőműszerek egymás közelében, stabil pilléreken álltak, a hozzájuk tartozó lécek szabatos beállítása pedig speciális lécbefogó berendezéssel történt (4. ábra). Így lényegében csak a lécek osztáshibái és a műszerek hibái terhelték a mérési eredményeket. Minden összehasonlítandó műszer egyidőben ugyanazokat a léceket irányozta, így ellenőrizhettük, hogy azok egyforma magasságkülönbséget mérnek-e.

Intézetünk az ipari megbízások során (pl. Bányai és Mentes 2006) kezdetben csak hagyományos libellás és kompenzátoros szintezőműszereket használt. Később áttértünk a Leica NA 3003, újabban pedig a Leica DNA 03 digitális műszer használatára. A kompenzátoros műszerekkel mért sorozatokkal kapcsolatban már korábbi műszervizsgálatainknál is adódtak megmagyarázhatatlan eltérések. Most újabban arra voltunk kíváncsiak, hogy hasonló eltérések a digitális műszereknél is előfordulnak-e.

E célból először egy Leica NA 3003 és egy Leica DNA 03 műszert hasonlítottunk össze szimultán mérésekkel. A két műszer közel egyforma magasságban, egymás mellett, stabil pilléren volt felállítva. Az irányzott két léc a műszerektől 24m távolságban szintén egymás mellett állt. A vizsgálati eredmények egy része az 5. ábrán látható (22 mérés).

Többszörös ismétléssel a mérések számát úgy választottuk meg, hogy az mindig megfeleljen 1 km hosszúságú szintezésnek, miközben a műszerek és a lécek egy helyben álltak. A vizsgálat meglepő eredménye az lett, hogy a két műszer által mért magasságkülönbségek „álláspontonként" szisztematikusan eltértek egymástól mintegy 0.08 mm – 0.1 mm-rel. A keletkezett km-es záróhiba a két műszer között 2.00 – 2.25 mm-nek adódott. Az új magassági hálózatunk újramérésénél ilyen csatlakozási hibákra esetleg akkor számíthatunk, ha az újabban használ DNA 03 műszerrel egy korábban NA 3000 műszerrel mért szakaszhoz csatlakozunk.



3. ábra. Lépcsős kalibrációs tesztpálya vázlata

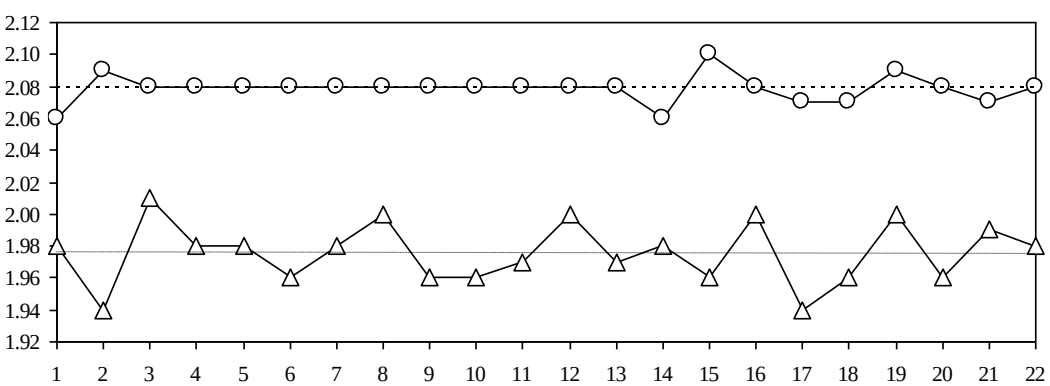


4. ábra. Lécbefogó-szerkezet

Példaképpen még egy rövid, de tanulságos vizsgálat eredményeit foglaljuk össze a 1. táblázatban, ahol három DNA 03 műszert hasonlítottunk össze (A, B és C műszerek). Itt a műszereket szintén egyforma magasságban helyeztük el, és különböző távolságokból vizsgáltuk a mért magasságkülönbségeik eltérését a „kell" értéktől. A vizsgálat alapján megállapítható, hogy a helyes értéktől való eltérések a távolság függvényében növekednek. A C műszer szignifikáns eltérést mutatott a másik két műszerhez viszonyítva, ami a műszer nem megfelelő állapotának következtében jelentkezhetett. Az észlelt hibákra felhívtuk a tulajdonos figyelmét.

A teljesség igénye nélkül az összehasonlító vizsgálat további szempontjaira is rámutatunk:

- A mérések megkezdése előtt a műszereknek megfelelő akklimatizálódási időt kell hagyni, és legalább félórával a mérés előtt létre kell hozni a mérés időpontjára jellemző környezeti hatásokat (világítás, hőmérséklet). Ez idő alatt a műszereket már be kell kapcsolni, hogy az elektromos hőtermelés okozta hibák is kiegyenlítődjenek. Ilyen szempontból a terepen végzett vizsgálatok néha jobbnak bizonyulnak a jobb hőelvezetés miatt. Hasonló célból egyes laboratóriumi vizsgálatokat segéd-akkumulátorral végeznek, de az eredeti akkut is a műszerben hagyják az egyensúlyi helyzet megőrzése céljából. A műszervizsgálatok alatt a hőmérséklet-, légnyomás -és páratartalom adatokat folyamatosan regisztrálni kell.
- A méréseket egymás mellett, közel egyforma magasságban elhelyezett műszerekkel párhuzamosan kell végrehajtani.
- Ez a vizsgálati elrendezés a konkrét mérőcsoportok összehasonlítását is lehetővé teszi, ha a szimultán méréseknél mindenki a saját műszerével és lécével is mér, majd eredményeit összehasonlítja a laboratórium etalon műszerének és lécének adataival.



5. ábra. A Leica NA 3003 (Δ) és a Leica DNA 03 (O) műszerek által mért magasságkülönbségek (mm) a mérésszám függvényében

1. táblázat. Három Leica DNA 03 műszer által mért magasságkülönbségek helyes értéktől való átlagos eltérései és azok szórása (mm) különböző léctávolságból mérve

műszer-léctávolság	A vizsgált DNA 03 műszerek		
	A	B	C
5 m	0.05 ±0.02	0.06 ±0.02	0.09 ±0.03
16 m	0.09 ±0.03	0.10 ±0.03	0.19 ±0.06
21 m	0.15 ±0.05	0.17 ±0.06	0.29 ±0.10

3.3 Az eredmények összefoglalása és hasznosítása

Az eddig végzett vizsgálataink tapasztalatai alapján már látható, hogy a Leica műszerek összehasonlítására végzett egyszerűsített vizsgálatok is alkalmasak a gyártó cég által megadott műszerjellemzők ellenőrzésére és a nem megfelelő pontosságú műszerek kiszűrésére. A külföldi vizsgálatokból azt is tudjuk, hogy a léc-sérülések és a műszerek esetleges meghibásodásai 0.1 mm-es és ezt jóval meghaladó mérési hibákhoz is vezethetnek (Heister et al. 2005). Az ilyen nagyságrendű hibák a mi vizsgálati módszereink pontosságával nagy biztonsággal kimutathatók.

Megállapítottuk, hogy még azonos típusú műszerek mérési eredményei között is lehet jelentős különbség, amely számos okra vezethető vissza. Ezeknek a hibaforrásoknak a tüzetes vizsgálatát is tovább kell folytatnunk. A további ellenőrzések során a teljes felszerelést és azokat a műszerelemeket is alaposan meg kell vizsgálni, amivel ebben a dolgozatban most részletesen nem foglalkoztunk, például a horizontferdeség vizsgálatával, a libellák kiigazításával, mágneses hatás vizsgálatával, stb.

A lécméter ellenőrzésére alkalmazott itthoni vizsgálattal ellenőrizni tudjuk a lécméter változását, ezért a léceket ritkábban kell külföldön kalibráltatni. Az új felsőrendű szintezési szabályzat előkészítésénél ezekre a szempontokra is felhívtuk az illetékesek figyelmét.

Reményeink szerint az intézetünkben folyó vizsgálatok jelentősen hozzájárulhatnak az EOMA mérések pontosságának fokozásához, az ismétlések számának redukálásához és a kalibrálási költségek csökkentéséhez.

Hivatkozások

Alpár Gy (1966): Libellák pontosságának vizsgálata. Kandidátusi értekezés

Bányai L, Mentes Gy (2006): Deformáció vizsgálatok geodéziai módszerei. Geomatikai Közlemények IX, 71-87.

Foppe K, Wasmeier P, Wunderlich T (2005): Erfahrungen aus nahezu 25 Jahren Nivellierlattenprüfungen an der TUM. AVN, 6, 213-220.

Halmos F (1971): Giroteodolitok geodéziai alkalmazásának elméleti és gyakorlati kérdései. Kandidátusi értekezés.

Heister H, Worschitz H, Brunner F. K, (2005): Präzisionsnivellierlatten, Komponanten- oder Systemkalibrierung? AVN, 6, 233-238.

Mentes Gy (2001): Geodéziai és geodinamikai műszerfejlesztések az MTA Geodéziai és Geofizikai kutatóintézetében. Geomatikai Közlemények IV., 47-60.

Orbán A (1970): About the instrumental research and test equipments of GRL. Fifteen Years Geodetical and Geophysical Research Laboratories of then Hungarian Academy of Sciences in Sopron, 31-36.

Orbán A (1982): Laboratóriumi módszerek a teodolitok minősítésére. Kandidátusi értekezés

Orbán A (1987): A kompenzátoros szintezőműszerek mágneses hatás miatti hibái. Geodézia és Kartográfia, 6, 438-442.

Orbán A, Bánfi F (1988): Szabatos kompenzátoros szintezőműszerek mágneses hatás miatti hibáinak hazai vizsgálata. Geodézia és Kartográfia, 1, 5-11.

Orbán A, Horváth A, Gyimóthy A (2009): A libellás szintezőműszertől a digitális szintezőműszerig, Geodézia és Kartográfia, LXI (2), 6-13.

Rüger JM, Brunner FK (2000): On the System Calibration and Type Testing od Digital Levels. ZfV, 4, 120-130.

Schauerte W, Heister H (2005): Der Ringversuch 2003-2004 zur Kalibrierung von Präzisionsnivillerlatten. AVN 6, 221-228.

Staiger R, Witte B (2005): Zur Bedeutung der Prüfung von Präzisionslatten für die Praxis. AVN, 6, 200-203.

Virág G (2002): A hazai szintezések komparálási problémái. Geomatikai Közlemények, V, 319-326.

Worschitz H (2005): Systemkalibrierung: Effekte von digitalen Nivelliersystemen. AVN, 6, 239-244.

EÖTVÖS-INGA FELÚJÍTÁSA ÉS TESZTMÉRÉSEK A BUDAPESTI MÁTYÁS-HEGYI-BARLANGBAN

Völgyesi Lajos[,**], Égető Csaba[*], Laky Sándor[**], Tóth Gyula[*,**], Ultmann Zita[*]*

Reconstruction of a torsion balance, and test measurements in the Mátyás cave in Budapest *- During recent investigations concerning geodetic applications of torsion balance measurements several problems arose, which required performing new torsion balance measurements. For that reason the Eötvös-Rybár (Auterbal) torsion balance owned by the Department of Geodesy and Surveying (Budapest University of Technology and Economics), which has been out of operation for many decades, was reconstructed and modernized. The scale reading has been automatized and its accuracy has been improved by using CCD sensors. Calibration and processing of field measurements were computerized to meet today's requirements. The first test measurements took place in the Mátyás cave (Budapest), including measurements on the main gravity reference point of Hungary, and the points of a gravity microbase created by the Eötvös Loránd Geophysical Institute.*

Keywords: reconstruction of a torsion balance, CCD sensor, automation, test measurements

Az Eötvös-inga mérések geodéziai alkalmazására vonatkozó kutatásaink során az utóbbi időkben több olyan probléma adódott, amely szükségessé tette újabb Eötvös-inga mérések elvégzését. Ennek érdekében felújítottuk a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék múzeumában korábban kiállított működésképtelen Eötvös-Rybár (Auterbal) ingát, a leolvasást CCD érzékelők alkalmazásával automatizáltuk és pontosabbá tettük. Modern technikai és számítástechnikai lehetőségek alkalmazásával oldottuk meg a kalibrációt és a mérések kiértékelését. Az első teszt-méréseket a budapesti Mátyás-hegyi-barlangban a gravitációs főalapponton és az ELGI mikrobázisán végeztük.

Kulcsszavak: Eötvös-inga felújítása, CCD érzékelő, automatizálás, tesztmérések

1 Bevezetés

Magyarországon 1967-ben történtek utoljára Eötvös-inga mérések. A gravitációs kutatásokban az Eötvös-inga mérések nehézkessége, időigényessége miatt egyre inkább a graviméteres mérések vették át a vezető szerepet. Időközben a technika és a tudásunk is sokat fejlődött. Az új technikai lehetőségek (a modern számítógépek megjelenése, CCD érzékelős kamerák, digitális hőmérők alkalmazása, stb.) olyan új távlatokat nyitottak, amelyekről nagynevű példaképeink – Eötvös Loránd és társai – a korukban még nem is álmodhattak. Elképzelhető, hogy az új alapelveken működő gradiométerek megjelenésével – és részben a még fellelhető Eötvös-ingák modernizációjával – a gradiensmérések új, nagy reneszánszát éljük meg hamarosan.

Napjainkban az újabb Eötvös-inga mérések végzését több különböző ok mellet elsősorban a vertikális gradiensek meghatározásával kapcsolatos kutatásaink tették szükségessé (Csapó et al. 2008, Völgyesi et al. 2005). Mint ismeretes, az Eötvös-tenzor 9 eleme közül szimmetria okok miatt csak 5 elem független, amelyből 4 mérhető közvetlenül Eötvös-ingával. Haalck (1950) ötlete alapján olyan számítási módszert dolgoztunk ki, amellyel Eötvös-inga mérések felhasználásával az Eötvös-tenzor hiányzó 5. eleme, a vertikális gradiens is meghatározható interpolációs eljárással (Tóth et al. 2005, Tóth 2007). A módszer alkalmazhatóságát szintetikus adatok felhasználásával teszt számításokkal már igazoltuk (Tóth et al. 2005), hátra van még viszont a valódi mért adatokkal történő ellenőrzés. Erre a célra olyan pontok kellenek, ahol mind Eötvös-inga adatok, mind vertikális gradiens mérések rendelkezésre állnak. Mivel a korábban szinte kizárólagosan nyersanyagkutatás céljaira végzett ingamérések pontos koordinátái nem ismeretesek, ezért ezeken a pontokon ma már vertikális gradiens mérések nem végezhetők. Adott volt ugyanakkor az ELGI Mátyás-hegyi-barlangjában egy olyan 14 pontból álló mikrobázis, ahol rendelkezésre állnak korábbi Eötvös-inga mérések, valamint garviméteres és vertikális gradiens mérések is történtek. Sajnos korábban csak 3 azimutos ingamé-

[*]*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék*
[**]*MTA-BME Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport*
E-mail: volgyesi@eik.bme.hu, csabiegeto@yahoo.de, laky.sandor@freemail.hu, gtoth@sci.fgt.bme.hu, ultmann@gmail.com

réseket végeztek, így ezekből az interpolációhoz szükséges görbületi gradiensek nem határozhatók meg. A mikrobázis pontjai egymáshoz igen közel, néhány méteres távolságban helyezkednek el a Mátyás-hegyi-barlang bejárati folyosójában.

Az Eötvös-ingák közül napjainkban két olyan típus áll rendelkezésre, amelyekkel jelenleg is megfelelő pontosságú terepi méréseket tudunk végezni. Az egyik az 1920-as évek végére kifejlesztett Eötvös-Rybár (*Auterbal*) inga, a másik ennek az 50-es évekre továbbfejlesztett változata, az *E54* típus. Az E54 ingák elterjedésével az ELGI 1964-ben egy akkor már sokat „gyengélkedő" Auterbal-ingája nélkülözhetővé vált, ezért az ÉKME Felsőgeodézia tanszékének ajándékozta oktatási célokra. Nem sokkal ezt követően az inga teljesen működésképtelen lett és később a tanszék múzeumába került. Mivel a működésképtelen inga javítását senki nem tudta elvégezni, magunk vállalkoztunk a feladat megoldására. Hosszú munkánkat siker koronázta, az Auterbal-inga működőképes lett, sőt bizonyos szerkezeti elemek továbbfejlesztésével (pl. CCD érzékelős leolvasással) sikerült a jelenkori technikai szintnek megfelelően továbbfejleszteni. Az alábbiakban röviden megismerkedünk az Auterbal-inga felépítésével, a felújításának problémáival, és áttekintjük a tesztmérések eredményeit.

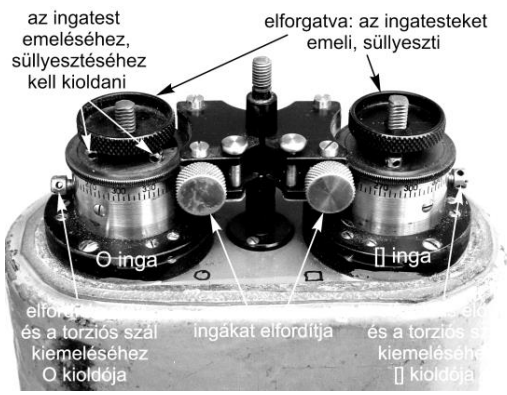
2 Az Auterbal-inga felépítése

Az Auterbal-inga mérőképes állapotában a 1. ábrán látható. Négy fő szerkezeti egysége: az ingaház, a középrész, az állványzat és a leolvasókar. Az ábrán látható ingaház a műszer legfontosabb szerkezeti eleme, ebben található két egymástól teljesen független, ugyanakkor egyenértékű torziós inga egymással antiparalel felfüggesztésben. Az ingaház és a középrész a későbbi fejlesztésű és széles körben elterjedt E54 típusú ingával ellentétben még egyetlen egységet képez, amelyek szétszerelését csak megfelelő ismeretekkel rendelkező szakember végezheti el, 6 db erős összekötő-csavar eltávolításával. Az ingaház felső részén találhatók a beszabályozó csavarok (2. ábra), amelyek a védőkupak leszerelésével válnak hozzáférhetővé. Ezekkel állítható külön-külön a két inga felfüggesztési magassága, és itt nyílik lehetőség az ingatestek parányi elfordítására. Ugyancsak itt lehet előkészíteni a torziós szálak kiemelését, illetve cseréjét. Ezeket a műveleteket kizárólag speciális ismeretekkel és nagy gyakorlati tapasztalatokkal rendelkező szakember végezheti el, a legkisebb rossz mozdulat a torziós szál szakadását eredményezi. A torziós szálak ma már pótolhatatlanok.

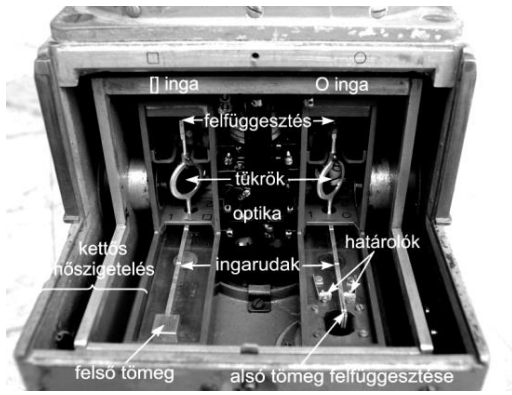
Vizuális leolvasás esetén speciális leolvasókar csúsztatható az ingaházra a felső részén található függőleges sínekre. A leolvasókaron és az ingaházon a megegyező számozásnak megfelelően egyetlen helyzetében illeszthető finoman és akadálymentesen a leolvasókar az ingaházra, fordított felhelyezés esetén a kar rászorulhat az őt vezető függőleges sínekre. Az ingaházon belül az ingák elhelyezése a 3. ábrán látható, az inga szétszedett állapotában. A két antiparalel elhelyezésű inga kettősen hőszigetelt térben van, mindkét alumíniumból készült ingarúd a felülről ráerősített tükrön keresztül csatlakozik a felfüggesztő torziós szálakhoz. Az Auterbal-ingában a torziós szálak vastagsága 0.017 mm (a hajszálak vastagsága 0.06 - 0.14 mm). A 3. ábrán jól látható a baloldali ingarúdra erősített téglatest alakú tömeg, a másik vele párhuzamos ingakaron pedig az alsó tömeg felfüggesztési helye. Megkülönböztetésül az egyik ingát "O"-val jelölve köringának, a másikat "[]"-val jelölve négyszögingának nevezzük.



1. ábra. Az Auterbal-inga fontosabb szerkezeti elemei



2. ábra. A torziós szálak beszabályozó csavarjai



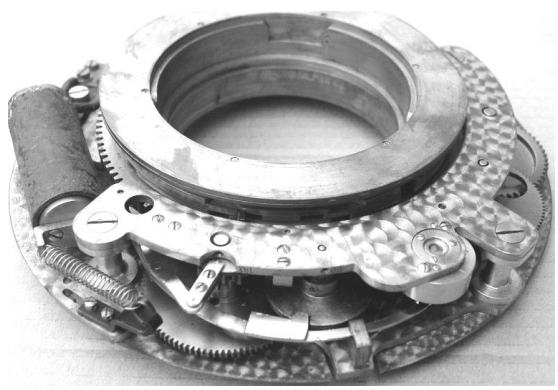
3. ábra. Az inga belső szerkezete

1. táblázat. A 36617 sz. Auterbal-inga fontosabb fizikai paraméterei

	O inga	[] inga
tömeg	14.905 g	14.906 g
az ingarúd keresztmetszeti méretei	2 / 7 mm	2 / 7 mm
az ingarúd fél karhossza	7 cm	7 cm
a torziós szál hossza	20 cm	20 cm
a torziós szál átmérője	0.017 mm	0.017 mm
a torzós szál csavarási állandója	0.0612 [cgs]	0.0616 [cgs]
az ingakar és a lelógó tömeg távolsága	20.987 cm	20.992 cm
tehetetlenségi nyomaték	1634.2 [cgs]	1652.6 [cgs]
tükör - skála távolság	32.46 cm	32.46 cm
skálaosztás tartománya	0 - 280	280 - 560
két szomszédos skálaosztás távolsága	0.25 mm	0.25 mm
ingakar 1°-os elfordulása	88 skálaosztás	88 skálaosztás
torziós fej állítócsavarjának menetemelkedése	1 mm	1 mm
a két párhuzamos inga egymástól mért távolsága	7 cm	

Az ingák lengési tartománya a 3. ábrán látható "határolókkal" állítható be, az ingák elfordulási szöge valamivel kisebb, mint $\pm 2^{o}$. A vizsgált 36617 számú Auterbal-inga fontosabb fizikai paraméterei Rybár I. 1937-as, Banai Gy. 1964-es mérései illetve számításai alapján az 1. táblázatban láthatók összefoglalva.

Az Auterbal-inga 1. ábrán bemutatott középrészének több fontos funkciója van. Legfontosabb része a bonyolult óraszerkezet, amely az ingát elforgatja és különböző azimutokban leállítja. Az ingával 3, 4, vagy 5 azimutban lehetséges a mérés, így a kiinduló É-i irányhoz viszonyítva 360/3=120 fokonkénti (3 azimutos mérés) 360/4=90 fokonkénti (4 azimutos mérés), vagy 360/5=72 fokonkénti (5 azimutos mérés) lehetséges. A kívánt azimutszám a középrészen található beállító kar megfelelő pozícióba fordításával választható meg. Ahhoz hogy a torziós inga különböző azimutokba el tudjon fordulni, a mérés előtt a műszert „fel kell húzni", vagyis az



4. ábra. Az Auterbal-inga kibontott vezérlőszerkezete

óramutató járásával ellentétes irányban a rugóerő ellenében el kell forgatni. A felhúzás során összesen négyszer lehet körbefordítani az ingaházat, a felhúzás mértékét a középrész hengeres falán kiképzett ablakokban lehet ellenőrizni. Az inga mérés közbeni forgatását a 4. ábrán látható óraszerkezet vezérli, amely az inga „gyenge pontja", kisebb konstrukciós hibák miatt a vezérlőszerkezet alkatrészeinek akár enyhe kopása következtében is a vezérlés időnként bizonytalanul működik.

3 Az Auterbal-inga felújítása

Az első vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy az ingánkban lévő torziós szálak nincsenek elszakadva. Ugyanakkor az inga teljesen felhúzott állapotban van, és mivel a vezérlő óramű nem működik, ebben az állapotában a műszer használhatatlan. Ekkor még nem lehetett sejteni, hogy a legalább 30 éve teljesen megfeszített állapotban lévő rugó mennyire veszítette el az erejét, és milyen egyéb problémák lehetnek a műszerrel. Az ingáról semmiféle leírás nem állt a rendelkezésünkre, így az inga szétszerelése, javítása és felújítása jelentős kihívás volt.

Az első komoly feladat az inga szét-, illetve összeszerelési sorrendjének és logikájának megfejtése, a számtalan csavar és rögzítő elem funkciójának tisztázása volt. Már a szétbontás kezdetétől fogva nagyon körültekintően kellett eljárni, mivel tudtuk, hogy a teljesen megfeszített forgatórugó a szétszedésnél igen komoly kárt okozhat.

Az ingaház és a középrész szétválasztását követően, szerencsére már a középrész szétbontásának kezdetén sikerült a rugót kioldani, majd minden további bontási műveletet alaposan megfontolva végül a 4. ábrán látható hibás vezérlőszerkezetet ki tudtuk emelni. A vezérlő óramű felújítása és az egyik törött alkatrész cseréje után sikerült a szerkezetet működőképes állapotba hozni.

Az inga összeszerelése után már az első tesztmérések alapján látható volt, hogy a „[]" inga kiválóan működik, viszont a „O" inga n_0 nyugalmi helyzete (a torziós szál csavarodásmentes állapota) a 0-280 osztású skála középső 140-es osztása helyett a skála szélén n_0 =20 körüli értékre esett, következésképpen szükségessé vált a „O" inga beszabályozása. Ez újabb problémát okozott, ugyanis máig tisztázatlan okból a „O" inga szabályozó csavarjával az ingatestet nem lehetett elfordítani. Emiatt ellenőrizni kellett a torziós szál felfüggesztését, amihez viszont elkerülhetetlenné vált a torziós szál kiemelése. Ez a szál szempontjából rendkívül veszélyes művelet, ezért korábban mindenképpen szerettünk volna elkerülni. Itt további jelentős probléma merült fel, ugyanis a torziós szál kiemeléséhez ki kellett volna oldani három olyan nehezen hozzáférhető csavart, amelyek egyikét lehetetlen volt kicsavarni, mivel a feje tőből le volt törve. A törött csavarhoz felülről nem lehetett hozzáférni a közvetlenül fölötte lévő tárcsa miatt, amit éppen ennek a 3 csavarnak a kioldásával lehetett volna eltávolítani. Végül a problémát – ha nem is egyszerűen, de – sikerült megoldani, kiemeltük a torziós szálat és ellenőriztük a szabályozó csavar és a felfüggesztés kapcsolatát. Az összeszerelést követően már be tudtuk szabályozni a „O" ingát, és elkezdődhettek a tesztmérések, amely során először közel egy hónapon keresztül ugyanabban az azimutban ellenőriztük az ingák állapotát napi legalább 10 leolvasással.

Az első napok mérési eredményei ijesztőek voltak: miközben a „[]" inga kiválóan működött, a „O" ingánál hatalmas driftet tapasztaltunk: az első 24 órában több mint 20 skálaegységet zuhant a leolvasás. Néhány nap elteltével viszont már sejteni lehetett, hogy nem annyira kétségbeejtő a helyzet, ugyanis amint az 5. ábrán is látható, jelentősen kezdett csökkeni a driftgörbe meredeksége. Két hét elteltével már csak napi 1-2 skálaosztással csökkent a leolvasás, viszont az addigi folyamatosan csökkenő drift miatt újra be kellett szabályozni a „O" szálat. Amint az 5. ábrán is láthatjuk, ekkor szándékosan kicsit "túlszabályoztuk" az ingát, mivel továbbra is számítani lehetett tartós csökkenő driftre. A közel egy hónapos folyamatos megfigyelés után elérkezettnek láttuk az időt „éles" mérések elvégzésére a Mátyás-hegyi-barlangban, ahol egyébként pár hónappal korábban már mértünk a gravitációs főalapponton az ELGI E54 típusú ingájával is.

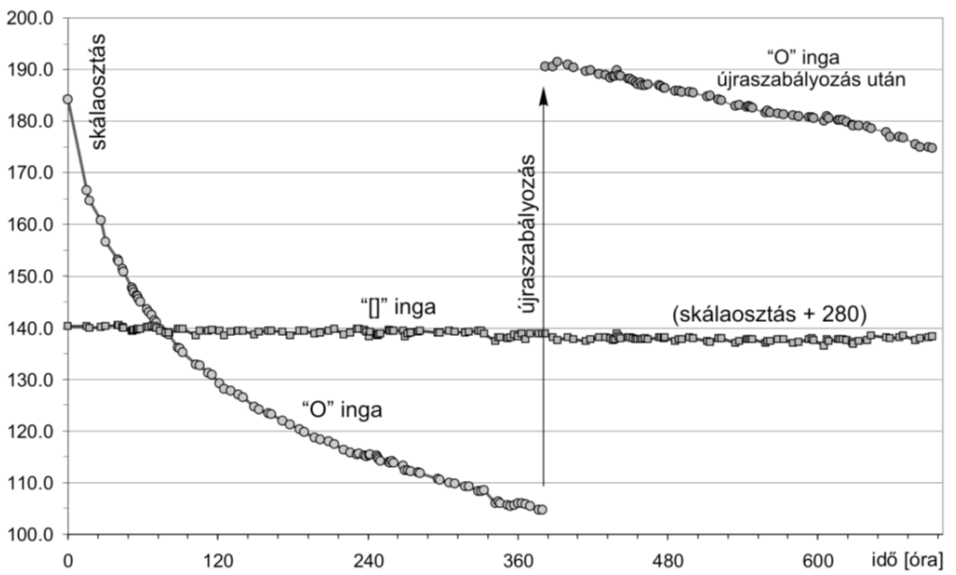
A barlangban több mérési sorozatot is végeztünk, amelyek során egyre gyakrabban felfigyelhettünk az ingánk furcsa viselkedésére. Az 5 azimutos mérések esetén az 1. és a 2. ismétlő azimutban a „[]" inga szinte ugyanazokat az értékeket mérte, ugyanakkor a „O" ingánál miközben az egyik ismétlő azimutban gyakorlatilag visszajött ugyanaz a leolvasás, a másikban viszont nem egyszer akár 40-50 skálaegység ugrást tapasztaltunk. Emiatt erős gyanú merült fel, hogy valami gond lehet a

torziós szál befogásával. Ismét szétszedtük az ingát, kivettük a torziós szálat, és erős nagyítóval átvizsgáltuk a szál befogását. A torziós szál mindkét végét a 6. ábrán látható formában forrasztással rögzítették a befogó fülekhez.

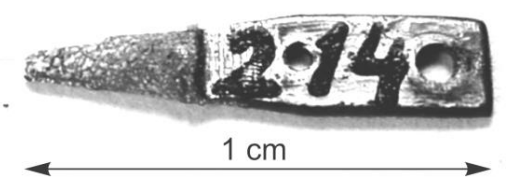
Az átvizsgálás során a felső befogó fül forrasztásán erős korróziót tapasztaltunk és a torziós szál körül egy mélynek tűnő üreg alakult ki a befogás csatlakozásánál. Még a viszonylag erős nagyítás mellet sem lehetett az üregen belül látni a szál és a forrasztás fémes kapcsolatát. Mivel az újraforrasztásnak túl nagy lett volna a kockázata, végül a ragasztás mellet döntöttünk. Vegyészekkel konzultálva olyan rendkívül erős, de ugyanakkor kellőképpen rugalmas ragasztót alkalmaztunk, amely várhatóan nem tesz kárt a szál anyagában. A ragasztás rendkívül kényes műveletét nagyító alatt hajszálak ragasztásával gyakoroltuk (a torziós szál a legfinomabb női hajszálnál is vékonyabb, szabad szemmel alig látható).

Az összeszerelés után több hétig tartó tesztmérések azt mutatták, hogy eltűnt a „O” inga korábbi erős driftje, és a 7. ábra tanúsága szerint a két inga most már teljesen egyenrangúan működött.

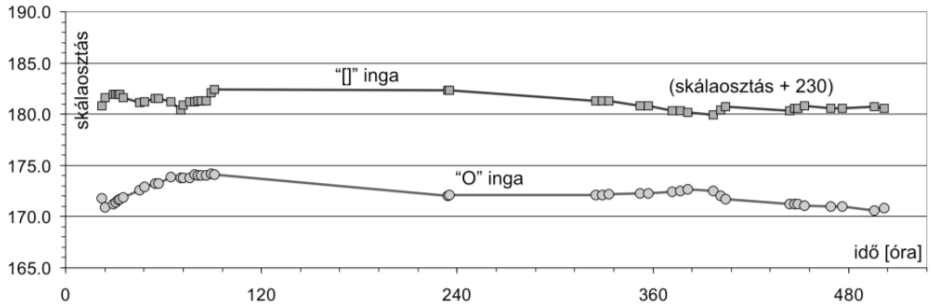
Ezt követően további fontos fejlesztéseket hajtottunk végre. Az automatikus leolvasás megvalósítása céljából a 8. ábrán bemutatott formában CCD-érzékelős kamerákat szereltünk fel a leovasókarokra, a skálák megvilágítására pedig a 9. ábrán látható formában erős fényű LED-eket (fénykibocsátó diódákat) erősítettünk a leolvasó távcsövek alá. A kamerák vezérlését, a képek rögzítését számítógéppel oldottuk meg, a szükséges szoftvereket Linux operációs rendszer alá fejlesztettük. Mivel a kamerák alkalmazásával lehetőség nyílt hosszú időn keresztül akár másodpercenkénti leolvasásokra is, ezért új távlatok nyíltak eddig ismeretlen jelenségek megfigyelésére. Megoldódott például a lengések csillapodásának, valamint a hosszú idejű drift minden eddiginél pontosabb és részletesebb megfigyelése és tanulmányozása.



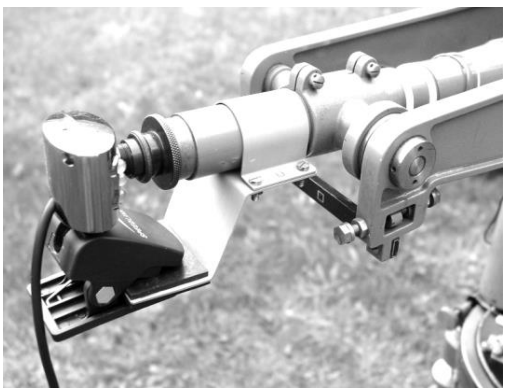
5. ábra. Az Auterbal-inga drift vizsgálata a két beszabályozás után



6. ábra. A torziós szál befogása



7. ábra. Az Auterbal-inga drift vizsgálata az „O” torziós szál ragasztása után



8. ábra. CCD-érzékelős kamera a leolvasókaron



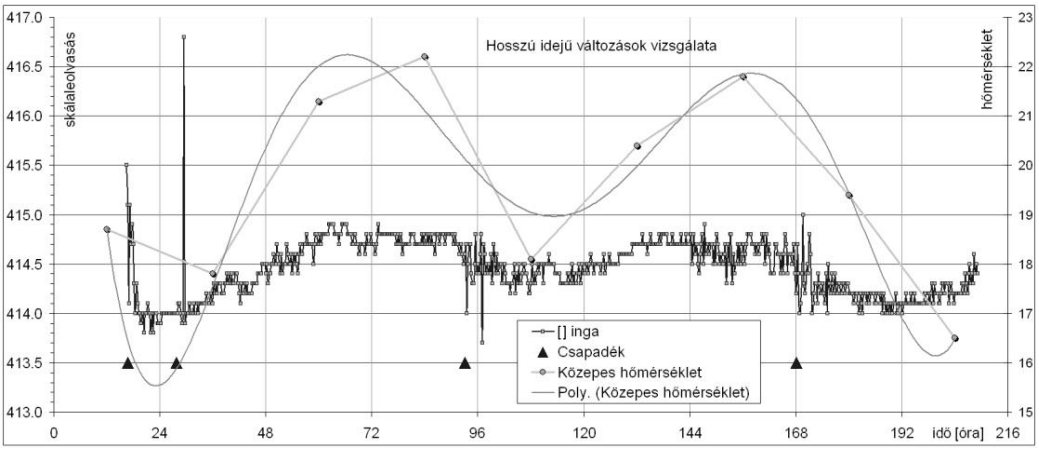
9. ábra. A skála megvilágítása fénykibocsátó diódákkal

4 Tesztmérések és az Auterbal-inga vizsgálata

A számítógéppel vezérelt CCD-érzékelők alkalmazása lehetővé tette a hosszú idejű változások pontos vizsgálatát és többek között annak ellenőrzését, hogy valóban teljesen érzéketlenek-e az ingák az árapály hatására. A vizsgálat céljából nyolc napon keresztül 5 percenként leolvasásokat végeztünk egy lakatlan, nyugodt épületen belül, majd ábrázoltuk a méréseket az idő függvényében. A “[]” ingára vonatkozó megfigyelés a 10. ábrán látható. Amint várható volt, az Eötvös-inga méréseken árapály-hatás nem mutatkozik. Láthatók viszont rövid és hosszabb idejű, illetve rendszertelen változások. A rendszertelen, markáns változások időben egy-egy nagyobb nyári zápor illetve zivatar után adódtak közvetlenül, az épületen kívül az inga környezetében feltételezhető aszimmetrikus sűrűségváltozás következtében. A hosszabb idejű ingadozásról kiderült, hogy a napi külső átlaghőmérséklet változásával hozható kapcsolatba. Ekkor sajnos az inga mellett még nem történt folyamatosan pontos hőmérsékletmérés, hiszen éppen ez a megfigyelés irányította a figyelmet a hőmérsékleti változások vizsgálatának fontosságára. Az egészen rövid idejű változások okát egyelőre nem tudjuk biztosan, elképzelhető a mikroszeizmikus talajnyugtalanság hatása.

Ezt követően felkészítettük az ingát külső terepi mérések végzésére. Beszereztünk egy észlelősátrat (11. ábra), és többek között az ingalábak alá speciális teherelosztó háromszöget készítettünk (12. ábra). A mérések során most az inga hőérzékenységét teszteltük. A vizsgálatokhoz többérzékelős digitális hőmérőt alkalmaztunk, a hőérzékelőket a 11. ábrán látható különböző magasságokban helyeztük el, és az ingát ugyanabban az azimutban több órán keresztül 5 percenként leolvastuk.

Terepi mérések esetén gyakran előfordul, hogy az ingát nyári napon pl. 20-25°C hőmérsékletű raktárból kiszállítva a 30°C feletti inga-sátorban felállítjuk. Az első vizsgálatunk arra irányult, hogy néhány fokos hőmérsékletváltozás esetén mennyi idő múlva kezdhető a mérés, amikor már nagy



10. ábra. A [] inga hosszú idejű vizsgálata



11. ábra. Hőmérők az inga-sátorban

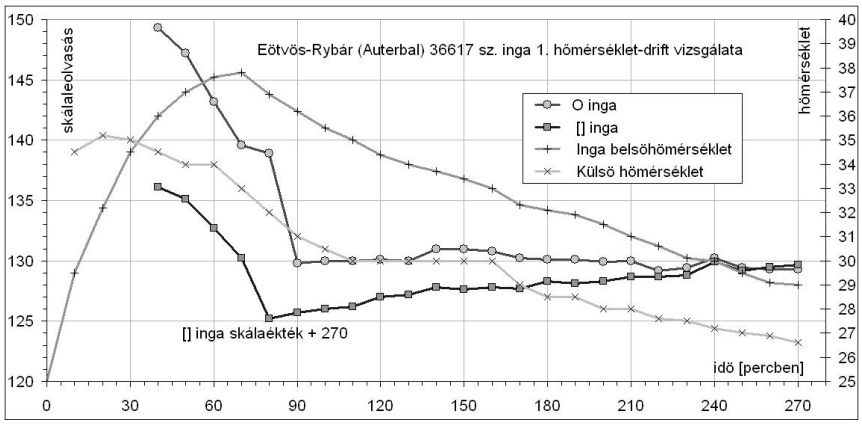


12. ábra. Terhelosztó háromszög az ingalábak alatt

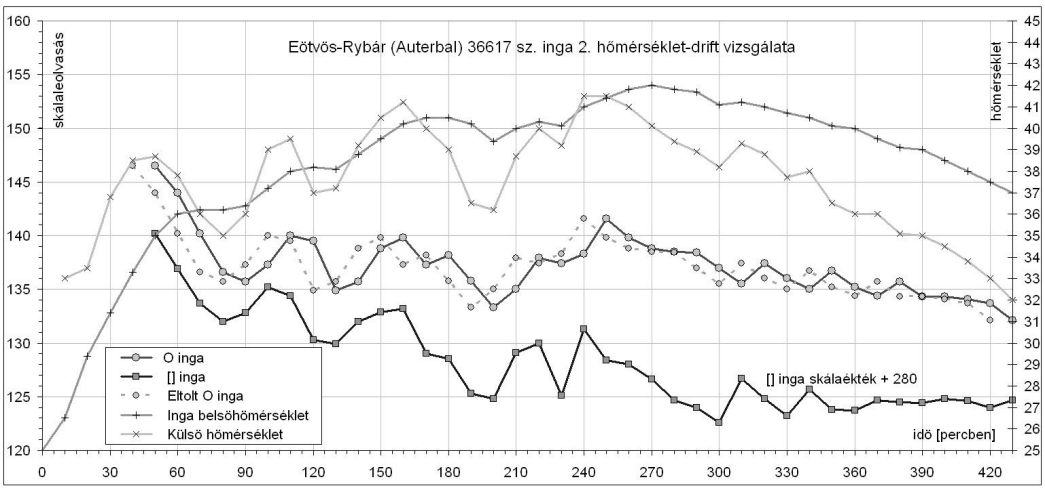
eséllyel lineáris a hőmérsékletváltozás miatti drift. Az erre vonatkozó méréseink közül az egyik jellegzetes megfigyelést a 13. ábrán mutatjuk be. Látható, hogy esetünkben az eddig alkalmazott és elfogadott 40 perces várakozási (csillapodási) idő helyett 90 perc után alakult ki olyan állapot, amikor lehetővé válik a jó minőségű mérés elvégzése.

A másik fontos vizsgálatunkkal a mérések közben rendszerint előforduló nagyobb hőingadozások hatását kívántuk megállapítani. Erre a célra olyan közepesen felhős meleg nyári napokat választottunk, amikor a felhős és a napos periódusok között az inga-sátorban 3-5°C-os hőingadozás volt tapasztalható. A sátorban a 13. ábrán látható különböző magasságokban helyeztük el a hőérzékelőket. Az egyik jellegzetes napi mérés eredményeit a 14. ábrán láthatjuk, a könnyebb áttekinthetőség érdekében csak az ingaház belső hőmérsékletét, illetve a leolvasó-karok magasságában elhelyezett hőmérséklet változását szemléltettük. Ezt egyébként az is indokolja, hogy a talajon illetve más magasságokban feljegyzett hőmérsékletváltozással nem találtunk olyan jó korrelációt, mint az ingakarok magasságában mért hőmérséklettel. Jól látható, hogy a leolvasások alapvetően nem az ingaház belső hőmérsékletének függvényében változnak, hanem szinte azonnal és feltűnően követik a külső hőmérséklet ingadozását. Ebben azonban a "[]" és a „O" inga viselkedése nem teljesen azonos, ugyanis amíg a "[]" inga gyakorlatilag azonnal-, addig a „O" inga mintegy 10 perces késéssel követi a leolvasó karok magasságában lévő külső hőmérséklet változását.

Igen jól szemléltethető ez a 14. ábrán, ahol a szaggatott vonal a „O" inga leolvasásait 10 perc értékkel balra eltolva ábrázolja. Az inga belső hőmérsékletének változása lényegesen letompítva és némi fáziskéséssel van korrelációban a skálaleolvasások változásával, ez inkább a leolvasások trendjét adja meg.



13. ábra. Az Auterbal-inga hőmérséklet-drift vizsgálata

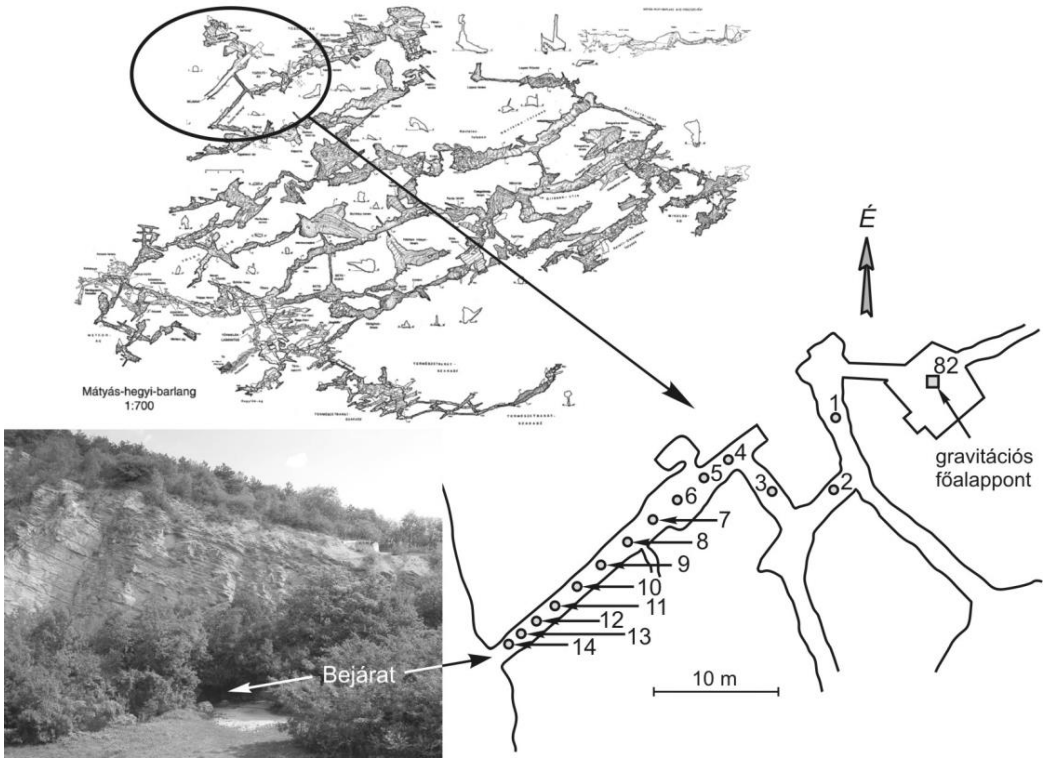


14. ábra. Az Auterbal-inga hőmérséklet-drift vizsgálata

Korábban arra gyanakodtunk, hogy a torziós szálak hőmérsékletének változása befolyásolja a jelenséget és a gyors, szinte azonnali változás okát abban láttuk, hogy az ingaházon belül a hő nemcsak viszonylag lassan vezetéssel, hanem sugárzással is terjed, amelynek hatása igen gyorsan jelentkezhet. Ma már az tűnik lényegesen valószínűbbnek, hogy a lassú változások jelentős része valóban a torziós szálak hőmérsékleti érzékenysége miatt következik be, a szinte azonnali változások oka viszont az ingakarok hőtágulása, hőmozgása. Ennek bizonyítására már van elképzelésünk, azonban ezzel kapcsolatosan további mérésekre lesz szükség. Végső cél a leolvasások hőmérsékleti korrekciójának kidolgozása – amire egyébként már szintén van elképzelésünk. Ez lényeges kérdés a mérések pontossága tekintetében ugyanis a legutóbbi vizsgálataink azt mutatják, hogy az inga már néhány tized fokos hőmérsékletváltozásra is érzékenyen reagál.

5 Mérések a Mátyás-hegyi-barlangban

Mivel a Mátyás-hegyi-barlangban gyakorlatilag nem változik a napi hőmérséklet, másrészt az eredeti célunk eleve az itteni mérések végzése volt, ezért a fenti tapasztalatok birtokában a már jó állapotban lévő felújított ingával megkezdhettük a tényleges munkát. A Mátyás-hegyi-barlang alaprajza, ezen belül az ELGI gravitációs obszervatóriumának alaprajza, bejáratának fotója, valamint a gravitációs főalappont és az Eötvös-ingás mikrobázis pontjainak elhelyezkedése a 15. ábrán látható.



15. ábra. Az Eötvös-inga mérések mikrobázisa az ELGI Mátyás-hegyi-barlang laboratóriumában

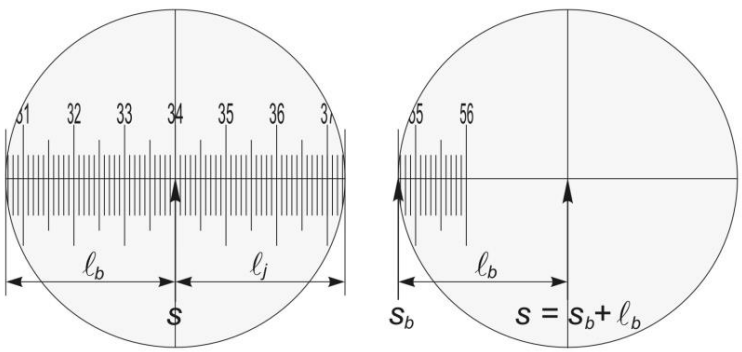
A Mátyás-hegyi-barlangban a rendszeres napi méréseket 2008. július második harmadában kezdtük, és szeptember elejére fejeztük be. A mérések során mind a „O”-inga, mind a „[]”-inga kiválóan működött; problémák csupán az inga forgató szerkezetével adódtak, amit később megoldottunk (Ultmann 2008). A 15. ábrán látható mikrobázis 5. pontjától kifelé haladva újabb nehézségek jelentkeztek: bizonyos azimutokban a skálaértékek egyre inkább közeledtek a még leolvasható szélső értékekhez. Ezt kezdetben sikerült az inga újraszabályozásával (az n_0 értékének kismértékű aszimmetrikus eltolásával) megoldani, de a 10. ponttól már ez a megoldás sem segített. Ekkor egy bizonyos tekintetben vitatható, de ugyanakkor hasznos ötlettel sikerült mintegy ±33 skálaosztással mindkét irányban kibővíteni a leolvasási tartományt azzal, hogy nem a középső index-szálon, hanem szükség esetén a leolvasó mikroszkóp látómezőjének jobb illetve bal oldali szélén olvastunk le. Mindezt a 16. ábrán szemléltetjük, ahol példaként az ábra bal oldali részén, a középső indexszálon a leolvasás 340.0, a leolvasó mikroszkóp látómezőjének bal oldali szélén kb. 306.5, a leolvasó mikroszkóp látómezőjének jobb oldali szélén pedig 373.5. Ugyanakkor az ábra jobb oldalán példaként bemutatott esetben a leolvasó mikroszkóp látómezőjében a középső indexszálon már nem lehet leolvasni, a bal oldali szélén viszont a leolvasás értéke 546.5. A skála ilyen módon történő kibővítését hosszabb kalibráló mérések előzték meg, amelynek egy skálarészletét a 2. táblázatban láthatjuk.

Természetesen annak ára van, hogy nem a látómező közepén lévő index-szálon, hanem a látómező szélén olvasunk le, a leolvasott értékek megbízhatósága bizonyos tekintetben romlik, ezek ugyanis becsült, és nem pontos leolvasások. A gradiensek további drasztikus növekedésével már ezzel az ötlettel sem tudtunk mérni a 12.-14. pontokon.

A barlangban végzett mérések során általában lehetőségünk volt az adott napi mérést befejezve az ingát azonnal áthelyezni és elindítani a soron következő mérési ponton. Ezzel egyrészt időt tudtunk megtakarítani, mivel a másnapi mérést már a kiérkezés pillanatában azonnal meg lehetett kezdeni, másrészt így az inga kioldásához kapcsolódó sokkhatás (kezdeti jelentős drift) is már elmúlt. A Mátyás-hegyi-barlangban a gravitációs főalapponton és a mikrobázis pontjain végzett méréseink

eredményeit a 17. 18. 19. és a 20. ábrákon foglaltuk össze. Az ábrákon rendre a W_{zx} és W_{zy} gradiensek, valamint a W_{Δ} és a W_{xy} görbületi adatok változása látható a főalappontról indulva a mikrobázis 11. pontjáig. A mikrobázis pontjai a 15. ábrán látható elrendezésben a barlangba vezető folyosón helyezkednek el. A folyosó a főalappontot tartalmazó nagy teremhez képest jóval alacsonyabb és keskenyebb. Az 5-ös ponttól kezdve a bejárat felé haladva jelentkezik egyre inkább a külső meredek sziklafal gravitációs hatása is. A várható egyre nagyobb gradiens-értékek miatt a mérési pontok a bejárathoz közeledve egyre sűrűsödnek.

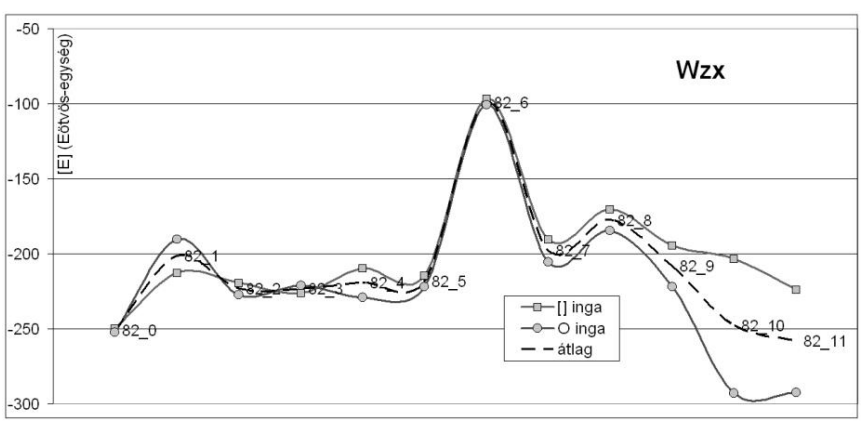
Mivel az Eötvös-ingában két egymástól független antiparalel elhelyezésű ingaszerkezet található az 1. táblázat adatai szerint egymástól 7 cm távolságban, ezért minden egyes gradiensre és görbületi adatra a mérések során két független értéket kapunk. Teljesen hibátlan mérések esetén elvileg a két inga méréseinek meg kellene egyezni, így az eltérések részben a mérések megbízhatóságára adnak információt. A 17. 18. 19. és a 20. ábrákon jól megkülönböztethetők a „O”-inga, és a „[]”-inga mérési eredményei, a szaggatott vonal pedig a kettő átlagértékét mutatja.



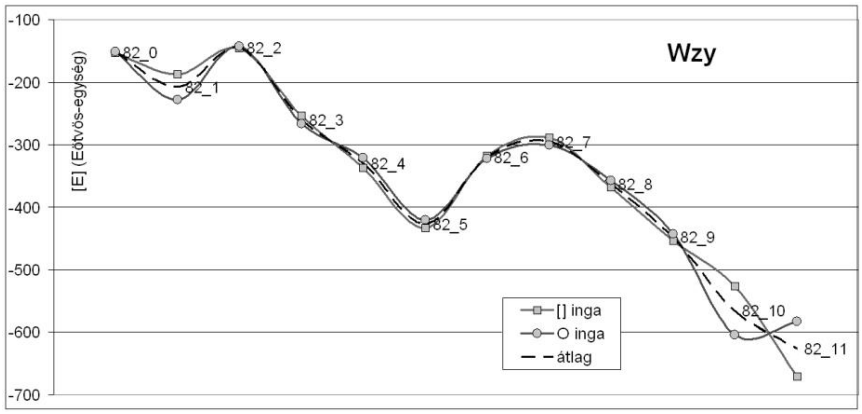
16. ábra. A mérési tartomány kibővítése

2. táblázat. Példa a kalibráló mérésekre a mérési tartomány kibővítésre vonatkozóan

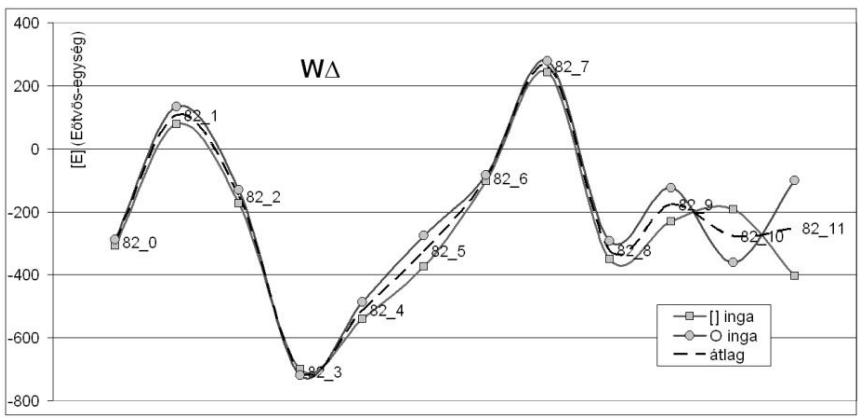
t	“O” bal	ℓ_b	“O” közép	ℓ_j	“O” jobb
15.12	136.5	33.5	170.0	33.0	203.0
15.31	137.2	33.5	170.7	32.9	203.6
16.20	138.0	33.4	171.4	33.0	204.4
17.15	138.7	33.5	172.2	33.0	205.2
19.16	139.6	33.4	173.0	33.0	206.0
		33.5		**33.0**	



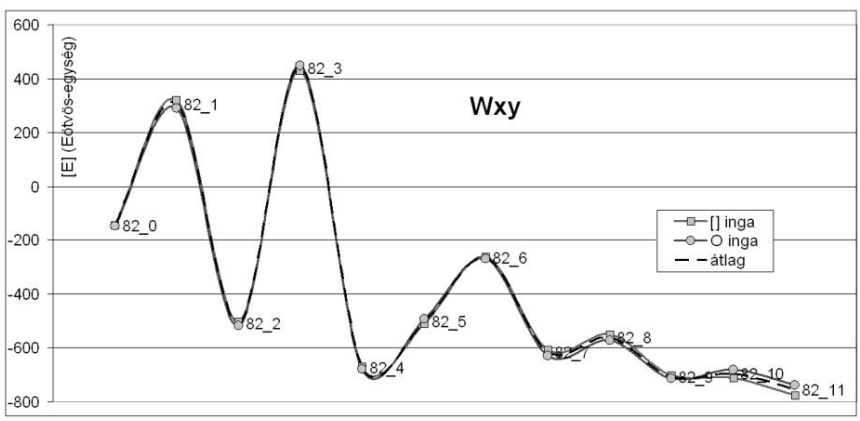
17. ábra. A Wzx gradiensek a Mátyás-hegyi-barlang mikrobázisának pontjain



18. ábra. A Wzy gradiensek a Mátyás-hegyi-barlang mikrobázisának pontjain



19. ábra. A W_{Δ} gradiensek a Mátyás-barlang mikrobázisának pontjain



20. ábra. A Wxy gradiensek a Mátyás-hegyi-barlang mikrobázisának pontjain

Ha megvizsgáljuk a két független inga által mért értékek eltérését egymástól, akkor többé-kevésbé jó egyezéseket láthatunk, vannak azonban olyan (pl. a 82/1, a 82/10 és a 82/11) pontok, ahol jelentősebb eltérések adódtak. A 82/1 pont közvetlen szomszédságában egy nagy tömegű biztonsági vasajtó található, míg a 82/10 és a 82/11 pontok a barlang bejáratának közvetlen közelében fekszenek, ahol mintegy 40 m magasságú meredek sziklafal emelkedik a magasba, ráadásul ezek a pontok az egyik oldalon aszimmetrikusan közel helyezkednek el a barlang falához. Kézenfekvőnek tűnik,

hogy ezekben a pontokban olyan jelentős a gradiensek változása, hogy ez már az egymástól 7 cm távolságra lévő ingák esetén is kimérhető különbséget jelent. A sejtés bizonyítására további ingamérések szükségesek, részben az 1. ponton a vasajtó mind nyitott, mind csukott állapota mellett. A 10. és a 11. pontokon pedig a közelebbi barlangfaltól kb. 10 cm-es távolsággal beljebb mozdulva is érdemes lenne a méréseket megismételni. A 10. és a 11. pontokon tapasztalható nagyobb eltérések további lehetséges oka, hogy itt a nagy gradiensek miatt nem a látómező közepén lévő index-szálon, hanem a látómező szélén tudtunk csak leolvasni. Probléma adódhat abból is, hogy az ingamérések feldolgozásakor használt egyenletekben szereplő egyensúlyi mérési azimutok a gyakorlatban az elvi értékektől (0˚, 72˚, 144˚, stb.) pont a gradiensek hatása miatt akár 2˚-al is eltérhetnek. Ezt a hatást eddig nem vették figyelembe, pedig a gradiensek számított értékeiben több Eötvös különbséget is jelenthet. Ez utóbbi lehetőséget is ellenőriznünk kell a későbbiekben.

Feltűnő ugyanakkor, hogy a 82/0 jelű gravitációs főalapponton a többször is megismételt mérések során a „O” és a „[]”-inga gyakorlatilag ugyanazokat az értékeket mérte. A gravitációs főalappont nagy légterű terem közepén található viszonylag távol a zavaró tömegek hatásától, így feltételezhetően a két ingára gyakorlatilag ugyanakkora erők hatnak.

6 Összefoglalás

Az Eötvös-inga mérések geodéziai alkalmazására vonatkozó kutatásaink során több olyan probléma adódott, amely szükségessé tette újabb Eötvös-inga mérések elvégzését. Ennek érdekében megjavítottunk és felújítottunk egy már működésképtelen Auterbal-ingát. Az újabb technikai lehetőségek (a modern számítástechnika, CCD kamerás érzékelők, digitális hőmérők alkalmazása, stb.) új távlatokat nyitottak az Eötvös-inga mérések területén is. A felújított ingával széleskörű vizsgálatokat végeztünk az inga használhatóságára vonatkozóan, majd sikeres méréseket folytattunk a Mátyás-hegyi-barlang gravitációs laboratóriumában. Vizsgálataink során világossá vált, hogy a közel 80 éve gyártott Eötvös-Rybár ingával kiváló minőségű méréseket lehet végezni, és az inga alkalmazásával számos új problémára választ lehet adni. A mérési eredményeink értelmezése során sok új izgalmas kérdés is felmerült, amelyeket csak további mérésekkel és vizsgálatokkal tudunk megválaszolni.

Köszönetnyilvánítás. Kutatásaink a K60657 és a K76231 OTKA támogatásával folynak. Ezúton is köszönjük a Mátyás-hegyi-barlangban végzett méréseinkhez az ELGI, és kiemelten Csapó Géza segítségét.

Hivatkozások

Haalck H (1950): Die vollständige Berechnung örtlicher gravimetrischer Störefelder aus Drehwaagemessungen. Veröffentlichungen des Geodätischen Institutes Potsdam, Nr. 4, Potsdam.

Tóth Gy, Völgyesi L, Csapó G (2005): Determination of vertical gradients from torsion balance measurements. IAG Symposia 129, Gravity, Geoid and Space Missions, C. Jekeli, L. Bastos, J. Fernandes (Eds.), Springer, 292-297.

Tóth Gy (2007): Vertikális gravitációs gradiens meghatározás Eötvös-inga mérések hálózatában. Geomatikai Közlemények X, 29-36.

Ultmann Z (2008): Eötvös-inga mérések. TDK dolgozat, BME, Építőmérnöki Kar, Földmérő és térinformatikai szekció.

Völgyesi L, Tóth Gy, Csapó G, Szabó Z (2005): Az Eötvös-ingamérések geodéziai célú hasznosításának helyzete Magyarországon. Geodézia és Kartográfia, 57(5), 3-12.

CCD KAMERÁS OKULÁR-RENDSZER LACOSTE-ROMBERG G TÍPUSÚ GRAVIMÉTEREKHEZ

*Papp Gábor, Battha László, Bánfi Frigyes**

CCD ocular system for the LACOSTE-ROMBERG gravimeters *- Many of the LCR meters are equipped by only opto-mechanical reading system which makes the automatic and continuous observation impossible by such instruments. Although this problem is entirely solved by the so called optional CPI reading system usually combined with a feed-back system, the modernization of old, but properly working instruments is always risky. The technical modification of the meters's "heart" certainly influences its characteristics and therefore the consistent tracking of the behaviour of the instruments during their lifetime becomes questionable. With the proposed and applied image sensor system the original, very sensitive spring-lever unit of the G meter remains untouched and the direct and automated optical observation of the movement of the index beam can be determined by the tools of image processing. The aim of the described development is to provide a possibility for the continuous observation of the "individual" and local response of the G meters having only basic configuration to the gravity tides and to the change of meteorological parameters. Both factors might have some influence on the corrections of precise gravity observations at some μGal (1 μGal = 10^{-8} m/s^2) level. This paper summarises the setup of a complete hardware and software system running at the Geodynamical Observatory of the Geodetic and Geophysical Research Institute and evaluates its test observations.*

Keywords: LCR G meters, CCD ocular, continuous optical observation, tidal response

A használatban lévő LCR G graviméterek közül sok csak az alapfelszereltséghez tartozó optomechanikai mikrométeres leolvasó berendezéssel rendelkezik. E miatt ezekkel a műszerekkel lehetetlen az automatizált, folyamatos mérés. Habár ez a probléma az ún. CPI rendszerrel és a hozzá kapcsolható ún. feed-back egységgel teljes mértékben megoldott, a régi, de jól működő alapműszerek utólagos kiegészítése mindig kockázatos. Az alkalmazott technikai-szerkezeti módosítások bizonyosan befolyásolják a műszer karakterisztikáit és ez kérdésessé teszi ezen műszerek sajátságainak következetes nyomon követését működési idejük alatt. A javasolt képérzékelő rendszer alkalmazásával elkerülhető az eredeti rugós felfüggesztésű karból álló, igen érzékeny „erőmérő" egység megbontása és módosítása és egyben lehetővé válik az ún. index-szál mozgásának direkt és automatikus észlelése és az elmozdulás mértékének meghatározása képfeldolgozási módszerekkel. A bemutatandó fejlesztésnek a fő célja az, hogy eszközt biztosítson a G méterek gravitációs árapályra és a meteorológiai paraméterek változására adott egyedi, kisebb-nagyobb mértékben hely és műszerfüggő válaszának folyamatos megfigyelésére. Mindkét hatás figyelembe veendő a néhány μGal (1 μGal = 10^{-8} m/s^2) pontosságot igénylő gravitációs mérések megfelelő javításainál. A cikk bemutatja az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet Geodinamikai Obszervatóriumában működő teljes hardver és szoftver rendszert és elemzi az első teszt észlelések tapasztalatait.

Kulcsszavak: LCR G graviméterek, CCD érzékelő, folyamatos optikai észlelés, árapály hatás

1 Bevezetés

Az egyre nagyobb pontossági követelményeknek a gravimetriában (Csapó és Völgyesi 2004, Csapó 2006) csak úgy lehet eleget tenni, ha a mérést, amiből egy adott ponton a nehézségi gyorsulás értéke származik, befolyásoló összes, általában nem kívánatos belső (műszeres) és külső (környezeti) tényezőnek ismerjük a végeredményre kifejtett hatását. Ezen tényezőket a különböző javításokon (korrekciókon) keresztül vehetjük figyelembe. Így pl. beszélünk árapály-javításról, amely a földi nehézségi tér interplanetáris tömegvonzási hatásainak a nehézségi tér statikus összetevőjének meghatározása szempontjából zavaró időbeli változásai miatt szükséges (Wenzel, 1996). De tekinthetjük

*MTA GGKI, 9400 Sopron, Csatkai u. 6-8.
E-mail: papp@ggki.hu

a barometrikus-javítást is (pl. Torge, 1989), amely a légköri tömegek szintén időben változó térfogatsűrűsége miatt kialakuló tömegváltozások gravitációs hatását hivatott kiküszöbölni. Mindkét jelenségre ismertek és alkalmazhatók általános javítási modellek, amelyek paraméterezése azonban nem biztos, hogy a legpontosabban tükrözi az egyes műszereknek a jelenségekre adott egyedi és pl. az árapály esetében bizonyosan helyfüggő „válaszát". A helyes paraméterezés meghatározásához hosszú idejű és ellenőrzött körülmények között végzett laboratóriumi mérésekre van szükség. Ilyen mérési sorozat az LCR G graviméterek alaptípusaival, melyek kizárólag optikai-mechanikai leolvasó berendezéssel rendelkeznek, csak igen korlátozott mértékben kivitelezhető (pl. Benedek és Papp, 2005). Habár a műszerek leolvasó berendezésének korszerűsítése egy ún. kapacitív mérő-átalakító (CPI – Capacitance Beam Position Indicator) és a szintén opcionális visszacsatoló (feed-back) egység beépítésével rutinszerű feladat, mégis felvet egy sor problémát. Ugyanis az átalakítás elsősorban a műszernek az igen érzékeny, az egyszerűség kedvéért „rugós erőmérő" egységét érinti, aminek eredményeképpen megváltoznak a karakterisztikái. Ezért a módosítás után végzett mérések eredményei nehezen vethetők össze a módosítás előttiekkel anélkül, hogy valamiféle rendszeres eltérést ne kellene figyelembe venni. Ez pl. a geodinamikai vizsgálatok céljából végzett ismételt mérések esetén, melyek sokszor évtizedeken keresztül folynak kifejezetten hátrányt jelent. A technikai problémákon túl az is gondot okoz, hogy az átalakítás drága és elsősorban az USA-ban végeztethető el.

Gyors és viszonylag olcsó megoldás, ha a leolvasó mikroszkóp okulárját egy CCD (Charge Coupled Device) kamerával helyettesítve, digitálisan rögzített kép alapján határozzuk meg az ún. index-szál kezdeti helyzetéhez viszonyított elmozdulását, amely arányos a nehézségi térerősség/gyorsulás változásával. Ennek az előnye az, hogy érintetlenül hagyja a graviméter érzékelő egységét, technikai kialakítása folytán csereszabatosan alkalmazható másik graviméteren és lehetővé teszi az automatizált laboratóriumi mérést. Ugyanezt az eljárást alkalmazva lehetséges más műszerek korszerűsítése is (pl. Völgyesi et al. 2009). Jelen cikk az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetben kialakított és üzembe állított CCD okulár-rendszert és a rendszer tesztelése során szerzett első tapasztalatokat mutatja be.

2 A CCD okulár LCR G típusú graviméterekhez illesztésének alapelvei

A CCD érzékelőket már lassan három évtizede használják képrögzítésre, aminek következtében pl. az analóg, fényérzékeny filmre történő fotózást lassan teljesen felváltja a digitális fényképezés. A méréstechnikában ennek az eszköznek mind az 1D (vonal CCD) mind a 2D változatait is előszeretettel alkalmazzák optikai jelek digitalizálására, amelyek azután digitális jel- ill. képfeldolgozási eljárásokkal hatékonyan kiértékelhetők. A 2D érzékelők, vagyis az ún. CCD lapkák esetében a kép fotoelektromos rögzítése után egy fényintenzitás értékeket tartalmazó $n \times m$ elemű mátrix olvasható ki. Ha a kamera színes, akkor a 3 alapszínre (vörös – zöld – kék) bontott intenzitásokat is egyetlen $n \times m$ elemű mátrix tárolja egy megfelelő színmaszkolási séma szerint. Mivel a lapka fényérzékeny elemeinek (pixeleinek) mérete (5 μm – 10 μm) és egymáshoz viszonyított helyzete igen nagy pontossággal állandónak vehető, ezért a képről metrikus információk is nyerhetők.

Ez a tulajdonság jól kihasználható a graviméter okulárjának (és egyben az észlelő szemének) az eszközzel való felváltásakor. Ugyanis az ún. relatív g mérés elve alapján éppen azt kell megállapítani a mérés során, hogy az aktuális helyzethez (index-álláshoz) viszonyítva a kiindulási helyzet, amelyet az okulárban látható skálán rögzített ún. leolvasási vonal határoz meg, mekkora és milyen irányú index-szál elmozdítással érhető el. A mérés szokásos menete szerint az index-szál a mikrométer csavarral, egy többszörös áttételt megvalósító fogaskerék-rendszeren keresztül a leolvasási vonalra mozgatható. Az előző állapothoz viszonyított elmozdítás mértéke a mikrométerhez kapcsolt számláló berendezés és a mikrométer osztott tárcsájának állása alapján számolható ki. Az adatfeldolgozás fontos lépése a mikrométer egységben megállapított leolvasási érték átszámítása mGal (1 mGal = 10^{-5} m/s^2) egységbe. Ez a gyári kalibrációs adatok segítségével történik. Azonban azt is tudni kell, hogy az okulár látómezejében a mérő kar és a hozzá rögzített index szál szabad mozgásának korlátozása miatt, a graviméter teljes mérési tartományának (kb. 7000 mGal) csak töredékében tudunk az index szálat mozgató mikrométer-rendszer használata, azaz a mérőszemély aktív közreműködése nélkül mérni. Szerencsére ez a tartomány (kb. 1.5 mGal) bőven elegendő ahhoz, hogy pl.

az árapály-hatást, ami ±200 μGal-os határok között mozog, folyamatosan és automatikusan regisztrálni lehessen. Természetesen az ún. műszerjárás (drift) miatt előbb-utóbb az index-szál fennakad a szabad mozgási tartomány valamelyik végét jelölő ütközőn, de mivel a tapasztalatok szerint (Benedek és Papp, 2005) a drift naponta csak kb. 20 μGal eltolódást eredményez, ezért legalább egy hónapig biztosított a folyamatos, igazítás nélküli regisztrálás. Elvileg az automatizált elmozdulás mérés megoldásához egy vonal CCD is elégséges lenne, azonban, mint látni fogjuk, CCD lapka (azaz 2D érzékelő) alkalmazása nagymértékben növeli az elmozdulás mértékének meghatározási pontosságát és statisztikailag lehetővé teszi, hogy az töredék-pixel élességgel is megállapítható legyen.

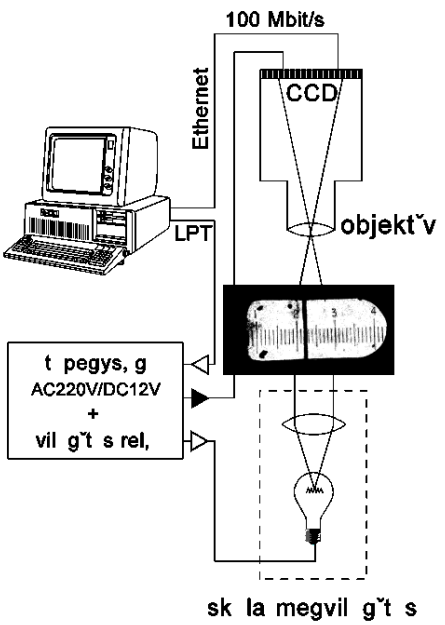
A számítási folyamat során az elmozdulás pixelben meghatározott mértékét először transzformálni kell az ún. mikrométer egységbe (m.e.), majd a gyártó által megállapított kalibrációs adatok alapján a mikrométer egység mGal egységbe számítható át. Ebből adódóan a CCD okulár-rendszer használatához meg kell határozni egy plusz lépték együtthatót is [m.e./pixel] mértékegységben. Az eljárás ismertetése a következő fejezetek között megtalálható.

3 A CCD okulár elemei és a mérést vezérlő rendszer

A rendszer felépítése az 1. és 2. ábrákon látható. Mivel ebben az esetben a színre vonatkozó információnak nincs jelentősége, ezért egy 8 bit felbontású, azaz 256 szürkeségi intenzitást rögzíteni képes CCD kamera (Leutron Vision P202M-GigE) került kiválasztásra. A kamera érzékelő lapkája egy 1236 × 1624 elemű mátrixot képez, amelyben a négyzet alakú pixelek mérete 4.4 μm. A leolvasó mikroszkóp látómezejének megfelelő leképezését egy háromszoros nagyítású objektív (L-VS-TC3-65) biztosítja. Ennél a nagyításnál 1 pixel kb. 1 μGal-nak felel meg, ami tekintettel arra, hogy még a kedvező körülmények között végzett terepi relatív gravimetriai mérések (belső) pontossága is csak ritkán jobb ±5 μGal-nál, elégséges a műszerkarakterisztikák szükséges pontosságú tanulmányozásához. A hasznos látómező éppen lefedi az index-szál teljes mozgási tartományát. Így kb. 1.5 mGal g változás követhető nyomon anélkül, hogy a mikrométer csavart állítani kelljen.

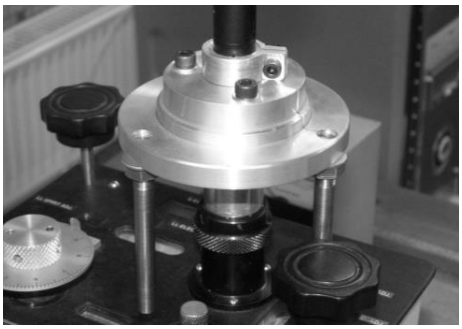


1. ábra. A CCD okulárral felszerelt LCR G949 sz. graviméter a soproni MTA GGKI műszervizsgáló laboratóriumának mérőpillérén



2. ábra. A CCD okulár vezérlő rendszerének blokkvázlata

A kamera graviméterhez csatlakoztatására egy olyan adapter készült (3. ábra), mely a szilárd rögzítés mellett lehetővé teszi a kamera tengelyének 3 irányú eltolását ill. a forgatást a kamera tengelye körül. Ezekkel a mozgatásokkal, feltételezve, hogy a mechanikai kényszert képező okulár tubus miatt a kamera optikai tengelye párhuzamos a leolvasó berendezés optikai tengelyével, 1) beállítható a megfelelő élesség, 2) fedésbe hozható az index-szál teljes mozgási tartománya a pixel mátrixszal, 3) a pixelsorok és az index-szál mozgási iránya párhuzamossá tehetők.



3. ábra. A CCD okulárt tartó adapter

A kamera vezérlése 100 Mbit/s sebességű Ethernet kapcsolaton keresztül történik (2. ábra). Egyetlen kép mérete ugyanis kb. 1.96 Mbyte, ami tekintettel arra, hogy a kamera maximális teljesítőképessége 12 kép/s megkívánja a gyors adattovábbítást. Sajnos ez a képrögzítési sebesség nem használható ki az LCR G típusú graviméterek esetében, mert az index-szálat és a skálát hordozó üveglemezt megvilágító fény, habár az emberi szemnek még megfelelő, a „gépi látás"-hoz viszonylag gyenge. Így elfogadható intenzitású felvételek készítéséhez hosszú, 0.8 s-os expozíciós időt kell használni. A tapasztalatok szerint ezzel a zársebességgel 1 kép rögzíthető és továbbítható másodpercenként. A jelenlegi rendszerben a mérést egy 1.8 GHz órajelű processzorral ellátott Pentium PC–n futó C nyelven írt program végzi. Ez a program az exponáláson és az adatkiolvasáson túl kiszámítja az index-szál, amelynek szélessége kb. 80 pixel, középvonalának koordinátáját pixel egységben. E mellett a program mellett fut egy QBasic nyelven írt program is, amely egy másik, később részletezendő algoritmus szerint szintén kiértékeli az aktuális képet, de ez már m.e.-ben adja meg az index-szálnak a kezdő helyzethez viszonyított elmozdulását ill. mGal egységben regisztrálja a leolvasásokat. A számítás fázisait és részleteit napló fájlok rögzítik, míg a végeredmény egy jegyzőkönyv fájlba kerül. Az eredményeket a rendszer folyamatosan listázza a képernyőre is. A PC-re telepített VNC szerver (www.realvnc.com) modul lehetővé teszi a PC távvezérlését, így a rendszer az Interneten keresztül is felügyelhető.

4 A pixel koordináta-rendszer stabilitása és kalibrálása

Mivel az index-szál elmozdulásának meghatározása az *n* sorból és *m* oszlopból álló pixel mátrixhoz viszonyítva történik, ezért fontos annak ismerete, hogy ez a vonatkozási rendszer az időben mennyire stabilan őrzi meg helyzetét a kezdő képen rögzült helyzethez viszonyítva. Ugyanis, ha a teljes kép is elmozdul az expozíciók közötti időben, akkor az index-szál *M* látszólagos elmozdulására kapott pixelszám az m_{sz} valódi szálelmozdulásnak és a teljes kép m_k elmozdulásának az összege:

$$M = m_{sz} + m_k \,. \tag{1}$$

Ebben a tárgyalásban feltételezzük, hogy a mérés elvéből adódóan csak a sorok irányában történő elmozdulás van hatással a mérés eredményére, mert a szál elmozdulása a kamera helyes beállítása miatt teljesen párhuzamos a mátrix soraival. A kép elmozdulásának meghatározásához jól felhasználhatók a skálavonások, hiszen ezek helyzete a pixel mátrixhoz viszonyítva csak akkor változhat, ha megváltozik a kamera és a graviméter egymáshoz viszonyított térbeli helyzete a mérés során. Ennek oka lehet pl. a hőmérséklet változásából eredő szerkezeti deformáció, amely érintheti a kamerát a graviméterhez rögzítő szerkezetet. A kép elmozdulásának meghatározása ugyanazzal a később részletezendő programmal történik, mint az index-szál elmozdulás kiértékelése.

A pixelekben mért elmozdulás és a mikrométer egysége közötti α viszonyszám/skálatényező meghatározásához meg kell vizsgálni, hogy a mikrométer csavar egy teljes körbefordulása hány pixelnyi elmozdulást okoz a képmezőben. Ennek aktuális értékét meg kell határozni minden olyan esetben (pl. a rendszer szétszerelése ill. összeállítása), amelynek során a kamera és a graviméter

1. táblázat. A mikrométer egység (m.e.) – pixel viszonyszám (α) meghatározása az LCR G949 műszerre. Sopron, MTA GGKI, műszervizsgáló laboratórium, 2009.01.09. 11:25 – 12:01

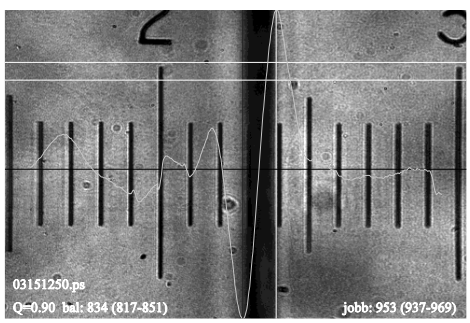
mérés szám	min. [m.e./pixel]	max. [m.e./pixel]	átlag [m.e./pixel]	szórás [m.e./pixel]
10	0.96712	0.97656	0.97183	±0.00305

relatív helyzete változhat. Egy teljes körbefordulás névleges értéke 1000 mikrométer egység (kb. 1 mGal), melyhez a mért elmozdulást kell hozzárendelni. A tapasztalatok alapján (1. táblázat) még kedvezőtlen körülmények (városi és vasúti forgalom miatti talajrezgések) között is nagy pontossággal levezethető ez a viszonyszám kellő számú fölös mérésből.

5 A kiértékelő algoritmusok ismertetése

A mérés vezérlését és az előzetes kiértékelést egy C++ nyelvű program végzi. A kamera és a PC közötti kommunikáció a gyártó által rendelkezésre bocsátott szoftver csomagon keresztül valósul meg. A vezérlési protokoll szerint először be kell kapcsolni a leolvasó berendezés világítását, azután inicializálni kell a kamerát, majd az exponáláshoz szükséges parancsot kell kiadni.

A CCD-kamera működtetését biztosító gyári C++ szubrutin programok segítségével kiolvasható és mátrixba rendezhető bármely pixel szürkeségértéke, ami egy 0-255 közötti egész szám. Így a képfeldolgozáshoz egy 1236 × 1624 elemű szürkeség-mátrixot tárolunk. A program a mérőszál pozíciójának meghatározásához a képen két téglalap alakú ablakot definiál, amelyeknek a skálavonásokkal párhuzamos *y* tengely irányú oldalai hézag nélkül csatlakoznak (minden sorban a bal ablak utolsó pixele után a jobb ablak első pixele következik). Ezután rögzítésre kerül egy a pixelsorokkal párhuzamos *x* tengely irányú mérősáv, amelyben az előbb leírt kiértékelő ablakpár pixelenkénti léptetéssel a sáv jobb széléig halad. Az algoritmus az ablakpár minden egyes pozíciójában meghatározza mind a bal mind a jobb oldali ablakokba eső pixelek szürkeségértékeinek s_1 ill. s_2 összegét. Az index-szál bal szélének *x* koordinátáját (x_{min}) a min(s_2-s_1) feltétel szabja meg. Az x_{max} vagyis az index-szál jobb széle pozíciójának meghatározása hasonlóan történik. Értékelhető kép esetén $P = \max(s_2 - s_1) > 0$ és $\min(s_2 - s_1) \approx -P$. A mérőszál középvonalának *x* koordinátája az $(x_{min}+x_{max})/2$ függvénnyel becsülhető. A program ellenőrzés céljából PostScript formátumban is eltárolja az okulár látómezejében látható képet, amelyre feltünteti a mérősávot határoló vízszintes egyeneseket, valamint az s_2-s_1 görbe grafikonját (4. ábra).



4. ábra. Példa a PostScript formátumban rögzített képre

A másik kiértékelő algoritmus (korrelátor) a bináris formában rögzített képet a digitális korrelációszámítás elvei szerint (pl. Press et al. 1986) dolgozza fel. Alapvetően három feladatot hajt végre és ezekhez a kép különböző területeiről válogatott pixelsorokat használja fel.

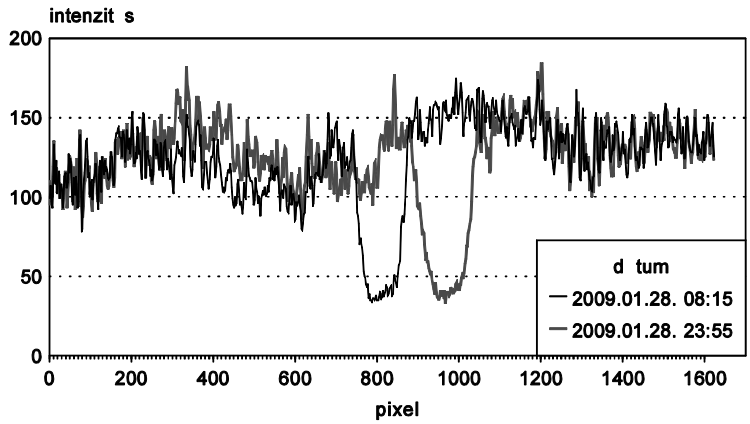
A korrelátor az első rögzített kép alapján összesen 60 pixelsor auto-korrelációjából megállapítja a skálavonások d_s átlagos távolságának mértékét, mert ez a paraméter szükséges a további számításokhoz. Az ebből kapott eredmény jó ellenőrzési lehetőséget ad az α skálatényező értékére, hiszen elvileg 10 skálaosztásnak (1 skálaosztás = 100 m.e.) kell megfelelnie a mikrométer csavar egy teljes körbefordulásának. Az ismertetésre kerülő tesztmérések során a

$$10 d_s = 1000/\alpha \qquad (2)$$

egyenlőség, ahol d_s=102.88 pixel ±1.68 pixel, az alábbi pontossággal teljesült:

$$1028.8 \cong 1029.0\,. \qquad (3)$$

Amikor a mintavételezési idő szerint elkészülnek a soron következő képek, akkor mind a kezdő, mind az aktuális képről ismét leválogatásra kerül 180-180 pixelsor, amelyekből 3 soronként egy-egy 1624 elemű, összegezett intenzitás-eloszlás vektor készül a képmező teljes hosszában. Mivel a CCD által érzékelt kép meglehetősen „zajos" (5. ábra) és sem a skálavonások, sem az index-szál élei nem elég határozottak (t.i. az intenzitásváltozás az éleken nem egy lépcsőfüggvény szerint következik be), ezért az összegezés sokat javít a jel/zaj viszonyon, ami pozitív hatással van a korrelációszámítás megbízhatóságára. A kapott intenzitás-eloszlás a vizsgált pixel intenzitásának értékétől függően 2 osztályba kerül. Így a „világos" pixelek értéke 0, míg a „sötét" pixelek értéke 1 lesz. Az osztályok közötti határok megállapítása tapasztalati úton történik. Képenként összesen 60 pixelsor-pár korrelációjából kapott eredmények átlagértéke adja az index-szál látszólagos *M* elmozdulását pixel egységben. Az átlagértékhez tartozó σ_M szórás is meghatározásra kerül.



5. ábra. Két, azonos pixelsorra vonatkozó intenzitás-eloszlás görbe

Ezeknek a számításoknak a végeredményei képenként egy-egy napló fájlban rögzülnek és a képernyőn is megjelennek. Az index-szál helyzetének vizsgálata után a kép stabilitásának kiértékelése, vagyis az m_k képelmozdulás meghatározása következik. Ebben a lépésben is 60, természetesen a kezdő és az aktuális képen azonos sorszámú pixelsor-pár korrelálása történik meg, melynek eredményei a számított átlag képelmozdulással és annak σ_{mk} szórásával együtt szintén a napló fájlban megtalálhatók. Az index-szál valódi elmozdulása (1) szerint:

$$m_{sz} = M - m_k \,. \tag{4}$$

Ezután a program az α értéke alapján m_{sz} pixel értékét m.e.-be konvertálja, majd a graviméterhez tartozó gyári kalibrációs táblázat felhasználásával kiszámítja a méréshez tartozó leolvasást mGal egységben. Ez az érték a kiegészítő adatokkal együtt egy jegyzőkönyv fájlba kerül.

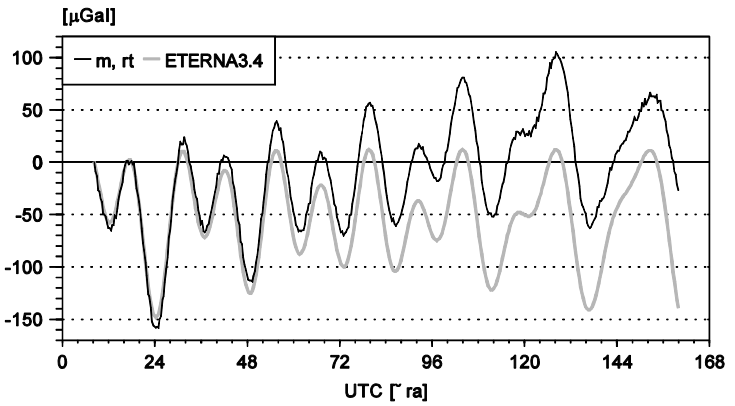
A számítások során egy egyszerű, a soronkénti mérési eredményeknek az átlagértékkel történő összevetésén alapuló durvahiba szűrés is történik, mivel a leolvasó berendezés látómezejében vannak olyan zavarok (pl. eltávolíthatatlan foltok és porszemcsék az üveglemezen), amelyek jelenléte a korrelációszámításban a szálelmozdulás értékének helytelen megállapításához vezet. A durva hibákat a program a napló fájlokban megjelöli és kihagyja a statisztikák számításából.

6 A rendszer tesztelésének eredményei

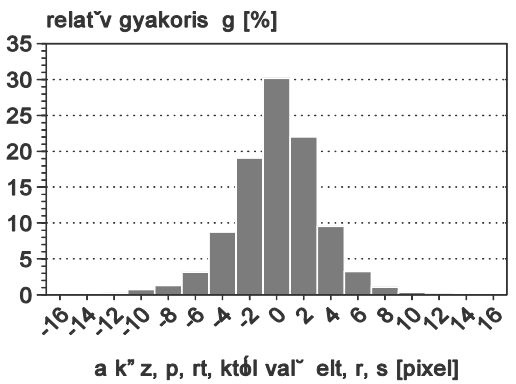
Mivel a rendszer stabil működése a 2008. év végére valósult meg, ezért csak ízelítő adható a tesztelés fázisának első eredményeiről. Így pl. az 6. ábrán látható egy majdnem egy hetes folyamatos árapály regisztrátum és a megfelelő időperiódusra számított elméleti árapály-görbe. Az elméleti adatokat az ETERNA3.4 program (Wenzel, 1996) szolgáltatta, melynek paraméterezése (t.i. a domináns árapály összetevők amplitúdó és fázis adatainak megadása) a Bécs mellett működő ún. szupravezető graviméter hosszú idejű észleléseinek analízise alapján történt.

Az ebben az időszakban a rendszer által rögzített napló fájlok alapján megállapítható, hogy az index-szál elmozdulásának megbízhatósága ±2 μGal és ±4 μGal között változik, amit a 7. ábra is alátámaszt. Az itt látható hisztogram (7. ábra) 449 mérési sorozat (azaz rögzített kép) feldolgozásából származó 26758 adat (korrelogram) alapján készült és a mérések sorozatonkénti átlagértékeitől való eltéréseinek relatív gyakoriságát ábrázolja a hiba értékének függvényében.

Ezen időszakban a kép stabilitásának vizsgálata, vagyis az m_k értékének képről-képre történő meghatározása a következő eredményt hozta (8. ábra). Megállapítható, hogy a képek helyzete a CCD lapka pixel koordináta-rendszerében nem változott jelentős mértékben. Igaz, hogy némi tendencia (szabályosság) felfedezhető az m_k változásában, de egyrészt csak ritkán éri el az 1 pixel értéket, másrészt a σ_{mk} szórások nagysága miatt ($\sigma_{mk} \approx \pm 0.5$ pixel) m_k értéke nem tekinthető statisztikailag szignifikánsnak. Ennek ellenére a 8. ábra rávilágít arra, hogy mennyire fontos a mérési hely környezeti paramétereinek (hőmérséklet, légnyomás, stb) regisztrálása is, hiszen a legvalószínűbb, hogy a tapasztalt tendenciák összefüggésben vannak ezen paraméterek helyi változásaival.



6. ábra. A CCD okulárral felszerelt LCR G949 sz. graviméterrel regisztrált gravitációs árapály-hatás és az ETERNA3.4 programmal, a bécsi paraméter-rendszerrel számított szintetikus adatsor a 2009.01.28 – 2009.02.03 közötti időszakban. Jól megfigyelhető a műszerjárás, amelynek hatására a mérési eredményt mutató görbe (fekete vonal) fokozatosan távolodik az elméleti görbétől (szürke vonal). Mintavételi gyakoriság: 20 perc

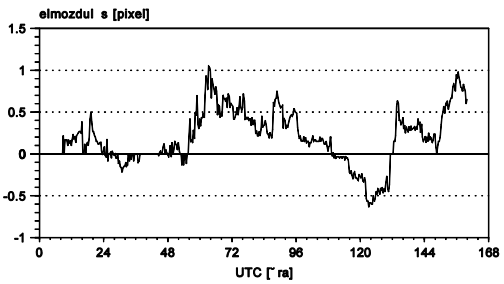


7. ábra. Az index-szál helyzetének megállapítására 2009.01.28 – 2009.02.03 között végzett észlelések mérési sorozatonkénti (képenkénti) átlagértékeitől való eltéréseinek hisztogramja

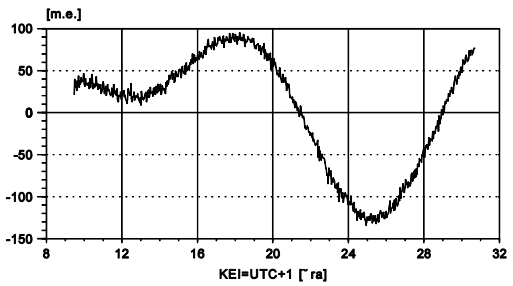
Az eredmények alapján a mérés megbízhatósága kissé gyengébb, mint az várható volt. Ugyanis a korrelátor program előzetes tesztjei, amelyek szintetikusan módosított képekkel történtek, azt mutatták, hogy az index-szál helyzetének változása, ha az egész pixel értékű, hiba nélkül meghatározható. Ezt az elméleti lehetőséget természetesen a valódi képek tökéletlensége (4. ábra) és a mérést ténylegesen befolyásoló, közúti-vasúti forgalomból származó rezgések miatt lehetetlen kihasználni. Sajnos a városi „talajnyugtalanság" következtében az index-szálnak akár ±10 μGal amplitúdójú, néhány másodperces periódusidejű kilengései észlelhetők, amelyeknek hatása jól kivehető egy rövid, de 2 perces mintavételezéssel rögzített adatsoron (9. ábra). Remélhetőleg a város központjától távolabb fekvő Sopronbánfalvi Geodinamikai Obszervatóriumban kedvezőbb körülmények lesznek majd a hosszabb idejű regisztrálásra.

7 Összefoglalás

Az előzetes vizsgálatok alapján megállapítható, hogy az MTA GGKI-ban a LCR G típusú graviméterekhez elkészített CCD okulár stabilan és automatikusan működtethető hosszú idejű árapály regisztrátumok előállítása céljából. Természetesen az így nyert adatok pontossága (±2 μGal - ±4 μGal) nem közelíti meg azt, amit az ún. szupravezető graviméterek ma biztosítanak (~0.01 μGal) az árapály jelenség vizsgálatához és egyéb globális geodinamikai kutatásokhoz, de a bemutatott fejlesztésnek nem ezek a témák tartoznak a célkörébe. A rendszer sokkal inkább a terepi mérésekben alkalmazott, a környezeti hatásokat csökkentő javítások, esetleg a gravimétertől is függő (egyedi) jellegzetességeinek vizsgálatában segíthet. Ennek igazolásához néhány hetes időtartamú, különböző helyeken végzett észleléseket kell elvégezni. Egy ilyen mérési program várhatóan arra is választ adna, hogy van-e kimutatható eltérés az árapály paraméterek között az ország területén, azaz elégséges-e egyetlen paraméter készlet használata. A rendszer teszteléséhez szükséges lenne más graviméterek (pl. szupravezető graviméter) bevonása is, párhuzamos észlelések kivitelezésével.



8. ábra. Az képelmozdulás (m_k) idődiagramja a 2009.01.28 – 2009.02.03 között végzett észlelések alatt



9. ábra. 2 perces mintavételezéssel rögzített árapály regisztrátum (Sopron, MTA GGKI műszercsarnok, 2009.01.12-13.)

Köszönetnyilvánítás. A szerzők köszönetet mondanak a PICTRON Számítás- és Videotechnikai Kft-nek a fejlesztés során felmerült szoftveres problémák megoldásában nyújtott segítségért.

Hivatkozások

Csapó G, Völgyesi L (2004b): Újabb mérések a vertikális gradiens(VG) értékének meghatározására. Magyar Geofizika, 45 (2), 64-69.

Csapó G (2008): Accuracy Tests of LCR Model G gravimeters. Geophysical Transactions *ELGI*, Vol. 45(3) 123-133.

Benedek J, Papp G. (2005): Graviméteres mérések kiértékelése műszervizsgálat céljából. Geomatikai Közlemények VIII, 201-208.

Press WH, Flannery BP, Teukolsky SA, Vetterling WT (1986): Numerical recipes. The art of scientific computing. Cambridge University Press, London

Torge W (1989): Gravimetry. de Gruener, Berlin.

Völgyesi L, Égető Cs, Laky S, Tóth Gy, Ultmann Z (2009): Eötvös-inga felújítása és tesztmérések a budapesti Mátyás-barlangban. Geomatikai Közlemények XII, 71-82.

Wenzel HG (1996) The nanogal software: Earth tide data processing package – ETERNA3.30. Bulletin D'informations Marees Terrestres, 124. 9425-9439.

KÍSÉRLETI MÉRÉSEK EÖTVÖS-INGÁVAL ÉS GRAVIMÉTEREKKEL – AZ EÖTVÖS-INGA MÉRÉSEK EREDMÉNYEI GEODÉZIAI CÉLÚ HASZNOSÍTÁSÁNAK VIZSGÁLATA CÉLJÁBÓL

Csapó Géza[*], *Tóth Gyula*[**,***], *Laky Sándor*[***], *Völgyesi Lajos*[**,***]

Test measurements by torsion balance and gravimeters in view of geodetic application of torsion balance data *- The purpose of the measurements presented in this paper was to utilize besides numerous (about 300000) gravity values determined by gravimetry, Hungarian torsion balance measurement results as well, and thereby facilitate an improved gravity field determination of our country. The primary goal of about 60000 torsion balance measurements was domestic prospecting of raw materials. Earlier theoretical investigations and geodetic torsion balance measurements made by Loránd Eötvös showed that these measurements are good for gravity field determination as well and it is possible by combining torsion balance with gravimetry to generate all functionals of the gravity field.*

Keywords: gravity gradients, gravimeter, torsion balance

A tanulmányban bemutatott mérések alapvető célja az volt, hogy a nagyszámú (mintegy 300000) graviméterrel mért nehézségi gyorsulási érték felhasználásán kívül hasznosítsuk a magyarországi Eötvös-inga mérések eredményeit is és ezzel az eddiginél részletesebben ismerjük meg a nehézségi erőtér szerkezetét hazánk területére vonatkozóan. A mintegy 60000 Eötvös-inga mérés elsősorban a hazai nyersanyag kutatás céljait szolgálta. Elméleti vizsgálatok és Eötvös Loránd geodéziai célú ingamérései bizonyították, hogy ezek az adatok a nehézségi erőtér szerkezetének jobb megismerésére is hasznosíthatók, valamint az Eötvös-ingás és a graviméteres mérések eredményeinek kombinálásával a nehézségi erőtér valamennyi eleme előállítható.

Kulcsszavak: nehézségi erőtér gradiensei, graviméter, Eötvös-inga

1 Bevezetés

Részben az elméleti vizsgálatok gyakorlati igazolása, részben a kétféle gravitációs módszerrel meghatározott mennyiségek megbízhatóságának összehasonlítása céljából 2006-ban az ELGI-ben felújításra került egy E–54 típusú Eötvös-inga, amellyel először laboratóriumi vizsgálatok történtek (Csapó 2007), majd a terepi mérésekhez szükséges kiegészítők elkészítése után megfelelő területet kerestünk a tervezett munkák elvégzéséhez. Erre a célra a Csepel-sziget déli része, Makád község külterülete látszott alkalmasnak, ahol minimális a beépítettség és az ötvenes években számos Eötvös-inga mérést is végeztek.

2 A nehézségi erőtér horizontális gradiensének meghatározása

A Makád község külterületén létesített 300 m × 300 m kiterjedésű méteres síkvidéki teszthálózat pontjain egyidejűleg végeztünk Eötvös-ingával és graviméterrel horizontális gradiens méréseket. Az 1. táblázatban a graviméterrel mért horizontális gradienseket *HG*-vel, az ingával meghatározott értékeket W_{zs}-sel jelöltük (Völgyesi 2002). A graviméteres méréseket a következők szerint végeztük: a négy főégtájban a P központtól 5-5 méter távolságban kitűzött É, K, D, Ny pontok és a központi pont között ún. „kettős csillagmérést" végeztünk (P-É-P-K-P-D-P-Ny-P-…), és a számított Δg értékeket 5 m távolsággal osztva kaptuk a *HG* μGal/m-ben kifejezett értékét. A $HG_{É}$, HG_{K} , ill. W_{zx} ,

[*]*Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, H-1145 Budapest, Kolumbusz utca 17-23.*
[**]*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék*
[***]*MTA-BME Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp.3.*
E-mail: csapo@elgi.hu, gtoth@sci.fgt.bme.hu, laky.sandor@freemail.hu, volgyesi@eik.bme.hu

W_{zy} gradiens-összetevők számításánál az *x* tengely pozitív ága észak felé, az *y* tengely pozitív ága kelet felé mutat. Az eredő (*HG*, ill. W_{zs}) számításához alkalmazott képlet:

$$HG = \sqrt{HG_{É}^2 + HG_{K}^2}\ , \tag{1}$$

$$W_{zs} = \sqrt{W_{zx}^2 + W_{zy}^2}\ . \tag{2}$$

A graviméterrel végzett *HG* meghatározások μ_{HG} megbízhatóságát az ismételt mérések alapján számítottuk a:

$$\mu_{HG} = \sqrt{\mu HG_{É}^2 + \mu HG_{K}^2} \tag{3}$$

összefüggés alkalmazásával.

A mérésekhez elektronikus libellákkal, CPI elektronikával ellátott LCR gravimétert alkalmaztunk, a műszerleolvasásokat a graviméterhez csatlakoztatott, szűrővel ellátott digitális voltmérővel végeztük interpoláló eljárással (Csapó 2006).

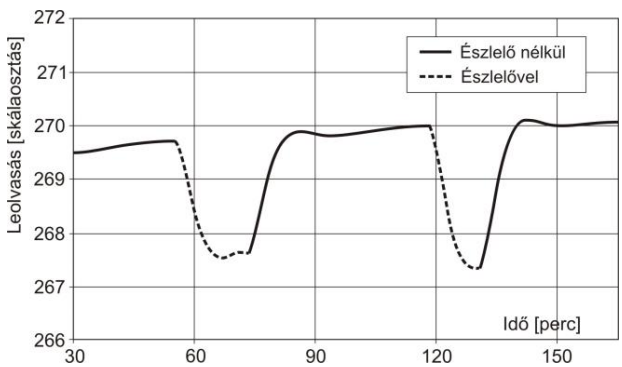
Az 1. táblázat adatai szerint LCR graviméterrel terepi körülmények között végzett *HG* horizontális gradiens mérések átlagos megbízhatósága esetünkben ± 5μGal. Ez a megbízhatóság jobb, mint az általában tapasztalható $\mu_{\Delta g}$ > ± 10μGal, ami azzal magyarázható, hogy a műszer áthelyezése a pontok között gyorsan és elhanyagolható káros mechanikai hatással végezhető, valamint a mért pontokon csak minimális tárcsaforgatás szükséges a műszerleolvasások előtt. Több ponton néhány nap elteltével különböző időjárási körülmények között megismételtük a méréseket (lásd 1.táblázat: 2#2 és 3#3 jelű pont).

1. táblázat. A teszt-területen graviméterrel és Eötvös-ingával 2007-2008-ban mért horizontális gradiens értékek és ezek megbízhatósága μgal/m egységben

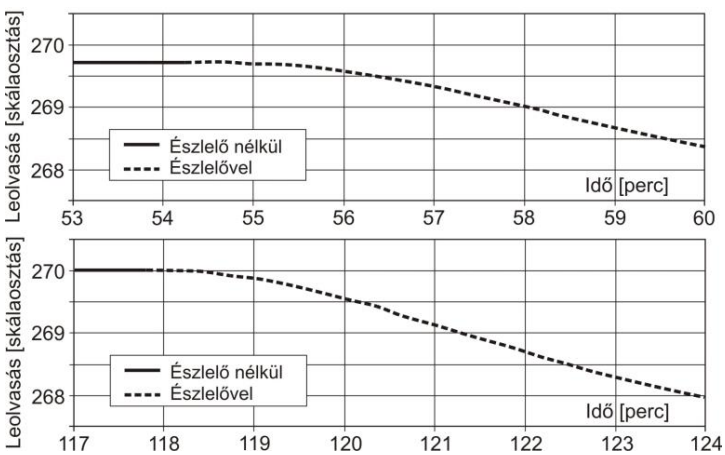
No.	graviméterrel	ingával	eltérés	megjegyzés
E238	6.5 ± 8.4	1.7	4.8	
E208	8.4 ± 2.4	3.3	5.1	azonos: 3#5
1#1	6.4 ± 3.2	–		
1#2	10.6 ± 5.6	5.2	5.4	
1#3	10.2 ± 12.6	2.3	7.9	
1#4	1.1 ± 2.2	0.4	0.7	
1#5	1.5 ± 2.8	2.8	– 1.3	
2#2	8.7 ± 5.4	–		
2#2	5.8 ± 5.7	1.6	4.2	ismétlés
2#3	6.3 ± 5.7	1.4	4.9	
2#4	4.5 ± 4.3	0.8	3.7	
2#5	3.8 ± 8.4	2.7	1.1	
2#6	2.5 ± 3.6	1.7	0.8	
3#3	4.8 ± 3.3	1.8	3.0	
3#3	4.1 ± 3.2	–		ismétlés
3#4	0.5 ± 4.8	2.4	– 1.9	
3#6	5.0 ± 3.9	2.2	2.8	
4#4	5.5 ± 3.6	0.7	4.8	
4#5	4.9 ± 5.7	1.2	3.7	
5#4	2.4 ± 5.0	1.3	1.1	
6#1	1.4 ± 6.3	2.9	– 5.0	
6#2	3.5 ± 5.8	2.3	– 2.2	
23#5	1.5 ± 0.7	3.0	0.8	
23#4	3.8 ± 2.1	1.1	1.6	
32#5	5.4 ± 16.4	2.5	– 10.9	
23#3	4.5 ± 3.7	0.9	0.8	
23#35	9.9 ± 7.4	2.9	2.5	
33#5	4.1 ± 3.5	1.4	0.6	
34#45	3.5± 2.2	1.0	1.2	
34#5	12.5 ±5.7	0.3	6.7	
34#5	13.0 ±3.2	–		ismétlés
átlagos hiba: ± **5.1**		átlagos eltérés: **4.2**		

Kedvező feltételeknél (3#3 pont) egyező eredményeket kaptunk, nagyon eltérő körülmények között azonban (2#2 pont) az eredmények egyezése rosszabb volt. A bemutatott adatok értékeléséhez megjegyezzük, hogy a graviméteres mérésekkel egyidőben végzett ingamérések szempontjából a külső körülmények igen kedvezőtlenek voltak. Az ingasátorban a hőmérséklet a sorozat mérése közben 7-8 ºC -kal is emelkedett, egyes napokon elérte a 40 ºC-t és a vertikális hőmérsékleti gradiens is 7-8ºC/m értékű volt. Ez utóbbi érték hatására kedvezőtlen levegő turbulenciák adódhattak az ingaszálak védőcsöveiben.

Az E–54 típusú Eötvös-ingával 5 azimutos méréseket végeztünk vizuális észleléssel úgy, hogy az 1. és 2. azimut észlelését a sorozat végén megismételtük. Az inga dezarretálása után az első észlelést 40–50 perc elteltével hajtottuk végre, utána az egyes azimutokban végzett észlelések közötti idő 40 perc volt. Az ingakarnak az egyes azimutok közötti forgatását mechanikus óraszerkezet biztosította. Az inga szerkezeti felépítéséből következik, hogy minden meghatározott mennyiségre két – részben független – mérési eredmény adódik; végeredménynek a két érték átlagát számítjuk. A horizontális gradiens ingával meghatározott értékének megbízhatóságát részben a két mérési eredmény eltérése alapján vettük figyelembe, (a megismételt azimutokban észlelt viszonylag nagy eltérések miatt a feldolgozásnál csak a második leolvasásokkal számoltunk), részben pedig meghatároztuk az észlelő közelségéből származó tömeghatást. Az 1. ábrán az észlelő tömeghatását láthatjuk a Mátyás-barlangban végzett kísérleti mérések során. A 2. ábrán az 1. ábra azon részeit látjuk kinagyítva, ahol a leolvasó személy megjelenését követően elkezdődik a leolvasott értékek megváltozása. Látható, hogy a mintegy 2 perces észlelési idő alatt a tömeghatás átlagosan 0.4-0.6 E érték. Az 1. ábráról kiderül, hogy az észlelő teljes tömeghatása jóval az észlelés befejezése után jelentkezik és 35-40 perc szükséges ahhoz, hogy az inga visszaálljon eredeti állapotába.



1. ábra. Az észlelő közelségéből származó tömeghatás az Eötvös-inga leolvasási értékeire



2. ábra. Az észlelő közelségéből származó tömeghatás kinagyított részei

A grafikonok előállításához szükséges sűrű mintavételezést az tette lehetővé, hogy vizuális észlelés helyett videokamerás felvételezésre tértünk át. A leolvasó mikroszkópok szemlencséje elé videokamerákat rögzítettünk, amelyeket egy interaktív célprogrammal vezérelve tetszőleges gyakorisággal fényképezhető a látómező. A program elvégzi a képfeldolgozást is, de manuális kiértékelésre is lehetőséget ad az egyes felvételek megjeleníthetőségével. A történetiség kedvéért megjegyezzük, hogy az E–54 típusú ingákkal korábban is volt lehetőség a vizuális leolvasások helyettesítésére oly módon, hogy a látómező képét egy fényérzékeny üveglemezre rögzítette a berendezés. A lemezek fényképészeti előhívása után az egyes felvételeken vizuálisan lehetett az index helyzetét meghatározni. A 2007-ben végzett *vizuális mérések* megbízhatóságát 4-5 E értékűre becsüljük. A videokamerás mérések eredményeinek ismertetését egy későbbi tanulmányban tervezzük akkor, amikor befejezzük az inga automatikus forgatására irányuló jelenleg folyó fejlesztésünket is.

A graviméterekkel ugyanazon ponton végzett ismételt *HG* mérések eredményei között átlagosan 1-3 μGal eltérést tapasztaltunk, ami igen jó egyezés. Tekintettel azonban arra, hogy a graviméterrel végzett méréseknél a mért mennyiség nagysága és a meghatározás megbízhatósága azonos nagyságrendű, ezért mind a mért mennyiség nagysága, mind az eredő iránya durván eltérhet az ingamérésekkel meghatározott értékektől. Tapasztalatainkat a 2008-ban további 12 ponton végzett *HG* mérésünk eredményei is alátámasztották.

Ezen összehasonlító mérések tapasztalatai alapján az a következtetés vonható le, hogy *elektronikus libellákkal, CPI elektronikával szerelt LCR graviméterekkel és digitális voltmérővel történő műszerleolvasással sem lehet megbízhatóan meghatározni a nehézségi gyorsulás horizontális gradiensét. Ezt az összetevőt megbízható módon továbbra is az Eötvös-ingával lehet meghatározni.*

3 Nehézségi gyorsulás különbségek (Δg) meghatározása graviméterekkel és Eötvös-ingával

Az egyes mérési pontok közötti Δg értékek meghatározását az előző pontban ismertetett LCR graviméterekkel végeztük 2007-2008-ban. A méréseket különböző napokon hajtottuk végre egy időben két LCR műszerrel. A műszereket a mérési pontok, illetve a sorozatokhoz felhasznált bázispontok között személygépkocsival szállítottuk. (Mivel a hálózat valamennyi pontját szántóföldön állandósítottuk, szállítás közben a graviméterek folyamatosan káros hatású mechanikai igénybevételnek, rázkódásnak voltak kitéve).

A mérési eredmények feldolgozásánál árapály-, műszermagassági-, barometrikus- és műszerjárás miatti javítást alkalmaztunk. (A javításba hallgatólagosan a matematikai módszerrel nem számítható hőmérsékletváltozások és a káros mechanikai hatások figyelembevétele is beleértendő).

A 2. táblázatban bemutatott Δg értékek az adott pontok között mért, vagyis kiegyenlítés előtti, javításokkal ellátott nehézségi gyorsulás különbségek. A táblázat „eltérés” oszlopában szereplő adatokból látszik, hogy a két graviméter mérési eredményeit nem terheli méretarány eltérésből származó szabályos hiba. A mérési időszak második felében megnőtt a két graviméterrel mért Δg értékek közötti különbség (> 0.03 mGal), ennek okát jelenleg nem ismerjük.

Eötvös-inga mérések eredményeiből két pont közötti Δg értékét annak feltételezésével számíthatjuk ki, hogy a két pont közötti magasságkülönbség és távolság kicsi. Ebben az esetben ugyanis a köztes vonalszakaszon a vízszintes értelmű gradiensek helyettesíthetők azoknak a két végponton mért értékének átlagával. A mérési pontok közötti távolságok számításához a GPS módszerrel meghatározott vízszintes koordinátákat használtuk (az egyes pontok vízszintes koordinátáinak megbízhatósága 1-2 cm).

A vertikális gradienseknek a számított Δg értékre gyakorolt esetleges hatását elhanyagoltuk. Az ingamérések eredményei alapján tehát valamely két A és B pont közötti Δg számításánál alkalmazott képlet:

$$\Delta g = \frac{W_A + W_B}{2} t_{AB} \,, \tag{4}$$

ahol W_A és W_B a két ponton mért gradiensnek az AB irányba eső összetevője, t_{AB} pedig az A és B pont távolsága (lásd 2. táblázat). Az eredmény mGal-ban adódik.

Az eredeti Eötvös-inga mérési pontok között, amelyeknek 150–300 m közötti a távolsága, a fenti

2. táblázat. A teszt-területen graviméterrel végzett Δg mérések

mérés dátuma	mérési kapcsolat	távolság m	$\Delta g_{LCR\text{-}220}$	$\Delta g_{LCR\text{-}1919}$	eltérés	Δg átlag
			mGal			
2007.07.31	E238 – 1#2	451.961	0.318	0.342	– 0.024	0.330
	1#2 – 1#1	298.924	– 0.369	– 0.371	0.002	– 0.370
	1#1 – 1#3	599.540	1.105	1.085	0.020	1.095
	1#3 – 1#4	298.737	0.593	0.578	0.015	0.586
	1#4 – 1#5	298.043	0.528	0.529	– 0.001	0.529
	1#5 – E208	599.259	0.636	0.649	– 0.013	0.643
	E238 – E208	1437.610	2.834	2.797	0.037	2.816
2007.08.14	2#3 – 2#4	299.136	0.314	0.324	– 0.010	0.319
	2#4 – 2#5	300.904	0.264	0.233	0.031	0.249
	2#5 – 2#6	300.060	0.230	0.287	– 0.057	0.259
	3#6 – 3#4	602.220	– 0.645	– 0.664	0.019	– 0.655
	3#4 – 3#3	299.760	– 0.190	– 0.195	0.005	– 0.193
	3#3 – 2#2	356.443	– 0.812	– 0.780	– 0.032	– 0.796
2007.08.22	1#2 – 2#3	424.380	1.295	1.256	0.039	1.276
	2#3 – 3#3	298.010	0.407	0.438	– 0.031	0.423
2007.09.29	5#4 – 4#4	424.265	– 0.364	– 0.328	– 0.036	– 0.346
2008.08.12	502 – 6#1	–	0.068	0.041	0.027	0.055
	6#1 – 6#2	300.003	0.634	0.636	– 0.002	0.635
	6#2 – 7#2	–	– 0.498	– 0.538	0.040	– 0.518
	7#2 – 6#3	–	1.098	1.141	– 0.043	1.120
	6#3 – 500	–	– 1.736	– 1.718	– 0.018	– 1.727
	500 – 502	–	0.417	0.438	– 0.021	0.428
2008.08.15	502 – 3#25	–	1.7903	1.748	0.042	1.769
	3#25 – 23#3	221.351	0.0378	0.061	– 0.023	0.049
	23#3 – 3#35	212.851	0.4067	0.384	0.023	0.395
	3#35 – 23#4	214.467	– 0.0445	– 0.058	0.014	– 0.051
	23#4 – 3#45	212.845	0.3191	0.324	– 0.005	0.322
	3#45 – 2#35	422.852	– 0.6859	– 0.687	0.001	– 0.686
	2#35 – 500	–	– 2.2351	– 2.207	– 0.028	– 2.221
	500 – 502	–	0.4122	0.438	– 0.026	0.425
	500 – 3#25	–	2.2096	2.181	0.029	2.195
	23#3 – 2#35	211.504	– 0.0259	– 0.050	0.024	– 0.038
	23#5 – 23#4	210.012	0.3720	0.369	0.003	0.371
	3#45 – 3#35	300.000	– 0.3042	– 0.245	– 0.059	– 0.275
	3#35 – 502	–	– 2.2386	– 2.200	– 0.039	– 2.219
2008.09.09	502 – 23#35	–	2.190	2.142	0.048	2.166
	23#35– 23#3	149.900	– 0.370	– 0.339	– 0.031	– 0.355
	23#3 – 34#45	540.920	0.542	0.549	– 0.007	0.546
	34#45– 500	–	– 2.813	– 2.800	– 0.013	– 2.807
	500 – 502	–	0.477	0.435	0.042	0.456
	500 – 23#35	–	2.645	2.597	0.048	2.621
	34#45– 502	–	– 2.344	– 2.364	0.020	– 2.354
az eltérések abszolút értékének átlaga:					**0.025**	

számítás nem adott értékelhető eredményt, ezért a 3. táblázat megfelelő adatait úgy számítottuk ki, hogy 10×10 m-es osztásközű rácsra digitális domborzatmodellt állítottunk elő a terület 1:10000-es topográfiai térképe, másrészt az ingamérésekhez kapcsolódó, mérőállomással meghatározott 8 irányú területszintezési adatok segítségével. A számítás tömegelemei háromszög alapú hasábok voltak, amelyekből kettő-kettő helyezkedett el vízszintes értelemben a 10 m-es rács egy-egy celláján belül. Ezekhez a hasábokhoz a teljes területre jellemző 2000 kg/m^3-es sűrűség értéket rendeltünk, és a modellnek a gravitációs hatását a peremhatás csökkentése érdekében egy alkalmasan választott referencia tömegmodellhez képest számítottuk ki 50×50 m-es osztásközű rácsra. A gravitációs gradiensek számításához az egyes poliéderekre Holstein (2003) összefüggéseit alkalmaztuk, és az így besűrített vízszintes gradienseket használtuk a pontok közötti nemlineáris gravitációs gradiens változás modellezéséhez. Az elkészített digitális domborzatmodell területén kívül eső pontokra nem

tudtuk alkalmazni az eljárást, ezért azok nem szerepelnek a 3. táblázatban. A jövőben szeretnénk elvégezni a domborzatmodell bővítését, hogy ezekre a pontokra is elvégezhessük a számítást.

Az Eötvös-inga mérési eredményeiből számított Δg értékek megbízhatóságának számításához (becsléséhez) a következőket kell figyelembe venni:

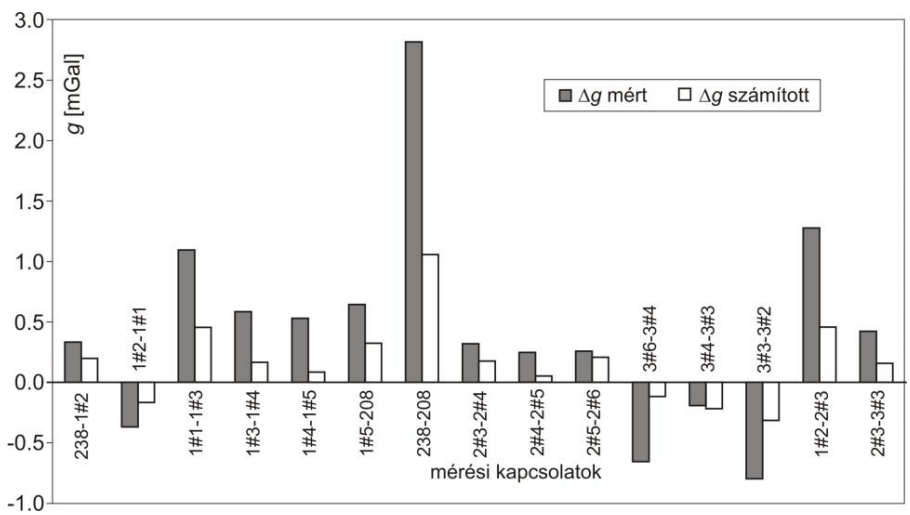
1. az egyes pontok vízszintes koordinátáinak meghatározási hibája 1-2 cm,
2. az ingamérések megbízhatósága**:** 4-5 E
3. két pont koordináták alapján meghatározott távolságának (t_{AB}) figyelembe vételével számított Δg érték esetén 5 cm távolsági bizonytalanság cca. 1.6 µGal hibát okoz,
4. az 5°–os azimut hiba pedig cca. 1.3 µGal hibát okoz.

Az ingamérések megbízhatósága több tényező függvénye. Az egyik a vizuális észlelés leolvasási pontatlansága, amely ha 0.2-0.3 körüli skálaosztás egység, akkor ez a gradiensekben 0.8-1.1 E, a görbületi értékekben 1.7-3 E meghatározási középhibát eredményez. Ennél komolyabb hatást jelent a műszerszál nem lineáris driftje. Habár a műszerbe épített két inga mérései nem tekinthetők teljesen függetlennek, bizonyos környezeti hatások (pl. hőmérséklet) várhatóan nagyjából egyformán befolyásolják a leolvasásokat. Ennek ellenére ezen különbségek alapján az ingamérések megbízhatósága megbecsülhető: a szórás átlagosan ± 4-6 E volt a mért állomásokon, de pontról-pontra is erősen változott. Már említettük, hogy az észlelő tömeghatása is jelentős, a 2 perces észlelési idő alatt átlagosan 0.4-0.6 E érték. Ezen hibahatások egy része várhatóan csökkenthető illetve kiküszöbölhető lesz automatizált észleléssel, a műszerszálak driftjének pontosabb modellezésével, illetve az észlelőház jobb hőszigetelésével.

A 3. és a 4. ábra alapján látható, hogy a graviméterrel és ingával mért Δg értékek irányra ugyan megegyeznek, nagyságra azonban nem. Ez részben azzal magyarázható, hogy még 300 méteres távolságban sem teljesül az alapfeltétel, amely szerint a vizsgált két pont között a nehézségi gyorsulás értékek lineárisan változnak. Az eltérések egyéb lehetséges okainak kiderítésére további vizsgálatokat tervezünk. Ugyanakkor a 4. ábrán igen jó korrelációs együtthatóval rendelkező lineáris összefüggést találtunk a kétféle módon nyert értékek között.

Összehasonlítás céljából a 4. táblázatban azokat az eredményeket is bemutatjuk, amelyeket 1991-ben a budapesti Mátyás-barlang egyik vízszintes folyosóján mért Csapó Géza LCR graviméterekkel és E–54 típusú ingával. A szomszédos pontok egymás közötti távolsága 1.5 és 6 m között, tengerszint feletti magasságuk pedig 201.2-201.8 m tartományban változott.

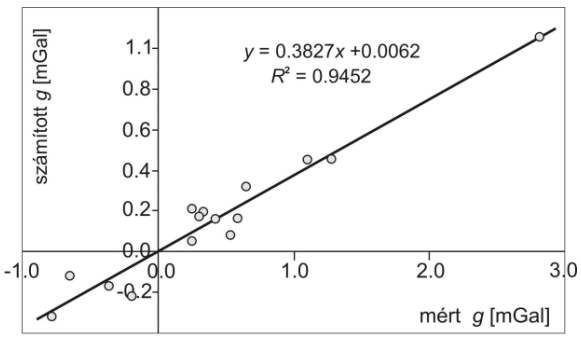
A táblázat adatai szerint a kétféle mérésből számított eredmények egyezése kielégítő. A számításoknál nem vettük figyelembe a barlang tömeghatását. A mért és számított Δg értékek majdnem lineáris kapcsolatban vannak egymással, viszont a számított érték arányosan kisebbek. Ennek okát még egyelőre nem látjuk tisztán, az okok kiderítésére további vizsgálatok szükségesek.



3. ábra. A mért és a számított Δg értékek összehasonlítása

3. táblázat. Graviméterrel és Eötvös-ingával végzett *Δg* mérések eltérései

mérési kapcsolat	*Δg* (graviméterrel) mGal	*Δg* (ingával) mGal	eltérés mGal
E238- 1#2	0.330	0.199	0.131
1#2 – 1#1	– 0.370	– 0.168	– 0.202
1#1 – 1#3	1.095	0.454	0.641
1#3 – 1#4	0.586	0.166	0.420
1#4 – 1#5	0.528	0.084	0.444
1#5 –E208	0.642	0.323	0.319
E238–E208	2.816	1.057	1.759
2#3 – 2#4	0.319	0.176	0.143
2#4 – 2#5	0.248	0.053	0.195
2#5 – 2#6	0.258	0.208	0.050
3#6 – 3#4	– 0.654	– 0.116	– 0.538
3#4 – 3#3	– 0.192	– 0.218	0.026
3#3 – 2#2	– 0.796	– 0.313	– 0.483
1#2 – 2#3	1.276	0.457	0.819
2#3 – 3#3	0.422	0.158	0.264
5#4 – 4#4	– 0.346	–	–



4. ábra. A mért és a számított *Δg* értékek kapcsolata

4. táblázat. Graviméterrel és Eötvös-ingával meghatározott *Δg* értékek a Mátyás-barlangban

mérési kapcsolat	*Δg* (LCR)	*Δg* (inga)	*Δg* különbség (LCR–inga)
		μGal	
1–2	110	93.5	+ 16.5
2–3	101	91.3	+ 9.7
3–4	113	121.6	– 8.6
4–5	905	80.4	+ 14.6
5–6	110	97.3	+ 12.7
6–7	109	92.3	+ 16.7
7–8	102	90.0	+ 12.0
8-9	105	86.2	+ 18.8
9–10	110	100.9	+ 9.1
10–11	110	94.8	+ 15.2
11–12	97	95.4	+ 1.6
12–13	102	99.2	+ 2.8
13–14	98	104.3	– 6.3

4 Hálózatban végzett Eötvös-inga mérésekből számított *VG* értékek meghatározása

Közismert, hogy Eötvös-inga mérések eredményeiből az adott pont vertikális gradiens értékére közvetlenül nem kapunk információt. Létezik azonban olyan módszer, amellyel a *VG* érték minden Eötvös-inga mérési pontban meghatározható akkor, ha a hálózatban szerepelnek valamilyen módon meghatározott *VG* értékek (Tóth 2007).

Az elméleti kutatások eredményének a gyakorlatban történő ellenőrzése céljából a teszthálózat pontjainak nagy többségén graviméterrel meghatároztuk a *VG* helyi értékét (Csapó 1999). A terepi méréseket az 5. ábrán látható speciális állványon két LCR graviméterrel végeztük 50, 700 és 1300 mm pontjel feletti magasságban. Az 5. táblázatban a két műszer mérési eredményeinek átlagát tüntettük fel pontonként. A mérési eredmények megbízhatóságát erősen rontotta az észlelések idején általában uralkodó változó erősségű szél (erősebben szeles időben végzett mérések megbízhatósági értékeit a táblázatban kiemeléssel jelöltük).

A mérési területre számított átlagos *VG* érték megközelíti a normálértéket (0.3086 mGal/m) és az egyes pontokra számított értékek néhány μGal/m értékkel különböznek csupán. Haalck (1950) eredeti elgondolása nyomán a hiányzó W_{zz} vertikális gradiens meghatározása is elvégezhető az Eötvös-inga méréseit felhasználva, mivel a potenciálfüggvény 3. deriváltjain keresztül megteremthető a kapcsolat a hiányzó és mért mennyiségek között az alábbi összefüggések szerint:



5. ábra. Vertikális gradiens mérés a teszt területen

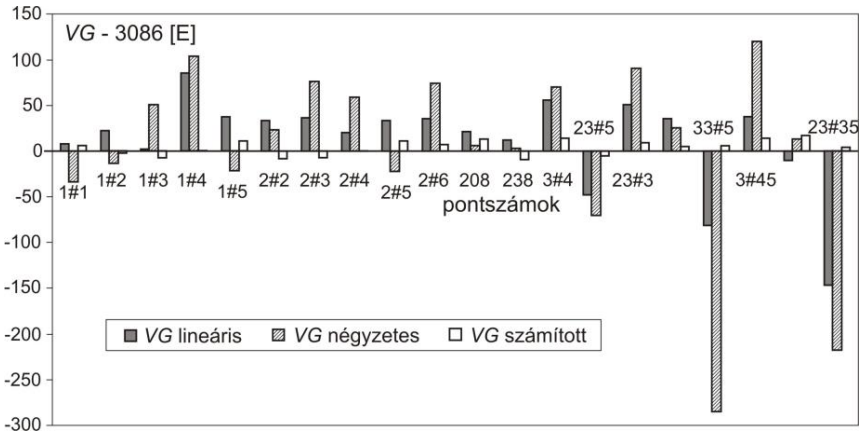
$$\begin{aligned} W_{zzx} &= -W_{\Delta x} - 2W_{xyy} \\ W_{zzy} &= W_{\Delta y} - 2W_{xyx} \\ W_{zzz} &= -W_{xzx} - W_{yzy} \end{aligned} \tag{5}$$

Figyelembe véve ismét a nemlineáris gradiens-változásokat, a terület digitális domborzatmodelljének segítségével elkészítettük a mérésekből előállítható gradiens és görbületi térképeket egy 50 × 50 m-es osztásközű rácsra. Ezek numerikus differenciálásával kiszámítottuk az (5) összefüggések jobb oldalait, és konstans *z* magasságban – a (Vassiliou 1986) által ismertetett numerikus integrálással – a W_{zzx}, W_{zzy}-ból előállítottuk W_{zz}-t.

A 6. ábrán igen szemléletes formában összehasonlíthatjuk a *VG* mérésekből lineáris, illetve négyzetes modell alapján meghatározott, valamint az Eötvös-inga mérések felhasználásával számított *VG* értékeket.

5. táblázat. *VG* mérések eredményei

pont	lineáris közelítés		másodfokú közelítés	
	VG mGal/m	μ_{VG}	*VG* mGal/m	μ_{VG}
1#1	– 0.3078	**± 0.041**	– 0.3120	± 0.041
1#2	– 0.3064	± 0.008	– 0.3099	± 0.005
1#3	– 0.3084	± 0.011	– 0.3035	± 0.006
1#4	– 0.3001	± 0.005	– 0.2982	± 0.003
1#5	– 0.3048	± 0.013	– 0.3107	± 0.006
2#2	– 0.3053	± 0.008	– 0.3063	± 0.005
2#3	– 0.3049	± 0.009	– 0.3010	± 0.005
2#4	– 0.3066	± 0.006	– 0.3027	± 0.002
2#5	– 0.3053	± 0.012	– 0.3109	± 0.006
2#6	– 0.3050	**± 0.017**	– 0.3012	± 0.009
3#4	– 0.3030	± 0.012	– 0.3016	± 0.009
E208 (3#5)	– 0.3065	± 0.008	– 0.3080	± 0.009
4#4	– 0.3092	± 0.011	– 0.3076	± 0.006
4#5	– 0.3120	**± 0.018**	– 0.3190	± 0.009
B502	– 0.3189	± 0.012	– 0.3202	± 0.007
E238	– 0.3074	± 0.006	– 0.3083	± 0.007
átlag:	**– 0.3062**		**– 0.3067**	



6. ábra. A mért és a számított VG értékek összehasonlítása

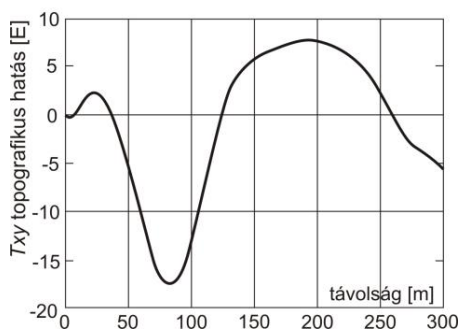
Az, hogy a számított értékek az U_{zz}=-3086 E normálértéknél jelentősen kisebbek, részben abból adódhat, hogy még 50 m-es távolságon sem tekinthető lineárisnak a gradiensek változása. Ezt a 7. ábrán láthatjuk, ahol a terepmodell T_{xy} gradiens változását mutatjuk be 5 m-es ponttávolsággal számolva. Ezért szeretnénk megismételni mind a nehézségi rendellenességek, mind a vertikális gradiensek interpolációját 5 m-es felbontású digitális domborzatmodellel és 5 m-es ponttávolsággal. Ezen kívül tervezzük a Haalck módszer alkalmazását közvetlenül a kétváltozós (u,v) frekvencia tartományban, mivel a deriváltak Fourier-transzformáltjának tulajdonságai, illetve a potenciálfüggvényre vonatkozó Laplace-egyenlet segítségével könnyen igazolható, hogy ott az alábbi analitikus kapcsolat áll fenn az ingamérések $FW_{\Delta}(u,v)$, $FW_{xy}(u,v)$ és a vertikális gradiens $FW_{zz}(u,v)$ Fourier transzformáltjai között:

$$FW_{zz}(u,v) = \frac{(u^2 - v^2)\, FW_{\Delta}(u,v) - 2uv\, 2FW_{xy}(u,v)}{u^2 + v^2} \tag{5}$$

Ez az összefüggés az első próbaszámításaink szerint a gyakorlatban is kedvező módon nyújthat majd lehetőséget a *VG* interpoláció elvégzésére, és egyben szépen mutatja az Eötvös-ingával mérhető görbületi értékek és a vertikális gradiensek igen szoros kapcsolatát.

5 Következtetések

A 2007-ben végzett Eötvös-inga mérések tapasztalatai alapján megállapítottuk, hogy a mérések megbízhatóságának növeléséhez jobb hőszigetelést biztosító észlelőházra van szükség. Ennek megfelelően a 8. ábrán látható korábbi észlelőházat átalakítottuk, a ház tetőlemeze fölé néhány cm távolságra egy második lemezt illesztettünk, és valamennyi oldalfalát hőszigetelő anyaggal vontuk be (9. ábra). Ezzel nagyobb hőstabilitást és az észlelőházon belül kisebb értékű vertikális hőmérsékleti gradienst sikerült biztosítanunk. A videokamerás műszerleolvasás előnye az eredeti fényképészeti eljárással szemben az, hogy másodpercenként akár több kép is készíthető, így az inga finomabb mozgásának és a driftnek a részletes elemzése is megvalósítható – lásd pl.: 1. ábra (Laky 2009). A jelenlegi állapothoz viszonyított pontosságnövelés szükségessé teszi az eredeti automatikus észlelési lehetőség rekonstruálást, ami a jelenlegi technikai eszközökkel megvalósítható és reményeink szerint a közeli jövőben sikerül kiviteleznünk.



7. ábra. Topografikus hatás a távolság függvényében



8. ábra. A korábbi észlelőház



9. ábra. A javított hőszigeteléssel ellátott észlelőház

Köszönetnyilvánítás. A tanulmányban ismertetett munkákat a K60657 és a K76231 számú OTKA pályázat támogatásával végeztük. Ezúton köszönjük a makádi református egyházközség vezetője *Lakatos Enikő* segítségét, aki munkánk sikeréhez fontos információkkal és azzal járult hozzá, hogy lehetőséget biztosított berendezéseink makádi tárolásához. Köszönettel tartozunk továbbá a Geoservice Kft. munkatársainak, akik messzemenően alkalmazkodtak a geodéziai munkákkal kapcsolatos igényeinkhez.

Hivatkozások

Csapó G (1999): Effect of vertical gravity gradient on the accuracy of gravimeter measurements based on Hungarian data. Geophysical Transactions, 42(1-2), 67-81.

Csapó G (2006): Accuracy Tests of LCR Model G gravimeters. Geophysical Transactions, 49; 3, 123-134.

Csapó G (2007): Az E−54 típusú Eötvös-inga használati utasítása. ELGI kiadvány, 1-27.

Haalck H (1950): Die vollständige Berechnung örtlicher gravimetrischer Störefelder aus Drehwaagemessungen. Veröffentlichungen des Geodätischen Institutes Potsdam, Nr. 4.

Holstein H (2003): Gravimagnetic anomaly formulas for polyhedra of spatially linear media. Geophysics, 68, 157-167.

Laky S (2009): E−54 típusú Eötvös-inga korszerűsítése. Technológiai jelentés, munkaközi változat, MTA-BME, Budapest.

Tóth Gy (2007): Vertikális gravitációs gradiens meghatározás Eötvös-inga mérések hálózatában. Geomatikai Közlemények X, 29-36.

Vassiliou AA (1986): Numerical techniques for processing airborne gradiometer data, UCSE Report 20017, Dept. of Surv. Eng., University of Calgary, Calgary, Alberta.

Völgyesi L (2002): Geofizika, Tankönyvkiadó, Budapest.

A NEHÉZSÉGI ERŐTÉR 3D POTENCIÁLFÜGGVÉNYÉNEK INVERZIÓS ELŐÁLLÍTÁSA

Dobróka Mihály[*,**]*, Völgyesi Lajos*[***,****]

Inversion reconstruction of 3D gravity potential based on torsion balance measurements *- Inversion reconstruction of 3D gravity potential based on each of the torsion balance and gravity measurements, deflections of the vertical and digital terrain model data have been solved by developing our former 2D solution. Applying this method the elements of the full Eötvös-tensor including the vertical gradients can be determined not only in the torsion balance stations, but anywhere in the surroundings of these points. This gives a simple possibility to transform the torsion balance measurements to different heights and the analytical determination of the equipotential surfaces of the gravity field.*

Keywords: inversion, torsion balance measurements, Eötvös-tensor, deflection of the vertical, potential function, gravity gradients

Az általunk korábban kidolgozott 2D eljárás továbbfejlesztésével megoldottuk a nehézségi erőtér 3 dimenziós potenciálfüggvényének inverziós előállítását Eötvös-inga mérési adatok, nehézségi gyorsulás mérések, függővonal-elhajlás értékek és digitális terepmodell adatok együttes felhasználásával. A módszerrel nem csupán az Eötvös-inga mérési pontokban, hanem ezek környezetében is meghatározható a teljes Eötvös-tenzor, és így megkaphatjuk az Eötvös-ingával közvetlenül nem mérhető vertikális gradiens értékeket is. Ezzel egyszerű lehetőség adódik az Eötvös-inga mérések átszámítására különböző magasságokra, és megoldható a nehézségi erőtér potenciál szintfelületeinek analitikus meghatározása.

Kulcsszavak: inverzió, Eötvös-inga mérések, Eötvös-tenzor, függővonal-elhajlás, potenciálfüggvény, gradiensek

1 Bevezetés

Magyarországon a múlt században közel 60000 Eötvös-inga mérést végeztek elsősorban ásványi nyersanyagok kutatása céljából. Napjainkban erre a célra már lényegesen hatékonyabb kutatási módszereket alkalmaznak, ezért az Eötvös-inga mérések geofizikai hasznosítása helyett a geodéziai hasznosítás került előtérbe. A geofizikai alkalmazások céljára korábban csak a W_{zx} és a W_{zy} horizontális gradienseket dolgozták fel, a W_{Δ} és W_{xy} görbületi adatok eddig feldolgozatlanok maradtak. A geodéziában viszont éppen a görbületi gradiensek alapján számíthatók függővonal-elhajlások, amelyeknek többek között a geoid finomszerkezetének meghatározása szempontjából van nagy jelentősége (Völgyesi 1993, 1995, 2001, 2005).

Az Eötvös-inga mérések geodéziai célú felhasználási lehetőségei a legutóbbi időkben tovább bővültek (Völgyesi et al. 2005). A W_{zx} és a W_{zy} horizontális gradiensek felhasználásával a nehézségi erőtér, illetve a gravitációs anomáliák határozhatók meg interpolációval (Völgyesi et al. 2004, 2007), a W_{zx} és a W_{zy} horizontális gradiensek és a W_{Δ} és W_{xy} görbületi adatok együttes felhasználásával pedig a vertikális gradiensek állíthatók elő az Eötvös-inga mérési pontokban (Haalck 1950, Tóth et al. 2004, 2005, Tóth 2007).

Valamennyi probléma megoldása szempontjából nagy jelentősége van a potenciálfüggvény előállításának. Amennyiben meg tudjuk határozni a nehézségi erőtér potenciálfüggvényét, ebből megfelelő irányú első deriváltakkal elő tudjuk állítani az erőtér vektorának összetevőit, a második deri-

[*]*Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, H-3515 Miskolc-Egyetemváros*
[**]*MTA - Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, H-3515 Miskolc, Egyetemváros*
E-mail: dobroka@gold.uni-miskolc.hu
[***]*BME, Általános és Felsőgeodézia Tanszék, H-1521 Budapest*
[****]*MTA Felsőgeodéziai és Geodinamikai Kutatócsoport, H-1521 Budapest*
E-mail: volgyesi@eik.bme.hu

váltak pedig az Eötvös-tenzor elemeit adják. Az általunk korábban kidolgozott 2D eljárással megoldottuk a W_Δ és a W_{xy} Eötvös-inga mérések alapján a nehézségi erőtér potenciálfüggvényének és a potenciálfüggvény valamennyi fontos deriváltjának inverziós előállítását (Dobróka és Völgyesi 2005, 2008). Az alábbiakban a 2D eljárás továbbfejlesztésével a nehézségi erőtér 3D potenciálfüggvényének inverziós rekonstrukciójára adunk megoldást. A 3D inverziós algoritmus ellenőrzésére a Szabadszállás-Kiskőrös környéki közel 750 km^2 kiterjedésű területen végeztünk kísérleti számításokat. A javasolt módszerrel lehetőség nyílik az eddig alkalmazott interpolációs módszerek pontosságát felülmúló számítások elvégzésére és a korábban alkalmazott eljárások során felmerülő bizonyos problémák áthidalására. Ezzel kapcsolatos kutatásainkban több részletkérdés még tisztázásra szorul, azonban a módszer bizonyítottan jól működik.

2 Az inverziós algoritmus

Írjuk fel a nehézségi erőtér potenciálfüggvényét valamely $\Psi_1 ... \Psi_P$ bázisfüggvény rendszer szerinti sorfejtés alakjában:

$$W(x,y,z) = \sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y}\sum_{k=1}^{N_z} B_l \Psi_i(x)\Psi_j(y)\Psi_k(z)\,, \tag{1}$$

ahol $l = i + (j-1)*N_y + (k-1)*N_x*N_y$.

Bázisfüggvényekként pl. hatványfüggvényeket alkalmazhatunk. Az 1 index a konstans tagot jelöli, és mivel a potenciál konstans erejéig egyértelmű ezért az $i = j = k = 1$ kizárható.

Az (1) potenciál második deriváltjaiként egyszerűen előállíthatjuk az Eötvös-ingával mérhető görbületi adatok-, illetve a horizontális gradiensek elméleti értékeit:

$$\left.\begin{aligned}
{}^{számított}W_{xy} &= \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} = \sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y}\sum_{k=1}^{N_z} B_l \Psi_i'(x)\Psi_j'(y)\Psi_k(z) \\
{}^{számított}W_\Delta &= W_{yy} - W_{xx} = \sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y}\sum_{k=1}^{N_z} B_l \left\{\Psi_j''(y)\Psi_i(x) - \Psi_j(y)\Psi_i''(x)\right\}\Psi_k(z) \\
{}^{számított}W_{zx} &= \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} = \sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y}\sum_{k=1}^{N_z} B_l \Psi_i'(x)\Psi_j(y)\Psi_k'(z) \\
{}^{számított}W_{zy} &= \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} = \sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y}\sum_{k=1}^{N_z} B_l \Psi_i(x)\Psi_j'(y)\Psi_k'(z)
\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Vezessük be a q-ik (x_q, y_q, z_q) mérési pontban az alábbi jelöléseket:

$$\begin{aligned}
S_{ql} &= \Psi_i'(x_q)\Psi_j'(y_q)\Psi_k(z_q) \\
Q_{ql} &= \left\{\Psi_j''(y_q)\Psi_i(x_q) - \Psi_j(y_q)\Psi_i''(x_q)\right\}\Psi_k(z_q) \\
D_{ql} &= \Psi_i'(x_q)\Psi_j(y_q)\Psi_k'(z_q) \\
F_{ql} &= \Psi_j'(y_q)\Psi_i(x_q)\Psi_k'(z_q)\,,
\end{aligned} \tag{3}$$

amelyekkel a (2) Eötvös-inga adatok a q-ik pontban:

$${}^{számított}W_{xy}^{(q)} = \sum_{l=1}^{M} B_l S_{ql}\,,\quad {}^{számított}W_\Delta^{(q)} = \sum_{l=1}^{M} B_l Q_{ql}\,,\quad {}^{számított}W_{zx}^{(q)} = \sum_{l=1}^{M} B_l D_{ql}\,,\quad {}^{számított}W_{zy}^{(q)} = \sum_{l=1}^{M} B_l F_{ql}\,, \tag{4}$$

ahol $M = N_x N_y N_z - 1$ a sorfejtési együtthatók száma, $S_{ql}, Q_{ql}, D_{ql}, F_{ql}$ pedig ismertek.

Az inverziós eljáráshoz szükséges első deriváltak:

$$W_z = \frac{\partial W}{\partial z} = \sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y}\sum_{k=1}^{N_z} B_l \Psi_i(x)\Psi_j(y)\Psi_k{}'(z)$$

$$W_x = \frac{\partial W}{\partial x} = \sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y}\sum_{k=1}^{N_z} B_l \Psi_i{}'(x)\Psi_j(y)\Psi_k(z) \qquad (5)$$

$$^{számított}W_y = \frac{\partial W}{\partial y} = \sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y}\sum_{k=1}^{N_z} B_l \Psi_i(x)\Psi_j{}'(y)\Psi_k(z)\,.$$

Alkalmazzuk a q-ik (x_q, y_q, z_q) mérési pontban az alábbi jelöléseket:

$$A_{ql} = \Psi_i(x_q)\Psi_j(y_q)\Psi_k{}'(z_q)\,, \quad C_{ql} = \Psi_i{}'(x_q)\Psi_j(y_q)\Psi_k(z_q)\,, \quad H_{ql} = \Psi_i(x_q)\Psi_j{}'(y_q)\Psi_k(z_q)\,. \qquad (6)$$

Ezek szintén kiszámolható és mátrixba foglalható elemek, amelyekkel a számított első derivált adatok a q-ik pontban:

$$^{számított}W_z^{(q)} = \sum_{l=1}^{M} B_l A_{ql}\,, \quad ^{számított}W_x^{(q)} = \sum_{l=1}^{M} B_l C_{ql}\,, \quad ^{számított}W_y^{(q)} = \sum_{l=1}^{M} B_l H_{ql}\,, \qquad (7)$$

ahol $M = N_x N_y N_z - 1$ a sorfejtési együtthatók száma, A_{ql}, C_{ql}, H_{ql} pedig ismertek.

A mért és a számított értékekből alkotott eltérés vektorok elemei a második derivált adatokra:

$$e_q{}^{(1)} = {}^{mért}W_{xy}^{(q)} - \sum_{l=1}^{M} B_l S_{ql}\,, \qquad e_q{}^{(2)} = {}^{mért}W_{\Delta}^{(q)} - \sum_{l=1}^{M} B_l Q_{ql}\,,$$

$$e_q{}^{(3)} = {}^{mért}W_{zx}^{(q)} - \sum_{l=1}^{M} B_l D_{ql}\,, \qquad e_q{}^{(4)} = {}^{mért}W_{zy}^{(q)} - \sum_{l=1}^{M} B_l F_{ql} \qquad (8)$$

az első derivált adatokra pedig:

$$e_q{}^{(5)} = {}^{mért}W_z^{(q)} - \sum_{l=1}^{M} B_l A_{ql}\,, \quad e_q{}^{(6)} = {}^{mért}W_x^{(q)} - \sum_{l=1}^{M} B_l C_{ql}\,, \quad e_q{}^{(7)} = {}^{mért}W_y^{(q)} - \sum_{l=1}^{M} B_l H_{ql}\,, \qquad (9)$$

ahol a ${}^{mért}W_z^{(q)}$ a nehézségi gyorsulás graviméterrel mérhető értéke, és a ${}^{mért}W_x^{(q)}$ és ${}^{mért}W_y^{(q)}$ pedig csillagászati függővonal elhajlásokból számítható értékek. (Az első deriváltak a függővonal-elhajlásból: $W_x = -g\xi + U_x$ és $W_y = -g\eta + U_y$, ahol U az ellipszoidi normáltér ismert potenciálfüggvénye, g az átlagos nehézségi gyorsulás, ξ és η pedig a függővonal-elhajlás összetevők.)

A minimalizálandó függvény legyen az eltérésvektor L_2 normája:

$$E = \sum_{s=1}^{7}\sum_{q=1}^{N_s} (e_q^{(s)})^2\,, \qquad (10)$$

ahol N_s az s-ik típusú adatok száma. Vektoros írásmódot alkalmazva vezessük be a

$$\boldsymbol{d}^{(mért)} = \left\{ W_{xy}^{(1)},...,W_{xy}^{(N_1)}, W_{\Delta}^{(1)},...,W_{\Delta}^{N_2}, W_{zx}^{(1)},...,W_{zx}^{(N_3)},...,...,W_y^{(1)},...,W_y^{(N_7)} \right\} \qquad (11)$$

jelölést. Az S_{ql} Q_{ql} D_{ql} F_{ql} valamint az A_{ql} C_{ql} H_{ql} értékeket egyetlen (az ún. Jakobi-együtthatómátrixba) foglalva:

$$G_{qj} = \begin{cases} S_{qj} & q \le N_1 \\ \vdots & \\ H_{qj} & \sum_{s=1}^{6} N_s < q \le \sum_{s=1}^{7} N_s \end{cases}\,. \qquad (12)$$

A mért és a számított értékek eltérése:

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{d}^{(mért)} - \boldsymbol{GB}\,, \tag{13}$$

és ezzel a (10) szerint:

$$E = (\boldsymbol{e},\boldsymbol{e}) = \sum_{q=1}^{N} e_q^2 \qquad \text{(ahol: } N = \sum_{s=1}^{7} N_s \text{).} \tag{14}$$

Az így definiált inverz feladat megoldását a

$$\frac{\partial E}{\partial B_l} = 0\,, \quad (l = 1,\ldots,M) \tag{15}$$

feltételrendszer alapján felállított

$$\boldsymbol{G}^T\boldsymbol{GB} = \boldsymbol{G}^T\boldsymbol{d}^{(mért)} \tag{16}$$

egyenletrendszerből kapjuk:

$$\boldsymbol{B} = \left(\boldsymbol{G}^T\boldsymbol{G}\right)^{-1}\boldsymbol{G}^T\boldsymbol{d}\,. \tag{17}$$

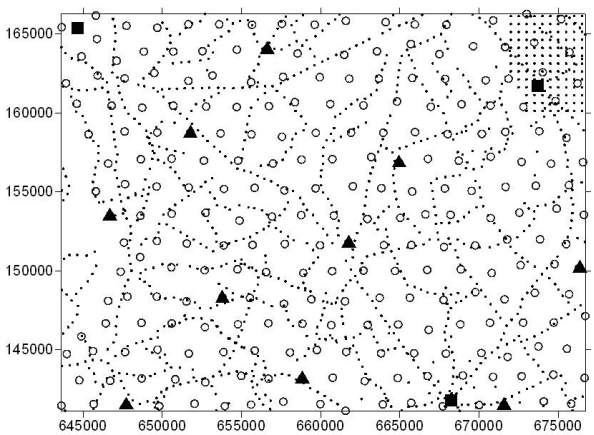
Az inverz probléma lineáris, megoldásával a sorfejtési együtthatók $\boldsymbol{B}$ vektora meghatározható. A $\boldsymbol{B}$ vektor elemeinek ismeretében a teljes Eötvös-tenzor (beleértve az Eötvös-ingával közvetlenül nem mérhető vertikális gradiens értékeket is), ezen kívül pedig a függővonal-elhajlás számításához szükséges W_x, W_y mennyiségek továbbá a nehézségi gyorsulás értékek is egzaktul számíthatók nemcsak a mérési pontokban, hanem a teljes mérési területen.

3 Kísérleti számítások

A módszer alkalmazhatóságának vizsgálatára az 1. ábrán látható Szabadszállás-Kiskőrös környéki területen végeztünk kísérleti számításokat, ahol 248 Eötvös-inga és 1197 graviméteres mérés eredményei állnak rendelkezésre.

A teszt területen három asztrogeodéziai és további tíz asztrogravimetriai pont is található, ahol ismertek a GRS80 rendszerre vonatkozó ξ, η függővonal-elhajlás értékek. Az ábrán a pontok a graviméteres mérések, a körök az inga-mérések helyszínét a fekete négyzetek az asztrogeodéziai, a háromszögek pedig az asztrogravimetriai pontokat jelölik. A kereten az EOV koordináták láthatók méterben.

A 2. és a 3. ábrán a W_Δ, a 4. és az 5. ábrán a W_{xy} görbületi gradiensek, 6. és a 7. ábrán a W_{zx}, a 8. és a 9. ábrán pedig a W_{zy} horizontális gradiensek izovonalas térképe látható. A 2. 4. 6. és a 8. ábrán a 248 Eötvös-inga mérés alapján megszerkesztett kép, a 3. 5. 7. és a 9. ábrán pedig az inverziós eljárással előállított kép látható. Az ábrákon az izovonalak lépésköze 5 E. (1E = 1Eötvös egység = 10^{-9} s^{-2}).



1. ábra. Graviméteres és Eötvös-inga mérési pontok a teszt területen

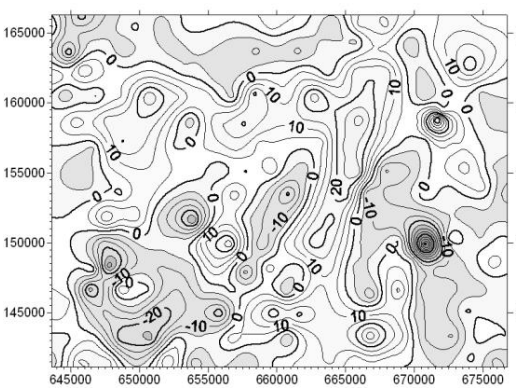
Az ábrákat úgy csoportosítottuk, hogy az Eötvös-ingával mért eredeti és az ellenőrzés céljából inverziós rekonstrukcióval előállított képek egymás mellett közvetlenül összehasonlíthatók legyenek.

A W_{Δ}, a W_{xy}, a W_{zx} és a W_{zy} gradiensek 2. 4. 6. és 8. ábrán látható meglehetősen változatos képe azt vetítette előre, hogy esetünkben a potenciáltér sorfejtéses leírása csak viszonylag magas fokszámú polinomokkal lesz lehetséges.

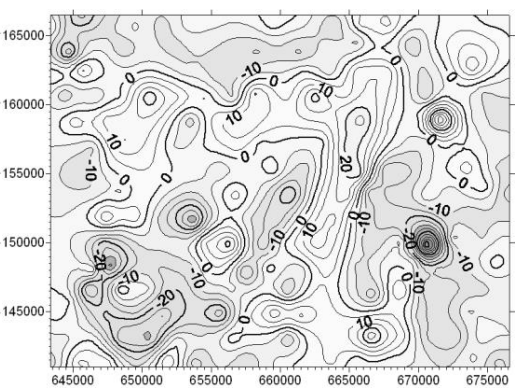
Az inverziós feladat megoldása során meghatároztuk mindazon sorfejtési együtthatókat, amelyek segítségével a teljes tesztterületre előállítható mind a nehézségi erőtér potenciálfüggvénye, mind a potenciálfüggvény valamennyi első és második deriváltja. Összehasonlítva például a 2. és 3. illetve a 4. és 5. ábrákon az Eötvös-ingával mért, valamint az együttes inverzióval előállított W_{Δ} és W_{xy} görbületi gradiensek képét, az egyezés igen jónak mondható, – de ugyanez a jó egyezés tapasztalható a W_{zx} és a W_{zy} horizontális gradiensek esetében is a 6. és 7. illetve a 8. és 9. ábrákon.

Tapasztalataink szerint a polinomok fokszámának meghatározásakor körültekintően kell eljárnunk, mert a fokszám növelésével kezdetben lassan, majd egyre gyorsabban csökken a megoldandó normálegyenletek együtthatómátrixának kondicionáltsága, a fokszám csökkentésével viszont romlik a felbontóképesség. Vizsgálataink szerint a $P = 18 - 24$ általában jó kompromisszumnak látszik a felbontóképesség és a normálegyenletek kondicionáltsága vonatkozásában, – mi most $P = 19$ fokszámú hatványpolinomot alkalmaztunk.

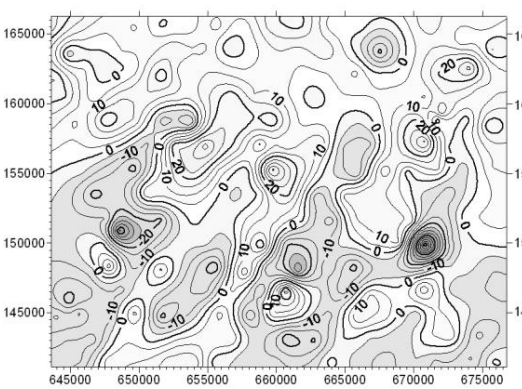
A sorfejtési együtthatók ismeretében lehetőség van a nehézségi erőtér potenciálfüggvényének valamint a potenciálfüggvény első deriváltjainak meghatározására is. A 10. ábrán egy additív állan



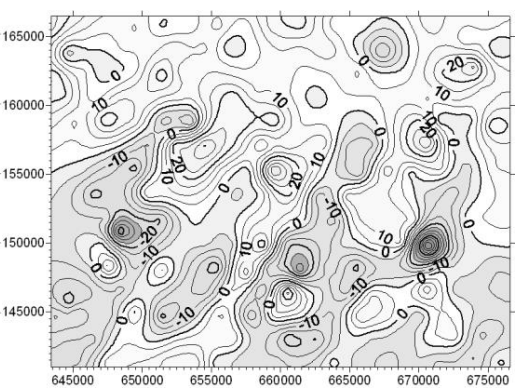
2. ábra. Eötvös-ingával mért W_{Δ} területi eloszlása



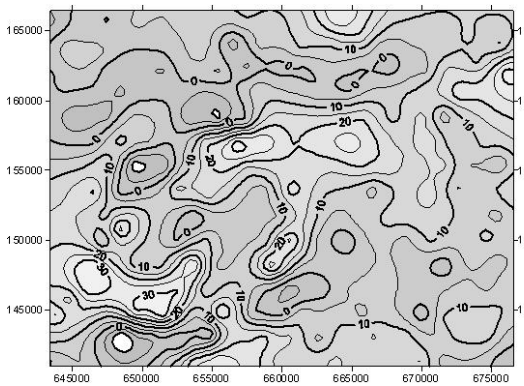
3. ábra. Az inverzióval előállított W_{Δ} területi eloszlása



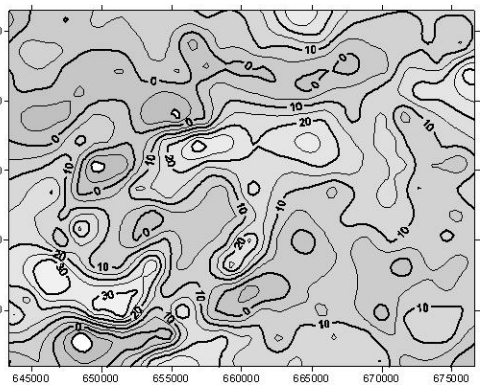
4. ábra. Eötvös-ingával mért W_{xy} területi eloszlása



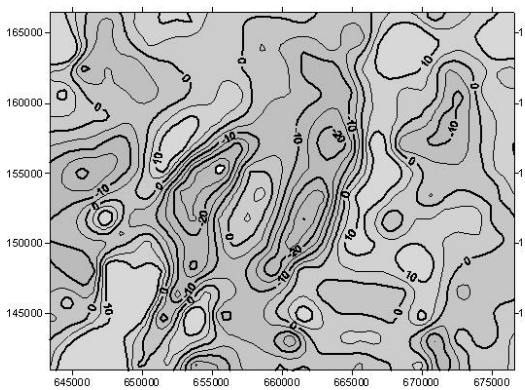
5. ábra. Az inverzióval előállított W_{xy} területi eloszlása



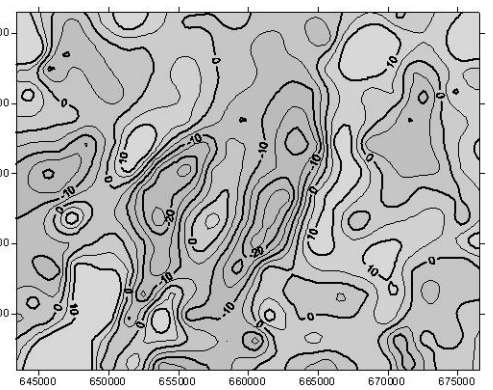
6. ábra. Eötvös-ingával mért W_{zx} területi eloszlása



7. ábra. Az inverzióval előállított W_{zx} területi eloszlása



8. ábra. Eötvös-ingával mért W_{zy} területi eloszlása



9. ábra. Az inverzióval előállított W_{zy} területi eloszlása

A geodézia számára igen fontos függővonal-elhajlások számításához a W_x és W_y mennyiségek ismerete szükséges, ugyanis a ξ és az η értékek a

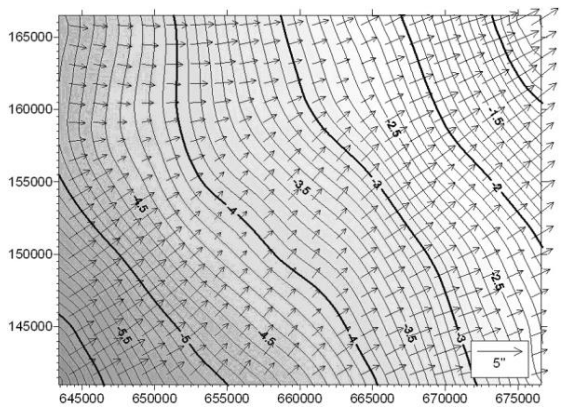
$$\xi = W_x / g \tag{17}$$

és

$$\eta = W_y / g \tag{18}$$

összefüggések alapján számíthatók. A 10. ábrán egyúttal a függővonal-elhajlások vektorait is bemutatjuk az együttes inverziós megoldásából, – ahol a vektorok hosszát a $\theta = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$ összefüggés alapján számítottuk.

Végül, amint jeleztük, az inverziós eljárással lehetőség nyílik az Eötvös-ingával közvetlenül nem mérhető W_{zz} vertikális gradiensek meghatározására is. Az így meghatározott vertikális gradiensek ellenőrzésére eddig nem volt lehetőségünk, ebből a célból néhány ellenőrző pontban vertikális gradiens méréseket tervezzük.



10. ábra. Együttes inverzióval előállított potenciáltér (az izovonalak lépésköze 0.1 m^2/s^2) és a függővonal-elhajlások vektorábrája

6 Összefoglalás

Az általunk korábban kidolgozott 2D eljárás továbbfejlesztésével megoldottuk a nehézségi erőtér 3 dimenziós potenciálfüggvényének inverziós előállítását. A bemutatott módszer a potenciálfüggvény nagyszámú Eötvös-inga és graviméteres mérés, valamint digitális terepmodell adatok és néhány függővonal-elhajlás adat együttes inverziójának felhasználásával történő meghatározására nyújt lehetőséget. Az így rekonstruált potenciálfüggvényből számos gyakorlati fontosságú „teret", (pl. vertikális gradienseket, függővonal-elhajlásokat) származtathatunk le a vizsgálati terület bármely pontjában. Az eljárás előnye, hogy mindezt egy jelentősen túlhatározott inverz probléma megoldásával tehetjük.

Köszönetnyilvánítás. Kutatásaink a K60657 és a K76231 OTKA támogatásával folynak.

Hivatkozások

Dobróka M, Völgyesi L (2005): A nehézségi erőtér potenciálfüggvényének inverziós rekonstrukciója Eötvös-inga adatok alapján. Geomatikai Közlemények VIII, 223-230.

Dobróka M, Völgyesi L (2008): Inversion reconstruction of gravity potential based on gravity gradients. Mathematical Geosciences, 40(3), 299-311.

Haalck H (1950): Die vollständige Berechnung örtlicher gravimetrischer Störefelder aus Drehwaagemessungen. Veröffentlichungen des Geodätischen Institutes Potsdam, Nr. 4, Potsdam.

Tóth Gy, Völgyesi L, Csapó G (2004): Determination of vertical gradients from torsion balance measurements. IAG International Symposium, Gravity, Geoid and Space Missions. Porto, Portugal August 30 - September 3, 2004.

Tóth Gy, Völgyesi L, Csapó G (2005): Determination of vertical gradients from torsion balance measurements. IAG Symposia Vol 129, Gravity, Geoid and Space Missions, C. Jekeli, L. Bastos, J. Fernandes (Eds.), Springer, 292-297.

Tóth Gy (2007): Vertikális gravitációs gradiens meghatározás Eötvös-inga mérések hálózatában. Geomatikai Közlemények X, 29-36.

Völgyesi L (1993) Interpolation of deflection of the vertical based on gravity gradients. Periodica Polytechnica Civ.Eng., 37(2), 137-166.

Völgyesi L (1995) Test Interpolation of deflection of the vertical in Hungary based on gravity gradients. Periodica Polytechnica Civ.Eng., 39(1), 37-75.

Völgyesi L (2001): Local geoid determinations based on gravity gradients. Acta Geodaetica et Geophysica Hung. 36(2), 153-162.

Völgyesi L, Tóth Gy, Csapó G (2004): Determination of gravity anomalies from torsion balance measurements. Gravity, Geoid and Space Missions GGSM 2004. IAG International Symposium Porto, Portugal. Jekeli C, Bastos L, Fernandes J. (Eds.) Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York; Series: IAG Symposia, 129. 292-297.

Völgyesi L, Tóth Gy, Csapó G, Szabó Z (2005): Az Eötvös-ingamérések geodéziai célú hasznosításának helyzete Magyarországon. Geodézia és Kartográfia, 57(5), 3-12.

Völgyesi L (2005) Deflections of the vertical and geoid heights from gravity gradients. Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica, 40(2), 147-159.

Völgyesi L, Tóth Gy, Csapó G (2007): Determination of gravity field from horizontal gradients of gravity. Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica, 42(1), 107-117.

AZ ANTARKTISZ TÖMEGÁTRENDEZŐDÉSEINEK VIZSGÁLATA GRACE GEOPOTENCIÁLIS MODELLEK ALAPJÁN

Földváry Lóránt[*]*, Mészáros Péter*[**]

Analysis of mass redistribution in Antarctica based on GRACE gravity models *- Records of the tide gauges detect a sea level rise between 1.0 mm/year and 2.5 mm/year. The rise is normally explained as effect of the melting icecaps, however these interpretations are not fully reliable. The present study provides an outlook of the Antarctic ice sheet, with an estimate of the ice melting based on GRACE gravity field models.*

Keywords: temporal gravity field, GRACE, gravity models, Antarctica

Napjainkban sokat beszélünk a globális felmelegedésről, annak következményeiről. A nagy tengeri kikötők vízmércéi alapján az elmúlt évszázadban 1.0 mm/év és 2.5 mm/év tengerszint emelkedés tapasztalható. Egy ésszerű magyarázat szerint a sarki jégtakaró olvadása szolgáltatja ezt a víztöbbletet, azonban, mint arra cikkünkben rámutatunk, ezt csak meglehetősen kis megbízhatósággal állíthatjuk. Tanulmányunkban az Antarktisszal foglalkozunk, és becslést teszünk a jégtakaró olvadásának mértékére a GRACE gravimetriai műhold mérései alapján.

Kulcsszavak: nehézségi erőtér időbeli változásai, GRACE, geopotenciális modell, Antarktisz

1 Bevezetés

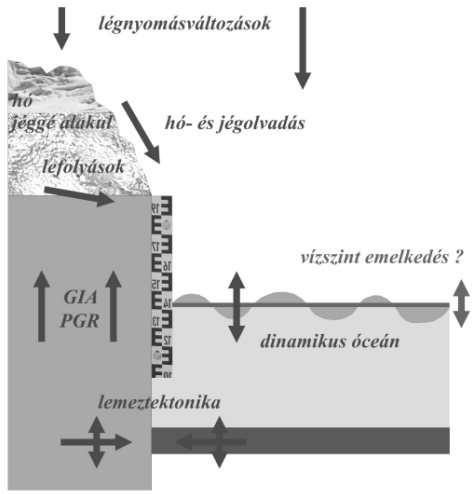
A nagy tengeri kikötők vízmércéi alapján az elmúlt évszázadban 1.0 mm/év és 2.5 mm/év tengerszint emelkedés tapasztalható (NRC 1997). A víztöbblet eredete azonban korántsem nyilvánvaló (Edwards 2006). A Föld forgása következtében a víztömegek eleve folyamatos mozgásra (áramlásra) kárhoztatottak, tehát olyan, mint statikus óceán nem létezik. Ezt a dinamikus rendszert teszi komplikáltabbá a víztározó folyamatos változása. Ez alatt a litoszféra lemezek állandó tektonikus és izosztatikus mozgását értjük. Ezek közül a vízmércés mérések megbízhatósága szempontjából különös jelentőséggel bírnak a vertikális irányú mozgások, mint a konzekvensen egyirányú elmozdulást eredményező GIA (Glacial Isostatic Adjustment, am. a jégtakaró izosztatikus kiegyenlítődése) következtében tapasztalható RSL (Relative Sea Level, am. relatív vízszint) változások. Egy vízmércén mért változás tehát nem egyértelműen a víztöbbletnek a megnyilvánulása, hanem összetett, magasságváltozást eredményező folyamatok következménye, mint azt az 1. ábrán szemléltetjük.

Mégis, ha a víztöbblet forrását keressük, ésszerűnek tűnő elképzelés azt a globális felmelegedés következtében megindult földi jégtakaró olvadásában keresni. Azonban ezt az antarktiszi és a grönlandi jégtakarón végzett vizsgálatokkal korábban nem tudták egyöntetűen alátámasztani. A GRACE-t megelőző tanulmányokból az antarktiszi jégtakaró változására még a változás előjele sem egyértelmű; összességében valamennyi tanulmány a jégtakaró változásának mértékét -14 mm/év és +14 mm/év közé teszi (NRC 1997). Tanulmányunkban az Antarktisszal foglalkozunk, és becslést teszünk a jégtakaró olvadásának mértékére a GRACE gravimetriai műhold mérései alapján.

2 Jégtörténet

A földtörténeti negyedkorban a Föld pályageometriájának változása következtében a Föld felszínére beérkező napfény mennyisége kisebb mértékben ingadozott. Ennek következtében ezt a 900.000 évet a drasztikus éghajlatváltozások jellemezték, amelyek átlagosan 100.000 éves periódusokban jelentkező jégkorszakokat eredményezett. Egy-egy ilyen periódus hosszú, 90.000 éves eljegesedést és 10.000 éves olvadást tett ki. A legutóbbi jégkorszak jellegét tekintve kissé tovább tartott: mintegy

[*]*MTA-BME Fizikai Geodézia és Geodinamika Kutatócsoport, BME, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.*
E-mail: foeldvary@sci.fgt.bme.hu
[**] *BME Építőmérnöki Kar, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.*
E-mail: mesz.peter@yahoo.com



1. ábra. Egy vízmércén észlelhető vízszintemelkedés hátterében álló nem periodikus jellegű tömegátrendeződések rendszere

21.000 évvel ezelőtt tetőzött (ez az ún. LGM, Last Glacial Maximum), aminek 6.000 évvel ezelőtt olvadt el teljesen. Ebben a 15 ezer évben a jégolvadás következtében a világóceán vízszintje mintegy 120 m-rel emelkedett. Az olvadás következtében fellépő járulékos tömegátrendeződés még napjainkban is tart, különösen a földkéreg késleltetett reakciója, az ún. PGR (Post Glacial Rebound, am. a legutóbbi eljegesedés utáni visszarendeződés) miatt. A földkéreg litoszféra lemezei az asztenoszféra folyékony lávatengerén úsznak. A litoszféra lemezek a jégolvadás következtében „hirtelen" tehermentes állapotba kerültek, aminek következtében ezek a lemezek az úszási egyensúlyi állapot elérése céljából emelkedni kezdtek. Az asztenoszféra nagy viszkozitása miatt azonban ez a folyamat meglehetősen időigényes. Ez a földkéregnek az ún. viszkoelasztikus válasza a jégolvadásra. Mértékét tekintve néhány *mm/év*, bár az egykor legnagyobb eljegesedések területein jelentős, akár *cm/éves* mértékű emelkedés is észlelhető. További részletekhez lásd Peltier (1994, 1999) vagy Sasgen et al. (2005).

3 Jégtakaró változásainak meghatározása

A jégtakaró pusztulás mértékének meghatározását nehezíti, hogy a jégtakaró változásától hatásában el nem különíthető jelenségek sora hosszú. Továbbiakban az antarktiszi tömegek időbeni változásáért felelős jelentősebb geofizikai okokat mutatjuk be (NRC 1997).

A jégtakaró eltűnésére a földkéreg felúszással válaszol, ez a GIA folyamata. A reakció gyorsaságának függvényében kétféle jelenséget különböztetünk meg. Az egyik a már ismertetett viszkoelasztikus visszarendeződés, a PGR, ami több évezred után is fokozatosan érezteti a hatását. Ennek következtében egyes területeken, különösen Skandináviában és a kanadai Hudson-öböl térségében ez akár +10-12 mm/év-es változást is okozhat (Velicogna és Wahr 2002a, 2003). Bár az Antarktisz és Grönland felszínének jelentős részét jelenleg is jég borítja, ezeken a területeken is tapasztaltak ilyen jelenséget. A PGR az Antarktisz területén néhány *mm/év*. A modellek nem adnak egyértelmű választ ennek konkrét mértékére, a különböző modellekből kapott becslések 0,7 és 2,0 mm/év közötti geoidváltozásról adnak számot (Tushingham és Peltier 1991, Velicogna és Wahr 2002b, Peltier 2004, Sasgen et al. 2005). A PGR modellek alapvetően számtalan kevésbé ismert jelenségre tett feltételezésen alapulnak úgy, mint a földköpeny viszkozitása, valamint a vizsgálati terület eljegesedésének teljes története (Peltier 1994, 1999, Velicogna és Wahr 2005). A PGR modellek bizonytalansága, továbbá az emelkedő litoszféra lemez tömeghatásának és a napjainkban zajló gyors lefolyású, elasztikus reakció hatásának szétválasztása mintegy ±5 mm/év hibát okoz a jégtakaró tömegátrendeződésének meghatározásában (Velicogna és Wahr 2002b). A szekuláris lefolyású PGR mellett

a jégtakaró fokozatos olvadását a földkéreg rugalmas, elasztikus kiegyenlítődését az olvadással szimultán tapasztaljuk. Erre a PGR-ra rárakódó, a jégtakaró jelenlegi változása következtében tapasztalható gyors és változó előjelű földkéreg ingadozásra a szakirodalom, mint „jelenlegi GIA folyamatok" hivatkozik (elsőként talán Peltier (1999), azóta pl. Sasgen et al. (2005)). Gravitációs hatását a jégtakaró tömegváltozásának hatásától nem lehet elkülöníteni, azonban a jelenlegi GIA folyamatok a geoid jóval kisebb mértékű változását eredményezi, mint a jégtakaró tömegének eltűnése (Sasgen et al. 2005). Egy-egy vízmércén a tengerszintet mérve annak ingadozását tapasztaljuk; ennek egy jelentős része nem valódi változást takar. Egy vízmérce környezetében az esetleges PGR reakció a lemez folyamatos emelkedését (a vízszint látszólagos csökkenését) mutatja, míg a hó- és jégtakaró olvadása következtében a változás kétarcú: a jelenlegi GIA folyamatok a lemez rövid idejű változásait (a vízszint látszólagos emelkedését és csökkenését) eredményezi, míg az olvadás vízét a lefolyások lassanként az óceánba/tengerbe juttatják, ami valódi vízszintemelkedést jelent (Sasgen et al. 2005). Ezt a komplex látszólagos vízszintingadozást relatív vízszint, ún. RSL modellekkel írják le (Tushingham és Peltier 1991). Azonban ezek a becslések erősen a felvett paraméterezés hatását tükrözik, úgy, mint a vizsgált terület feltételezett jégtörténete, illetve a földköpeny (meglehetősen bizonytalannak tekinthető) viszkozitás viszonyai (Peltier 1994, 1999).

Az Antarktisz nagy tömegeket átrendező hidrológiai folyamatainak (havazások, lefolyások, evapotranspiráció) gravitációs hatása, mint a Földön mindenütt, elsősorban éves periódusú tömegváltozásokat jelent. Antarktiszi sajátosság az éves ciklusból jelentős mennyiségű kieső tömeg, amit a megmaradó, és saját súlya alatt jéggé átalakuló hó okoz. A hó jéggé transzformálódott állapotában már nehezebben olvad el, amely fennmaradó tömeg nem választható szét a PGR következtében tapasztalt tömeggyarapodástól. Mértéke (többek között a PGR értékének bizonytalan ismerete miatt is) nem becsülhető (NRC 1997).

A légnyomásváltozás következtében a felúszás mértéke is változhat; így például nagy felszíni légnyomás visszanyomhatja, lassíthatja az emelkedő lemez mozgását. Az atmoszféra tömegátrendeződései a szárazföldeken a kiterjedt meteorológiai hálózatnak köszönhetően nagyon jól feltérképezettnek mondhatók. Kivételt képez az Antarktisz, ahol a földi megfigyelő állomások száma minimális. Itt csak műholdas mérésekből nyert globális adatokra támaszkodhatunk, ami csak nagyobb foltokban és nagyobb időközökben érzékeny a változásokra, így bizonyos esetekben, bizonyos változásokra bizonytalannak tekinthetők. A tanulmányban használt geopotenciális modellek az atmoszféra tömegének hatására korrigáltak (Bettadpur 2003). Az atmoszferikus korrekció azonban nem feltevésmentes, különösen óceáni területeken, ahol az atmoszféra és az óceán kölcsönhatását leíró modell választása néhány tized *mm* geoidunduláció eltérést is okozhat (Földváry és Fukuda 2001, Peters et al., 2002). Az atmoszféra nyomásának következtében az óceáni reakció az Antarktisz esetén a hatalmas jégtáblák úszási egyensúlyának megváltozását eredményezheti, ami oly mértékű vertikális tömegátrendeződést jelent, hogy hatása a kontinens partjainak geoidképét is módosíthatja.

További tömegátrendeződéseket jelent a kontinens alatti talajvizek ingadozása, valamint a mértékben jelentősebbnek feltételezett jéglemezeken belüli vízátrendeződések. Ezeket megbízhatóan modellezni sem lehet. Látható, nagymértékű tömegátrendeződést jelentenek a gleccserek, ahol a változás mértéke szintén nem határozható meg adekvátan. A jégtakaró pusztulásának becslését ezen hidrológiai tömegátrendeződések nem-ciklikus jellegű megváltozásai hibaként terhelik.

A fentiekben említett hatások szabálytalan összefolyása miatt nehéz a jégtakaró pusztulására becslést tenni. Tanulmányunkban egyes jelenségektől eltekintünk, másokra realisztikus feltételezéseket teszünk, ezzel az egyes összetevők konkrét modellezése nélkül, csak a GRACE mérések alapján becsüljük a jégtakaró pusztulását.

4 Alkalmazott matematikai modell

Felsőgeodéziai tanulmányainkból jól ismert a geopotenciál, V valamely r, φ, λ poláris koordinátákkal jellemezett helyen (Heiskanen és Moritz 1967):

$$V(r,\varphi,\lambda) = \frac{GM}{R}\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{R}{r}\right)^{n+1}\left(\overline{C}_{nm}\cos m\lambda + \overline{S}_{nm}\sin m\lambda\right)\overline{P}_{nm}(\varphi) \qquad (1)$$

Az (1) egyenletben G a gravitációs állandó, M és R a Föld tömege és átlagos sugara, n és m a gömbfüggvény sor foka és rendje, $\overline{C}_{nm}$ és $\overline{S}_{nm}$ a gömbfüggvény együtthatók, $\overline{P}_{nm}$ a Legendre-polinomok. Az egyenletet a geoidundulációval, N függvénykapcsolatba a Bruns-féle elv, $N = \frac{T}{\gamma}$ felhasználásával hozhatjuk, amelyben T a potenciálzavar, és γ a normál nehézségi gyorsulás. A γ értékét a tömegvonzás gömbszimmetrikus részével $\gamma = \frac{GM}{R^2}$ közelítve kapjuk (Kaula 1966), hogy

$$N(r,\varphi,\lambda) = R\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{R}{r}\right)^{n+1}\left(\overline{C}_{nm}\cos m\lambda + \overline{S}_{nm}\sin m\lambda\right)\overline{P}_{nm}(\varphi) \tag{2}$$

Ennek idő szerinti deriváltja

$$\dot{N}(r,\varphi,\lambda) = R\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{R}{r}\right)^{n+1}\left(\dot{\overline{C}}_{nm}\cos m\lambda + \dot{\overline{S}}_{nm}\sin m\lambda\right)\overline{P}_{nm}(\varphi) \tag{3}$$

Ezt az összefüggést több tanulmány is alkalmazza (Velicogna és Wahr 2002a, 2002b, 2003). Azonban jelen tanulmányban a gömbfüggvény együtthatókból a (2) összefüggéssel előbb geoidundulációt számítunk minden időpontra, ebből a vizsgált időintervallumot jellemző statikus geoidot levonjuk a (4) összefüggés szerint, ahol t az idő. Az így nyert „dinamikus" geoidundulláció változásértékek, ΔN időbeli változásait az (5) összefüggés szerint definiált sebességgel becsüljük.

$$\Delta N(r,\varphi,\lambda,t) = N(r,\varphi,\lambda,t) - \frac{\sum_i N(r,\varphi,\lambda,t_i)}{n} \tag{4}$$

$$\dot{N}(r,\varphi,\lambda,t) = \frac{\Delta N(r,\varphi,\lambda,t)}{t} \tag{5}$$

A geopotenciális gömbfüggvény-együtthatók ortogonális volta miatt ez elvi különbséget nem jelent. A két számítási eljárás pontossági különbségét nem vizsgáltuk, de mivel a geoidundulláció változásai nagyságrendileg nagyobbak a gömbfüggvény együtthatók változásainál, véleményünk szerint ez a módszer kevesebb kerekítési hibát eredményez.

5 Számítások

A számításainkhoz az austini egyetemen (Center for Space Research, University of Texas at Austin) GRACE mérésekből meghatározott geopotenciális modelleket használtuk fel (Bettadpur 2003). A modellek a 2002. áprilisa és 2007. novembere közötti időszakot fedik le. Ezek a legtöbb esetben egy hónapnyi GRACE mérési eredményeken alapulnak, így egy-egy hónap gravitációs viszonyainak, tömegeloszlásának jellemzésére alkalmasak. A modelleket az atmoszféra dinamikus hatásaira korrigálták (Bettadpur 2003, Chen et al. 2006). A modellek időtartamára vonatkozó paramétereit az 1. táblázat összegzi. A geopotenciális modell számításához felhasznált időszak első és utolsó napját adott év január 1-től folytonosan számítva adtuk meg, továbbá azt is megadtuk, hogy adott időintervallumban hány napnyi használható GRACE mérést tudtak a modell számításához igénybe venni. A geopotenciális modellek gömbfüggvény együtthatók sorát tartalmazza 60 fokig és rendig. Az együtthatókból a (2) egyenlet felhasználásával geoidundulációt számítottunk. A számításokat az Antarktiszi kontinens területére, 100 km-es felbontású négyzetrács pontjaira végeztük. A 2. ábrán egy ilyen geoidundulláció képet mutatunk. A kép az első időszakhoz (2002.102-2002.120) tartozik, megjegyezzük azonban, hogy szemmel látható mértékben ettől egyik megoldás sem tér el.

A különböző időszakokban észlelt geoidok egymástól mindössze néhány mm-es eltérést mutatnak. A 3. ábrán az 1. időszakban észlelt geoid időben változó részét, tehát a (4) egyenlet szerint a statikus geoid levonásával kapott részét mutatjuk. Értelemszerűen egy-egy időpontban a dinamikus geoidkép egymástól teljesen eltérő jelleget mutat.

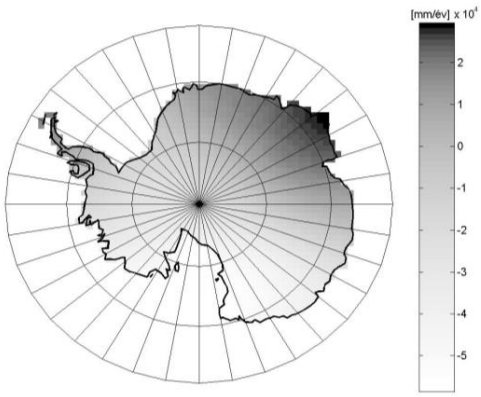
Minden időpontban a geoidundulációt meghatározva a geoidunduláció értékének egyes pontokban észlelt idősorát kapjuk. Egy ilyen idősort mutat a 4. ábra, az érdekesség kedvéért ez éppen a déli sark pontja (megjegyzendő, hogy ebben a pontban az idősor teljesen általános képet mutat). Egy ilyen idősorban különböző szabályos változásokat is láthatunk úgy, mint éves- és féléves periodikus változások, lineáris trend. Számunkra a lineáris trend meghatározása a feladat. Ezt az alábbi összefüggés alapján határoztuk meg:

$$N(t) = A_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \phi_2) + A_3 t \qquad (6)$$

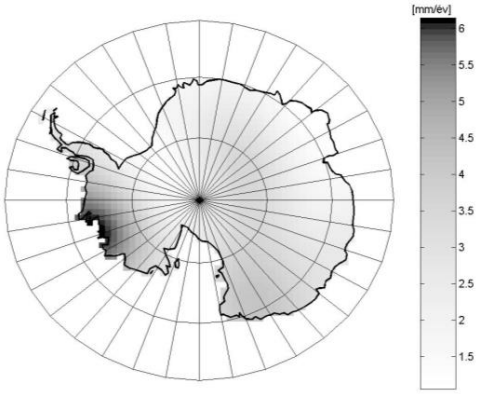
A (6) egyenletben ω_1 és ω_2 az éves, illetve a féléves periódusoknak felel meg. A legkisebb négyzetek módszerével minden egyes pontban meghatároztuk az éves, féléves periódusú, és a lineáris változások nagyságát (A_1, A_2 és A_3) és (a periodikus változások esetén) a fázisát (Φ_1 és Φ_2). Az így meghatározott lineáris trendet, $A_3 \cdot t$, a példaként kiemelt pontban, a 4. ábrán vastag, szaggatott vonallal megjelenítettük.

1. táblázat. A használt GRACE geopotenciális modellek jellemzői

sorszám (1-33)	év	első nap	utolsó nap	használt napok száma	sorszám (34-65)	év	első nap	utolsó nap	használt napok száma
1	2002	102	120	18	34	2005	91	120	30
2	2002	121	139	19	35	2005	121	151	31
3	2002	213	243	29	36	2005	152	181	30
4	2002	244	273	20	37	2005	182	212	31
5	2002	274	304	27	38	2005	213	243	31
6	2002	305	334	27	39	2005	244	273	30
7	2002	335	365	30	40	2005	274	304	31
8	2003	1	31	28	41	2005	305	334	30
9	2003	32	59	26	42	2005	335	365	26
10	2003	60	90	30	43	2006	1	31	31
11	2003	91	120	30	44	2006	32	59	28
12	2003	121	141	21	45	2006	60	90	29
13	2003	182	212	31	46	2006	91	120	30
14	2003	213	243	31	47	2006	121	151	31
15	2003	244	273	29	48	2006	152	181	29
16	2003	274	304	31	49	2006	182	212	31
17	2003	305	334	29	50	2006	213	243	31
18	2003	335	365	31	51	2006	244	273	30
19	2004	1	13	13	52	2006	274	304	31
20	2004	35	60	26	53	2006	305	334	30
21	2004	61	91	31	54	2006	335	365	28
22	2004	92	121	30	55	2007	1	31	26
23	2004	122	152	28	56	2007	32	59	28
24	2004	153	182	30	57	2007	60	90	31
25	2004	183	213	31	58	2007	91	120	30
26	2004	214	244	31	59	2007	121	151	31
27	2004	245	274	30	60	2007	152	181	26
28	2004	275	305	31	61	2007	182	212	28
29	2004	306	335	30	62	2007	213	243	22
30	2004	336	366	28	63	2007	244	273	30
31	2005	1	31	31	64	2007	274	304	31
32	2005	32	59	28	65	2007	305	334	26
33	2005	60	90	28					



2. ábra. Az Antarktiszi geoid képe GRACE mérési eredmények alapján



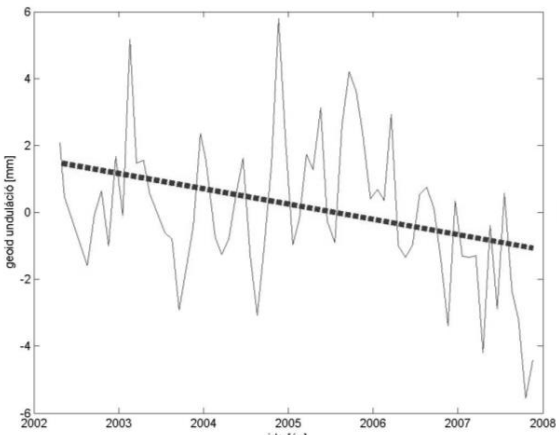
3. ábra. Az Antarktiszi geoid időben változó képe 2002. április 12. és 30. között GRACE mérési eredmények alapján

Az A_3 lineáris trend az (5) egyenlet definíciójának megfelelően a geoidunduláció változásának sebességét fejezi ki. Az A_3 lineáris együtthatók térképét, tehát az éves lineáris geoidváltozás területi eloszlását mutatjuk az 5. ábrán. Ez a lineáris együttható önmagában nem túl informatív, mert számtalan (a bevezetőben említett) tényező együttes hatását mutatja. Induljunk ki abból a feltételezésből, hogy a legjelentősebb tényező, a PGR hatása néhány év alatt konstans, amit a 9000 éve megkezdődött visszarendeződés esetén joggal meg is tehetünk (Chen et al. 2006). Ebben az esetben érdekes lehet megvizsgálni adott 6 éves időszakban a trend *változásának* mértékét. Ezt egy ún. „moving window"-val végzett trend meghatározás segítségével végeztük el (szemléltető céllal lásd 6. ábra). A módszer lényege, hogy a teljes idősor első elemeinek összefüggő részhalmazát vesszük, amelyet elég nagynak választunk ahhoz, hogy a trend meghatározást megbízhatóan elvégezzük vele. A trendet meghatározva az idősoron egy elemet csúsztatva újabb trendet határozunk meg. A trend meghatározást egy-egy elemmel csúsztatva az egész időtartamra elvégezzük a vizsgálatot. Így a trend értékek idősorát kapjuk, amely a trend időbeli változásának a becslését adja.

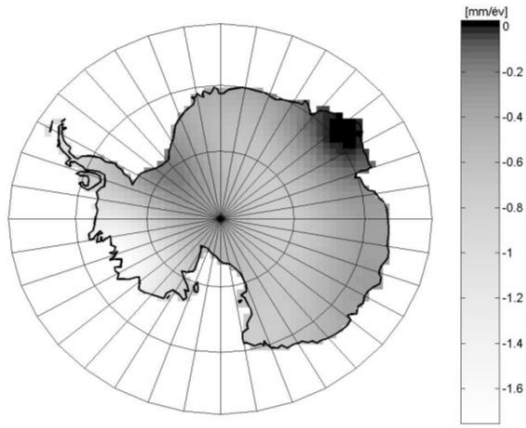
Az időben változó trendbecsléshez minimum 2 éves idősort tartottunk szükségesnek, mivel 1 éven belül elsősorban az éves periódusú változások véletlenszerű kitérései dominálnak, így pl. egy kemény vagy enyhe tél is képes teljesen felborítani a trendbecslést. A 100 km-es raszter-háló valamennyi pontjában elvégeztük a trend becslését, majd az egész területre egy átlag trend értéket számoltunk. Egy-egy ilyen átlagos trendértéket már egy időponthoz tudtunk rendelni. A trendbecsléshez rendelt időpontot a becslés során használt időintervallum közepére vettük fel. Ezzel tehát nem egy igazán adekvát időponthoz rendeltük a trendet, hiszen különböző ablak méretek mellett más és más időszakokat takar egy-egy jelölt időpont, de az összehasonlíthatóság szempontjából szükségesnek találtuk ehhez az eljáráshoz folyamodni.

A trendbecsléshez tapasztalataink szerint a 2 éves ablak még nem elég hosszú, hiszen jelentős ingadozásokat látunk a trend jellegét illetően, mint arról a 7. ábra tanúskodik. A vizsgálatot így 3, 4 és 5 éves ablakokkal is elvégeztük, amiket ugyancsak a 7. ábrán feltüntettünk. A trendbecsléseket összevetve egyértelműen elmondhatjuk, hogy a trend 2004 utolsó harmadától egyértelműen csökken.

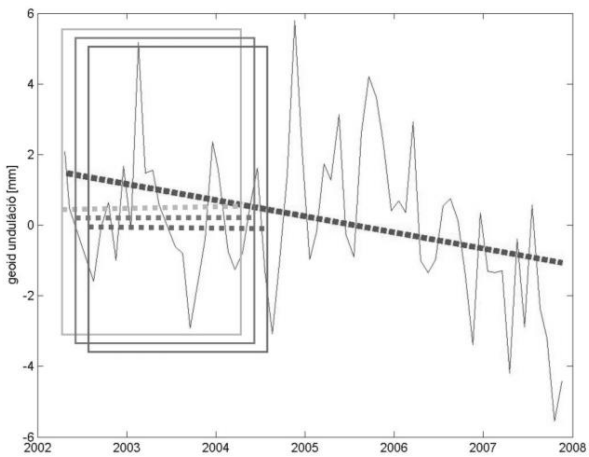
A mértéke kérdéses, mivel a nagyobb időablakok használata simító hatást eredményez. Az ábráról érzékelhetjük továbbá a nagyobb ablakok használata során tapasztalható ellaposodást, ami ugyan az átlagolás simítóhatása miatt természetes jelenség, de a trend számszerű becslését ellehetetleníti. Mint látható, a trend becslésére használt időtartam önmagában nem ad egyértelmű választ a trend előjelére sem, ami összecseng a szakirodalomban tapasztalt összevisszasággal. Azonban adott periódusban, különösen 2004 utolsó harmadától számítva a trend határozott csökkenését tapasztaljuk. Ennek magyarázata elég sok feltételezés mellett adható csak meg. Mivel adekvát trendbecslés a 7. ábrán látható változó trend értékek alapján nem adható (-2,74 mm/év és 2,12 mm/év közötti értékeket látni), egy-egy ablakméret mellett a becsült értékek átlagát számolni ugyanannyira rossz



4. ábra. A geoidunduláció változása a déli sarkponton. A vastag, szaggatott vonal adott pontban a geoidunduláció lineáris trendjét mutatja



5. ábra. A geoidunduláció éves változásának trendje



6. ábra. A 2. ábrán bemutatott idősor (folytonos, vékony vonal) és trend (szaggatott, vastag vonal) 2 éves ablakokkal végzett becslése. A 2 éves ablakot egy-egy időponttal elcsúsztatva kis mértékben eltérő trendbecslést kapunk (ablakolt szaggatott vonalak), amelyek összességében nagyon eltérhetnek a teljes időintervallumra becsült trendtől. A trend így kapott idősora a trend időbeli változásának vizsgálatára alkalmas.

becslés, mint bármilyen más módon próbálkozni. Így a 2, 3, 4 és 5 éves ablakmérettel meghatározott trend értékek és azok szórásai -0,57 ± 1,42 mm/év, -0,15 ± 0,75 mm/év, -0,15 ± 0,29 mm/év és -0,40 ± 0,09 mm/év mértékűre adódtak.

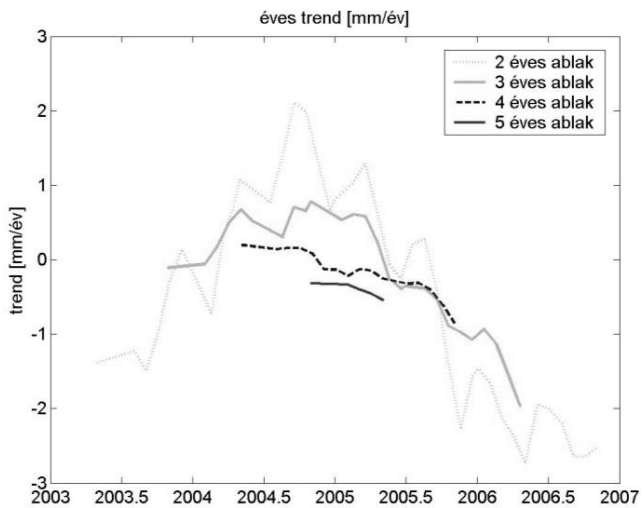
A továbbiakban a 7. ábrán felvázolt, különböző paraméterezéssel becsült trendértékek időbeli lineáris változását, tehát a hó- és jégtakaró pusztulásának időben felgyorsuló jellegét kívánjuk megbecsülni. Ehhez a vizsgált terület valamennyi pontjában a 7. ábrán látható görbének megfelelő trendbecslésekhez egy-egy lineáris trendet illesztünk. Az eredményeket kétféleképpen jelenítjük meg. A 8. ábrán minden egyes pontban a négy ablakkal becsült trendváltozás értékének számtani közepét mutatjuk, ami a trend változásának területi eloszlását szemlélteti. Más megközelítésben az egyes pontokban számolt trendváltozás értékek területi átlagát (területtel súlyozott átlagát) képeztük, és a trendeket a becslés során alkalmazott ablakméret függvényében jelenítettük meg (9. ábra). Az egyes trendek lineáris időbeli változását 2, 3, 4 és 5 éves ablakolás mellett -0,65 mm/év^2, -0,73 mm/év^2, -0,57 mm/év^2 és -0,33 mm/év^2 mértékűnek találtuk. A 7. ábrán mutatott ablakméret szerint átlagolt trendváltozásoknak is kiszámítottuk a területi átlagát, amit a 9. ábrán a vastag, szaggatott

vonallal jelenítettünk meg. Az átlagos trendváltozást -0,57 mm/év^2-nek találtuk, ami a negatív trend időbeni fokozódásának, tehát a hó- és jégtakaró pusztulásának határozott felgyorsulását jelenti.

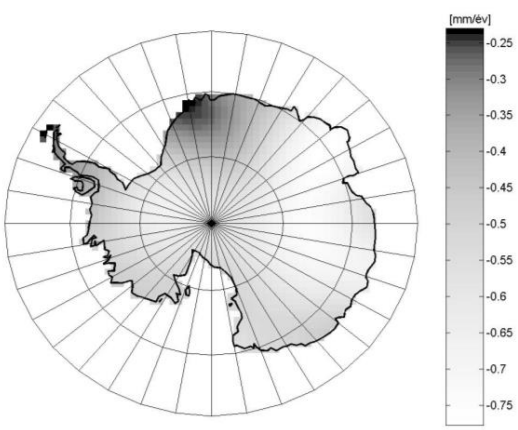
6 Eredmények értelmezése

Amennyiben feltételezzük, hogy az alkalmazott eljárással nyert becslések a PGR hatásától mentesek, továbbá hogy a geopotenciális modellek az atmoszférára megfelelően korrigáltak, valamint a hó jéggé transzformálódásának és a jelenlegi GIA folyamatok hatásától a biztonság javára eltekinthetünk, akkor elmondhatjuk, hogy az itt tapasztalt trend változások a jégtakaró pusztulásának a következtében tudhatók be. Érzésünk szerint a fenti feltételezések közül egyik sem teljesen alaptalan. A PGR pár éves időtartamon belüli állandóságát más tanulmányok is elfogadható feltételezésnek találták (Chen et al. 2006). Tény, hogy a GRACE modelleket az atmoszféra tömeghatására korrigálták (Bettadpur 2003), még ha a korrekciónak a pontosságát vitatja is a szakirodalom (Chen et al. 2006).

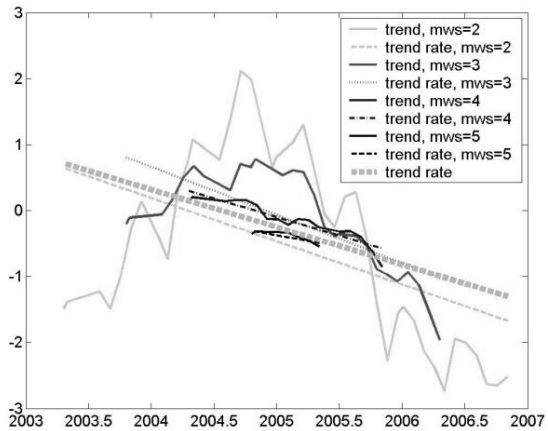
A hó jéggé transzformálódásával az olvadási folyamat ütemét lassítja, bekövetkeztét késlelteti, ezért ennek elhanyagolása mellett kimutatott jégpusztulás egy időben korábban megindult felmelegedés következményének tekinthető. A földköpeny jelenlegi rugalmas reakcióival, a jelenlegi GIA folyamatokkal kapcsolatban kimutatták, hogy hatása a jégtakaró tömegátrendeződéséhez képest „relatíve kicsi" (Sasgen et al. 2005). A felszín alatti, valamint a jégtáblákon belüli, nem-periodikus tömegátrendeződések hatásától információ hiányában el kellett tekintünk.



7. ábra. Az időben változó trend



8. ábra. A trend időbeni változása, amit a különböző ablakolásokkal kapott értékek számtani közepeként származtattunk



9. ábra. A trend időbeni változása, a területenként meghatározott trendváltozások területi súlyozott átlagaként számolva

Eddig a geofizikai jelenségek kapcsán felmerülő hibahatásokról szóltunk. Fontos megemlíteni a GRACE geopotenciális modellekkel kapcsolatos pontatlanságokat is. A GRACE műholdak valamely időpontban végzett mérése nagyobb területek tömegeinek összesített gravimetriai hatását tükrözi, és pár száz km-es környezeten belül ezen hatások teljesen összemosódnak (ún. térbeli jelhamisítás, az angol nyelvű szakirodalomban „spatial aliasing").

Egy-egy terület gravimetriai feltérképezéséhez több mérésre is szükség van, a több méréshez a műholdaknak többször is át kell haladniuk egy-egy terület felett, ami időt vesz igénybe. Ezen időszak alatt a geofizikai jelenségek tömegátrendeződéseket produkálnak, amely időbeni változások a mérési eredményekben összemosódnak (ún. időbeni jelhamisítás, az angol nyelvű szakirodalomban "temporal aliasing"). Ezen két módosító hatás figyelembe vételével alakították ki a geopotenciális modell készítői a felbontás paramétereit: a hónapos időbeni felbontást, valamint a 600-700 km-es vízszintes felbontást (amelyet a modell maximális foka és rendje határoz meg). Grönlandra végzett vizsgálatok azonban azt mutatják, hogy a nyers GRACE mérésekben ennél több rejlik. Közepes szélességi köröknél időben 10 napos, térben 400 km-es felbontás nyerhető potenciálisan a GRACE mérésekből, amely értékek nagyobb szélességi körök esetén még jobbak (Luthcke et al. 2006). Összességében tehát az antarktiszi tömegátrendeződések meghatározásának pontossága a GRACE mérések valamilyen más elven végzett feldolgozásával feltételezhetően javítható.

Megemlítenénk még a jelen tanulmányban használt mennyiség, a geoidunduláció alkalmasságának kérdését tömegátrendeződés vizsgálatára. A geofizikai gyakorlatban a nehézségi anomália az, amellyel a tömegek területi eloszlását leírják. Azonban vizsgálataink során egy kontinensnyi terület globális tömegváltozásainak jellemzésére vállalkoztunk, ezért a helyi formák érvényesülése helyett a területileg jóval simítottabb geoidunduláció alkalmas választásnak bizonyult.

7 Összegzés

Tanulmányunkban az Antarktisz területén határozottan a hó- és jégtakaró pusztulást diagnosztizáltuk (átlagosan -0,15 mm/év és -0,57 mm/év közötti trendbecsléseket kaptunk), megjegyzendő azonban, hogy ennek számszerű értéke meglehetősen bizonytalan. Tanulmányunkban a lineáris trend becslésének pontatlanságát éppen a kapott trendbecslések változatos értékeivel támasztottuk alá (-2,74 mm/év és +2,12 mm/év közötti értékeket kaptunk).

A továbbiakban megvizsgáltuk adott időszakban a hó- és jégtakaró pusztulásának ütemét. Úgy tapasztaltuk, hogy ennek üteme egyértelműen felgyorsult, az olvadás sebessége átlagosan -0,57 mm/év^2 mértékben növekszik. Megjegyzendő azonban, hogy a két éves időszakra kimutatott jégtakaró pusztulás (u.i. 2004 közepe és 2006 közepe között) nem elégséges bizonyítéka a globális felmelegedésnek, a jég drasztikus pusztulásának egyértelmű kimutathatásához. Lehet ez egy hosszabb

szekuláris változás csökkenő szakasza, amit az idősor elején tapasztalt emelkedés is sugall. Azonban korábbi időszakokra végzett tanulmányok időben közel állandó mértékű jégolvadás becsléseinek ismeretében a 2 év alatt tapasztalt néhány tized mm/éves trendcsökkenés valószínűsíthetően egy komolyabb jégpusztulási folyamat jele.

Köszönetnyilvánítás. Az itt bemutatott munka a Bolyai-ösztöndíj és a Bolyai-Kelly ösztöndíj támogatásával készült.

Hivatkozások

Bettadpur S (2003): Level-2 Gravity Field Product User Handbook. GRACE Project material.

Chen J, Wilson C, Tapley B (2006): Satellite gravity measurements confirm accelerated melting of Greenland Ice Sheet. Science, 313, 1958.

Edwards RJ (2006): Sea levels: change and variability during warm intervals. Progress in Physical Geography 30 (6), 785-796.

Földváry L, Fukuda Y (2001): IB and NIB hypotheses and their possible differentiation by GRACE. Geophysical Research Letters, 28; 4, 663-666.

Heiskanen WA, Moritz H (1967): Physical Geodesy. W. H. Freeman and Co., San Francisco, pp. 366.

Kaula WM (1966): Theory of Satellite Geodesy. Blaisdell Publishing Co., Waltham, Massachusetts, Toronto and London, pp. 130.

Luthcke SB, Zwally HJ, Abdalati W, Rowlands DD, Ray RD, Nerem RS, Lemoine FG, McCarthy JJ, Chinn DS (2006): Recent Greenland ice mass loss by drainage system from satellite gravity observations. Science, 314, 1286-1289.

NRC [National Research Council] (1997): Satellite gravity and the geosphere: contributions to the study of the solid Earth and its fluid envelope, 112 pp., National Academy Press, Washington, D. C.

Peltier WR (1994): Ice Age Paleotopography. Science, 265, 195-201.

Peltier WR (1999): Global Sea Level Rise and Glacial Isostatic Adjustment. Global and Planetary Change, 20, 93-123.

Peltier WR (2004): Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE. Invited Paper, Annual Review of Earth and Planetary Science, 32, 111-149.

Peters T, Müller J, Sneeuw N (2002): Temporal variations in the Earth's gravity field with emphasis on atmospheric effects. Vorträge beim 4. Rundgespräch Rotation der Erde in Höllenstein am 8./9.3.2001. DGK Reihe A, Vol. 118.

Sasgen I, Wolf D, Martinec Z, Klemann V, Hagedoorn J (2005): Geodetic signatures of glacial changes in Antarctica: rates of geoid-height change and radial displacement due to present and past ice-mass variations. Scientific Technical Report, STR05/01, GFZ, Potsdamm ISSN 1610-0956.

Tushingham AM, Peltier WR (1991): ICE-3G: A New Global Model of Late Pleistocene Deglaciation Based Upon Geophysical Predictions of Post-Glacial Relative Sea Level Change. J. Geophys. Res., 96, 4497-4523.

Velicogna I, Wahr J (2002a): Post Glacial rebound and Earth's Viscosity Structure From GRACE. J. Geophys. Res. Vol. 107, 10.1029/2001JB001735.

Velicogna I, Wahr J (2002b): A method for separating Antarctic postglacial rebound and ice mass balance using future ICESat Geoscience Laser Altimeter System, Gravity Recovery and Climate Experiment, and GPS satellite data. J. Geophys. Res. Vol. 107, 10.1029/2001JB000708.

Velicogna I, Wahr J (2003): Geodesy and the problem of the ice sheet. Proceedings, V Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy.

Velicogna I, Wahr J (2005): Greenland mass balance from GRACE. Geophysical Research Letters, 32; 18, L18505, 10.1029/2005GL023955.

A GEOID IDŐBELI VÁLTOZÁSA

Völgyesi Lajos[*,**]

Time variation of the geoid *- In the first part of this study the development and problems related to the concept of the geoid are discussed. The wide-spread use of the GPS in the geodetic praxis demands the knowledge of precise and reliable geoid heights. Nowadays the determination of the precise, cm-accuracy geoid is one of the biggest challenges of the Earth's sciences. At the present state of the geoid determination the basic concepts of the geoid definition and the driving factors leading to the time variation of the geoid must be discussed.*

Keywords: geoid, mean see level, height determination, critical points of the geoid concept

A tanulmány első részében a geoid fogalmának kialakulásával és a geoidfogalom problémáival foglalkozunk. A korszerű GPS technika elterjedésével fokozott igény jelentkezik a pontos és megbízható geoidunduláció értékek ismeretére. A megfelelő cm-es pontosságú geoidkép meghatározása napjainkban a földtudományok egyik legnagyobb kihívása. A geoidmeghatározás jelenlegi pontossága mellett pontosan tisztáznunk kell az alapfogalmakat, és vizsgálnunk kell azokat az okokat is, amelyek a geoid alakjának időbeli változását eredményezik.

Kulcsszavak: geoid, középtengerszint, magasságmeghatározás, geoidfogalom problémái

1 Bevezetés

Mivel a Föld alakja nem azonosítható szabályos geometriai felülettel és zárt matematikai képlettel sem írható le, felmerül a kérdés: mit kell értenünk valójában a Föld alakján? A Föld alakjának meghatározásához vezető úton az első mérföldkő Gauss nevéhez fűződik, aki 1828-ban elsőként definiálta Föld "matematikai alakját", mint a földi nehézségi erőtér egy bizonyos potenciál-szintfelületét (Gauss 1828). Közel két évtizeddel később 1849-ben Stokes levezette a róla elnevezett híres integrálformulát, amellyel lehetővé tette nehézségi gyorsulás értékekből a nehézségi erőtér potenciálfelületeinek – így a geoidnak – a meghatározását (Stokes 1849). Ezt követően 1873-ban Listing úgy definiálta a geoid fogalmát, mint a Föld nehézségi erőterének azt az idealizált potenciál szintfelületét, amely potenciálértéke megegyezik a középtengerszint magasságában lévő potenciálértékkel (Listing 1873). A következő fontos mérföldkő Helmert nevéhez fűződik, aki 1880-ban elkészítette a fizikai geodéziáról szóló értekezését, amely magában foglalta a geoidalak meghatározásának problémakörét (Helmert 1880). A geoid klasszikus definíciója azonban már nem alkalmazható a modern geodéziai környezetben. A szatellita altimetriában például rendszeresen használjuk és elfogadjuk a középtengerszint fogalmát, noha a műholdas mérések a poláris területekről nem adnak részletes információt, tehát nem globálisak. A geoidnak a "globális" középtengerszinttel történő azonosítása ma már több okból sem engedhető meg. A tengerfelszín nem árapály jellegű periódusos és nem periódusos változásai (pl. a globális tengerszint növekedés) következménye a földi nehézségi erőtér, és így a geoid időbeli változása. Ugyanakkor napjaink rohamosan fejlődő technikája és a tudásunk gyarapodása megköveteli a Föld elméleti alakjának minél pontosabb ismeretét. Ezen a szinten elkerülhetetlenné válik a geoid fogalmának felülvizsgálata, illetve pontosítása, valamint időbeli változásának vizsgálata.

2 A geoid fogalmának problémái

A geoid fogalmának pontosítása során két szorosan egymáshoz kapcsolódó kulcskérdésre kell választ adnunk: egyrészt hogyan definiáljuk és valósítjuk meg a magasság fogalmát, továbbá hogyan definiáljuk a referenciamagasság szintjét, illetve valójában mi is a geoid?

[*]*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék*
[**]*MTA-BME Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport*
H-1111 Budapest, Műegyetem rkp.3.
E-mail: volgyesi@eik.bme.hu

A pontos és korrekt magasságfogalommal szemben három fontos követelmény támasztható:

1) legyen a magasság egyértelmű és feltevésmentes,
2) az azonos magasságú helyek ugyanazon potenciálértékű szintfelületen legyenek,
3) a magasságfogalom metrikus legyen.

A harmadik feltétel kényelmi szempontokat szolgál, kevésbé fontos, szükség esetén a legkönnyebben feláldozható. A jelenleg használt magasságfogalmak egyike sem elégíti ki egyszerre a felsorolt három feltételt.

A magasságfogalom vizsgálatához határozzuk meg a nehézségi erő $\boldsymbol{g} = -\mathrm{grad}W = \nabla W$ vektorát az 1. ábrán látható P és Q pont között. A $\boldsymbol{g}$ nehézségi erő ellenében végzett munka $\boldsymbol{d}\ell$ irányú elmozdulás esetén:

$$K_{PQ} = \int_Q^P \boldsymbol{g}\,\boldsymbol{d}\ell = -\int_Q^P \nabla W\,\boldsymbol{d}\ell = W_Q - W_P\,. \tag{1}$$

Mivel tetszőleges $\boldsymbol{F}$ (pl. $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{g}$) erőre

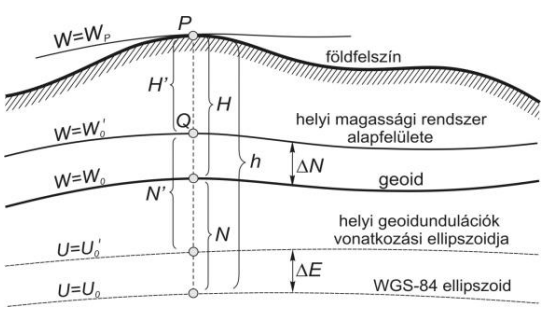
$$\oint \boldsymbol{F}\,\boldsymbol{d}\ell = 0\,,$$

ezért a (1) független az úttól, tehát a K_{PQ} egyértelmű magasságfogalom.

Amennyiben a Q pontot referenciapontnak választjuk, és a $W_Q = W_0'$ potencálértéket rendeljük hozzá, akkor a $K_P = W_0' - W_P$ geopotenciális érték a valódi magassággal kapcsolatosan felsorolt két legfontosabb feltételt kielégíti, viszont nem metrikus magasság, mivel a 3. feltételt nem teljesíti. (A K_P geopotenciális értékből származtatható ortométeres-, dinamikai-, vagy normálmagasság már metrikus, viszont ezeknél az első két feltétel sérül.)

Ha valamely ország kiválasztott magassági alappontjában a W_0' konstanshoz megfelelő számértéket rendelünk, a nehézségi erőtér végtelenül sok potenciál szintfelülete közül kiválaszthatjuk azt a felületet, amelyet az adott ország nulla magasságú referencia felületének tekintünk. Ha viszont az így kiválasztott W_0' értékű szintfelületet megpróbáljuk globális méretekben kiterjeszteni referencia szintfelületként, akkor távolabbi területeken még abban az esetben is problémák adódnának, ha a $W(x,y,z)$ potenciálfüggvényt megfelelő pontossággal ismernénk. Ha nem megfelelő számértéket rendelünk a W_0' mellé, és ezt globálisan kiterjesztjük, akkor megsérthetjük a $W(r \to \infty) = 0$ alapfeltételt is (definíció szerint ugyanis a gravitációs potenciált a végtelenben zérusnak tekintjük). Jelenleg a különböző magassági vonatkozási rendszerekkel elvileg ugyanaz a probléma, mint fél évszázaddal korábban a különböző referencia ellipszoidokkal volt.

Felmerül a kérdés, hogy mi az a W_0 potencálérték, amely globálisan alkalmazható, vagy másképpen fogalmazva: hol is van valójában a geoid felszíne? A 19. században a globális magassági dátum létrehozásakor feltételezték, hogy a középtengerszint felhasználásával össze-kapcsolhatók olyan távolabbi területek, amelyek szintezéssel közvetlenül nem köthetők össze. A középtengerszinttel azonosították a geoidot, és több mint egy évszázadon keresztül a „*középtengerszint*”, a „*geoid*” és a „*magassági dátum*” fogalmak szinonimák voltak. Napjainkban ezeket a fogalmakat élesen meg kell különböztetnünk – ellenkező esetben jelentős zavarok és problémák adódnak.



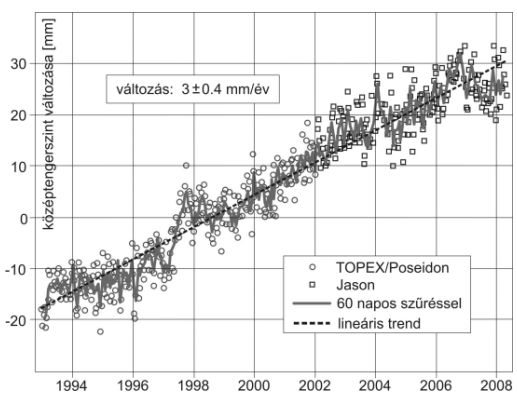
1. ábra. A magasság értelmezése

A hidrosztatikus egyensúlyi állapotban lévő szabad folyadékfelszín a nehézségi erő potenciáljának szintfelülete. Sajnos a tengerek esetében a nehézségi erőn kívül a szél és a légnyomásváltozás is hat ezek tömegére, ráadásul a földrajzi hely függvényében jelentősen változik a víz hőmérséklete és a sótartalma is, így az óceánok és a tengerek felszíne nem szabad folyadékfelszín, következésképpen nem is lehet potenciálfelület. Ezek a hatások közel két méter nagyságrendű és néhány ezer km hullámhosszúságú topográfiát rajzolnak a tengerek szabadnak képzelt felszínére (Heck 1989). A geoid értelmezése szempontjából erősen zavaró a tengerszintnek a klímaváltozás miatti jelentős globális emelkedése. Az 1992-ben felbocsátott TOPEX-Poseidon majd 2001-től a Jason-1 és 2008-tól a Jason-2 műholdak radar altiméteres mérései alapján néhány cm-es pontossággal meghatározható a tengerfelszín topográfiája. Ezen mérések szerint jelenleg a tengerszint évente közel 3 mm-es globális emelkedése tapasztalható. Ezt láthatjuk a 2. ábrán (a felhasznált adatokban az évszakos hatás nem szerepel).

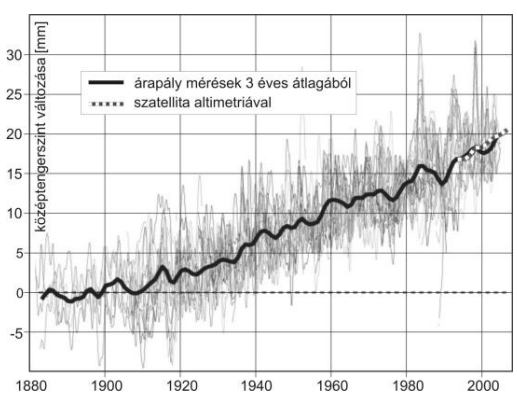
A műholdas mérésekkel jó összhangban álló eredményeket szolgáltatnak a közel 130 éves időtartamra kiterjedő árapály megfigyelések. A 3. ábrán 1880-tól napjainkig a teljes Földet többékevésbé jól lefedő, összesen 23 geológiailag stabil (nem lemezhatárokon lévő, tektonikailag nyugodt, izosztatikus egyensúlyi állapotú) helyen működő árapály regisztráló készülék regisztrátumai alapján megszerkesztett görbe látható. A Douglas (1997) által kiválasztott mérőhelyek (Auckland 1903-2000, Balboa 1908-1996, Brest 1807-2000, Buenos Aires 1905-1987, Cascais 1882-1993, Cristobal 1909-1980, Dunedin 1900-1998, Fernandina 1897-2003, Genova 1884-1997, Honolulu 1905-2003, Key West 1913-2003, Lagos 1908-1999, La Jolla 1924-2003, Lyttelton 1924-2000, Marseille 1885-2000, Cornwall, 1915-2003, Pensacola 1923-2003, Quequen 1918-1982, San Diego 1906-2003, San Francisco 1854-2003, Santa Cruz de Tenerife 1927-1990, Santa Monica 1933-2003, Trieste 1905-2001) mindegyike legalább 60 éves adatsorral rendelkezik. A mérések alapján az 1900-as képzeletbeli 0 szinthez képest 2000-ig a globális tengerszint mintegy 18.5 cm-es emelkedése tapasztalható.

Ha ragaszkodunk ahhoz, hogy a magassági referencia rendszerünket a zérus magasságúnak definiált középtengerszinthez kössük, akkor ez számtalan területen megoldhatatlan zavart okoz (pl. a geodézia oceanográfiai alkalmazásában, vagy pl. a klímaváltozás vizsgálatában). A középtengerszint ilyen mértékű globális emelkedésével egyébként nem csak az a probléma, hogy a Listing-féle geoid definíció tarthatatlan mivel a geoidot nem lehet azonosítani a középtengerszinttel, hanem ezzel jelentősen változik a Föld tömegeloszlása, tehát időben változnak a szintfelületek, és így a geoid alakja is. A elkövetkező időkben a geodézia tudományával szemben fontos elvárás, hogy a klímaváltozás kérdéséhez kapcsolódva meg kell határoznia a globális tengerszintváltozás mértékét, a globális tengeráramlások miatt meg határozni a tengerfelszín topográfiáját, és pontos kapcsolatot kell teremteni a műholdas altimetriával meghatározott tengerszint és a gravimetriai geoid között.

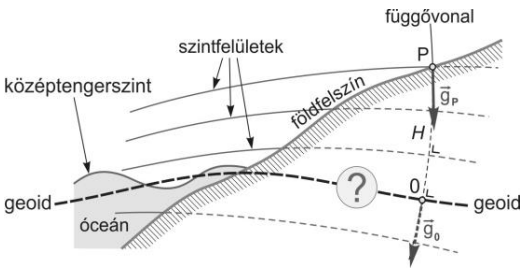
Az eddigieknél is nagyobb probléma a geoid meghatározása a szárazföldek területén, ahol különböző fontos paramétereket nem tudunk közvetlen mérésekkel megfigyelni. A 4. ábrán folytonos



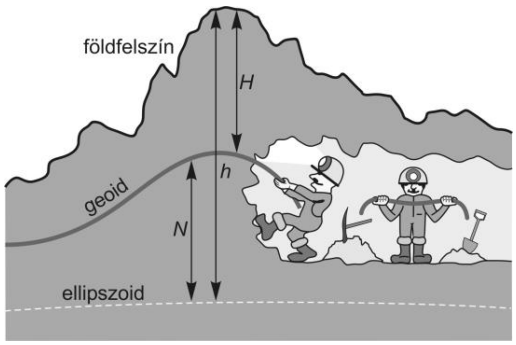
2. ábra. A globális tengerszint-emelkedés szatellita altiméteres mérések alapján



3. ábra. A globális tengerszint-emelkedés mareográfok mérései alapján



4. ábra. A Föld feletti valódi- és a Föld alatti képzeletbeli világ



5. ábra. A geoidmeghatározás fáradtságos munkája szárazföldek területén

vonalakkal jelöltük a Föld felszínén vagy a felszíne felett a valóságban látható, illetve mérhető mennyiségeket (földfelszín topográfiája, középtengerszint, földfelszíni nehézségi gyorsulás értékek); míg a szaggatott vonalak a földalatti közvetlenül nem megfigyelhető képzeletbeli világot mutatják (szintfelületek alakja, geoid felszíne, nehézségi gyorsulás geoid felszínére vonatkozó értéke). Ezeket az utóbbi mennyiségeket csak különféle megállapodásokon, definíciókon keresztül, közvetve határozhatjuk meg, – vagyis ezek nem feltevésmentes, valóságos értékek. Szárazföldi területeken a geoid közvetlen, feltevésmentes meghatározása csak az 5. ábrán szemléltetett módon hosszú, fáradtságos munkával lehetséges (Roman 2007).

Mindebből az következik, hogy mindenképpen szükséges az eddigieknél precízebb olyan geoid definíció, mely akár a szárazföldek területén is pontosan értelmezhető és egyértelműen meghatározható. Ez a kérdéskör napjainkban egyre időszerűbb és egyre divatosabb kutatási terület, a témában egyre több figyelemre méltó eredmény születik (pl. Featherstone és Lichti 2008, Hipkin 1988, 2002; Hofmann-Wellenhof és Moritz 2005, Li és Götze 2001, Smith 1998, Torge 2001). Ennek a tanulmánynak korlátozott terjedelmi okokból nem az a célja, hogy megoldja a geoid pontos definíciójának problémáját, ehelyett inkább az időbeli változások problémájával foglalkozunk.

Az eddigiek alapján nyilvánvaló, hogy bármely geoidfogalom szükségszerűen kapcsolódik a Föld nehézségi erőteréhez, így a nehézségi erőtér bármely időbeli változása elkerülhetetlenül a geoid időbeli változását vonja maga után.

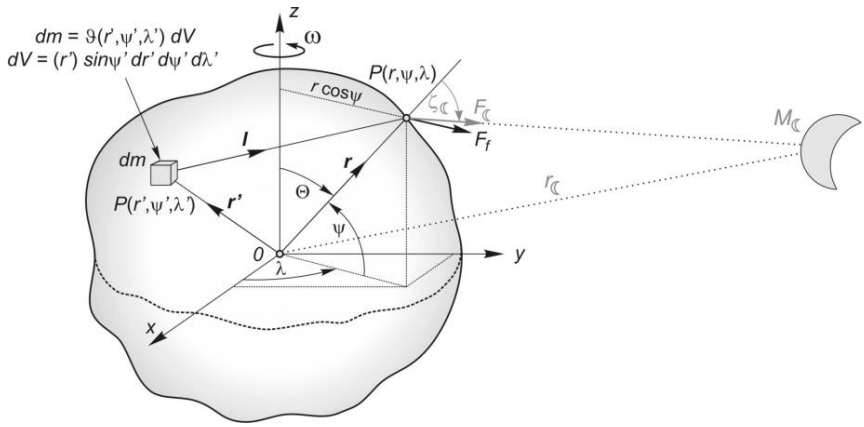
3 A nehézségi erőtér időbeli változása

Az alábbiakban röviden összefoglaljuk mindazon okokat, amelyek a nehézségi erőtér időbeli változását eredményezik. A Föld tetszőleges pontjában a nehézségi térerősség, (illetve gyorsulás) a 6. ábra jelöléseinek megfelelően (Völgyesi 2005, 2006):

$$g(t) = k(t) \int\limits_{r'(t)} \int\limits_{\psi'(t)} \int\limits_{\lambda'(t)} \frac{\rho(r',\psi',\lambda',t)\, r'^2(t) \sin\psi'(t)}{\left[r(t) - r'(t)\right]^2} dr'\, d\psi'\, d\lambda' + \omega^2(t) r^2(t) \cos^2\psi(t) + \delta g_a \,. \qquad (2)$$

A (2) összefüggésben megjelöltük azokat a tagokat, amelyeknek valamilyen okból szerepe lehet a nehézségi erőtér időbeli változásában, majd ezek alapján az 1. táblázatban összefoglaltuk az időbeli változás lehetséges okait.

Vizsgáljuk meg most az 1. táblázat alapján részletesebben a kiváltó okokat. Az erőtér időbeli változásainak vizsgálata során érdemes különválasztani az árapály következtében kialakuló, és a nem árapály jellegű változásokat. Az elkülönítés legfontosabb indoka az, hogy az árapály igen rövid periódusú tized mGal nagyságrendű változása valamennyi más változásnál markánsabb. Az árapály hatására a földi nehézségi erőtér potenciáljának szintfelületei napi kétszeri maximummal és minimummal átlagosan néhány dm-es „lüktetést” mutatnak, ezért a geoidot semmiképpen nem definiálhatjuk a valódi nehézségi erőtér potenciáljának szintfelületeként. Emiatt alapvetően fontos a földi



6. ábra. Jelölések a földi nehézségi erő összetevőinek számításához

árapály igen pontos ismerete, mivel a hatását a *g* mérések feldolgozása során minden esetben el kell távolítanunk.

Dirac Nobel-díjas fizikus korábban arra a következtetésre jutott, hogy a *k* gravitációs "állandó" értéke fordítottan arányos a világegyetem (vagy a világegyetem egy részének) a korával; a gravitációs állandó értéke az időben csökken (Dirac 1937). Amennyiben ez igaz, a becslések szerint a *g* értéke az utóbbi 1 milliárd évben kb. 1m/s^2 értékkel változott, ami évente 0.1 μGal csökkenésnek felel meg (Völgyesi 2005, 2006).

Mivel a Föld tengelykörüli forgásának szögsebessége sem egyenletes, ezért a centrifugális erő megváltozása miatt is változik a nehézségi erőtér. A hatás a forgástengelytől mért távolság függvénye, a Föld felszínén az egyenlítő mentén a legnagyobb, ettől északra és délre haladva csökken, a pólusoknál pedig zérus. Erre vonatkozóan pontos számítások végezhetők, amelyek szerint az egyenlítői fél nagytengely hosszának csökkenése 800 évenként kb. 1 cm, a nehézségi gyorsulás csökkenése pedig közelítőleg 2 nGal/év, ami kb. 500 év alatt tesz ki 1 μGal értéket az egyenlítő vidékén (Völgyesi 2005, 2006).

A pólusmozgásnak már jelentősebb a hatása. A pólusingadozás következtében a forgástengely évi 10-20 m nagyságrendű közel periodikus elmozdulását tapasztaljuk, ez a cetrifugális gyorsulásnak a közepes földrajzi szélesség környékén évente 5 μGal nagyságrendű kvázi-periodikus változását eredményezi. Ennél is nagyobb lehet a hatása a pólusvándorlásnak, ugyanis a földtörténeti korok folyamán a földrajzi pólus jelentős – akár kontinentális méretű – elmozdulásával is lehet számolni. A rendelkezésre álló mérések szerint az utóbbi 110 év alatt a közepes pólus több mint 10 métert mozdult el Kanada irányába, ami a nehézségi gyorsulásnak a $\varphi = 45^o$ szélesség környékén mintegy 2-3 μGal nagyságrendű változását eredményezte (Völgyesi 2005, 2006).

A Föld tágulásának hipotézise Egyed László (1970) nevéhez fűződik. Elképzelésének, pontos és minden apró részletre kiterjedő igazolása még a jövő nehéz feladata. Különböző megfontolások

1. Táblázat. A nehézségi erőtér időbeli változásának lehetséges okai

δg_a	árapály
$k(t)$	gravitációs együttható időbeli változása
$\omega(t)$	lassuló forgási szögsebesség
$\psi(t), \lambda(t)$	pólusmozgás
$r(t)$	táguló Föld
$\rho(r',\psi',\lambda',t)$	sűrűségváltozások
$r(t)$	felszínmozgások
$r'(t)$	tömegátrendeződések

alapján Egyed évi 0.6 mm sugárnövekedést feltételezett, ami a nehézségi gyorsulás csaknem 0.2μGal nagyságú éves csökkenésének felelne meg.

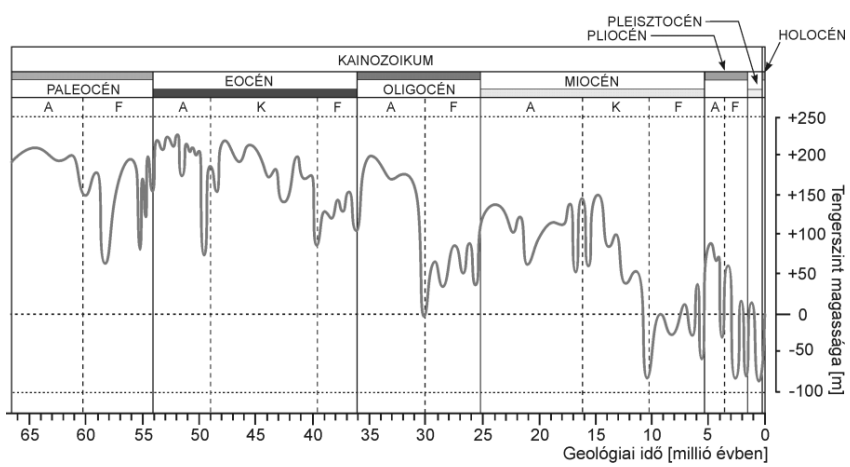
Földünk jelentős területén laza fiatal üledékes kőzetek találhatók a felszínen vagy a felszín közelében. Ezekben a magas pórustérfogat lehetővé teszi, hogy jelentős mennyiségű vizet vagy akár különféle szénhidrogéneket tartalmazzanak. Ilyen kőzetek esetében számolni kell az ún. kőzetkompakcióval, vagy tömörödéssel, – különösen abban az esetben, ha a kőzetekből szénhidrogén vagy vízkitermelés is történik. A kőzetek tömörödésével növekszik a kőzetek sűrűsége, másrészt a térfogatcsökkenés miatt felszíni süllyedések is keletkeznek. Korábbi vizsgálataink során a magyarországi kéregmozgási szintezési hálózat vonalai mentén 5 km-es távolságokban kiolvastuk a szintváltozási értékeket, és a szintezési vonalak ugyanezen pontjaira meghatároztuk az alsó- és felsőpannóniai, valamint a kvarter rétegek talpmélységét. Az esetek nagy részében a süllyedési értékek és a pannon üledékek vastagsága között korrelációt találtunk, ami a kőzetkompakciót igazolja (Völgyesi et al. 2005).

A függőleges felszínmozgások során, a földfelszínen lévő pontok a Föld nehézségi erőterében más potenciálértékű helyre kerülnek, így az elmozdult pontokban más lesz a nehézségi erő értéke. Magyarország területén a függőleges felszínmozgások átlagos értéke 1mm/év, bár helyenként ez lehet 4-5 mm/év is, sőt pl. Debrecen területén eléri a 8 mm/év értéket. Ezért 10 éves időtartam alatt a felszínmozgások miatt átlagosan 2-4 μGal, de bizonyos területeken akár 10-20 μGal változásra is számítani lehet (Völgyesi et al. 2005). Találhatók a Földön olyan területek is (pl. Skandináviában) ahol ennél lényegesen nagyobb elmozdulások is mérhetők. A vízkivétel hatására Kalifornia az ideális példa, néhány évtized alatt méteres nagyságrendű süllyedéssel.

A nehézségi erőtér domináns összetevője a tömegvonzási erőtér elsősorban az erőteret keltő tömegek átrendeződése miatt változhat meg. Az átrendeződési folyamatokban résztvevő tömegek nagyságának, sűrűségviszonyainak és mozgási sebességének megfelelően kialakulhatnak a tömegvonzási, illetve a nehézségi erőtér helyi, regionális és globális változásai; a mozgások jellegének megfelelően pedig lehetnek szekuláris, rövidperiódusú és rendszertelen (egyszeri) változások.

A légköri meteorológiai változások, elsősorban a légnyomás és a páratartalom változása a nehézségi erőtér időbeli változását okozza. A tapasztalat szerint 1 mBar légnyomásváltozás kb. 0.3 μGal nagyságú g változást eredményez. Mivel a legkisebb és a legnagyobb légnyomás közötti különbség akár 50-60 mBar is lehet és 10-20 mBar értékű változás akár fél nap alatt is bekövetkezhet, ezért a g mérések során a légnyomás változását mindenképpen figyelembe kell venni, a graviméteres méréseket az árapály és a drift javításokkal egyidőben el kell látni a légnyomás korrekcióval is.

A Föld felszínén, vagy a felszín közeli tartományokban lejátszódó geológiai, tektonikai folyamatok a nehézségi erőtér tetszőleges idejű lokális, regionális vagy akár globális változásait eredményezhetik. Az eróziós folyamatok, üledékképződés, vulkáni működések, lokális és globális tektoni-



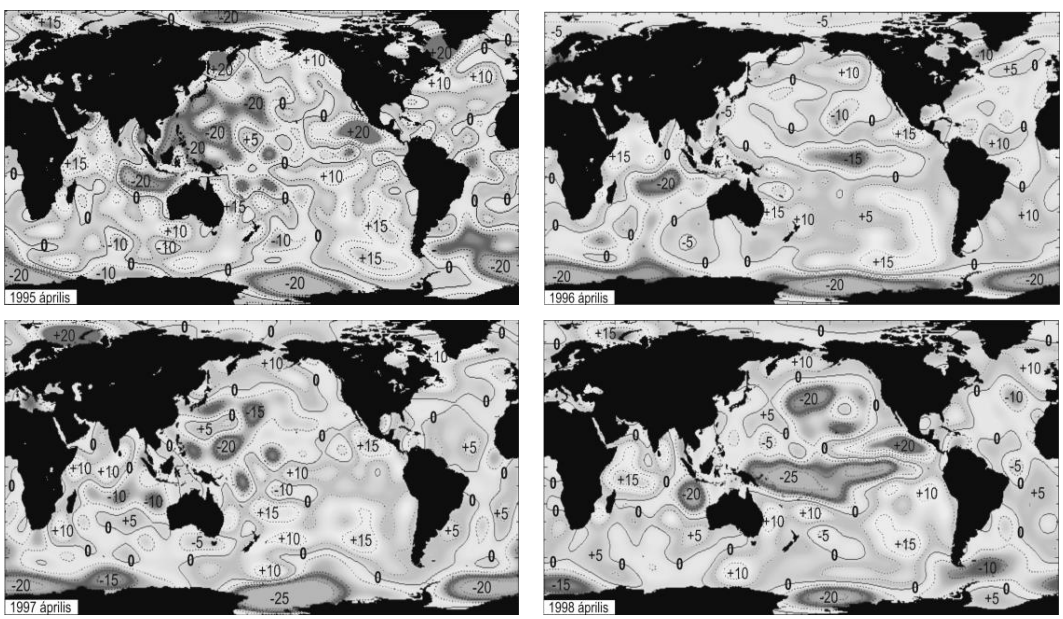
7. ábra. Globális tengerszint-változások a kainozoikumban Haq et al. (1987) szerint

kai folyamatok, lemeztektonika, kontinensvándorlás, óceáni medencék tágulása (ocean floor spreading) mind olyan jelenségek, amelyek hosszabb időtartam alatt a nehézségi erőtér számottevő változását okozhatják. A Föld belsejében lejátszódó tömegátrendeződésekről egyelőre még rendkívül keveset tudunk. A köpenyáramlások, vagy esetleg a belső földmag korábban feltételezett excentrikus modelljének megfelelő tömegmozgások a nehézségi erőtér hosszú periódusú globális változásait okozhatják. Az ember bányászati, és a hatalmas építmények létrehozására vonatkozó tevékenysége (óriási völgyzárógátak, felhőkarcolók, és egyéb építmények) a nehézségi erőtér lokális változását eredményezik. Ma már rendelkezésre állnak olyan szoftverek, amelyekkel minden egyes speciális esetre ki lehet számítani az adott építmény lokális gravitációs hatását, amely akár néhány tized mGal nagyságú is lehet (Völgyesi és Tóth 2004).

A földi tömegátrendeződések legjelentősebb tétele a különféle víztömegek mozgásához, áramlásához, hidrológiai folyamatokhoz kapcsolódik. Földünk felszínének több mint 70%-át a világóceánok, tengerek és folyók alkotják, de nem elhanyagolható tömeget képviselnek a földalatti vizek, a sarki jégsapkák, a csapadék eső és hó formájában, valamint az a víztömeg, amely mozgása az ember tevékenységéhez kapcsolódik.

Érdemes külön figyelmet szentelnünk az óceánok és tengerek globális méretű vízszintváltozásaira. A földtudományokon belül a szeizmikus sztratigráfia egyre pontosabb eredményei lehetőséget adnak a nehézségi erőtér szekuláris, vagy a földtörténeti korokra kiterjedő ún. paleoszekuláris változásainak meghatározására a világtengerek eusztatikus változásai vizsgálatán keresztül (Völgyesi 1996). A 7. ábrán példaként a kainozoikumra vonatkozó eusztatikus változási görbét láthatjuk. Feltűnő, hogy a mai tengerszinthez viszonyítva az eddigi maximális szint csaknem 200 méterrel magasabban, míg a minimális szint mintegy 100 méterrel alacsonyabban volt. A világ óceánjainak ilyen mértékű mozgása a nehézségi erőtér – és ezen keresztül a geoid – földtörténeti korokra kiterjedő hatalmas méretű paleoszekuláris változásait eredményezi.

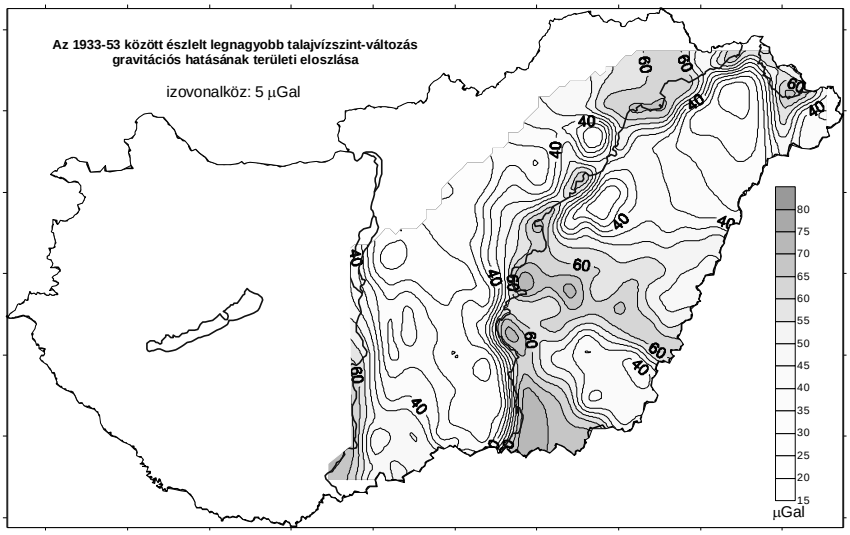
Hasonlóképpen érdekes és fontos a tengerfelszín topográfiájának rövid periódusú nem árapály jellegű időbeli változásait vizsgálni. Erre kiváló lehetőséget teremtenek az ERS-1,2 műholdak által mért adatok, amelyekből a tengerfelszín topográfiájának a középtengerszinthez viszonyított változása határozható meg és ábrázolható különböző időtartamokra átlagolt izovonalas térképek formájában (pl. 1995 áprilisa és 2003 júniusa között havi bontásban: http://nng.esoc.esa.de/ers/alti.html). A mérési adatok előzetes feldolgozása során az árapály-hatást és a légnyomás-változás hatását korrekció-



8. ábra. A tengerfelszín topográfiájának változása 1995 és 1998 között az ERS-1,2 műholdak mérései alapján

ként eltávolították, az így kapott javított adatok tehát a tengerfelszín topográfiájának nem modellezett rövidebb idejű, szezonális és egyéb változásait tükrözik. A rendelkezésre álló adatok alapján az 1995 és a 2003 közötti időszakban 97 ilyen ábrán tanulmányozhatjuk havi bontásban valamennyi óceán- és tengerfelszín topográfiájának időbeli változását. A 8. ábrán példaként az 1995, 1996, 1997 és 1998 áprilisára megszerkesztett izovonalas képeken követhető nyomon a tengerfelszín topográfiájának 12 hónaponkénti változása. Már ezen a négy képen is jól lehet látni a változások jellegét és mértékét. A vizsgált adatokon egyértelműen látszik az éves periódusú szezonális hatás, a változások nagyságrendje a vizsgált időtartam alatt mintegy ±20 cm. Ugyanakkor éppen a 8. ábra mutatja, hogy egyéb jelentős nem szezonális hatások is jelentkeznek legalább ±10 cm nagyságrendben.

Természetesen nem csupán az óceánok tömegének gravitációs hatása érdekel minket, az utóbbi időkben megnőtt azoknak a kutatásoknak a jelentősége, melyek a különféle víztömegek lokális gravitációs hatásával foglalkoznak. A talajvízszint ingadozásának gravitációs hatása évtizedek óta közismert. Vizsgálataink szerint pl. az Alföldön 1 m talajvízszint ingadozás átlagosan 10-15 μGal nehézségi gyorsulás változást eredményez (Csapó et al. 2003). 1950 és 1955 között a Magyar Állami Földtani Intézet nagyszabású talajvíz térképezést végzett az ország síkvidéki részein. A térképezés során több mint 1 000 000 ásott talajvízkút és közel 16 000 fúrt kút adatait mérték meg és jegyezték fel. Ezen adatrendszer alapján az Alföld területére megszerkesztettük a talajvízszint ingadozás okozta maximális gravitációs hatás területi eloszlásának 9. ábrán látható térképét (Völgyesi et al. 2007).



9. ábra. Talajvízszint változás gravitációs hatása az Alföld területén

Érdekes és jelentős a nehézségi erőtér időbeli változása a folyók apadása-áradása következtében. 2002-ben megvizsgáltuk az augusztusi dunai árvíz gravitációs hatását is. Megállapítottuk, hogy a víztömeg gravitációs hatása közvetlenül a vízparton 0.2 mGal körüli érték, ami a vízparttól távolodva rohamosan csökken, tehát lokális hatás (Völgyesi és Tóth, 2004).

4 A geoid időbeli változása

A földi nehézségi erő potenciálterének szintfelületei és így a geoid is Stokes ismert módszere alapján határozhatók meg a nehézségi erőtér ismeretében. Az ún. "remove-restore" technika alkalmazásával:

$$N = N_{GM} + \Delta N_{\Delta g} + \Delta N_H \,, \tag{3}$$

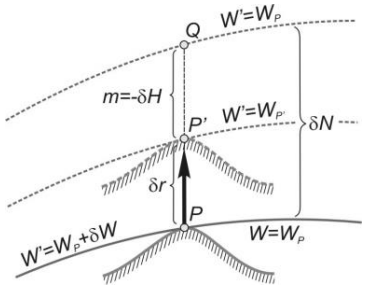
ahol

$$N_{GM} = \frac{kM}{r\gamma}\sum_{n=2}^{k}\left(\frac{a}{r}\right)^{n}\sum_{m=0}^{n}\left(C_{nm}\cos m\lambda + S_{nm}\sin m\lambda\right)P_{nm}(\sin\psi) \tag{4}$$

az ismert jelölésekkel (Torge 2001, Hofmann-Wellenhof és Moritz 2005) a geopotenciál modellből számítható és a globális hatásokat tartalmazó unduláció érték, a

$$\Delta N_{\Delta g} = \frac{R}{4\pi\gamma}\int_{\alpha=0}^{2\pi}\int_{\psi=0}^{\pi} S(\psi)\Delta g\sin\psi\, d\psi\, d\alpha \tag{5}$$

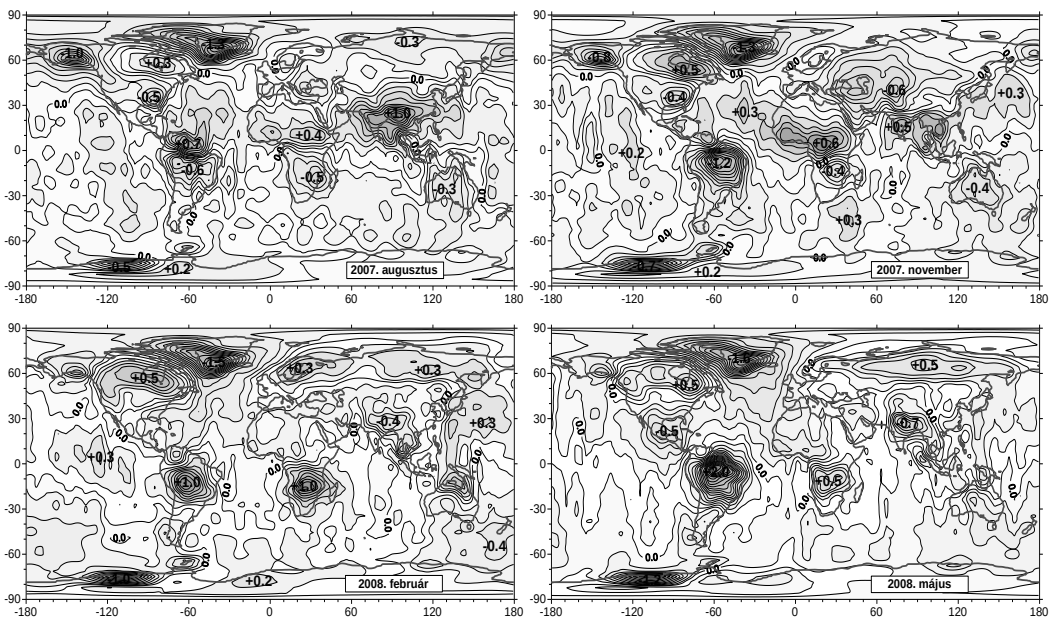
a nehézségi rendellenességekből a Stokes-integrállal (Biró 1985) állítható elő regionális és lokális hatásokat adó hozzájárulás, ΔN_H pedig a terephatásából számítható finomítás (Tóth 1999). A nehézségi erőtér időbeli változása a (4)-ben alapvetően a C_{nm}, S_{nm} tagokban jelentkezik, az (5)-ben viszont a Δg tartalmazza és okozza a geoid időbeli változását.



10. ábra. A geoidmagasság δ*N* megváltozása

Biró (1981, 1983) vizsgálatai szerint valójában a nehézségi erőtér és a geoid időbeli változása közötti kapcsolat nem olyan egyszerű, mint ahogyan az (5) Stokes-integrál mutatja. Ennek oka, hogy a Föld nem merev, hanem rugalmas test, és ennek megfelelően az erőtér változása a földtömeg deformációját is okozza, így a 10. ábrán látható módon a geoid δ*N* megváltozása két részből tevődik össze: a W_P potenciálértékű szintfelület δ*H* eltolódásából és a földfelszín δ*r* deformációjából. A δ*r* meghatározása meglehetősen nehéz, mivel ez további két részből tevődik össze: részben az erőtér változása miatti rugalmas deformációból, részben ettől függetlenül az adott terület esetleges tektonikai mozgásaiból.

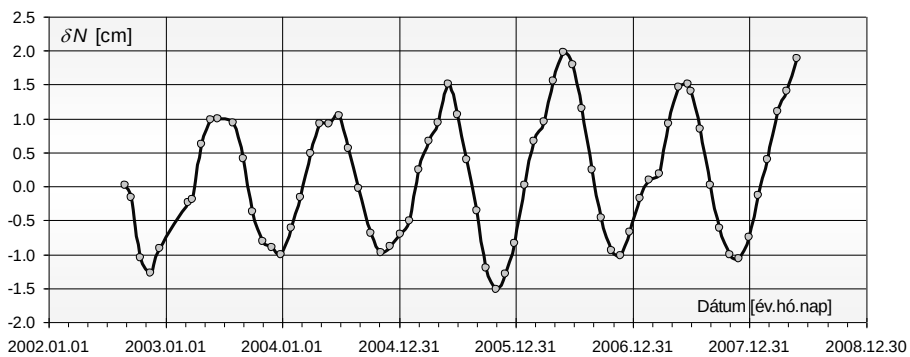
Először vizsgáljuk meg a (4) összefüggés alapján a lehetséges globális változásokat! Rendkívül tanulságos a nehézségi erőtér és a geoid időbeli változását a GRACE és a LAGEOS műholdak



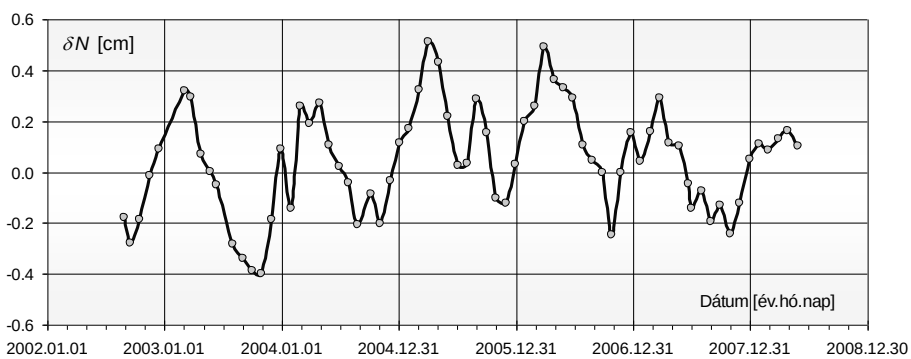
11. ábra. Példa a geoid időbeli változására a GRACE és a LAGEOS műholdak mérései alapján (Lemoine et al. 2007)

2002. július 29. és 2008. május 27. közötti mérési adatsora alapján tanulmányozni. A LAGEOS-1,2 mérései a $C_{2,0}$ gömbfüggvény-együttható meghatározásában játszottak fontos szerepet, a GRACE mérései az összes többi gömbfüggvény-együttható meghatározásához szolgáltattak információt. Ezekből a mérésekből képzett adatbázisban a nehézségi erőtér gömbfüggvény-sorának n=2 és 50 közötti együtthatói találhatók 10 napos időtartamokra számított átlagértékek formájában (http://bgi.cnes.fr:8110).

A mérési adatok előzetes feldolgozása során az árapály-hatást és légnyomás-változás hatását korrekcióként eltávolították, az így kapott javított adatok a nehézségi erőtér nem modellezett hosszabb idejű változásait: pl. szezonális hatásokat, hidrológiai tömegátrendeződések, hóvastagság változása, sarki jégsapkák olvadásának megfelelő tömegváltozások, stb. hatásait tükrözik. Az említett adatbázisból a C_{nm}, S_{nm} gömbfüggvény-együtthatók ismeretében a (4) alapján a 2002 és 2008 közötti időszakra 10 napos bontásban kiszámíthatók a geoidmagasságok a Föld bármely pontjára. A 11. ábrán a teljes Földre $1^o \times 1^o$ rácshálózatban számított geoidmagasságok felhasználásával 2007 augusztusára és novemberére, illetve 2008 februárjára és májusára megszerkesztett geoidképeken követhetjük nyomon a geoid formáinak időbeli változását 3 hónaponkénti felbontásban. A rendelkezésre álló adatok alapján összesen 209 ilyen geoidábra szerkeszthető a 2002 és 2008 közötti időtartamra, terjedelmi okok miatt azonban leszűkítettük a vizsgált esetek számát a 11. ábrán látható négy időpontra, ugyanis ezen a négy képen is már igen jól lehet látni a változások jellegét és mértékét. Nagy változások látszanak a kontinentális területeken, jó összhangban a hidrológiai folyamatok periódusával. Igen jól látható pl. az Amazonas vízgyűjtő területének éves periódusú változása (Földváry 2008), amit egyébként a 12. ábrán a $\varphi = -3.5^o$, $\lambda = -60.5^o$ koordinátájú pontban külön kiemelve is bemutatunk a teljes 2002 és 2008 közötti időtartamra. A változás nagyságrendje meglepően nagy: közel 4 cm. Hasonló jelentős változások tapasztalhatók a 11. ábra tanúsága szerint más kontinentális területeken is.



12. ábra. A geoidmagasságok változása az Amazonas vidékén műholdas gravimetriai mérések alapján



13. ábra. A geoidmagasságok változása Budapest közelében műholdas gravimetriai mérések alapján

Számunkra különösen fontos kérdés a változások nagyságrendje Magyarország területén. A 13. ábrán a Budapest közelében fekvő $\varphi = 47.5^{o}$ és $\lambda = 19.5^{o}$ koordinátájú pontban ábrázoltuk a geoid időbeli változását a GRACE és a LAGEOS műholdak 2002. július 29. és 2008. május 27. közötti közel 6 éves mérési adatsora alapján. Látható, hogy a változás cm nagyságrendű, és több különböző periódusból tevődik össze. Az ábrán sejthető egy hosszabb periódus is, és elképzelhető, hogy ez a 11 éves napfoltciklus időjárásra gyakorolt hatásával, illetve az ennek megfelelő csapadékmennyiség változásával kapcsolatos, azonban a megfigyelt időtartam ennek biztos megállapításához még nem elegendően hosszú. Ez a kérdés mindenképpen tisztázódhat a következő években, amikor már hosszabb adatsorok fognak a rendelkezésünkre állni. Vizsgálataink szerint a változások jellege nagyjából egész Magyarország területére a 13. ábrán láthatóhoz hasonló.

Végül foglalkozzunk még röviden a geoid lokális időbeli változásának kérdésével! A geoid lokális változásai a nehézségi erőtér kisebb kiterjedésű változásaihoz kapcsolódnak (légnyomásváltozás, talajvízszint ingadozás, folyók /pl. Duna/ áradó-apadó víztömegének hatása, kőzetkompakció, geológiai, tektonikai, technogén, stb. hatások). A kapcsolat az (5) Stokes-integrálon keresztül valósítható meg a földtömeg rugalmas viselkedésének Biró (1981, 1983) vizsgálatai figyelembe vételével. Ezeknek a változásoknak a geoid időbeli változására gyakorolt mértéke és területi eloszlása további részletes vizsgálatokat és számításokat igénylő fontos kutatási feladat. Ebből a célból speciális szoftver elkészítését tervezzük, amellyel megfelelő modellszámítások végezhetők.

5 Összefoglalás

Egyik oldalról törekszünk a geoid minél pontosabb meghatározására, ugyanakkor általában nem gondoljuk végig, hogy pontosan mit is határozunk meg. Lassan hozzá kell szoknunk a gondolathoz, hogy a klasszikus Listing-féle geoid-definíció már egyre kevésbé tartható, vagy ha mégis ragaszkodunk hozzá, akkor egy bizonyos meghatározott geoidkép mellé oda kell írni azt az időpontot is, amikorra érvényes. Ha ugyanis cm pontosságú geoidot kívánunk meghatározni (márpedig a GPS magasságok gyakorlati alkalmazása mellett mindenképpen ez az igény), akkor nem hagyhatjuk figyelmen kívül, hogy a geoidmagasságok viszonylag rövid időn belül akár több cm-rel is megváltoznak.

Köszönetnyilvánítás. Kutatásaink a K76231 OTKA támogatásával folynak.

Hivatkozások

Biró P (1981): Zur Anwendung der Stokes'schen Formel für zeitliche Schwereänderungen. Zeitschrift für Vermessunsgswesen 106(10), 523-531.

Biró P (1983): Time Variation of Height and Gravity. Akadémiai Kiadó, Budapest.

Biró P (1985): Felsőgeodézia, egyetemi jegyzet Tankönyvkiadó, Budapest.

Csapó G, Szabó Z, Völgyesi L (2003): Changes of gravity influenced by water-level fluctuations based on measurements and model computation. Reports on Geodesy, Warsaw University of Technology, 64(1), 143-153.

Dirac PA (1937): The cosmological constants. Nature, 139, 323.

Gauss CF (1828): Bestimmung des Breitenunterscchiedes zwischen den Sternwarten von Gottingen und Altona, Gottingen.

Douglas BC (1997): Global Sea Rise: A Redetermination. Surveys in Geophysics 18, 279–292.

Egyed L (1970): A Föld belső szerkezetének új dinamikus felfogása. Fizikai Szemle, XX, 354-364.

Featherstone WE, Lichti DD (2008): Fitting gravimetric geoid models to vertical deflections. Journal of Geodesy, DOI: 10.1007/s00190-008-0263-4.

Földváry L (2008): Globális klimatológiai változások hatása a nehézségi erőtérre, és annak műholdas észlelési lehetőségei. Magyar Tudomány 169(6), 704-714.

Haq BU, Hardenbol J, Vail PR (1987): Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. Science 235, 1156-1167.

Heck B (1989): A revision of R. Mather's Work ont he Determination of Stationary Sea Surface Topography an Global Vertical Datum Definition, Lecture Notes in Earth Sciences, Springer-Verlag, 29, 85-97.

Helmert FR (1880): Die mathematischen und physicalischen Theorien der hoheren Geodasie, Teubner, Leipzip, Frankfurt.

Hipkin R (1988): Bouguer anomalies and the geoid: a reassessment of Stokes' method. Geophysical Journal, 92, 53-66.

Hipkin R (2002): Defining the geoid by $W=W_0 \equiv U_0$: Theory and practice of a modern height system, 3rd Meeting of the IGGC, Thessaloniki, Greece, Aug. 26-30, 2002, 367-377.

Hofmann-Wellenhof B, Moritz H (2005): Physical Geodesy, Springer, Wien.

Lemoine J-M, Bruinsma S, Loyer S, Biancale R, Marty J-C, Perosanz F, Balmino G (2007): Temporal gravity field models inferred from GRACE data, Advances in Space Research 39, 1620-1629.

Li X, Götze HJ (2001): Ellipsoid, geoid, gravity geodesy, and geophysics, Geophysics, 66(6), 1660-1668.

Listing JB (1873): Uber unsere jetzige Kenntnis der Gestalt und Grosse der Erde, Nachr. d. Kgl., Gesellsch. d. Wiss. und der Georg-August-Univ., 33-98, Gottingen.

Roman DR (2007): Geoid Surfaces and Theory, Annual Meeting of the Central Chapter of the PLSC. Denver, CO, February 24.

Smith DA (1998): There is no such thing as "The" EGM96 geoid: Subtle points on the use of a global geopotential model. IGeS Bulletin No. 8. International Geoid Service Milan, Italy, 17-28.

Stokes GG (1849): On the variation of gravity at the surface of the Earth, Transactions of the Cambridge Philosophical Society, V. 8, p. 672.

Torge W (2001): Geodesy, 3rd edn. Walter de Gruyter, Berlin.

Tóth Gy (1999): Szabályos hibák a gravimetriai geoidmeghatározásban és kimutatásuk GPS-szel, 12. Kozmikus Geodéziai Szeminárium előadásainak gyűjteménye, Székesfehérvár, 97-102.

Völgyesi L (1996): A geoid időbeli változása a tengerszintváltozások alapján. Geodézia és Kartográfia, 48(6), 26-33

Völgyesi L, Tóth Gy (2004): Modelling gravity gradient variation due to water mass fluctuations. IAG International Symposium, Gravity, Geoid and Space Missions. Porto, Portugal.

Völgyesi L (2005): A nehézségi erőtér időbeli változása, Geomatikai Közlemények VIII, 181-192.

Völgyesi L, Csapó G, Szabó Z (2005): Relation between time variation of gravity and pannonian sediment thickness in the Carpathian basin., Reports on Geodesy, Warsaw University of Technology, 73 (2): 255-262

Völgyesi L (2006): Some possible physical reason of time variation of Earth's gravity field (a possible proof of time change of gravitational constant). Periodica Polytechnica Civ. Eng, 50(2), 161-170.

Völgyesi L, Csapó G, Szabó Z, Tóth Gy (2007): A nehézségi erőtér időbeli változása Magyarország területén. Geomatikai Közlemények X, 159-166.

A HGTUB2007 ÚJ MAGYARORSZÁGI KOMBINÁLT KVÁZIGEOID MEGOLDÁS

Tóth Gyula[*]

The Hungarian combined quasigeoid solution HGTUB2007 *- A new quasigeoid solution was computed for Hungary by combining geopotential model, gravimetric, GPS/levelling, astrogeodetic deflection, gravity gradients and DTM datasets. Least-squares collocation technique was used with planar logarithmic auto- and cross-covariances and a high degree (n=720) geopotential reference model. In the final solution high weights were assigned to the 95 levelled points of the Hungarian GPS Network (OGPSH) for practical reasons. The estimated prediction errors are below 2 cm inside Hungary.*

Keywords: least-squares collocation, geoid, gravity gradients, deflections of the vertical

Új kvázigeoid megoldást határoztunk meg Magyarország területére geopotenciál modell, gravimetriai, GPS/szintezés, függővonal elhajlás, Eötvös-inga és DTM adatok kombinálásával. A számítás a legkisebb négyzetes (LKN) kollokáció módszerével, síkbeli logaritmikus auto- és keresztkovariancia függvényekkel és magas fokszámú (n=720) referencia geopotenciál modell felhasználásával történt. A végső megoldásban gyakorlati okokból nagy súllyal szerepeltek az Országos GPS Hálózat (OGPSH) 95 szintezett pontjának mérései. Az elkészült geoidmegoldás becsült predikciós hibái az ország területén 2 cm alattiak.

Kulcsszavak: legkisebb négyzetes kollokáció, geoid, Eötvös-inga mérések, függővonal elhajlás

1 Bevezetés

Egy nagy pontosságú és az egész ország területére vonatkozó kvázigeoid meghatározásának napjainkban gyakorlati okokból általában mindig az a célja, hogy megteremtse a kapcsolatot a tengerszintre (Balti alapszintre) vonatkozó normálmagasságok és a GPS által előállított ellipszoid feletti magasságok között. Habár hazánk mérsékelt domborzati viszonyainak köszönhetően a legnagyobb eltérés a kvázigeoid és a geoid felülete között csak 25 mm (Ádám et al. 2002), ezt az eltérést a nagy pontosságú geoid meghatározásánál már tekintetbe kell venni (mivel normálmagasságaink vannak), így a továbbiakban a rövidség kedvéért a „geoid" elnevezés alatt is mindig a kvázigeoidot értjük.

Magyarország területére már számos gravimetriai geoidmegoldás született a Stokes integrál és az FFT számítási eljárások segítségével (HGEO2000: Völgyesi et al. 2005, HGTUB2000: Tóth és Rózsa 2000). Ezek közül néhányat illesztettek az Országos GPS Hálózat (OGPSH) GPS/szintezési pontjaira azért, hogy lehetővé váljon a GPS felhasználása a magyar országos magassági rendszerben történő magasságmeghatározás céljára (HGGG2000&2004: Völgyesi et al. 2005).

A gravimetriai adatainkon kívül azonban még számos, a gravimetriához közvetetten kapcsolódó adatrendszer is létezik, pl. asztrogeodéziai függővonal elhajlások és Eötvös-inga mérések (földfelszíni gravitációs gradiensek), ezért kívánatos lenne ezeket is felhasználni a gravimetriai adatokkal együtt egy pontosabb geoidmegoldás érdekében. Az eltérő adattípusokat együtt feldolgozó eljárásnak egy további előnye, hogy így *közvetlenül* már a megoldás számítása *közben* fel tudjuk használni a GPS/szintezési adatainkat, nem pedig csak *közvetett* módon, *utólag*, valamilyen ad hoc illesztési eljárással. Ha a GPS/szintezési adatainkat nagy súllyal látjuk el, ezzel lényegében illesztjük is a megoldást abba a magassági rendszerbe, amelyet a GPS ellipszoidi illetve a szintezési hálózat pontjainak normálmagasságai valósítanak meg a gyakorlatban (Marti 2006).

2 A felhasznált adatok és redukálásuk

A számításaink során – a geopotenciális modellen és a domborzatmodellen kívül – az alábbi adatrendszerekkel dolgoztunk:

[*]*MTA-BME Fizikai Geodéziai és Geodinamikai Kutatócsoport, BME ÁFGT, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.*
E-mail: gtoth@sci.fgt.bme.hu

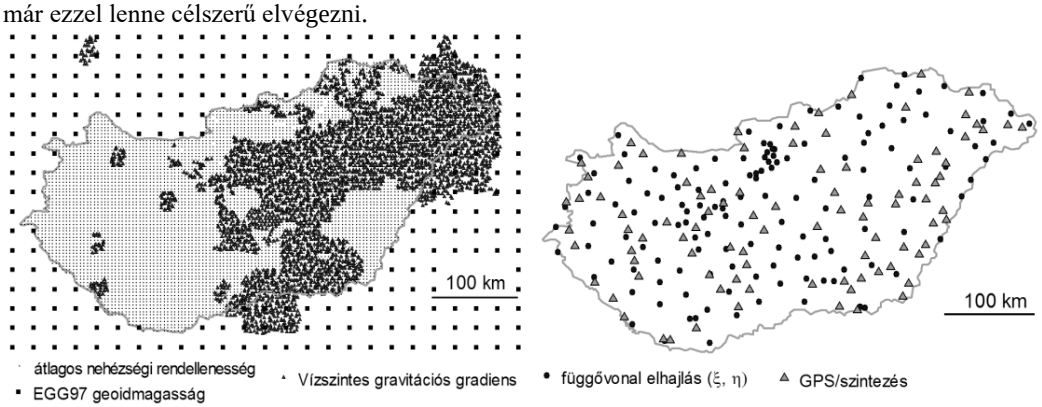
- átlag szabadlevegő nehézségi rendellenességek 1'×1.5'-es blokkokra, több mint 300 000 pontbeli nehézségi rendellenesség alapján számítva (az ELGI adatbázisából)
- 138 asztrogeodéziai függővonal elhajlási pontban a (ξ , η), azaz É-i és K-i irányú összetevők a HD72-es dátumról GRS80 rendszerbe átszámítva
- Eötvös-inga mérések (felszíni nehézségi gradiensek, azaz a nehézségi erő változásának É-i és K-i irányú összetevői) 27 005 pontban
- az Országos GPS Hálózat (OGPSH) 340 pontbeli GPS/szintezésből származó kvázigeoid magasságai (H-G. Wenzel részére tesztelésre átadott OGPSH340.DAT állomány, Kenyeres (1999))

Az említett adatok némelyikét egyenletesen ritkítottuk, egyrészt azért, mert az eljárás során a felhasznált adatok számával azonos méretű egyenletrendszert kell megoldanunk, másrészt pedig azért, mert a célunk elsősorban az alkalmazott számítási eljárás gyakorlati ellenőrzése és kipróbálása volt. A kombinált megoldásban végül a következő adatok szerepeltek (1. ábra):

- 6678 átlag szabadlevegő nehézségi rendellenesség 2'×3' méretű (kb. 3.5 km × 3.5 km-es) blokkokra
- 276 (2 × 138) asztrogeodéziai függővonal elhajlás összetevő
- 7452 Eötvös-inga nehézségi gradiens összetevő
- 95 GPS/szintezési pont (ezek azok, amelyek nem túl régen meghatározott szintezett magasságokkal rendelkeznek)

Mindezeken kívül bevontunk még a megoldásba az ország területén kívül az EGG97-es modellből (Denker és Torge, 1997) származó 267 kvázigeoid magasságot. Ennek az eljárásnak az volt az egyedüli célja, hogy megakadályozza a megoldás „elcsúszását" az ország területén kívül, pontosan úgy, ahogy a svájci CHGEO2004-es számítás esetében történt (Marti 2006). Az EGG97-es modellből származó kvázigeoid magasságok súlyozását úgy választottuk meg, hogy ne legyenek hatással Magyarország területén belül a megoldásra. Ezt azáltal értük el, hogy mesterségesen megnöveltük ezeknek a pontoknak és a valódi GPS/szintezési pontoknak a távolságát a legkisebb négyzetes kollokáció számítása során. Így értelemszerűen a kétféle kvázigeoid unduláció adatrendszer esetleges illeszkedési problémái sem okozhattak szabályos hibát a megoldásban az ország területén belül.

Az adatok redukálását két, 720 maximális fokig és rendig előállított geopotenciális modellel is elvégeztük. Ez a két modellel összesen 14-féle redukció számítását jelentette. Az egyik a GPM98CR modell volt (Wenzel 1998) (amely egyébként 180 fokig és rendig azonos az EGM96 modellel). A másik a GRACE GGM02C modell együtthatóit tartalmazta 200 fokig és rendig, azon felül pedig a GPM98CR modell együtthatóit, amelyeket a 180-200 fokszám tartományban lineáris átmenettel kombináltunk (GGM02CB modell). Ezt az eljárást azért alkalmaztuk, hogy a modellek eltérő maximális fokszáma ne befolyásolja az adatok redukcióját, másrészt pedig kíváncsiak voltunk arra, hogy az új GRACE modell mennyire javítja a megoldást. Miután 2008-ban megjelent a nagy felbontású EGM2008-as geopotenciális modell, amely a GRACE újabb mérésein alapul, a számítást már ezzel lenne célszerű elvégezni.



1.ábra. A kombinált megoldáshoz felhasznált adatok

Az adatok további redukciójához a 3” (kb. 90 m) felbontású SRTM3 digitális domborzatmodellt használtuk fel (Farr és Kobrick 2000, Tímár et al. 2003). Ezzel a modellel RTM korrekciókat számítottunk (Forsberg és Tscherning 1981) mind a 7 adatrendszerre külön-külön, figyelembe véve a geopotenciál modellek maximális fokszámát.

Korábbi vizsgálataink (Tóth és Rózsa 2006) azt jelezték, hogy a GRACE mérésein alapuló geopotenciál modellekből számított nehézségi rendellenességek az ország területén, az eltérések szórása és az átlagos eltérés tekintetében jobban illeszkednek a mérésekhez, mint a korábbi modellek (pl. EGM96). A GRACE alapú modellekből számított kvázigeoid undulációk ezzel szemben rosszabbul illeszkedtek az OGPSH szintezett pontjaiban a mérésekhez, mint a korábbi EGM96 alapú modellek, természetesen azonos fokszám mellett. Az adatredukció során most is azt tapasztaltuk, hogy a felhasznált GRACE alapú modellből számított erőtér paraméterek, a nehézségi rendellenességek kivételével, kissé nagyobb szórással és átlagos eltéréssel illeszkedtek (1. táblázat).

1. táblázat. Az eredeti valamint a redukált adatok szórása és átlaga

adatrendszer	nehézségi rendellenesség [mGal]	ξ ["]	η ["]	GPS/szintezés [m]
eredeti adatok	±17.92/ 14.90	± 2.47/ 0.55	± 2.17/ 2.85	±0.12/ 0.23
GPM98CR + RTM	± 7.77/ -4.41	± 1.22/ 0.02	± 1.06/ -0.06	±0.12/ 0.23
GGM02CB + RTM	± 7.69/ -1.06	± 1.20/ -0.24	± 1.09/ -0.11	±0.14/ 0.61

A táblázatban az Eötvös-inga mérések nem szerepelnek, mert az alkalmazott modellek felbontása (kb. 28 km) nem elégséges ezeknek az adatoknak az érdembeli redukciójához. Ezt jelzi, hogy a gradiensek szórása ±15 E volt a redukció előtt, és ez a szórás maradt a redukció után is. A nagy (9 km-es) felbontású (2160/2190 maximális fokszámú) EGM2008-as modell változtatni fog ezen a helyzeten.

3 A kvázigeoid meghatározása

A redukálással előállított maradék adatokra illeszkedő nehézségi erőtérre a legkisebb négyzetes kollokáció eljárásával adtunk optimális becslést a Forsberg (1987) által javasolt sík logaritmikus kovariancia modell alkalmazásával, amely azonban térbeli modellezésre is alkalmas, hiszen a távolságot nemcsak a referencia síkban értelmezi. Egyrészt azért ezt a modellt választottuk, mert a geoid undulációk, nehézségi rendellenességek, függővonal elhajlások és a potenciálfüggvény második deriváltjainak (a gravitációs gradienseknek) az auto- (ACF) és kereszt-kovariancia (CCF) függvényei viszonylag egyszerű összefüggésekkel jellemezhetők mind a modell referencia síkjában, mind pedig a fölötte elhelyezkedő pontokban. Másrészt a választott magas fokszámú (n_{max} = 720) referencia geopotenciális modell és a számítási terület kisebb kiterjedése (3.5º × 7º) is lehetővé teszi egy ilyen modell használatát (Forsberg 1984).

A nehézségi zavar (rendellenesség) ACF-e:

$$C(\Delta g^{h_1}, \Delta g^{h_2}) = -C_0 \sum_{i=1}^{4} \alpha_i \ln\left(D_i + h_1 + h_2 + \sqrt{s^2 + (D_i + h_1 + h_2)^2}\right) \tag{1}$$

mind a két pont h_1 , h_2 magasságától, mind s vízszintes távolságától függ. C_0 a nehézségi rendellenességek varianciája, az α_i -k egész számok (1, –3, 3, –1), $D_i = D + (i - 1)T$ (Forsberg 1984).
Ezen kívül nem szinguláris az *összes* számítandó mennyiségre nézve, ami csak nagyon kevés kovariancia modellről mondható el, mivel az ilyen modellekkel általában csak a nehézségi rendellenes-

ségeket, geoid undulációkat, és legfeljebb még a függővonal elhajlásokat lehet modellezni, de a nehézségi gradienseket már nem.

A modell α_i és D_i állandóin keresztül végső soron csak a következő három szabadon választható paramétertől függ: C_0, D és T. Az első paraméter, C_0, skálatényezőül szolgál a nehézségi rendellenesség ACF számára, a D paraméter elnyomja az erőtér magasabb frekvenciájú, a T paraméter pedig az alacsonyabb frekvenciájú összetevőit. A potenciálzavar függvényét modellező ACF és CCF részletes leírását, valamint annak első és második deriváltjai számítási összefüggéseit Forsberg (1987) függelékében találhatjuk meg.

A kovariancia modellezés során a fenti három ACF paramétert határoztuk meg oly módon, hogy az (1)-es modellt illesztettük a maradék nehézségi rendellenességek tapasztalati ACF függvényéhez. Elfogadható illeszkedést tapasztaltunk a modell és a tényleges adatok között a 2. táblázat tanúsága szerint az alábbi paraméter értékek esetében: $C_0 = 57.7$ mGal^2, $D = 5$ km, $T = 9$ km.

2. táblázat. A $C_0 = 57.7$ mGal^2, $D = 5$ km, $T = 9$ km paraméterű kovariancia modellből számított és a redukált adatok szórásai. A nehézségi rendellenességek szórása megegyezik C_0 értékével

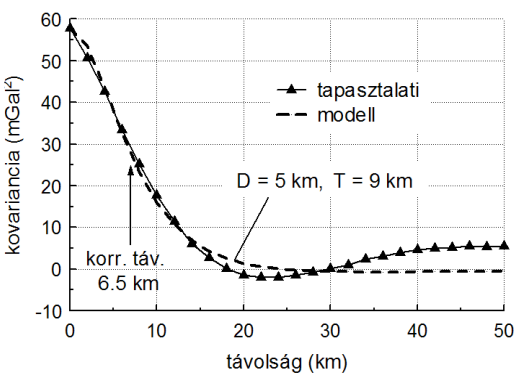
mennyiség	redukált adatok szórása	modellből számított szórás
magassági rendellenesség	±0.120 m	±0.083 m
függővonal elhajlás	±1.1-1.2 "	±1.13 "
vízszintes gravitációs gradiens	±14-15 E	±15.2 E

A 2. és 3. ábrákon láthatók a nehézségi rendellenességek és kvázigeoid undulációk (GPS/szintezés) modellből számított ACF-jei. A következőkben ismertetett számításokhoz ezeket az ábrán feltüntetett ACF paramétereket használtuk fel. A kovariancia modell paramétereinek változására a tapasztalataink alapján a függővonal elhajlások és a nehézségi gradiensek voltak a legérzékenyebbek.

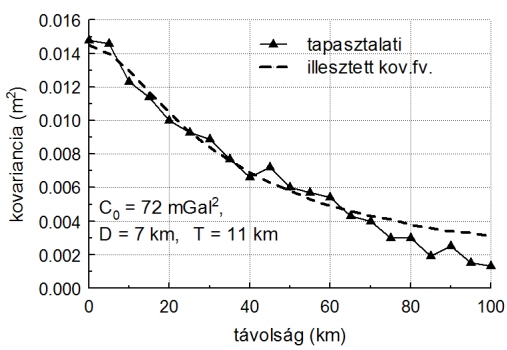
Ezek után a nehézségi rendellenességek, függővonal elhajlások és GPS/szintezési adatok már további nehézségek nélkül kombinálhatóak voltak a kollokációs becslés elvégzése céljából a választott konzisztens kovariancia modell segítségével. A különböző jellegű adatok egymáshoz viszonyított súlyozását tapasztalati úton végeztük, megfigyelve a predikcióból kapott eltéréseket a számított pontokban. A vízszintes nehézségi gradienseket (Eötvös-inga méréseket) azonban egy kétlépéses eljárásban hasznosítottuk. Először a kiválasztott 3726 pontbeli vízszintes gradiensekből, amelyeket ±5 E középhibával jellemeztünk, és a maradék csillagászati függővonal elhajlásokból függővonal elhajlás predikciót végeztünk mind a 3726 pontban. Ezt a ±5 E középhiba értéket a nehézségi rendellenességekkel és vízszintes nehézségi gradiensekkel végzett tesztszámításaink eredményezték.

A mért csillagászati függővonal elhajlásokat pedig a ±0.3"-es mérési középhibával vittük be a fenti predikcióba.

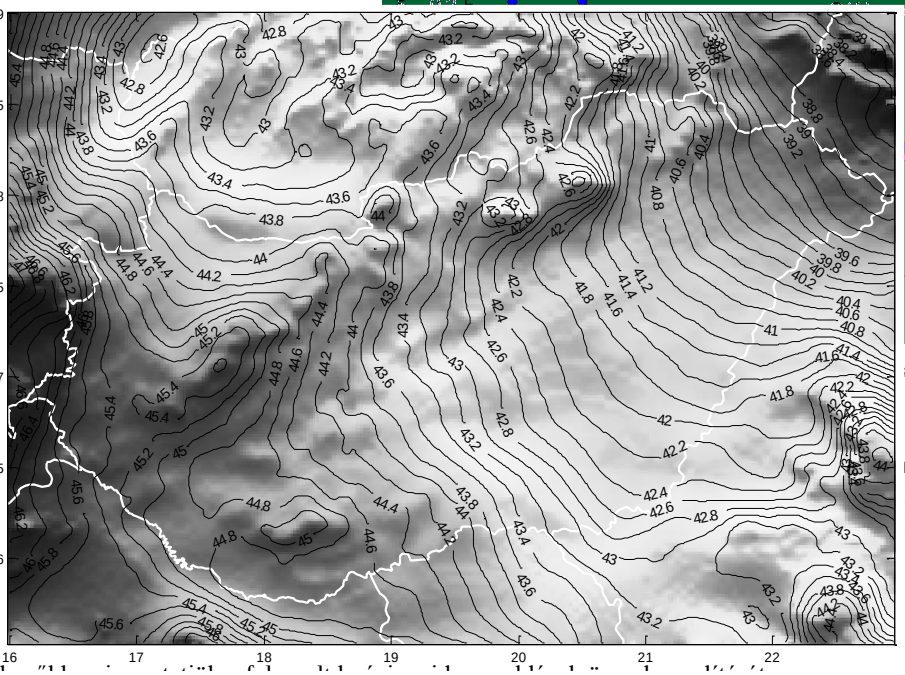
A második számítási lépésben ezeket a becsült fiktív függővonal elhajlásokat a predikciós hibáikkal együtt bevittük egy közös LKN kollokációs megoldásba a nehézségi rendellenességek, függővonal elhajlások és GPS/szintezési adatok mellett. Ebben a lépésben LKN kollokációval 14 700 pontban számítottuk ki a kvázigeoid undulációkat.



2. ábra. RTM nehézségi rendellenesség ACF és tapasztalati ACF

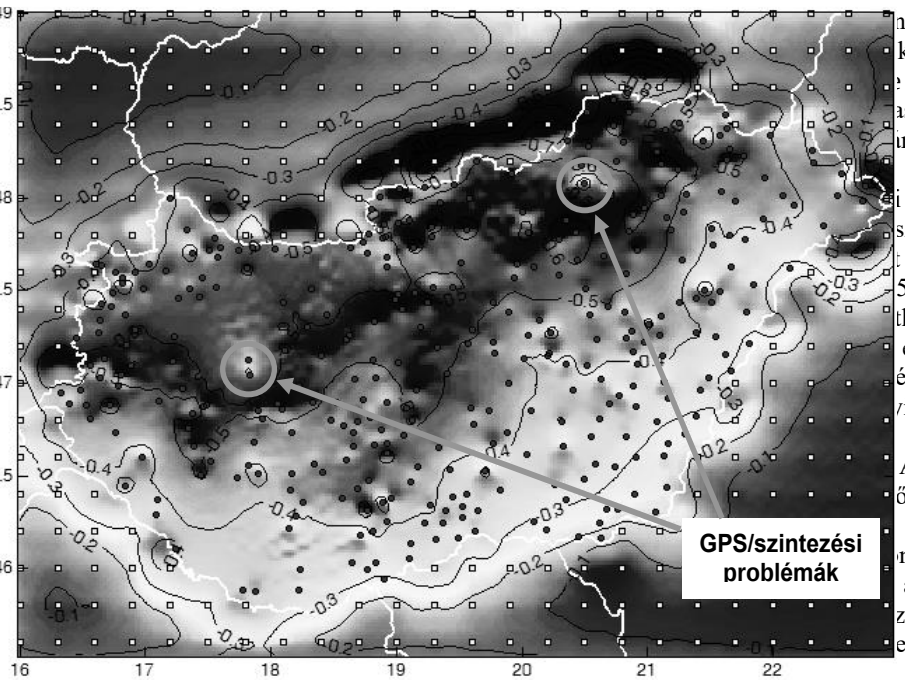


3. ábra. GPS/szintezés ACF – tapasztalati és modell

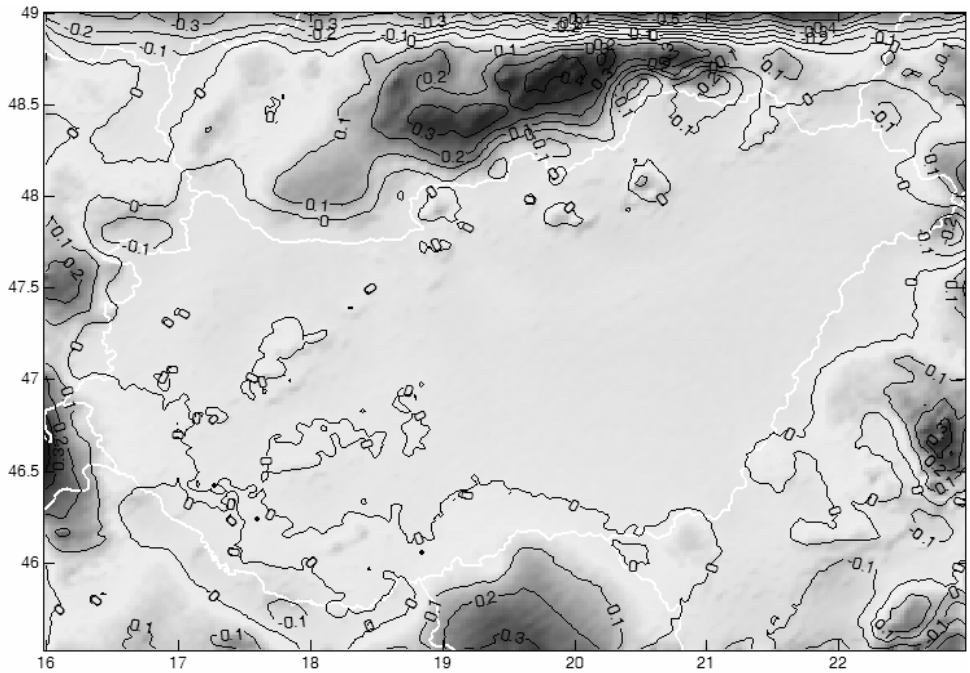


5. ábra. HGTUB2007 kvázigeoid undulációk (m). Ez egy GPS/szintezési adatokhoz illeszkedő asztrogravimetriai és vízszintes gravitációs gradiens (AGGG) megoldás, amelyik a GGM02CB geopotenciális modellre és az SRTM3 magasságokra épül.

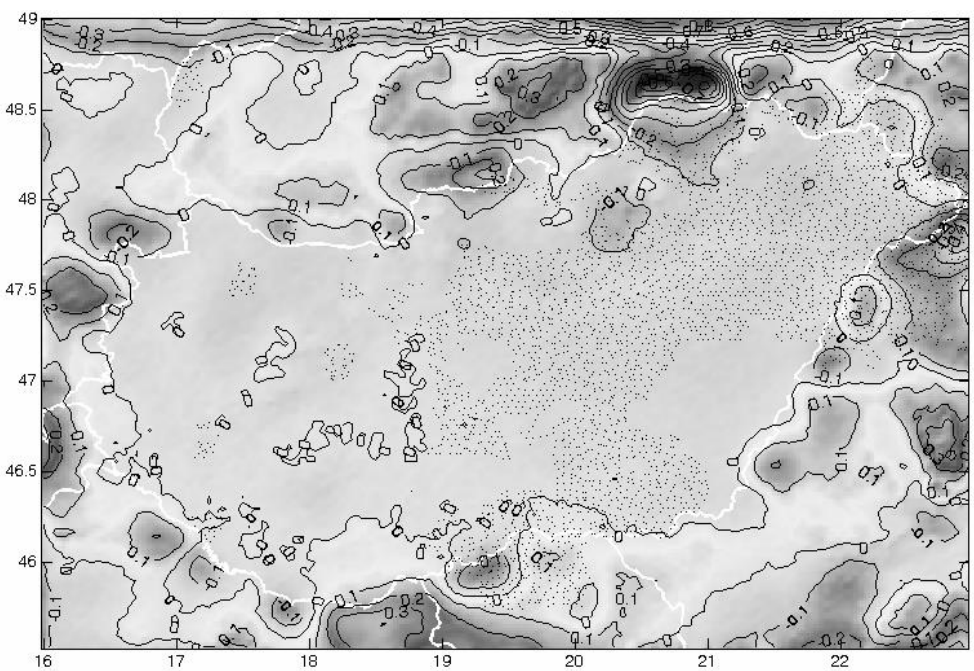
- asztrogravimetriai, GPS/szintezési és vízszintes gravitációs gradiens (AGGG)



6. ábra. Az asztrogravimetriai és a GPS/szintezéshez illeszkedő asztrogravimetriai kvázigeoid megoldások különbsége (m). A szürke pontok jelölik a GPS/szintezési adatok helyét és az ország területén kívüli négyzetek a mindkét megoldáshoz felhasznált EGG97-es kvázigeoid undulációkat. A nyilak azokat a helyeket jelzik, ahol a két megoldás jelentősen eltér egymástól, ami a GPS/szintezési adatok problémáira utal.



7. ábra. A GPM98CR és GGM02C geopotenciális modelleken alapuló és a GPS/szintezési adatokra illeszkedő AGG megoldások eltérései (m)



8. ábra. A vízszintes gravitációs gradiensek bevonásából eredő kvázigeoid unduláció különbségek az AGG és AGGG illeszkedő megoldása esetében (m). Az ábrán látható pontmező a felhasznált gradiens mérések eloszlását szemlélteti.

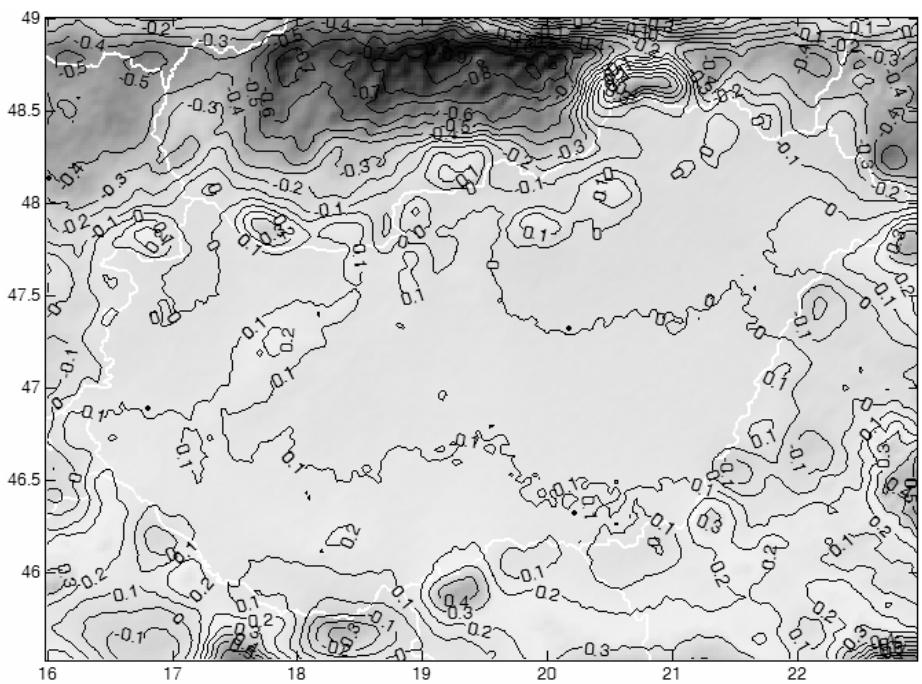
Utolsóként említjük meg azt az összehasonlítást, amelyet a korábbi HGTUB2000B jelű gravimetriai geoidmegoldásunkkal végeztünk el (Tóth és Rózsa 2000, Völgyesi et al. 2005). Ezt a megoldást spektrális kombinációs eljárással határoztuk meg, ugyanúgy, mint ahogy az európai EGG97-es geoid számítása is történt. Az eltérések az ország területén kívüli magas hegyvidéken elérik a 90 cm-t is, de az ország területén belül jóval kisebbek, általában 10 cm alattiak (9. ábra). Ezek a nagyobb eltérések feltehetően abból adódtak, hogy a HGTUB2000B megoldásban az adatok között Magyarország területén kívülről is voltak nehézségi rendellenesség értékek, és valószínűleg a felhasznált geopotenciális modellek is különböztek.

A kombinált megoldás becsült predikciós hibái az országon belül 1-2 cm-esek, az OGPSH felhasznált pontjain a választott súlyozás miatt gyakorlatilag nulla értékűek (10. ábra). Az EUVN GPS/szintezési pontjaiból (Ádám et al. 2000, Ihde et al. 2000) 7 esik a számítási területre és ezekben szintén ellenőriztük a számított AGGG megoldást. Ez esetben az átlagos eltérés – 0.136 m és az eltérések szórása ± 4.2 cm. Megjegyezzük, hogy ez az átlagos eltérés megegyezik azzal a 14 cm-es eltéréssel, amelyik az UELN és a magyar felsőrendű szintezési hálózat magasságai között van (http://crs.bkg.bund.de/evrs/Relations.html).

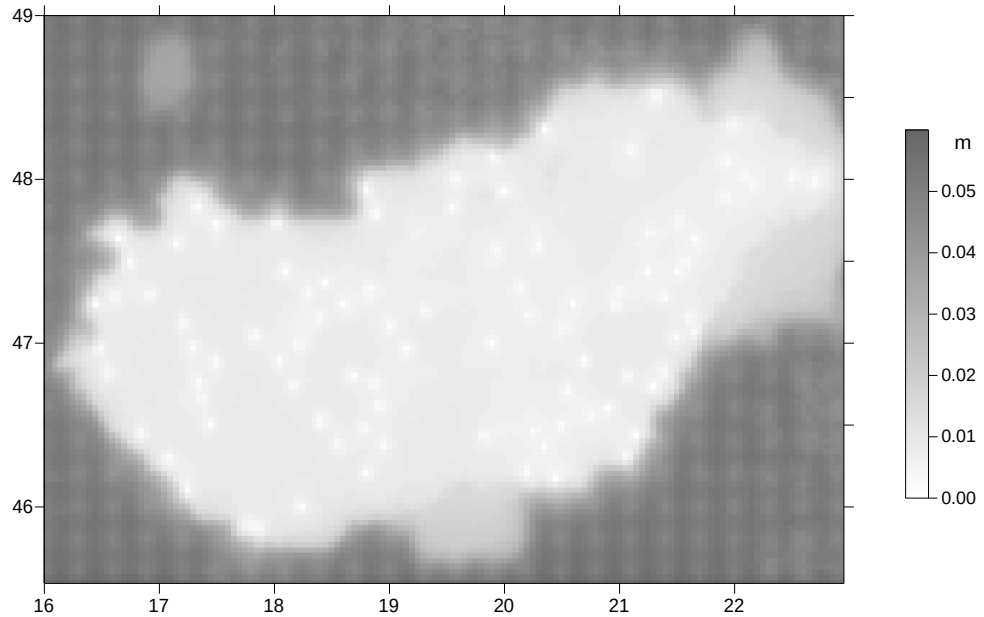
5 Következtetések és további feladatok

Tanulmányunkban bemutattunk egy kísérleti kvázigeoid modellt, amely Magyarországon elsőként úgy készült, hogy abban különböző gravimetriai, csillagászati geodéziai, GPS/szintezési és felszíni nehézségi gradiens mérések együttesen egy *közös* számítási eljárásban lettek felhasználva. A megoldás jelentős újdonsága az, hogy abban már – bár közvetetten, függővonal elhajlás predikción keresztül – de szerepelnek a hazai Eötvös-inga mérések is.

Amint arra már utaltunk, a számításban felhasznált GPS/szintezési adatok némelyike nem jól illeszkedett az asztrogravimetriai adatokból számított megoldáshoz. Nyilvánvaló, hogy a jövőben a cm pontos geoid meghatározásához fontos lenne olyan GPS hálózati pontok létesítése illetve felhasználása, amelyeknek a szintezett magasságai felsőrendű magassági alappontokból vannak levezetve. Ez remélhetően meg fog valósulni az országos magassági alaphálózatunk újramérése kap-



9. ábra. A HGTUB2007 és a HGTUB2000B geoidmegoldások eltérései (m)



10. ábra. A HGTUB2007 megoldás becsült predikciós hibái. A súlyozás miatt a felhasznált OGPSH szintezési pontokon ezek gyakorlatilag zérus értékűek.

csán. Másrészt mivel a függővonal elhajlás adatok közvetlen információt szolgáltatnak a geoidfelület normálvektorának helyzetéről, ezért a svájci példa nyomán (Marti 2006) a pontosság növelését lehetne elérni további ilyen jellegű mérések felhasználásával. Erre a célra jól használható lenne pl. egy digitális zenitkamera.

Habár a rendelkezésre álló gravimetriai adatok száma megfelelő, továbbra is szükség lenne néhány területen a hiányzó gravimetriai adatok sűrítésére, illetve ilyen területeken előnyösen lehetne felhasználni a már rendelkezésre álló Eötvös-inga méréseket is.

Amint már a 2. részben említettük, egy következő kvázigeoid megoldás számításához a nagy felbontású EGM2008-as geopotenciális modellt fogjuk felhasználni. Ugyanis a legújabb, folyamatban levő vizsgálataink szerint ez a modell már sokkal jobban illeszkedik a meglevő adatainkhoz, nem csak a megnövelt felbontása, hanem a számításához felhasznált legújabb mesterséges holdas mérések miatt is.

Előnyös lenne szintetikus tömegmodellek, különösen a Pannon medence litoszféra modelljének az alkalmazása is, elsősorban a számítási eljárás és szoftver tesztelése céljára (Papp és Kalmár 1996). Az LKN kollokáció számítási eljárása megfelel a jövőbeni GOCE mesterséges hold méréseinek a felhasználására is egy kombinált geoid meghatározása céljából.

A fent említett problémák és okok miatt a bemutatott új kvázigeoid megoldás csak előzetesnek tekinthető és tervezzük egy újabb és még pontosabb megoldás elkészítését a felmerült nehézségek megoldása után.

Köszönetnyilvánítás. Ez a kutatást támogatta az Országos Tudományos Kutatási Alap (OTKA) a T046718 és K60657 sz. pályázatok keretében. A felhasznált adatokat részben az ELGI és a FÖMI szolgáltatta tudományos együttműködés keretében. Ezen kívül megköszönjük C.C. Tscherning-nek és R. Forsberg-nek a GRAVSOFT programcsomag felhasználásának lehetőségét az elvégzett számítások során, továbbá Kenyeres Ambrusnak és Papp Gábornak a cikk átnézése során tett értékes észrevételeit.

Hivatkozások

Ádám J, Augath W, Brouwer F, Engelhardt G, Gurtner W, Harsson BG, Ihde J, Ineichen D, Lang H, Luthardt J, Sacher M, Schlüter W, Springer T, Wöppelmann G (2000): Status and Development of the European Height Systems. In: Proceedings of the IAG General Assembly, Birmingham, July 18-30, In: IAG Symposia, 121, 55-60, Geodesy Beyond 2000, Springer, Berlin Heidelberg, New York.

Ádám J, Tokos T, Tóth Gy (2002): Magassági mérőszámok és azok kapcsolata Magyarországon. Geodézia és Kartográfia, 54;1, 5-10.

Denker H, Torge W (1997): The European Gravimetric Quasigeoid EGG97 - An IAG Supported Continental Enterprise. In: R. Forsberg, M. Feissel, R. Dietrich (eds.): Geodesy on the Move - Gravity, Geoid, Geodynamics and Antarctica. In: IAG Symposia, 119, 249-254, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Farr TG, Kobrick M (2000): Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. Eos, Trans. American Geophys. Union 81, 583–585.

Tímár G, Telbisz T, Székely B (2003): Űrtechnológia a digitális domborzati modellezésben: az SRTM adatbázis. Geodézia és Kartográfia, 55; 12, 11-15.

Forsberg R (1984): Local Covariance Functions and Density Distributions. Reports of the Department of Geodetic Science and Surveying, Report No. 356, The Ohio State University, Columbus, Ohio.

Forsberg R (1987): A New Covariance Model for Inertial Gravimetry and Gradiometry. Journal of Geophysical Research, 92; B2, 1305-1310.

Forsberg R, Tscherning CC (1981): The Use of Height Data in Gravity Field Approximation by Collocation. Journal of Geophysical Research, 86; B9, 7843-7854.

Ihde J, Ádám J, Gurtner W, Harsson BG, Sacher M, Schlüter W, Wöppelmann (2000): The EUVN Height Solution – Report of the EUVN Working Group – Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung, 61., München 2000, ISBN 3 7696 9623 9.

Kenyeres A (1999): 340 GPS/levelling derived height anomalies in Hungary. File OGPSH340.DAT, Status: 2004.08.05. (personal communication).

Kenyeres A, Virág G (1998): Testing of Recent Geoid Models with GPS/Leveling in Hungary. Proceedings of the Second Continental Workshop on the Geoid in Europe. Vermeer M. and Ádám J. (Eds.), Reports of the FGI, 98:4, 217-223.

Marti U (2006): Comparison of High Precision Geoid Models in Switzerland. Proceedings of the IAG Scientific Assembly, Cairns. Proceedings of the IAG, 130, 377-382, Springer Verlag, Hamburg.

Papp G, Kalmár J (1996): Toward the physical interpretation of the geoid in the Pannonian basin using 3-D model of the lithosphere. IGeS Bulletin, 5, 63-87.

Tóth Gy, Rózsa Sz (2000): New Datasets and Techniques – an Improvement in the Hungarian Geoid Solution. Paper presented at Gravity, Geoid and Geodynamics Conference, Banff, Alberta, Canada July 31-Aug 4, 2000. (available from www.agt.bme.hu/gtoth).

Tóth Gy, Rózsa Sz (2006): Comparison of CHAMP and GRACE geopotential models with terrestrial gravity field data in Hungary. Acta Geod. Geoph. Hung., 41(2), 171-180.

Völgyesi L, Kenyeres A, Papp G, Tóth Gy (2005): A geoidmeghatározás jelenlegi helyzete Magyarországon. Geodézia és Kartográfia, 56; 1, 4-11.

Wenzel G (1998): Ultra hochauflösende Kugelfunktionsmodelle GPM98A und GPM98B des Erdschwerefeldes. In: Freeden W (ed.): Progress in Geodetic Science at GW 98 - Geodätische Woche in Kaiserslautern. Shaker Verlag, 323-331.

A HAZAI GEODÉZIAI HÁLÓZATOK ÉS GEOID MODELLEK VIZSGÁLATA KOORDINÁTATRANSZFORMÁCIÓK ALKALMAZÁSÁVAL

Bányai László[*]*, Gyimóthy Attila*[*]

Investigation of the Hungarian geodetic networks and geoid solutions by means of coordinate transformations *- The introduced coordinate transformations allow the estimation of the geoid, the local datum parameters and the available geoid solutions, too. The local GPS and gravimetric geoids estimated by five-parameter transformations agree well and the spatial orientation parameters are practically the same. The 1 ppm scale discrepancy between the GPS and traditional measurements is also very excellent.*

Keywords: coordinate transformation, geoid determinations, GPS and traditional networks

A bemutatott általánosított koordinátatranszformációs eljárások lehetővé teszik a geoid becslését, a helyi rendszerek dátum paramétereinek meghatározását és a rendelkezésre álló geoid megoldások vizsgálatát is. Az ötparaméteres transzformáció segítségével becsült helyi GPS és gravimetriai geoidok jó egyezést mutatnak, a hozzájuk tartozó térbeli tájékozási paraméterek gyakorlatilag azonosak. A GPS és a hagyományos mérések 1 ppm méretarány eltérése szintén kedvező érték.

Kulcsszavak: koordinátatranszformáció, geoid meghatározás, GPS és hagyományos hálózatok

1 Bevezetés

A korábbi tanulmányaink során (Bányai 2005, 2008) bemutattuk és részletesen megvizsgáltuk azt a térbeli transzformációs eljárást, ahol a geocentrikus (ETRF89≅WGS84/GRS80) és a helyi (HD72, IUGG GRS67) rendszerek közötti hasonlósági transzformáció során a helyi rendszerre vonatkozóan elhanyagolt geoidundulációkat is ismeretlenként lehet figyelembe venni.

A geoid-ismeretlenek bevezetése egy valódi és két közelszingularitást eredményezett. A valódi szingularítás a legkisebb négyzetes kiegyenlítésnél szokásos módon egy geoid-ismeretlen rögzítésével, vagy a szabadhálózat elvének megfelelően a négyzetösszegük minimalizálásával oldható fel.

A közelszingularitások a forgatási ismeretlenekhez, különösen az X és Y tengelyek körüli értékekhez (R_X , R_Y) kapcsolódnak. A közelszingularitás ebben az esetben azt jelenti, hogy a normálegyenletek matematikailag ugyan invertálhatók, de a becsült értékek elcsordulnak, gyakorlatilag irreális eredményt szolgáltatnak. Ez a hiba a forgatási ismeretlenek számának csökkentésével kezelhető. Olyan eljárást dolgoztunk ki, amely nagyszámú pont esetében is számítástechnikailag optimális megoldást szolgáltat.

A vizsgálatok folytatásaként az eljárásunkba beépítettük a súlyponti hálózatra történő áttérés és az R_Z forgatás alternatívájaként a súlypont, vagy a hálózati kezdőpont ellipszoidi normálisa körüli R_N forgatás becslésének a lehetőségét is. A gyakorlati vizsgálatok során a 24 pontos GPS kerethálózat helyett az ország területére eső 141 elsőrendű vízszintes alappont adatait használtuk fel, amely az új eljárás mellett a rendelkezésünkre álló geoid megoldásoknak, a helyi rendszer tájékozásának és a hálózati hibáknak a vizsgálatára is lehetőséget biztosít.

A dolgozat további részében bemutatjuk a kibővített eljárás alapösszefüggéseit, a vizsgálatba bevont független geoid megoldásokat és a vizsgálatok fontosabb eredményeit.

2 Az eljárás alapösszefüggései

A bevezetőnek megfelelően a helyi rendszerünk tájékozását is vizsgálni szeretnénk, ezért a következő összefüggéseket és az ábrákat a helyi rendszerből a geocentrikus rendszerbe történő átszámítási iránynak megfelelően adjuk meg, azaz a helyi rendszert toljuk, forgatjuk és nyújtjuk/zsugorítjuk

[*]*MTA GGKI, 9400 Sopron, Csatkai u. 6-8.*
E-mail: geomatika@ggki.hu

úgy, hogy az a legkisebb négyzetes értelemben a legjobban illeszkedjen a geocentrikus rendszerben adott GPS koordinátákhoz.

A hagyományos hétparaméteres hasonlósági transzformáció tehát a közismert (1), a geoid-ismeretlenekkel kibővített modell a (2) összefüggéssel írható fel, ahol a *g* alsóindex a geocentrális a *h* alsóindex a helyi rendszerre vonatkozik, *t* az eltolásokat, *R* a forgatásokat, Δm a méretarány egységtől való eltérését, n_h a geoidundulációkat, továbbá φ_h és λ_h a helyi ellipszoidi koordinátákat jelöli. Ha $\rho = 206264.8$ ívmásodperc és a derékszögű koordináták m dimenzióban adottak, a *t* értékeket m, az *R* értékeket ívmásodperc és a Δm értéket *ppm* (mm/km) dimenziókban kapjuk.

$$\begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_h \\ Y_h \\ Z_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_h/10^6 & 0 & -Z_h/\rho & +Y_h/\rho \\ 0 & 1 & 0 & Y_h/10^6 & +Z_h/\rho & 0 & -X_h/\rho \\ 0 & 0 & 1 & Y_h/10^6 & -Y_h/\rho & +X_h/\rho & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \\ \Delta m \\ R_X \\ R_Y \\ R_Z \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_h \\ Y_h \\ Z_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_h/10^6 & 0 & -Z_h/\rho & +Y_h/\rho \cdots & cos\varphi_h cos\lambda_h \\ 0 & 1 & 0 & Y_h/10^6 & +Z_h/\rho & 0 & -X_h/\rho \cdots & cos\varphi_h sin\lambda_h \\ 0 & 0 & 1 & Y_h/10^6 & -Y_h/\rho & +X_h/\rho & 0 \cdots & sins\varphi_h \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \\ \Delta m \\ R_X \\ R_Y \\ R_Z \\ \vdots \\ n_h \end{bmatrix} \tag{2}$$

A rendszer geometriai elrendezését az 1. ábra mutatja, ahol sematikusan a súlypont, vagy a hálózati kezdőpont (*S*) ellipszoidi normálisára vonatkozó topocentrikus koordinátarendszert is feltüntettük az *E,K,N* északi, keleti és normális irányú balsodrásos rendszerben. (Az *E,N* sík az aktuális pont ellipszoid meridián síkjában található.) Az *N* körüli forgatás levezetéséhez a helyi *X,Y,Z* koordinátákat először az *E,K,N* irányú rendszerbe kell áttranszformálni, a transzformált koordinátákat az *N* körül differenciálisan kicsi R_N értékkel el kell forgatni, majd visszatranszformálni az eredeti rendszerbe. Ügyelni kell arra, hogy a két rendszer sodrása eltérő (Seeber 2003). Az így kapott közvetítő egyenletek:

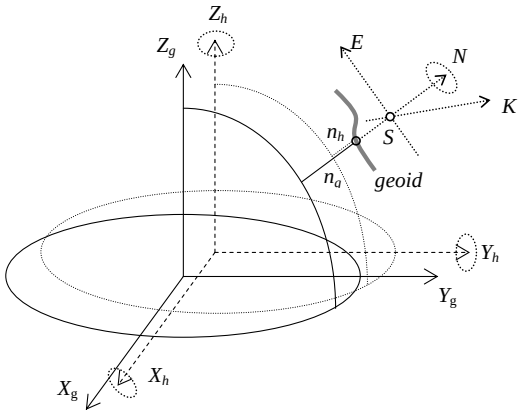
$$\begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_h \\ Y_h \\ Z_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_h/10^6 & (-\sin\varphi_S Y_h + \cos\varphi_S \sin\lambda_S Z_h)/\rho & \cdots & cos\varphi_h cos\lambda_h \\ 0 & 1 & 0 & Y_h/10^6 & (\sin\varphi_S X_h - \cos\varphi_S \cos\lambda_S Z_h)/\rho & \cdots & cos\varphi_h sin\lambda_h \\ 0 & 0 & 1 & Z_h/10^6 & (-\cos\varphi_S \sin\lambda_S X_h + \cos\varphi_S \cos\lambda_S Y_h)/\rho & \cdots & sins\varphi_h \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \\ \Delta m \\ R_H \\ \vdots \\ n_h \end{bmatrix}, \tag{3}$$

ahol φ_S és λ_S a súlypont, vagy a hálózati kezdőpont helyi ellipszoidi koordinátái.

A súlyponti, vagy a hálózati kezdőponti rendszerre történő áttérésnél az (1-3) egyenletek jobb oldalán az

$$\begin{bmatrix} X_h \\ Y_h \\ Z_h \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X_h - X_S \\ Y_h - Y_S \\ Z_h - Z_S \end{bmatrix} \tag{4}$$

helyettesítést kell alkalmazni, azaz a *S* indexel jelölt kezdőpontra vonatkozó eltolásokat és elfordulásokat keressük a geocentrális rendszerben.



1. ábra. Transzformációk geometriai elrendezése

Az egyenletek bal oldalán továbbra is az eredeti koordináta különbségek szerepelnek.

A geocentrálisból a helyi rendszerbe történő átszámításnál a *g* és *h* indexeket értelemszerűen fel kell cserélni. Triviális, hogy ekkor a becsült transzformációs paraméterek ellentétes előjelűek lesznek, de a paraméterek abszolút értéke (különösen a forgatások esetében) nem feltétlenül azonosak a koordináták 100 m körüli eltéréséből adódóan (Bányai 2005).

Az (1-3) közvetítő egyenleteket írjuk fel a

$$\boldsymbol{b} = \left[\boldsymbol{A}\boldsymbol{G}\right] \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_p \\ \boldsymbol{x}_n \end{bmatrix} + \boldsymbol{v} \tag{5}$$

particionált alakban, ahol $\boldsymbol{b}$ a tisztatagok vektora, $\boldsymbol{A}$ az $\boldsymbol{x}_p$ transzformációs paraméterek vektorának, $\boldsymbol{G}$ az $\boldsymbol{x}_n$ geoidunduláció ismeretlenek vektorának együttható mátrixai és $\boldsymbol{v}$ a mérési javítások vektora. Egységnyi súlyozást alkalmazva a normálegyenletek a

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{A}^t\boldsymbol{b} \\ \boldsymbol{G}^t\boldsymbol{b} \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}^t\boldsymbol{A} & \boldsymbol{A}^t\boldsymbol{G} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{G}^t\boldsymbol{A} & \boldsymbol{G}^t\boldsymbol{G} & \boldsymbol{c} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{c}^t & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_p \\ \boldsymbol{x}_n \\ k \end{bmatrix} \tag{6}$$

alakban írhatók fel ahol a $\boldsymbol{c}$ kényszerfeltételi vektor a *k* korreláta ismeretlenhez tartozik. A geoidundulációk négyzetösszegének minimalizálásakor $\boldsymbol{c}$ minden eleme 1, míg egyetlen érték rögzítésekor csak az aktuális elem 1, a többi 0 értékű. Az egyenletrendszert a következőképpen is particionálhatjuk:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{b}_p \\ \widehat{\boldsymbol{b}}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{N}_{11} & \widehat{\boldsymbol{N}}_{12} \\ \widehat{\boldsymbol{N}}_{12} & \widehat{\boldsymbol{N}}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_p \\ \widehat{\boldsymbol{x}}_n \end{bmatrix}, \text{ ahol } \widehat{\boldsymbol{N}}_{22} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{G}^t\boldsymbol{G} & \boldsymbol{c} \\ \boldsymbol{c}^t & 0 \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Mivel könnyen belátható, hogy $\boldsymbol{G}^t\boldsymbol{G} = \boldsymbol{I}$, azaz egy olyan egységmátrix, amelynek a mérete azonos a pontok számával, ezért az $\widehat{\boldsymbol{N}}_{22}$ mátrix tárolására sincs is szükség, ráadásul az inverze a kényszerfeltételeknek megfelelően közvetlenül fel is írható. Az optimális megoldáshoz ezért lényegében csak az $\boldsymbol{N}_{11}$ mátrixot kell tárolni, a gyakorlati megoldás a particionált egyenletrendszerek megoldására vezethető vissza (Detrekői 1991).

A teljes eljárásnál a következő opciók közül választhatunk:

1. paraméter becslés iránya: a, helyi > geocentrikus
   b, geocentrikus > helyi
2. geoid becslés: a, nincs
   b, négyzetösszeg minimum
   c, rögzített kezdőérték

3.	forgatási középpontok:	a, az X,Y,Z rendszer origója b, a hálózat súlypontja c, hálózat kezdőpontja
4.	forgatási irányok:	a, R_X , R_Y , R_Z b, R_Z c, súlyponti R_N d, kezdőponti R_N

Az opciók tehát egyetlen adatrendszer esetében is $2 \times 3 \times 3 \times 4 = 72$ különböző feldolgozást tesznek lehetővé, amelyek többsége nem rendelkezik gyakorlati jelentőséggel. A vizsgálatunk szempontjából hasznos variációkat és a levonható következtetéseket a felhasznált adatok ismertetését követően mutatjuk be.

3 A vizsgálatba bevont adatok

A vizsgálatokat az ország területére eső 141 elsőrendű alappontra vonatkozó adatok segítségével végeztük el. A pontok EOVA (Egységes Országos Vízszintes Alapponthálózat) koordinátáit, Balti magasságait és az OGPSH (Országos GPS Hálózat) koordinátáit használtuk fel a vizsgálatokhoz. Ez utóbbiak az OGPSH korábbi kiegyenlítéséből származnak.

Az 1. ábra nem csak a transzformációs egyenletekkel, de az elsőrendű hálózattal és a geoiddal kapcsolatos előzetes információkat is tartalmazza. Vastag vonallal jelöltük az *S* hálózati kezdőpont meridián síkjában elképzelt geoid profilt.

A hálózati kezdőpont a hagyományos mérések ellipszoid felszínén történő kiegyenlítésénél speciális szerepet tölt be (Bomford 1962, Homoródi 1966, Biró 1985). A háromszögelési méréseket először a kiválasztott ellipszoid felületén egyenlítik ki, majd az úgynevezett csillagászati kiegyenlítéssel a felületen kis mértékben eltolják és elforgatják. Ekkor a hálózati kezdőpont két függővonal elhajlás összetevőjét (és geoidundulációját) kezelik ismeretlenként, amit azzal a feltétellel határoznak meg, hogy a többi Laplace pontokra vonatkozó eltérések négyzetösszege minimum legyen. Elméletileg a Laplace pontokon csillagászati úton mért azimutok biztosítják azt, hogy a helyi ellipszoid tengelyei párhuzamosak legyenek a földi térbeli derékszögű koordinátarendszer (valamelyik, jelenleg ITRS megvalósulásának) tengelyeivel.

A hazai hálózatunk kialakítása azonban ennél jóval összetettebb, és több fázisban is készült (Lukács 2003). A vizsgálataink szempontjából azonban elegendő annyit figyelembe vennünk, hogy a hálózati kezdőpontunk n_h=6.56 m geoidundulációját a volt szocialista országok Pulkovo dátumú közös kiegyenlítése alapján rögzítették (Biró 2008). A csillagászati mérések sűrítése lehetővé tette a helyi geoidkép csillagászati szintezéssel történő meghatározását is (Homoródi 1966, Biró 1985). Az ebből származó átlagértékekkel a távmérővel levezetett háromszög oldalakat a geoidról az ellipszoid felületére redukálták. Az akkor levezetett geoidkép ugyan nem áll a rendelkezésünkre, de a FÖMI a vizsgálatokhoz szükséges alapadatokat kérésre a tudományos közösség rendelkezésére bocsátja. Ezekkel az adatokkal intézetünkben is több geoid megoldást készítettünk.

A vizsgálatba bevont változat (AGG) pontossága 15-30 cm körüli érték, ami részben az adatok viszonylagos ritkaságának a következménye.

Vizsgálatainkba a FÖMI KGO gravimetriai geoidját is bevontuk (Kenyeres et al. 2000), ahol a geoidundulációk a geocentrikus GRS80 forgási ellipszoidra vonatkoznak (GGG, 2. ábra). A hálózati kezdőpontban n_g=42.78 m. A geoid pontossága 5-10 cm körüli értékkel jellemezhető.

Az úgynevezett GPS geoidot könnyen előállíthatjuk, ha a GPS koordinátából kiszámított WGS84 ellipszoid feletti magasságokból kivonjuk a pontok Balti magasságát. Mivel a GPS koordináták pontossága 1 cm körüli érték a geoidundulációk pontosságát a Balti magasságok pontosságával jellemezhetjük, amely trigonometriai magasságmérést feltételezve 5-10 cm körüli érték is lehet.

Az utolsóként vizsgált megoldás a geocentrikus gravimetriai geoid helyi rendszerre átszámított változata (HGG, 3. ábra), amely a klasszikus módszernek megfelelően történt (Bomford 1962). A GRS80 ellipszoidra vonatkozó geoidot átszámították a GRS67 forgási ellipszoidra, amely csak az eltérő méreteket veszi figyelembe, majd a párhuzamosnak tekintett rendszerek ΔX, ΔY, ΔZ eltolási

értékeit a „Jovakipart” alappont HD72 és OGPSH koordinátái alapján határozták meg (Kenyeres 2008). Ez lényegében háromparaméteres transzformációt jelent. (A hálózati kezdőpont geoid-undulációja ebben az esetben 6.54 m értéknek adódott.)

Az 1. táblázat a három releváns ellipszoid geometriai adatait tartalmazza. Megállapíthatjuk, hogy geometriai értelemben a GRS80 és WGS84 ellipszoidok gyakorlatilag azonosnak tekinthetők, de a HD72 dátum IUGG GRS67 ellipszoid fél-nagytengelyei 23 és 22 m értékkel nagyobbak.

Az 1. ábráról azt is leolvashatjuk, hogy a fizikai valóságban csak egyetlen geoidról (és földfelszínről) beszélhetünk. A bemutatott geocentrikus és helyi geoid megoldások nagyságrendi eltérése csak annak a következménye, hogy térben eltérően elhelyezett és különböző méretű ellipszoidra vonatkoznak. A 2. és 3. ábra tehát elméletileg ugyan azt a térbeli felületet ábrázolja.

Képzeljünk el a geoid felszínén egy 1000 m-es távolságot, amelynek a GRS67-re vonatkozó átlagos geoidi távolsága n_h=6.56 m és a WGS84-ra vonatkozóé pedig n_g=42.78 m, ami azonos a kezdőpontban ismert értékekkel. Redukáljuk a távolságot a szokásos közelítéssel az alapfelületekre:

$$d_h = 1000\frac{6372000}{6372000+6.56} = 999.999\text{m} \qquad (-1\,\text{ppm rövidülés})$$
$$d_g = 1000\frac{6372000}{6372000+42.78} = 999.993\text{m} \qquad (-7\,\text{ppm rövidülés}) \quad , \tag{8}$$

ami azt mutatja, hogy a vetítés következtében a WGS84 felszínén jóval rövidebbek a vetített távolságok. (Az elméletileg pontosabb konkrét Gauss görbületek is hasonló értékeket szolgáltatnának.)



2. ábra. GGG gravimetriai geoid – GRS80 (Kenyeres et al. 2000)



3. ábra. HGG helyi gravimetriai geoid – GRS67 (Kenyeres 2008)

1. táblázat. Három forgási ellipszoid geometriai paraméterei

ellipszoid	fél-nagytengely (m)	lapultság	fél-kistengely (m)
GRS67	6 378 160.0	1/298.247167427	6 356 774.5161
GRS80	6 378 137.0	1/298.257222101	6 356 752.3141
WGS84	6 378 137.0	1/298.257223563	6 356 752.3142

4. A gyakorlati vizsgálatok és eredményei

A rendelkezésünkre álló adatok és a tervezett vizsgálatok ismeretében már kiválaszthatjuk az alkalmas feldolgozási opciókat is. Ahogy azt már említettük, a hétparaméteres transzformáció és az együttes geoid meghatározás nem alkalmazható, de a hét paraméteres transzformáció a helyi undulációk elhagyásával a vizsgálatunk referencia eredményeként kezelhető (M.1 vizsgálat). A következő két hétparaméteres megoldásnál a helyi asztrogeodéziai geoidot (M.1.1 vizsgálat) és a helyi gravimetriai geoidot is alkalmaztuk (M.1.2 vizsgálat). Az utóbbi két megoldás azt tükrözi, hogy a Balti magasságok és a relatív geoid megoldások hogyan illeszkednek a GPS ellipszoid feletti magasságokhoz, amelyek a globális geoid undulációkat is tartalmazzák.

Az eredményeket a 2. táblázat foglalja össze, amely két lényeges információt hordoz. A helyi geoidok figyelembe vétele a +2 ppm relatív méretarány eltérést +1 ppm értékre csökkentette, és a gravimetriai geoid sokkal jobb összhangot mutat, mint a vizsgálatba bevont asztrogeodéziai geoid. Az M.1.2 vizsgálatnál a súlyegység (σ_0) és a becsült paraméterek (σ) középhibája is felére csökkent, továbbá a magassági irányú mérési javítások (v_H) csak 9 cm szórást mutatnak a -29 és +27 cm szélső értékek között. Ez a GPS és gravimetriai geoid, továbbá a magasságok ellentmondásait tükrözi. A geoid alkalmazása a vízszintes javítások (v_K, v_E) esetében nem eredményezett javulást.

A hálózatunk kezdőpontja és a súlypontja viszonylag közel esik egymáshoz, ami a gyakorlati számítások szempontjából ugyan elhanyagolható különbséget eredményezne, de a hálózati kezdőpont csillagászati kiegyenlítés során betöltött speciális szerepe miatt a kezdőpont választása elméletileg sokkal indokoltabb.

A következő vizsgálati blokkban ezért a kezdőponti rendszerben a geoidot is meghatároztuk úgy, hogy a kezdőpontban ismert értéket rögzítettük és a kezdőpont körüli elfordulást is megbecsültük (M.2 vizsgálat). Az előző vizsgálatokhoz hasonlóan most is alkalmaztuk a geoid megoldásokat, de a kezdőponti rendszerben azokhoz javításokat is rendeltünk, a négyzetösszeg minimum feltételnek megfelelően (M.2.1 vizsgálat asztrogeodéziai, M.2.2 vizsgálat gravimetriai helyi geoid).

Az eredményeket a 3. táblázat foglalja össze. A transzformációból származó geoidot a 4. ábra mutatja, amely első ránézésre hasonlít a gravimetriai geoidhoz (3. ábra). Megállapíthatjuk, hogy a transzformációval együtt történő geoid becslés jó összhangot mutat az M.1.2 megoldással. A becsült paraméterek kisebb középhibája a kezdőponti rendszer jobb kondíciójának a következménye. Az eltolások (t_X , t_Y , t_Z) néhány méteres eltérése is a kezdőpontok megválasztásának a következménye.

Az eddigi vizsgálatoknál a fizikailag azonos pontok a földfelszínén helyezkedtek el. Ha áttérünk a geoidra vetített azonos pontokra, akkor a Balti magasságokat, mint hibaforrást kiejthetjük. (Ha az M.2 vizsgálattal analóg a GRS67 felületi pontokat transzformáljuk az WGS84 rendszerbe úgy, hogy az ellipszoidi magasságból levonjuk a Balti magasságokat, az M.2 vizsgálattal gyakorlatilag azonos eredményt kapunk, mivel a magasságok hibáit most áthelyezzük a WGS84 rendszerbe.)

A következő vizsgálati egység első megoldásánál transzformációval becsüljük meg a helyi gravimetriai geoidot úgy, hogy rögzítjük a kezdőponti értéket és a WGS84 felületi pontokhoz a globális gravimetria geoidot adjuk hozzá (M.3 vizsgálat).

A következő két megoldásnál a GRS67 felületi pontokhoz adjuk hozzá a relatív, a WGS84 felülethez pedig az abszolút gravimetriai geoidot. Hétparaméteres transzformációval ellenőrizzük az egybevágóságukat (M.3.1 vizsgálat), majd az ellentmondásokat vizsgáljuk meg a geoid becsléssel úgy, hogy az eltérések négyzetösszege minimum legyen (M.3.2 vizsgálat).

Az eredményeket a 4. táblázat foglalja össze. A helyi geoid képet az 5. ábra mutatja, amely a korábban megadott kezdőpontra vonatkozó 2 cm eltérésen kívül gyakorlatilag azonosnak tekinthető a 3. ábrán bemutatott geoiddal. A 4. és 5. ábra összehasonlítása a gravimetriai és a GPS geoidok közötti ismert regionális jellegű eltéréseket mutatja.

Az M.3.1 vizsgálat a két gravimetriai eredetű felület azonosságát mutatja. Az M.1.2 és a hasonló M.3.1 megoldások lényegesen eltérnek az M.1 referencia megoldástól, amely a helyi geoid hiányát tükrözi. Az M.2 és M.3 eredmények is hasonlóak, de a tájékozási paraméterek az M.1.2 és M.3.1 megoldáshoz viszonyított nagyobb eltérései a különböző modellekből származnak.

A geoid nélküli megoldástól eltekintve a Δm paraméterek gyakorlatilag +1 ppm értéknek tekinthetők minden további vizsgálat esetében is. A horizontális javítások (v_K, v_E) azonban minden eset-

ben csak néhány cm eltérést mutatnak és összhangban vannak más publikációk eredményeivel is (Busics 2009, Virág 1999). A nagyobb horizontális eltérések tehát lényegében nem a geoid információk és a transzformációs modellek következményei. A vizsgálatba bevon csillagászati geoid azonban kevésbé illeszkedik az adatokhoz, mint a relatív gravimetriai geoid.

5 Az eredmények összefoglalása

A hétparaméteres térbeli hasonlósági transzformáció jól használható általános értelemben vett ponthalmazok alakjának és méretének az összehasonlítására. A hagyományos helyi elhelyezésű geodéziai hálózatok esetében azonban a kezdőponti rendszerre vonatkozó ötparaméteres transzformáció,

2. táblázat. A vizsgálatok összefoglalása
(*f* a szabadság fok, σ_0 *a súlyegység és* σ *a paraméterek középhibája,* v_K v_E v_H *a mérési javítások)*

	M.1 vizsgálat HD72 ⇒ GPS nincs helyi geoid				M.1.1 vizsgálat HD72 ⇒ GPS AGG helyi geoid				M.1.2 vizsgálat HD72 ⇒ GPS HGG helyi geoid			
f	417				417				417			
σ_0	0.268	σ			0.270	σ			0.135	σ		
t_x	52.42	1.50			44.57	1.52			53.14	0.76		
t_y	-63.23	1.45			-61.29	1.46			-68.28	0.72		
t_z	-16.00	1.62			-9.86	1.63			-15.20	0.81		
Δm	2.027	0.15			1.062	0.15			1.017	0.08		
R_X	0.107	0.05			0.107	0.05			0.234	0.02		
R_Y	0.143	0.06			-0.172	0.06			0.143	0.03		
R_Z	0.540	0.04			0.638	0.04			0.430	0.02		
R_N	-	-			-	-			-	-		
	geoid	v_K	v_E	v_H	*geoid*	v_K	v_E	v_H	*geoid*	v_K	v_E	v_H
min.	-	-0.45	-0.40	-0.87	-	-0.44	-0.40	1.09	-	-0.45	-0.41	-0.29
max.	-	0.36	0.42	0.99	-	0.36	0.41	1.39	-	0.36	0.42	0.27
átlag	-	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00
szórás	-	0.17	0.14	0.41	-	0.16	0.13	0.41	-	0.17	0.14	0.09

amely a három tengely körüli elfordulás helyett csak a kezdőpont normálisa körüli elfordulás engedi meg, elméletileg helyesebbnek tekinthető. A kezdőpont ellipszoidi normálisa körüli elforgatás mind a három koordináta összetevőre (*X, Y, Z*) hatással van (3), amit a hétparaméteres transzformáció esetében egymástól függetlenül kezelünk, pedig az eltérések azonos forrásból származnak.

Az ötparaméteres hasonlósági transzformáció további előnye, hogy lehetővé teszi a helyi geoid-undulációk és a paraméterek együttes meghatározását is. A paraméterek a helyi rendszer valós térbeli tájékozási adatait is szolgáltatják (M.2 , M.3 megoldás). Ezek a:

t_X = +57 m , t_Y = -70 m , t_Z = -9 m , R_H = -0.5 ivmásodperc és Δm = +1 *ppm* (mm/km)

kerekített értékkel jellemezhetők. A +1 ppm a két rendszer átlagos technológiai méretarány eltérését jelenti, amely az első rendű hálózat esetében igaz. Egyéb pontoknál ettől lényeges eltérő értékeket is

3. táblázat. A vizsgálatok összefoglalása
(*f* a szabadság fok, σ_0 *a súlyegység és* σ *a paraméterek középhibája,* v_K v_E v_H *a mérési javítások)*

	M.2 vizsgálat HD72 ⇒ GPS GPS helyi geoid becslése				M.2.1 vizsgálat HD72 ⇒ GPS AGG helyi geoid				M.2.2 vizsgálat HD72 ⇒ GPS HGG helyi geoid			
f	278				278				278			
σ_0	0.153	σ			0.153	σ			0.153	σ		
t_x	57.03	0.10			57.27	0.01			57.09	0.01		
t_y	-70.05	0.04			-69.97	0.01			-70.03	0.01		
t_z	-9.35	0.11			-9.07	0.01			-9.27	0.01		
Δm	0.999	0.09			1.059	0.09			1.017	0.09		
R_X	-	-			-	-			-	-		
R_Y	-	-			-	-			-	-		
R_Z	-	-			-	-			-	-		
R_N	-0.499	0.02			-0.498	0.02			-0.498	0.02		
	geoid	v_K	v_E	v_H	*geoid*	v_K	v_E	v_H	*geoid*	v_K	v_E	v_H
min.	5.54	-0.45	-0.40	-	-0.97	-0.45	-0.40	-	-0.37	-0.45	-0.40	-
max.	7.66	0.37	0.42	-	1.48	0.36	0.42	-	0.34	0.36	0.42	-
átlag	6.63	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	-
szórás	0.44	0.17	0.14	-	0.50	0.17	0.14	-	0.10	0.17	0.14	-

kaphatunk. A hagyományos méréseket tehát ezzel az értékkel kell nyújtani, hogy összhangban legyenek a GPS mérésekkel. Ez látszólag ellent mond a (8) összefüggésnek. A WGS84 felületén azonban azért rövidebbek a távolságok, mert a geoidtól jóval távolabb helyezkednek el. Ha a transzformációt az ellipszoidi felületi pontokra írjuk fel (Busics 2009), amelyek a térben nem azonos pontok, akkor negatív átlag értéket kapunk. Ugyan ezt a negatív értéket kapjuk, de durva hibát követünk el, ha a helyi geoid unduláció helyett véletlenül a globális geoidot alkalmazzuk, amely eltolja a felszíni pontokat. A rövidebb GPS hosszak tehát csak az eltérő méretű és elhelyezésű ellipszoid felületen értelmezhetők.

A horizontális javítások eredetére a hagyományos mérések ismételt szabatos redukciója és kiegyenlítése adhat bizonyítható magyarázatot.

4. táblázat. A vizsgálatok összefoglalása
(*f* a szabadság fok, σ_0 *a súlyegység és* σ *a paraméterek középhibája,* v_K v_E v_H *a mérési javítások)*

	M.3 vizsgálat GRS67 ⇒ WGS84 + GGG helyi gravimetriai geoid becslése				M.3.1 vizsgálat GRS67 + HGG ⇒ WGS84 + GGG illeszkedés vizsgálat				M.3.2 vizsgálat GRS67 + HGG ⇒ WGS84 + GGG illeszkedés vizsgálat			
f	278				417				278			
σ_0	0.153	σ			0.125	σ			0.153	σ		
t_x	57.04	0.10			52.84	0.70			57.06	0.01		
t_y	-70.04	0.04			-71.22	0.67			-70.04	0.01		
t_z	-9.33	0.11			-13.99	0.76			-9.32	0.01		
Δm	1.002	0.09			1.005	0.07			1.005	0.09		
R_X	-	-			0.313	0.02			-	-		
R_Y	-	-			0.111	0.03			-	-		
R_Z	-	-			0.372	0.02			-	-		
R_N	-0.499	0.02			-	-			-0.499	0.02		
	geoid	v_K	v_E	v_H	*geoid*	v_K	v_E	v_H	*geoid*	v_K	v_E	v_H
min.	5.63	-0.45	-0.40	-	-	-0.45	-0.40	-0.01	-0.01	-0.45	-0.40	-
max.	7.46	0.37	0.42	-	-	0.37	0.42	0.00	0.01	0.37	0.42	-
átlag	6.55	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
szórás	0.41	0.17	0.14	-	-	0.17	0.14	0.00	0.00	0.17	0.14	-



4. ábra. Ötparaméteres transzformációból származó helyi GPS geoid



5. ábra. Ötparaméteres transzformációból származó helyi gravimetriai geoid

Köszönetnyilvánítás. Köszönettel tartozunk a Földmérési és Távérzékelési Intézetnek a vizsgálatok alapadataiért.

Hivatkozások

Bányai L (2005): Koordinátatranszformáció geoidundulációk becslésével. Geomatikai Közlemények VIII, 69-76.
Bányai L (2008): A műholdas helymeghatározás földtudományi alkalmazása. Geomatikai Közlemények XI, 144.
Biró P (1985): Felsőgeodézia, egyetemi jegyzet Tankönyvkiadó, Budapest.
Biró P (2008): Személyes közlés.
Bomford G (1962): Geodesy. Springer Berlin / Heidelberg, 537.
Busics Gy (2009): AZ ETRS89 és a HD72 vonatkoztatási rendszerek közötti méretaránytényező kérdése. Geomatikai Közlemények XII, 151-161.
Detrekői Á (1991): Kiegyenlítő számítások. Tankönyvkiadó, Budapest. 685.
Homoródi L (1966): Felsőgeodézia, Tankönyvkiadó, Budapest. 614.
Lukács T (2003): Rövid visszapillantás Magyarország vízszintes felsőrendű háromszögelési hálózatára. Geodézia és Kartográfia 9, 25-30.
Kenyeres A, Rózsa G, Papp G (2000): HGEO2000: A step put forward to cm-accuracy gravimetric geoid in Hungary. GGG2000, Banff, Canada.
Kenyeres A (2008): Személyes közlés, nem publikált adatok.
Seeber G (2003): Satellite Geodesy. 2nd Edition. DeGruyter, 589.
Virág G (1999): Az Egységes Országos Vízszintes Alaphálózat vizsgálata az OGPSH tükrében. Geodézia és Kartográfia 5, 8-13.

AZ ETRS89 ÉS A HD72 VONATKOZTATÁSI RENDSZEREK KÖZÖTTI MÉRETARÁNYTÉNYEZŐ KÉRDÉSE

Busics György[*]

The scale factor between ETRS89 and HD72 reference systems *- In this study we discuss the scale factor between the Hungarian classical and the national GPS networks, creating two study-net with 141 and 1146 points. The method of examination is the 3D and 2D transformation models, and the direct comparison of slope and geodesic distances. The estimated -4,3 mm/km mean value reflects the significant scale difference. The likely reason of such geographical distribution of scale is the fact, that during the HD72 adjustment the distances measured by electronic distance meter were fixed.*

Keywords: Hungarian National GPS Network, Hungarian Datum 72, transformation, scale factor

*A cikk a hazai klasszikus vízszintes hálózat és az OGPSH közötti méretarányeltérést mutatja be egy 141 pontos és egy 1146 pontos vizsgálati hálózat kialakításával. A vizsgálat módszerei 3D és 2D transzformációs modelleken és a térbeli vagy ellipszoidi távolságok közvetlen összehasonlításán alapulnak. A méretarányténye*ző *-4,3 mm/km-re becsült értéke jelentős méretaránybeli különbséget jelez a két rendszer között. A méretarányténye*ző *földrajzi eloszlása magyarázható a fénytávmérővel mért és a kiegyenlítésbe kényszerként bevitt távolságok szabályos hibájával, de a kérdés megválaszolása további kutatásokat igényel.*

Kulcsszavak: OGPSH, HD72, transzformáció, méretarányténye*ző*

1 Bevezetés

A méretarányténye*ző* kérdése felmerül minden GPS-EOV transzformációnál, de feltehetjük azt a kérdést is, hogy a két rendszer hosszmérték-egysége azonosnak tekinthető-e? Érdeklődésünk tárgyát képezheti annak kiderítése is, hogy vajon egységesnek tekinthető-e a méretarányténye*ző* egy országban? A fenti kérdések megválaszolása érdekében a Magyarországon jelenleg használatos két alapvető fontosságú vonatkoztatás rendszert, az ETRS89 és a HD72 rendszereket vettük górcső alá. Két vizsgálati hálózatot alakítottunk ki a mindkét rendszerben ismert közös pontok koordinátáiból. Az egyik vizsgálati hálózatot az Országos GPS hálózat 1146 pontja jelenti, a másik vizsgálati hálózatot pedig az EOVA 141 elsőrendű pontja alkotja.

A következőkben teljes vizsgálati hálózatnak nevezzük az OGPSH 1146 pontjából kialakított hálózatot. A teljes OGPSH valóságosan 1153 pontból áll, azonban egy előzetes ellenőrző vizsgálat alapján ki kellett zárnunk egyrészt az egymáshoz túl közeli (500 méteren belüli) 2 pontot (41-40012, 36-2200) továbbá a lokális inhomogenitást mutató további 5 pontot (15-3120, 33-3337, 38-2332, 58-40011, 98-3229). Utóbbi pontokat azért szűrtük ki, mert egy 12 km-es keresősugár alapján lokális hasonlósági transzformációt végezve az OGPSH pont körül, azt találtuk, hogy a környező pontok alapján transzformált koordináták és az eredeti koordináták között 20 cm-nél nagyobb a lineáris eltérés, ami durva azonosítási hibára enged következtetni. A pontok ETRS89 rendszerű koordinátáit a FÖMI KGO bocsátotta rendelkezésünkre, de nem az 1998. évi kiegyenlítés alapján (amit OGPSH1991 rendszernek is neveznek), hanem a 2002. évi, forgalomba nem került kiegyenlítés szerint. Ismeretes, hogy utóbb, 2007 októberében megtörtént az OGPSH pontjai ETRS89 koordinátáinak újabb pontosítása, azaz áttértünk az ETRF2005 rendszerre (más elnevezéssel: OGPSH2007). A 2002. évi térbeli derékszögű koordináták és a 2007. évi megfelelő koordináták 1 cm-en belül egyeznek. Az ETRS89 rendszerű adatok *X, Y, Z* koordinátákkal és geoid-magasságokkal adottak; ugyanezen pontok HD72 rendszerű koordinátái pedig *y, x* EOV síkbeli koordinátákat és transzformált Balti magasságokat *(H)* jelentenek.

A továbbiakban elsőrendűnek nevezett vizsgálati hálózatot az EOVA államhatáron belüli 141 pontja alkotja, amely pontok HD72 rendszerbeli koordinátáit (*y, x, H*) a központi adattárból szereztük be.

[*]*NyME GEO, 8000 Székesfehérvár, Pirosalma u. 1-3.*
E-mail: bgy@geo.info.hu

A 141 pontos elsőrendű hálózatnak azonban csak 64 olyan pontja van, amelyeken központos GPS mérést végeztek az OGPSH kampányban, ezeket tudtuk közvetlenül felhasználni. 17 pontot ugyan nem mértek közvetlenül, de mérték az anyaponthoz tartozó közeli pontot (levezetett pontot, iránypontot) vagy másik elsőrendű pontot. Ennek a 17 pontnak az EOV koordinátáit térbeli hasonlósági transzformációval számítottuk át ETRS rendszerbe, a környező 4-6 OGPSH pontból. Mivel a közös pontok egyike az átszámítandó ponthoz nagyon közeli pont, ezen transzformáció során interpolációt alkalmaztunk, vagyis a maradék ellentmondások alapján egy másodlagos javítást, így a közeli mért elsőrendű ponthoz leginkább illeszkedik az átszámított koordináta. GPS-szel mért elsőrendű iránypontból számított elsőrendű pontok a következők: 24-2001, 32-1001, 61-4001; elsőrendű levezett pontból számított elsőrendű magaspontok: 13-3001, 37-3001, 46-1001, 46-3001, 56-1001, 58-1001, 58-4001, 75-3001, 78-4001, 810-2001; közeli elsőrendű pontból számított pontok: 15-1001, 54-3001, 67-2001, 77-2001. Az OGPSH kampány során nem mért többi elsőrendű pontot EOV-GPS irányú lokális térbeli hasonlósági transzformációval számítottuk át ETRS89 rendszerbe.

Az elsőrendű hálózat kialakítását azért tartottuk fontosnak, mert ez képezi az egész vízszintes vonatkoztatási rendszer, az összes EOTR rendszerű térkép alapját, ezt a hálózatot számították ki először, erre épült a további alappontmeghatározás.

2 A méretaránytényező értelmezése

Az *M* méretaránytényezőt általánosságban az *I. jelű forrás-rendszer* és a *II. jelű* cél-rendszer között az egymásnak megfelelő I. rendszerbeli távolságok és a II. rendszerbeli távolságok hányadosaként értelmezzük:

$$M = \frac{távolság^{I.}}{távolság^{II.}} \quad . \tag{1}$$

A méretaránytényező a II. és az I. rendszerbeli távolságok hányadosaként is értelmezhető:

$$k = \frac{távolság^{II.}}{távolság^{I.}} = \frac{1}{M} \quad . \tag{2}$$

Mivel a hányados 1-hez közeli szám, sok tizedesjegyre kellene kiírni, a könnyebb kezelhetőség érdekében az arányszámot 1 km-es távolságra vonatkoztatva, mm egységben fejezzük ki, vagyis a méretaránytényezőt mm/km vagy másképpen ppm *(parts per million)* egységben adjuk meg:

$$M[mm/km] = M[ppm] = (M-1)\cdot 10^6 \tag{3}$$

$$k[mm/km] = k[ppm] = -M[ppm] \quad . \tag{4}$$

A továbbiakban I. rendszernek az ETRS89 hazai megvalósítását (OGPSH2002), II. rendszernek pedig a HD72 rendszert tekintjük. Kérdés, hogy a térben, az alapfelületen, vagy a vetületi síkon elhelyezkedő, egymásnak megfeleltethető távolságok között értelmezzük-e a méretaránytényezőt? E szerint háromféle méretaránytényezőről beszélhetünk. A térbeli méretaránytényező:

$$M_{térbeli} = \frac{térbeli\ távolság^{I.}}{térbeli\ távolság^{II.}} \quad . \tag{5}$$

A térbeli távolságokat a pontok geocentrikus térbeli derékszögű koordinátáiból térbeli Pitagorasz-tétellel képezzük. Az ETRS89 vonatkoztatási rendszerben derékszögű koordinátákkal adott pontok közötti térbeli távolság számítása egyértelmű. A helyi (HD72) rendszerben csak akkor képezhetünk tényleges térbeli távolságot, ha ismerjük minden pontban az *N* geoidmagasságot. Vagyis a helyi rendszerű térbeli derékszögű koordinátákat az

$$(y,x)^{II.} \Rightarrow (\varphi,\lambda)^{II.} \Rightarrow (\varphi,\lambda,H+N)^{II.} \Rightarrow (X,Y,Z)^{II.} \tag{6}$$

eljárás szerint kell számítani, különben (az *N* érték bevonása nélkül) nincs értelme a térbeli távolság számításának. Az ellipszoidi méretarányténye:

$$M_{ellipszoidi} = \frac{ellipszoidi\ ívhossz^{I.}}{ellipszoidi\ ívhossz^{II.}} \ . \tag{7}$$

A vetületi síkon értelmezett méretarányténye:

$$M_{vetületi} = \frac{vetületi\ távolság^{I.}}{vetületi\ távolság^{II.}} \tag{8}$$

A vetületi távolságok tartalmazzák az egyes vetületek torzulásait, amelyek nagyobb távolságok esetén jelentős nagyságrendűek, és a két vetületen eltérő mértékűek lehetnek. E miatt a vetületi síkon értelmezett méretarányténye ebben a cikkben nem használjuk.

A méretarányténye akkor egyértelmű fogalom, ha két, egymásnak megfeleltethető távolság viszonyára értelmezzük. Pontcsoportok (hálózatok) esetén eljárhatunk úgy, hogy a pontokból háromszöghálózatot alakítottunk ki, akkor a méretarányténye két további értelmezése lehetséges. Pontbeli méretarányténye alatt a háromszög-hálózatban az egy pontból kiinduló irányokra megállapított méretarányténye számtani átlagát értjük. Háromszögre vonatkozó méretarányténye alatt a háromszög három oldalára megállapított méretarányténye számtani átlagát értjük. Egy ponthálózatban a háromszögek kialakításánál két esetet különböztetünk meg. Az első esetben maga a háromszögelés módszere, a terepi mérés során kialakított háromszögek jelentik a felosztást. A második esetben mesterségesen alakítunk ki háromszögeket egy síkbeli ponthálózatban. Erre alkalmas módszer az ún. Delaunay-féle háromszögelés (Kádár, Papp 1999).

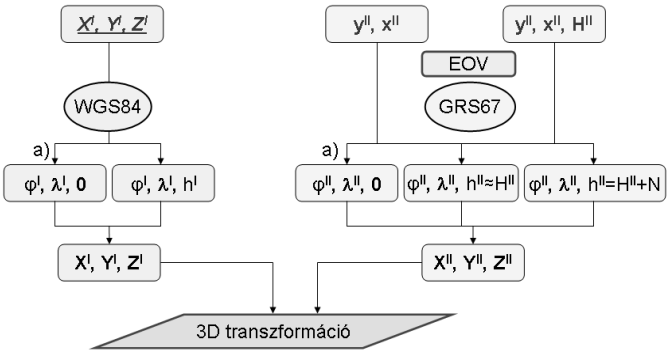
3 Transzformációs megoldásokból származó méretarányténye

A térbeli hasonlósági transzformáció a leggyakoribb modell két rendszer kapcsolatának megadásához, ezzel a lehetőséggel már 1991-ben éltek, amikor a 24 pontos kerethálózat első transzformációs eredményeit elemezték (Borza 1997). Miután elkészült az OGPSH, vizsgálták a helyi torzulásokat (Virág 1999). A transzformációs közös pontokban fellépő durva hibák szűrésére L1 normás eljárást dolgoztak ki (Závoti 2004). Az új évezredben külön OTKA kutatás foglalkozott a hazai vonatkoztatási rendszerek kapcsolatával (Ádám 2000). A neurális hálózatokkal, tanuló-pontokkal történő átszámítást eredményesen próbálták ki az OGPSH pontjaira (Barsi 1999, Zaletnyik 2005). A geoidundulációk becslését belefoglalták a transzformációs egyenletekbe (Bányai 2005). A hazai viszonyoknak megfelelő transzformációs szoftvereket fejlesztettek ki utólagos és valós idejű átszámításokhoz (Virág, Borza 2007; Gyenes, Kulcsár 2007).

A következőkben a térbeli transzformáció ún. szigorú Helmert-féle modelljén alapuló saját vizsgálatainkat mutatjuk be, amely modellben *k* jelöli a méretarányténye-t. Az I. jelű forrás-rendszer esetünkben az ETRS89 (WGS84), a II. jelű cél-rendszer a HD72. A II. rendszerben a pontok eredetileg EOV koordinátákkal és Balti magassággal adottak. A transzformációs számítás kiinduló adatai azonban térbeli derékszögű koordináták kell legyenek. Ezért a közös pontot először a GRS67 ellipszoidi normális mentén az ellipszoid-felszínre vetítjük, ezzel megkapjuk a pont ellipszoidi földrajzi koordinátáit.

A térbeli derékszögű koordinátákhoz ezután három úton juthatunk (1. ábra):

1. A pontot az ellipszoid felszínén lévőnek képzeljük (ellipszoidi magasságát zérusnak vesszük) és így számítunk térbeli derékszögű koordinátákat. Természetesen, ilyenkor a GPS meghatározásból származó pontot is a WGS84 ellipszoid felszínén lévőnek kell tekinteni. Lényegében egy 2D megoldásról van szó, amelyhez azonban 3D modellt használunk fel. Ezt az utat jelzi az *1. ábrán* az **a)** betűjel.



1. ábra. A térbeli transzformációhoz szükséges alapadatok előállításának folyamata

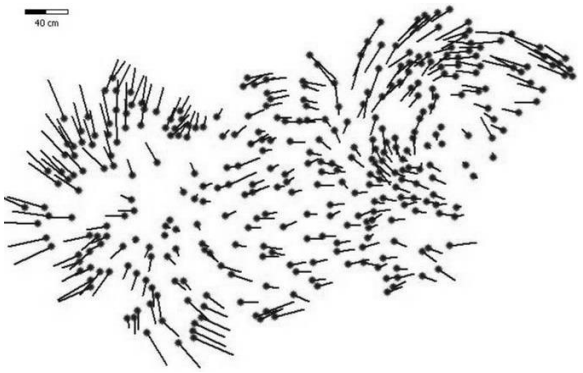
2. A pont Balti magasságát azonosnak vesszük az ellipszoidi magassággal. Kisebb területen, ameddig síkkal helyettesíthető a geoid, megengedhető ez a közelítés. A lokális transzformációknál eddig többnyire ezt az utat követjük.
3. A pont ellipszoidi magasságát a Balti magasság és a pontbeli geoidmagasság összegeként képezzük, majd ezt használjuk fel az ellipszoid-centrikus koordinátákhoz. Ez a korrekt megoldás feltételezi valamely geoid-modell beépítését a szoftverbe.

Az elsőrendű vizsgálati hálózat esetében elvégezve az ETRS89-HD72 irányú transzformációt, kimutattuk minden közös pontban a maradék ellentmondásokat, ezek összesítő statisztikáját valamint a transzformációs paraméterként kapott k méretarányténye zőt az 1. táblázatba foglaltuk. A szemléltetés érdekében elkészítettük a vízszintes értelmű transzformációs hibák vázlatait is, amelyeket a 2. és 3. ábrán mutatunk be, mely utóbbi számos publikációból jól ismert.

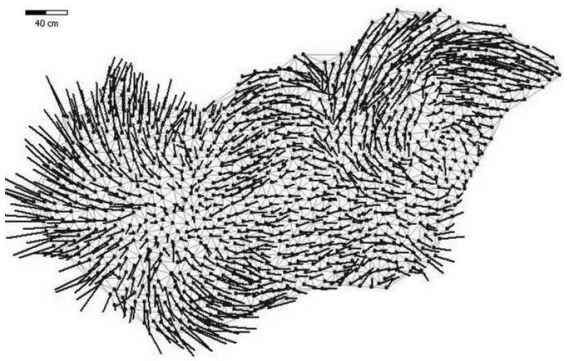
Az ábrák és a táblázat alapján levonható következtetések régóta ismertek. Vagyis: a maradék ellentmondások terjedelme számszerűen, *y, x* irányban 80 cm körüli érték, így -40 és +40 cm értékű maximális transzformációs ellentmondásokkal számolhatunk. Országosan egységes paraméterekkel geodéziai pontosság nem érhető el, ezért lokális megoldásokra van szükség. Akárhány közös pontból, de a teljes országra kiterjedő mintavétellel végezzük az átszámítást, a maradék ellentmondások lényegében azonosak maradnak. A transzformációs hibák egy érdekes, csavarodó mozgást mutatnak a dunántúli és a tiszántúli területen. A Tiszántúli területen ezt a hatást már az OGPSH első üteme után kimutatták (Borza 1997*)*, a teljes országra kiterjedő ábra több publikációban is megjelent (Virág 1999, Ádám et al 2004).Vizsgálatunk tárgyával, a méretarányténye zővel kapcsolatban érdemes megfigyelni azt, hogy a három bemutatott transzformációs modellnél kettőnél közel egyező (k = +4.7), egynél pedig ettől eltérő, *k* = -2 ppm értéket kaptunk. Ez utóbbi annak tulajdonítható, hogy elhanyagoltuk a geoid és ellipszoid közötti különbséget és ennek hatása is jelentkezik a méretarányténye zőben, ezért a k = -2 ppm érték nem reális.

1. táblázat. Az elsőrendű hálózat térbeli hasonlósági transzformációiból származó maradék ellentmondások összefoglaló statisztikai adatai, ETRS89-HD72 irányban (méterben)

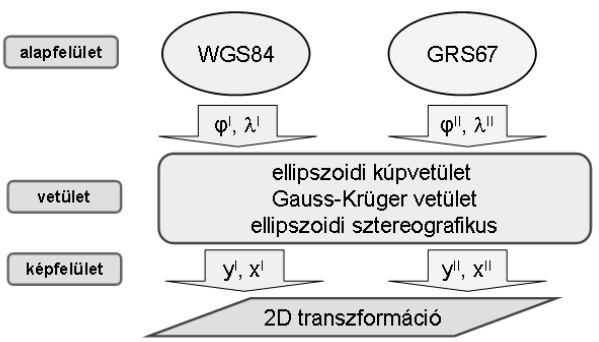
vizsgálati hálózat	szórás			terjedelem			átlagos eltérés			(k) [ppm]
	my	mx	mH	Ty	Tx	TH	|dy|	|dx|	|dH|	
3D modell geoid nélkül	0.17	0.14	0.41	0.80	0.82	1.86	0.14	0.10	0.32	-2.03
2D modell	0.15	0.13		0.74	0.77		0.13	0.09		+4.70
3D + geoid modell	0.15	0.13	0.09	0.78	0.69	0.06	0.13	0.10	0.07	+4.71



2. ábra. Vízszintes értelmű transzformációs hibák a 141 pontos hálózatban



3. ábra. Vízszintes értelmű transzformációs hibák az 1146 pontos hálózatban



4. ábra. A 2D transzformáció kiinduló adatai előállításának folyamata

Nemcsak térbeli, de síkbeli hasonlósági transzformációt is alkalmazhatunk. Háromféle ellipszoidi vetület jöhet szóba:

1. Gauss-Krüger vetület.
2. Normális elhelyezésű Lambert-féle két paralelkörös metsző kúpvetületet.
3. Az ellipszoid Roussilhe-féle sztereografikus vetülete.

A síkbeli transzformációhoz az EOV sík-koordinátákat – azok jelentős vetületi torzulása miatt – nem tudjuk közvetlenül felhasználni. Előbb az EOV alapfelületéhez, a GRS67 ellipszoidi földrajzi

2. táblázat. Az ellipszoidi vetületek közötti síkbeli hasonlósági transzformációkból származó maradék ellentmondások összefoglaló statisztikai adatai (141 pontos elsőrendű vizsgálati hálózat)

ellipszoidi vetület	szórás		terjedelem		átlagos eltérés		illeszkedés	méretarány
	my	mx	Ty	Tx	|dy|	|dx|	mH	(k) [ppm]
Lambert-féle	0.15	0.13	0.74	0.79	0.13	0.09	0.14	4.70
Gauss-Krüger	0.16	0.13	0.81	0.81	0.14	0.10	0.15	4.76
Sztereografikus	0.16	0.13	0.78	0.80	0.13	0.10	0.14	4.73

koordinátákhoz is hozzá kell rendelni egy ellipszoidi vetületet, majd ezután végezhető el a két síkbeli koordináta-rendszer közötti transzformáció (4. ábra). Lényeges hangsúlyozni, hogy mindkét rendszerben ugyanazt a típusú vetületet kell alkalmazni azonos paraméterekkel.

A vázolt eljárás szerint előállítottuk az elsőrendű vizsgálati hálózat 141 pontjának síkbeli koordinátáit mindhárom említett vetületen. A síkbeli Helmert transzformációt követően kimutattuk a maradék ellentmondásokat. A 141 pont javításainak statisztikáját a 2. táblázat foglalja össze.

Az 1. és 2. táblázat adatait összehasonlítva azt látjuk, hogy a statisztikai jellemzők lényegében megegyeznek, a k méretaránytényező pedig az előző táblázatban kétszer szereplő k = 4.7 körüli értékkel jó egyezést mutat.

4 Oldalakra és háromszögekre vonatkozó méretaránytényező

A mért elsőrendű háromszögekből összeállított 141 pontos vizsgálati hálózat minden egyes irányára kiszámítottuk az ellipszoidi ívhosszakra vonatkozó méretaránytényezőt és a térbeli méretaránytényezőt ppm egységben, egy tizedes élességgel. A két méretaránytényező megegyezett, mivel a HGGG95 geoid-modellből ismertük a geoidunduláció értékét minden elsőrendű pontban. Az egy pontból kiinduló irányokra vonatkozó méretaránytényező átlagaként meghatároztuk a pontbeli értéket, majd azt izovonalas ábrán megjelenítettük (5. ábra). Az ábrából megállapítható, hogy az ETRS89 és HD72 közötti, mm/km egységben megadott méretaránytényező csak Magyarország délnyugati részén zérus, kelet felé haladva negatív értékűvé válik, a Duna vonala menti értéke -5 ppm körüli, de a Mátra körzetében a -10 ppm értéket is eléri. Számítottuk a méretaránytényezőknek minden egyes elsőrendű háromszögre vonatkozó értékét is, amit kétféleképpen ábrázoltunk. Egyszer a háromszögre vonatkozó értéket a háromszög súlypontjához rendeltük hozzá, majd izovonalasan jelenítettük meg (6. ábra); másszor minden egyes elsőrendű háromszöget a hozzá tartozó méretaránytényezőnek megfelelően különböző szürke árnyalattal jelöltünk (7. ábra). Az 1146 pontból álló hálózatban előbb az adott pontok közötti legrövidebb összekötéseket kellett megadni, amit a Delaunay-féle háromszögeléssel oldottunk meg. Elkészítettük a háromszög-oldalakra kapott méretaránytényezők statisztikáját, aminek összefoglaló adatait a 3. táblázat tartalmazza mindkét hálózatra vonatkozóan. A méretaránytényezők átlaga -4.3 ppm, szórása 2.6. A szórás háromszorosát felvéve, a +2.2 ppm és a -11.0 ppm közötti értékeket elfogadtuk, az ezen kívülieket durva hibásnak tételeztük fel. Az 1146 pontos vizsgálati hálózatban így 15 durva hibásnak minősíthető pont található, pontszámsorrendben a 23-4001, 23-4223, 27-1441, 31-2301, 31-4114, 32-1014, 32-1208, 41-4001, 43-3109, 52-2013, 77-3056, 86-10521, 86-2451, 86-4164 és 86-4206.

5 Az elsőrendű hálózat távmérővel mért oldalaira vonatkozó méretaránytényező

Érdeklődésünk ezután a klasszikus háromszögelési hálózatunkban közvetlenül vagy közvetve mért oldalak méretaránytényzőjének vizsgálatára irányult. Elöljáróban érdemes röviden összefoglalni a magyar hálózat mérésének és számításának jellegzetességét. A magyar hálózatban – az országban egyenletesen elosztva – eredetileg hat, átlagosan 9 km hosszúságú alapvonalat mértek, amelyeket ún. alapvonalfejlesztő hálózattal „nagyítottak” elsőrendű oldallá, amelyek a 9. ábrán a 13, 14, 15, 16, 17, 18 számú oldalként szerepelnek.

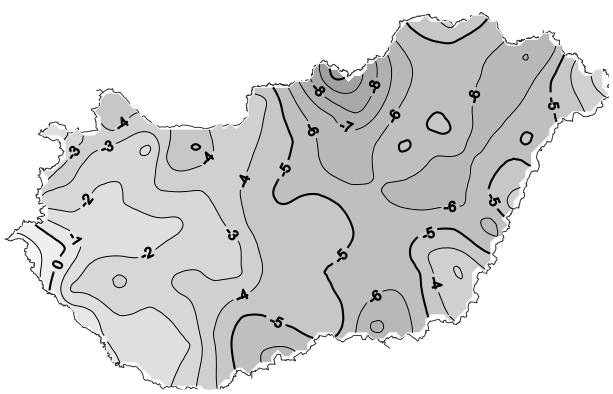
3. táblázat. A méretarányténye zők oldalakból számított statisztikája a két vizsgálati hálózatban

Vizsgálati hálózat	Pontok száma	Távolságok száma	M min [ppm]	M max [ppm]	M átlag [ppm]
elsőrendű	141	370	-15.5	+2.9	-4.34
teljes	1146	3403	-26.8	+25.7	-4.33

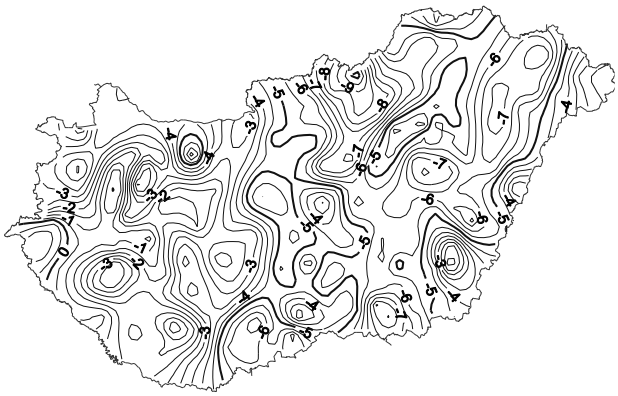
Az egykori szocialista országok geodéziai szolgálatvezetőinek 1965. évi moszkvai konferenciája előírta a Pulkovó-Szófia-Potsdam ún. kozmikus poligon (KP) létesítését, amely háromszög oldalait kb. 30 km-es szakaszokban irány- és távméréssel kellett meghatározni. A poligon Potsdam-Szófia oldala Magyarországon haladt keresztül, így annak tervezését célszerű volt összekapcsolni az elsőrendű hálózat folyamatban lévő finomításával. A poligon magyarországi része összesen 12 darab, 1-12 sorszámmal jelölt szakaszból áll, ezek közül az 1. és a 12. szakasz nem része a jelen elsőrendű vizsgálati hálózatunknak. A kozmikus poligon mérése közben került sor az alapvonalakból fejlesztett 6 oldal, valamint további 5 oldal távmérésére, így összesen 23 oldal határozza meg hálózatunk méretarányát (Papp 1979).

Az eredeti sorszámok meghagyásával, 21 vizsgálati távolságot tüntet fel a 9. ábra. A 23 oldalból csak 4 elsőrendű oldalt lehetett közvetlenül megmérni; 17 oldalt két részletben, 2 oldalt pedig három részletben mértek meg AGA6, EOD1 és AGA 6A típusú távmérővel, 12-24 sorozatban. Az egyes sorozatokból kapott középértéket használták fel, kimutatva a javításokból számított középhiba értékét. A távolságokat az ellipszoidi normálisok mentén vetítették az ellipszoid felszínre, a következő redukciókat számítva: fényút és térbeli egyenes között; vízszintesre; simulógömbi húrra; ellipszoidi húrra; geodéziai vonalra. Ezeket a távolságokat vonták be a kiegyenlítésbe úgy, hogy ne kapjanak javítást. Ezért, ha az EOV rendszerű kiinduló adatainkból ellipszoidi földrajzi koordinátákat számítunk a GRS67 ellipszoidon, majd azokból GRS67 ellipszoidi távolságokat, akkor ugyanezeket a távolságokat kell visszakapnunk a számítási élességen belül. Ezt az ellenőrzést a 4. táblázatban elvégeztük, és visszakaptuk a korreláta-kiegyenlítés kiinduló távolságait. A 4. táblázatban összehasonlítottuk a vizsgálati hálózat távmérővel mért 21 oldalát a GPS mérésből levezethető oldallal.

Mind az ETRS89 rendszerben, mind a HD72 rendszerben a kiinduló adatokból a térbeli és az ellipszoidi méretarányténye zőt egyaránt képeztük. A térbeli és az ellipszoidi méretarányténye ző távolságonként azonosnak tekinthető. A 21 távolság esetében az átlagos méretarányténye ző -4.5 ppm, ami az összes elsőrendű oldalból levezetett -4.3 ppm értékkel jó egyezést mutat. A méretarányténye ző transzformációs paraméterként történő meghatározásánál a k=+4.7 mm/km értéket találtuk, ami jó egyezést mutat a 21 távmérővel mért oldalból levezethető M=-4.5 mm/km értékkel. A GPS-mérésből és a fénytávmérésből származó távolságok összevetéséből megállapítható, hogy minden GPS-ből



5. ábra. A WGS-EOV méretarányténye ző 141 pontból számított pontbeli értékének alakulása



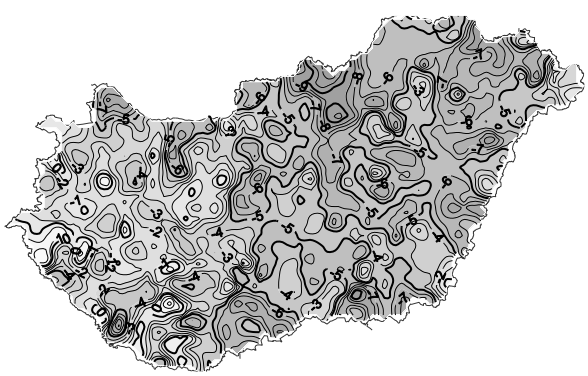
6. ábra. A méretaránytényező alakulása háromszögenként számított értékekből

származó távolság kisebb a fénytávmérővel mért értéknél. A 21 távolság alapján egy GPS-es első-rendű oldalhossz átlagosan 11 cm-rel rövidebb, mint egy fénytávmérővel mért oldal.

A 21 vizsgálati távolság között 8 olyan van, amelyet közvetlen pontraállással mértek GPS-szel; 6 távolság esetében az egyik végpont közvetlen felállású a másik végpont az anyapont közvetlen közelében lett mérve, 7 további távolság egyik vagy mindkét végponti koordinátája lokális transz-formációból származik. Ha ez utóbbi távolságokat külön kezeljük, mert bizonytalanabbnak ítéljük a pont-azonosságot, akkor a következő eredményre jutunk. A közvetlenül illetve jó pontazonosítással mért 14 távolság esetében az átlagos távolságeltérés -10 cm, a méret-arányténye ző -4.2 mm/km. A transzformált koordinátákból származó 7 távolság esetében az átlagos távolságeltérés -12 cm, a méretarányténye ző -5.1 mm/km.



7. ábra. A WGS-EOV méretarányténye ző számított értéke a 230 darab háromszögben



8. ábra. A méretarányténye ző 1146 pontból számított pontbeli értékének változása

6 Az elsőrendű hálózat méretarányeltérésének modellezése

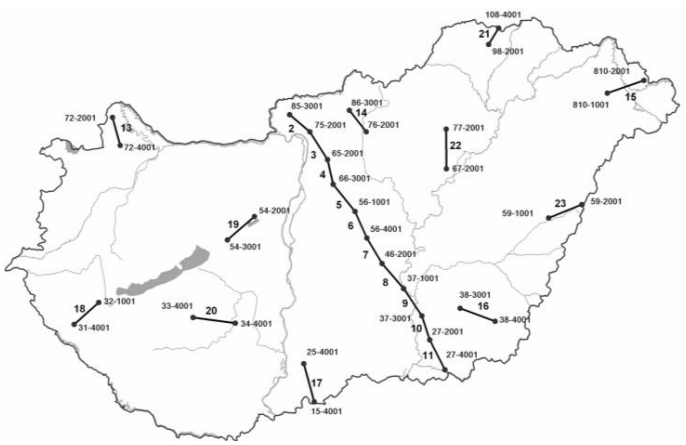
Ha elfogadjuk, hogy az előzőekben kimutatott méretarányeltérés a két vonatkoztatási rendszer között elsősorban a fénytávmérővel mért távolságok szabályos hibájából adódik, akkor felmerül az a kérdés, hogyan változna a helyzet, ha a „helyes" (pontosabban: a GPS-mérésből származó) távolságokkal helyettesítenénk a kényszerfeltételként bevitt távolságokat?

Jelenleg nem áll rendelkezésünkre olyan szoftver, amellyel ez a számítás elvégezhető lenne, de vízszintes hálózatkiegynlítő programmal van lehetőség a megváltozott állapot modellezésére. A térbeli vektorok hossza ugyanis távmérési eredménynek tekinthető ($t_{AB\_térb}$). Kiszámítjuk minden egyes, a WGS84 rendszerben X,Y,Z koordinátákkal adott pontról (A) a szomszédos pontra (B) vonatkozó WGS84 rendszerű ellipszoidi azimutot (α_{AB}), és távolságot ($t_{AB\_térb}$). Az azimutokat megjavítjuk a területen érvényes vetület (EOV) második irányredukciójával (Δ_{AB}), majd az így kapott $l_{AB} = \alpha_{AB} - \Delta_{AB}$ értékeket irányértéknek tekintjük. A távolságokat a helyi vetületi síkra redukáljuk (t_{AB_vet}). Elvégezzük az irány- és távméréses 2D szabad hálózat kiegyenlítését. A szabad hálózatból kapott koordinátákat síkbeli koordináta-transzformációval tudjuk egybevetni a másik (esetünkben a HD72) rendszerben megadott eredeti koordinátákkal.

A vázolt eljárást arra használtuk, hogy a magyar elsőrendű hálózatban modellezzük a felhasznált távolságok GPS-ből és fénytávmérésből származó értékeinek a különbségét.

Először az előzőekben definiált „iránymméréses" hálózatunkba bevittük azt a 21 távolságot (EOV síkra redukálva), amely távolságok eredeti térbeli hosszát az ETRS89 koordinátákból számítottuk. Nevezzük röviden ezeket a távolságokat „GPS-távolságoknak". Elvégeztük a 739 irányból és 21 GPS-távolságból álló szabad hálózat kiegyenlítését. Ezt követően az „iránymméréses" hálózatunkba bevittük azt a 21 távolságot, amelyeket EOV koordinátákból számítottunk. Nevezzük röviden ezeket a távolságokat „EOV-távolságoknak". Az EOV-távolságok értéke megegyezik az eredeti, 1972-es kiegyenlítésben szereplő ellipszoidi távolságoknak az EOV síkra redukált értékével. Elvégeztük a 739 irányból és 21 EOV-távolságból álló szabad hálózat kiegyenlítését is.

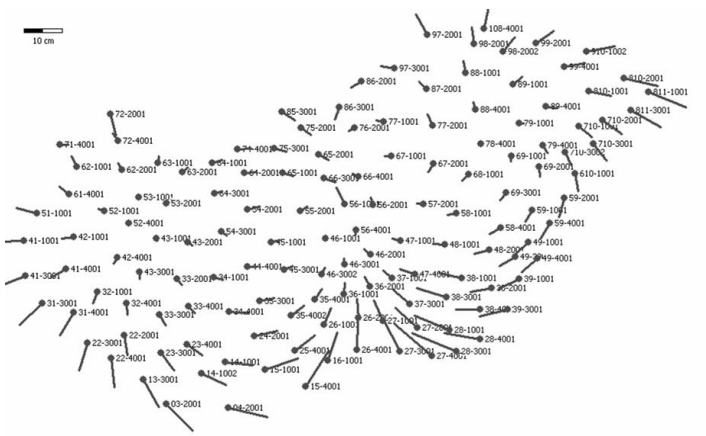
Ezután transzformációval összehasonlítottuk a két hálózatot és a 10. ábrán szereplő lineáris eltéréseket kaptuk. Ezek az eltérések lényegében a 21 távolság méretarány-különbözőségének a hatását mutatják. Az ország közepén, az egykori kozmikus poligon mentén mért pontokban az EOV távolságok javításai északi irányból és déli irányból az ország belseje felé mutatnak. Mivel minden távolság szabályos hibával terhelt, ez végeredményben zsugorítást jelent az észak-déli pontsor mentén. A többi pont lineáris eltérésének vektorábrája nagyon hasonlít a 2. illetve 3. ábrához. A jelentősebb lineáris eltérések nagyságrendje 10-15 cm körüli. Az eljárással érzékeltetni kívántuk annak a hatását, amit a kényszerként bevitt távolságok méretarányeltérése jelent (Busics 2007).



9. ábra. Az elsőrendű vizsgálati hálózatban távmérővel mért, és a kiegyenlítésben hibátlannak tekintett oldalak az eredeti sorszámukkal jelölve

4. táblázat. A méretaránytényező alakulása az elsőrendű hálózatban távmérővel mért távolságok esetében

Azo-nosító	Térbeli távolság (OGPSH)	Térbeli távolság (EOVA)	Ellipszoidi távolság (WGS84)	Ellipszoidi távolság (GRS67)	Táv. eltérés (térb.)	Táv. eltérés (ell.)	M (térb) [ppm]	M (ell) [ppm]
2	19925.319	19925.413	19920.644	19920.739	-0.094	-0.095	-4.7	-4.7
3	24919.790	24919.901	24915.786	24915.898	-0.111	-0.112	-4.4	-4.5
4	19037.096	19037.183	19035.960	19036.047	-0.087	-0.087	-4.6	-4.6
5	26298.822	26299.011	26297.477	26297.666	-0.189	-0.189	-7.2	-7.2
6	21929.577	21929.614	21928.623	21928.659	-0.037	-0.036	-1.7	-1.7
7	22392.285	22392.413	22391.689	22391.816	-0.127	-0.127	-5.7	-5.7
8	24938.958	24939.075	24938.406	24938.521	-0.116	-0.115	-4.7	-4.6
9	24682.614	24682.752	24682.116	24682.253	-0.138	-0.138	-5.6	-5.6
10	19095.955	19096.053	19095.437	19095.535	-0.099	-0.098	-5.2	-5.2
11	25346.995	25347.152	25346.327	25346.483	-0.156	-0.156	-6.2	-6.1
13	21814.890	21815.065	21814.254	21814.429	-0.175	-0.175	-8.0	-8.0
14	20099.248	20099.358	20097.502	20097.611	-0.109	-0.109	-5.4	-5.4
15	29479.183	29479.283	29478.319	29478.420	-0.100	-0.101	-3.4	-3.4
16	28209.574	28209.675	28208.990	28209.091	-0.101	-0.100	-3.6	-3.6
17	29580.097	29580.275	29579.190	29579.368	-0.178	-0.178	-6.0	-6.0
18	24848.721	24848.791	24847.341	24847.410	-0.070	-0.069	-2.8	-2.8
19	27054.756	27054.849	27053.086	27053.178	-0.092	-0.092	-3.4	-3.4
20	32166.047	32166.156	32164.447	32164.555	-0.108	-0.108	-3.4	-3.4
21	14462.361	14462.386	14461.544	14461.568	-0.025	-0.024	-1.7	-1.7
22	29938.369	29938.444	29937.484	29937.559	-0.075	-0.075	-2.5	-2.5
23	27030.556	27030.676	27029.822	27029.942	-0.120	-0.120	-4.4	-4.4
		Átlag:		24439	-0.110	-0.110	-4.5	-4.5



10. ábra. A „GPS-távolságokkal" majd „EOV-távolságokkal" kiegyenlített „iránymeréses" hálózatok transzformációja után kapott lineáris eltérések

7 Összefoglalás

Amikor Magyarországon az ETRS89 rendszerből a HD72 rendszerbe számítunk át pontokat, mindig számolunk a méretaránytényezővel is. Sokan, sokféle módszerrel vizsgálták már a két rendszer inhomogenitásának kérdését, a transzformáció utáni maradék ellentmondások területi eloszlását. Ebben a cikkben a két említett vonatkoztatási rendszer közötti méretaránytényező nagysága és földrajzi hely szerinti változása egyik lehetséges okára kívántuk felhívni a figyelmet. Kimutattuk, hogy

a hálózat kiegyenlítésében szereplő, távmérővel mért és alapfelületre redukált távolságok szabályos eltérést mutatnak a GPS-hálózatból levezethető értékhez képest, miközben a vízszintes hálózat kiegyenlítésekor ezeket a távolságokat kényszerfeltételként vitték be a számításba. A kérdés megválaszolása további kutatást, így a hálózat újbóli kiegyenlítését igényelné.

Hivatkozások

Ádám J (2000): Magyarországon alkalmazott geodéziai vonatkozási rendszerek vizsgálata. Geodézia és Kartográfia, 2000/12.

Ádám J, Bányai L, Borza T, Busics Gy, Kenyeres A, Krauter A, Takács B (2004): Műholdas helymeghatározás. Műegyetemi Kiadó, Budapest.

Bányai L (2005): Koordinátatranszformáció geoidundulációk becslésével. Geomatikai Közlemények VIII, 69-76.

Barsi Á (1999): Koordinátatranszformációk megoldása neurális hálózatokkal. Geodézia és Kartográfia 10, 12-18.

Borza T (1997): A GPS technikára alapozott háromdimenziós geodézia és hazai bevezetése. Doktori értekezés kézirata, Budapest.

Busics Gy (2007): A műholdas helymeghatározás geodéziai alkalmazásának technológiai és minőségi kérdései. PhD értekezés, BME.

Gyenes R, Kulcsár A (2007): Koordinátatranszformációk: elmélet és gyakorlat. GIS Open konferencia CD kiadványa, NyME GEO, Székesfehérvár.

Kádár I, Papp E (1999): Dirichlet-sokszögelés és háromszögelés a magyar GPS hálózatban. Ezredvégi helymeghatározás. A 12. Kozmikus Geodéziai Szeminárium előadásainak gyűjteménye, Székesfehérvár 89-96.

Papp Z (1979): Magyarország asztrogeodéziai hálózatában az I. rendű oldalak távolságmérése. EAGH távolságmérések leírása. FÖMI Adattár. 18 old.

Virág G (1999): Az Egységes Országos Vízszintes Alaphálózat vizsgálata az OGPSH tükrében. Geodézia és Kartográfia 5. 22-29.

Virág G, Borza T (2007): Speciális transzformációs eljárások a valós idejű GNSS helymeghatározásnál. Geomatikai Közlemények X, 59-64.

Zaletnyik P (2005): Internetes alkalmazás koordinátatranszformációra neurális hálózatok alkalmazásával. Geomatikai Közlemények VIII, 76-84.

Závoti J (2004): A 7 paraméteres 3D transzformáció egzakt megoldása. Geomatikai Közlemények VIII, 53-60.

„PONTÁLLANDÓSÍTÁS" AZ ÉGEN – MILYEN KVAZÁROK ALKALMASAK AZ ÉGI VONATKOZTATÁSI RENDSZER KIJELÖLÉSÉRE?

Frey Sándor, Moór Attila**

Defining the celestial reference points – which quasars are the best suited? *- We briefly introduce the International Celestial Reference Frame (ICRF) and summarise why the radio-loud active galactic nuclei (quasars) are the most suitable objects for its definition. We discuss the quasars' positional stability and its possible relation to their radio structure imaged with Very Long Baseline Interferometry (VLBI) at the milli-arcsecond angular scale.*

Keywords: VLBI, celestial reference system, quasars

Röviden bemutatjuk a nemzetközi égi vonatkoztatási rendszert (ICRF) és összefoglaljuk, hogy miért a rádiósugárzó aktív galaxismagok (kvazárok) a legalkalmasabbak a rendszer definiálására. Szólunk a kvazárok pozíciós stabilitásáról. Megvizsgáljuk, hogy az összefüggésben lehet-e a kvazárok ezred-ívmásodperces szögskálán, nagyon hosszú bázisvonalú rádió-interferometriás (VLBI) mérésekkel megfigyelt szerkezetével.

Kulcsszavak: VLBI, égi vonatkoztatási rendszer, kvazárok

1 Bevezetés

A nagyon hosszú bázisvonalú rádió-interferometria (*Very Long Baseline Interferometry*, VLBI) egy az 1960-as évek második felében eredetileg rádiócsillagászati célra kifejlesztett technika. Működésének alapelve, hogy egymástól távol – akár különböző földrészeken – elhelyezett rádióteleszkópokkal egyidőben ugyanazt az égi rádióforrást figyelik meg. A távoli égitestekről beérkező rádióhullámokat detektálják, digitalizálják, mágneses adathordozóra (szalagokra, mágneslemezekre) rögzítik. (A nagy távolságokat csak a legutóbbi években sikerült szélessávú optikai adatátviteli hálózatok segítségével valós időben is áthidalni; a jövőben ennek az ún. e-VLBI technikának a további elterjedése várható.) Az interferométer-hálózat egyes elemeinél rögzített adatokat utólag visszajátszva egy központi számítógép segítségével állítják elő az interferenciát. A csillagászok így rendkívül nagy szögfelbontással tanulmányozhatják a távoli, kompakt rádiósugárzó égitestek szerkezetét. A rendszer szögfelbontását ugyanis nem az egyes antennák mérete, hanem a köztük levő távolság határozza meg.

A távoli égitestekről érkező hullámfront más-más időpontban éri el a különböző rádióteleszkópokat. Ez a késés függ többek közt az égi rádióforrás irányától, a forgó Föld szilárd kérgén rögzített antennák egymáshoz viszonyított pillanatnyi geometriai helyzetétől, a földi ionoszférában és troposzférában bekövetkező, a hullámterjedést befolyásoló jelenségektől, a helyi frekvencia-etalonok (atomórák) paramétereitől. Geodéziai szempontból fontos mérési adat a hálózat különböző bázisvonalain (az egyes antennapárokat összekötő szakaszokon) mért időkésés, illetve annak idő szerinti deriváltja (Frey 2007). Geodéziai célú VLBI megfigyelések világszerte rendszeresen, szolgálatszerűen folynak. Ezeket jelenleg a Nemzetközi VLBI Szolgálat (*International VLBI Service for Geodesy and Astrometry*, IVS) koordinálja. A mérések célja például a Föld forgási szögsebességének és a pólusmozgásnak a nyomon követése, az antennák és a kijelölt égi rádióforrások koordinátáinak meghatározása. Napjainkban a VLBI pozíció- és iránymérések a földfelszínen centiméteresnél, az égen ezred-ívmásodpercesnél (*milli-arcsecond*, mas) is pontosabbak (Sovers et al. 1998). Fontos kiemelni, hogy a Föld forgásának változásait hosszabb időtávon, nagy pontossággal kizárólag a VLBI technikával tudjuk tanulmányozni. Ennek oka, hogy a VLBI vonatkoztatási rendszerét távoli, fényes aktív galaxismagok (kvazárok) jelölik ki. Ez a rendszer a kvazárok nagy – jellemzően több

**FÖMI Kozmikus Geodéziai Obszervatóriuma, 1592 Budapest, Pf. 585*
és MTA-BME Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport, 1521 Budapest, Pf. 91
E-mail: frey@sgo.fomi.hu

milliárd fényéves – távolsága, és az ebből adódó elhanyagolható sajátmozgása miatt az inerciarendszer jelenleg ismert legjobb gyakorlati megvalósításának tekinthető.

2 A kvazárok, mint égi vonatkoztatási pontok

Az 1960-as évek elején felfedezett *kvazárok*ról (vagyis csillagszerűnek tűnő kompakt rádióforrásokról) tudjuk, hogy távoli galaxisok magjaiban találhatók. Hatalmas sugárzási teljesítményüket a központi, nagytömegű (több millió vagy milliárd naptömegnyi) fekete lyukba hulló anyagból nyerik. A fekete lyukba a környezetéből befogott anyag egy része a rendszer forgástengelye mentén relativisztikus sebességgel kidobódik. Az így létrejövő anyagsugarakban (*jet*ekben) az erős mágneses térben, közel fénysebességgel mozgó, elektromosan töltött részecskék bocsátják ki az általunk is észlelhető rádiósugárzást. Asztrofizikai szempontból a VLBI megfigyelések jelentősége a kvazárok „működésének" megértése, a jetek legbelső szerkezetének és tulajdonságainak vizsgálata.

Az égi vonatkoztatási rendszer kijelölése szempontjából a kvazárok ideálisnak tűnnek, a már említett kozmológiai léptékű távolságuk és kis szögméretük miatt. A jelenleg elérhető optikai csillagkatalógusok pontosságát meghaladva, a kvazárok által kijelölt nemzetközi égi referenciarendszer (*International Celestial Reference Frame*, ICRF) számít 1997 óta a hivatalos fundamentális égi rendszernek (Ma et al. 1998). Az ICRF definícióját bő két évtizedes VLBI megfigyelés-sorozat előzte meg, amelynek eredményeképpen összesen 212 extragalaktikus rádióforrás (kvazár és más típusú aktív galaxismag) koordinátáit rögzítették.

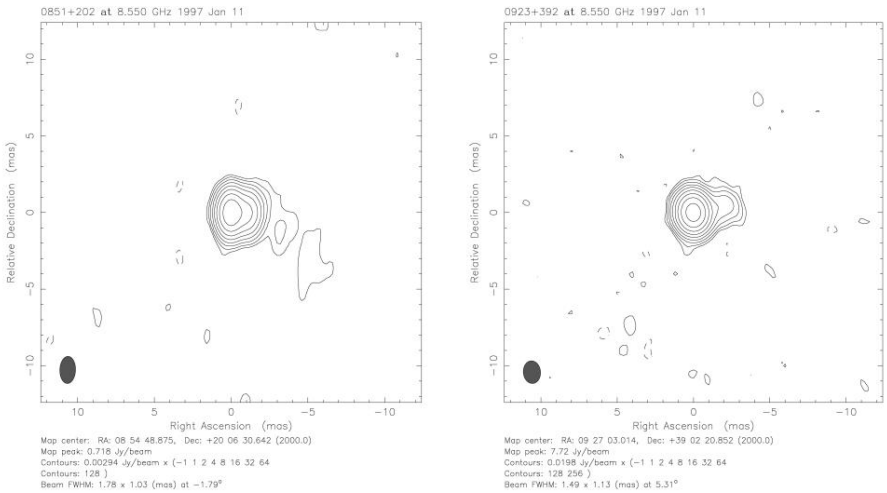
2.1 A kvazárok pozíció-változásai

Az ICRF bevezetése óta eltelt idő alatt tovább finomodtak a megfigyelési módszerek. Kiderült, hogy a megnövekedett pontossági igények kiszolgálása érdekében szükség van a rendszer javítására. Mára a geodéziai VLBI programok egyik legnagyobb, nehezen modellezhető hibaforrássává vált a nem kellőképpen pontos égi vonatkoztatási rendszer. A problémák egyik része, hogy a referenciapontok viszonylag ritkán, és nem egyenletesen fedik le az égboltot. Technikai okokból jóval több definiáló rádióforrás található az északi égbolton, mint a délin. (A déli féltekén a földi VLBI hálózatok kiépítettsége kisebb.) Másrészt kiderült, hogy a rendszer „állandósításásra" kiválasztott kvazárok pozíciója hosszabb időtávon mégsem elegendően stabil. Annak idején az égi alappontok kijelölésénél elsődleges szempont volt a hosszú, a VLBI korai időszakaira visszanyúló megfigyelés-sorozat. Így jellemzően a legfényesebb kvazárok kerültek a mintába, amelyeknek a nagyfelbontású rádiószerkezete nem feltétlenül „pontszerű". Valóban, az immár több évtizedre visszanyúló koordináta-idősorok alapján akár a 0.1 mas/év nagyságrendjébe eső elmozdulások is mérhetők számos kvazár esetében. Jelenleg napirenden van az ICRF újradefiniálásának kérdése, amire egy sor javaslat született (pl. Lambert és Gontier 2009, és az ottani hivatkozások). Ezek főleg gyakorlatiasan, az ideális égi alappontok kiválasztási módszere felől közelítik meg a kérdést. Kevesebb hangsúlyt kap, hogy egyáltalán miért is változik e távoli kvazárok pozíciója?

2.2 A kvazárok nagyfelbontású rádiószerkezete és fizikája

A távoli kvazárok rádiószerkezetét a néhány GHz-es frekvencia-tartományokban VLBI technikával vizsgálva, a következő általános kép tárul elénk (1. ábra). Szinte minden esetben látunk egy domináns, fényes és viszonylag kisméretű „magot". Ez a rádiósugárzás valójában a kvazár irányából induló, felénk mutató jet egy olyan részéből származik, amelynél az adott frekvencián már nem hatolhatunk „mélyebbre" (az onnan érkező sugárzás elnyelődik). Valójában a különböző frekvenciákon más-más mélységig látunk: minél magasabb a rádióhullámok frekvenciája, annál közelebb kerülünk a központi fekete lyukhoz. (Magát a fekete lyukat közvetlenül természetesen nem észlelhetjük.)

A kvazárok VLBI rádióképeinek másik jellegzetes összetevője az optikailag vékony „jet". Itt a központi fekete lyuk környezetéből eltávolodó anyagkilövellés távolabbi részleteit, esetenként lökéshullámokat figyelhetünk meg, amelyek fényesebb csomók formájában mutatkoznak.



1. ábra. A 0851+202 (OJ 287, *balra*) és a 0923+392 (4C 39.25, *jobbra*) kvazár 8.6 GHz frekvencián, 1997. január 11-én készült kontúrtérképei (fényességeloszlásuk). Az amerikai VLBI hálózat (VLBA) felbontása itt észak-déli irányban 1.5–1.8 mas, kelet-nyugati irányban kb. 1 mas. A hálózat irányfüggő szögfelbontását az ábrák bal alsó sarkában látható ellipszisek jelképezik. (Képek: *US Naval Observatory Radio Reference Frame Image Database*, http://rorf.usno.navy.mil/RRFID)

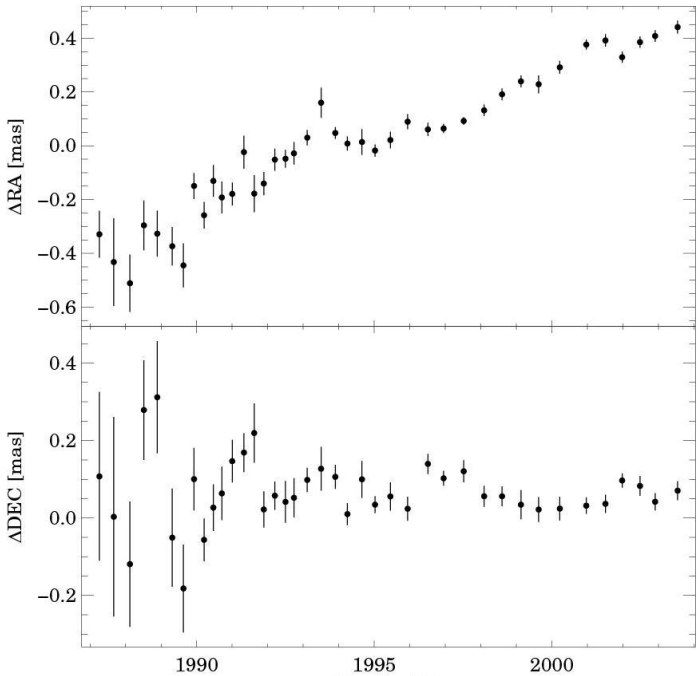
Gyakorlatilag minden esetben aszimmetrikus szerkezetet (a magból kiinduló egyirányú jetet) látunk. Ennek az a magyarázata, hogy a központi fekete lyuk környezetéből két ellentétes irányban kiinduló anyagsugarak egyike többé-kevésbé pontosan a látóirányunkba mutat. Ennek a sugárzása – relativisztikus hatások miatt – jelentősen felerősödik, míg a másik, ellenkező irányba indulóé a detektálhatóság határa alá halványul. Fontos megemlíteni, hogy a szerkezet sok esetben rövid (néhány éves vagy akár hónapos) időskálán észrevehető változásokat mutat! Ennek hátterében is a kis látószög és a plazmacsomók fénysebességhez közeli sebességei állnak (Frey 2002).

3 A kvazárok szerkezete és látszó elmozdulása közti összefüggés vizsgálata

Joggal merülhet fel a kérdés, hogy van-e kimutatható kapcsolat a kvazárok VLBI technikával feltérképezhető *rádiószerkezete*, annak összetettsége, illetve a *koordináta-változások* között. Ennek az összefüggésnek a léte valószínű, mivel a referenciapont helye valójában a fényességeloszlás „súlypontjával" kell egybeessen. Ha a fényességeloszlás változik, annak hatással kell lennie a kvazár észlelt pozíciójára is. Másképpen megfogalmazva: bár az igen távoli aktív galaxisok sajátmozgása tényleg elhanyagolható, rádiószerkezetük változása a VLBI pontossági szintjén már nem mindig az!

Ilyen jellegű vizsgálatok korábban történtek ugyan (pl. Fey et al. 1997, Titov 2007), de csupán néhány egyedi kvazárra vonatkozóan. Mostanra lehetővé vált, hogy a kérdést egy nagyobb mintán, statisztikai szempontból közelítsük meg. Publikussá váltak egyrészt az égi vonatkoztatási rendszert kijelölő kvazárok hosszú időn át rendszeresen készített VLBI térképeiből származtatott szerkezeti modellek (Piner et al. 2007). Másrészt a különböző geodéziai és asztrometriai VLBI adatfeldolgozó központok előállították ugyanezen kvazárokra a koordináta-változásokból lineáris közelítéssel becsült sebességértékeket (pl. MacMillan és Ma 2007). Mi az Oleg Titov által az OCCAM geodéziai VLBI adatfeldolgozó program (Titov et al. 2004) segítségével, mintegy 4 millió mérési adat felhasználásával előállított koordináta-idősorokat használtuk, amelyek jellemzően az 1984-től 2007-ig terjedő intervallumot fogják át. Példaképpen a legmarkánsabb változásokat mutató kvazárok egyikének, az 1. ábra jobb oldalán is látható 4C 39.25 jelűnek a koordináta-változásait mutatjuk be (2. ábra).

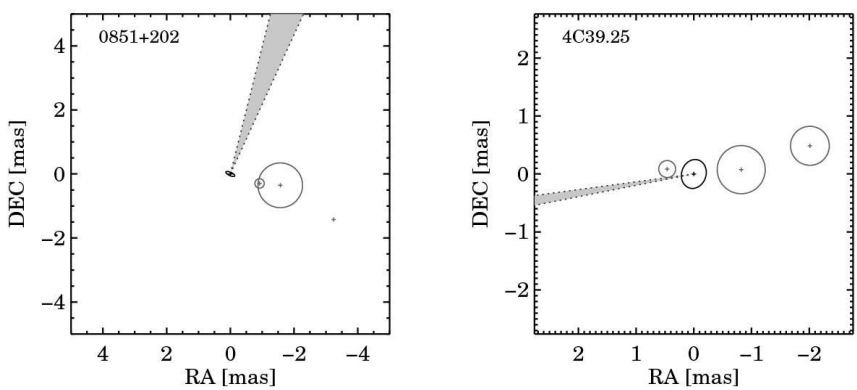
Munkánk során első lépésként azt a célt tűztük ki, hogy megállapítsuk: hogyan függ össze a kvazárok nagyfelbontású rádiószerkezetére jellemző irány (*a jet iránya*) és a mért *koordináta-változások iránya* (3. ábra). Ha helytálló a feltételezés, hogy a pozíció eltolódását a jetben megjele-



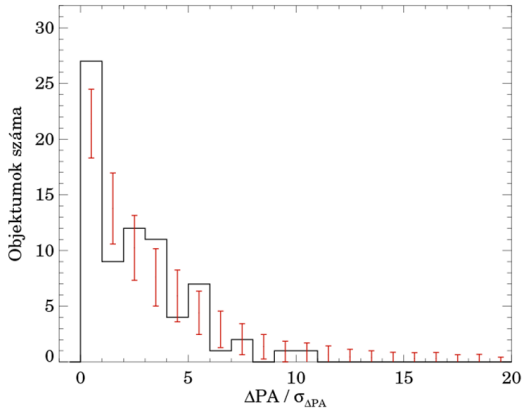
2. ábra. A 0923+392 (4C 39.25) egyenlítői koordinátáinak (rektaszcenziójának és deklinációjának) változása ezredívmásodpercben (mas) mérve. Különösen szembetűnő a rektaszcenzió változása (*fent*). A csúszó átlagolással kapott pontokhoz tartozó hibaértékek egyúttal azt is jelzik, hogy a mérési és adatfeldolgozási technika hogyan vált pontosabbá az eltelt kb. két évtized folyamán.

nő vagy onnan eltűnő, annak mentén esetleg kifelé mozgó rádiókomponensek okozzák, akkor várható, hogy esetleg korrelációt találunk a fent említett két irány között is.

Vizsgálati módszerünk és eredményeink minden részletére itt nem tudunk kitérni, publikálásuk előkészületben van (Moór et al. 2009). Előzetes eredményeink azt mutatják, hogy egy 75 kvazárt



3. ábra. 0851+202 (OJ 287, *balra*) és a 0923+392 (4C 39.25, *jobbra*) kvazár 8.6 GHz-en készített VLBI térképeiből előállított fényességeloszlási modellek komponensei. Az illesztett Gauss-függvények (Piner et al. 2007) középpontját keresztek, félértékszélességét ellipszisek jelölik. A jetek jellemző iránya a komponensek elhelyezkedése alapján jól kivehető, kvantitatív módon kezelhető. A geodéziai VLBI mérésekből a pozícióeltolódásra kapott irányt és annak bizonytalanságát a központi „magból" kiinduló szürke nyalábok iránya és szélessége mutatja. A két példa közül az egyik (4C 39.25) egy igen jó iránybeli egybeesést, a másik (0851+202) ugyanakkor egy közel merőleges jet–elmozdulás viszonyt mutat. (Ez utóbbi jelentős szögeltérés nem egyedi eset a vizsgált mintában.)



4. ábra. A vizsgált 75 elemű kvazárminta VLBI szerkezete (Piner et al. 2007) alapján definiált jetirány és a koordináta-változások iránya (Titov, személyes közlés) közötti szögeltérés (ΔPA) és hibája ($\sigma_{\Delta PA}$) közötti arány, hisztogramon ábrázolva (folytonos vonal). Ezer hasonló, de véletlenszerűen beállított irányokkal rendelkező mintával végzett szimulációink átlagát és az értékek szórását jelképezik a grafikonra rajzolt függőleges szakaszok. A két irány értelmezéséhez segítenek a 3. ábrán bemutatott példák. A valódi mintában a ΔPA értékek eloszlása 0º és 90º között közel egyenletes.

tartalmazó minta alapján *nincs* nyilvánvaló összefüggés a koordináta-változások iránya és a jetre jellemző irány között (4. ábra).

Ez az állítás úgy értendő, hogy a vizsgált kvazárok közt nagyjából egyformán fordulnak elő olyanok, amelyeknél a két irány egybeesik, s olyanok is, amelyeknél nem. (A vizsgált 75 kvazár közül 16 tartozik az ICRF-et jelenleg definiáló elsődleges referenciapontok közé.)

Mivel magyarázható ez az elsőre furcsának tűnő eredmény? Emlékeztetünk rá, hogy a VLBI rádióképek szögfelbontása ~1 mas, a jetek jellemző szögkiterjedése pedig ~1-10 mas. A koordináta-változások nagyságrendje ugyanakkor legfeljebb ~ 0.01–0.1 mas/év. Ez a rendelkezésre álló hosszú idősorok alapján ~0.001 mas/év pontossággal mutatható ki (pl. MacMillan és Ma 2007). Mindez azt is jelenti, hogy a geodéziai VLBI megfigyelések során kapott kvazár-koordináták bizonytalansága jóval belül esik azon a szögskálán, amelyről közvetlen interferometrikus képalkotással információhoz juthatunk. Ha a mért pozíció-eltolódások kapcsolatba hozhatók a nagyfelbontású rádiószerkezettel – aminek az ellenkezőjére egyelőre nincs bizonyíték –, akkor az úgy lehetséges, hogy a kvazárok a mostaninál 1-2 nagyságrenddel kisebb szögskálán más jellemző irányokkal (is) írhatók le. Ez a feltételezés a VLBI képalkotás szögfelbontásának növelésével lenne ellenőrizhető a jövőben. Erre a megfigyelési hullámhossz csökkentése és/vagy az űr-VLBI technika – a VLBI bázisvonalak kiterjesztése a Föld méretein túlra, mesterséges holdon elhelyezett rádióteleszkóppal – kínál lehetőséget. A relativisztikus jetekben – nagyobb, az ezred-ívmásodperces és ívmásodperces skálák között – jól ismertek ilyen irányeltérések (pl. Conway és Murphy 1993).

4 Összefoglalás

A VLBI fontos űrgeodéziai technika, amelynek kvázi-inerciális vonatkoztatási rendszerét (ICRF) távoli rádiósugárzó aktív galaxismagok jelölik ki. Közülük egy 75 elemű minta statisztikai elemzése azt mutatta, hogy a kvazárok ~1-10 mas skálájú rádiószerkezetére jellemző irány nincs nyilvánvaló összefüggésben a legfeljebb ~0.01–0.1 mas/év nagyságrendű koordináta-változásaik irányával. Küszöbön áll az ICRF definíciójának pontosítása, újraértelmezése. Ennek során elsődleges szempont lesz, hogy olyan kvazárokat válasszanak alappontul, amelyeknek az elmúlt évtizedekben mért koordináta-eltolódásai minimálisak. Mind asztrofizikai, mind geodéziai szempontból továbbra is nyitott kérdés, hogy mi az összefüggés a kvazárok rádiószerkezete, fizikai tulajdonságai, valamint az egyes esetekben mérhető látszólagos pozíció-változások között.

Köszönetnyilvánítás. Köszönettel tartozunk Oleg Titovnak (Geoscience Australia) a kvazárok koordináta-idősorainak rendelkezésünkre bocsátásáért. Kutatásainkat részben az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok (OTKA) támogatásával végezzük, a K72515 sz. szerződés alapján.

Hivatkozások

Conway JE, Murphy DW (1993): Helical jets and the misalignment distribution for core-dominated radio sources. Astrophys. J., 411, 89-102

Fey AL, Eubanks TM, Kingham KA (1997): The Proper Motion of 4C 39.25. Astron. J., 114, 2284-2291.

Frey S (2002): Kvazárok. Meteor Csillagászati Évkönyv 2003, Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 222-234.

Frey S (2007): Alappontok az égen. Geod. Kart., 59;8-9, 29-35.

Lambert S, Gontier A-M (2009): On radio source selection to define a stable celestial reference frame. Astron. Astrophys., 493, 317-323.

Ma C, Arias EF, Eubanks TM, Fey AL, Gontier A-M, Jacobs CS, Sovers OJ, Archinal BA, Charlot P (1998): The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry. Astron. J. 116, 516-546.

MacMillan D S, Ma C (2007): Radio source instability in VLBI analysis. J. Geod., 81, 443-453.

Moór A, Frey S, Titov OA, Bakos J (2009), Astron. Astrophys., előkészületben.

Piner BG, Mahmud M, Fey AL, Gospodinova K (2007): Relativistic Jets in the Radio Reference Frame Image Database. I. Apparent Speeds from the First 5 Years of Data. Astron. J., 133, 2357-2388.

Sovers OJ, Fanselow J, Jacobs CS (1998): Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results. Rev. Mod. Phys., 70;4, 1393-1454.

Titov O, Tesmer V, Böhm J (2004): OCCAM v.6.0 Software for VLBI Data Analysis. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2004 General Meeting Proceedings. Edited by N. R. Vandenberg and K. D. Baver, NASA/CP-2004-212255, 267-271.

Titov OA (2007): Apparent Proper Motions of Radio Sources from Geodetic VLBI Data. Astron. Lett., 33; 7, 481-487.

A GNSSNET.HU SZOLGÁLTATÁS JELENE ÉS JÖVŐJE

*Horváth Tamás**

The GNSSnet.hu service at present and in the future *- The Hungarian GNSSnet.hu ground based augmentation system and services have gone through a major development in the last few years. All planned Hungarian GNSS reference stations have been deployed and the integration of the neighbouring countries' nearby stations has commenced. Following the international development trends a number of new procedures and data types have been introduced. The development will continue in the future, among other tasks the support of new GNSS satellite systems and signals will be a high priority.*

Keywords: GNSS, network RTK, RTCM, state-space modelling

A GNSSnet.hu földi kiegészítő infrastruktúra és az arra támaszkodó szolgáltatások az elmúlt évek során jelentős fejlődésen mentek keresztül. A hazai referenciaállomás-hálózat összes tervezett állomását kiépítettük és megkezdtük a szomszédos országok határmenti állomásinak integrációját. A nemzetközi fejlesztéseket követve számos új eljárást és adattípust vezettünk be. A fejlesztések a jövőben tovább folytatódnak, egyebek mellett kiemelt fontossággal kezeljük majd az új GNSS műholdrendszerek és új jelek támogatását.

Kulcsszavak: GNSS, hálózati RTK, RTCM, állapot-tér modellezés

1 Bevezetés

A Földmérési és Távérzékelési Intézet (FÖMI) penci Kozmikus Geodéziai Obszervatóriumának (KGO) munkatársai az elmúlt évek során jelentős erőfeszítéseket tettek annak érdekében, hogy a hazai GNSS infrastruktúra kiépítése befejeződjön. 2008. év végére az összes tervezett magyarországi GPS/GNSS referenciaállomást beüzemeltük és a határon túli állomások integrációja is jó úton halad. A GNSS hálózatra épülő valós idejű- és utólagos szolgáltatások segítségével ma már bárhol az országban hozzáférhetünk az egységes európai vonatkoztatási rendszerhez, az ETRS89-hez. A KGO transzformációs megoldásai (VITEL, EHT[2]) révén az ETRF-ben kapott koordinátákat az Egységes Országos Vetületi rendszerbe (EOV-ba) transzformálhatjuk. A GNSSnet.hu infrastruktúra lehetővé teszi, hogy a hagyományos geodéziai módszereknél lényegesen gyorsabban lehessen centiméteres pontossággal helymeghatározást végezni Magyarországon.

2 Optimális állomásközi távolság

A Selective Availability (SA) 2000-es eltörlése óta a GNSS helymeghatározást terhelő hibaforrások közül a műholdak pálya- és órahibái, valamint az atmoszféra okozta hibák a legjelentősebbek. Ezek közül a műholdak órahibái függetlenek a felhasználó referenciaállomástól való távolságától, hatásuk különbségképzéssel kiesik. A pályahibák és az atmoszféra különböző rétegei által okozott jelkésleltetések viszont a GNSS vevő helyzetétől függően más-más hatást gyakorolnak a meghatározott műhold-vevő távolságokra. Relatív helymeghatározás esetén az említett hibaforrások a referenciaállomástól távolodva egyre növekvő mértékű maradékhibákat okoznak. Ezért ezeket távolságfüggő hibáknak nevezzük. Hagyományos, egybázisos RTK esetén a referenciaállomás méréseit terhelő hibákat csak az állomás viszonylag szűk, 30-40 km-es környezetében tekinthetjük a felhasználói oldalon tapasztalt hibákhoz hasonlónak. Ennél messzebb a távolságfüggő hibák hatása miatt a referenciaállomások korrekciói már nem írják le elegendően pontosan a felhasználókra vonatkozó hibahatásokat, vagyis nem alkalmasak arra, hogy geodéziai pontosságot lehessen velük elérni.

A 1990-es évek második felétől terjedtek el világszerte azok a megoldások, ahol már nem külön kezeljük az egyes referenciaállomásokat és állítjuk elő az azokra vonatkozó korrekciókat, hanem a hálózatban lévő összes állomás adatait együttesen dolgozzuk fel. Így lehetőség nyílik arra, hogy az

*FÖMI-KGO, 1592 Budapest, Pf. 585.
E-mail: horvath@gnssnet.hu

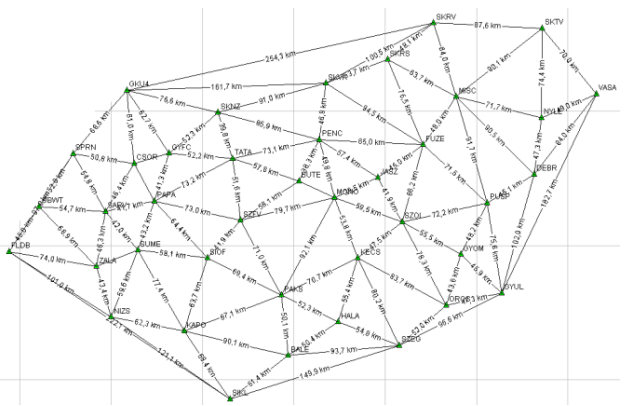
állomások közötti területre is modellezni tudjuk a távolságfüggő hibákat és becsülni tudjuk azok hatását. Az ilyen elven működő valós idejű kinematikus helymeghatározást nevezzük hálózati RTK-nak. Az így felépülő rendszerekben kevesebb állomás telepítésével is ugyanazt a pontosságot lehet elérni, továbbá egy-egy állomás kiesése (pl. kommunikációs hiba folytán) nem jelent a szolgáltatásban kiesést, vagy jelentős pontosságromlást az adott területen (Horváth 2004).

Az RTK hálózatokban is célszerű azonban megfelelően megválasztani az állomások közötti távolságot. A távolságfüggő hibák közül a troposzféra okozta késleltetés változik leggyorsabban a növekvő távolsággal. Éppen ezért elsősorban a troposzféra megfelelő pontosságú modellezéséhez szükséges mintavételi sűrűség szabja meg a kívánatos állomásközi távolságot. A különböző hálózati RTK szoftverek által alkalmazott jelenlegi modellek alapján az mondhatjuk, hogy az optimális állomásközi távolság 50-70 km körül van. Minél nagyobb hálózatról van szó, minél több állomás adatait dolgozzuk fel együttesen, annál hosszabbak lehetnek ezek a vektorok, a pontossági követelmények változatlanul hagyásával. 15 vagy annál több állomás hálózatba kapcsolása esetén akár 100 km-ig is nőhet ez a távolság. Az ilyen hosszúságú vektorok esetén ugyanakkor az inicializálási idő növekedésével kell számolni.

A fentiek figyelembevételével a hazai GNSS infrastruktúrát az évtized közepén úgy terveztük meg, hogy a referenciaállomások átlagos távolsága nagyságrendileg 60 km legyen, és lehetőleg sehol ne haladja meg a 100 km-t. A 2008. év végére elkészült hálózatban 35 magyarországi és 9 határon túli állomás működik, az átlagos állomásközi távolság 59 km. Az 1. ábra a GNSSnet.hu hálózat 2008. novemberi állapotát tükrözi és nem tartalmazza az azóta bekapcsolt salgótarjáni (SALG), barcsi (BARC), dunaújvárosi (DUJV) és bodonci (BODO) állomásokat.

3 Az infrastruktúra-építés elmúlt 2 éve

A hálózatépítés 2007-2008-ban jelentősen felgyorsult. Ebben a két évben 15 új hazai állomás épült (Barcs, Debrecen, Dunaújváros, Gyomaendrőd, Gyula, Kiskunhalas, Nagykanizsa, Nyíregyháza, Pápa, Salgótarján, Sárvár, Siklós, Siófok, Szolnok, Vásárosnamény) és 9 határon túli állomást (Bodonci, Érsekújvár, Feldbach, Felsőőr, Nagykürtös, Pozsony, Rimaszombat, Rozsnyó, Tőketerebes) vontuk be a feldolgozásba. 2008. év végéig összesen 27 db új referenciaállomás vevőt vásároltunk, amelyek mindegyike képes az amerikai GPS műholdak mellett az orosz GLONASS rendszer műholdjeleinek vételére is. Az új vevők mindegyikéhez robotkaron végzett egyenkénti abszolút PCV (fáziscentrum változás) kalibrált choke ring antennát telepítettünk. Az új referenciavevők és antennák garanciát jelentenek arra, hogy állomásaink a jelenleg elérhető legjobb mérési minőséget biztosítják. A 27 db új vevőből nem csak új állomásokat telepítettünk, hanem megkezdtük a régi, elavult műszerek cseréjét is. A KGO középtávú célja, hogy a hálózatban lévő összes, csak GPS jelek vételére alkalmas műszert és antennát GPS+GLONASS-képes eszközökre cserélje. Néhány évvel ezelőtt még erősen megkérdőjelezhető volt, hogy érdemes-e támogatni a GLONASS műholdrendszert



1. ábra. A GNSSnet.hu referenciaállomások közötti távolságok

Az elmúlt két évben felbocsátott 12(!) új GLONASS-M műholdnak köszönhetően 2009 februárjában 20 műholdból áll az orosz konstelláció. A napi gyakorlatban ez azt jelenti, hogy egyes napszakokban a horizont felett akár 8-9 GLONASS holdat is észlelhetünk. Különösebb magyarázat nélkül is belátható, hogy korábbi évekhez képest nagyságrendekkel többet ér a GLONASS támogatás. Ezt felismerve vezette be a GNSS Szolgáltató Központ előbb a GLONASS-os hagyományos RTK (2007) majd a GLONASS-os hálózati RTK szolgáltatást (2008). A GLONASS növekvő jelentőségét igazolják vissza azok a felhasználóink, akik GPS+GLONASS-képes rover vevőjükkel nehéz mérési körülmények között (épületek között, fás területen, tagolt domborzati viszonyok között) is tudnak dolgozni. A tapasztalatok szerint ott is lehetséges az inicializálás, ahol korábban meg se próbáltak volna GPS vevővel mérni. Az igazi különbséget a két rendszer együttes használata jelenti. A GLONASS mellett a GPS rendszer is folyamatosan fejlődik. A jelenlegi konstelláció 31 műholdból áll, Magyarországon egyidőben 8-14 holdat lehet „látni". A két rendszer kombinálásával nem ritkán 19-20 műhold áll rendelkezésre.

4 Az GNSSnet.hu szolgáltatások fejlődése

Az utólagos adatok felhasználói részére a megszokott állomásonkénti RINEX adatok mellett 2007 márciusától ún. virtuális RINEX adatokat is kínálunk. A virtuális adatokat nem a vevők, hanem a központi hálózati szoftver állítja elő. Ilyen adatokhoz az RTK hálózat által lefedett területen belül lehet hozzájutni. A virtuális RINEX fájlokat a felhasználók által az adatok lekérésekor megadott pozícióra állítjuk elő. Ezáltal a régebbi, egyfrekvenciás vevőkkel is lehetséges utófeldolgozással geodéziai pontosságú helymeghatározást végezni az országban bárhol. Továbbá a referenciaállomásoktól távolabb virtuális RINEX adatok használata esetén kétfrekvenciás GPS vevőkkel elegendő rövidebb ideig észlelni. A GLONASS jelek vételére is alkalmas referenciaállomások szaporodásával a jelenleg letölthető RINEX és virtuális RINEX adatok – a felhasználói igénytől függően – már GLONASS észleléseket is tartalmaznak.

A KGO valós idejű szolgáltatása is jelentős fejlődésen ment át az elmúlt két év során. A korábbról megszokott korrekciók mellett új típusú adatok és új formátumú korrekciók is megjelentek. 2008 végén az alábbi valós idejű adatokhoz lehetett hozzáférni:

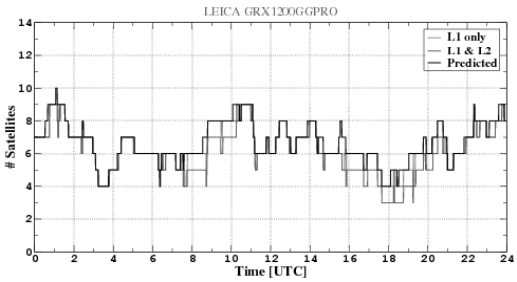
Hagyományos, egybázisos adatok

1. DGPS korrekciók, RTCM 2.1 formátumban, automatikus állomásválasztással,
2. DGPS korrekciók, RTCM 2.1 formátumban, Monor állomásról,
3. RTK adatok csak GPS műholdakra, RTCM 2.3, RTCM 3.0 és Trimble CMR formátumban, automatikus állomásválasztással,
4. RTK adatok GPS és GLONASS műholdakra, RTCM 2.3 és RTCM 3.0 formátumban, automatikus állomásválasztással,

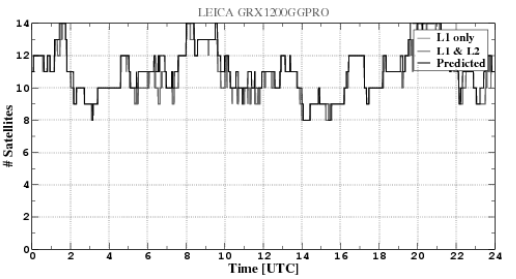
Hálózati RTK adatok

5. VRS adatok csak GPS műholdakra, RTCM 2.3, RTCM 3.1 és Trimble CMR formátumban, a felhasználó pozíciójára lokalizálva,
6. VRS adatok GPS és GLONASS műholdakra, RTCM 2.3 és RTCM 3.1 formátumban, a felhasználó pozíciójára lokalizálva,
7. FKP adatok GPS és GLONASS műholdakra, RTCM 2.3 formátumban, automatikus állomásválasztással és korrekciófelületi paraméterekkel,
8. MAC adatok csak GPS műholdakra, RTCM 3.1 formátumban, automatikus fő- és kiegészítő állomás választással.

Adataink döntő hányadát a nemzetközi RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) SC-104 szabvány különböző verzióinak megfelelő formátumban továbbítjuk. Az RTCM szabványt az összes jelentős GNSS vevő gyártó cég támogatja. Elsősorban a precíziós mezőgazdálkodás területéről érkező felhasználóink számára 2007 közepe óta Trimble CMR formátumban is sugárzunk valós idejű adatokat. Az adatok továbbítása változatlanul kizárólag az Interneten keresztül történik az erre a célra kifejlesztett Ntrip (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) protokollon keresztül. Az Ntrip protokoll 2004. óta egyben RTCM SC-104 szabvány is.



2. ábra. Észlelt és lehetséges maximális GLONASS műholdszám, Gyula, 2009. 01.28.



3. ábra. Észlelt és lehetséges maximális GPS műholdszám, Gyula, 2009. 01.28.

A korábban bár bemutatott (Horváth 2004) VRS és FKP módszerek után 2008 elején új hálózati RTK eljárást vezetett be a GNSS Szolgáltató Központ. Az ún. fő- és segédállomások módszere (Master-Auxiliary Concept, MAC) a hálózatot automatikusan max. 6 db állomásból álló cellákra osztja. A felhasználó a cellában automatikusan kiválasztott főállomás nyers méréseit, valamint a kiegészítő állomások főállomáshoz viszonyított korrekció különbségeit kapja meg. A MAC előnye a VRS-sel és az FKP-vel szemben, hogy segítségével visszanyerhetők a kiegészítő állomások eredeti nyers mérései is, és így a mozgó vevő szabatos valós idejű hálózatkiegyenlítést tud végezni. Ezzel kizárható, hogy a központi szoftverben és a mozgó vevőben különböző modelleket alkalmazzunk pl. a troposzféra hatásának számítására, tehát kiküszöbölhetőek a modell eltérésekből fakadó maradékhibák. További előnye a MAC-nek (és az FKP-nek) a VRS módszerrel szemben, hogy nem csak azokról a műholdakról tudunk információt nyújtani, amelyekre sikeresen megtörtént a ciklustöbbértelműség feloldása a hálózati szoftverben, hanem a főállomás esetén a még nem fix státuszú holdakról is (a kiegészítő állomásokra ez nem igaz). Így a rover vevő dönthet úgy is, hogy a hagyományos és a hálózati RTK hibrid változatát használja olyan esetekben, amikor a közös műholdak száma a központi szoftverből kapott kizárólag fix műholdak esetén nem éri el a minimális ötöt. A MAC (és az FKP) módszerek hátránya a VRS-sel szemben a nagyobb adatmennyiség és az annak továbbításához szükséges nagyobb sávszélesség igény. A MAC 2006. óta, a 3.1-es RTCM verzió bevezetése óta nemzetközi hálózati RTK szabvány. A VRS (pontosabban: nem-fizikai referenciaállomás) 2007 augusztusa óta, az FKP pedig várhatóan 2009-ben válik majd RTCM szabvánnyá.

A monori állomás DGPS adatain kívül az összes többi valós idejű adatunkat a felhasználók pozíciójára optimalizálva állítjuk elő. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a felhasználóknak a központi internetes szerver felé be kell küldeniük a közelítő pozíciójukat. Ennek a szabványos megoldása szintén be van építve az összes modern GPS/GNSS rover vevőbe. A bejövő pozíció alapján a szerver hagyományos DGPS és RTK, valamint FKP adatok kiválasztása esetén megkeresi a felhasználóhoz legközelebbi működő referenciaállomást, és annak adatait továbbítja. VRS esetén a felhasználó pozíciójának megfelelően előállítja a számára optimalizált, ún. virtuális referenciaállomás adatokat. MAC esetén a cella és azon belül a fő- és a kiegészítő állomások választása történik automatikusan.

A szolgáltatás technikai hátterét érintő változások 2008-ban zajlottak le. Áprilisban az addig a penci obszervatóriumban működő adatfeldolgozó és -továbbító szerver számítógépek a FÖMI budapesti székházába kerültek át. Az átköltözés az adatforgalom biztonsága szempontjából volt fontos, a korábbi tapasztalatok szerint a penci Internet kapcsolat nem volt elegendően megbízható. A költözéssel egyidőben a Szolgáltató Központ lecserélte az addig használt számítógép-parkját egy új, gyorsabb és megbízhatóbb szerver-számítógépekből álló rendszerre. Ettől a váltástól is a nem tervezett kiesések csökkenését vártuk, ami igazolódott is az év során. A szolgáltatás rendelkezésre állása és minősége szempontjából a feldolgozó számítógépeken kívül döntő szerepe van a kommunikációs hálózatnak is. A GNSSnet.hu referenciaállomások többsége földhivatalban található. A vevők másodpercenkénti nyers mérési adatait a földhivatalokat összekötő TAKARNET hálózaton keresztül juttattuk el a feldolgozó központba. Egy korábban elfogadott jogszabály alapján minden hazai költségvetési intézménynek, így a FÖMI-nek is csatlakozni kellett az Elektronikus Kormányzati Gerinchálózathoz (EKG-hoz). Az EKG rendszerben a korábbinál lényegesen szigorúbban szabályozott

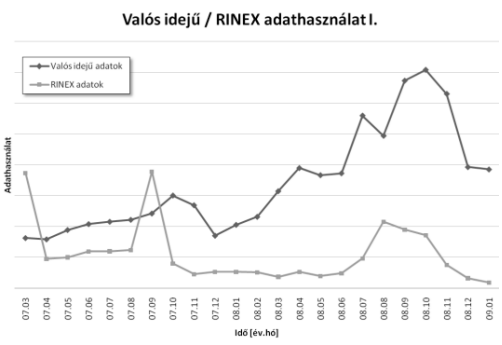
az adatokhoz való hozzáférés, így biztosítható a hálózaton belüli adatforgalom és a belső védett számítógépes hálózatok biztonsága. Az EKG-ba való belépéssel párhuzamosan 2008 februárjában a FÖMI központi döntése alapján a korábban használt bérelt vonali TAKARNET hálózatot ADSL-alapú összeköttetésre cserélték. Az ADSL technológia lényegesen nagyobb sávszélességet biztosít, ami a földhivatalok közötti ingatlan-nyilvántartási és térképi adatok letöltését nagyban gyorsítja. Az ADSL emellett lényegesen olcsóbb technológia a bérelt vonali kapcsolatnál. Ugyanakkor sajnos az ADSL vonalak megbízhatósága meg sem közelíti a bérelt vonalakét, ezt tapasztaltuk is a referencia-állomások adataiban megjelenő nagyszámú szakadás formájában. Míg a földhivatalok számára tökéletesen megfelelt, sőt a nagyobb sávszélesség miatt előnyt jelentett az ADSL technológiára való áttérés, egyértelművé vált, hogy a GNSS Szolgáltató Központ igényeit nem elégítette ki. Ezért 2008 október-novemberében az összes érintett földhivatalban a TAKARNET mellett egy második, bérelt vonali kapcsolatot építettünk ki, kizárólag a GNSS adatok továbbítására. A változtatás eredménye azonnal érezhető volt, a szakadozások megszűntek, az adatok rendelkezésre állása ismét a korábban megszokott magas szintre emelkedett.

5 A felhasználásra jellemző adatok

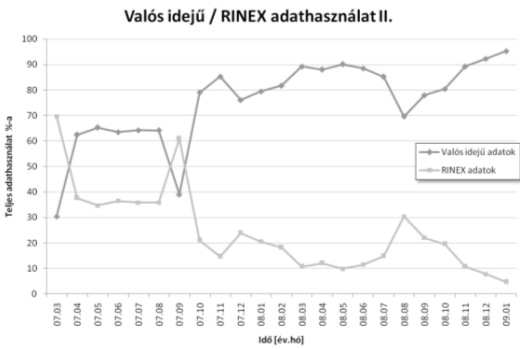
A GNSSnet.hu szolgáltatásról elmondható, hogy a felhasználók döntő többsége földméréssel foglalkozó vállalkozás. Az elmúlt évek során a hazai földmérő cégek egyre nagyobb hányada fektetett be a GPS/GNSS technológiába, annak egyértelmű előnyei miatt. Közülük is folyamatosan nő azoknak a száma, akik a FÖMI GNSSnet.hu szolgáltatására támaszkodnak. Mintegy 440 magánszemély, cég és intézmény regisztrált a szolgáltatások valamelyikére. Ez 560 regisztrált felhasználói nevet jelent, azaz 560 GPS/GNSS műszert (egy cég sok esetben több műszerrel és ezért több felhasználói névvel is rendelkezik).

Az RTK és hálózati RTK technológia elterjedésével érezhetően visszaesett az utólagos adatok iránti kereslet, míg a valós idejű adatokra az évszakos ingadozástól eltekintve folyamatosan növekszik az igény. Ez látható a 4. és 5. ábrákon, amelyek 2007 márciusától 2009 januárjáig mutatják az adathasználat változását a különböző adatok esetén. Az ábrákon szereplő adathasználat értékek az egyes adattípusokra vonatkozó adatforgalommal, és így az azokból származó bevételekkel arányosak. Mivel ezeket az információkat a Szolgáltató Központ bizalmasan kezeli, nem tüntettünk fel abszolút értékeket. Ezekkel az ábrákkal ugyanakkor jól érzékeltethető a változások trendje. A RINEX adatletöltések két kiugró értéke (2007. március és szeptember) egy-egy felhasználó nagymennyiségű másodperces RINEX letöltése miatt jelentkezett. Az 5. ábrán látható, hogy amíg 2007 első felében nagyjából hasonló bevételt könyvelhetett el a FÖMI a valós idejű és az utólagos adatok forgalmazásából, addig 2008 végére a teljes adatforgalom és bevétel több mint 90%-át a valós idejű adatok adták. A 4. ábrán jól látható, hogy a valós idejű adatok használata a 2008. év második felében ugrásszerűen nőtt. Ezt követően a téli hónapokban jelentős visszaesés volt tapasztalható, ami egyrészt a csapadékosabb és hidegebb időjárásnak, másrészt az építőipari beruházásokat is érintő gazdasági visszaesésnek tudható be.

A 6. ábrán a különböző típusú valós idejű adatok felhasználásának összehasonlítása látható. Ebből kiderül, hogy ma már a felhasználók döntő többsége hálózati RTK és nem hagyományos, egybázisos RTK megoldást választ. Jól látható, hogy a legnépszerűbb hálózati RTK módszer a VRS, bár figyelemre méltó a MAC 2008 februári bevezetését követő gyors térnyerése. A korrekciófelületi paraméterek (FKP) módszerére Magyarországon csak elenyésző számban támaszkodnak a felhasználók. Differenciális korrekciókat (DGPS-t) alig használnak, ebből is látszik, hogy a GNSSnet.hu szolgáltatás felhasználói a professzionális szektorból kerülnek ki, egyértelműen centiméteres pontosságot igényelnek. Az elsősorban RTK felhasználók számára bevezetett új RTCM 3.x szabványcsalád 2005-ös megjelenése fontos előrelépés volt a korábbi RTCM 2.x-hez képest. A 3.x szabvány legfontosabb előnye, a korábbinál lényegesen jobb tömörítési eljárás, aminek köszönhetően ugyanazt az információt mintegy negyedakkora sávszélesség igénybevételével lehet továbbítani.



4. ábra. A valós idejű- és utólagos adatok használatának változása az elmúlt két évben



5. ábra. A valós idejű- és utólagos adathasználat arányának változása az elmúlt két évben

Ennek a terepi mérési gyakorlatban van kiemelt szerepe. Az Interneten keresztül továbbított adatokhoz terepen mobil adatkommunikációs csatornákon keresztül lehet hozzáférni. A viszonylag szűk területre, elsősorban a nagyobb városok és a Balaton környékére korlátozódott szélessávú mobil Internet hozzáférés (3G/HSDPA) mellett országosan csak a kisebb sávszélességet biztosító EDGE, vagy a még lassabb GPRS kapcsolat áll rendelkezésre. Utóbbi esetén a mégoly kis sávszélesség igényű GNSS adatok átvitelében is tapasztalhatunk szakadásokat, kisebb-nagyobb fennakadásokat. A tömörebb RTCM 3.x szabvány tehát egyértelműen előnyösebb a megbízható adattovábbítás szempontjából. Nem beszélve a kisebb adatmennyiség után fizetendő alacsonyabb mobil Internet szolgáltatási díjról. A fentiek fényében érthető, hogy miért terjedt el olyan gyorsan és miért szorította ki szinte teljesen az RTCM 2.x szabványt a hazai geodéták körében is.

Az RTK és hálózati RTK technológiával végzett helymeghatározás minőségét két mutatóval lehet legjobban jellemezni. Az egyik a meghatározott pozíció abszolút pontossága, a másik a ciklustöbbértelműség feloldáshoz (vagyis az inicializáláshoz) szükséges idő. A szolgáltatás nem működik megfelelően, ha a felhasználók által meghatározott pontok pozíciója nem bizonyul elegendően pontosnak, illetve, ha az inicializálásra túl sokat kell várni. Mind a pontosság, mind az inicializálási idő függ a mérés körülményeitől, többek között a felhasználói GPS/GNSS vevő minőségétől, a rendelkezésre álló műholdak számától, azok geometriájától, az ionoszféra aktivitásától, a többutas jelterjedés és más lokális zavaró hatások mértékétől, a legközelebbi állomás távolságától, ill. hálózati RTK esetén az állomások közötti távolságtól, valamint az adatátviteli csatorna megbízhatóságától. Számos tesztmérés (Busics 2007) és felhasználói visszajelzés bizonyította, hogy megfelelő mérési körülmények között a hazai infrastruktúrára támaszkodva bárhol az országban ≤ 2 cm (1σ) vízszintes és ≤ 3 cm (1σ) magassági pontosság érhető el (Busics és Horváth 2006).

Az inicializálás időtartamának vizsgálatára a legcélszerűbb, ha a felhasználók által a központi szervernek beküldött pozíció adatokat használjuk. Az automatikus állomásválasztáshoz, ill. a virtuális referenciaállomás adatok előállításához szükséges felhasználói pozíció üzenet (NMEA GGA) a rover vevő aktuális ellipszoidi földrajzi koordinátái mellett tartalmazza többek között a pozíció minőségi mutatóját is. Ennek a mutatónak a változása jelzi, hogy a kezdeti abszolút GNSS pozíció mikor megy át differenciális pozícióba, majd lebegőpontos (float) RTK-ba, végül az inicializálás eredményeként fix RTK-ba. A felhasználói vevők többsége 5 másodpercenként küldi be ezt az üzenetet, de vannak olyan vevők, amelyek másodpercenként, megint mások csak 10 másodpercenként továbbítják azt. A 7. ábrán a 2009. január második felében rögzített összes felhasználói RTK és hálózati RTK inicializálás időtartamának eloszlása látható. Az ábrán a bejelentkezés utáni első befejezett inicializálás adatait mutatjuk, vagyis a minta nem tartalmazza az általában gyorsabban végbemenő újra-inicializálásokat és a megszakított inicializálásokat sem. A közel 9000 inicializálás az ország egészéről ad képet, az adatok tartalmazzák mind a hagyományos, mind a hálózati RTK bejelentkezéseket, a felhasználók által használt összes műszertípust és firmware verziót. A több mint két hétnyi minta a különböző műhold geometriák, napszakok és mérési körülmények közötti inicializálások eredményeit tartalmazza, így azt a szolgáltatásra jellemző adathalmaznak tekinthetjük. Látha-

tó, hogy a vizsgált időszakban a felhasználók többsége 20 másodpercen belül tudott inicializálni. Az esetek 80%-ában 40 másodpercen belül fix lett a pozíció, két percen belül pedig már az inicializálások 94%-a befejeződött. Öt percnél hosszabban mindössze az esetek 1.3%-ban kellett várni (ez már nincs feltüntetve az ábrán). Ebből levonható az a következtetés, hogy két percnél hosszabban nem célszerű várni az inicializálásra, ha ennyi idő alatt nem sikerült fix pozíciót elérni, akkor inkább meg kell szakítani a mérést és újra kell kezdeni az inicializálást.

6 Várható változások, fejlesztések

A GNSSnet.hu rendszer fejlesztése a jövőben sem áll meg, a Szolgáltató Központ célja, hogy mindig a lehető legmagasabb színvonalú szolgáltatásokkal álljon a felhasználók rendelkezésére, az elsők között követve a jelentős technológiai változásokat.

A hálózatépítés magyarországi szakasza 2008-ban lezárult (elképzelhető, hogy Pécsett még egy új állomás épül), de a környező országok határainkhoz közeli állomásainak hálózatunkba kapcsolása még közel sem fejeződött be. Az integráció elhúzódásnak számos oka van, többek között a hosszan húzódó közbeszerzési eljárások, az üzemeltetők belső konfliktusai és az adatcsere iránt mutatott mérsékelt érdeklődés. Mindezek ellenére célunk, hogy 2009 végére Horvátország, Szerbia, Románia és lehetőleg Ukrajna határmenti állomásait is integráljuk.

2008-ban a referenciaállomások mellett két monitorállomást is beüzemeltünk Nyírbátorban és Budapesten. Ezek az állomások tipikus GPS+GLONASS-os rover vevővel és antennával vannak felszerelve és nagy pontossággal ismerjük a pozíciójukat. A monitorállomások a GNSSnet.hu rendszer korrekcióit felhasználva folyamatosan, valós időben számítani fogják saját pozíciójukat. Az ismert és a számított pozíciók különbségét idősorokon feltüntetve, valamint statisztikai táblázatok formájában azonnal a felhasználók rendelkezésére fogjuk bocsátani a Szolgáltató Központ weboldalán. A folyamatos visszajelzés alapján a felhasználók akár azonnal a terepen meg tudnak majd győződni arról, hogy a szolgáltatás megfelelően működik-e, vagy van-e az adott pillanatban általános probléma a központi rendszerben. Az adatok alapján havi/éves statisztikák készülnek majd a szolgáltatás pontosságáról és rendelkezésre állásáról.

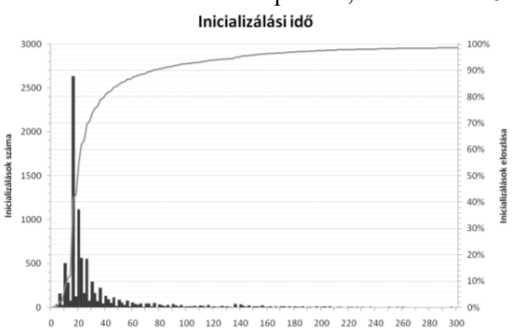
A 2009-es év során be kívánunk vezetni egy új RTCM-alapú transzformációs eljárást, aminek segítségével a transzformációs üzenetek fogadására képes rover vevők azonnal EOV rendszerben számíthatják pozíciójukat. Ezzel az újítással sikerül megoldani azon felhasználóink problémáját, akiknek a műszergyártója nem támogatja a FÖMI KGO által több évvel ezelőtt kidolgozott és azóta is sikeresen alkalmazott VITEL nevű valós idejű transzformációs eljárást.

Várható még, hogy a 2009-es év első felében RTCM szabvánnyá válik a GLONASS-os MAC is, így ezután ezt a hálózati RTK eljárást is választhatják a hibrid vevővel rendelkező felhasználók.

Felhasználóink számára a http://www.gnssnet.hu honlapon elérhető minőségellenőrző oldalakon túl, kifejezetten a terepi mérések támogatására be kívánunk vezetni egy mobiltelefonon/PDA-n/rover vevő vezérlőn megjeleníthető tömör minőségellenőrző weboldalt. A kisméretű, de annál informatívabb oldal tájékoztatja majd a felhasználókat a hálózati feldolgozás aktuális állapotáról (az állomásokon észlelt és a fix műholdak számáról, az atmoszféra aktuális állapotáról, a monitorállo-



6. ábra. Az egyes valós idejű adattípusok használatának változása az elmúlt két évben



7. ábra. Az inicializálási idő eloszlása 2009. január 15. és 31. között

mások által meghatározott pillanatnyi pozícióhibákról, stb.). Segítségével a felhasználók mérési nehézségek esetén könnyebben meg tudják majd ítélni, hogy saját műszerükhöz köthető, vagy más lokális problémával állnak-e szemben, esetleg a központi rendszer hibájából nem tudnak megfelelő minőségű helymeghatározást végezni. Mivel a hazai földmérő vállalkozások száma véges és egy bizonyos idő után nem várható, hogy továbbra is dinamikusan bővüljön a geodéta felhasználók száma, a GNSS Szolgáltató Központ más területekre is szeretné bevezetni a szolgáltatást. Elsőként a precíziós mezőgazdaságot szeretnénk megcélozni.



9. ábra. A GNSSnet.hu VRS szolgáltatását használó traktor sorkultiválás közben

Ismeretes, hogy számos globális kommerciális szolgáltató nyújt GPS korrekciós adatokat mezőgazdasági munkagépek automatikus kormányzásához. Ezeknél a szolgáltatóknál a FÖMI adataival gyorsabban és nagyobb pontosságot lehet elérni. Miután 2007-ben és 2008-ban sikeresen teszteltük a rendszert valós mezőgazdasági körülmények között (lásd 8. ábra), 2009-től elindítjuk a szolgáltatást ebben a szektorban is. A közeljövőben a legnagyobb kihívást minden bizonnyal a meglévő műholdrendszerek modernizációja, valamint az új GNSS rendszerek megjelenése fogja okozni. A jelenlegi két GPS frekvencián (L1 és L2) sugárzott jelek (L1 C/A, L2 P(Y), L2C) és a két GLONASS frekvencia tartományban (L1 és L2) sugárzott jelek (L1 C/A és L2 C/A) mellett egy sor új GNSS frekvencia és jel fog megjelenni:

- GPS (31 műhold) L5 frekvencia és jel, L1C jel az L1 frekvencián,
- GLONASS (24 tervezett műhold) L3 (FDMA) frekvencia, L1 (CDMA) és L5 (CDMA) frekvenciák rajtuk civil jelekkel,
- Galileo (30 tervezett MEO műhold) E1, E5A, E5B, E5, E6 (mind CDMA) frekvenciák, rajtuk számos civil jellel
- Compass (27 tervezett MEO műhold) E1, E2, E6 és E5b (mind CDMA) frekvenciák, rajtuk számos civil jellel.

A GLONASS holdak példájából is látszik, hogy néhány plusz műhold milyen hatással van a geodéziai műholdas helymeghatározásra. Belátható, hogy az összesen 112 műholdból álló GNSS flotta gyökeres változást hoz majd a precíz helymeghatározás területén. Az új jelek segítségével a korábbinál gyorsabban, pontosabban és megbízhatóbban lehet majd pozícionálni. A fölös mérések nagy száma miatt felgyorsul az inicializálás, várhatóan 1-2 másodpercen belül fix pozíciót fogunk kapni. Az atmoszféra késleltető hatását pontosabban fogjuk tudni modellezni és így csökkenteni tudjuk majd az ionoszféra és troposzféra okozta maradékhibák hatását. A nagyszámú redundáns műholdnak és a nagyobb teljesítményű jeleknek köszönhetően remélhető, hogy elegendő számú műhold lesz a pozíció számításhoz, bármilyen környezetben kell is dolgoznunk.

Mindehhez persze az szükséges, hogy az eddigiek mellett az új frekvenciák és jelek közül is jónéhányat támogassanak mind a felhasználói- és referenciaállomás vevők, mind a központi szoftver. A nagy GNSS vevőgyártók készülnek a váltásra, sorra jelennek meg a piacon a 72 – 120, sőt 216 (!) csatornás vevők, amelyekkel minden horizont feletti műhold jeleit lehet majd venni. Ahhoz azonban, hogy a centiméter pontos helymeghatározásban ezeket a jeleket használni lehessen, a másik oldalnak, vagyis a földi GNSS infrastruktúrának is támogatnia kell azokat. A Szolgáltató Központ hosszútávú célja, hogy az összes új GNSS műholdrendszert és az összes új frekvenciát és jelet támogassa. A referenciavevők esetén ez viszonylag könnyen megoldható, ma már többségben vannak azok a vevők a hálózatban, amelyek hardver és szoftverfrissítés után képesek lesznek az új jelek vételére. Ez azt jelenti, hogy nem kell majd új vevőket vásárolnunk, csupán a meglévőket kell majd frissíteni, ami nagyságrendekkel kevesebb pénzbe fog kerülni, mint az új vevők vásárlása. A vevők frissítésénél sokkal nehezebb kérdés a központi szoftver alkalmassá tétele. Ez a probléma természetesen nem csak minket, hanem minden RTK hálózat üzemeltetőt érint majd, bármilyen gyártó szoftverét is használják. Belátható, hogy a jelenlegi struktúrában, azaz relatív helymeghatározás esetén, ha minden új jelet támogatni kívánunk, akkor az robbanásszerű sávszélesség-igény növekedéssel

fog járni. Várhatóan a következő 4-5 évben még lesz egy átmeneti periódus, amikor nem minden új jel áll még rendelkezésre, az új műholdrendszerek még kiépítés alatt lesznek. Előreláthatólag ekkor még lehetséges lesz a jelenlegi rendszerben annak az 1-2 új jelnek (pl. GPS L5) a támogatása, amelyek lényeges előrelépést jelentenek ugyan, de nem okoznak még jelentős adatmennyiség növekedést. A későbbiek folyamán ugyanakkor ez már nem lesz tartható. A rendelkezésre álló korlátozott sávszélesség mellett nem lesz gazdaságos, sőt valószínűleg egyáltalán nem lesz megoldható az összes jelre vonatkozó nyers mérés vagy korrekció továbbítása.

Mint általában, úgy az elmúlt 1-2 évben is az RTCM SC-104 nemzetközi szabványosítási bizottság volt a változások motorja. A bizottság számos munkacsoportjában zajlik a fejlesztő, egyeztető munka, aminek eredményeképpen új szabványok formájában megszületnek a közeljövő kihívásaira adott szakértői válaszok. Az egyik ilyen fórum az ún. állapot-tér munkacsoport (State Space Working Group), melynek tagjai évek óta aktívan dolgoznak egy új filozófia bevezetése érdekében. A jelenleg alkalmazott mérés-tér modellezés az egyes műholdakra vonatkozó nyers távolságmérések vagy a távolságmérésekre vonatkozó korrekciók továbbításán és felhasználásán alapul. Ez minden esetben a referencia-rover vevőpár közötti különbségképzést, azaz relatív technológiát jelent. Ezzel szemben az állapot-tér modellezés különbségképzés nélküli, abszolút helymeghatározást takar. Az állapot-tér modellezés célja, hogy a mérés-tér modellezéssel szemben ne a GNSS hibák távolságmérésre gyakorolt hatását próbáljuk leírni, hanem magukat a hibaforrásokat. Vagyis próbáljuk meg az eddigieknél sokkal pontosabban modellezni a műholdak pályáját, a műholdak órahibáját, az atmoszféra különböző rétegeinek fizikai paramétereit, stb.. Ha elegendően pontosan meg tudjuk határozni a GNSS helymeghatározást terhelő összes hibaforrás pillanatnyi állapotát (→ állapot-tér modellezés), és az azokhoz tartozó megbízhatósági mutatókat (vagyis a teljes variancia-kovariancia mátrixot), majd azokat szabványos formában el tudjuk küldeni a felhasználóknak, akkor az ugyanazon modell-algoritmusokat használó felhasználói vevők, behelyettesítve a kapott paramétereket akár centiméter pontos abszolút helymeghatározást is végezhetnek (Bisnath és Gao 2007). Ehhez persze arra van szükség, hogy az összes hibaforrást szabványokban rögzített modellekkel írjuk le és a modell-paramétereket is szabványos formában továbbítsuk. Az állapot-tér munkacsoport éppen ezeknek a szabványoknak a definiálásával foglalkozik.

Miért is előnyös az állapot-tér modellezés a mérés-tér modellezéssel szemben? Egyebek mellett a következők miatt (Wübbena et al. 2005):

1. Állapot-tér modellezés és reprezentáció esetén nem kell az összes paramétert ugyanolyan gyakorisággal továbbítani. Tudjuk, hogy az egyes hibaforrások különböző dinamikával változnak. A mérés-tér megjelenítéssel szemben, ahol nincs lehetőség az egyes hibaforrások különválasztására, hanem minden adatot a leggyorsabban változó hibaforrás (műhold órahiba) dinamikájával, azaz másodpercenként kell továbbítani, itt megoldható, hogy az egyes paramétereket eltérő gyakorisággal frissítsük. Például a műholdak pályahibáit és a troposzféra paramétereket elegendő 30 másodpercenként, vagy még ritkábban frissíteni, az ionoszféra paramétereket pedig 10 másodpercenként. Ezzel drasztikusan csökkenthető a továbbítandó adatmennyiség.
2. Mérés-tér reprezentáció esetén a továbbított adatoknak valamennyi összetevő nagyságrendjét magukba kell foglalni, míg állapot-tér reprezentáció esetén csak az egyes összetevőkre külön-külön jellemző nagyságrendű adatokat kell továbbítani. Így minimalizálható az adatátvitelhez szükséges sávszélesség.
3. A meghatározott modell-paraméterek többsége (pl. műholdak pálya- és órahibája) független az egyes referenciaállomások méréseitől, illetve a felhasználók állomásoktól való távolságától. Nem fordulhat elő olyan eset, hogy a központi szoftver nem tud minden horizont feletti műholdra adatot szolgáltatni.
4. A meghatározott paraméterek nem függnek az egyes GNSS frekvenciáktól/jelektől, vagyis bármilyen frekvencián képes is észlelni a rover vevő, a továbbított állapot-tér információkat fel tudja majd használni. A meglévő műholdrendszerek közeljövőben megjelenő új frekvenciái és jelei semmilyen sávszélesség növekedést nem okoznak majd, míg az új GNSS rendszerek támogatása is lényegesen kevesebb adatot jelent, mint mérés-tér esetén.

5. Állapot-tér modellezés esetén a GNSS helymeghatározás tényleges fizikai hátterének pontos leírása a cél. Ehhez az egyes hibaforrásokat külön kezeli, figyelembe véve azok sajátos fizikai jellemzőit. A hasonló hatású hibákat jobban el lehet majd különíteni egymástól.

Az új eljárás bevezetése természetesen nem történhet meg egyik napról a másikra. A nemzetközi szabványban elfogadott modell-algoritmusokat be kell építeni az új rover vevőkbe, az eddig alkalmazott pozíció-számítási modellek helyére. Ez várhatóan hosszú időt vesz majd igénybe. Éppen ezért az állapot-tér munkacsoport több lépésben kívánja majd bevezetni az új megoldást (RTCM State Space Working Group, Mission Statement. http://rtcm.info/sc104/):

1. Valós idejű, deciméteres pontosságú abszolút helymeghatározás (Precise Point Positioning, PPP) kétfrekvenciás vevők részére. Szükséges állapot-tér adatok: precíz műhold pálya- és óraadatok valamint műhold oldali kód-késés adatok. → Ciklustöbbértelműség lebegőpontos megoldása.
2. Valós idejű, deciméteres pontosságú abszolút helymeghatározás egyfrekvenciás vevők részére. További szükséges állapot-tér adatok: ionoszféra VTEC (zenit irányú teljes elektron tartalom) adatok.
3. Valós idejű, centiméteres pontosságú abszolút helymeghatározás (RTK-PPP). További szükséges állapot-tér adatok: ionoszféra STEC (műhold irányú TEC) paraméterek, troposzféra paraméterek, műhold oldali fázis-késés adatok. → Ciklustöbbértelműség egész szám jellegű megoldása.

A FÖMI GNSS Szolgáltató Központja által használt hálózati RTK szoftver (Geo++ GNSMART) eddig is állapot-tér modellezést alkalmazott, az így előállt adatokat alakítja mérés-tér információkká (pl. virtuális referenciaállomás távolságmérésekké) annak érdekében, hogy a jelenlegi rover vevők képesek legyenek azokat felhasználni. Ugyanakkor már most lehetőség van arra, hogy a teljes állapot vektort továbbítsuk. Ez garanciát jelent arra, hogy a FÖMI az elsők között fogja tudni támogatni az új RTCM üzeneteket és a mögöttük rejlő új helymeghatározási filozófiát.

7 Összefoglalás

Cikkünkben bemutattuk, hogyan változott a hazai GNSS infrastruktúra kiépítettsége és az arra támaszkodó GNSSnet.hu szolgáltatás az elmúlt két évben. Részletesen jellemeztük a különböző valós idejű adatok felhasználási arányának változását és az RTK valamint hálózati RTK szolgáltatásra támaszkodó helymeghatározás gyakorlati tapasztalatait. Beszámoltunk a GNSS Szolgáltató Központ közeli és távlati terveiről, betekintést nyújtva a jövő valós idejű megoldását jelentő állapot-tér modellezés fejlesztésébe.

Hivatkozások

Bisnath S, Gao Y (2007): Current State of Precise Point Positioning and Future Prospects and Limitations. International Association of Geodesy Symposia, 133, in press.

Busics Gy, Horváth T (2006): Az aktív hálózatok adottságainak kihasználása a műholdas helymeghatározásban. Geodézia és Kartográfia, 4, 9-16.

Busics Gy (2007): A műholdas helymeghatározás geodéziai alkalmazásának technológiai és minőségi kérdései. PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2007.

Horváth T (2004): Javított valós idejű helymeghatározás Interneten keresztül. Geomatikai Közlemények VIII, 123-133.

Wübbena G, Schmitz M, Bagge A (2005): PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks. Proceedings of ION GNSS 2005, 13-16 September, Long Beach, California, USA, 2584-2594.

GPS MÉRÉSEK ÚJRAFELDOLGOZÁSA: NEMZETKÖZI ÉS HAZAI EREDMÉNYEK

Kenyeres Ambrus[*], *Figurski M*[**], *Grenerczy Gyula*[*]

Re-analysis of GPS measurements: results from abroad and Hungary *- The GPS analysis strategies, the applied models and software have been considerably changed since the global (IGS) and regional (EPN) permanent networks are in operation. All changes brought temporal inhomogeneity in the estimated parameters, most apparently in the coordinate time series. After the introduction of the absolute phase centre variation (PCV) models of the satellite and ground GPS antennae, the complete re-analysis of the historical measurements could not be further postponed. In 2009, following the IGS re-analysis a coordinated re-processing of the EPN observations is also planned. In preparation of the EPN re-processing a test re-analysis has been done at the Military University of Technology (MUT) in Poland covering the complete EPN dataset. The target of this work is to assess the required resources, the status and completeness of the database and to quantify the improvement may gained by the re-processing.*

Using the re-processed weekly SINEX solutions a cumulative solution was created using the CATREF software (Altamimi et al. 1994), and it was compared to the standard solution, which is based on the historical EPN SINEX files. In this paper the first comparisons are presented and the superiority of the re-processed solution is demonstrated.

Keywords: GPS re-processing, reference frame, spectral analysis, velocity estimation

A GPS mérések feldolgozásának stratégiája, az alkalmazott modellek és szoftverek az elmúlt több mint egy évtized folyamán, amióta a globális (IGS) és kontinentális (EPN) permanens GPS állomások üzemelnek, több lényegi változáson mentek keresztül. Valamennyi modell-finomítás azonban az eredmények lépcsőzetes javulásán túl csökkentette azok időbeli homogenitását. A történeti mérések teljes újrafeldolgozását az eddigi legnagyobb hatású váltás, a GNSS holdak és a földi antennák fáziscentrumának változását (PCV) leíró abszolút modellek bevezetése tette elodázhatatlanná. Az újrafeldolgozás 2009-ben az IGS, majd az EPN hálózatában is megtörténik. Célja az eddigi teljes mérési anyag egységes szempontok és a legfrissebb modellek szerinti feldolgozása, majd az eredmények értelmezése és alkalmazása. Az EPN analízis előkészítéseképpen a varsói Katonai Műszaki Egyetem (MUT) kutatói előzetes feldolgozást végeztek a jelenlegi adatbázis, az analízis kapacitásigényének és a várható eredmények felmérésének céljából.

Felhasználva az MUT által előállított újrafeldolgozott heti felbontásban elérhető SINEX formátumú eredményeket egy 12 évet lefedő egységes, ún. kumulatív megoldást számítottunk a CATREF szoftverrel (Altamimi et al. 1994), amelyet összehasonlítottunk a jelenleg 'hivatalos' ún. standard megoldással. Cikkünkben a több szinten elvégzett összehasonlítás eredményeit mutatjuk be és bizonyítjuk az újrafeldolgozással elérhető eredmények pontosságának lényeges javulását.

Kulcsszavak: GPS újrafeldolgozás, vonatkoztatási rendszer, spektrál analízis, sebesség becslés

1 Bevezetés

Az EUREF Permanens Állomás Hálózat (EPN) 1996-ban kezdte meg működését. Az azóta eltelt időszakban a GPS analízis fő elemei (hálózati geometria, pálya/vonatkoztatási rendszer, feldolgozási stratégia, szoftverek és alkalmazott modellek) többször is változtak a koordináta idősorokban különböző szintű és jellegű változásokat, elsősorban ugrásokat okozva.

A változások korántsem teljes listája a következő:

- az EPN állomások száma 30-ról 200 fölé nőtt,
- a feldolgozást végző Analízis Központok (LAC) száma 4-ről 16-ra nőtt, a KGO 2001-től EPN LAC analízis központ

[*]*FÖMI Kozmikus Geodéziai Obszervatórium, H-1592 Budapest, Pf. 585*
e-mail: kenyeres@gnssnet.hu
[**]*Military University of Technology, 00-908 Varsó,49, ul .gen. Sylwestra Kaliskiego 2,*

- 5 egymást követő vonatkoztatási rendszert (ITRF94-től az ITRF2005-ig) alkalmaztunk,
- mind a referencia állomások száma, mind a vonatkoztatási rendszerhez kötés módja (állomás koordináták rögzítése ill. a legkisebb kényszerek elve) változott,
- az analízis szoftverek (14 LAC a Bernese szoftvert használja) menet közben többször frissítésre kerültek,
- a szoftverfrissítésekkel az alkalmazott modellek és paramétereik (pl. a légkör és ionoszféra kezelése, változó ajánlott kitakarási szögek) szintén változtak.

Az 1.a ábra az idősorok inhomogén változásának illusztrálására a standard kombinált megoldás és a heti input megoldások koordinátái között számítható 7 paraméteres térbeli transzformáció XYZ eltolási paramétereit mutatja be. Bár maguknak a paramétereknek nincs valós fizikai jelentésük, de tükrözik a heti megoldások időbeli változásait, amelyeket pl. egy újabb vonatkoztatási rendszer bevezetése okoz.

Bár minden esetben az akkor legjobbnak tartott eljárások és modellek kerültek bevezetésre a szükségszerű és ugrásszerű váltások növelték a hosszútávú megoldások inhomogenitását. Az abszolút PCV modellek (a GNSS antennák fáziscentrum változását nem egy kiválasztott típushoz viszonyítva - relatív módon -, hanem önállóan határozzák meg) 2006 novemberi (1400-as GPS hét) bevezetésével egy minden korábbinál jelentősebb minőségi váltást sikerült elérni, amely azonban egy állomásfüggő, akár 20 mm-es magassági koordinátaugrást okozott. A helyzetet tovább bonyolította, hogy az abszolút PCV modellekkel egyidőben került bevezetésre az új vonatkoztatási rendszer megoldás, az ITRF2005 (Altamimi et al. 2007). Miután az ITRF2005 GPS összetevőjét még a régi, relatív PCV modellekre alapozták azonnali ellentmondás alakult ki a vonatkoztatási rendszer és a valóság között. Az IGS úgy próbálta áthidalni ezt, hogy kb. 6 hónapnyi IGS mérési anyag újrafeldolgozásával állomásfüggő korrekciók hozzáadásával, majd térbeli transzformációval definiálták az IGS05 vonatkoztatási rendszert (Ferland 2006). Az IGS05 azonban csak az IGS mintegy 100 állomására (32 EPN) elérhető és nem tartalmaz információkat a 2006 előtti állapotokról. Ráadásul, bár az IGS05 és az ITRF2005 definíció szerint globálisan ekvivalens, regionális szinten, így az EPN esetében is cm-es szinten eltérhetnek egymástól (Bruyninx et al. 2008). Ilyen feltételek mellett rendkívül nehézzé vált a vonatkoztatási rendszer regionális szintű kialakítása és fenntartása.

Mindezek a tényezők minden szinten (a globálistól a nemzeti hálózatokig) sürgetik az eddigi teljes GNSS mérési anyagok újrafeldolgozását, majd egy új, immár az abszolút PCV modellekkel összhangban levő geodéziai vonatkoztatási rendszer definiálását. Az ITRF2005 ilyen szemmel nézve az eddigi legrövidebb életű és legellentmondásosabb megoldás. Az IGS mérések újrafeldolgozása 2008-ban megkezdődött és 2009 elején legalább 3 IGS Analízis Központ legalább 7 évnyi anyagának beépítésével 2009 végére elkészül az új ITRF2008 vonatkoztatási rendszer, amelyet minden eddiginél nagyobb várakozás előz meg.

2 Az EPN mérések újrafeldolgozása

A hivatalos EPN analízist megelőzve a varsói Katonai Műszaki Egyetem (MUT) GPS csoportja kihasználva nagyszámítógépes hátterüket 2008-ban elvégezte a rendelkezésükre álló, szinte teljes EPN mérési anyag feldolgozását. A feldolgozásba vont mérési adatok a 834-1459 GPS heteket (1996 január – 2007 december) ölelték fel. Az analízist a Bernese 5.0 szoftverrel (Beutler et al. 2006), az EPN-ben jelenleg alkalmazott stratégiával és paraméterekkel (pl. abszolút PCV modellek, 3° magassági kitakarási szög, légköri gradiens becslése, JPL DE405 csillagászati efemeridák, Niell leképezési függvény, FES2004 óceáni árapály terhelési modell) hajtották végre. Az analízishez már újrafeldolgozott GPS műholdpályákat használtak (Steigenberger et al. 2006).

Hasonló teljes EPN analízist kezdtek el a Belga Királyi Obszervatóriumban (ROB), ott azonban a fő hangsúlyt a regionális vonatkoztatási rendszer optimális definiálásához kapcsolódó kutatásokra fektették. Az EPN esetében ez kiemelt fontosságú, mert regionális hálózat lévén a globális ITRS vonatkoztatási rendszert csak korlátozottan tudjuk 'reprodukálni'. Az első eredmények azt bizonyítják, hogy a különböző regionális megoldás-változatok a cm-es nagyságrendben eltérnek egymástól, míg az EPN globális kiterjesztése a vonatkoztatási rendszer definícióját a mm-es szinten stabilizálja

(Legrand és Bruyninx 2008). A tervezett EPN újrafeldolgozásnál tehát az EPN 'globalizációjára', kiterjesztésére kell törekedni.

Miután a ROB megoldásai jóval rövidebb időintervallumra voltak elérhetők a következőkben az MUT adataira alapozott vizsgálatainkat mutatjuk be.

2.1 Kumulatív (összegző) megoldások

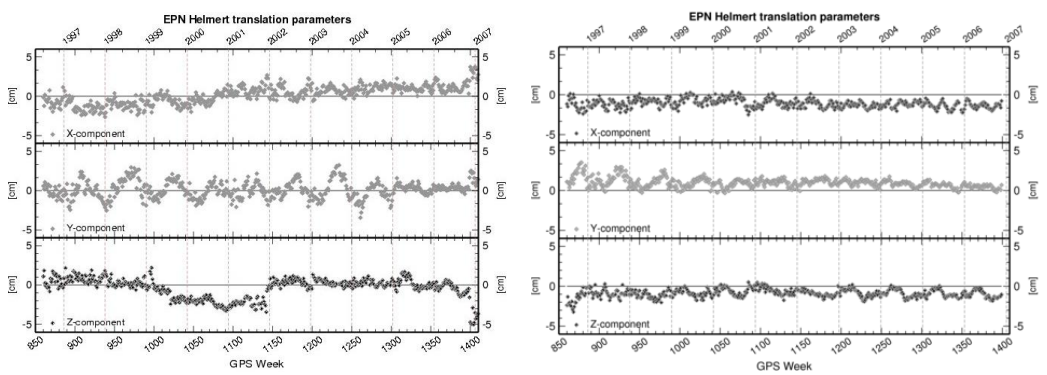
Az újrafeldolgozás és a jelenleg érvényes analízis eredményei heti időfelbontású SINEX (Software Independent Exchange Format – az állomások becsült koordinátáit és azok variancia-kovariancia mátrixát tartalmazó szabvány fájl) formátumban érhetők el. Ezek felhasználásával két párhuzamos, ún. kumulatív, az eddigi teljes anyagot magában foglaló összegző kiegyenlítést számítottunk a CATREF szoftver (Altamimi et al. 2004) felhasználásával. A jelenleg érvényes, ún. standard koordináta és sebesség megoldást az EPN Idősor Analízis projekt keretében állítottuk elő az EPN Analízis Koordinátor (H. Habrich, BKG) által számított heti SINEX adatokból. Ezt a most referenciaként szolgáló megoldást évente 3-4 alkalommal frissítjük és az EPN Központi Iroda honlapján (www.epncb.oma.be) tesszük közzé.

A másik megoldást az MUT által szolgáltatott heti SINEX eredmények felhasználásával állítottuk elő. Mindkét esetben ugyanazt a 22 db ITRF2005 rendszerben ismert referencia állomást használtuk fel a vonatkoztatási rendszer definiálására. Az ún. legkisebb kényszerek (Minimal Constraint – MC) elvét alkalmaztuk, amely azt jelenti, hogy az esetleges hálózati torzulások elkerülése érdekében egyetlen referencia állomás koordinátáját sem rögzítjük, hanem a dátumot definiáló közös pontok segítségével aktuális hálózatunkat térbeli transzformációval az ITRF2005 rendszerébe transzformáljuk. A dátumot definiáló referencia pontok kiválasztásánál az adott állomásokra vonatkozó mérési minőségi és hálózati geometriai szempontokat vettük figyelembe.

Bár az újrafeldolgozás a 1459-es GPS hétig állt rendelkezésre, de jelen vizsgálatainkhoz csak a 1399 GPS hétig bezárólag meglévő adatokat használtuk fel az 1400-as hétnél bekövetkező koordináta ugrások elkerülése végett.

3. A kumulatív megoldások összehasonlítása

Az 1996-2006 intervallumot lefedő többéves adatsor együttes kiegyenlítésével számított két megoldás elsődleges eredménye egy-egy kumulatív koordináta és sebességmegoldás, amelyeket a későbbiekben mutatunk be. A CATREF szoftver emellett további, az eredmények értelmezésében felhasználható 'mellékterméket' is szolgáltat. A következőkben először a standard és az újrafeldolgozott megoldások súlyozott RMS, Helmert-transzformációs paraméter és maradék koordináta eltérések idősorait vizsgáljuk meg.



1a-b ábra. A standard (bal) és az újrafeldolgozott (jobb) kombinált megoldások és a megfelelő heti input megoldásaik koordinátái között számítható 7 paraméteres térbeli transzformáció XYZ eltolási paraméterei

3.1 A 7-paraméteres térbeli transzformációk idősorai

A kumulatív megoldásokat a heti SINEX eredményeknek a 'legkisebb kényszerek' elve alapján (Altamimi et al. 2004) végzett közös kiegyenlítésével, egyfajta összegzésével határozzuk meg. A számítások utolsó lépéseként a végső megoldás és minden egyes felhasznált heti megoldás között egy hétparaméteres térbeli transzformációt hajtunk végre ellenőrizendő az inputként használt heti megoldások konzisztenciáját. Az 1.a-b ábrán példaként mind a standard, mind az újrafeldolgozott megoldásokra kapott X,Y,Z eltolási paraméter-sorozatokat mutatjuk be. Könnyű észrevenni, hogy az újrafeldolgozott megoldás paraméterei kisebb szórást és kisebb amplitúdójú évszakos változást mutatnak. Hasonló jellegű javulás tapasztalható az itt be nem mutatott forgatási és méretarány paraméterek esetében is. Az egységes újrafeldolgozás következtében nyilvánvalóan nem láthatunk a vonatkoztatási rendszer-váltásból eredő ugrásokat. Az Y-komponensben észlelt csökkenő periódikus hatás okát egyelőre nem tudjuk.

3.2 A heti súlyozott középhibák idősorai

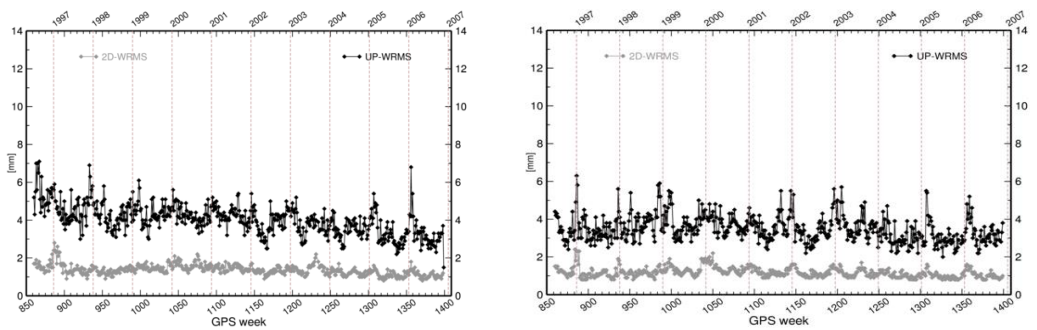
A minden egyes hétre, az együttes kiegyenlítés folyamán számított heti súlyozott középhibák (WRMS) az adott heti megoldás minőségéről adnak tájékoztatást. Tapasztalataink szerint a WRMS nagyon érzékeny indikátora bármely állomás adatproblémájának, ezért minden esetben a WRMS idősorokat használtuk a heti megoldások első és általános ellenőrzésére, az előzetesen elvégzett adatszűrés hatékonyságának felmérésére.

Megállapítottuk, hogy az újrafeldolgozással a WRMS értékek átlagosan 10%-kal javultak mind a magassági, mind a vízszintes koordináta összetevők esetében. A kezdeti, 1996-97 évekre ez a javulás a 30%-ot is elérte (lásd 2a-b ábrák). A tényleges helyzet ennél még sokkal jobb lehet, mert a standard heti megoldásokat 16 Analízis Központ (LAC) eredményei alapján határozták meg, amely mintegy átlagolja az egyes megoldásokat, szemben az újrafeldolgozott megoldással, amely egyetlen LAC-tól származik. A téli időszakokban tapasztalt nagyobb WRMS a földi GPS antennák átmeneti hóval való fedettségéből adódik.

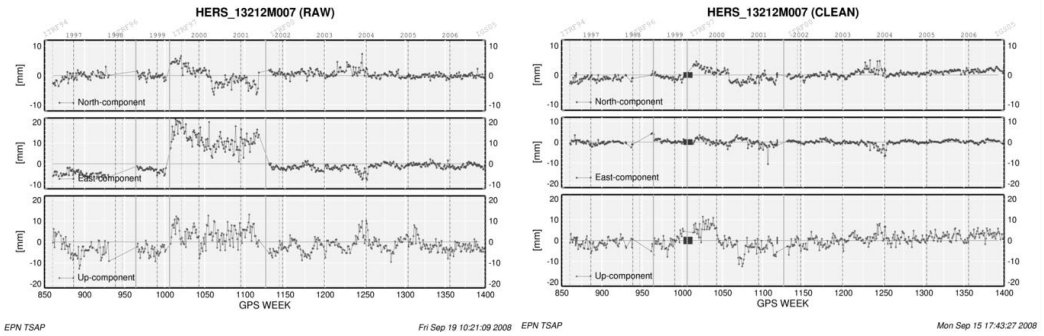
3.3 Koordináta idősorok

Ahogy már a 3.1 fejezetben is bemutattuk a közös kiegyenlítés végén a kumulatív és minden egyes felhasznált heti megoldás között 7-paraméteres transzformáció-sorozatot hajtunk végre. A kapott Helmert-paraméterek egyrészt áttekintést adnak a hálózat egészének 'fejlődéstörténetéről' (lásd 1a-b ábrák), másrészt a transzformációk állomásonkénti maradék ellentmondásai - amelyeket ténylegesen az állomások koordináta idősoraként kezelünk - jellemzik az egyedi állomások viselkedését.

Összevetve a standard és újrafeldolgozott idősorokat általánosságban megállapíthatjuk, hogy várakozásainknak megfelelően az újrafeldolgozás eredményeképpen simább lefutású, jobb heti ismételhetőségű idősorokat kaptunk, különösen a magassági összetevő esetében feltűnő a javulás. Drámai javulás tapasztalható pl. HERS, GOPE és BZRG esetében, ahol antenna vételi problémák miatt



2a-b ábra. A standard (bal) és újrafeldolgozott (jobb) EPN megoldások WRMS idősorai



3a-b ábra. HERS (Nagy-Britannia) állomás standard és újrafeldolgozott koordináta idősorai. A standard idősorokban (bal oldal) a koordináta ugrások hatását még nem vettük figyelembe!

(bizonyos azimut irányokban lecsökkent az antenna érzékenysége, és ott nem vett műholdjeket) korábban az adatok használhatatlanok voltak. A 3a-b. ábránkon HERS állomás standard és újrafeldolgozott koordináta idősorai láthatók. A zaj általános csökkenésén túl szembetűnő az 1000 és 1120 GPS hetek közötti időszakban, a GPS antenna (ASH700936E) azimut-függő jelvétele következtében kialakult magas zajszint és koordinátaugrás. A javulás egyértelműen az azimutfüggést és alacsony kitakarás mellett is pontos modellezést biztosító abszolút PCV modell alkalmazása miatt következett be.

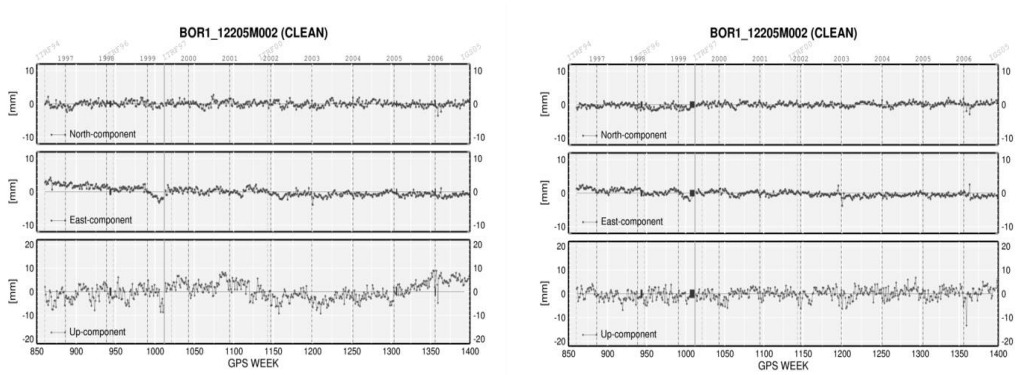
3.4 Spektrális jellemzők

Amint az előző összehasonlításban is láthattuk az újrafeldolgozás a koordináta zajszintek erőteljes csökkenését hozta. Annak érdekében, hogy számszerűsítsük a fenti megállapítást és betekintést kapjunk a kapott koordináta-idősorok spektrális tulajdonságaiba minden állomásra előállítottuk azok ún. Lomb-Scargle periodogramjait (Lomb 1976, Scargle 1982), azaz energiasűrűség spektrumait (PSD) és vizsgáltuk az évszakos és a hosszúperiódusú komponensek jelenlétét és az újrafeldolgozás hatását. Az általános spektrális elemzésen túl valamennyi koordináta összetevőre meghatároztuk az évszakos, az egyéves periódusú harmonikus változás amplitúdóját és fázisát. Ehhez a vizsgálathoz a CATS szoftvert (Williams 2008) használtuk. Várakozásunk szerint az évszakos koordinátaingadozásnak csökkennie kell a pontosabb GPS pálya-, légkör- és antennamodellezés következtében. Korábbi tanulmányok (Dong et al. 2002; van Dam et al. 2007; Tregoning és van Dam 2005) már felhívták a figyelmet arra, hogy a jelenleg előállított standard idősorokban kimutatható évszakos ingadozás amplitúdója kb. 40%-kal meghaladja a felszín-terhelési modellek (óceán, csapadék, légnyomás) alapján számítható értékeket és a fáziskülönbségeik sem koherensek. A szerzők feltételezték, hogy az ellentmondás fő oka a GPS analízisnél alkalmazott modellekben keresendő.

A standard és az újrafeldolgozott idősorok alapján meghatározott évszakos periódus amplitúdók összehasonlítása egy térben látszólag egyenetlenül eloszló változást hozott. Meglepő módon az átlagos amplitúdó (~1 mm a vízszintes, ~2 mm a magassági komponens) az újrafeldolgozással nem változott, viszont mégis a pontok kb. felénél az amplitúdó az északi ill. magassági összetevőnél 30%-kal, a keleti összetevőnél 20%-kal csökkent. Következésképpen az állomások el nem hanyagolható részénél nem változott ill. még nőtt is az évszakos hatás! Több ilyen esetben (pl. HFLK és CHIZ) további bizonyítékot kaptunk arra, hogy az évszakos változás pontállandósítási gondokra vezethető vissza.

Az évszakos periódus fázis változásai még összetettebb képet mutatnak, értelmezésük egy későbbi, részletesebb analízist, a felszín-terhelési modellekkel való összehasonlítást (mint pl. van Dam 2007) követel meg.

Az energiasűrűség spektrumok vizsgálata egy nagyon kritikus jellemzőjét mutatja az standard idősoroknak. Számos, alapvetően IGS/ITRF állomás esetében (pl. ANKR, BOR1, BRUS, GRAS, JOZE, KOSG, PENC), amelyeket a regionális vonatkoztatási rendszer definiálásához használtunk, a

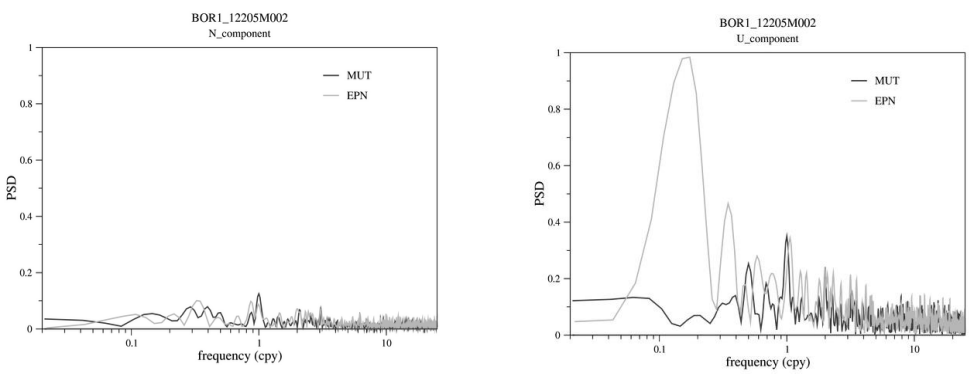


4a-b ábra. BOR1 állomás standard és újrafeldolgozott koordinát idősorai

standard megoldás magassági összetevőjében szignifikáns, kb. 5 éves periódussal bíró koordináta változást tapasztalunk, amely teljes egészében érzékelhetetlen az újrafeldolgozott állomások idősoraiban. Példaképpen BOR1 (Borowiecz, Lengyelország) standard és újrafeldolgozott koordináta idősorát (4.a-b ábrák) és azok energiasűrűség-spektrumát (5.a-b ábrák) mutatjuk be. A feltárt hosszúperiódusú változás oka egyelőre ismeretlen, de figyelembe véve, hogy erős korrelációt mutat a 3.1 fejezetben tárgyalt 7-paraméteres térbeli transzformáció méretarány-tényező-sorozatával, teljes bizonyossággal állítható, hogy az adat analízisnek valamely nem kívánatos következménye.

3.5 Sebességek összehasonlítása

E vizsgálat folyamán a standard és az újrafeldolgozott megoldások különböző változatainak koordináta és sebesség megoldásait vetettük össze egymással és a hivatalos ITRF2005 megoldással. Miután az EPN 'csak' egy regionális hálózat, a dátumot definiáló ITRF/EPN referencia állomások kiválasztása kiemelt fontosságú az ún. hálózati hatás (amikor a globális vonatkoztatási rendszert kísérelj ük meg egy regionális hálózattal reprodukálni) csökkentése érdekében. Lehetőségeink általában korlátozottak, mert az Európán kívüli EPN állomások (pl. QAQ1, THU1, ZECK, DRAG, NSSP) adat- elérhetősége és minősége gyengébb – épp távolságuk és környezeti viszonyaik miatt.
Tesztvizsgálataink a kumulatív megoldás, és azon belül a magassági koordináta- és sebesség összetevő nagyfokú érzékenységét mutatták a definiáló referencia hálózat aktuális geometriájára. Hasonló teszteket, de még további globális állomásokat is bevonva végzett Legrand és Bruyninx (2008), ők is azonos következtetésre jutottak.
Megállapítottuk, hogy az EPN kumulatív megoldás segítségével a globális ITRF2005 sebességek 1 ill. 2 mm/év hibával (vízszintes ill. magassági összetevő) reprodukálhatók. A standard ill. újrafeldolgozott sebesség-megoldások eltérései a vízszintes összetevő esetében elhanyagolhatók, kivéve



5a-b ábra. BOR1 állomás energiasűrűség spektruma a standard és az újrafeldolgozott idősorok alapján.

néhány állomást (pl. BSCN, COBA, EVPA, GUIP, MILO, ZARA), ahol még csak rövid észlelési adatsor állt rendelkezésre.

A magassági sebesség-összetevő esetében is ugyanezen állomások mutatnak szabálytalan eltérést, azonban az ábrán egy messze nem elhanyagolható, észak-déli irányú, trend jellegű eltérés dominál (6. ábra), amely a standard megoldás vonatkoztatási rendszerének nem tökéletes megvalósítására vezethető vissza (emlékezzünk a 4.a és 5.a ábrákon bemutatott koordináta idősorra ill. spektrumra). Ezt a megállapítást megerősítette az ITRF2005 sebességekkel való összevetés is, az újrafeldolgozott sebesség megoldás gyakorlatilag egyezik az ITRF2005 sebességekkel, így az ajánlható pl. a globális vonatkoztatási rendszer regionális sűrítéséhez és további geofizikai vizsgálatokhoz.

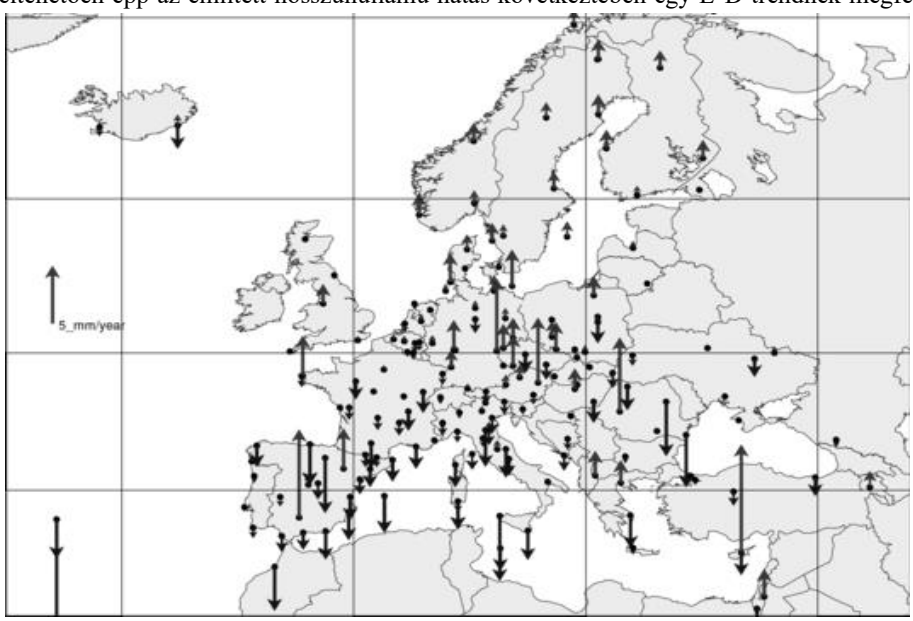
4 Összefoglalás

Az elmúlt 15 év folyamán a GNSS analízisben bevezetett változások felgyülemlett hatása napjainkra elodázhatatlanná tette a folyamatos és az ismételt, kampány jellegű GNSS mérések teljes újrafeldolgozását. Európában egy teszt jellegű analízist végzett el az MUT kutatócsoportja a rendelkezésre álló adatok és az aktuálisan alkalmazott EPN stratégia felhasználásával. Céljuk a GPS adatbázisok teljességének és a jelenlegi modellek ellenőrzése volt. Cikkünkben rendkívül pozitív tapasztalatainkat mutattuk be, bizonyítva az újrafeldolgozás szükségességét és várható eredményességét.

A koordináta idősorok zaját vizsgálva a zajszint lényeges csökkenését észleltük, ami a heti megoldások súlyozott középhibájának 10%-ot is meghaladó csökkenésében, az idősorok simább lefutásában (később lehetővé téve a napi szintű kombinációt is) jelentkezett. Ráadásul az új, abszolút PCV modelleknek egy meglepő tulajdonságát észleltük: csökkent az érzékenységük az antennavételi hibákra.

A spektrálanalízis (általában) kisebb amplitúdójú és homogénebb fázis-eloszlású évszakos hatást jelzett, amely feléleszti a reményt, hogy az újrafeldolgozás után a GNSS analízis a tényleges felszín-terhelési modellekkel jó összhangban lévő eredményeket szolgáltat. Az újrafeldolgozott magassági koordináta idősorokból eltűnő hosszúperiódusú hatás is majd pontosabb és reálisabb regionális vonatkoztatási rendszer megvalósítást tesz lehetővé a következő ITRS megoldás megjelentével.

Kimutattuk, hogy a magassági összetevő sebességei a jelenleg még használt standard megoldásban, feltehetően épp az említett hosszúhullámú hatás következtében egy É-D trendnek megfelelően



6. ábra. A standard és az újrafeldolgozott adatokból kapott magassági sebesség-összetevő különbsége

hibásak. Ezért geofizikai vizsgálatokhoz az újrafeldolgozott állományból származtatott sebességek felhasználását javasoljuk.

Valamennyi bemutatott vizsgálat azt bizonyította, hogy az újrafeldolgozott EPN adatrendszerrel sokkal pontosabb és valósághűbb eredményeket kapunk, a GPS analízis eredményei megszabadulnak számos mesterséges, a modellezés korábbi hibáiból származó hatástól, amellyel a GPS technika a földtudományok még hatékonyabb vizsgálati eszközévé válik.

A bemutatott kutatások még korántsem teljesek. A végleges EPN újrafeldolgozás 2009-ben megkezdődik és ehhez kapcsolódóan az epocha jellegű mozgásvizsgálati mérések újrafeldolgozását is elvégezzük, most már joggal remélve, hogy az a tektonikai értelmezés további finomítását ill. a magassági összetevő bevonhatóságát hozza magával.

Köszönetnyilvánítás. Kenyeres Ambrus és Grenerczy Gyula kutatómunkáját az OTKA támogatta (K69184 és X00000 pályázatok). A cikk ábrái a GMT4.3 szoftvercsomaggal készültek (Wessel és Smith 1998).

Hivatkozások

Altamimi Z, Collilieux X, Legrand J, Garayt B, Boucher C (2007): ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, J. Geophys. Res., 112(B09401), doi: 10.1029/2007JB004949.

Altamimi Z, Sillard P, Boucher C (2004): CATREF software: Combination and analysis of terrestrial reference frames. LAREG Technical Note SP08, Institut Géographique National, France.

Beutler G, Bock H, Dach R, Fridez P, Gaede A, Hugentobler U, Jaeggi A, Meindl M, Mervart L, Prange L, Schaer S, Springer T, Urschl C, Walser P, Brockmann E, Ineichen D, Schmid R, Svehla D, Habrich H, Rothacher M, Steigenberger P, Thaller D, Gurtner W, Weber R. (2007): Bernese GPS software version 5.0. eds. R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl, Univ. Bern, p.464

Bruyninx C , Altamimi Z, Boucher C, Brockmann E, Caporali A, Gurtner W, Habrich H, Hornik H, Ihde J, Kenyeres A, Mäkinen J, Stangl G, van der Marel H, Simek J, Söhne W, Torres JA, Weber G (nyomtatás alatt): The European Reference Frame: Maintenance and Products**,** IAG Symposia Series ”Geodetic Reference Frames”, Springer.

Dong D, Fang P, Bock Y, Cheng MK, Miyazaki S (2002): Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series. J. Geophys. Res., 107(B042075), doi: 10.1029/2001JB000573.

Ferland R (2006): IGSMAIL-5447: Proposed IGS05 Realization, 19 Oct 2006.

Legrand J, Bruyninx C (2008): EPN Reference Frame Alignment: Consistency of the Station Positions. (in this issue).

Lomb NR (1976): Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. Astrophysics and Space Science, 39: 447-462, doi: 10.1007/BF00648343.

Scargle JD (1982): Studies in Astronomical Time Series Analysis II. Statistical Aspects of Spectral Analysis of Unevenly Sampled Data. Astrophysical Journal, 263(2), 835-853.

Steigenberger P, Rothacher M, Dietrich R, Fritsche M, Rülke A, Vey S (2006): Reprocessing of a global GPS network, J. Geophys. Res., 111(B05402), doi: 10.1029/2005JB003747.

Tregoning P, van Dam T (2005): Effects of atmospheric pressure loading and seven-parameter transformations on estimates of geocenter motion and station heights from space geodetic observations. J. Geophys. Res., 110(B3408), doi: 10.1029/2004JB003334.

van Dam T, Wahr J, Lavallée D (2007): A comparison of annual vertical crustal displacements from GPS and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) over Europe. J. Geophys. Res., 112(B03404), doi: 10.1029/2006JB004335.

Wessel P, Smith WHF (1998): New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS Trans. AGU, 79; 47, 579.

Williams SDP (2008): CATS: GPS coordinate time series analysis software. GPS Solutions, 12(147-153), doi: 10.1007/s1029-007-0086-4.

INTEGRÁLT VÍZGŐZTARTALOM BECSLÉSE GPS ADATOK ALAPJÁN

Rózsa Szabolcs[*]*, Dombai Ferenc*[**]*, Németh Péter*[**]*, Ablonczy Dávid*[**]

Estimation of integrated water vapour (IWV) from GPS observations *- This paper studies the feasibility of the estimation of integrated water vapour (IWV) from the zenith tropospheric delay (ZTD), which is a by-product of the GPS processing. In order to evaluate the technique, six mathematical models have been studied, including two models, which neglect the information stemming from GPS processing. The GPS derived IWV values are compared to radiosonde observations in both study periods, moreover the results are validated with a documented evolution of a storm in the summer period, when the estimated IWV distribution is compared to radar observations, too.*
The computations were carried out in two periods: a three-day-long summer period with high water vapour content, in which a severe storm has evolved; and a calm, dry seven-day-long winter period. The results show that the IWV can be estimated with the accuracy of 2 mm in terms of standard deviation. The radiosonde observations agreed with the GPS derived IWV values at the same level of standard deviation. The results also show that the evolution of a severe weather front can be detected by the visualization of the lateral distribution of the GPS derived IWV.

Keywords: GPS, integrated water vapour, meteorology, troposphere

Jelen dolgozat azt vizsgálja, hogy hogyan valósítható meg az integrált vízgőztartalom becslése a zenitirányú troposzférikus késleltetés felhasználásával. Megvizsgáltunk több matematikai modellt is, köztük olyat is, amelyhez nincsen szükség a troposzférikus késleltetésére, így GPS adatokra sem. A becsült vízgőztartalom értékeket rádiószondás mérésekkel is összevetettük, valamint egy jelentős nyári zivatarfront evolúciójával is összevetettük a vízgőztartalmak eloszlásának időbeli változásait.

Számításainkban két időszakot vizsgáltunk, egy három napos nyári nagy vízgőztartalmú időszakot, amelyben egy heves zivatarfront is kialakult, illetve egy egyhetes téli kis vízgőztartalmú, nyugodt időszakot.

Eredményeink azt mutatták, hogy az integrált vízgőztartalom mintegy 2mm-es középhibával határozható meg GPS adatok alapján. A meghatározott értékek és a rádiószondás mérések is hasonló szórással illeszkedtek egymáshoz. Az eredményekből az is látszik, hogy egy gyors frontátvonulást is jól nyomon lehet követni a meghatározott vízgőztartalom-értékek térbeli eloszlásának ábrázolásával.

Kulcsszavak: GPS, troposzféra, vízgőztartalom, meteorológia

1 Bevezetés

A műholdas helymeghatározó rendszerek segítségével lehetőségünk nyílik a troposzféra okozta késleltető hatás számszerűsítésére. Ezt a hatást két részre bonthatjuk fel, a száraz légtömegek hatására, és a nedvességtől függő hatásra. A száraz légtömegek hatását földi meteorológiai adatok segítségével modellezhetjük, így a nedvességtől függő hatás meghatározható. A nedvességtől függő hatás ismeretében a troposzféra integrált vízgőztartalma – különféle modellek alapján – becsülhető. Ez a vízgőztartalom a kihullható csapadék felső korlátját adja meg, így fontos információkat biztosít az előrejelzésekhez használt numerikus modellek számára.

A közelmúltban többen foglalkoztak már e kérdéssel (Borbás 2000, Bányai 2008), de az aktív GNSS hálózat fejlődésének köszönhetően új lehetőségek nyíltak meg a GPS meteorológiai alkalmazásában. Jelen dolgozatban megvizsgáltuk, hogy a magyarországi aktív GNSS hálózat adatainak felhasználásával milyen megbízhatósággal becsülhető a troposzféra vízgőztartalma. Ennek keretében több matematikai modellt is megvizsgáltunk, illetve eredményeinket az Országos Meteorológiai

[*]*BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék, 1521 Budapest, Pf. 91.*
e-mail: szrozsa@sci.fgt.bme.hu
[**]*OMSZ Marczell György Főobszervatórium, 1181 Budapest, Gilice tér 39.*

Szolgálat Marczell György Főobszervatóriumában végzett rendszeres rádiószondás észlelésekkel is összevetettük.

2 A troposzféra integrált vízgőztartalmának becslése GNSS adatokból

2.1 A troposzféra hatása a GNSS mérésekre

A műholdas helymeghatározó rendszerek méréseire a troposzféra késleltető hatást fejt ki. Ez a késleltető hatás a levegő törésmutatójának megváltozásából fakad. A troposzféra hatását az

$$s' = s + 10^{-6} \int N \, ds \tag{1}$$

képlettel határozhatjuk meg (Bányai 2008), ahol N a refraktivitás, mely az

$$N = k_1 \frac{P_d}{TZ_d} + k_2 \frac{e}{TZ_W} + k_3 \frac{e}{T^2 Z_W} \tag{2}$$

egyenlettel számítható ki (Haase et al. 2003), ahol P_d a száraz levegő nyomása, e a parciális páranyomás, T a hőmérséklet, Z_d és Z_w a kompresszibilitási tényező a száraz levegőre, illetve a párára, k_1, k_2, k_3 értékek pedig tapasztalati konstansok (Thayer 1974). Bevis et al. (1992) szerint a legjobb tapasztalati konstansok értékei k_1=0.7760 K/Pa, k_2=0.704 K/Pa valamint k_3=0.03739×10^5 K^2/Pa. A troposzféra zenitirányú hatását tehát az alábbi integrállal határozhatjuk meg (Haase et al. 2003):

$$ZTD = 10^{-6} \int_{z_{ant}}^{tfh} N \, dz = 10^{-6} \int_{z_{ant}}^{z_{tfh}} \left(k_1 \frac{P_d}{TZ_d} + k_2 \frac{e}{TZ_W} + k_3 \frac{e}{T^2 Z_W} \right) dz \,, \tag{3}$$

ahol z_{ant} a GNSS antenna magassága, míg z_{tfh} a troposzféra felső határa.

A valódi gázok állapotegyenlete:

$$pV = \frac{m}{M} RZT \,, \tag{4}$$

ahol R az egyetemes gázállandó, V a térfogata, m a tömeg, M pedig a moltömeg. Ha a (4) egyenletből kifejezzük a nyomást, akkor az az alábbi alakra hozható:

$$p = \frac{m}{V} \frac{R}{M} ZT = \rho_i R_i Z_i T \,, \tag{5}$$

ahol ρ_i az adott gáz sűrűsége, R_i a gáz egyedi gázállandója, Z_i pedig a kompresszibilitási tényezője. Az (5) egyenletet felírjuk a száraz levegőre, illetve a párára, majd azokat behelyettesítjük (3)-ba, ezzel a zenitirányú troposzferikus késleltetés alábbi alakját kapjuk:

$$\begin{aligned} ZTD = {} & 10^{-6} k_1 R_d \int_{z_{ant}}^{z_{tfh}} \rho \, dz + 10^{-6} R_v \left(k_2 - \frac{R_d}{R_v} k_1 \right) \int_{z_{ant}}^{z_{tfh}} \rho_v \, dz + \\ & + 10^{-6} k_3 R_v \int_{z_{ant}}^{z_{tfh}} \frac{\rho_v}{T} \, dz, \end{aligned} \tag{6}$$

ahol ρ a levegő sűrűsége (vízgőzzel együtt), ρ_v a vízgőz sűrűsége, R_d és R_v a száraz levegő, illetve a vízgőz egyedi gázállandója. A zenitirányú troposzferikus késleltetést felírhatjuk két tényező összegeként:

$$ZTD = ZHD + ZWD, \tag{7}$$

ahol ZHD a zenitirányú hidrosztatikus késleltetés:

$$ZHD = 10^{-6} k_1 R_d \int_{z_{ant}}^{z_{tfh}} \rho \, dz, \tag{8}$$

míg a zenitirányú „nedves” késleltetés:

$$\begin{aligned} ZWD = 10^{-6} R_v \left(k_2 - \frac{R_d}{R_v} k_1 \right) \int_{z_{ant}}^{z_{tfh}} \rho_v \, dz + \\ + 10^{-6} k_3 R_v \int_{z_{ant}}^{z_{tfh}} \frac{\rho_v}{T} \, dz. \end{aligned} \tag{9}$$

A zenitirányú troposzférikus késleltetésből az egyes műholdakra jellemző értékeket az ún. leképezési függvényekkel határozhatunk meg (Ádám et al. 2000). Jelen dolgozatban a Niell-féle leképezési függvényt használtuk erre a célra.

2.2 A troposzféra vízgőztartalmának becslése

A GNSS adatok feldolgozása során lehetőségünk nyílik a troposzféra okozta késleltetés becslésére. A Bernese V5.0 szoftver esetében lehetőségünk van a teljes troposzféra okozta zenitirányú késleltetés meghatározására (Dach et al. 2007), illetve amennyiben a priori modellként a hidrosztatikus részt már figyelembe vesszük, akkor rögtön a „nedves” összetevőt (ZWD) is meghatározhatjuk. Az utóbbiból az alábbi eljárással becsülhetjük a troposzféra integrált vízgőztartalmát.

Az integrált vízgőztartalom (IWV) definíciója szerint:

$$IWV = \int_{z_{ant}}^{z_{tfh}} \rho_v \, dz. \tag{10}$$

Vezessük be a vízgőz átlagos hőmérsékletét (T_m) (Haase et al. 2003):

$$T_m = \frac{\int_{z_{ant}}^{z_{tfh}} \rho_v \, dz}{\int_{z_{ant}}^{z_{tfh}} \frac{\rho_v}{T} \, dz}. \tag{11}$$

Ekkor (9) egyenletet az alábbi alakra hozhatjuk:

$$ZWD = 10^{-6} R_v \left(k_2 - \frac{R_d}{R_v} k_1 \right) IWV + 10^{-6} k_3 R_v \frac{IWV}{T_m}, \tag{12}$$

amelyet átrendezve az alábbi összefüggést kapjuk:

$$IWV = \frac{10^6}{R_v \left(-\frac{R_d}{R_v} k_1 + k_2 + \frac{k_3}{T_m} \right)} ZWD. \tag{13}$$

A (13) egyenletből láthatjuk, hogy a ZWD értékekből csupán a vízgőz átlagos hőmérsékletétől (T_m) függő $Q(T_m)$ tényező ismeretére van szükségünk, ahol

$$Q(T_m) = \frac{10^6}{R_v \left(-\frac{R_d}{R_v} k_1 + k_2 + \frac{k_3}{T_m} \right)}. \tag{14}$$

T_m értékre Bevis et al. (1992) több mint 9000 rádiószondás (ballonos) mérésből vezettek le egy lineáris összefüggést a földfelszíni hőmérséklet (T_f) függvényében:

$$T_m = 70{,}2 + 0{,}72T_f . \tag{15}$$

Mind a Q, mind a T_m tényezőkre többféle modell is létezik, kimutatható, hogy ezek a modellek regionális és szezonális változásokat is mutatnak. A Q arányossági tényező reciprokára Emardson és Derks (2000) 38 európai állomásról származó, mintegy 120.000 rádiószondás mérésből vezetett le egy összefüggést, amely csak a felszíni hőmérséklettől függ:

$$\frac{1}{Q(T_f)} = a_0 + a_1\left(T_f - \overline{T}\right) + a_2\left(T_f - \overline{T}\right)^2, \tag{16}$$

ahol a_0 = 6.458 m^3/kg, a_1=-1.78×10-2 m^3/kg/K, a_3=-2.2×10-5 m^3/kg/K és $\overline{T}$ =283.49 K.

3 Lokális modellek meghatározása a vízgőz átlagos hőmérsékletére

Mint ahogyan azt már korábban említettük, a (14) képletet amerikai rádiószondás mérések alapján vezették le. A közelmúltban több nemzetközi vizsgálat is bizonyította, hogy helyi modellek levezetésével pontosabban becsülhető az integrált vízgőztartalom. Ennek vizsgálatára 10.115 rádiószondás észlelést dolgoztunk fel, amelyekből meghatároztuk a vízgőz átlagos hőmérsékletét az észlelés idején. Mivel rendelkezésünkre álltak az észlelésekhez tartozó földfelszíni mérések is, így lehetővé vált a két mennyiség közötti lineáris regressziós kapcsolat meghatározása. Abban az esetben, ha a szezonális változásoktól eltekintünk, akkor az alábbi összefüggést vezethetjük le:

$$T_m = 0{,}675T_f + 82{,}3 . \tag{17}$$

Megvizsgáltuk, hogy a regressziós egyenes paraméterei mutatnak-e szezonális változásokat. Ennek megfelelően a ballonos méréseket hozzárendeltük az észlelési hónapokhoz, majd minden hónapra meghatároztunk egy-egy összefüggést. Az egyes hónapok és az éves regressziós egyenes paramétereit az 1. táblázatban láthatjuk. A táblázatban található paraméterek használata esetén a felszíni hőmérsékletet °C-ban kell behelyettesíteni a regressziós összefüggésbe. Amint az a táblázatból is látható, a regressziós egyenes körüli maradék ellentmondások szórása lényegesen nem változott a szezonális modellek esetében az éves modellhez képest. Amennyiben feltételezzük, hogy a vízgőz átlagos hőmérsékletét mintegy ±3 K középhibával tudjuk meghatározni, ez azt jelentené, hogy a hibaterjedés törvénye alapján a vízgőztartalmat ±0.3mm-es középhibával tudnánk meghatározni (hibátlan ZWD esetén). Amennyiben a ZWD középhibáját is figyelembe vesszük, úgy ez a középhiba 1.5-2 mm-re tehető. Ebből tisztán látszik, hogy az eljárás szempontjából a vízgőz átlagos hőmérsékletének meghatározásához az éves lineáris regressziós modell is megfelelő.

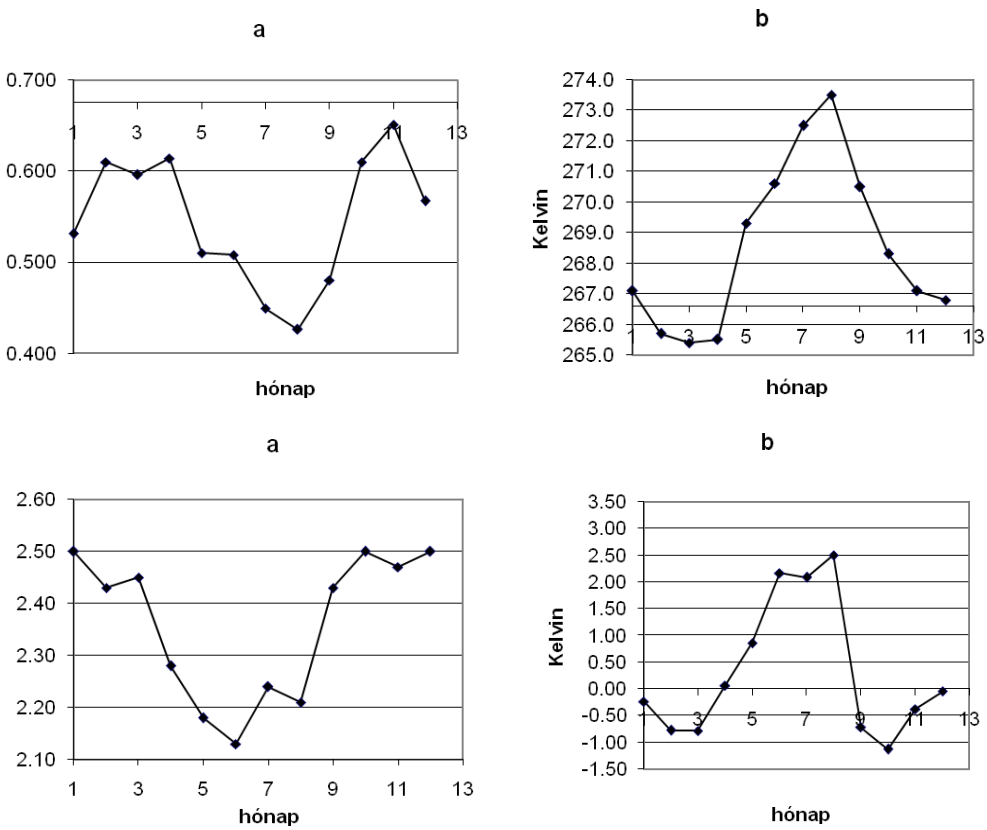
A ballonos mérések feldolgozása során felmerült, hogy a talajközeli vízgőzsűrűség függvényeként is fel lehet állítani egy regressziós összefüggést az integrált vízgőztartalomra. Ebben az esetben nem is lenne szükség GPS mérésekre az integrált vízgőztartalom becsléséhez. Így meghatároztuk az egyes hónapokra, illetve az egész évre a regressziós egyenesek paramétereit. Az egyes paraméterek, illetve a maradék ellentmondások szórásai a 2. táblázatban találhatók. Amint azt a táblázatból láthatjuk, az így kapott középhibák nagyobbak, mint az előzőekben említett 1.5-2mm-es érték, ami a GPS mérések felhasználását indokolttá teszi. A kétfajta regressziós összefüggés paramétereinek havonkénti változásai az 1. ábrán láthatóak.

4 A vizsgált időszakok

A 2. szakaszban láthattuk, hogy az integrált vízgőztartalom becslése lehetséges GNSS adatok felhasználásával felszíni meteorológiai adatok ismeretében. Vizsgálatainkhoz két időszakot választottunk ki, az egyiket 2006. augusztus 19-21 között, amely jellemzően egy nagy vízgőztartalmú időszak, a közepén egy heves zivataros hidegfronttal (Horváth: A 2006. augusztus 20-i vihar időjárási háttere http://www.met.hu/doc/2006aug20_bp-i_vihar.pdf), a másik időszak pedig 2007. február 22-28 közötti időszak, amely egy kis vízgőztartalmú időszak.

1. táblázat A felszíni hőmérséklet (°C) és a vízgőz átlagos hőmérséklete (K) közötti regressziós egyenesek paraméterei, illetve azok statisztikai jellemzői. (R^2 determinációs együttható, σ – szórás, N - mintaszám)

Hónap	a	b	R^2	σ	N
1	0.531	267.1	0.37	3.16	849
2	0.610	265.7	0.49	3.39	787
3	0.596	265.4	0.50	3.03	862
4	0.614	265.5	0.58	2.88	837
5	0.510	269.3	0.48	2.86	847
6	0.508	270.6	0.45	2.99	828
7	0.449	272.5	0.41	2.75	864
8	0.426	273.5	0.41	2.75	857
9	0.480	270.5	0.41	2.84	831
10	0.610	268.3	0.54	3.07	865
11	0.651	267.1	0.55	2.92	829
12	0.567	266.8	0.40	3.09	859
Év	0.675	266.6	0.80	3.21	10115



1. ábra A felszíni hőmérséklet és a vízgőz átlagos hőmérséklete regressziós paramétereinek (fent), a felszínközeli vízgőzsűrűség és az integrált vízgőztartalom regressziós paramétereinek (lent) éves változása

2. táblázat A felszínközeli vízgőzsűrűség (g/m3) és a tropszféra integrált vízgőztartalma (mm) közötti regressziós egyenesek paraméterei és statisztikai jellemzői (R^2 determinációs együttható, σ – szórás, N - mintaszám)

Hónap	a	b	R^2	σ	N
1	2.50	-0.24	0.53	2.90	849
2	2.43	-0.78	0.65	2.37	787
3	2.45	-0.79	0.73	2.34	862
4	2.28	0.06	0.78	2.26	837
5	2.18	0.86	0.72	2.93	847
6	2.13	2.16	0.64	3.75	828
7	2.24	2.08	0.65	3.79	864
8	2.21	2.50	0.63	3.86	857
9	2.43	-0.72	0.66	3.63	831
10	2.50	-1.13	0.70	3.83	865
11	2.47	-0.38	0.62	3.32	829
12	2.50	-0.05	0.54	3.07	859
Év	2.39	-0.14	0.84	3.27	10115

5 Felhasznált adatok

5.1 GNSS adatok

A FÖMI Kozmikus Geodéziai Obszervatóriuma mindkét időszakra rendelkezésre bocsátotta a kért GNSS adatokat. Az első időszakra ez összesen 17 (BALE, BUTE, CSOR, GYFI, JASZ, KAPO, KECS, MILE, MONO, NYIR,OROS, PENC, PESO, SUME, SZFV, TATA, ZALA) állomást, míg a másodikra 8 (BUTE, JASZ, KECS, MONO, OMSZ, PENC, SZFV, TATA) állomást jelentett. Annak érdekében, hogy a becsült integrált vízgőztartalom értékeket összevethessük a budapesti Marczell György Főobszervatóriumban végzett rádiószondás mérésekkel, a 2007-es vizsgálati időszakban telepítettünk egy permanens állomást az obszervatórium területére, amely több hónap folyamatos észlelést végzett 2007 februárjától. Ezzel lehetőségünk nyílt arra is, hogy megvizsgálhassuk a különböző mérőeszközök térbeli elhelyezkedésének hatását, azaz össze tudtuk hasonlítani a rádiószondás méréseket az obszervatóriumban elhelyezett GPS vevő és a BUTE permanens állomás adataival.

A GPS adatok feldolgozásához IGS (International GNSS Service) precíz pályaadatokat, illetve CODE (Center for Orbit Determination in Europe) ionoszféramodelleket szereztünk be, illetve az IGS által elfogadott antennamodelleket használtuk. A feldolgozásokat Bernese V5.0 szoftverrel hajtottuk végre.

5.2 Meteorológiai adatok

A troposzféra hidrosztatikus késleltetésének figyelembevételéhez, illetve a vízgőz átlagos hőmérsékletének meghatározásához földi meteorológiai adatokra volt szükségünk. Mivel hazánkban a működő permanens GNSS állomások közül csak háromnál találunk meteorológiai szenzorokat (PENC, BUTE, SPRN), így az egyes állomásokhoz mindig a legközelebbi OMSZ szinoptikus vagy klímaállomás adatait használtuk fel. Mivel a klímaállomásokon nem állt rendelkezésre légnyomás adat, így a légnyomást mindig a legközelebbi szinoptikus állomásról nyertük.

A légnyomások minden esetben tengerszintre redukált légnyomásként álltak rendelkezésünkre, így azokat átszámítottuk az egyes GPS antennák magasságára. Ehhez ugyanazt a képletet használtuk, amellyel a földfelszíni mért értékekből az OMSZ tengerszintre redukált légnyomásértékeket számol:

$$p_{z_{ant}} = p_0\left(1-0{,}0065\frac{z_{ant}}{T(°C)+274}\right)^d , \tag{18}$$

ahol

$$d = \frac{g}{0{,}0065c} , \tag{19}$$

g a nehézségi gyorsulás értéke és c = 287.05.

A földfelszíni észleléseken kívül mindkét vizsgált időszakban rendelkezésünkre álltak a Marczell György Főobszervatóriumban végzett ballonos mérésekből számított integrált vízgőztartalom értékek. Az obszervatóriumban naponta kétszer, 0 és 12 órakor (UTC) végeznek ballonos méréseket.

A vizsgált 2006-os, zivataros időszakban rendelkezésünkre álltak még a csapadékról készült radarképek is (http://www.met.hu).

6 GPS mérések feldolgozása

A mérések feldolgozását a Bernese szoftver 5-ös verziójával végeztük el. A feldolgozás során a műhold pályahibák és órahibák hatásának megfelelő figyelembevételéhez IGS végső pályamegoldásokat használtunk fel. A GPS antennák fáziscentrumainak átlagos külpontosságát és irányfüggő változását IGS antennamodellekkel vettük figyelembe. A vevőórák szinkronizálását követően elvégeztük a fázismérések minőségellenőrzését, majd a ciklustöbbértelműségek feloldását két lépcsőben hajtottuk végre. Először az L_5 lineáris kombináción oldottuk meg azokat, majd ezeket felhasználva az L_3 ionoszféra mentes lineáris kombináción végeztük el a megoldásokat a szigma módszerrel. Természetesen az L_5 kombináció esetén ionoszféramodelleket is felhasználtunk (CODE).

A vizsgált időszakot megelőző hétre ezt követően meghatároztuk a napi koordináta megoldásokat, majd együttes kiegyenlítéssel heti megoldásokat számítottunk. Ezeket a koordinátákat fogadtuk el a troposzféra okozta késleltetés meghatározásakor.

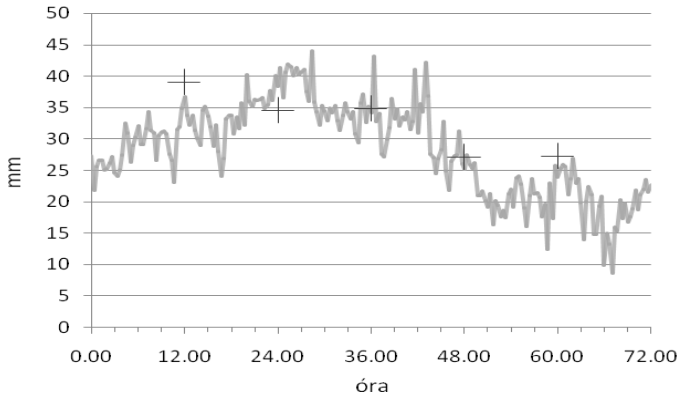
A vizsgált időszakra a ciklustöbbértelműségek megoldása után a permanens állomások koordinátáinak megkötésével, elvégeztük a zenitirányú „nedves” összetevő becslését oly módon, hogy a hidrosztatikus részt a Saastamoinen modellel határoztuk meg felszíni meteorológiai adatok felhasználásával. A műhold irányára a Niell leképezési függvénnyel számítottuk ki a ferde irányú késleltetést. A „nedves” összetevőt 2006-ban 20 percenként, míg a 2007-es időszakban már 15 percenként határoztuk meg. Jellemzően 5-8 mm-es középhibával sikerült meghatározni ezt az összetevőt.

7 Integrált vízgőztartalom becslése a vizsgált időszakokban

A vizsgálatok során több modellt is megvizsgáltunk, amelyekkel az integrált vízgőztartalmat meg lehet határozni. Ezek az alábbiak voltak:

- T_m meghatározása (14) egyenlet alapján (Bevis et al. 1992),
- T_m meghatározása hazai rádiószondás mérések alapján, éves regressziós paraméterekkel (Éves),
- T_m meghatározása hazai rádiószondás mérések alapján, havi regressziós paraméterekkel (Havi),
- Q meghatározása az Emardson-Derks modellel (Emardson-Derks 2000), valamint
- IWV becslése mért földfelszíni vízgőzsűrűség alapján, GPS adatok nélkül éves regressziós paraméterekkel (VG Éves), illetve havi regressziós paraméterekkel (VG Havi).

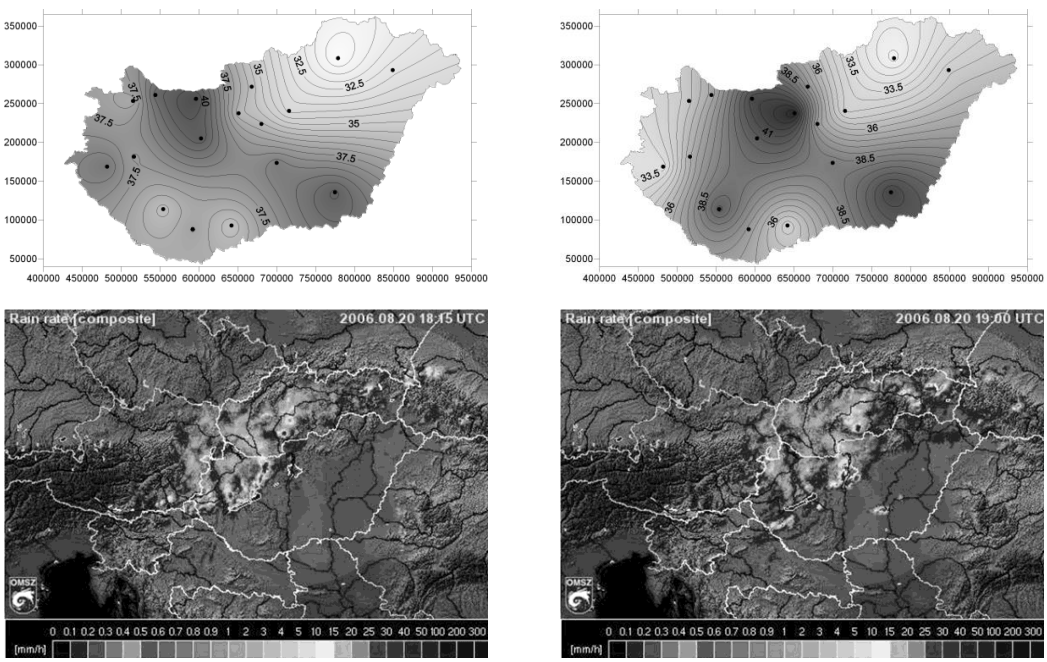
7.1 A 2006-os vizsgálati időszak eredményei



2. ábra. A BUTE állomáson meghatározott integrált vízgőztartalom idősor (Emardson-Derks modellel), illetve az OMSZ budapesti rádiószondás méréseinek (+) eredményei (mm)

A 2006-os időszakban kizárólag az aktív GNSS hálózat állomásait dolgoztuk fel. A meghatározott zenitirányú nedves késleltetésből az említett 6 modell segítségével meghatároztuk az integrált vízgőztartalmat. Az eredmények ellenőrzéséhez a BUTE állomáson meghatározott integrált vízgőztartalmakat (2. ábra) összevetettük a vizsgált időszakban végzett ballonos mérésekből származó értékekkel. Az egyes modell illeszkedésének statisztikai jellemzőit a 3. táblázatban láthatjuk. A táblázatból látható, hogy a szórás tekintetében legjobban az Emardson-Derks, illetve a lokális éves modell szerepelt. Legrosszabban pedig a GPS adatok nélküli regressziós modellek.

2006 augusztus 20-án 19.00 UTC időpontban érte el egy nagy zivatargóc Budapestet. A zivatar hatása jól látható a 2. ábrán is (43. óra). Mivel a vizsgált időpontban minden hazai GPS állomásra elvégeztük az integrált vízgőztartalom becslését, így ezen értékek alapján elkészítettük a 18.20 és a 19.00 UTC-re érvényes IWV térképet (3. ábra). Ezt össze is vethetjük az ugyanebben az időben készült radarképekkel (3. ábra) is, amelyekből jól látható a Győrnél 18.20-kor, és Budapestnél



3. ábra. Radarképek és GPS mérésekből becsült integrált vízgőztartalom térképek 2006. augusztus 20-án UTC 18.20 (balra) és 19.00-kor (jobbra)

19.00-kor kialakuló magas vízgőztartalmú terület ami egybeesik a zivatargóc helyzetével. Meg kell említenünk, hogy a Dél-Alföldön is található egy magas vízgőztartalmú rész, ami nem mutat semmilyen korrelációt a radarképekkel. Ha a 3. ábra felső részén megfigyeljük a GPS állomások eloszlását, akkor látszik, hogy ez az említett régióban a GPS állomások eloszlásából fakad.

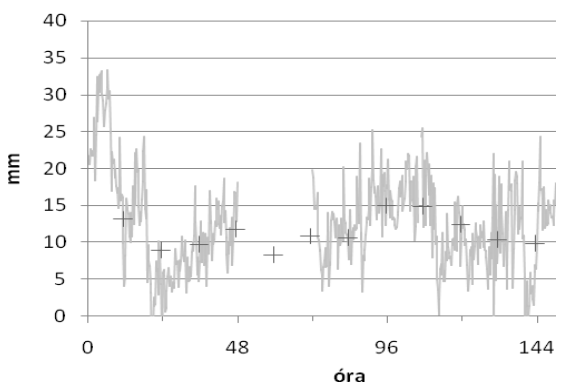
3. táblázat A 2006-os vizsgálati időszakban rádiószondával mért intergált vízgőztartalmak, és a BUTE GPS állomáson a vizsgált modellek (7. fejezet) által adott becslések illeszkedése (mm-ben)

		min	max	várh. ért.	szórás
Vízgőztartalom rádiószondás mérésből		27.1	39.0	32.5	5.19
A vizsgált modellek illeszkedése a rádiószondás mérésekhez	Bevis	-4.2	3.2	0.7	2.87
	Éves	-3.9	3.4	0.9	2.84
	Havi	-4.0	3.3	0.9	2.89
	Emardson-Derks	-3.9	3.3	0.8	2.83
	VG Éves	-2.6	4.9	0.4	3.15
	VG Havi	-3.1	4.8	0.2	3.13

7.1 A 2007-es vizsgálati időszak eredményei

2007 februárjában egy szárazabb időszakra is elvégeztük a vízgőztartalom becslését. 2007-ben csak a Budapest környéki GPS állomások adatait dolgoztuk fel, valamint üzembe helyeztünk egy állomást az OMSZ Marczell György Főobszervatóriumában is. Így az OMSZ állomás és a rádiószondás adatok összevetésénél a vízgőztartalom laterális változása már nem okoz problémát (4. ábra). A becslések és a ballonos mérések illeszkedésének statisztikai jellemzői a 4. táblázatban láthatók. A táblázatból látható, hogy ismét az Emardson-Derks modell és most a havi lokális modell hozta a legkisebb szórást, bár meg kell jegyezni, hogy a különbségek a GPS-es modellek között minimálisak. A csupán felszínközeli vízgőzsűrűségen alapuló becslések megint a legrosszabb illeszkedést adták a szórás tekintetében.

A 4. táblázatban az is megfigyelhető, hogy ebben a nyugodtnak tekinthető időszakban rosszabb illeszkedést tapasztaltunk a rádiószondás mérésekkel, mint a 2006. augusztusi időszakban.



4. ábra Az OMSZ GPS állomásra meghatározott integrált vízgőztartalom, illetve a rádiószondás (+) mérések eredményei

4. táblázat A 2007-es vizsgálati időszakban rádiószondával mért intergált vízgőztartalmak, és az OMSZ GPS állomáson a modellek által adott becslések illeszkedése (mm-ben)

		min	max	várh. ért.	szórás
Vízgőztartalom rádiószondás mérésből		8.9	15.1	12.0	2.42
A vizsgált modellek illeszkedése a	Bevis	-6.5	5.0	-1.8	3.47
	Éves	-6.4	5.0	-1.8	3.46
	Havi	-6.3	5.0	-1.7	3.44

rádiószondás mérésekhez	Emardson-Derks	-6.3	5.0	-1.7	3.43
	VG Éves	-5.4	4.5	-1.3	3.67
	VG Havi	-5.0	5.0	-0.9	3.71

A nappali és az éjszakai rádiószondás mérésekre külön-külön meghatározva a szórásokat, azt tapasztaltuk, hogy a nappali méréseknél az illeszkedés rosszabb volt (átlagosan ±3.84 mm), míg az éjszakai méréseknél (±2.61 mm).

8 Összegzés

Vizsgálataink bemutatták, hogy a permanens GPS állomások földfelszíni meteorológiai adatokkal párosítva alkalmasak a troposzféra integrált vízgőztartalmának meghatározására. Ezzel a hazánkban jelenleg két helyen végzett rádiószondás méréseket mind térben, mind időben hatékonyan be lehetne sűríteni, ezáltal lehetőség nyílhatna az időjárás előrejelzési modellek finomítására is. A 2006-os vizsgálati időszak jól megmutatta, hogy az így kapott értékek jó egyezést mutatnak nem csak az időbeli lefolyást tekintve a rádiószondás mérésekkel, hanem a térbeli eloszlást tekintve időjárási frontok helyzetével is.

Megvizsgáltuk, hogy csupán a földfelszíni vízgőzsűrűség felhasználásával milyen eredmények érhetőek el az integrált vízgőztartalom becslésében. Számításaink azt mutatták, hogy mindkét esetben rosszabb eredményeket kaptunk, mint a GPS méréseket is felhasználó modellek.

Köszönetnyilvánítás. Ezúton köszönjük meg a FÖMI KGO munkatársainak, hogy az aktív hálózat adatait rendelkezésünkre bocsátották a vizsgálatokhoz.

Hivatkozások

Ádám J, Bányai L, Borza T, Busics Gy, Kenyeres A, Krauter A, Takács B (2004): Műholdas helymeghatározás.

Bányai L (2008): A műholdas helymeghatározás földtudományi alkalmazása. Geomatikai Közlemények XI, pp. 181.

Bevis M, Businger S, Herring TA, Rocken C, Anthes A, Ware R (1992): GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. J. Geophys. Res., 97, 15 787–15 801.

Borbás É (2000): Meteorológiai adatok új forrása: a Globális Helymeghatározó Rendszer. PhD értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest.

Emardson TR, Derks HJP (2000): On the relation between the wet delay and the integrated precipitable water vapour in the European atmosphere. Meteor. Appl., 7, 61–68.

Haase J, Maorong G, Vedel H, Calais E (2003): Accuracy and Variablity of GPS Tropospheric Delay Measurements of Water Vapour in the Western Mediterranean. Journal of Applied Meteorology, American Meteorological Society, 42, 1547-1569.

Thayer GD (1974): An improved equation for the radio refractive index of air. Radio Sci., 9, 803–807.

Dach R, Hugentobler U, Fridez P, Meindl M (2007): Bernese GPS Software, Version 5.0, Astronomical Institute, University of Bern.

GEODÉZIAI GPS A VASÚTI VÁGÁNYHÁLÓZAT ÚJFELMÉRÉSÉBEN

*Ferencz Viktória**

Automated railroad tracking system using high accuracy GPS for - *This paper summarise the process and failures of efficient automated railroad tracking using high accuracy GPS systems. The goal is to develop a method for technology of measuring and mapping railroad parameters and analyzing the behaviour of geodetic GPS receivers in rail environments. Since of the receiver can be found on the top of locomotives or railcars and the aim is to measure parameters of tracks it is necessary to analyse the dynamic effects of railcar-track system for decreasing the effects of various errors .*

Keywords: GPS systems, railway, track geometry

A nagyvasúti közlekedésben számos olyan problémaforrás van, amely valamilyen módon a jármű vagy a pálya helyzetének meghatározásához kapcsolódik. A cél egy olyan módszer kidolgozása, amely alkalmas valós idejű vagy utófeldolgozásos méréssel a vasúti pálya hossz-szelvényének és helyszínrajzának automatikus előállítására. A kutatás vizsgálta nem csak a navigációs és a geodéziai GPS vevők viselkedését a nagyvasúti környezetben, hanem az általuk szolgáltatott mérési adatok megbízhatóságát, valamint ez alapján a pálya hossz-szelvényének és helyszínrajzának előállítását is.

Kulcsszavak: *vasúti közlekedés, GPS, pálya-jármű rendszer, pálya hossz-szelvény és helyszínrajz*

1 Bevezetés

A nagyvasúti közlekedésben számos olyan problémaforrás van, amely valamilyen módon a jármű vagy a pálya helyzetének meghatározásához kapcsolódik. Az építőmérnöki nagyvasúti gyakorlatban a legfontosabb műszaki termékek a hossz-szelvény és a helyszínrajz. Ma Magyarországon a Magyar Államvasutak feladata a vasúti pályák nyilvántartása és karbantartása. Nem áll rendelkezésre egy, minden viszonylatra kiterjedő digitális adatbázis, amelyben a geometriai adatok megfelelő pontossággal szerepelnének. A kutatás célja ezért egy olyan rendszer kifejlesztése, amely képes bizonyos mérések alapján a hossz-szelvény és a helyszínrajz automatikus és hatékony előállítására.

Kísérleti mérések keretében vizsgáltuk egy nagypontosságú geodéziai, és egy kisebb pontosságú navigációs GPS vevő nagyvasúti környezetben tapasztalható viselkedését. A műszerek által szolgáltatott mérési adatok alapján matematikai algoritmusok segítségével utófeldogozással előállítható a pálya tetszőleges szakaszának hossz-szelvénye és helyszínrajza. Bár számos kérdés nyitott még, a kidolgozott technológia megfelelő feltételek mellett hatékonyan képes előállítani a nagyvasúti pályára vonatkozó geometriai jellemzőket (Ferencz 2007b).

2 A geodéziai GPS a vasúti vágányhálózat újfelmérésében

A gyakorlatban számos mérési módszer terjedt el. Az, hogy melyik alkalmazása célszerű az adott feladat megoldásához, sok mindentől függ (feladat jellege, rendelkezésre álló felszerelés, terepi körülmények…). Természetesen más módszer célszerű egy navigációs pontosságot igénylő feladat megvalósításánál, és más egy geodéziai célú mérésnél.

A navigációs pontosságú mérést egy Garmin eMap vevővel, a geodéziai pontosságú mérést pedig egy Leica SR530 típusú RTK vevővel végeztük (Ferencz 2007).

*BME Általános és Felsőgeodézia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3-5.
E-mail: ferenczviktoria@upcmail.hu

2.1 Pálya újfelmérés GPS technikával

Legelőször azt szükséges tisztázni, hogy az elvégzendő feladatnak milyen pontosság-igénye van, és ezt a pontosságot a GPS technika képes-e biztosítani. Tekintettel a hossz-szelvények és helyszínrajzok tartalmára, a GPS kinematikus mérés során nem képes milliméter pontosságot biztosítani. Ha a VRS (Virtual Reference Station) mérési módszer kerül alkalmazásra, akkor az elérhető pontosság 1-3 cm (Busics, Horváth 2006). Ekkor a geodéziai vevő korrekciós paramétereket kap mobilhálózaton (GPRS) keresztül, ám ha a mobilhálózattal való folyamatos kapcsolat megszakad, a pontosság azonnal jelentősen csökken. Kijelenthető tehát, hogy akár több deciméteres eltérés is lehet a valódi ponthely és az észlelt helyzet között. A mérésről akkor állíthatjuk, hogy alkalmas hossz-szelvény és helyszínrajz előállítására, ha az észlelési hiba nem haladja meg az 5 centimétert (Ferencz 2007).

A GPS vevő önmagában nem elegendő a felmérés végrehajtásához. Ennek az az oka, hogy ha a vevő fölött bármi eltakarja az égboltot, akkor egy vagy több műhold jele nem jut el a vevőig. Ilyen kitakaró objektumok lehetnek a magas épületek, lombos fasorok, állomások, gyaloghidak, felüljárók, amelyekkel sűrűn találkozunk a Budapest környéki elővárosi vonalakon. A jelvesztés után a műszernek újra kell inicializálnia, ami akár percekig is eltarthat. Bár a mérésből kimaradó szakasz a jármű sebességének függvénye, mindenképpen foglalkozni kell a kérdéssel, mert a feladat célja nem engedi meg azt, hogy hosszú pályaszakaszok maradjanak ki a mérésből. Ahhoz, hogy a kimaradt pályaszakaszt pótolni lehessen, irányra és távolságra van szükség. A GPS vevő mellett tehát a mérés során odométert és giroszkópot mindenféleképpen, gyorsulásmérőt pedig ellenőrző adatnyerés végett kell üzemeltetni. A rendelkezésre álló erőforrások szerint lehetőség van 1, 2 vagy 3 GPS antennát elhelyezni a jármű tetején.

A mobil térképező rendszer a helymeghatározó műszereken kívül tartalmaz még (meglehetősen költséges) inerciális lézerrendszereket valamint képalkotó rendszert is. A képalkotást egy vagy két digitális kamera végzi, amelyet a járműre rögzítenek és meghatározzák a pontos helyzetét a GPS antenna középpontú és a mozgás irányába mutató derékszögű koordináta-rendszerben. A GPS által szolgáltatott koordináták alapján a képek fotogrammetriai módszerrel kiértékelhetők, azaz a rajtuk látható mindegyik objektumnak meghatározható a térben elfoglalt helyzete. A mozgás közben egy szervomotor biztosítja, hogy a kamera koordinátái ne változzanak a kijelölt koordináta-rendszerben. (Jamieson et al. 2001)

2.2 A műszaki termék előállításának lehetőségei

2007 márciusában a MÁV VMMSZK (MÁV Vasúti Mérnöki- és Mérésügyi Szolgáltató Központ) szakembereinek segítségével kísérleti mérés végrehajtására került sor a Budapest-Nyugati – Vác – Galgamácsa – Acsa vonalszakaszon a pálya újfelmérésének megvalósítására és a GPS nagyvasúti környezetben való alkalmazásának vizsgálatára. A mérés során nem csak geodéziai (Leica SR530 RTK) GPS vevő, hanem egy kézi navigációs (GARMIN eMap) vevő is üzemelt a mérések összehasonlítása céljából. A hordozó jármű egy FVG-02 típusú mérőkocsi, amellyel futásdinamikai méréseket végeztek. A GPS és a MÁV mérőrendszere egymástól függetlenül szolgáltatta az adatokat, a szinkront az idő biztosította. A GPS antennákat a jármű tetején saját mágnestalpuk rögzítette, amely elég erősnek bizonyult ebben a környezetben is. A Leica mérés végeredménye elérhető WGS-84 térbeli derékszögű koordinátaként vagy ellipszoidi földrajzi koordinátaként, az eMap azonban csak az utóbbival rendelkezett.

Tekintettel arra, hogy a magyarországi térképi állomány EOV rendszerben van, érdemes lenne a vasúti pálya újfelmérésére irányuló mérési adatokat is erre a vetületre átszámítani és térképezni. A vasúti pálya hossz-szelvénye és helyszínrajza azonban helyi (lokális) koordináta rendszerben készült. A GPS segítségével lehetőség nyílik nagypontosságú grafikus adatbázis létrehozására egy olyan rendszerben, amelyben a földmérési és topográfiai térképek is hozzáférhetők.

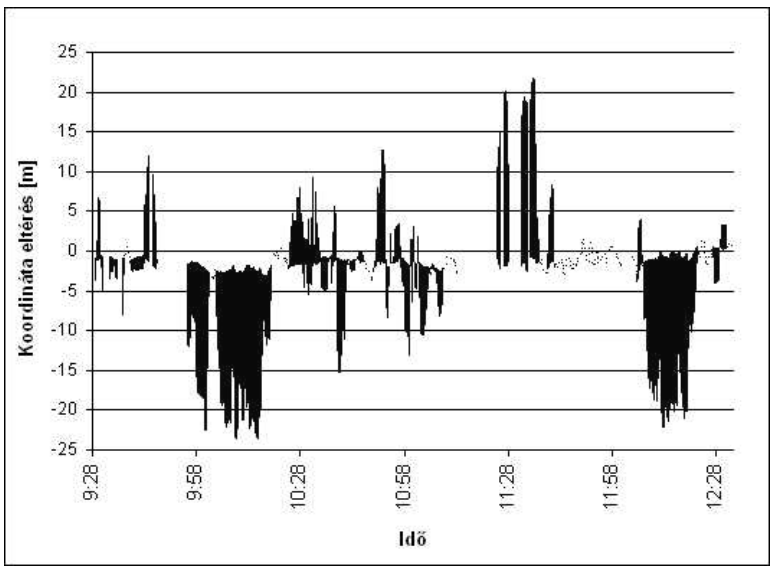
2.2.1 A navigációs és a geodéziai vevő adatsorainak összehasonlítása

A navigációs vevő 3500 értékelhető pozíciót szolgáltatott, míg a földmérési célú vevő közel 12000

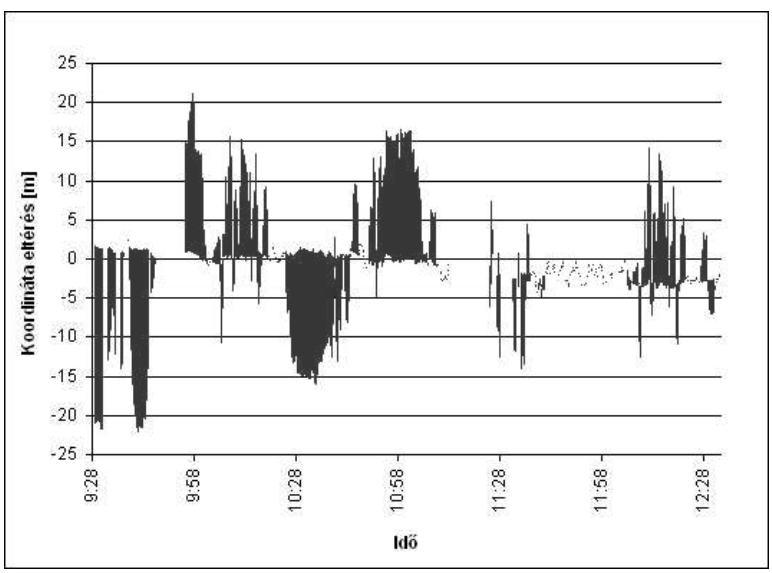
megfelelő adatot rögzített. Ennek az oka az, hogy a két vevő mintavételi ideje eltérő. Tekintettel arra, hogy a mérés egyik célja az volt, hogy a vasúti pályát felmérjük, ezért elfogadhatónak azt a mérési adatot tekintettem, ahol a pontosságérték nem haladta meg az 5 centimétert.

Az azonos időpontú észlelésekre vonatkozóan tanulságos a két mérési adatsor alapján számított EOV koordináták eltéréseinek összehasonlítása (1/a ábra, 1/b ábra). Tapasztalataink alapján a navigációs vevőnek vízszintes értelemben akár ± 24 méteres (!) hibája is lehet, míg magassági értelemben mindössze néhány méter a hiba (~ 8 méter) (1.táblázat). Ez meglepő, hiszen a GPS vevők általában a magasságot határozzák meg kevésbé pontosan (Ferencz 2007, Takács 2006, 2007).

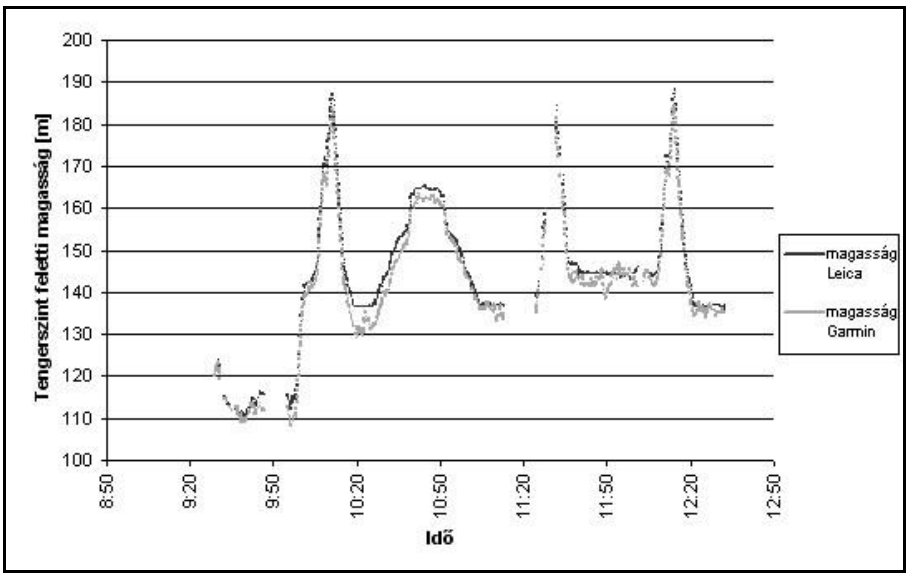
A magasság-idő függvény (2. ábra) az egyes mérésekre előállított hossz-szelvényekhez hasonló alakot mutat. Az adatsor maga a két mérési sorozat eredményhalmazának metszetét jelenti, vagyis azokat a méréseket, amelyek ugyanazon időpontban történtek.



1/a ábra. A kétfajta GPS vevővel meghatározott EOV X koordináta-eltérések (Ferencz 2007, 2007b)



1/b ábra. A kétfajta GPS vevővel meghatározott EOV Y koordináta-eltérések (Ferencz 2007, 2007b)



2. ábra. A kétféle mérési módszer magasság-idő függvényének összehasonlítása (Ferencz 2007, 2007b)

A grafikont szemügyre véve két fontos következtetés vonható le:

- vannak olyan szakaszok, ahol a navigációs mérésből adódó magasság és az RTK mérésből adódó (hibátlannak tekinthető) magasság eltérése csaknem állandónak tekinthető, így a vonalvezetés megegyezik, de a magasságok eltolva jelentkeznek
- vízszintes szakaszon a navigációs mérés igen jelentős magasságeltérést mutat.

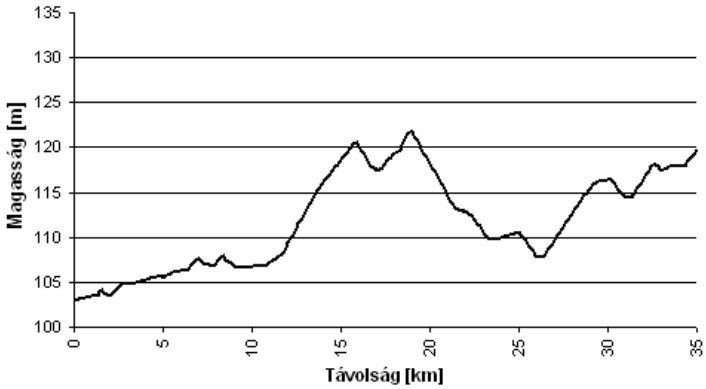
2.2.2 A geodéziai vevő adatsorának összehasonlítása a MÁV által szolgáltatott adatokkal

A MÁV VMMSZK rendelkezésre bocsátotta a Budapest-Vác vonalra vonatkozó hossz-szelvényt, valamint az egyes szakaszokra vonatkozó ívadatokat *xls* formátumban (3. ábra), illetve egy, szelvényeket és lejtviszonyokat tartalmazó kézzel írott dokumentációt is (4. ábra). A magassági adatok a bal- és a jobb sínszálra egyaránt ismertek, így adottak a túlemelés-értékek is, vagyis az átmeneti ívek kezdő és végpontjai is. A két formátum között lényeges eltérések tapasztalhatók az esés/emelkedés értékei tekintetében. A magassági adatokat egyszerűen össze lehet vetni a mérésből számított értékekkel, és megállapítható, hogy a megadott magasságok szignifikánsan eltérnek a mért értékektől (5.ábra, 6. ábra) (Ferencz 2007, 2007b).

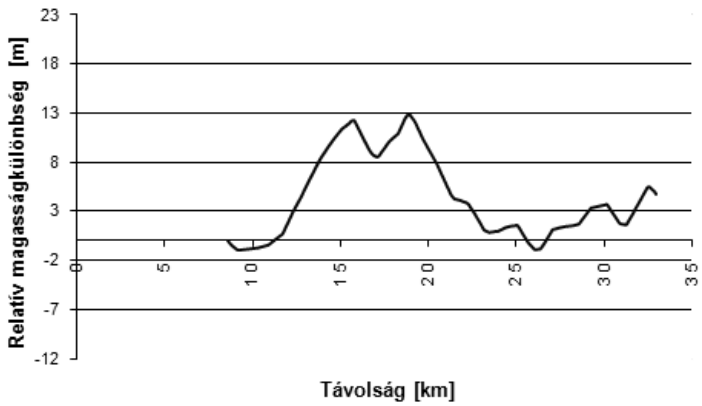
A fentiek alapján kijelenthető, hogy a digitális formában kapott hossz-szelvény adatok nem tükrözik a valós pályaadatokat. Ellentétben ezzel a ténnyel, a kézzel írt dokumentációból előállított hossz-szelvény és a mérési adatok között látványos egyezés van. A legnagyobb eltérés sem haladja meg a 0.3 métert, ami kedvező akkor, ha figyelembe vesszük, hogy a méréseink belső pontossága jobb, mint 5 cm, ugyanakkor a méréseinket számos egyéb hiba hatása is terheli (szerelvény rugózása, nem pont a pályatengelyben való mérés, a pálya esetleges elmozdulásai, a pálya-jármű rendszer dinamikai hatásai, stb.).

1. táblázat. EOV koordináta-eltérések kimutatása (Ferencz 2007, 2007b)

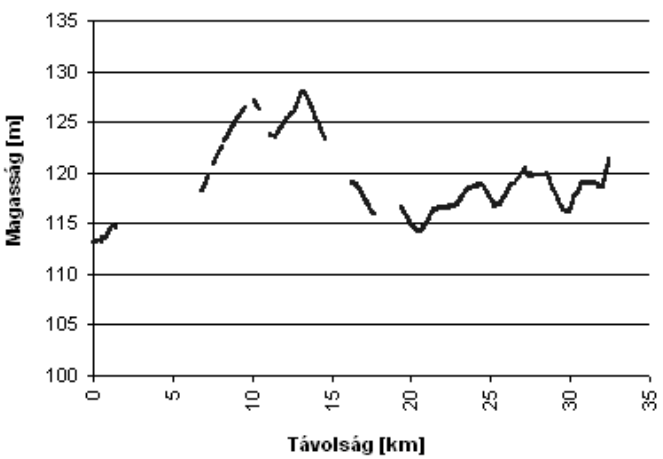
Koordináta	Minimum [m]	Maximum [m]	Átlag [m]	Szórás [m]
EOV *X*	-23.8	+21.9	-2.6	6.2
EOV *Y*	-22.2	+21.2	-0.7	6.3
Magasság	-2.7	+7.7	2.4	1.6



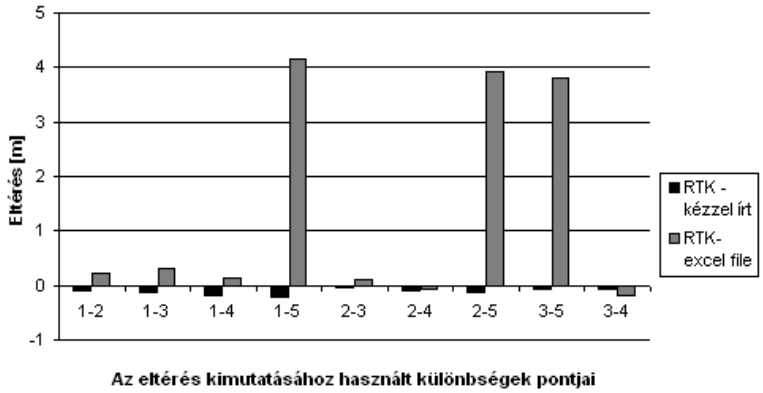
3. ábra. A MÁV által szolgáltatott Bp.-Szob viszonylat hossz-szelvénye digitális adatok alapján (Ferencz 2007b)



4. ábra. A MÁV által szolgáltatott kézzel írott adatokat tartalmazó vonalszakasz hossz-szelvénye (Ferencz 2007b)



5. ábra. A MÁV által szolgáltatott viszonylatok közös szakaszára vonatkozó hossz-szelvény az RTK adatok alapján (Ferencz 2007b)



6. ábra. A kiválasztott azonos pontokra számított magasságkülönbségek eltérése az RTK adatokhoz képest (Ferencz 2007b)

2.2.3 Ívhossz-számítás vagy Euklideszi távolság?

A hossz-szelvény előállításához a magasságok ismerete mellett szükség van a megtett út ismeretére is. Ez azonban a pályaszakaszok, mint harmadfokú spline-ok alkalmazása mellett elliptikus integrállal adódik, így csak Taylor-sorfejtéssel számítható, amely további hibákat eredményez a számításokban. Bizonyos alkalmazások esetében azonban megengedhető az ívek egyenessel való közelítése.

Elvégeztem annak a vizsgálatát, hogy síkban mekkora eltéréssel jellemezhető a Pitagorasz-tételből adódó távolság és a körív hossza abban az esetben, amikor az ívsugár és a hossz ismert (2. táblázat). A nagyvasúti közlekedésben alkalmazott ívsugár csak ritka esetben kevesebb, mint 300 méter (állomások területén, iparvágányoknál lehet kevesebb), a 20000 méter pedig – bár főként a magassági lekerekítő íveknél használják – példaértékű a feladat tekintetében. A mérési adatok közötti távolság a sebesség függvényében változik 1-25 méterig. A táblázat alapján levonható az a következtetés, hogy a mérési adatok tekintetében – ha ezek folytonosak – az Euklideszi távolság megfelel az ívhossznak. Ez a kijelentés kizárólag akkor érvényes, ha a pálya emelkedése/esése kicsi, ugyanis ellenkező esetben lényeges változások következnek be a térgörbe alakját tekintve.

2.2.4 A pálya-jármű rendszer hatása figyelembe vételének lehetőségei

A vasúti pálya bármely paraméterének meghatározásához figyelembe kell venni a pálya-jármű rendszer között létrejövő dinamikai hatásokat is, mivel a vevő elhelyezése a kocsiszekrény tetején, a megfelelően kiválasztott helyen történik. A mérés során az antennát úgy kell elhelyezni, hogy ezzel a pálya-jármű rendszerből adódó hibahatások nagy része kiküszöbölhető legyen. A rendszer által a helymeghatározás pontosságára gyakorolt hatások:

- szabálytalan járműmozgások
- oldalirányú nyomjáték és nyombővítés
- a forgóváz és a kocsiszekrény oldalirányú játéka
- a kocsiszekrény dőlése ívekben
- a túlemelés mértéke ívekben

A szabálytalan (parazita) járműmozgások (3. táblázat) abból adódnak, hogy a pálya-jármű rendszer egy többszabadságfokú, sztochasztikusan gerjesztett csillapított rezgőrendszernek tekinthető.

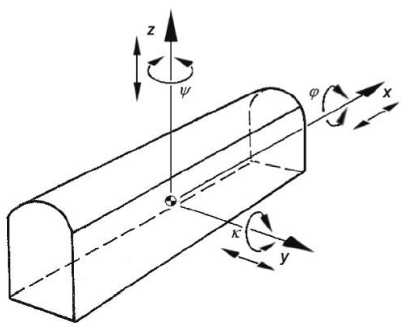
Hatására a kocsiszekrény súlypontja egy térbeli görbét ír le. Az, hogy ennek a pályatengelyre vonatkoztatott függőleges vetülete a pályatengelybe essen egy 0 valószínűségű biztos eseménynek tekinthető (7. ábra).

2. táblázat. Ívhossz és Euklideszi távolság eltéréseinek összehasonlítása (Ferencz 2007b)

Ívsugár [m]	Távolság [m]	Ívhossz [m]	Eltérés [cm]
300	10	5.000058	0.0058
300	100	100.468848	46.8848
5000	10	10.000002	0.0002
5000	100	100.001667	0.1667
20000	10	10.000000	0.0000
20000	100	10.000104	0.0104

3. táblázat. Szabálytalan (parazita) járműmozgások (Zobory 2008)

Tengely	Transzlációs lengés	Szöglengés
X	rángatás	támolygás
Y	szitálás	bólintás
Z	rázás	kígyózás



7. ábra. A pálya-jármű rendszerben értelmezett parazita járműmozgások (Zobory 2008)

Az oldalirányú nyomjáték a kocsikerék futóköre és a sínszálak felső érintősíkja közötti, mindkét oldalon jelentkező 5-5 mm-es eltérést jelenti. Hatására a jármű súlypontjának helyzete a sínszálakra merőlegesen mozdul el egy szinuszos jellegű görbe mentén.

A pályaoldali nyombővítést ívekben alkalmazzák, hatása hasonló az oldalirányú nyomjáték hatásához. A forgóváz és a sínszálak nyombővített ívben való futásának és a nyombővítés mértékének függvényében értéke elérheti a 25 mm-t. A nyombővítés a jármű súlypontjának a pályatengely merőlegesének irányába történő elmozdulását okozza.

A forgóváz és a kocsiszekrény oldalirányú játéka abból adódik, hogy a kocsiszekrény felfüggesztése az ívekben alkalmazott túlemelésből létrejövő szekrénydőlés elviselése érdekében nem rögzített, így bizonyos fokú elmozdulást tesz lehetővé. A hibahatás mértéke 35 mm, hatása a túlemeléssel és a nyombővítéssel együtt jelentkezik pályaívben.

3 Összefoglalás

A navigációs GPS-vevő által szolgáltatott koordináták nem alkalmasak a pálya újfelmérésére, hasznosak lehetnek viszont a pályageometria pontos ismerete mellett az utastájékoztatás és a flotta-menedzsment terén. A geodéziai vevővel végzett tesztmérések tapasztalatai alapján kijelenthető, hogy önmagában az RTK-vevők sem alkalmasak a pálya kielégítően pontos és hatékony felmérésére, részben a nagyarányú adatkimaradások, részben az elérhető néhány cm-es pontosság miatt. A meg-

oldás korszerűbb (a GPS és GLONASS műholdakat is észlelő, 20 Hz-es mintavételezésre is képes) geodéziai vevők és inerciális navigációs rendszerek alkalmazása lehetne, többszöri ismétléssel.

A pálya szelvényezését tekintve a rendelkezésre álló MÁV forrásadatok használatánál megbízhatóbbnak tűnik, ha geodéziai pontosságú méréseket végzünk bizonyos kijelölt pályaszelvényeknél és műtárgyaknál.

Kijelenthető, hogy a pálya-újfelmérés hatékony végrehajtásához nagypontosságú geodéziai GPS vevőket ajánlott alkalmazni. A mérés előkészítése során ki kell választani a mérendő viszonylatot és a mérés időpontját. A viszonylat ismeretében előre jelezhetők a GPS számára „veszélyes" szakaszok, ahol az észlelés megszakadhat. Célszerű a zavaró körülményeket – ésszerű határokon belül – a minimálisra csökkenteni. Az időpontra vonatkozóan eldönthető, hogy érdemes-e elvégezni a mérést, hiszen az előrejelző programok a DOP értékek alakulását is megadják egy kiválasztott földrajzi helyre vonatkozóan. Ez alapján durván becsülhető a mérési pontosság változása egyébként kedvező körülményeket feltételezve. Ha nem áll rendelkezésre speciálisan erre a célra kifejlesztett mérőkocsi, akkor el kell gondolkozni a hordozó járművön is. A műszerek elhelyezésére és megfelelő rögzítésére tervet kell kidolgozni. A mobilhálózat egyes helyeken (például a cellahatárokon) tapasztalható instabilitását egy „saját" külső GSM antennával lehet kiküszöbölni. Fontos döntés, hogy hányszor ismétlik a mérést és milyen sebesség mellett. A cél ugyanis a térbeli pálya előállítása egyenletesen elosztva elhelyezkedő diszkrét pontok alapján a lehető legtöbb fölös mérést végezve.

Az antennát a forgócsap függőlegesébe célszerű elhelyezni, mivel a forgócsapok jó közelítéssel az ívekben is a pályatengelybe esnek, így a vevő által meghatározott koordinátából a pályatengely helyzete egyszerűen számítható még akkor is, ha a jármű nyombővített és túlemelt ívben halad. A mérés során alkalmazni kell dőlésmérőt és lengésérzékelőt, valamint giroszkópot – esetleg odométert – is.

Kísérleteink tapasztalatai alapján érdemes kidolgozni és továbbfejleszteni egyrészt az alkalmazandó mérési technológiát, másrészt a mérésekből a helyszínrajz és hossz-szelvény előállításának technológiáját. Tekintettel a kapott adatok ellentmondó voltára, a MÁV szervezetének nagy szüksége volna olyan módszerekre, amelyekkel megoldható a vasútvonalak automatizált – ezáltal hatékony – geodéziai felmérése.

Hivatkozások

Busics Gy, Horváth T (2006): Az aktív hálózatok adottságainak kihasználása a műholdas helymeghatározásban. Geodézia és Kartográfia 4, 9-15.

Ferencz V (2007): A műholdas helymeghatározás alkalmazási lehetőségei a vasúti szolgáltatások fejlesztése területén. Diplomamunka, BME Építőmérnöki Kar Általános és Felsőgeodézia Tanszék, Budapest.

Ferencz V (2007b): Nagyvasúti közlekedési problémák geodéziai vonatkozásai. Doktori kutatások a BME Építőmérnöki Karán, Budapest, 7-17.

Jamieson D, Bloom J, Kelshaw R (2001): T-2000: A railroad track geometry inspection vehicle for the 21st century. Federal Railroad Administration, USA. (http://www.arema.org/eseries/scriptcontent/custom/e_arema/library/2001_Conference_Proceedings/00054.pdf).

Takács B (2007): GPS elmélet, ahogy azt a gyakorlatban tudni kell. GPS tanfolyam jegyzet. BME Általános és Felsőgeodézia Tanszék.

Takács B (2006): GPS mérések feldolgozása. GPS navigációs szakmérnöki szak. Számítási segédlet. BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék.

Zobory I (2008): Járműrendszerek: I. rész Vasúti járműrendszerek. BMK KMK Vasúti Járművek Tanszék, Egyetemi jegyzet, kézirat.

ÉPÜLETEN BELÜLI HELYMEGHATÁROZÁS RFID TECHNOLÓGIÁVAL

Krausz Nikol[*]*, Barsi Árpád*[*]

Indoor navigation with RFID *- Our paper gives an overview about the RFID technology and discusses the problems of indoor navigation and our proposed solution. Experiments have been carried out in order to investigate the limitations of the devices and requirements of equipment usage in real environment. Results are shown through the examples of our tests.*

Keywords: RFID, indoor, navigation

Cikkünkben rövid áttekintést adunk az RFID technológiáról, majd ismertetjük a beltéri navigáció problémakörét és az általunk javasolt megoldást. Modellkísérleteket folytattunk a felhasznált eszközökkel a technológia korlátainak megismerésére és valós körülmények közti felhasználhatóságára. Eredményeinket a tesztek segítségével prezentáljuk.

Kulcsszavak: RFID, beltér, navigáció

1 Bevezetés

RFID – angol rövidítés (*Radio Frequency Identification*) – rádiófrekvenciás azonosítást jelent. Az RFID általánosságban egy olyan rendszer, ami egy tárgy vagy egy személy egyedi azonosítóját továbbítja vezeték és érintés nélkül, rádióhullámok segítségével. Használata a negyvenes években kezdődött, azóta robbanásszerű fejlődésen ment át és egyre több a logisztikán kívüli speciális alkalmazása. Legutóbb az RFID Gazette tett közzé egy listát, amely a rádiófrekvenciás azonosítás alkalmazásának 15 legfurcsább módját tartalmazza. Ezzel arra szeretnénk rávilágítani, hogy rengeteg már kiforrott alkalmazás van a világon. A cikk bemutatja, hogyan lehet a rádiófrekvenciás azonosítást beltérben navigációs célokra alkalmazni, de előtte rövid, általános leírást adunk az RFID rendszerről (részletesebben: Krausz és Barsi 2007a).

2 A rendszer elemei és működése

Az RF rendszer összetevői:

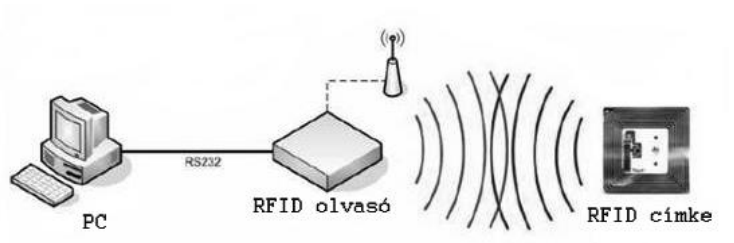
- címke (tag vagy transponder),
- olvasó (reader vagy interrogator),
- antenna.

A rendszer alapvető jellemzői a kommunikációs hatótáv (üzenetszórási tartomány) és az alkalmazott frekvencia. Az RFID címke (tag) egy integrált áramkörből (IC) és egy apró antennából áll, amit esetenként védőborítással is ellátnak. A címkék és az olvasók rádióhullámok segítségével kommunikálnak egymással (Finkenzeller 2003). Ebből következően az olvasási eljárás egyik legfontosabb jellemzője, hogy az olvasónak nem kell közvetlenül rálátnia a címkére, mint pl. a vonalkódok esetén. Előnyt jelent, hogy a rádióhullámok segítségével számos különböző közegen keresztül is hibamentesen olvasható a címkékben tárolt információ. Az adatok tárolásáért az integrált áramkör a felelős, a kommunikációért pedig az antenna.

A rádiófrekvenciás azonosító címkéknek alapvetően két csoportja létezik: aktív és passzív. Az aktív címkék saját erőből képesek az adattovábbításra, mivel belső áramforrással rendelkeznek, tehát nem a vevő által gerjesztett elektromágneses mezőt használják fel az adattartalom visszasugározására. A passzív címkék nem rendelkeznek saját áramforrással, csak az olvasóból kisugárzott energia segítségével képesek a kommunikációra. Az üzenetszóráshoz szükséges energiához csak akkor

[*]*BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.*
E-mail: krausz@mail.bme.hu
barsi@eik.bme.hu

jutnak, ha azokat a vevő megszólítja, a tekercsben áram indukálódik és a tárolt adatokat visszaküldi a vevőnek.



1. ábra. Rendszer működési elve

Az olvasó olyan eszköz, amely egy vagy több antennát is tartalmazhat, melyek rádióhullámokat bocsátanak ki és veszik a cimkékből érkező jeleket. Az olvasó a vett jeleket digitális formában továbbítja egy számítógép, vagy számítógép központ felé. Egyszerre több címkét is képes kezelni valós időben, nagy olvasási sebesség mellett. Az olvasók többsége víz- és saválló, mivel az iparban szélsőséges körülmények között is használják őket. Alkalmazástól függően lehetnek mobilak vagy rögzített helyzetűek.

Közvetítő egység a címke és az olvasó között az antenna, amely rádiójeleket sugároz, illetve fogad. Optimálisan mindkét komponens rendelkezik saját antennával. Az olvasási távolságok növelése érdekében kifejlesztették a külsőleg csatlakoztatható antennákat. Ezeket fel lehet használni a címkék esetében ugyanúgy, mint az olvasóknál. A különböző feladatokhoz speciális antennákat fejlesztettek ki, az ezekhez tartozó alak és irányítottság más és más. A kommunikációs távolság az a vevő és címke közötti maximális távolság, aminél még a jelek adása és vétele megtörténik.

Meghatározó eleme még a rendszereknek a használt frekvencia tartomány. Négy tartományból lehet választani. Az, hogy melyik rendszer melyik frekvencia tartományt használja, nagyon sok tényezőn múlik. Pl. a felhasznált címkék aktív vagy passzív mivolta, a leolvasási tartomány kiterjedése, címkék fizikai mérete. A felsoroltakon kívül még nagyon sok tényező befolyásolja az adott rendszerhez használt frekvenciát.

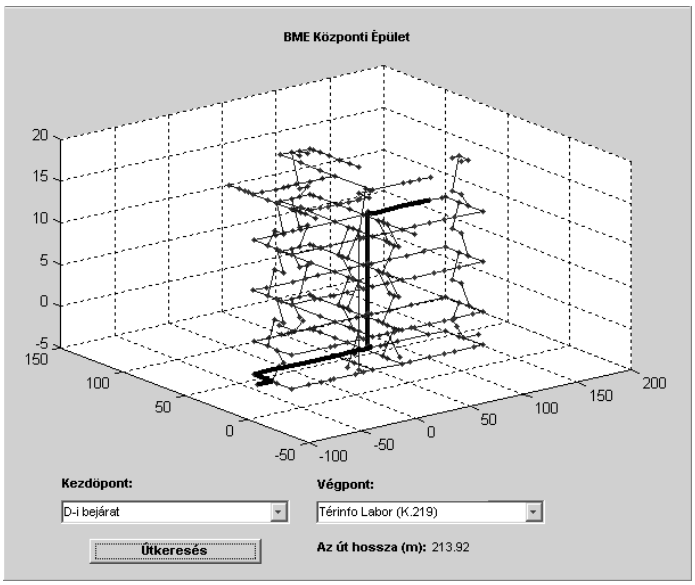
Az olvasó antennája rádiófrekvenciás jelet bocsát ki, ez gerjeszti a címkét. A címke átadja az azonosítót és az adatokat a leolvasónak, az olvasó pedig fogadja ezeket az adatokat, majd továbbküldi azokat a számítógépnek. Az aktív címke kétféle üzemmódban működhet. A beállított paraméterek alapján a saját áramforrását felhasználva sugározza az üzenetcsomagjait (beacon) vagy csak akkor továbbítja az adatokat, ha vevő tartózkodik a közelében (transzponder). A két üzemmód egyszerre is működhet, ilyenkor a címke automatikus üzenetszórási módban van, de ha megszólítja egy vevő, akkor is válaszol. Ezek a vett adatok mentésre kerülnek a számítógépen. A számítógép a fogadott adatok alapján meghatározza a szükséges lépéseket, majd utasítást ad az olvasónak, az olvasó pedig továbbítja az adatokat a címkének (1. ábra).

3 Navigálás RFID rendszerrel

GPS segítségével navigálni szabad ég alatt meglehetősen elterjedt manapság; akár mobiltelefonokon is futtathatunk műholdas helymeghatározó rendszert. Ezek a szoftverek viszont beltérben nem működőképesek, mivel a műholdakkal a közvetlen kapcsolat akadályozott. Ez természetesen nem érvényes a hagyományos cella alapú mobiltelefonos helymeghatározásra; a legkisebb beltéri cella méret a piko (20 m < R < 50 m), melynek hatósugara jóval alatta marad a rádiófrekvenciás technikával elérhetőnek. Kifejlesztetek már beltéri mobilcellát (femtocellát) otthoni használatra, aminek hatósugara körülbelül 13 méter. Ennek segítségével interneten keresztül olcsóbb telefonálás valósulhat meg, de navigálásra nem alkalmas. Szükség van tehát egy zárt térben megbízhatóan üzemeltethető rendszerre, ennek alapját adja a már ismertetett technológia, az RFID (Krausz és Barsi 2007a).

3.1 A rádiófrekvenciás azonosításon alapuló navigálás elmélete

Ha épületen belül szeretnénk eljutni a bejárattól a célig, bizonyos mértékű helyismerettel kell rendelkezni, vagy jól tájékoztató információs táblák szükségesek. Egyes közintézményekben ez a feltétel adott, de ebből van kevesebb. A rádiófrekvenciás azonosítás egy olyan technológia, amely lehe-



2. ábra. K-Navigátor

tőséget ad navigációs rendszerek kivitelezésére, mely zárt térben, épületen belül is elkalauzolja a közlekedő felhasználót.

Elgondolásunk alapján ez a következőképpen néz ki a BME K épülete alapján. Szükség van az épület adottságait és sajátosságait figyelembe vevő optimalizált úthálózati gráfra. A cél az volt, hogy a lehető legjobban sikerüljön modellezni a folyosókat és magát az egész épületet egy olyan gráffal, aminek a lehető legkevesebb csomópontja van, ugyanakkor áttekinthető, és minden lényeges, fontos objektum kapjon azonosítási lehetőséget. Ez az azonosítás egy sorszám, ennek segítségével lehet később hivatkozni az adott pontra. A csomópontokat összekötő élek irányítatlanok, mivel a folyosók sem egyirányúak a valóságban. Az előkészületek után a következő lépés a távolságmátrixok feltöltése, majd a Floyd-Warshall algoritmus meghívásával (Cormen et al. 2003, Paláncz 2001) a legrövidebb utak meghatározása. A fent leírt lépéseket hajtja végre az általunk fejlesztett Matlab alapú K-Navigátor program (2. ábra). A szoftver segítségével megkapjuk a legrövidebb utat a kiindulópont és a célobjektum között.

Az épületgráf szegmentálása is viszonylag egyszerűen elvégezhető a kijáratokra nézve: az épület helyiségeit a kijáratokhoz rendeljük. Felhasználható arra, hogy az épületen belül megmondjuk, melyik kijárathoz vagyunk egy adott ponton a legközelebb, illetve melyik kijáraton lehet a leggyorsabban elhagyni az épületet vészhelyzet esetén.

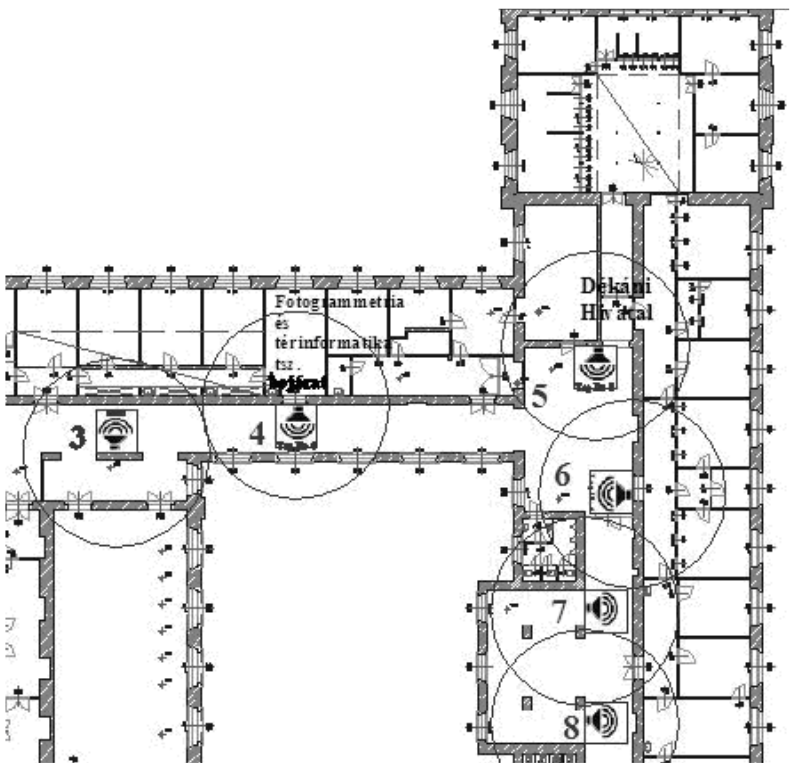
Az úthálózati gráf megalkotása után a következő lépés az, hogy a navigációt kiszolgáló hálózatot megtervezzük úgy, hogy az idomuljon a gráfhoz, a címkék a csomóponti elemekre illeszkedjenek. Az elmélet felállításánál kikötöttük, hogy a navigáció csak a folyóson történik, ezért ugyan a címkék üzenetszórási tartománya átlóghat a termekbe, szobákba, azt azonban nem vesszük figyelembe. A 3. ábrán megadott módon történik meg a címkék kihelyezése. Látható, hogy pl. az ötös és a hatos címke üzenetszórási tartománya átfedésben van, ennek köszönhetően nem csak jelenlétet lehet megadni az olvasóra, hanem pozíciót is. Ha az olvasó mindkét címkével képes a kommunikációra, akkor a két címke közös térszegmensében tartózkodik. Mivel a kihelyezett címkék pontos koordinátái ismertek, ezért a mozgó vevőnek lehet közelítő pozíciót számítani például egy egyszerű számtani középérték-képzéssel.

Ebben az esetben nem a pontos vevő helyzetet kapjuk, hiszen ha egy címke üzenetszórási tartományában tartózkodik a vevő; a helymeghatározás pontossága az üzenetszórási tartomány méretével egyezik meg. (Krausz és Barsi 2007a)

Az RFID-n alapuló beltéri navigációs rendszer elve a következő: az épületbe érkező tájékozódni óhajtó személy kap egy PDA-szerű készüléket, melyen fut a K-Navigátor szoftver, az alkalmazás legördülő menüsorából kiválasztja, hogy honnan indul (melyik bejáratnál érkezett az épületbe), majd a „hová” menüben megadja az úticélt. A program meghatározza a legrövidebb utat, majd szöveges utasításokkal és kis nyilakkal elnavigál a célállomásig. A közlekedés alatt a vevő kommunikál a kihelyezett címkékkel, kiolvassa belőlük a tárolt információkat, ezeket összeveti a számított útvonalra eső címkék adataival.

3.2 Működési próba vizsgálatok

Több tesztmérés is történt a beszerzett eszközökkel, ezek kezdetben ismerkedő mérések voltak. Vizsgáltuk, hogy a műszaki leírásban megadott értékek mennyire fedik a valóságot. Több teszt segítségével feltérképeztük a jelerősség-tartományokat, illetve a tereptárgyak és az emberi testek jelerősségre gyakorolt hatását. Fontos volt tudnunk, hogyan viselkedik a kibocsátott jel fémes környezetben, hiszen ebben a közegben elnyelődnek a rádióhullámok. Az általunk választott Identec eszköz kommunikációs frekvenciája az ultra magas frekvencia (UHF) tartományba tartozik és elvben nem érzékeny a fémes környezet jelenlétére (www.identecsolutions.com). Vizsgálatunk tárgyát képezte a tényleges kommunikációs hatótávolság meghatározása abban a közegben, ahol majd alkalmazásra kerülnek. Ez lényeges információ a kihelyezésre kerülő címkehálózat szempontjából; kell-e változtatni pl. a megalkotott struktúrán. A kísérletek során igyekeztünk megtalálni azt az ideális fizikai/geometriai elrendezést, amelyben a kommunikáció a vevő és a címke között optimális. Vizsgáltuk, vajon szükséges-e valamiféle irányítottság, hogy a maximumot lehessen kihozni a rendszerből. A tesztterület kiválasztásánál a változatosság (hosszú folyosó, fordulók, nagyobb terek), a jó megközelíthetőség és a viszonylag zavartalan mérési lehetőség játszotta a fő szerepet, mivel a kis hatótávolságú címkéket könnyen ellophatják, ha nincsenek fix helyre rögzítve.



3. ábra. A címkék által lefedett térrészek

Az antenna egy PCMCIA kártyán keresztül kapcsolódott egy laptop-hoz, amelyen a rögzítő és feldolgozó program futott. Az egész rendszer egy kézikocsira került felszerelésre, melyen az antenna elöl, a menetirány felé nézett. A kézikocsival bejárva a mérési területet, folyamatos adatrögzítés történt többféle címke struktúrában. A kiinduló és végpont mindig a Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék bejáratánál volt. Történt rögzítés külön a Dékáni Hivatal előtt, ebben az esetben a trajektóriákra és a pozíciókra voltunk kíváncsiak (Tőzsér 2007). A mérésekhez előre elkészültek a koordináta listák a címkék helyéről, melyekből egy kis szemelvény az 1. táblázatban látható. A

1. táblázat. Koordináta lista részlet

TagID	X	Y	Z	Megnevezés
100106020	62.7	32.6	100.0	Aula
100106021	48.7	46.6	100.0	Aula
100106022	62.7	46.6	100.0	Aula
100106023	76.7	46.6	100.0	Folyosó
100106024	90.7	46.6	100.0	Folyosó
100106031	118.7	46.6	100.0	Foto tsz
100106032	132.7	46.6	100.0	Dékáni
100106033	138.7	33.6	100.0	Lépcső

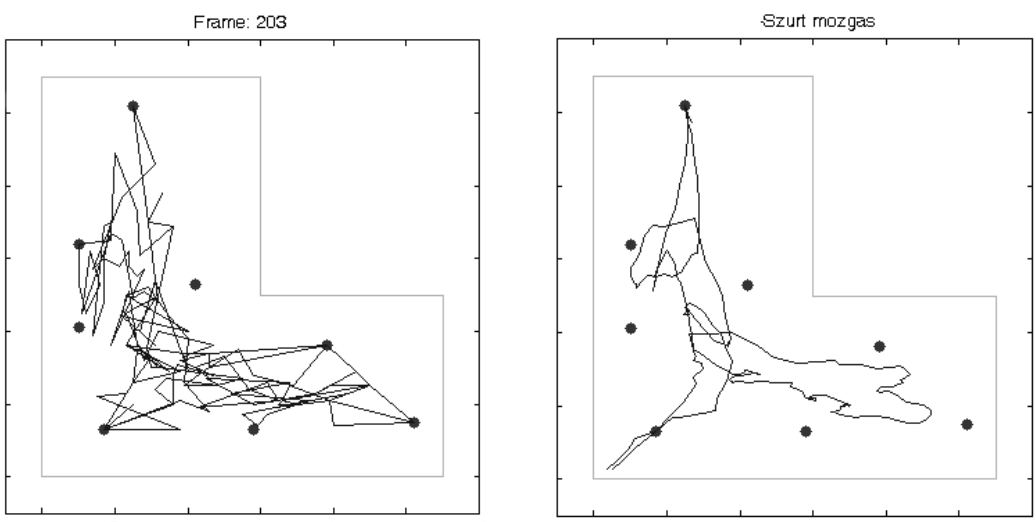
TagID azaz azonosító szám, ami egyedi minden címke esetében; a megnevezés oszlopban a címke memóriájában eltárolt információ látható, amelyet az olvasó kérésére sugároz (szándékosan nélkülöztük az ékezeteket).

A tesztmérések során alkalmazott szoftver nem a teljes K-Navigátor volt, hanem a helymeghatározáshoz készített modulja. A program az alábbi lépéseket hajtja végre:

- beolvassa az előre elkészített koordináta listát a címkék helyzetéről,
- a TagID-ket (címkeazonosítókat) és megnevezéseket vektorban, az X,Y,Z koordinátákat mátrixban tárolja el,
- indít egy címke szkennelést,
- a szkennelés időpontját rögzíti,
- a látható címkék számát rögzíti,
- az észlelt címkék koordinátáit kikeresi a koordináta listából,
- a koordinátákon végrehajtja az átlagolást,
- a mérés adatait egy /txt/ állományban rögzíti: idő, látott címkék száma, X, Y, Z sorrendben,
- a fenti lépéseket a program megállításig ismétli.

A program a mért és számított értékeket egy szöveges (*.txt) állományba mentette el, amely könnyen importálható további feldolgozás, megjelenítés céljából más szoftverekbe.

A 4. ábrán a Dékáni Hivatal előtt elhelyezett címke elrendezés látható, ekkor a trajektória rögzítése volt a cél. A nyers adatokból a szűrt értékeket egy konvolúciós simítószűrő segítségével kaptuk,



4. ábra. Nyers és simított mozgásábrák egy folyosósarkon

így a tényleges mozgást jobban, simábban leíró görbét kapunk. Az ábrán az előre telepített helyeket (címkéket) a vastag pontok jelzik. Leolvasható, hogy a mérés során majdnem minden pozícióban többszörös címkeolvasás történt, így az átlagolás pontosabb helyet volt képes megadni.

4.3 Jövőkép

A tesztmérések alkalmával a berendezés és a szoftver jól vizsgázott, az eltárolt és a megjelenített információ megegyezett. Vizsgálódásaink során felvetődött, hogy alkalmazható lenne ez a technológia városokban, pl. városi kanyonok esetében is, hiszen a GPS alapú navigációs eszközök nagyvárosokban, magas épületek közti szűk utcákban nem minden esetben használhatóak; ahol a műholdakra nincsen megfelelő rálátás, ott kiegészítő rendszerként üzemelhetne. A kiépített RFID struktúra összehangoltan működhetne egy a közlekedés biztonságát támogató rendszerrel (Krausz és Barsi 2007b).

5 Összefoglalás

A cikkünkben igyekeztünk kis áttekintést adni az RFID alapú helymeghatározási technológiáról. Az RFID rendszereket sikerrel használják már számos alkalmazásban a világon. Vizsgálataink során bebizonyítottuk, hogy a rádiófrekvenciás azonosítás alkalmas beltéri navigációs eszközként való felhasználásra. Gondosan kell eljárni az elhelyezések megtervezésénél, mivel a vevő egyszerre több kihelyezett címkét képes azonos időben kezelni. A hálózat megfelelő tervezésével, elrendezésével és eszközeinek megválasztásával az egyik legjobb megoldása lehet az épületen belüli tájékozódásnak. Az általunk fejlesztett szoftver megbízhatóságát tesztekkel igazoltuk. A tesztek során felhasznált eszközöket az ipar igényei szerint fejlesztették, ezáltal extrém időjárás esetén is üzemképesek. Ezt a tulajdonságot beltérben nem igazán lehet kihasználni, de a fent megemlített kültéri szituációban valószínűsíthetően jól vizsgázna, de ebben a kérdéskörben további vizsgálatok szükségesek.

Hivatkozások

Finkenzeller K (2003): RFID handbook. John Wiley and Sons, Chichester.
Krausz N, Barsi Á (2007a): RFID technológia: A helymeghatározás új eszköze. Geomatikai Közlemények X, 99-106.
Tőzsér Á (2007): Rádiófrekvenciás azonosításon alapuló épületen belüli navigáció, diplomaterv.
Cormen T, Leiserson C, Rivest R, Stein C (2003): Új algoritmusok, Scolar Kiadó.
Paláncz B (2001): Algoritmusok és adatszerkezetek, Műegyetemi Kiadó.
Krausz N, Barsi Á (2007b): Rádiófrekvenciás azonosítás a közlekedés biztonságának támogatására, Geodézia és Kartográfia 8-9, 24-28.

FORGALOMMAL SZEMBEHAJTÓ JÁRMŰ DETEKTÁLÁSA RFID SEGÍTSÉGÉVEL

Barsi Árpád, Lovas Tamás*, Krausz Nikol**

Detecting ghost driver by RFID – *In order to improve road safety, state-of-the-art sensors and technologies are applied by transportation authorities. In the frame of an EU FP6 project, our department investigates the potential of radio frequency identification as safety sensor. Our primary goal is to detect a vehicle travelling against the traffic direction (also known as „ghost driver").*

Keywords: detection, RFID, ghost driver

A közlekedés biztonságának növelése érdekében modern szenzorok és technológiák szállnak versenybe. Tanszékünk egy EU 6-os keretprogramban folyó projektben az rádiófrekvenciás azonosítás, mint a közlekedés biztonságát növelő szenzor alkalmazhatóságát vizsgálja. Elsődleges feladatunk a technológia alkalmazása forgalommal szemben haladó jármű detektálására. Cikkünk áttekintést ad a megoldandó problémáról és a kifejlesztett mérési-detektálási eljárásról. Eredményeinket elvégzett sikeres modellkísérletben és valós tesztjeinken keresztül mutatjuk be.

Kulcsszavak: detektálás, RFID, forgalommal szembehajtó jármű

1 Bevezetés

A rádiófrekvenciás azonosítás (radio frequency identification – RFID) technológiája igen ismert és elterjedt az árufelismerésben, azonosításban (Finkenzeller 2003); az utóbbi időben elkezdték ezeken az alkalmazásokon kívül is innovatívan használni. Tanszékünkön végzett kutatás kereteiben mi is elsőként helymeghatározás céljára alkalmaztuk a rendszert (Krausz és Barsi 2007).
A rádiós kommunikáción és azonosításon alapulóan további kísérleteket folytattunk; törekvésünk a közlekedés biztonságának növelése volt. Mivel a berendezéseket egy EU-s keretprogramban folytatott közreműködésünk támogatásával vásároltuk, így a konzorcium vezetői által megjelölt célok szerint is vizsgáltuk az eszközöket.

Így kerülhetett sor arra, hogy az RFID technológiát a forgalommal szemben haladó járművek automatikus azonosítására alkalmazzuk. A projekt irányító résztvevői (autógyárak, útkezelő cégek, szenzor-gyártók, kommunikációs partnerek) érdemesnek találták a technológia ilyen célú vizsgálatát a nyilvánvaló előnyök közlekedésben történő kihasználására. Az RFID technológia ugyanis alapvető pozitív tulajdonságai miatt terjedt el pl. a raktár-nyilvántartásban, tömegközlekedésben, gyárak árumozgásainak követésében. Ezek az előnyök a következők:

- kisméretű, kis energiafogyasztású, könnyen felszerelhető RFID címkék (tag-ek),
- könnyen telepíthető RFID olvasó berendezések, illetve antennák,
- szabványosított, viszonylag nagy (akár 100 méteres nagyságrendű) érzékelési hatótáv,
- elérhető ár.

2 A forgalommal szembehajtó jármű (ghost driver)

A közúti közlekedés statisztikai kimutatásai mindig megkülönböztetett figyelemmel kezelik a tömeges baleseteket. Egyik kiváltó okaként a forgalommal szemben haladó járműveket tekintik.
A forgalom rendes haladási irányával ellentétesen alapvetően a következő okok miatt haladnak a járművek:

- fogadásból, bátorságpróbából, „vagányságból",
- öngyilkossági kísérlet okán,
- figyelmetlenségből,
- rossz látási viszonyok miatt.

BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.
E-mail: barsi@eik.bme.hu, tlovas@mail.bme.hu, krausz@mail.bme.hu

Természetesen a fentiek kombinációja is előfordul: mostoha időjárási körülmények között, csekély látótávolság mellett fáradt, figyelmetlen gépjárművezető hibás irányban hajt az úton.

A forgalommal szemben haladó jármű (angol kifejezéssel *ghost driver*) főként az autópályákon és zárt sávokban jelent különös veszélyt. A szemben haladó járművek nagy sebességkülönbsége miatt túlnyomórészt halálos kimenetelűek ezek az ütközések, az autópályákon nagyobb forgalom mellett pedig emiatt tömeges balesetek keletkeznek – nagyon sok személyi sérüléssel és jelentős anyagi kárral (D2.3.2 Final Report, Safespot projekt, http://www.safespot-eu.org/deliverables.html).

Mivel a közlekedők biztonságának növelése a cél az Európai Unió iránymutatásai szerint (is), ezért a modern technika minden eszközét bevetik ebben a küzdelemben.

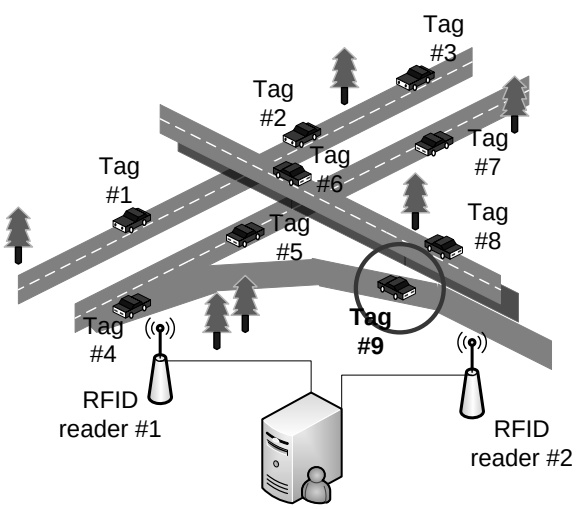
A forgalommal szemben haladó jármű minél korábbi észlelése, majd a korai riasztás kulcsfontosságú! A korai észleléshez igen jól kapcsolható automatikus figyelőrendszer, amely emberi, operátori beavatkozás nélkül azonosítja be a hibásan közlekedő gépjárműveket, majd a megfelelő helyen riasztja a beavatkozókat (figyelmeztető táblák, feliratok automatikus aktiválása, hatóság értesítése stb).

3 A mérés és detektálás elve

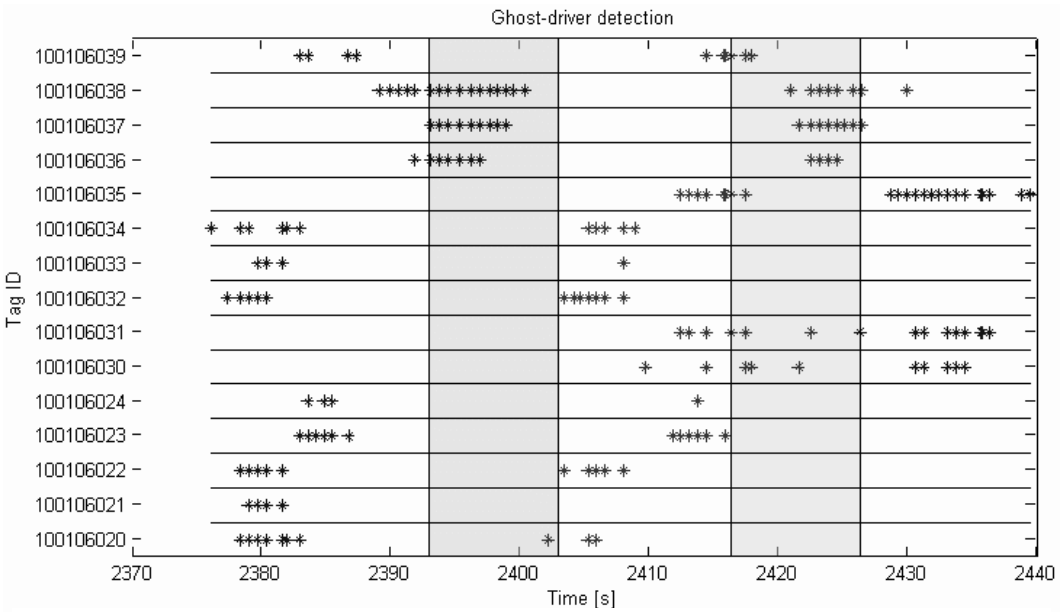
Az automatikus érzékelő- és riasztórendszer számára a forgalommal szemben haladó jármű legalább két érzékelési ponton történő áthaladással mutatható ki; az érintési sorrend alapján dönthető el, hogy helyes vagy fordított-e a haladási irány. Ha a helyes sorrend szerint a jármű előbb az A (#1), majd a B (#2) érzékelőnél figyelhető meg, nincs tennivaló. (Legfeljebb ez a két megfigyelés tárolása és esetleges feldolgozása a forgalom nagyságáról adhat képet.) Amennyiben viszont egy B, majd A áthaladást érzékelünk, szemben haladó járműről van szó (1. ábra #9-es járműve).

Ha csupán egyetlen érzékelőnél jelentkezik a jármű, nem lehet a haladási irányt megállapítani.
A feladat gyakorlati kivitelezése során a következő nehézségeket/problémákat kell kezelni:

- mekkora időablakon belül kell figyelni a járműveket, hiszen előfordulhat, hogy egy nap vagy egy óra múlva ismét arra jár a jármű és mindvégig szabályosan haladt;
- hogyan kell elhelyezni a járműre a címkéket, hogy azokat az olvasóegység minél nagyobb találati aránnyal olvasni tudja;
- hogyan kell elhelyezni az olvasókat, hogy az adott helyen (pl. útkereszteződés, autópálya felhajtó) minden irányt ellenőrizhessünk, ugyanakkor ne fordulhasson elő tévedés (egyik fajú hiba se forduljon elő: téves riasztás sem, és észrevétlen ghost driver sem);
- milyen távolságra kell helyezni az érzékelőket, illetve hogyan lehet megoldani azok között a kommunikációt.



1. ábra. A forgalommal ellentétes irányban haladó jármű egy autópálya lehajtón



2. ábra. Érzékelési diagram két szenzorral. A baloldali szürke időablakban nincs, a jobboldaliban van forgalommal szemben haladó jármű (az 100106031 azonosítójú címke)

A 2. ábrán egy mérés kis részletén mutatjuk be a működés lényegét. A forgalommal szemben haladó járműről tehát tudjuk, hogy az iménti érzékelő-konfiguráció mellett B-A haladású. Ezek szerint ha egy járművet először a B érzékelőnél, majd a meghatározott időablakon belül az A érzékelőnél is észlelünk, riasztanunk kell. Egy konkrét járműről könnyű eldönteni, hogy A-B vagy B-A sorrend szerint halad-e, egy egész járműfolyam esetén más megközelítésre van szükség.

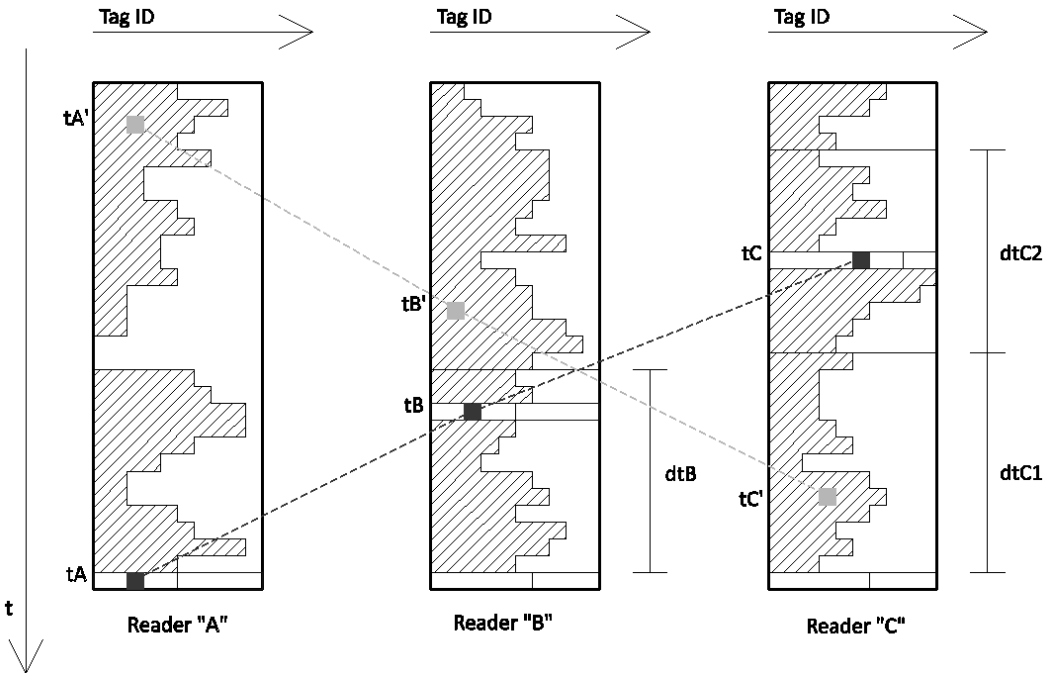
Algoritmusunk szerint a sorrend ellenőrzésére az A érzékelőnél kerül sor, B érzékelő folyamatosan „figyeli" az elhaladó címkéket, azaz a gépjárműveket, majd az azonosítókat elküldi az A érzékelőnél működő számítógépnek. Itt ennél a gépnél is fut egy érzékelés. A forgalommal szemben haladó jármű az lesz, amelyik egy A érzékelőnél történt elhaladáskor az előzőleg B érzékelőtől megkapott azonosítók között szerepel. Mivel az időablakot kezelni kell, így a B érzékelőtől megkapott azonosítók észlelési idejükkel együtt egy listába kerülnek. A lista hossza a forgalomtól függően dinamikusan változik; minden azonosító csak az időablakon belül tartózkodik a listában. Amint „túlkoros" lesz, törlésre kerül. Programtechnikailag tehát kettős a feladat:

- a B érzékelőtől kapott azonosítók listáját folyamatosan karbantartani kell;
- az A érzékelőnél észlelt azonosítók jelenlétét kell ellenőrizni a B-től jött, karbantartott listában.

Ha az A-nál észlelt azonosító tehát a B listájában előfordul (akár többszörös, sorozatos egymás utáni észleléssel), riasztást kell kiadni. Ilyen riasztást kell generálni a 2. ábra 100106031 azonosítójú címkéje, vagyis járműve miatt.

Az elv több érzékelőre is kiterjeszthető; a 3. ábrán három érzékelő esetét mutatjuk be. Az ábra függőleges tengelyén az idő látható, míg a hasábok az egyes érzékelőknél mért azonosítókat jelzik satírozottan. A maximális szélesség az egyszerre olvasható maximális számú azonosítót jelenti; esetünkben ez 30 volt.

A feladatban az optimalizáláskor a gyorsaságra (teljesítményre) kell a hangsúlyt helyezni, mivel valós idejű feldolgozásnál a látenciát minimalizálni kell. A helyes sorrendben haladó járművek azonosítója először A-nál jelentkezik tA' időpillanatban, majd utána kerül B érzékelőhöz tB' időpillanatban. A jármű folytatja útját és tC' időpillanatban a harmadik érzékelőnél jelenik meg. Az A-nál futó detektálás tehát nem fogja kiszűrni a járművet és nem generál riasztást. Ghost drivernek tekinthető az a jármű, amelyik tC időben a harmadik, majd tB időben a második, s tA időben az első ér-



3. ábra. Három érzékelő észleléseit tartalmazó lista, valamint a helytelen (erős vonal – vessző nélküli időpillanatok) és a helyes (halvány vonal – vesszős időpillanatok) irányban haladó járművek leképződése. A satírozott csíkok az észlelt címkék számával arányosak

zékelőnél figyelhető meg. Mivel láthatóan időablakokon belül tC<tB<tA növekvő időpillanatokban érzékelhető a jármű, riasztást kell kiadni.

Mivel a B érzékelő csak adatot gyűjt és továbbít A felé, az A pedig fogadja a B-nél végzett méréseket, ezért az alkalmazások kifejlesztésénél használt programozási technikák szerint az A érzékelő szerver, a B érzékelő kliensnek tekinthető.

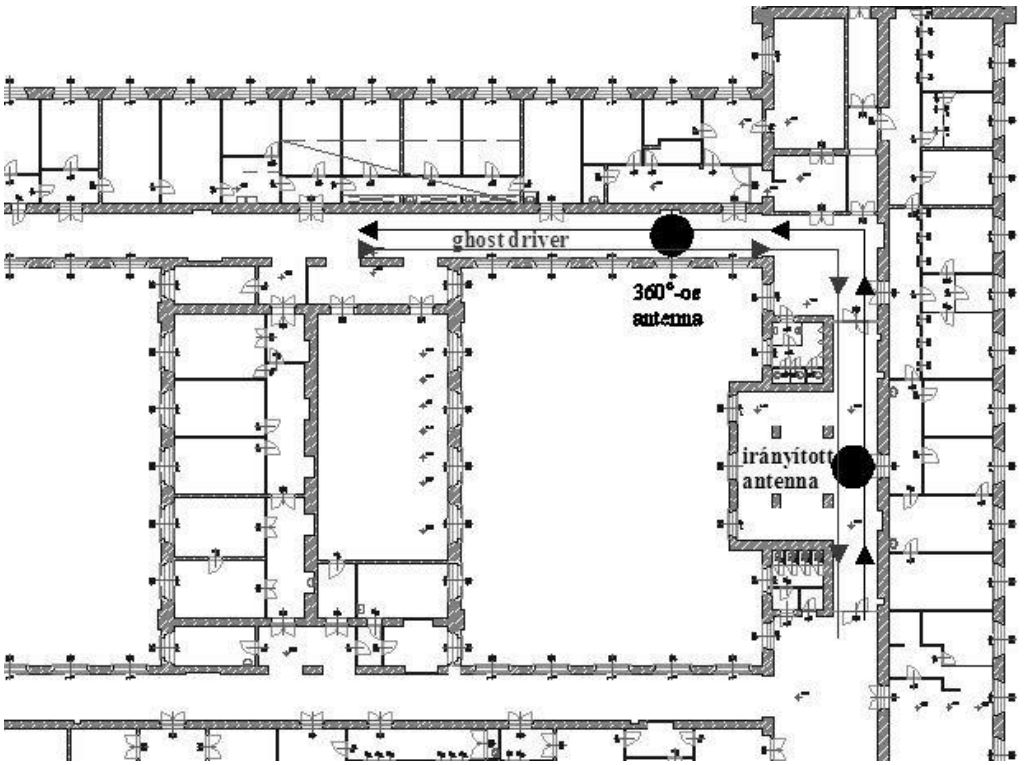
4 Modellkísérlet

Az előző fejezetben leírt elvi megoldás ellenőrzésére modellkísérletet végeztünk a BME Központi épületének folyosóján (4. ábra). A kísérletben 6 m hatótávolságú címkéket használtunk, ezeket hallgatók vitték, ezzel szimuláltuk a mozgó járműveket. A folyosó két egymástól távolabb eső részén egy-egy laptopot helyeztünk el címkeolvasóval (vastag fekete pontok). A használt RFID rendszer a korábban beszerzett Identec rendszer volt (Krausz és Barsi 2007).

Mivel az érzékelők távolságának csupán a címkék hatótávolságánál kellett nagyobbnak lennie, így a tanszéki vezeték nélküli hálózatra kapcsolódhatott mindkét érzékelő laptopja. A két gép óráját időszerver segítségével szinkronizáltuk, az érzékelésnél így abszolút időket használtunk. A gépek közötti adattovábbítás idejét a kis távolság miatt elhanyagoltuk.

A helyes irányban közlekedő „járművek” (hallgatók) esetében a detektáló algoritmus nem jelzett, míg a tévesen szemben haladóknál figyelmeztető üzenet jelent meg a képernyőn.

A kísérlet során az elvi megoldás helyesnek bizonyult, azonban az időablak meghatározásához teszteket kell végezni. Megállapítható volt, hogy az érzékelők távolsága, valamint a várható forgalmi sebesség határozzák meg az időablak nagyságát. Az időablakot ugyanis úgy kell megválasztani, hogy esetlegesen szabályosan haladó, későbbi időpontban arra közlekedő jármű ne okozzon (ne generáljon) figyelmeztetést. A helyesen beállított időablak esetén az érzékelő ismételt felkeresése nem okozott hibaüzenetet.



4. ábra. A folyosón elhelyezett két érzékelő, valamint a helyes és helytelen haladási irány

5 Valós teszt

A sikeres modellkísérlet után az éles teszt összeállítása történt. A tesztet a BME területén, a Magyar Tudósok Körútján végeztük (5. ábra). A két laptop óráját ebben az esetben is szinkronizáltuk. A valós körülmények között már a nagy hatótávolságú (100 m névleges értékű) címkéket használtuk. Ebben a helyzetben a két érzékelőt úgy helyeztük el, hogy egy vezeték nélküli hálózat két ellentétes szélén (megközelítőleg 150 méterre) helyezkedjenek el. A kommunikációt tehát egy Wifi-router biztosította; a létrejövő helyi hálózat független az internettől, így gyakorlatilag bárhol elhelyezhető. A router hatósugarában akár több számítógép is elhelyezhető, így bonyolultabb helyzetekben (csomópontokban), több reader együttes alkalmazásával összetett vizsgálatok is végezhetők.

A kliens érzékelő saját tápellátást használt (laptopról lévén szó, elektromos hálózat nélkül néhány óráig működőképes), a szerver esetén egy parkoló autó szivargyújtójáról inverterrel biztosítottuk a 220V-os feszültséget mind a router, mind a laptop számára.

A címkéket egy személygépkocsira erősítettük fel több helyre (szélvédő mögé, műszerfalhoz, középkonzol mellé, rendszám elé), amely 5 mérési fordulóban helyes és helytelen irányban haladt. A mérés során a képernyőn aktivált riasztások mellett minden érzékelést naplóztunk, így később részletes elemzés is lehetséges.

Így lehetővé válik annak tanulmányozása, hogy mennyi ideig tartózkodik a címke az olvasók hatósugarában, milyen jelerősség mellett történik meg az érzékelés, az egyes áthaladások között mennyi idő telik el, milyen hosszú időablak megválasztására van szükség.

A teszt alatt a címkék többsége teljes mértékben érzékelhető volt. A szélvédő mögött elhelyezett címke bizonyult a legjobb elrendezésnek.

A valódi körülmények között végzett vizsgálat megerősítette azt a korábbi megfigyelésünket, hogy a címkék olvasására használt antennák elhelyezése nagyon lényeges, mivel a rosszul elhelye-



5. ábra. Az éles teszt helyszíne Google Earth képen a helyes és helytelen irányok, valamint az érzékelők megjelölésével

zett antennák miatt kieső észlelés esetén a forgalommal szemben haladó jármű detektálása nem lehetséges. A nagyobb sebességgel haladó járművek csak rövid ideig tartózkodnak az olvasók hatósugarában, emiatt az antennakonfiguráció nagyon lényeges.

6 Összefoglalás

Vizsgálataink során bebizonyítottuk, hogy a rádiófrekvenciás azonosítás alkalmas olyan speciális feladat, mint a forgalommal szemben haladó jármű érzékelésére. A több RFID érzékelő egyidejű alkalmazása alapos tervezést (pl. érzékelők és címkék elhelyezése, áramellátás) és speciális programtechnikai követelmények (pl. időszinkron megoldása külterületi utak mentén, megfelelő időablak beállítása) teljesülését követeli meg. Az általunk fejlesztett érzékelési eljárás alkalmas a rendelkezésre álló adott hatótávolságú és érzékenységű RFID olvasók és címkék segítségével a feladat megoldására. Az érzékelési algoritmus teljesítményét beltéri tesztekkel igazoltuk, míg a teljes rendszer működőképességét (a háttérprojekt követelményeinek megfelelően) valós környezetben, út mellett elhelyezett olvasók és járműre szerelt címke segítségével igazoltuk.

Kutatásaink bizonyítják, hogy pl. a logisztikai feladatok során már széles körben alkalmazott technológia akár ilyen új, innovatív alkalmazásokban is hasznosítható, előnyei kiaknázhatók.

A sikeres modellkísérlet után az éles teszt összeállítása történt. A tesztet a BME területén, a Magyar Tudósok Körútján végeztük. A két laptop óráját ebben az esetben is szinkronizáltuk. A valós körülmények között lefolytatott vizsgálat igazolta, hogy a kidolgozott algoritmus képes valódi sebességgel mozgó, a forgalommal szembehaladó járművet kimutatni és figyelmeztető üzenetet generálni.

Projektünkben, amelynek infrastrukturális érzékelését végeztük, ennek az adatnak a birtokában megtörténik a feldolgozása: egy gyors dinamikus adatbázisba kerül, ahol esetenként ellenőrzése is megtörténik, illetve a többi közlekedő fél számára figyelmeztető üzenet kiadására kerül sor. Ezzel egy időben az út mentén elhelyezett (változtatható jelzésképű) táblák is figyelmeztetnek a komoly balesetveszélyre.

Hivatkozások

Krausz N, Barsi Á (2007): RFID technológia: A helymeghatározás új eszköze, Geomatikai Közlemények X, 99-106.
Finkenzeller K (2003): RFID handbook. John Wiley and Sons, Chichester.

A KÁRPÁT-MEDENCE ÉS KÖRNYÉKE FÖLDRENGÉSEINEK STATISZTIKAI ELEMZÉSE

Kiszely Márta[*]

Statistical investigations of local earthquakes in the Carpathian Basin and surrounding area *- Statistical property of seismicity is analysed on the example of three seismo-tectonically different regions in this article: the Carpathian Basin, the Dinarides and the Eastern Carpathians (Vrancea) region. The spatial and temporal fractal structures of earthquakes were analysed by different methods.*

Keywords: Carpathian Basin, fractal study of earthquakes, seismicity

A cikk a földrengések eloszlásának statisztikai tulajdonságait elemzi három tektonikailag eltérő területen: a Kárpát medencében, a Dinári-hegységben és Keleti és Déli-Kárpátok (Háromszéki-havasok) területén. A földrengések térbeli és időbeli fraktál tulajdonsága többféle módszerrel került elemezésre.

Kulcsszavak: Kárpát-medence, földrengések fraktál analízise, szeizmicitás

1 Bevezetés

Magyarország területén a földrengés aktivitás mérsékeltnek mondható. Ennek ellenére erősebb, M_L=5-6 Richter magnitúdójú, az epicentrum környékén komoly épületkárokat okozó földrengések kis számban, de előfordulnak. A szeizmikus aktivitás területi eloszlása nem homogén, vannak az átlagnál egyértelműen aktívabbnak nevezhető területek (Komárom, Móri-árok, Kapos-vonal, Eger, Jászság, Zala megye északi része). Magyarország Kelet-Európának két legaktívabb területe között fekszik, a Dinári-hegység és a Keleti- és Déli-Kárpátok között. Ebben a régióban együttvéve 1900-2006 között kb. 20 000 földrengést tartalmazó katalógusok állnak rendelkezésünkre. Ezek adatait felhasználva a Kárpát-medence, a Dinári-hegység és a Keleti- és Déli-Kárpátok területén kipattant rengések statisztikai jellemzőit vizsgáltuk. Ennek eredményeként sikerült kimutatni, hogy a földrengések térbeli és időbeli eloszlása fraktál jelleget mutatnak ezeken a területeken.

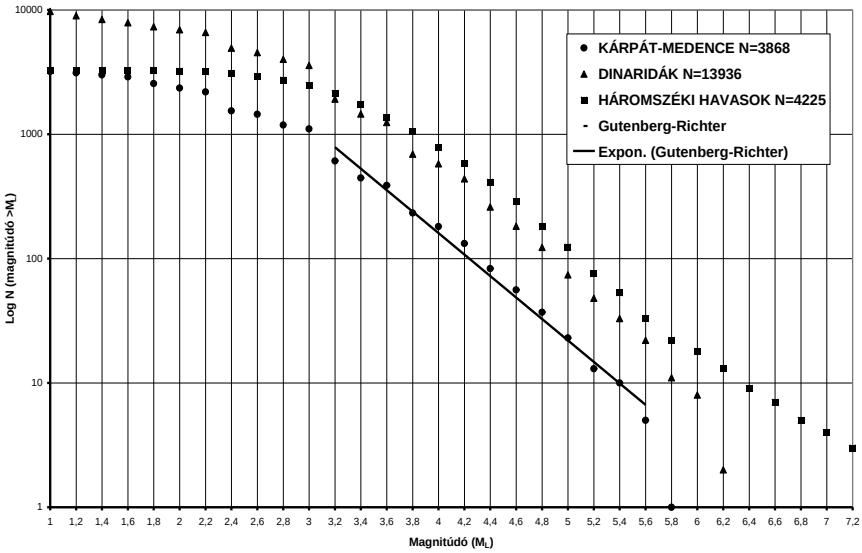
A földrengések időbeli eloszlását első megközelítésként Poisson eloszlásúnak gondolhatjuk. Viszont egy katalógus adatai elő- és utórengéseket is tartalmaznak. Ezek már nem független események, időbeli eloszlásukat az Omori (1894) törvény írja le. A földrengések térbeli eloszlása sok esetben vetőkhöz, lemezhatárokhoz köthető, tehát nem véletlenszerű. A Gutenberg-Richter (1944) törvény a földrengések mérete és száma között ad exponenciális összefüggést. Kis rengésből sokkal több fordul elő, mint nagyobbakból (1. ábra). Ezek alapján azt mondhatjuk, hogy a földrengések idő- és térbeli eloszlása, valamint méret-gyakoriság összefüggése a földrengések többszörös fraktál tulajdonságát mutatják.

E cikkben a vizsgált területek földrengéseinek időbeli és térbeli eloszlásának fraktál-dimenzióját határoztuk meg, többféle magnitúdó érték felett, dobozszámláló (3.2 fejezet), és korrelációs integrál módszerrel (3.3 fejezet). A földrengés katalógus adatai közül a statisztikai vizsgálat számára érdekes adatok a következők:

- a teljes *T* katalógus idő
- a rengések *N* száma
- két egymás utáni rengés között eltelt *dt* idő
- két rengés közötti *r* távolság
- valamint a rengés *M* mérete

A visszatérési *t* idő ekkor $t = T/N$. A visszatérési időket a variációs együttható meghatározásával elemeztem. A magasabb variációs együttható, magasabb klaszter aktivitást jelent.

[*]*MTA GGKI, 1112 Budapest, Meredek u. 18.*
E-mail: marta@seismology.hu



1. ábra. A rengések magnitúdó szerinti halmozott gyakorisága (1900-2006). Az $M_L > 3.2$ méretű rengésekre teljesnek tekinthető mind a három adatrendszer. A Kárpát-medencére $b = 0.86$ érték adódott.

2 A Magyar földrengés katalógus statisztikai jellemzői

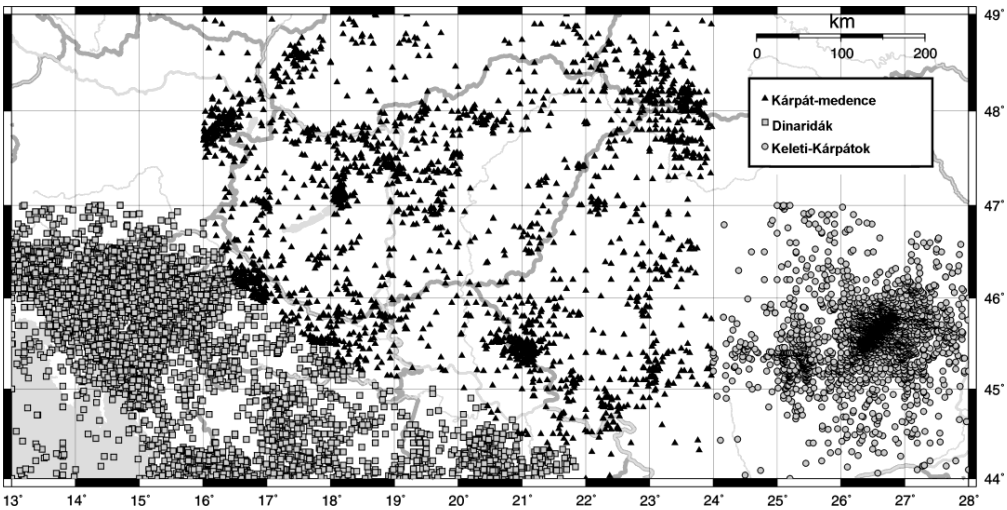
Statisztikai vizsgálatot csak teljes adatrendszerre érdemes elvégezni. A Magyar földrengés katalógus (Zsíros 2000) műszeres regisztrálás előtti évszázadokban szereplő eseményeiről általánosságban elmondható, hogy sok kisebb rengés nem szerepel a katalógusban, mivel azokat az emberek vagy nem éreztek, vagy ezekről a leírások időközben elvesztek. Mindez elmondható még a XX. század rengéseire is. A katalógus teljességét a Gutenberg-Richter összefüggés alapján ellenőrizhetjük. Eszerint ha a földrengések halmozott számát különböző magnitúdó értékek fölött logaritmikus skálán a méret függvényében ábrázoljuk, akkor lineáris összefüggést kell kapnunk (1. ábra). A rengés méretének csökkenésével a Gutenberg-Richter-féle összefüggésnek megfelelően (ami exponenciális növekedést ír elő) az illesztett egyeneshez képest kevesebb eseményt kapunk az $M_L < 3.2$ méretű rengések esetén. A adataink mind a három területen teljesnek tekinthető 1900 és 2006 között az $M_L > 3.2$ méretű rengésekre.

A földrengések epicentrumainak térbeli eloszlását a 2. ábra mutatja. A statisztikai vizsgálat során a földrengések mérete már nem játszik szerepet, ezért csak egy alsó magnitúdó határt célszerű megadni. Az ennél nagyobb rengéseket a számítás során már nem különböztetjük meg, a térképen is egyforma jelekkel ábrázoljuk azokat. A nagyobb földrengéseket előrengések előzhetik meg, és utórengések követhetik. Ezeket az összetartozó eseményeket sem célszerű külön ábrázolni.

3 A földrengések fraktálanalízise

A természetben megfigyelhető egyik érdekes jelenség az, hogy például egy faág hasonlít a fa egészére, a felhők, a sziklák, vagy a tenger partvonala/körvonala távolról és közelről nézve is azonos kontúrt mutatnak. Vagyis a kisebb lépték formája megjelenik egy nagyobb léptékben. Az ilyen tulajdonságokkal rendelkező objektumokat fraktáloknak nevezik. Megismerhető-e az a fizikai mechanizmus, amely révén a fraktálok kialakulnak? Ezek az önmagukra hasonló alakzatok nemcsak bizonyos rendszerek látható képében jelennek meg, hanem más, közvetlenül nem látható, de mérhető fizikai paraméterének idő- vagy térbeli változásában is megfigyelhetők. Erre példa a forgalmi dugók, a lavinák és földrengések eloszlásának tulajdonságaiban.

A kis entrópiájú, magas szervezettségű rendszerek olyan egységek, amelyeknek nagyon sok energiájuk van, és ahol az elemek közötti kölcsönhatások erős visszacsatolási hatásokat hoznak lét-



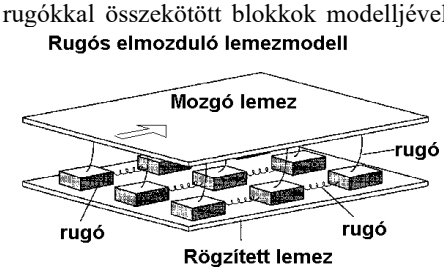
2. ábra. A rengések epicentrumainak eloszlása a három vizsgált területen (1900-2006)

re. Ezt a jelenséget *önszerveződésnek* nevezzük, az ilyen rendszer viselkedését csodálatosan gazdag, kifinomult mintázatok jellemezhetik. Az önszerveződő rendszer folyamatait tanulmányozva láthatjuk, hogy a gazdag mintázatokat körfolyamatok, körfolyamatok összekapcsolódása és összjátéka hozza létre. Az önszerveződő rendszer, bár működését igen sokféle folyamat és változásra való képesség jellemzi, bizonyos mennyiségek értékét igyekszik állandónak tartani.

Az önszerveződő rendszerek kialakulásának és fennmaradásának két általános feltétele van. Egyik, hogy létezzen a rendszer elemei között *kölcsönhatás*. A másik általános feltétel az, hogy a rendszer legyen *nyitott*, azaz álljon kölcsönhatásban a környezettel, mert csak így maradhat a rendszer entrópiája alacsony. Az önszerveződő rendszerek viselkedése nagyon érzékeny lehet egyes feltételek változásaira és ezért a jövőjük jósolhatatlan. A rendszereknek a feltételekre való nagyfokú érzékenysége az ún. *kaotikus viselkedés* jellemzője. Ugyanakkor, a külső behatásokra való rendkívüli érzékenységük azt is lehetővé teszi, hogy igen kicsiny külső hatásokkal ellenőrzés alatt lehet tartani viselkedésüket.

Az *önszervező kritikusság* egyszerűen szemléltethető a következő kísérlettel. Homokot szórunk az asztalra egyenletesen. Kis domb keletkezik, aminek a meredeksége eleinte növekszik, de egy bizonyos pont után lavinák gördülnek le róla, és ezek a meredekségét állandó értéken tartják. A kisebb lavinák gyakrabban fordulnak elő, a nagyobbak ritkábban, egyensúlyi helyzet alakul ki. A lavinák nagysága és a gyakorisága jól meghatározott egyszerű matematikai összefüggésben vannak egymással.

A Föld felszíne, mint önszerveződő kritikus rendszer természetesen összehasonlíthatatlanul bonyolultabb viselkedést mutat, mint a fenti példában a homokdomb. Bak et al. (1987) vetette fel először azt, hogy a földrengések tér- és időbeli eloszlása rugókkal összekötött blokkok modelljével szemléltethető. A földrengésmodell e mechanikai rendszerét a 3. ábra szemlélteti, amiben az önszerveződő kritikus jelenség is fellép. A modell figyelembe vesz egy regionális tektonikai hajtóerőt, és az elemek rugókkal kapcsolódnak. Ha egy cellában növekszik a deformáció, elérve egy kritikus értéket lavinaszerűen végigvonul a cellák többségén. A kioldódó feszültség eloszlik a blokkok között. Ez egy földrengési eseményt jelent. A földrengéseket tehát önszerveződő fraktál jelenségnek is tekinthetjük, és szeretnénk meghatározni a Kárpát-medence és környezetének erre vonatkozó jellemző paramétereit.



3. ábra. A rugós elmozduló lemezmodell. Az alsó lemez rögzített, a felsőre folyamatosan erő hat, elcsúszik. A két lemez blokkokkal érintkezik, melyek rugókkal kapcsolódnak egymáshoz.

Fraktál jelenségről akkor beszélünk, ha két az *r*-rel és *N*-nel jelölt változó között az (1) képlettel leírt összefüggés áll fenn:

$$N = \frac{c}{r^D} \ , \tag{1}$$

ahol *c* arányossági tényező, a *D* kitevő pedig a jelenséghez tartozó ún. *D* fraktál-dimenzió (Mandelbrot 1982). Magát a "fraktál" szót is Mandelbrot alkotta a latin fractus (törött) melléknévből, utalva arra, hogy a fraktál-dimenzió többnyire törtszám. Az egyenlet mindkét oldalának természetes logaritmusát véve a következő (2) kifejezést kapjuk:

$$\ln N = c - D \ln r \ . \tag{2}$$

Ez az egyenlet megfelel a Gutenberg-Richter (3) összefüggésnek. A Kárpát-medence rengéseire a (4) összefüggés adódik (Tóth et al. 2008) $2.0 \leq M \leq 6.3$ értékekre, ahol *N* az $M' \geq M$ magnitúdójú rengések éves száma:

$$\log N(M') = a - bM \ , \tag{3}$$

a és *b* konstansok, és az utóbbi értéke 0.7 és 1.3 között változik, a terület tektonikai aktivitásától függően. Tehát a *b* konstans a terület heterogenitásával és feszültségviszonyaival összefüggő szám. Ez fejezi ki a nagyobb és kisebb rengések számának arányát. Kisebb *b* érték a nagyobb méretű rengések nagyobb gyakoriságát mutatja.

$$\log N = 3.3 - 0.9M \ . \tag{4}$$

Létezik egy hierarchikus struktúra a nagyobb és kisebb rengések aránya között. Eszerint a földrengések eloszlása nem kaotikus, nem is determinisztikus (Gauss-eloszlású), hanem a fraktálok törvényei szerint statisztikus tulajdonságokkal leírhatók. Az utórengések időbeli lecsengését leíró Omori–formula (Omori 1894) is fraktál viselkedésre utal. A (3) képletben szereplő *b* konstans pontos meghatározása fontos a szeizmikus kockázat meghatározásakor. Területről területre változik az értéke, ill. nagyobb rengést megelőzően is megváltozhat. Az 1. ábra alapján a *b* konstans az egyenes meredeksége. Több cikk foglalkozik a *D* fraktál-dimenzió és *b* konstans kapcsolatával (Aki 1967, Kanamori és Anderson 1975, Legrand 2002). A kis méretű rengésekre $D = 3b$, a közepesekre $D = 2b$, a nagyokra $D = b$ az elfogadott elméletileg is alátámasztott érték. A *D* meghatározása hatékony eszköz az önhasonló rendszerek geometriájának jellemezésére. A földrengések térbeli eloszlását megadó fraktál érték a litoszféra heterogenitásával lehet kapcsolatban, és ez a különböző geológiájú területeken más és más lesz. Összességében a terület stabilitását adja meg. Időbeli változása, pedig változóban levő körülményekre utal. A térbeli eloszlást meghatározó fraktál-dimenzió értéke azt mutatja meg, hogy a földrengések eloszlása milyen mértékben tölti ki a környező területet. Ha $D = 3$, akkor a földrengések a teljes kéreg térfogatát kitöltik, ha $D = 2$, akkor egy síkra korlátozódnak az epicentrumok, és ha $D = 1$ akkor egy vető vonalára. Más megközelítésben, ha $D \approx 1$, akkor minden esemény egy pontra koncentrálódik, és ha $D \approx 2$, akkor a földrengések véletlenszerűen, az egész közeget kitöltik.

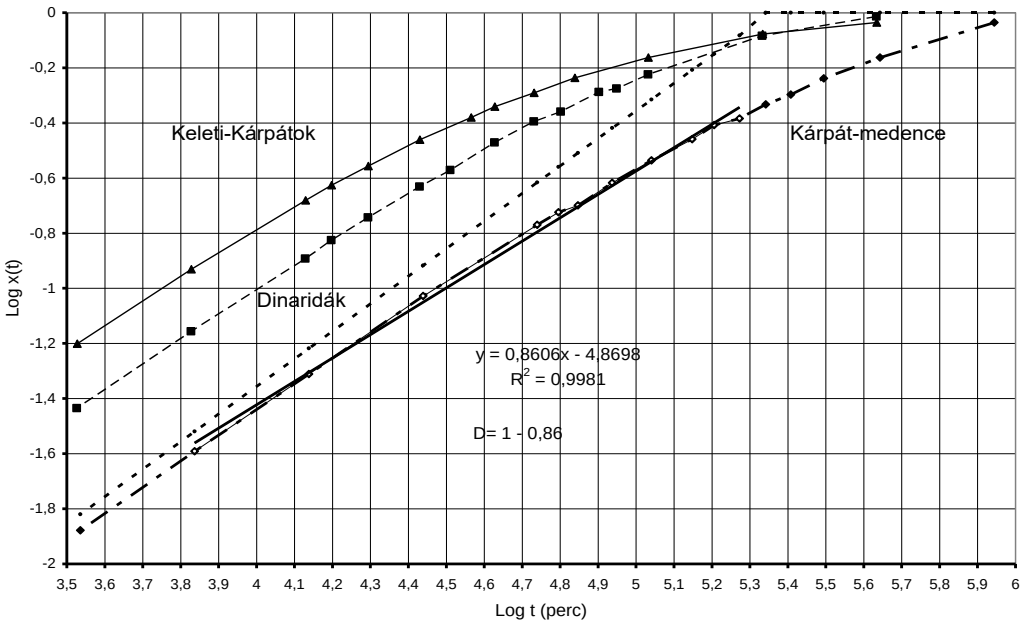
A továbbiakban meghatározzuk két rengés között eltelt idő statisztikai jellemzőit, a *variációs együtthatót*, valamint a földrengések *időbeli* és *térbeli fraktál-dimenzióját*.

3.1 A földrengések időbeli fraktál jellemzői

Az időbeli *D* fraktál-dimenzió meghatározása a következőképpen történhet. Felosztjuk a katalógus adatait különböző, egyre rövidebb hosszúságú *t* időintervallumokra, és meghatározzuk az $x(t)=N/n$ arányt, ami a legalább 1 földrengést tartalmazó időszakaszok *N* számának aránya az összes *n* időintervallumok számához képest. Ha a jelenség fraktál tulajdonságú, akkor az üres időszakaszok számára igaz az (5) összefüggés, vagyis a legalább 1 eseményt tartalmazó szakaszok aránya a (6) képlettel közelíthető (Young et al. 1998).

$$x(t) \approx t^D \tag{5}$$

$$x(t) \propto t^{1-D} \ . \tag{6}$$



Az *x(t)* értékeket *log(t)* függvényében ábrázolva a lineáris szakasz meredeksége a fraktál *D* dimenzióval kapcsolatos (4. ábra). A teljes katalógus idejét 128, 256, 512, stb. szakaszra osztva kb. 7000 óra, 3500 óra, 1750 óra… hosszú időintervallumokkal dolgoztunk. A legkisebb szakasz 60 óra hosszú volt. Ilyen rövid időegységek esetén sok „0" eseményt tartalmazó elem van már.

Ha t_0 a katalógus eseményeit felölelő időszak, N a rengések száma, akkor $T = t_0/N$ az *átlagos visszatérési idő*. Ez egy jellemző paraméter lesz a kiválasztott területre. A másik a *visszatérési idők* változékonyságának a mérőszáma a *variációs együttható (V)*. Ez definíció szerint a szórás és az aritmetikai közép hányadosa. Ha $V = 1$ akkor Poisson folyamatról van szó, vagyis a földrengés kipattanásának valószínűsége nem függ az időtől és a korábbi eseményektől. A földrengés bekövetkeztének valószínűsége növekszik, ha az utolsó rengéstől eltelt idő nagyobb, mint T, ekkor $V < 1$, vagyis kvázi-periódikus folyamatról van szó. Ha $V > 1$, akkor a rengések rajokban (klaszterekben) fordulnak inkább elő. Minél nagyobb V értéke, annál erősebb a klaszteresedés. Ez azt jelenti, hogy földrengés kipattanása esetén nő a veszélyezettség az érintett területen. Különböző magnitúdó tartományokra a statisztikai jellemzőket az 1. táblázatban láthatjuk. A legerősebb klaszteresedés a Keleti- és Déli-Kárpátok területére (Háromszéki havasok) adódik, és itt a legmagasabb az időbeli eloszlást jellemző D fraktál érték. A Kárpát-medencében $M_L > 3.2$ esetén a legkisebb a klaszteresedési hajlam és a D érték is kisebb.

1. táblázat. A területek statisztikai jellemzői

Terület	Magnitúdó	Földrengések száma	Fraktál-dimnenzió. D	Variációs együttható. V	Visszatérési idő (nap)
Kárpát-medence	$M_L > 3.2$	579	0.16	1.47	67
	$M_L > 3.6$	247	0.12	1.62	158
Dinaridák	$M_L > 3.2$	1759	0.2	1.69	21
	$M_L > 3.6$	754	0.15	1.57	50
Háromszéki-havasok	$M_L > 3.2$	1923	0.3	2.73	20
	$M_L > 3.6$	1191	0.18	2.14	32

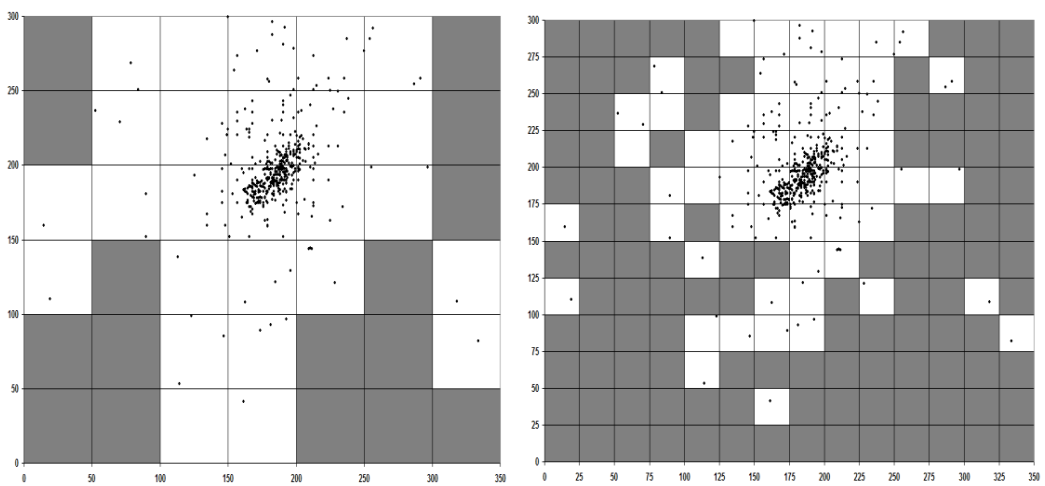
3.2 A földrengések térbeli fraktál jellemzői

Számtalan cikk foglalkozik azzal a megfigyeléssel, hogy számos geológiai jelenség, mint például a kőzetrepedések, a vetők hálózata vagy a földrengések térbeli eloszlása exponenciális összefüggéssel írhatók le, ami egy fraktál-dimenziót is meghatároz egyben. Például Matsumoto et al. (1992) Kínában és Indiában kipattant rengésekre, Lei és Kusunose (1999) Japán földrengéseinek és vetőinek, valamint folyóvíz hálózatának eloszlásában találtak fraktál tulajdonságot. Sok esetben a skála független tulajdonsága egy természeti jelenségnek több fraktál-dimenziót is meghatározhat. Lei et al. (1993) Kína területét vizsgálva más fraktál-dimenziót kapott a kőzetekben levő mikro-repedések, és mást a földrengésrajok epicentrumának eloszlására. A fraktál-dimenzió a kőzetek töredezettségét is méri, és kapcsolatba hozható a tektonikailag aktív terület vastagságával.

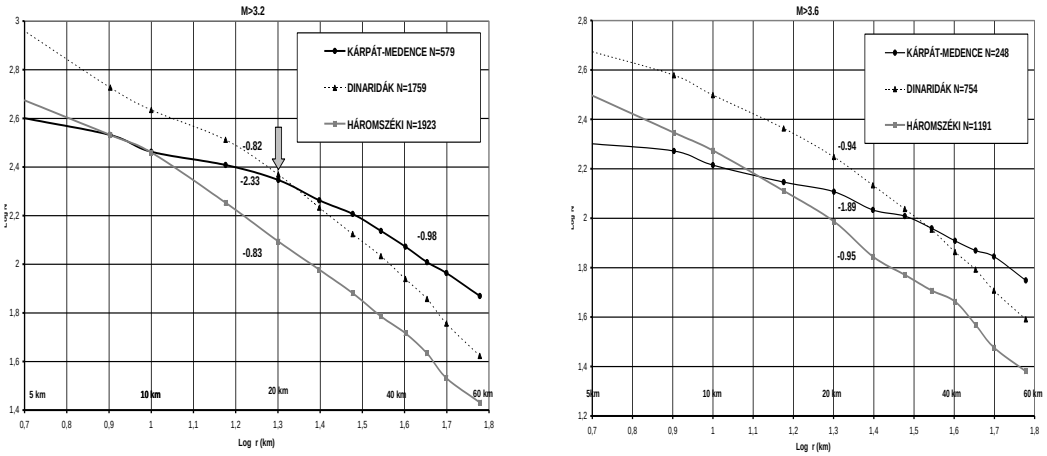
Doboz-számláló módszer segítségével megszámolhatjuk a vetőket, folyókat és a földrengéseket tartalmazó dobozok számát. Majd egyre kisebb méretű dobozokra felosztva a területet, ismét megszámoljuk, hogy hány doboz szükséges a geológiai jelenségek lefedéséhez. A doboz mérete r, és a lefedéshez szükséges elemek száma $N(r)$. Az 5. ábra mutatja ezt a módszert a Keleti- és Déli-Kárpátok esetére. Először 50 km-es aztán 25 km-es a hálózat felosztása, a fehéren hagyott elemek tartalmaznak földrengést, ezek száma: $N(r)$. A katalógus adataiból az 1900-2006 közötti események kerültek feldolgozásra. A doboz-számláló módszer segítségével kapott értékeket a 2. táblázatban láthatjuk. Ahogy a vizsgált események alsó magnitúdó értékét emeljük ($3.2 < 3.6 < 4.0$) kicsit növekedett a D értéke is. A Kárpát-medencére kapjuk a legnagyobb értékeket, míg a Dinaridák és a Háromszéki-havasok értékei nagyon hasonlóak egymáshoz. $M > 3.2$ földrengések esetén a Kárpát-medence esetében a fraktál-dimenziót meghatározó egyenes törést mutatott kb. 20 km-nél az $M > 3.2$ méretű rengésekre. A földkéreg a Pannon medencét körülölelő hegyvonulatok alatt meglehetősen vastag. A medence alatt azonban vékony, csupán mintegy 22.5-30 km vastag kérget találhatunk (Grad et al. 2006). A kéreg-köpeny határának (a Moho felületnek) a mélysége a Dinaridák területén 40 km körüli, és a Háromszéki-havasok alatt 40-50 km körül húzódik. Ez a határ a 6. ábrán, mint törés az egyenes menetében már nem látszik egyértelműen.

2. táblázat. A területek rengéseinek térbeli eloszlását jellemző D fraktál-dimenzió

Terület	$M > 3.2$	$M > 3.6$	$M > 4$
Kárpát-medence	2.33 0.98	1.89	2.2
Dinaridák	0.82	0.94	1.0
Háromszéki-havasok	0.83	0.95	1.1



5. ábra. A bal oldali ábrán 50 km-es, a jobb oldali ábrán 25 km-es a hálózat r felosztása, a fehéren hagyott elemek tartalmaznak földrengést, ezek száma: $N(r)$



6. ábra. *M* > 3.2 és *M* > 3.6 méretű földrengések *D* meghatározása doboz-számláló módszerrel. Ha a földrengést tartalmazó dobozok számát a rácshálózat *r* felosztásának logaritmusa függvényében ábrázoljuk, akkor egyenest kapunk. Ennek meredeksége a *D* farktál-dimenzió, amik a görbékre írt érték.

3.3 Fraktál-dimenzió meghatározása korrelációs integrállal

Multifraktálokról akkor beszélünk, ha egy bizonyos méret alatti és fölötti fraktál-dimenzió eltér egymástól. Az általánosított fraktál-dimenziót (vagy multifraktál-dimenziót) használhatjuk erre az esetekre. A fraktál-dimenzió meghatározására többféle módszer létezik. A leggyakrabban Grassberger és Procaccia (1983) képletét használják, aminek egy egyszerűsített változatát Hirata és Imoto (1991) vezette be. Az általánosított korrelációs integrál-függvény definíciója a következő:

$$c_q = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=j}^{N} N_i(R \le r) \right)^{q-1} \right]^{\frac{1}{q-1}} \tag{7}$$

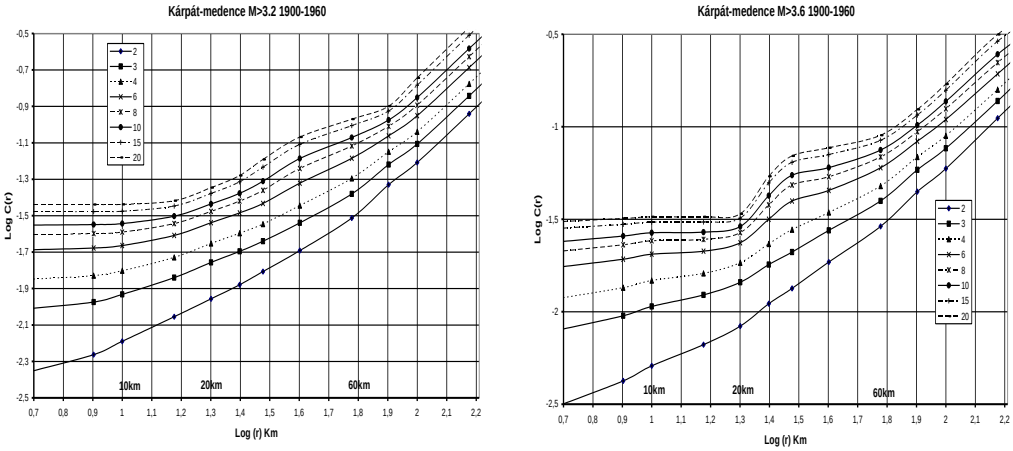
$$c_q(r) \propto r^{Dq} \quad , \tag{8}$$

ahol $N_i(R \le r)$ azon esemény párok száma, melyek R távolsága kisebb vagy egyenlő r-rel. N az összes esemény száma. Ha a pontok (a földrengések) térbeli eloszlása fraktál tulajdonságot mutat, akkor $c_q(r)$–t az r függvényében ábrázolva exponenciális összefüggést kell kapnunk (8). A hatványkitevő lesz a fraktál-dimenzió: D_q ahol q=0, 1, 2, 3 …∞. Nevezetes fraktál-dimenzió a D_0 , ami megfelel a dobozszámláló módszerrel kapott értéknek, D_1 az információs, D_2 a korrelációs D_∞ pedig az euklideszi dimenziónak felel meg. Homogén fraktálok esetén $D_0 = D_1 = D_2 = \ldots D_\infty$. Heterogén fraktálok esetén $D_0 \ge D_1 \ge D_2 \ge \ldots D_\infty$ A $D_2 - D_\infty$ érték nagyon fontos, - ez fejezi ki a heterogenitás mértékét.

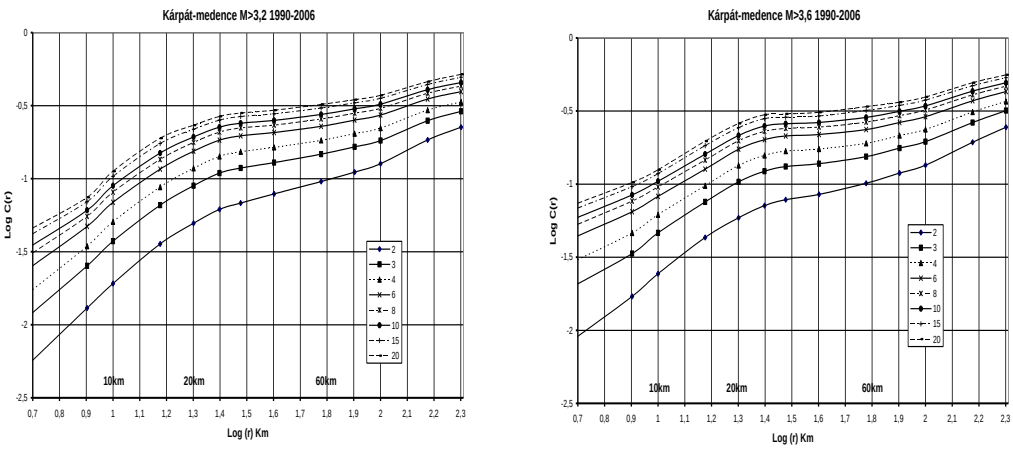
Abban a speciális esetben, ha q = 1 egy másik közelítést használnak a számításokban. Az r értékét úgy kell meghatározni, hogy maximum 1/3-a - 1/4 -e legyen a terület kiterjedésének, elkerülendő a terület szélének hatását. A Kárpát-medence esetén 200 km, míg a másik két területre 100 km lehet r-nek a felső határa.

A fraktál-dimenzió számításának menetét a 7-8 ábrák mutatják. Egy program segítségével a q érékét 2-től 20-ig változatva különböző r távolság értékekhez tartozó N esemény-pár lett meghatározni a (7) képlet alapján (N azon esemény párok száma, melyek távolsága kisebb, mint r). A 7-8 ábrán az r logaritmusának függvényében ábrázolva láthatjuk $c(r)$ logaritmusát. Látható hogy q érékét növelve egyre kisebb mértékű a változás, ezért csak q = 20-ig volt célszerű felvenni a függvény értékeit. A mintegy 100 évet átölelő időtartamot három részre osztottuk:

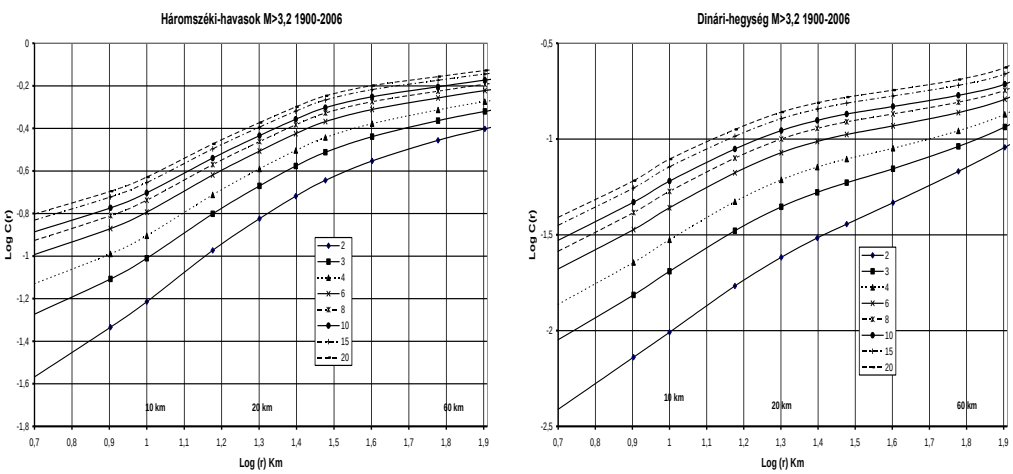
1900-1960; 1960-2006; 1990-2006.



7. ábra. M> 3.2 és M > 3.6 méretű földrengések 1900-1960-ig közötti D meghatározása a korrelációs integrál módszerével a Kárpát-medence területére. A Log *C(r)* értéket Log *r* függvényében ábrázolva, egyenest kapunk. Ennek a meredeksége a D fraktál-dimenzió.



8. ábra. M > 3.2 és M > 3.6 méretű földrengések 1990-2006-ig közötti D meghatározása a Kárpát-medence területére



9. ábra. M > 3.2 méretű földrengések 1900-2006-ig közötti D érték a Háromszéki-havasok és a Dinaridák területén

Így minden területre 4 különböző fraktál-dimenziót kapunk (a teljes és a három időintervallum). A 7-8 ábrán a Kárpát-medence $M > 3.2$-nél, és $M > 3.6$-nél nagyobb eseményeire, két időintervallumban végzett számításokat láthatjuk. Ahogy q érékét 2-től 20-ig változtatjuk, egyre erősebb törés látszik a függvényben, ami multifraktál tulajdonságot mutat. (Ha törés mutatkozik a függvény menetében, akkor multifraktálokról van szó.) A Kárpát-medence esetén 20 km körül a meredekség változása mutatkozik a függvények menetében. Szembetűnő az eltérés a két időszakasz meredekségében, azaz 1900-1960 és 1990-2006 közötti adatok között. A másik két terület farktál-dimenziójának jellemzői 1900-2006 közötti időszakra a 9. ábrán láthatók. Nem mutatkozik törés a görbék meredekségében.

4 Összefoglalás

A Kárpát-medence a Háromszéki-havasok és a Dinaridák területén az 1900-2006 közötti évek földrengéseinek statisztikai tulajdonságait elemeztük. Meghatároztuk a jellemző visszatérési időket, és a klaszteresedési hajlam mértékét.

A földrengések időbeli és térbeli eloszlása is fraktál tulajdonságot mutat. Többféle módszerrel meghatároztuk a Kárpát-medence, a Háromszéki-havasok és a Dinaridák területén kipattant földrengések fraktál tulajdonságait. A rengések időbeli eloszlásának elemzésekor a legerősebb klaszteresedés a Keleti- és Déli-Kárpátok területére adódott. A Kárpát-medence esetén a legkisebb a klaszteresedési hajlam és a D érték. A rengések térbeli eloszlására a Kárpát-medence esetén 20 km-es hálózatrácsméret körül változás állapítható meg. E fölött és alatt más-más D farktál-dimenzióval jellemezhető a terület. Ez az érték kapcsolatban lehet a Kárpát-medence alatti köpeny-kéreg határ mélységével. A fraktál-dimenzió alkalmazása földrengések eloszlásának jellemzésére viszonylag új szakterület. Még csak most körvonalazódnak felhasználásának lehetőségei. A földrengések eloszlását jellemző fraktál-dimenzió meghatározása 15-20 éves múltra tekint még csak vissza. Néhány szerző különböző területre vonatkozó eredményeit a 4. táblázatban láthatjuk összegezve. A Kárpát-medence esetén nagyon érdekes a multifraktálokra jellemző tulajdonság, és a fraktál-dimenzió értékének változása a különböző időszakokban.

3. táblázat. A D_2 és a D_{20} értékek a különböző területekre

	$M > 3.2$		$M > 3.6$		$M > 4$	
Terület	D_2	D_{20}	D_2	D_{20}	D_2	D_{20}
Kárpát-medence 1900-2006	1.27	0.95	1.3	0.86	1.53	1.18
Kárpát-medence 1961-2006	1.48	1.15	1.42	0.92	1.42	0.92
Kárpát-medence 1990-2006	0.8	1.0	1.06	0.65	-	-
Dinaridák 1900-2004	1.33	0.93	1.38	0.98	1.46	1.07
Dinaridák 1900-1960	0.97	0.45	1.16	0.78	1.16	0.79
Dinaridák 1961-2004	1.41	0.91	1.4	0.92	1.43	0.88
Háromszéki-havasok 1900-2004	1.24	0.66	1.2	0.72	1.13	0.66
Háromszéki-havasok 1900-1960	0.5	0.26	0.6	0.31	0.63	0.33
Háromszéki-havasok 1961-2004	1.63	1.34	1.45	1.19	1.41	1.09

4. táblázat. Néhány D_0 és D_2 érték a szakirodalomból

Szerzők	Terület	Fraktál-dimenzió
Lei et al. (1999)	Japán	$r < 13$km $D_0 = 1.1$ $r > 13$km $D_0 = 1.6$
Bhattacharya et al. (2002)	ÉK India	$D_2 = 1.41 - 1.66$
Thingbaijim et al. (2008)	ÉK India	$D_2 = 0.7 - 1.66$
Roy és Avadh (2006)	India	$D_2 = 1.3 - 1.6$
Reinhard és Mittag (2003)	Bohémia-Vogtland	$D_0 = 0.8 - 1$ $D_1 = 0.6 - 0.1$ $D_2 = 0.7 - 0.9$
Hirata és Imoto (1991)	Kantó, Japán	$D_2 = 1.7$
Domrádi et al. (2006)	Kárpát-Pannon vízhálózata	$D_0 = 1.7$-1.8

Hivatkozások

Aki K (1967): Scaling law of seismic spectrum. J. Geophys. Res. 72. 1217-1231.

Bak P, Tang C, Wiesenfeld K (1987): Self-organized criticality: an explanation of 1/f noise. Phys. Rev. Lett. 59. 381-384.

Bhattacharya P, Majumdar RK, Kayal JR (2002): Fractal dimension and b-value mapping in northeast India Current Science, 82; 12, 1486-1492.

Domrádi E, Tímár G, Bada G, Cloething S, Horváth F (2007): Fractal dimension estimations of drainage network in the Carpathian–Pannonian system. Global and Planetary Change 58 (1-4).

Grad MA, Guterch GR, Keller T, Janik E, Hegedűs J, Vozár A, Slaczka T, Tiira, Yliniemi J (2006): Lithospheric structure beneath trans-Carpathian transect from Precambrian platform to Pannonian basin: Celebration 2000 seismic profile CEL05, J. Geophys. Res. 111.

Grassberger P, Procaccia L (1983): Measuring the strangeness of strange attractors. Physica 9D, 189–208.

Gutenberg B, Richter CF (1944): Frequency of earthquakes in California. Bull. Seismol. Soc. Am. 34, 185-188.

Hirata T, Imoto M (1991): Multifractal analysis of spatial distribution of microearthquakes int he Kanto region Geophys. J. Int. 107, 1554-162.

Legrand D (2002): Fractal Dimension of small. intermediate. and large earthquakes. Bull. Seismol. Soc.Am. 92 (8), 3318-1120.

Lei X, Nishizawa O, Kusunose K (1993): Band-limited heterogeneous fractal structure of earthquakes and acoustic-emission events Bull. Seismol. Soc. Am. 115. 79-84.

Lei X, Kusunose K (1999) Fractal structure and characteristic scale in the distributions of earthquake epicenters, active faults and rivers in Japan. Geophys. J. Int. 139, 754-762.

Matsumoto N, Yomogida K, Honda S (1992): Fractal analysis of fault systems in Japan and in the Philippines. Geophys. Res. Let., 19, 356-360.

Mandelbrot BB (1982): The fractal geometry of nature. Freeman. San Francisco.

Kanamori H, Anderson L (1975): Theoretical basis of some empirical relations in seismology. Bull. Seismol. Soc. Am. 65, 1073-1095.

Omori T (1894): On the aftershocks of eartqakes Journal of the College of Sci. of the Imp. Univ. of Tokyo. 111-200.

Reinhard J, Mittag E (2003): Fractal analysis of earthquake swarms of Vogtland/NW-Bohemia intraplate seismicity. Journal of Geodynamics, 35 (1-2).

Roy PNS, Avadh R (2006): A correlation integral approach to the study of 26 January 2001 Bhuj earthquake, Gujarat, India. Journal of Geodynamics, 41(4), 385-399.

Thingbaijim KKS, Nath SK, Yadav A, Raj A, Walling M, Mohanty WK (2008): Recent seismicity in Northeast India and its adjoining region. Journal of Seismology, 12, 1.

Tóth L, Mónus P, Bus Z, Győri E (2008) Earthquake Monitoring and Seismoc Hazard Mitigation in Balkan Countries. Husebya ES (ed) NATO ARW Series, Springer-Verlag, Heidelberg, 97-108.

Young C, Ling C, Zhaojun L, Ro-Shan W (1998): Bull. Seismol. Soc. Am. 88, 89-94.

Zsíros T (2000): Hungarian earthquake catalogue (456-1995), Seism. Obs. Geod. Geoph. Res. Inst. Of HAS, Budapest 495.

PAKSI ATOMERŐMŰ II. BLOKK LOKALIZÁCIÓS TORONY DEFORMÁCIÓ MÉRÉSE

Siki Zoltán, Homolya András**

Deformation measurement of the localization tower of block II. in the Hungarian Nuclear Power Plant - *In this paper the surveying activities related to the localization tower of block II. in the Hungarian Nuclear Power Plant are introduced. Technology and software were developed to fulfill the necessary high precision demand and the quick on-field deformation calculation.*

Keywords: deformation analysis, automatic measurement, network adjustment

Cikkünkben a Paksi Atomerőmű II. blokk lokalizációs tornyán végrehajtott állékonyság vizsgálattal kapcsolatos geodéziai tevékenységről számolunk be. A szélső pontosságú igények kielégítése érdekében technológia és szoftverfejlesztést hajtottunk végre, hogy a helyszínen a mérések után rögtön adatokat tudjunk szolgálni a deformáció mértékéről.

Kulcsszavak: deformáció analízis, automatizált mérés, hálózat kiegyenlítés

1 Bevezetés

A BME Általános és Felsőgeodézia tanszéke már az 1960-as években bekapcsolódott a Paksi Atomerőmű építési munkáiba. A kapcsolat – kisebb megszakításokkal – azóta is tart. (Kiss A et al. 2002) Ennek a munkasorozatnak egy újabb állomása az erőmű élettartam hosszabbítása kapcsán az egyes blokkokhoz kapcsolódó lokalizációs tornyok állékonyság vizsgálata. A II. blokk lokalizációs torony állékonyságvizsgálatához kapcsolódó geodéziai munkákat a tanszék végezte 2008 augusztusában. Augusztus 6. és 11. közötti nyomáspróba idején a mintegy 45 méter magas és 50 méter széles lokalizációs torony, a mechanikai modellezésből előre becsült 3-5 milliméteres alakváltozásait kellett meghatározni folyamatosan, éjszakai körülmények között is. Ehhez megfelelő pontosságú alapponthálózat kialakítása és megfelelően gyors és megbízható technológia kidolgozása is a feladathoz tartozott, a vizsgálati mérések végrehajtása mellett. A vizsgálat kiterjedt a lokalizációs torony nyugati és északi homlokzatára valamint a záró födémére. Jelen cikk csak a nyugati és északi homlokzat deformációvizsgálatához kapcsolódó tevékenységgel foglalkozik.

2 Hálózatmérés és kiegyenlítés

A lokalizációs torony deformációvizsgálatának előkészítése során, 2007 évben kialakított és kiépített és már előzetesen, meghatározott alapponthálózatot használtuk a 2008 évi vizsgálati mérésekhez (Kiss és Dede 2007). Az alapponthálózat origója az A3 pont. Az Y tengely irányát az A3-A4 pontok határozzák meg. Az A1, A2, A3, A4 talajszinti mély alapozású pillérek és az A11, A12 segédépület attika falára épített pillérek alkották az alapponthálózatot. Valamennyi pillér fejezetét úgy alakítottuk ki, hogy rájuk felcsavarozható pillértalpakkal a pontraállást tizedmilliméter pontossággal el tudjuk végezni. Kern rendszerű pillértalpakat használtunk, hogy a felhasznált Mekometer 5000 távmérő műszer és egy adapter segítségével a Leica műszerek is központosan elhelyezhetők legyenek (1. ábra).

A mérések során Mekometer 5000 nagypontosságú távmérőműszert és Leica TCA 1800 robot mérőállomásokat használtunk (GeoCOM Reference Manual TPS1100 - Version 1.07; Leica TPS - System 1000, System Version 2.3, Heerbrugg, Switzerland; http://www.microsurvey.com/ helpdesk/index.php?_m=downloads&_a= viewdownload&downloaditemid=166&nav=0,1,4,24).
A mérések megkezdése előtt a Leica TCA 1800 műszereket kalibráltuk, amely kiterjedt a kéttengelyű kompenzátor, a kollimáció hiba, az indexhiba valamint a fekvőtengely ferdeségre. A vizsgálatot a mérések helyszínén végeztük el, a műszert az A3 pilléren helyeztük el és az A4 pillérek és a 418-s

*BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.
E-mail: siki@agt.bme.hu
E-mail: homolya@agt.bme.hu

vizsgálati pontot használtuk fel, a vizsgálati mérések során várható körülmények között. A vizsgálat eredményeként kapott hibákat a műszerekben beállítottuk és ezek kiküszöbölését a műszer számítással valósítja meg.

A hálózat mérések során a már említett Kern pillértalpakkal biztosítottuk a műszer és a jelek központos elhelyezését. A Leica TCA 1800 műszerrel a hálózatban valamennyi távolságot és irányt megmértünk, kivéve az A1-A3 pontok között, amely nem látható össze (2. ábra).

Az irányzásokat a TCA 1800 műszer ATR (Automatic Target Recognition) funkciójával végeztük el, egy fordulóban. A távolságokat a Mekometer 5000 távmérő műszerrel is megmértük, kivéve az A2-A11 és A2-A12 távolságokat, melyek túl meredekek a Mekométerrel történő irányzáshoz. A Mekometerrel a távolságok meghatározását háromszoros ismétléssel végeztük. Emellett a légnyomás, a száraz és nedves hőmérséklet értékeket mértük és rögzítettük, hogy a távmérések meteorológiai korrekcióját az Owens-féle képlettel számítani tudjuk a Mekometer esetében. A mérőállomásoknál a műszerek programját használtuk a meteorológia korrekció számítására, mely a nedves hőmérsékletet is figyelembe vette. A hálózatmérés során Mekometer 3000 és Mekometer 5000 műszerek prizmáit használtuk. A prizmaállandók értékét előzőleg laboratóriumi körülmények között meghatároztuk.

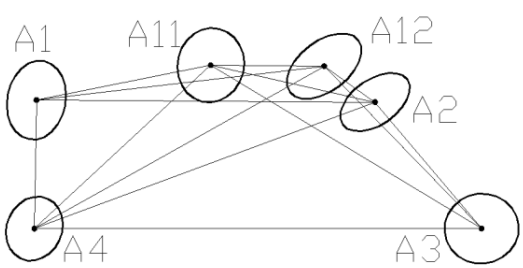


1. ábra. A használt kényszerközpontosító berendezés és prizma a hálózat mérések során, háttérben az attikán elhelyezett két pillér

A helyi koordinátarendszert úgy vettük fel, hogy a a vizsgálati pontokban a pozitív értelmű koordinátaváltozás a vizsgált homlokzat kihasasodását jelentse. A hálózatméréseket a terhelés vizsgálat előtt és attól függetlenül végeztük el. Ahhoz, hogy a vizsgálati pontokban a milliméteres mozgásokat ki tudjuk mutatni, az alappontok koordinátáinak néhány tizedmilliméternél nagyobb értéket nem szabad elérnie. A Leica TCA 1800 mérőállomás gyári adatok szerinti 1 + 1.5 ppm távmérési és 1” iránymérési középhibája nem tűnt elegendőnek, ezért a 0.4 milliméter távmérési középhibával rendelkező Mekometer 5000 műszert is felhasználtuk a hálózatmérések során.

A mérések előfeldolgozását - mint például a két távcsőállásban végzett mérések közepelése, mérések ellenőrzése és az esetleges hibák javítása, az előzetes koordináták számítása, a kiegyenlítő programok számára szükséges input állományok előállítása - a GeoEasy szoftverrel végeztük el (Siki Z: GeoEasy V2.05 Felhasználói kézikönyv. DigiKom Kft. Budapest, http://www.digikom.hu/szoftver/ help/geoeasy.pdf).

A GeoEasy programcsomag geodéziai mérések, elsősorban mérőállomásokkal rögzített adatállományok feldolgozására szolgál. Magyarországon elterjedt mérőállomás formátumokat, többek között a Leica GSI formátumot közvetlenül olvassa. Több kiegészítő moduljával (Regresszió számítás modul, Hálózat kiegyenlítés modul, DTM modul) számos ipari geodéziai feladat elvégzésére alkalmas. A projekt során alkalmazott többi szoftverhez interfészt biztosít, így a feldolgozás központjában állt.



2. ábra. A hálózat és a kiegyenlítés utáni hibaellipszisek (a legnagyobb féltengely 0.1 mm)

A hálózatmérések feldolgozását a II. kiegyenlítési csoport (közvetett mérések) összefüggéseinek a felhasználásával végeztük el (Detrekői 1987, 1991). A hálózatkiegyenlítéshez a tanszékünkön a Paksi Atomerőmű RT számára kifejlesztett GHMF rendszert

használtuk. A GHMF egy komplex számítógépes rendszer, mely a szélső pontosságú geodéziai hálózati mérések feldolgozását, dokumentálását és az eredmények adatbázisba tárolását biztosítja.

A rendszer három fő modulból áll:

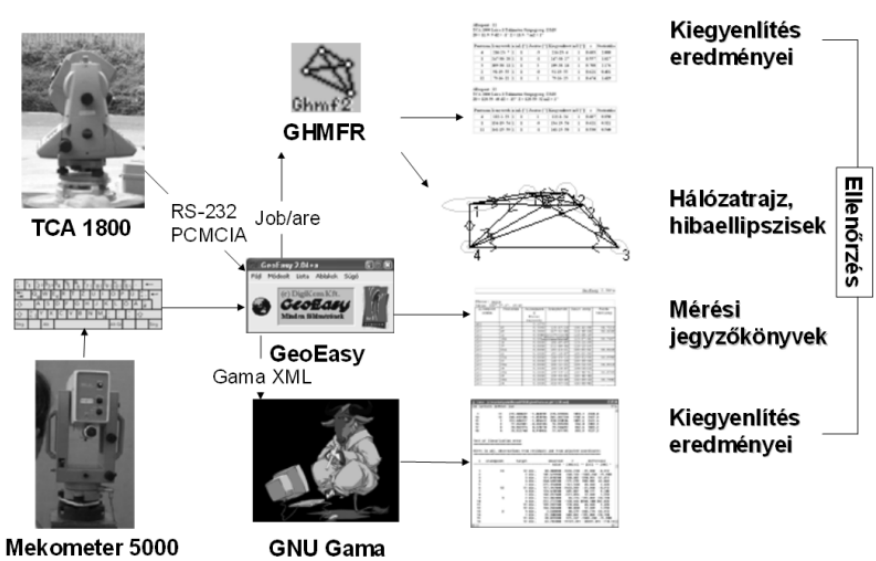
1. a műszer adatbázis, mely a műszerek a priori középhibáit, kalibrálási adatait biztosítja a feldolgozáshoz,
2. a feldolgozó modul az előzetes koordináták számítását, a mérések előfeldolgozását, a hálózat kiegyenlítést és durvahiba szűrést hajtja végre,
3. a pont adatbázis a meghatározott alappontok koordinátáinak tárolását biztosítja több időpontban és vetületi rendszerben, továbbá a koordináták időbeli változásainak elemzéséhez is tartalmaz eszközöket (polinom, regresszió, izovonalas ábrázolás).

A vízszintes és magassági hálózatot egymástól elkülönülten számítottuk ki. Ennek nem csak az volt az oka, hogy a GHMF rendszer nem támogatja a 3D-s hálózat kiegyenlítést, hanem az is, hogy a deformáció vizsgálat során a vízszintes helyzetváltozásokra kellett adatokat szolgáltatnunk. A magasságokat csak a távolságok vízszintesre redukálására használtuk. A műszer és jelmagasságokat csak milliméter élességgel mértük meg, mely alapvetően meghatározta a magassági hálózat megbízhatóságát.

Ellenőrzésképpen a GNU Gama (Cepek A: http://www.gnu.org/software/gama/manual/ gama.html) nyíltforrású hálózatkiegyenlítő szoftverrel is végrehajtottuk a kiegyenlítést. Mindkét esetben Baarda-féle durvahiba szűrést (t próba a normalizált javítás értékekre) alkalmaztunk a feldolgozás során. A vízszintes hálózat kiegyenlítés során 0.1 mm-es, a magassági hálózat kiegyenlítés során pedig 0.7 mm-es középhibákat kaptunk. A kiegyenlítés során számított a posteori középhibák a TCA műszer 1" iránymérési középhibáját visszaigazolták, annak ellenére, hogy a hálózati oldalhosszak 20 és 90 méter között változtak. Ez egyben az automatikus irányzás (ATR) megfelelő működését is igazolta. A távmérések középhibáit vizsgálva arra következtethetünk, hogy a TCA 1800 műszer távmérési középhibája, a száz méter alatti távolságokra, kisebb, mint a gyári adatokban megadott értékek (0.7 - 0.8 mm, 2. ábra). A korábbi hálózatkiegyenlítés (2007. május) eredményeivel összehasonlítva a 2008 évi eredményeinket azt tapasztaltuk, hogy az A4 pont koordinátái szignifikánsan megváltoztak. Ennek oka a pillér megdőlése, erre utalnak a környezetében látható talajsuvadások is. A dőlés sebessége 1 cm/év, aminek a hatása a több napos deformációvizsgálat ideje alatt elhanyagolható. A hálózat fontosabb adatait az 1. táblázatban foglaltuk össze, a hálózat mérésének és a mérés feldolgozásának folyamata a 3. ábrán követhető.

1. táblázat A hálózat fontosabb adatai

pontok száma:	6
rögzített koordináták száma:	0
ismeretlenek száma:	18
ismeretlen koordináták száma:	12
koordináták száma a minimumfeltételben:	12
mérések száma:	71
rangdefektus:	3
fölösmérések száma:	56
iránymérési álláspontok száma:	6
iránymérések száma:	21
távmérések száma:	50
súlyegység középhiba m0 (a priori):	1.00
súlyegység középhiba m0 (a posteriori):	0.99
átlagos koordináta középhiba (mm):	0.1
kihagyott mérések száma:	13



3. ábra. A hálózat mérés és feldolgozás folyamata

3 Vizsgálati mérések és feldolgozásuk

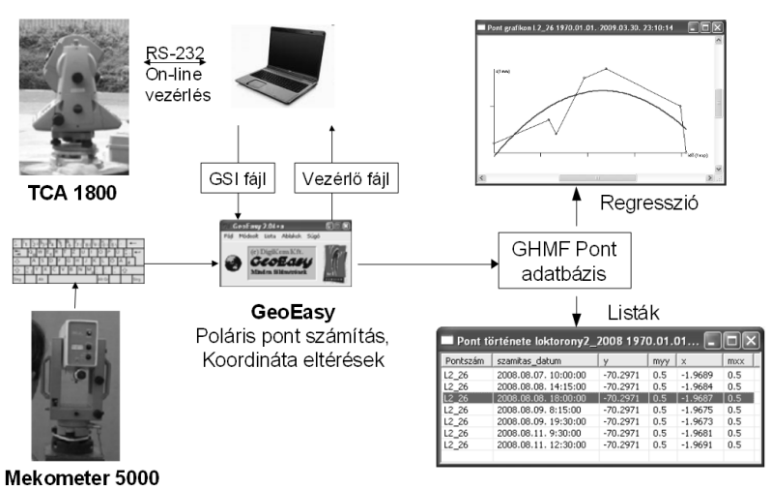
A lokalizációs torony állékonyság vizsgálata során több lépcsőben a normál légnyomás két és félszeresére növelték a belső nyomást. Az egyes nyomáslépcsők (100, 120, 135, 150, 170, 200, 250 kPa) stabilizálása után hajtottuk végre az egyes vizsgálati méréseket. Az egyes mérések végrehajtására, feldolgozására és az eredmények közlésére két óra állt rendelkezésünkre.

A nyugati homlokzaton 12, az északi homlokzaton 4 távmérő prizmát rögzítettünk a falon, azokban a pontokban, ahol a legnagyobb mozgás várható. A gyors adatszolgáltatás mellett a nagy megbízhatóság is elvárás volt a megbízók részéről. Ezért valamennyi vizsgálati pontra két független poláris meghatározást terveztünk, amit a legérzékenyebb pontokban Mekometer 5000 távmérésekkel kiegészítünk.

A gyors, a vizsgálati mérések megkezdése után 2 órával történő helyszíni adatszolgáltatás követelményeinek teljesítése érdekében robot mérési technológiát alakítottunk ki. Erre a Leica TCA 1800 mérőállomások alkalmasak, mivel szervo motorokkal rendelkeznek, a prizmára történő irányzást automatikusan képesek pontosítani (ATR), RS-232 (soros) kommunikációs csatornával rendelkeznek a számítógépes kapcsolathoz, továbbá képesek egy külső számítógépről érkező parancsokat végrehajtani. A műszerek vezérlését laptop számítógépekről oldottuk meg, a Leica GEOCOM program könyvtárak felhasználásával C++ programot készítettünk.

Egy általános technológiát dolgoztunk ki, mely a többi lokalizációs torony vagy egyéb objektum, akár több deciméteres deformációjának meghatározása esetén is változtatás nélkül alkalmazható. A robot mérés során a számítógép vezérli a műszert egy a számítógépen tárolt állomány alapján, mely a mérendő pontok vízszintes irányát (irányszögét) és zenitszögét tartalmazza. Amennyiben a műszert tájékozzuk, az automatikus irányzás képes pontosan megirányozni a prizmát, ha az a látómezőbe kerül. Ezért elegendő egy közelítő néhány percre pontos tájékozás is. A kidolgozott módszer alkalmazásának feltétele, hogy két mérés közötti időben a vizsgálati pont ne mozduljon el annyira, hogy a műszer látómezejéből kikerül. A mért adatok rögzítése a vezérlő számítógépen történik, nem a műszer adattároló egységén. A terepi mérések során laptop számítógépeket alkalmaztunk. A vizsgálati mérések feldolgozási folyamata a 4. ábrán látható.

A technológia teszteléséhez három vizsgálati pontból álló teszt környezetet alakítottunk ki a BME Általános és Felsőgeodézia tanszék Bodola Lajos komparátor termében. Itt a technológia és a kifejlesztett szoftver tesztelése mellett kiterjedt vizsgálatokat folytattunk a prizmák nem szemből



4. ábra. A vizsgálati mérések feldolgozási folyamata

történő megirányzásából adódó irány és távolsághibák kimutatására. A vizsgálati pontokon elhelyezett prizmák nem szemből történő megirányzása mind távolság, mind irány hibát is okoz, melyek hatása nem elhanyagolható (elérheti a néhány millimétert és a néhány tíz másodpercet). Mivel igyekeztünk olyan technológiát kialakítani, melyben a vizsgálati pontokra is egymástól független több meghatározás vonatkozik, nem lehetett a prizmákat pontosan a műszerek felé fordítani. A nem szemből történő irányzás szabályos hibát okoz a mérésben. Ezt számítással figyelembe vehetnénk, ha a vizsgálati pontokban felhelyezett prizmáknak a meghatározó irányokhoz képesti elfordulását meghatároznánk. Az elfordulás meghatározása komoly nehézségekbe ütközik. Ezért olyan feldolgozási technológiák dolgoztunk ki melyből ezen szabályos hibák hatása kiesik. A technológia lényege, hogy a vizsgálati pontokat poláris pontként határozzuk meg, majd az azonos pontokról, de különböző időpontban meghatározott koordináták különbségét képezzük, mely már nem tartalmazza a vizsgálati pontok külpontosságának hatását. A különböző alappontokról számított koordinátaváltozás értékek már összehasonlíthatók, átlagolhatók az egyes pontokon.

Az épület hőmozgásának kiszűrésére a lokalizációs torony túlnyomás alá helyezése előtt különböző napszakokban, meteorológiai körülmények között alapméréseket végeztünk. Ezek a mérések a véletlen jellegű hibák mellett csak a meteorológiai hatásokat tartalmazzák. A koordináta különbségek képzésnél az egyes már túlnyomás alatti méréseket az azonos meteorológiai körülmények között meghatározott nyugalmi helyzetben történt méréssel hasonlítjuk össze.

Az alapmérésekkel állítottuk elő azokat az adatállományokat, melyek a robot méréshez a pontok irányát megadják. A kialakított technológia várható megbízhatósága az alappontok koordináta középhibáinak, a műszerek középhibáinak és a hibaterjedés törvényének figyelembe vételével 0.2 - 0.5 mm.

A vizsgálati pontokban a legnagyobb alapváltozást a nyugati homlokzaton a 24 és 84 pontokban (2.8 mm), az északi homlokzaton a 915 pontban (2.3 mm) tapasztaltuk a legnagyobb túlnyomás esetén. Ezek az értékek a statikus tervezők által jósolt alakváltozásokkal jó összhangot mutatnak.

Az egyes vizsgálati pontok vízszintes helyzeti megbízhatóságát a hibaterjedés törvényével kiszámítottuk, értéke 0.2 és 0.4 mm között változik (Kiss és Dede 2008).

4 Összefoglalás

A Paksi Atomerőben alkalmazott eszközfelszereléssel és technológiával a deformáció mérés és számítás lépéseit nagymértékben automatizáltuk. Ez lehetővé tette, hogy éjszaka gyenge világítás mellett is a nappali mérésekkel azonos megbízhatóságú eredményeket kapjunk. Az elkészített illetve alkalmazott programok más területen is alkalmazhatók, ahol a két vizsgálati mérés között akár de-

ciméteres elmozdulások is lehetségesek, mint például nagy szerkezeti elemek mozgatása. A technológia a nagy pontosságra való törekedés mellett a gyors terepi adatszolgáltatás tekintetében is kiemelkedő.

Hivatkozások

Detrekői Á (1987): Geometriai mérések matematikai feldolgozása. Tankönyvkiadó, Budapest.

Detrekői Á (1991): Kiegyenlítő számítások. Tankönyvkiadó, Budapest.

Kiss A, Czakó J, Csemniczky L, Deák O, Detrekői Á, Homolya A, Kis Papp L, Sárközy F (2002): A Tanszék Paksi Atomerőmű építésénél és üzeménél végzett műszaki ellenőrző, mérnökgeodéziai és fotogrammetriai feladatai; Geodézia és Kartográfia, 54. 10., 32-38.

Kiss A, Dede K (2007) PA RT mérnökgeodéziai feladatait támogató korszerű mérési és digitális adatkapcsolati technológia a kidolgozása, BME Általános és Felsőgeodézia Tanszék Kutatási jelentés, Budapest.

Kiss A, Dede K (2008) A Paksi Atomerőmű II. blokk lokalizációs torony szerkezet 2008 évi ITV keretében végzett deformáció vizsgálata, BME Általános és Felsőgeodézia Tanszék Kutatási jelentés, Budapest.

A DUNASZEKCSŐI CSUSZAMLÁS MOZGÁSVISZONYAI

Újvári Gábor, Bányai László*, Mentes Gyula*, Gyimóthy Attila*, Holler Ildikó**

Movements of the Dunaszekcső landslide *- High banks of the River Danube are known to be one of the most landslide-risked areas in Hungary. In 2007, large ruptures appeared on the top of the bluff at Dunaszekcső indicating the development of a remarkable landslide which posed a risk on river navigation, local water supply and several landed properties. GPS, levelling surveys and permanent tilt measurements have been carried out since October 2007 on the problematic section of the bluff with the help of which the spatial and temporal evolution of the slide could be traced.*

Keywords: landslide, GPS, levelling, tilt, high bank, River Danube

A Duna-menti magaspartokat hazánk csuszamlások által egyik legveszélyeztetettebb területeként tartják számon. 2007-ben hatalmas repedések jelentek meg a dunaszekcsői magasparton, utalva egy későbbi jelentős csuszamlás kialakulására, amely veszélyeztetette a folyami hajózást, a község vízellátását és több ingatlant is. 2007 októberétől GPS mérések és szintezés, valamint folyamatos dőlésmérések történtek a magaspart problematikus szakaszán, melyek segítségével a mozgás-, tér- és időbeli fejlődését lehetett nyomon követni.

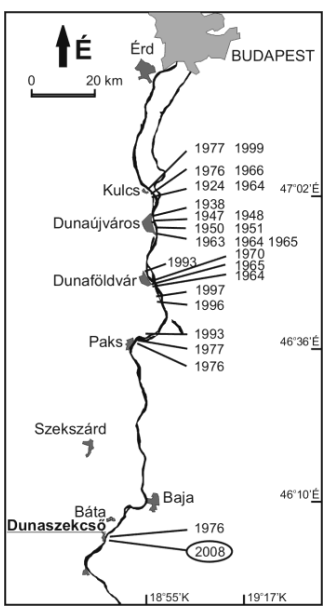
Kulcsszavak: földcsuszamlás, GPS, szintezés, dőlés, magaspart, Duna

1 Bevezetés

A WHO adatbázisa alapján a legnagyobb földcsuszamlások 1988 óta pusztán Európában 3,3 milliárd USD nagyságú kárt okoztak (http://www.emdat.be/Database/DisasterProfile/natural-table-emdat_disasters.php?dis_type=Slides&Submit=Display+Disaster+Profile#summarized%20table, utoljára megtekintve 2008.02.07). A jelenkori klímaváltozás valószínűsíthetően tovább növeli a csuszamlások számát és pusztító erejét a bolygón, jelentős károkat okozva a társadalomnak.

A téma aktualitását kiválóan jelzi, hogy a Springer kiadó „Landslides" címmel külön folyóiratot szentelt a földcsuszamlások kutatásának. Hazánk bizonyos területei az adott természeti jelenség által különösen érintettek. Ide tartoznak a Duna-, Rába- és Hernád-menti, a Balaton keleti illetve a Fertő-tó déli szegélyén lévő magaspartok, valamint bizonyos középhegységi (pl. Mátra) és dombsági területek (Zalai-dombság, Zselic, Tolnai-hegyhát, stb.) (Farkas 1983; Kleb és Schweitzer 2001; Szabó 2003)). A Duna jobb partja mentén található magaspartokat nem pusztán a Duna eróziója, hanem gyakran és évezredek óta előforduló partfalmozgások alakítják (Lóczy et al. 1989; Juhász 1999).

A XX. században több mint 25 nagy mozgás jelent meg a Duna-mentén és több mozgási periódus különíthető el (1. ábra, Kleb és Schweitzer 2001). Így korábban a jelen tanulmány vizsgálati területén a dunaszekcsői magasparton is előfordultak már mozgások a múlt század hetvenes éveiben. Néhány évtizedes nyugalmat követően azonban 2007-ben jelentős repedések alakultak ki a Vár- és Szent-János-hegyen, amelyek egy nagyobb, kb. 5000 m^2-re becsült területet érintő mozgás kialakulását vetítették előre. Az MTA GGKI az adott év nyarának végén mérőhálózatot alakított ki a területen több okból is. Egyrészt a kezdődő mozgások unikális lehetőséget teremtettek arra, hogy hazánkban először követhessünk végig egy partfalmozgás kifejlődését, annak főbb fázisait, hagyományos és modern geodéziai eszközökkel, eltérően a korábbi évti-



1. ábra. Jelentősebb Duna-menti földcsuszamlások a XX. században (Kleb és Schweitzer 2001)

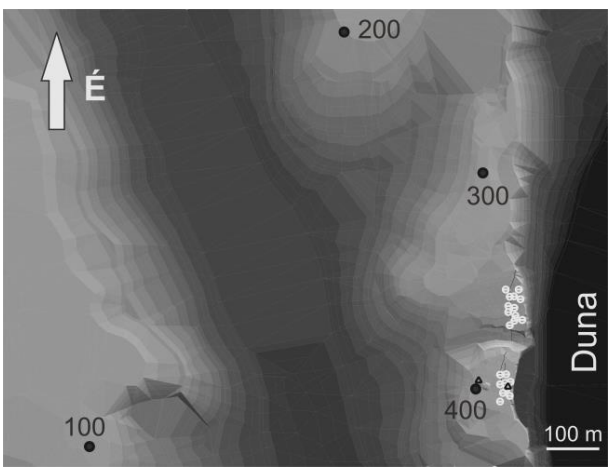
MTA GGKI, 9400 Sopron, Csakai u. 6-8.
Email: ujvari@ggki.hu

zedekben megszokott, főként utólagos empirikus és műszeres felmérésektől. Másrészt információt biztosíthattunk a helyi önkormányzat és a Katasztrófavédelem helyi szervezete számára a deformációk nagyságáról, irányáról, időbeli lefolyásáról a megelőzés és az esetleges mentési munkálatok megtervezéséhez.

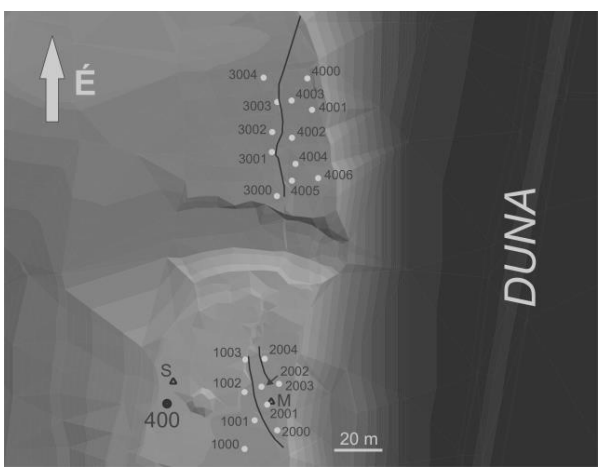
2 GPS mérések és szintezés

Méréseinkhez egy referencia hálózatot alakítottunk ki, mely négy vasbeton pillérből állt (2-4. ábra). Kettő pillér (100 és 200) a partfaltól nagyobb távolságra, 500-1000 m, míg további kettő (300 és 400) a mozgó partfalhoz közelebb, mintegy 50-250 m-es távolságra lett elhelyezve. A talajmagasságban elhelyezett szintezési gombok a pillérek dőlésvizsgálatát teszik lehetővé (4. ábra). További 21 kisebb, talajszintben lévő beton pontot helyeztünk el a fő repedésvonalon kívül eső stabil és az azon belül eső mozgó partfalon (3. ábra).

Az első GPS és szintezési kampányra 2007. október 3-án került sor egy Leica 1200 RTK GPS

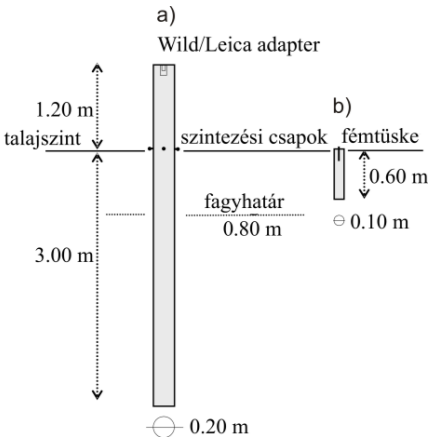


2. ábra. A GPS hálózat referenciaállomásai (100-400) és a mozgások által érintett magaspart. A fehér körök a 21 kisebb beton pontot, míg a két fekete háromszög a dőlésmérőket jelöli.



3. ábra. A mozgó partfal és a GPS hálózat kisebb pontjai. A fekete vonal a fő repedéshálózatot mutatja a mérések kezdetén (2008. október). 400: referencia állomás, S: a stabil partfalon lévő dőlésmérő, M: a déli mozgó blokkon lévő dőlésmérő; 1000-1003: beton pontok a déli terület (Vár-hegy) stabil részén, 2000-2004: pontok a déli mozgó blokkon, 3000-3004: pontok az északi terület (Szent János-hegy) stabil részén, 4000-4006: pontok az északi mozgó blokkon.

vevőpár, illetve egy Leica DNA03 nagy pontosságú szintezőműszer segítségével. Az első mérést hat további kampány követte 2007. október 18-án, 2007. november 8-án, 2007. december 13-án, 2008. január 23-án, 2008. február 26-án és 2008. március 31-én. Az első mérés során a 300-as pillér koordinátáit a magyarországi aktív GNSS hálózat segítségével határoztuk meg (Horváth 2005). A négy referenciaállomás közötti hat független bázisvonal mérése 30 percig történt, míg a 21 kisebb pilléren 5-15 perc időtartamú mérések zajlottak a két közelebbi (300 és 400) referenciaállomásról. A mért bázisvonalak a GPS-NET programmal kerültek feldolgozásra, ami a szisztematikus hibák és a fáziscentrum külpontosság becslését is lehetővé teszi (Bányai 1991, 2005). A szintezésre a GPS magasságok pontosítása miatt került sor.



4. ábra. A referenciaállomások vasbeton pillérei (a) és a kisebb beton pontok (b) pontosítása miatt került sor.

A referencia pillérek középhibája (belső pontossága) az alábbi számokkal jellemezhető: 0.3 mm (észak), 0.2 mm (kelet) és 0.5 mm (magasság). Ugyanezek az adatok a beton pontok esetén: 1.6 mm, 1.1 mm és 2,1 mm.

A 2., 3. és 6. ábrák alapját képező digitális terepmodell egy 1:10000-es méretarányú topográfiai térkép, valamint a magasparton GPS, Wild T-3000 digitális teodolit és DI 2002 rátét távmérő segítségével bemért 433 pont adatai alapján készült.

3 Dőlésmérés

A GPS mérőhálózat kialakításával párhuzamosan két dőlésmérő (Applied Geomechanics Inc., USA, Model 722A) installálására is sor került Mentes (2003) módszere alapján 3 m-es mélységű fúrólyukakban, amelyek kellő hőmérsékleti stabilitást biztosítottak a műszereknek. Egy dőlésmérő a stabil partszakaszon, a vízmű területén, míg a másik a déli mozgó blokkon (Vár-hegy) kapott helyet (2. ábra). A műszerek pozitív *x*-tengelyét északra tájoltuk, míg pozitív *y*-tengelyét keletre. A dőlés és talajhőmérsékleti adatok gyűjtésére óránkénti mintavételezéssel került sor 2007. november 11.-től kezdődően.

4 Az eredmények értékelése

Az első mért periódusban (2007. október 3. és 18. között) a horizontális elmozdulások 0.4-0.7, valamint 0.9-1.2 cm-t tettek ki az északi, illetve déli mozgó blokkon K-DK-i és K-ÉK-i irányokban. Ugyanekkor a vertikális mozgások -0.8 és -2.3 cm között változtak (1. táblázat). Ezt követően (2007. október 18. és november 8. között) a deformáció némileg felgyorsult, a vízszintes elmozdulások elérték a napi 1 mm körüli értéket (0.3–1.2 mm/nap), továbbra is hasonló, keleties irányokban. A süllyedések -1.8 – -5.1 cm-t tettek ki a mozgó blokkokon. A harmadik mért periódusban (2007. november 8. és december 13. között) a horizontális elmozdulási arányok az első periódusban mért értékek szintjére estek vissza, azaz a mozgások lassultak, viszont K-DK-i és K-ÉK-i irányultságuk nem változott. 2007–2008 fordulójára a mozgások felgyorsultak, amely mind a horizontális elmozdulási sebességekben (0.8–4.2 mm/nap), mind a vertikális sebességekben (-1.4 – -8.2 mm/nap) is megmutatkozott. A mozgások irányultsága továbbra is keleties (Duna irányú) maradt, pusztán egyetlen pont (2002) mozgása tért el ettől a mérések kezdete óta.

A stabil partfal dőlésére DNy-i irány volt jellemző 2007 novemberétől, azaz a mérések megkezdésétől, míg a déli mozgó blokkon elhelyezett műszer DK-i irányú, 2007 decemberének közepétől fogva egyre gyorsuló ütemű dőlést regisztrált (5. ábra). A dőlés iránya 2008 januárjának közepén megváltozott és a mozgó blokkon lévő műszer *y* komponense ellenkező irányra váltott, azaz a dőlés iránya ettől kezdve DNy-i volt. A GPS mérések és a dőlés adatok már ekkor egy közelgő nagyobb

elmozdulásra hívták fel a figyelmet, ami be is következett, 2008. február 12-én. Az adott napon – a helyszíni megfigyelések alapján – mind az északi, mind a déli blokk a reggeli óráktól kezdődően 50-70 cm/óra sebességű süllyedést produkált, így késő délutánra több métert süllyedt és helyeződött át mindkét blokk. Az esti-éjszakai órákra a mozgás lelassult és egy-két napon belül a mozgó blokkok egy új, minimális mozgásokkal jellemezhető, átmeneti egyensúlyi helyzetbe kerültek. Az említett nagy mozgások az ötödik mért periódusra estek (2008. január 23. és február 26. között), amelynek adatai jelentős horizontális (1.9–4.6 m) és vertikális deformációról (-6.4 – -9.7 m) tanúskodtak (6. ábra). Ugyanebben az időszakban a korábban „deviáns" mozgást végző 2002-es pont csupán 2.5 cm-t mozdult el vízszintesen és -5.7 cm-t függőleges értelemben, tehát a csuszamló földtömeg ezen részlete alig csúszott meg a többihez viszonyítva. Az utolsó mért periódusra (2008. február 26. és március 31. között) a mozgások a 2007 októberében megkezdett méréseinkkor észlelt nagyságrendre lassultak, azaz a minimális elmozdulások a mozgó blokkok egy újabb, átmeneti egyensúlyi helyzetét igazolták.

A déli mozgó blokkon elhelyezett műszer a nagy mozgások napján (2008. február 12.) a kora délelőtti óráktól már nem volt képes regisztrálni a jelentős dőlés miatt, viszont a stabil partfalon lévő egység igen. Ennek regisztrátumán jól látható egy markáns „ugrás" 2008. február 12-én, ami a déli mozgó blokk leválását, csúszását, emellett a stabil partfal további DNy-i irányú dőlését és a repedésvonal menti terület enyhe megemelkedését rögzíti. Erre utalnak a GPS mérések és a szintezési adatok is (1. táblázat).

A mozgás kialakulásának és fejlődésének pontos megértéséhez a földtani, vízföldtani és hidrológiai adatok ismerete is szükséges, amelyek bemutatásától itt eltekintünk, utalva Újvári et al. munkájára, ahol részletesebb elemzés olvasható a témában. Röviden azonban az alábbiakban foglalható össze mindaz, amit a dunaszekcsői partfal mozgásmechanizmusairól és fejlődéséről tudni vélünk.

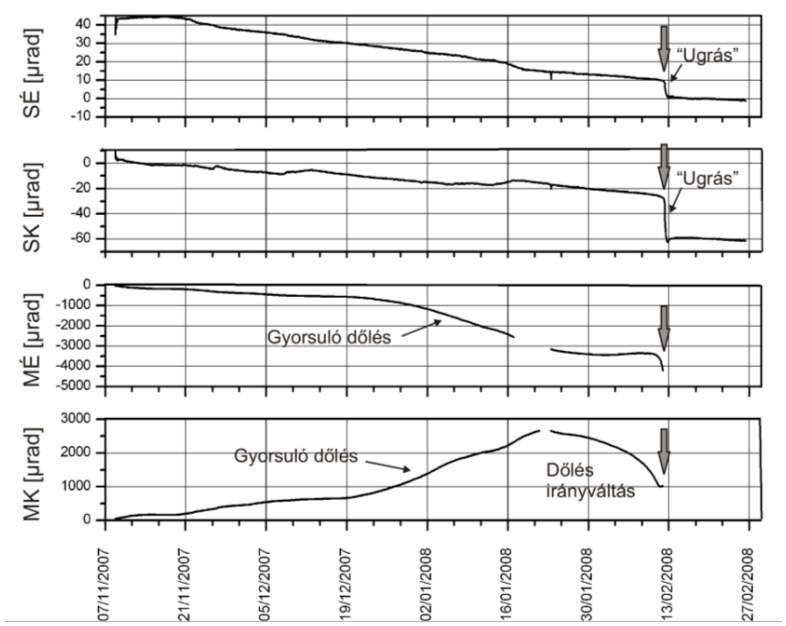
A dunaszekcsői magaspart a múlt század hetvenes éveiben előfordult mozgásokat követően átmenetileg nyugalomba került.

1. táblázat. Mért horizontális és vertikális elmozdulások (cm)

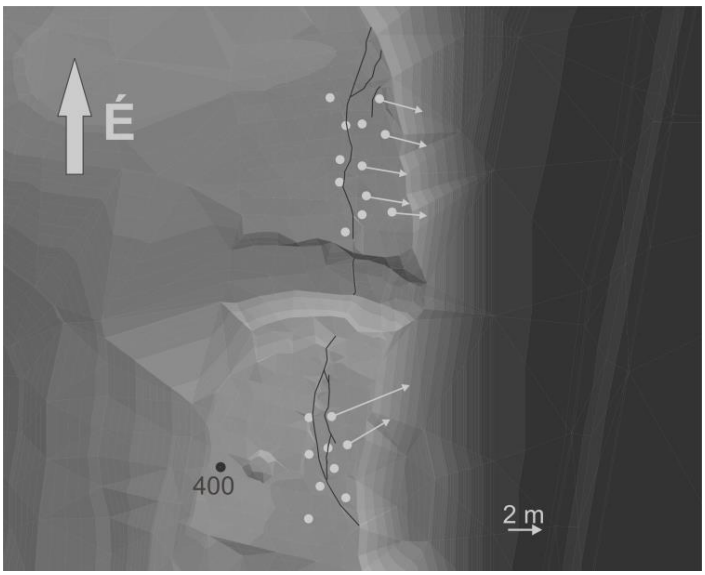
Pont	2007. október 18.			2007. november 8.			2007. december 13.		
	Észak	Kelet	Magasság	Észak	Kelet	Magasság	Észak	Kelet	Magasság
1000	0	0	0.01	-0.04	0.1	-0.03	0.11	0.12	-0.04
1001	-0.43	0.19	0.01	-0.05	-0.16	-0.03	0.17	0.18	0
1002	-0.45	0.25	0.01	-0.11	0.02	0.01	0.13	-0.13	0.01
1003	-0.14	0	-0.04	-0.07	-0.11	0.04	0.08	0.03	0.03
2000	0.17	0.55	-1.7	0.82	1.17	-3.9	0.72	1.03	-3.96
2001	0.06	1.16	-1.54	0.05	1.95	-3.64	0.43	1.64	-3.75
2002	0.27	0.91	-0.86	-0.68	1.19	-1.83	-0.14	0.93	-1.89
2003	0.76	0.66	-1.66	0.59	1.32	-3.92	0.63	1.32	-3.89
2004	0.65	1.06	-0.99	0.15	2.53	-2.67	0.58	2.37	-3.35
3000	0.2	0.14	-0.02	-0.17	0.08	0.04	0.08	-0.05	0.05
3001	0.07	-0.32	-0.01	-0.13	0.08	0.01	-0.01	0.07	0.02
3002	0.22	0.06	0.02	-0.14	-0.01	-0.01	0.17	-0.06	-0.02
3003	0.21	-0.06	0	-0.03	0.09	-0.02	0.16	0.07	-0.02
3004	0.08	-0.09	0.01	-0.08	0.1	-0.03	-0.08	-0.02	-0.03
4000	-0.1	0.42	-1.43	-1.3	1.79	-3.05	-0.8	1.24	-2.79
4001	-0.19	0.5	-1.55	-0.94	1.74	-3.42	-1.2	1.2	-3.21
4002	0.04	0.56	-2.01	-0.74	1.1	-4.69	-0.52	0.78	-4.34
4003	-0.24	0.54	-1.85	-0.55	1.23	-4.61	-0.51	0.99	-4.25
4004	-0.65	0.31	-2.12	-0.44	0.99	-4.84	-0.51	0.92	-4.53
4005	-0.46	0.42	-2.29	-0.32	0.64	-5.18	-0.58	0.64	-4.97
4006	-0.42	0.45	-1.92	-0.43	0.87	-4.14	-0.74	0.7	-3.97

1. táblázat. – folytatás – Mért horizontális és vertikális elmozdulások (cm)

Pont	2008. január 23.			2008. február 26.			2008. március 31.		
	Észak	Kelet	Magasság	Észak	Kelet	Magasság	Észak	Kelet	Magasság
1000	-0.07	-0.22	-0.06	-0.21	0.51	-1.76	-0.12	0.07	1.66
1001	0.49	-0.17	-0.01	-0.53	0.28	0.24	-0.2	0.03	0
1002	0.13	-0.31	0.04	-0.04	0.04	0.04	-0.15	-0.14	-0.08
1003	0.66	0.1	0.05	-0.73	-0.31	0.5	0.36	-0.04	-0.2
2000	4.42	6.64	-26.16	-	-	-	-	-	-
2001	3	10.24	-24.23	-	-	-	-	-	-
2002	-1.33	3.42	-6.02	-0.32	2.51	-5.7	0.03	-0.15	-0.77
2003	3.98	8.27	-26.39	144.26	241.42	-776.41	-8	-6.2	-2.1
2004	5.48	16.35	-19.24	176.34	434.79	-641.69	-2.97	-1.89	0.11
3000	-0.09	0.01	0.06	0.11	-0.36	-0.15	0.53	0.04	0.4
3001	-0.38	-0.16	0.02	0.43	-0.16	0.46	0.36	-0.3	0.04
3002	0.62	0.01	-0.01	-0.57	-0.27	0.55	0.46	-0.36	0.1
3003	-0.5	0.23	-0.03	0.67	-0.82	-0.27	0.21	0.33	0.62
3004	0.08	0.01	-0.03	-0.27	-0.04	-0.02	0.51	-0.19	0.24
4000	-5.05	10.61	-20.88	-66.65	244.1	-800.06	2.01	3.49	-0.86
4001	-4.72	9.53	-23.17	-60.44	237.74	-815.55	2.14	2.7	-1.05
4002	-3.14	8.77	-28.8	-41.88	253.69	-958.24	1.44	3.38	-0.63
4003	-2	8.92	-27.72	-	-	-	-	-	-
4004	-2.53	7	-31.08	-41.34	243.53	-978.01	-0.61	3.98	0.08
4005	-0.32	4.37	-33.98	-	-	-	-	-	-
4006	-2.51	5.46	-27.49	-17.5	198.96	-837.49	-0.18	3.51	-0.31



5. ábra. A stabil partfal és a déli mozgó blokk dőlése 2007. november 11. és 2008. február 27. között. SÉ: a stabil partfalon lévő műszer *x* komponense, SK: a stabil partfalon lévő műszer *y* komponense, MÉ: a déli mozgó blokkon telepített műszer *x* komponense, MK a déli mozgó blokkon telepített műszer *y* komponense. A szürke nyilak a 2008. február 12-ei nagy mozgásokat mutatják.



6. ábra. Horizontális elmozdulások 2008. január 23. és február 26. között. A fekete vonalak a repedéshálózat 2008. február 26-án felvett állapotát tükrözik. A stabil parton lévő részletpontok vektorai a skála (2 m) miatt nem láthatóak, azok ugyanis mm-es nagyságrendűek voltak. A mozgó blokkokon lévő vektor nélküli öt részletpont a 2008. február 12-én bekövetkezett nagyobb mozgások során eltűnt vagy megrongálódott).

Ezt követően 2006-2007 során ismét instabil állapotba jutott a magaspart egy részlete és megindult az újabb egyensúly felé törekvő anyagátrendeződés, melynek első jele a markáns, kb. 200 méter hosszú repedésvonal megjelenése volt a Vár- és Szent János-hegyen. Bár a hidrológiai háttér vizsgálatára pusztán felszínesen kerülhetett sor, mégis valószínű, hogy a csapadék illetve a Duna vízszintváltozásainak és eróziós tevékenységének együttes hatásai eredményezték a stabilitás elvesztését. Korábbi hazai (Domján 1952, Karácsonyi és Scheuer 1972, Horváth és Scheuer 1976, Fábián et al. 2006) és külföldi megfigyelésekhez (Twidale 1964, Thorne 1982, Springer et al. 1985, Lawler et al. 1997) hasonlóan a fő mozgásokra nem a magas, hanem éppen az ezt követő alacsony vízállás idején került sor. Ekkor általában a lábvonalbeli anyag még nedves, átáztatott állapotban van, de a víztömeg megtámasztó ereje megszűnik.

Meg kell említeni, hogy a magaspartot alkotó kőzettér már eleve gyengített állapotban volt (Kraft 2005), ahol a repedések a csapadék preferenciális útvonalai lehettek, tovább gyengítve ezzel a stabilitást (Újvári et al. 2009). Hegedűs et al. (2008) jelentésükben felvetették a tektonika szerepét is a mozgásokat illetően, bár véleményünk szerint nem ez lehetett a dunaszekcsői mozgás kiváltója.

A mozgások tehát 2007. őszétől fluktuálva ugyan, de egyre fokozódtak, gyorsultak, amire minden geodéziai mérési adat is utalt. A mozgó blokkok a Duna irányába mozogtak, dőltek, majd január közepétől az ívelt csúszólap mentén hátrabillentek és így süllyedtek tovább. A Duna irányú, majd ellenkező (hátrabillenő) mozgást a déli mozgó blokkon lévő dőlésmérő kiválóan regisztrálta. Ezen adatok alapján – a mozgás feltételezett lefolyását ismerve – várható volt a gyorsabb mozgásfázis közeledte, amely ténylegesen meg is történt az irányváltást követő ~25 napban.

A mozgó blokkok a nagy mozgásokat (2008. február 12.) követően alig vagy egyáltalán nem süllyedtek tovább, valószínűleg egy átmeneti egyensúlyi helyzetbe kerültek. Ezen pozíció meghatározásában a mozgó blokkok alatt elhelyezkedő, korábbi mozgásokból származó teraszok is szerepet játszottak, amelyek mintegy blokkolták a további süllyedést. A Duna jövőbeni eróziós tevékenysége azonban a csuszamlás lábvonalában, a mederben létrejött félszigetet elmosva ismét instabil helyzetet teremthet a mozgás által érintett szakaszon, sőt attól északra és délre egyaránt. Egy ilyen szituációban már nem pusztán nyaralóépületek, hanem lakóházak is veszélybe kerülhetnek.

5 Összefoglalás és konklúzió

A geodéziai deformáció mérések fontos, alapvető információkat biztosíthatnak a földcsuszamlások tér- és időbeli fejlődéséről. A GPS technika által biztosított adatok – nem permanens, hanem kampányszerű mérések esetén, ahogy az a jelen vizsgálatsorozatban is történt – a mozgások térbeli jellemzőiről adnak képet. Az elmozdulások nagysága és iránya alapján következtetések tehetők a mozgások jövőbeni irányára és mértékére, ezáltal pedig a legveszélyeztetettebb zónák lehatárolása is megtörténhet, az adott területeken a megelőzési és az esetleges mentési munkák tervezéséhez.

A dőlésmérések eredményei a mozgások időbeli lefolyásáról adnak pontos képet. Igen fontos megfigyelés, hogy a dőlésadatok (dőlés irányának megváltozása és gyorsulása) már a 2008. február 12-ét megelőző napokban utaltak a gyors mozgási fázis közeledtére, ami felveti a mozgás egy bizonyos szakaszának előrejelezhetőségét. Ennek a megerősítéséhez természetesen még jó néhány további vizsgálatra volna szükség a dunai magaspartok más szakaszain és mozgásain. Amennyiben az alapelv működőképesnek bizonyul, úgy real-time adatelérés és egy veszélyeztetettséget értékelő program segítségével megvalósíthatóvá válna egy korai előrejelző/riasztó rendszer.

Köszönetnyilvánítás. Munkánk nagy része az MTA Elnöki keret (Kinnof-15/6/35/2007) és az OTKA 78332 K támogatásával készült. Köszönjük Horváth Attila, Schlaffer Ferenc, Bánfi Frigyes és Molnár Tibor munkatársainknak a terepmunkák során nyújtott segítséget, valamint a helyi önkormányzat (Faller János polgármester és Pest Éva jegyzőasszony), a Baranya Megyei Katasztrófavédelem (Oláh Tibor őrnagy) és a mohácsi Tűzoltóság technikai jellegű segítségét.

Hivatkozások

Bányai L (1991): Treatment of rotation errors in the final adjustment of GPS baseline components. Bulletin Geodesique 65, 102-108.

Bányai L (2005): Investigation of GPS antenna mean phase centre offsets using a full roving observation strategy. Journal of Geodesy 79, 222-230.

Domján J (1952): Középdunai magaspartok csúszásai (Slides of the bluffs along the middle reach of the River Danube). Hidrológiai Közlöny 32, 416-422 (in Hungarian).

Farkas J (1983): Agyagok réteghatárán bekövetkező felszínmozgások. Mélyépítéstudományi Szemle 8, 355-361.

Fábián SzÁ, Kovács J, Lóczy D, Schweitzer F, Varga G, Babák K, Lampért K, Nagy A (2006): Geomorphologic hazards in the Carpathian foreland, Tolna County (Hungary). Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica, 40, 107–118.

Hegedűs E, Kovács ACs, Fancsik T (2008): A megcsúszott dunaszekcsői löszfal aktív és passzív szeizmikus vizsgálata. Kutatási Jelentés (Eötvös Loránd Geofizikai Intézet), p. 20.

Horváth T (2005): Enhanced real-time positioning via the Internet (in Hungarian). Geomatikai Közlemények VIII, 123-133.

Horváth Zs, Scheuer Gy (1976): A dunaföldvári partrogyás mérnökgeológiai vizsgálata. Földtani Közlöny, 106, 425-440.

Juhász Á (1999): A klimatikus hatások szerepe a magaspartok fejlődésében. Földtani Kutatás, XXXVI(3), 14-20.

Karácsonyi S, Scheuer Gy (1972): A dunai magaspartok építésföldtani problémái. Földtani Kutatás, 15, 71-83.

Kleb B, Schweitzer F (2001): A Duna csuszamlásveszélyes magaspartjainak településkörnyezeti hatásvizsgálata. Ádám A, Meskó A (szerk.): Földtudományok és a földi folyamatok kockázati tényezői. Bp. MTA, 169-193.

Kraft J (2005): A dunaszekcsői Töröklyuk kialakulása és fennmaradása. Mecsek Egyesület Évkönyve a 2004-es egyesületi évről. Új Évfolyam, 8, 133-153.

Lawler DM, Thorne CR, Hooke JM (1997): Bank erosion and instability. In: Thorne C R, Hey R D, Newson M D: Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 137–172.

Lóczy D, Balogh J, Ringer Á (1989): Landslide hazard induced by river undercutting along the Danube. In: Embleton C, Federici P R, Rodolfi G: Geomorphological Hazards, Supplements of Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 2, 5-11.

Mentes Gy (2003): Monitoring local geodynamical movements and deformations by borehole tiltmeters in Hungary. Proceedings of the 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 43-50.

Springer FM Jr, Ullrich CR, Hagerty DJ (1985): Streambank stability. Journal of Geotechnical Engineering, 111, 624–640.

Szabó J (2003): The relationship between landslide activity and weather: examples from Hungary. Natural Hazards and Earth System Sciences, 3, 43-52.

Thorne CR (1982) Processes and mechanisms of river bank erosion. In: Hey R D, Bathurst J C, Thorne C R: Gravel-bed Rivers, Wiley, Chichester, 227–271.

Twidale CR (1964) Erosion of an alluvial bank at Birdwood, South Australia. Zeitschrift für Geomorphologie, 8, 189–211.

Újvári G, Mentes Gy, Bányai L, Kraft J, Gyimóthy A, Kovács J (2009) Evolution of a bank failure along the River Danube at Dunaszekcső, Hungary. Geomorphology, doi: 10.1016/j.geomorph.2009.03.002. in press.

KÖRNYEZETI PARAMÉTEREK HATÁSA AZ EXTENZOMÉTERES MÉRÉSEKRE

Eperné-Pápai Ildikó[*], *Mentes Gyula*[*]

Environmental parameter effects on extensometric measurements *- Deformation, temperature and atmospheric pressure data from the Sopronbánfalva Geodynamical Observatory were investigated. Long-term temperature variations raise thermoelastic rock deformations which appear with about 20 days lag in our extensometric measurement. In tidal frequency bands the connection between temperature and strain results is negligible on the basis of coherence analysis. However the atmospheric tide's seasonal variation influences the strain tide parameters.*

Keywords: extensometer, temperature effect, atmospheric pressure, seasonal effect, tidal parameters

A Sopronbánfalvi Geodinamikai Obszervatóriumban regisztrált deformációs, hőmérsékleti és légnyomás adatsorok közötti összefüggést vizsgáljuk írásunkban. A hőmérséklet hosszúperiódusú változása által előidézett termoelasztikus kőzetdeformáció mintegy 20 nap késéssel jelenik meg extenzométeres regisztrátumunkban, árapály frekvenciákon elhanyagolható mértékű kapcsolatot mutatnak a koherenciavizsgálatok. Ugyanakkor a légköri árapály szezonális váltakozásának jelensége befolyásolja a deformációs adatainkból meghatározható árapály paraméterek nagyságát.

Kulcsszavak: extenzométer, hőmérsékleti hatás, légnyomás, szezonális hatás, árapály paraméterek

1 Bevezetés

A Sopronbánfalvi Geodinamikai Obszervatóriumban 1991 óta folynak extenzométeres mérések, amelyeknek egyik célja az árapály paraméterek minél pontosabb meghatározása, másik célja pedig a Pannon-medence jelenkori tektonikai mozgásainak vizsgálata (Mentes 1991, 2005). A környezeti paraméterek, ezek közül is főképpen a légnyomás és a hőmérséklet változása van hatással az extenzométerrel mért elmozdulás értékekre. A környezeti paraméterek hatása lehet direkt vagy indirekt. Az első esetben közvetlenül a mérőműszerre való hatásról van szó, míg a második esetben a műszert körülvevő kőzet deformálódik a hőmérséklet és a légnyomás hatására. Ez utóbbi esetben a hatás rendkívül komplikált, mivel az extenzométer által mért kőzet deformáció függ az obszervatórium környezetének topográfiájától, valamint az üreghatástól, vagyis annak a vágatnak az alakjától, amelyben a műszer elhelyezkedik (Mentes 1997). A környezeti hatások szezonális jellegűek és kvázi-periodikusak. Hosszú, többéves adatsorokból szűréssel viszonylag könnyen eltávolíthatók, így a tektonikai mozgásmegfigyelések szempontjából nem jelentenek akkora problémát, mint az árapály paraméterek meghatározása esetében. A légnyomás hatása még bonyolultabb, mint a hőmérsékleté. Ez azt jelenti, hogy a földkéreg bármely pontján a deformáció értéke függ a teljes Földön levő légnyomás értékektől, továbbá az óceánok szintje is változik a légnyomás változásával, ami az óceáni terhelés révén indirekt járul hozzá a szilárd földkéreg deformációjához. A légnyomásnak a gravitációs mérésekre kifejtett hatásával több cikk foglalkozik (pl. Sun 1995, Kroner és Jentzsch 1999, Boy et al. 2006), amelyek csak a földkéreg radiális irányú elmozdulását vizsgálják. Többek között Rabbel és Zschau (1985) tanulmányozták a Föld felszínén a deformáció és gravitáció változása, valamint a lokális és globális légnyomásváltozások közötti összefüggéseket sugárirányban rétegezett földmodell esetében. Megállapították, hogy a fő horizontális relatív deformációk nagysága elérheti a 10^{-8} nagyságrendet, míg a szezonális hatások következtében $\pm 1.5 \cdot 10^{-9}$ nagyságrendű lehet. A légnyomás hatását az extenzométeres mérésekre eddig keveset vizsgálták, pl. Onoue és Takemoto, (1998). A légnyomás és a deformáció közötti kapcsolat mechanizmusát, a topográfia hatását pl. Kroner et al. (2005), Steffen et al. (2005) végeselem módszerrel modellezték. Ez utóbbi hatást Mentes és Eper-Pápai (2006) a felszíni Sopronbánfalvi Geodinamikai Obszervatóriumban és a mély

[*]*MTA GGKI, 9400 Sopron, Csatkai u. 6-8.*
E-mail: papai@ggki.hu

(1040 m) pécsi uránbányában elhelyezett extenzométerek esetében tanulmányozták a két obszervatóriumban mért adatok összehasonlításával.

Az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetben Mentes (2000), Eper-Pápai és Mentes (2002) foglalkoztak a légnyomás korrekciójával extenzométeres mérések esetében. Másokkal együtt (pl. Kroner és Jentzsch, 1999) megállapították, hogy a légnyomás nem állandó periódusidejű szezonális változásai miatt a légnyomás hatásának korrigálása komplikáltabb feladat, mint azt eddig gondolták. E tanulmányban részletesen megvizsgáljuk a hőmérséklet és a légnyomás változásainak hatását az extenzométeres mérésekre abból a célból, hogy az itt nyert eredményeket és tapasztalatokat felhasználhassuk jobb és pontosabb módszerek fejlesztésére a hőmérséklet és a légnyomás hatásának korrekciójára.

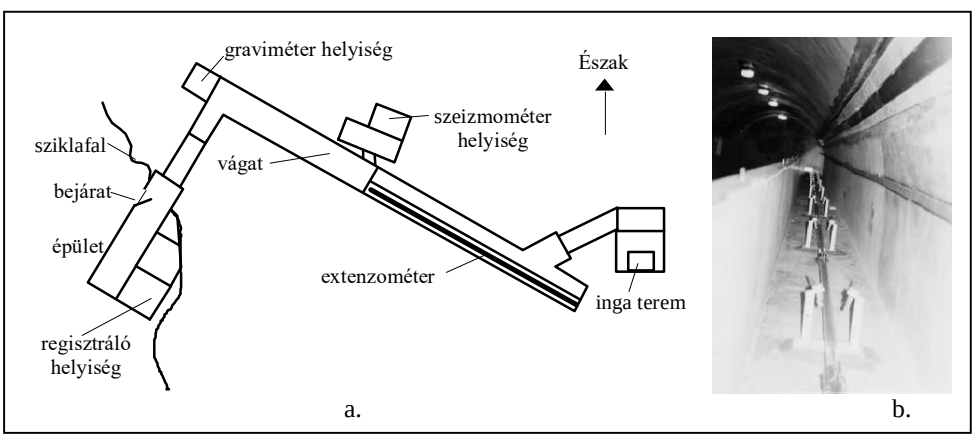
2 Obszervatórium, műszerek, mérési adatok

A Sopronbánfalvi Geodinamikai Obszervatóriumban 1991-ben készült el egy 22 m hosszúságú kvarccsöves extenzométer a moszkvai Földfizikai Intézettel együttműködésben. E műszer már nem fotografikus regisztrálással működik, hanem az extenzométer végpontjának elmozdulását az MTA GGKI-ban kifejlesztett (Mentes 1983) nagyérzékenységű, differenciálkondenzátoros kapacitív átalakító érzékeli. A műszer rendszeres kalibrálása ugyancsak az intézetben készült kalibráló berendezéssel történik (Mentes 1995). Az obszervatórium alaprajzát és az extenzométert az 1. ábra mutatja. A műszerrel regisztrált folyamatos adatsor hossza 17 év (Mentes 2005, 2008).

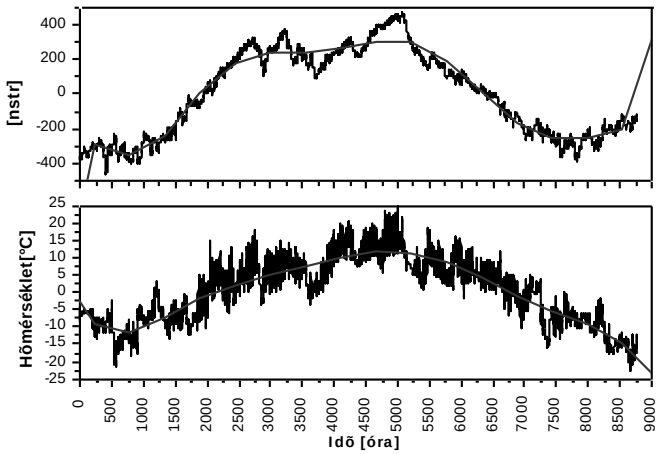
Az atmoszférikus árapály regisztrálására 1997-ben egy nagy érzékenységű mikrobarográfot fejlesztettünk ki és helyeztünk üzembe. A mikrobarográfhoz ugyancsak kifejlesztettünk egy nagy pontosságú kalibráló berendezést is (Mentes 1997, 2004). 2001 közepétől az obszervatórium adatgyűjtését korszerűsítettük. Üzembe helyeztünk egy sokcsatornás 24 bites adatgyűjtőt, amely lehetővé tette az obszervatóriumi adatok (extenzométer, mikrobarográf, graviméter, külső és belső hőmérséklet, stb.) egységes perces mintavételi sűrűséggel való regisztrálását. Jelen tanulmányunkhoz ezért csak a már előfeldolgozott és az új adatgyűjtővel regisztrált, 2002 és 2006 közötti extenzométeres, hőmérséklet és mikrobarográf adatokat használtuk fel. A perces mintavételi adatokat szűrtük és újramintavételezéssel órás adatokat állítottunk elő. Az adatok árapály-feldolgozásához az ETERNA 3.30 programot használtuk (Wenzel 1996).

3 A hőmérséklet hatásának vizsgálata

A hőmérséklet direkt hatása a műszerre elhanyagolható, mivel a belső hőmérséklet változása az obszervatóriumban nagyon kicsi. A napi változás 0.05°C-nál kisebb és az éves változás is 0.5°C alatt van, ezért csak a külső hőmérséklet ingadozásainak hatását vizsgáltuk. A 2. ábrán példaképpen a 2006-ban regisztrált extenzométeres és a külső hőmérséklet adatsorait mutatjuk be. A többi évek



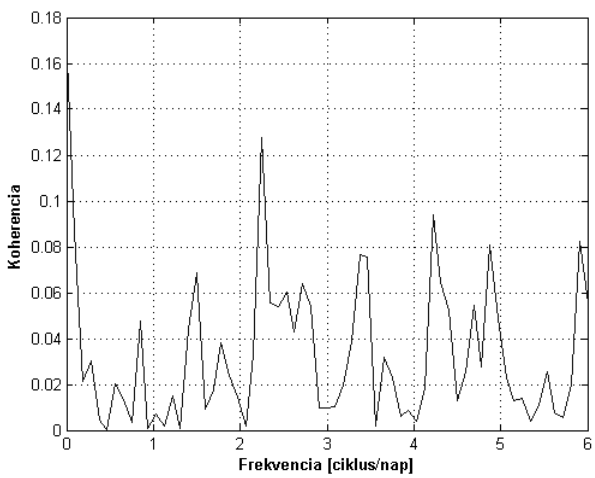
1. ábra. A Sopronbánfalvi Geodinamikai Obszervatórium alaprajza (a) és az extenzométer fényképe (b)



2. ábra. A Sopronbánfalvi Geodinamikai Obszervatóriumban 2006-ban regisztrált külső hőmérséklet és extenzométeres adatsor (relatív elmozdulás nstr-ben), valamint a hőmérséklet és az extenzométeres adatok átlagos változása

adatsorai is ehhez hasonlók.

Az extenzométer által mért Δl elmozdulást relatív egységben $\Delta l/L$ ábrázoltuk, ahol L az extenzométer hossza. A relatív elmozdulás egységének az árapály méréstechnikában szokásos 1 nstr = 10^{-9} egységet használjuk. A 2. ábrán látható görbékre 9-ed fokú polinomot illesztettünk, hogy az éves, szezonális változás jobban látható legyen. Látszólag a görbék jó egyezést mutatnak, azonban az adatsorokat regressziós analízisnek alávetve, már nem olyan egyértelmű a hőmérséklet hatása, amint az az ábrából első pillantásra tűnik. A szűretlen adatsorok regressziós vizsgálatával azt kaptuk, hogy 1°C hőmérsékletváltozás 22 nstr relatív megnyúlást okoz (a regressziós együttható: 22 nstr/°C), a két görbe közötti korrelációs tényező értéke: 0.839. Vizsgáltuk azt is, hogy a külső hőmérséklet változásának hatása mennyi idő múlva jelentkezik az extenzométeres eredményekben. A 2006-os adatokból azt kaptuk, hogy ez a késés kb. 21 nap. Ebben az esetben a regressziós együttható értéke: 25 nstr/°C, míg a korrelációs tényező csak 0.884 értékre növekedett. A többi év feldolgozása során is hasonló késések (20-22 nap) adódtak. Mentes (2000) 1996-os adatsorokon végzett vizsgálataiból 18 napos késést kapott. Következő lépésben levontuk a szezonális hatást (a 9-ed fokú polinomot) az adatokból és a rövididejű hőmérsékletváltozások hatását vizsgáltuk. Ebben az esetben a regressziós együttható értéke 3 nstr/°C, a korrelációs tényező értéke, pedig 0.188 lett. Ez azt mutatja, hogy a gyors hőmérsékletváltozások elhanyagolhatók. Ezt a következtetést erősítette meg az



3. ábra. A 2006 évi hőmérséklet és extenzométer adatok koherenciagörbéje

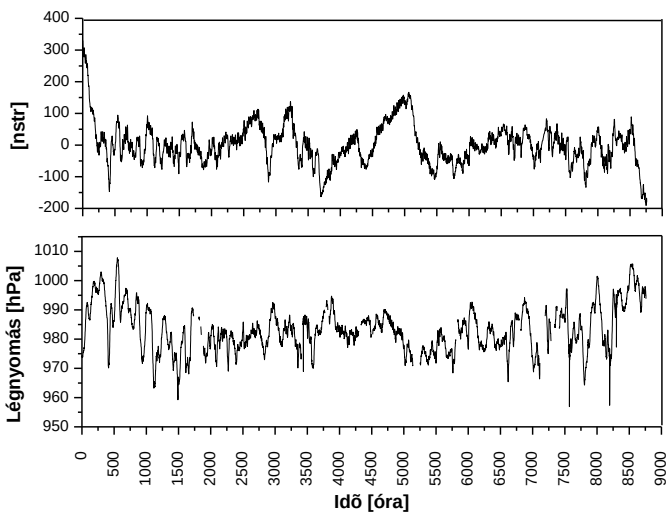
adatsorok koherenciavizsgálata is. A 3. ábrán megadtuk a 2006-os hőmérséklet és extenzométer adatok koherenciagörbéjét. Az ábrából jól látható, hogy a koherencia értéke az egész frekvenciatartományban 0.16 alatt van. A legfőbb árapályhullámok napos és félnapos frekvenciatartományában értéke csaknem nulla, ami azt jelenti, hogy az árapályfaktorok meghatározása szempontjából a hőmérséklet hatása elhanyagolható. A hosszúperiódusú, szezonális változások a tektonikai mozgások meghatározása során a hosszú adatsorokból könnyen eltávolíthatók.

4 A légnyomás hatásának vizsgálata

A megfelelő érzékenységgel rendelkező extenzométerek (jobb, mint 10^{-10} str) lehetővé teszik a föld belső szerkezetének vizsgálatát, geodinamikai paraméterek meghatározását. A légnyomásváltozás által előidézett „zaj" korlátozhatja a számunkra érdekes kicsiny jeleknek (pl. hosszú periódusú árapályhullámok, a földkéreg rezonancia paraméterei) az elkülönítését a deformációs adatsorból. Ezért a megfelelő, illetve minél hatékonyabb barometrikus korrekció lehetőségének keresésekor fontos figyelembe venni a légnyomásértékek nagyságának, valamint a légköri árapály paramétereknek a szezonális változásait. A légköri árapály egynapos és félnapos hullámainak szezonális változása a szakirodalomban ismert jelenség (pl. Haurwitz és Cowley 1973). Számításainkat a hasonló vizsgálatok esetében alkalmazott „LLoyd"-évszakoknak nevezett és D-, E- valamint J-hónapoknak jelölt adatszakaszokra tagolással végeztük mind a barometrikus, mind a deformációs adatsoroknál: D-hónapok: november, december, január, február, E-hónapok: március, április, szeptember, október, J-hónapok: május, június, július, augusztus. Először a teljes évi adatsorok vizsgálatával a légnyomás szezonális változásait szemléltetjük, majd 2002-2006 évi csoportosított adatokon árapály feldolgozással és regresszió analízissel elemezzük a szezonális változások hatását az extenzométerre, illetve a korrekció lehetőségeit. A 4. ábra példaképpen a 2006-os év deformációs és légnyomás adatait mutatja. Jól látható, hogy a légnyomásnak nincs olyan határozott hosszú periódusú, szezonális jellege, mint a hőmérsékletnek (2. ábra), ezért a 4. ábrán a deformációgörbét úgy ábrázoltuk, hogy a 2. ábrán látható nyers adatsorból levontuk a szezonális változást, a 9-ed fokú polinomot. Ezáltal jobban megfigyelhető a légnyomás és a deformáció gyors változásai közötti kapcsolat.

4.1 A légnyomás szezonális tulajdonságainak vizsgálata

Első lépésként a légnyomás kb. éves periódusú szezonális változásait tanulmányoztuk. Ehhez az egyes években meghatároztuk a havi átlagos légnyomás értékeket, valamint ezek szórását. Ezt a



4. ábra. A Sopronbánfalvi Geodinamikai Obszervatóriumban 2006-ban regisztrált mikrobarográf és a szezonális változás levonása utáni extenzométeres adatsor (relatív elmozdulás nstr-ben).

szórást tekintettük a havi változásnak. Az értékek az 1. táblázatban láthatók hPa-ban megadva 2002-től 2007-ig, majd az adott időszak értékeit havonként átlagoltuk (1. táblázat „Átlag" sora). E sorból jól látható, hogy a légnyomásváltozások a téli hónapokban jóval nagyobbak, mint a nyári hónapokban. A légnyomás változékonyságát az egyes hónapokban jól mutatja a légnyomásnak a havi átlaghoz viszonyított szórásai (1. táblázat „Szórás" sora). Ezekből az értékekből, pedig az látható, hogy a légnyomás változékonysága is nagyobb a téli hónapokban.

1. táblázat. A légnyomás havi változásai hPa egységben 2002 és 2007 között

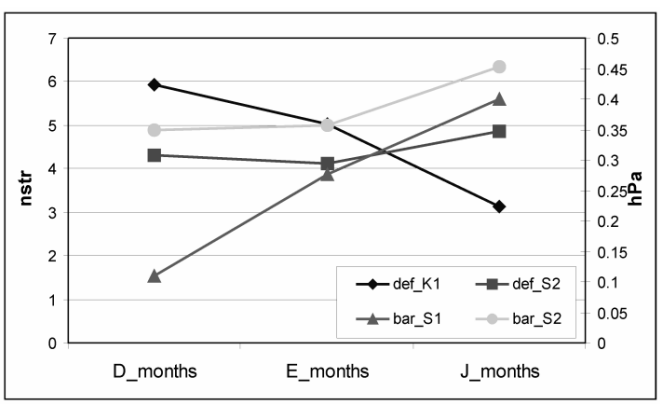
	Hónapok januártól (1) decemberig (12)											
Év	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2002	8.23	8.86	5.85	7.35	5.57	6.26	6.26	5.39	5.21	6.64	5.95	6.13
2003	11.63	11.10	5.71	6.29	3.59	3.76	4.12	4.51	6.76	10.22	10.03	8.42
2004	7.50	8.52	6.96	6.97	9.34	4.79	2.79	2.97	5.94	6.58	5.91	10.64
2005	8.60	13.80	6.77	9.68	4.62	4.39	3.19	3.95	4.69	4.31	10.22	10.84
2006	8.40	8.04	7.07	3.18	5.00	3.81	4.05	4.17	4.70	7.15	7.68	9.02
2007	6.85	7.86	11.01	4.20	5.46	4.18	3.90	5.02	5.34	3.27	6.95	11.73
Átlag	8.54	9.70	7.23	6.28	5.60	4.53	4.05	4.33	5.44	6.36	7.79	9.46
Szórás	1.65	2.33	1.94	2.33	1.97	0.93	1.20	0.85	0.79	2.43	1.93	2.04

4.2 Árapályanalízis

A Sopronbánalvi Obszervatóriumban mért deformációs és légnyomás (mikrobarográf) adatsoraink árapály kiértékelésével a jelen tanulmányban azt vizsgáljuk, hogy kimutatható-e összefüggés a paraméterek változása és a légköri árapály ismert szezonális váltakozása között. Mind az extenzométeres, mind a mikrobarográf adatokat szezonális csoportokba rendeztük, majd az árapályszámításokat az adatok e szakaszain, 2002-2006 évek időtartamára végeztük, az ETERNA 3.30 árapály-kiértékelő program segítségével (Wenzel, 1996) a Wahr-Dehant földmodellt alkalmazva (Wahr 1981, Dehant 1987). A mikrobarográf által regisztrált légnyomás értékeket kalibrálás után, mint gravitációs árapály komponenst dolgoztuk fel a programmal, azzal az egyszerűsítéssel élve, hogy az árapály modellben csak az S1 és S2 hullámok csoportjaiban vettünk fel lehetséges értékeket. Az egyes csoportokban meghatározott árapály amplitúdókat összegeztük a számítás éveire, az eredményeket az 5. ábra tartalmazza. Az ábra alapján megállapítható, hogy az egynapos árapály tartományban a növekvő S1 barometrikus hullám amplitúdóhoz csökkenő P1K1 deformációs amplitúdó társul, míg a félnapos tartományról (def_S2 és bar_S2) egyrészt megállapíthatjuk, hogy a változások kisebb mértékűek, másrészt a szezonális amplitúdó változások ellentétes irányultsága nem annyira kifejezett, mint az egynapos hullámok esetében (def_K1 és bar_S1).

4.3 Regresszió-analízis

A regresszió-analízis során gálatok együtthatók regresszió-határozhatók meg a deformációs és légnyomás adatsorok között, az extenzométeres adatokat a légnyomás függvényeként felvéve. A számítá-



5. ábra. Átlagos amplitúdó nagyságok a D-, E- és J-hónapokra a 2002-2006 időszakban

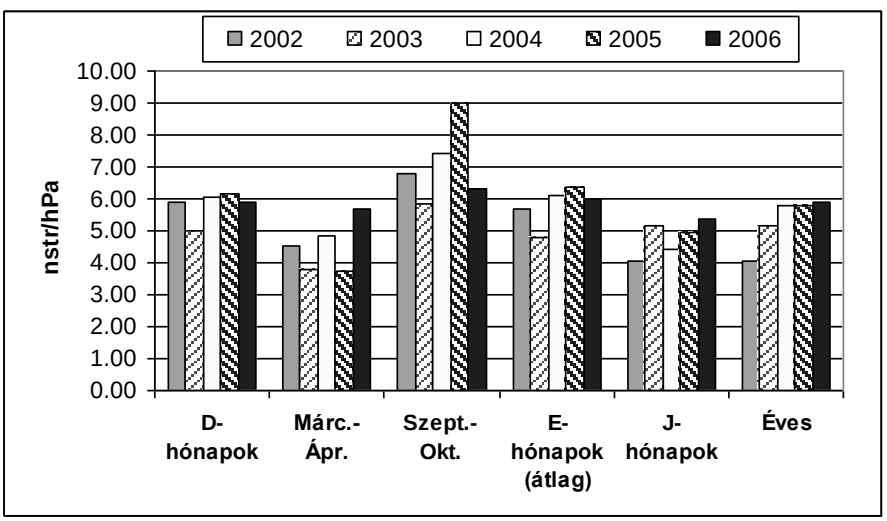
sokat mind az egyéves hosszúságú adatsorokon, mind a szezonálisan felbontott adatszegmenseken elvégeztük.

Az együtthatók meghatározásának hibája 0.1-0.3 nstr/hPa között változik, a két mért adatsor közötti fázisviszonyokat egy korábbi publikációban vizsgáltuk (Mentes és Eper-Pápai 2006), mely szerint a sopronbánfalvi Obszervatóriumra vonatkozóan a deformációs és légnyomás adatok között nem találtunk fázistolást az árapály frekvenciákon. Az eredményeket a 6. ábra foglalja össze. A regressziós együtthatókat mind szezonális felbontásban, mind az E-hónapok két részének felbontásában ábrázoljuk. A D- és E-hónapok átlagai kis mértékben különböznek az egész évre vonatkozó értékektől, a J-hónapok alacsonyabb értékei tükrözik azt a tényt, hogy a légnyomás változékonysága nyáron a legkisebb.

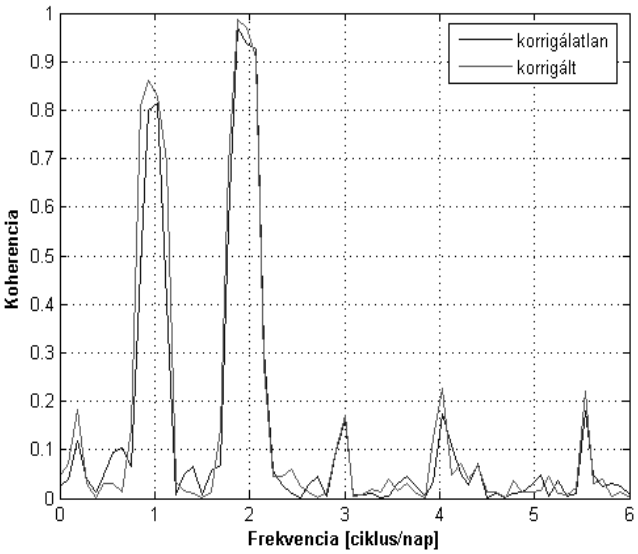
A szezonálisan elvégzett regressziós barometrikus korrekció hatékonyságát szemben az éves adatsoron végzett korrekcióval az árapály analízis utáni maradékértékek Fourier-amplitúdóinak segítségével vizsgáltuk. A reziduális értékek spektrumát mind a korrigálatlan mind a korrigált deformációs adatok feldolgozása után kiszámítottuk. Az egynapos árapály tartományban nem találtunk javulást – amplitúdó csökkenést – az adatokon, ami kétségessé teszi az eredményességet ebben a tartományban. Ugyanakkor a félnapos tartomány esetében a reziduális amplitúdók 20-30 %-os csökkenése mintegy 10 %-os javulást jelent az egész évre végzett korrekcióhoz képest.

4.4 Koherenciavizsgálat

Koherencia analízis segítségével ellenőriztük, hogy a légnyomás hatásának regressziós módszerrel való korrekciója mennyire hatásos. Első lépésben az obszervatórium földrajzi helyére az ETERNA 3.30 program segítségével a vizsgált évekre kiszámítottuk az elméleti árapályt. Ezt tekintettük bemeneti jelnek, az extenzométerrel mért adatokat pedig kimeneti jelnek. A két jel koherenciája egyúttal felvilágosítással szolgál a Föld - obszervatórium - műszer, mint rendszer jelátviteli tulajdonságairól (7. ábra korrigálatlan görbe). Ugyanezt a vizsgálatot megismételtük az elméleti árapály és a légnyomással korrigált extenzométer adatok között (7. ábra korrigált görbe). Az ábrából látható, hogy a napos frekvenciatartományban a koherencia értéke kb. 0.8, míg a félnapos tartományban 0.95. Ez azt jelenti, hogy a napos tartomány zavartabb, azonban a légnyomás korrekciója sem javított ezen az értéken jelentősen, bár a javulás valamivel jobb, mint a félnapos tartományban. Ezt követően megvizsgáltuk a hőmérséklet hatását is. Ehhez az extenzométeres adatsort előbb korrigáltuk a hőmérséklettel, majd ezt követően a légnyomással és ezt az adatsort használtuk kimenőjelként, míg a bemenőjel továbbra is az elméleti adatsor maradt. Eredményül ugyanazt a koherenciagörbét kaptuk, mint abban az esetben, amikor csak a légnyomás hatását korrigáltuk, ezért ezt a görbét a 7.



6. ábra. Regressziós együtthatók légnyomás és extenzométeres adatok között



7. ábra. Koherencia az elméleti árapály és az extenzométerrel mért deformáció adatok, valamint a hőmérséklettel korrigált deformáció adatok között 2006 évben

ábrán nem tüntettük fel. Ez az eredmény egyezik a 3. fejezetben kapott eredménnyel, hogy a hőmérséklet hatása a napos és félnapos frekvenciatartományokban elhanyagolható.

5 Összefoglalás

Obszervatóriumunkban regisztrált adatsorok – deformáció, légnyomás, hőmérséklet – rövid és hosszúperiódusú komponenseinek vizsgálata geodinamikai célú kutatásokat támogat. Mivel a hőmérséklet és a légnyomás változásainak hatása megváltoztatja a deformáció mérést, zajként jelentkezik. Célunk, hogy a folyamatok közötti bonyolult összefüggések alapján minél hatékonyabb korrekciós módszereket találjunk e hatások eltávolítására. Ebben a tanulmányban egyrészt a hőmérséklet extenzométeres mérésre gyakorolt hatását, másrészt a légnyomás szezonális változásainak deformációs árapály feldolgozásra kifejtett hatását vizsgáltuk. Megállapíthatjuk, hogy a hőmérséklet hosszúperiódusú változása olyan termoelasztikus deformációt okoz, mely késleltetve (kb. 20 nap késéssel) megjelenik a lineáris deformáció mérésében, és viszonylag egyszerű matematikai módszerekkel eltávolítható az adatsorból. Ugyanakkor az árapály tartományban koherencia vizsgálatok alapján nem találtunk közvetlen hőmérséklethatást. A légnyomás esetében megállapítható, hogy az árapály frekvenciákon a légköri árapály befolyásolja a deformáció mérésből meghatározható árapály paramétereket, továbbá a jelen tanulmányban bemutatott vizsgálatok arra utalnak, hogy a légnyomás szezonális váltakozása is hatást gyakorol a mérésre. A regressziós számításokból kapott eredményeket az árapály feldolgozás eredményeivel összehasonlítva azt találjuk, hogy a légnyomás amplitúdói ellentétes irányú változási tendenciát mutatnak a regressziós koefficiensekkel szemben. Ez az eredmény további magyarázatra szorul.

Köszönetnyilvánítás. Ez a tanulmány a K71952 számú OTKA projekt keretében készült. Külön köszönet illeti Molnár Tibort az obszervatórium rendszeres és gondos felügyeletéért, valamint a műszerek karbantartásáért, amely lehetővé tette a hosszú folyamatos adatsorok regisztrálását.

Hivatkozások

Boy JP, Ray R, Hinderer J (2006): Diurnal atmospheric tide and induced gravity variations. J. Geodyn. 41, 253-258.
Dehant V (1987): Tidal Parameters for an Unelastic Earth. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 49, 97-116.

Eper-Pápai I, Mentes G (2002): The effect of atmospheric pressure on strain measurements at the Sopron Observatory, Hungary. Bull. d' Inf. Marees Terr. 137, 10901-10906.

Haurwitz B, Cowley D (1973): The Diurnal and Semidiurnal Barometric Oscillations, Global Distribution and Annual Variation. Pure Appl. Geophys. 102, 193-222.

Kroner C, Jentzsch G (1999): Comparison of different barometric pressure reductions for gravity data and resulting consequences. Phys. Earth Planet. Int. 115, 205-218.

Kroner C, Jahr T, Kuhlmann S, Fischer KD (2005): Pressure-induced noise on horizontal seismometer and strainmeter records evaluated by finite element modelling. Geophys. J. Int. 161, 167-178, doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02576.x.

Mentes Gy (1983): Capacitive transducers for horizontal pendulums and gravimeters. Acta Geod. Geoph. Mont. Hung. 18, 359-368.

Mentes Gy (1991): Installation of a quartz tube extensometer at the Sopron Observatory. Marees Terrestres Bulletin d' Informations, Bruxelles, 110, 7936-7939.

Mentes Gy (1995): In-situ calibration of quartz tube extensometers, Marees Terrestres Bulletin d'Informations, Bruxelles, 121, 9070-9075.

Mentes Gy (1997): Folyamatos mérési módszerek geodinamikai, környezeti és ipari deformációk megfigyelésére. MTA doktori értekezés, Sopron (Magyar Tudományos Akadémia), 173 p.

Mentes G (2000): Influence of Temperature and Barometric Pressure Variations on Extensometric Deformation Measurements at the Sopron Station. Acta Geod. Geoph. Hung. 35 (3), 277-282.

Mentes Gy (2004): Atmospheric tide obtained by the microbarograph developed at the Geodetic and Geophysical Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences. Acta Geod. Geoph. Hung. 39 (1), 39-48.

Mentes Gy (2005): Results of Tidal Research. Acta Geod. Geoph. Hung., 40 (3-4), 293-305.

Mentes Gy (2008): Observation of recent tectonic movements by extensometers in the Pannonian Basin. J. Geodyn. 45, 169-177.

Mentes Gy, Eper-Pápai I (2006): Investigation of meteorological effects on strain measurements at two stations in Hungary. J. Geodyn. 41 (1-3), 259-267.

Onoue K, Takemoto S, (1998): Atmospheric pressure effect on ground strain observation at Donzurubo observatory, Nara, Japan. In: Proceedings of the 13th International Symposium on Earth Tides, Brussels, 22-25 July 1997, 157-164.

Rabbel W, Zschau J (1985): Static deformations and gravity changes at the Earth's surface due to atmospheric loading. J. Geophys. 56, 81-99.

Steffen H, Kuhlmann S, Jahr T, Kroner C (2005): Numerical modelling of the barometric pressure-induced noise in horizontal components for the observatories Moxa and Schiltach. J. Geodyn. 41, 242-252.

Sun HP (1995): Static deformation and gravity changes at the Earth' surface due to the atmospheric pressure. PhD Thesis, Cath. Univ. Louvain, Belgium.

Wahr JM (1981): Body Tides on an Elliptical, Rotating, Elastic Earth without Oceans. Geophys. J. R. astr. Soc. 64, 677-703.

Wenzel HG (1996): The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30. Bull. d'Inf. Marées Terr. 124, 9425-9439.

ÚJ, ÁLTALÁNOS CÉLÚ KÉPOSZTÁLYOZÓ KIFEJLESZTÉSE NAGYFELBONTÁSÚ, TEXTÚRÁVAL RENDELKEZŐ DIGITÁLIS KÉPEK FELDOLGOZÁSÁRA

Czimber Kornél[*]

Development of a new, general image classifier to process high-resolution, textured digital images *- High-resolution digital images are accessible due to the improvement of remote sensors, but the traditional pixel-based classifiers are ineffective. This paper describes the development of a new, segmentation based image classifier to process these textured images, recognize and extract image objects.*

Keywords: digital image classification, texture, segmentation, shape recognition

A távérzékelő szenzorok fejlődésével olyan nagyfelbontású digitális felvételek érhetők el, melyek a hagyományos pixel alapú osztályozókkal nem dolgozhatók fel. Ez a dolgozat egy új, szegmentálás alapú képosztályozó kidolgozását tárgyalja, mely képes a textúrával rendelkező felvételeket feldolgozni, a képobjektumokat felismerni és kinyerni.

Kulcsszavak: digitális képosztályozás, textúra, szegmentálás, alakfelismerés

1 Bevezetés

A távérzékelés területén folyamatosan születnek új eredmények. Új távérzékelő szenzorok jelennek meg, ezekhez új képfeldolgozó algoritmusok születnek. A civil szféra számára is elérhetők már a méter alatti terepi felbontású műholdfelvételek, hiperspektrális felvételek és digitális légifényképek.

A nagyobb geometriai és radiometriai felbontású felvételek már nem dolgozhatók fel a hagyományos pixel alapú képfeldolgozó eljárásokkal. A nagyobb felbontás miatt a pixeleket már nem lehet környezetükből kiragadni. Helyette inkább a több pixelből álló képobjektumokat érdemes vizsgálni és osztályokba sorolni (Czimber 2000).

Jelen kutatás célja egy olyan általános képosztályozó kidolgozása, mely a nagyobb felbontású felvételek feldolgozásán túl más képosztályozási feladatokra is alkalmas. A kifejleszteni kívánt képosztályozóval szemben támasztott igények a következők, az osztályozó legyen alkalmas:

1. Kisfelbontású (*Landsat*) és nagyfelbontású (*Ikonos, Quickbird, légifelvétel*), textúrával rendelkező felvételek osztályozására;
2. Egysávos és többsávos (*multi- és hiperspektrális*) felvételek feldolgozására (1..1024 sáv);
3. Eltérő geometriai (*0.1 … 30 méter*) és radiometriai felbontású (*1…1000 sáv, 8…32 bit*) felvételek együttes feldolgozására;
4. Különböző, de nem távérzékelésből származó adatok integrálása (*domborzatmodell, tematikus térképek, geológiai, meteorológiai adatok*);
5. Eltérő időpontban készült felvételek feldolgozására (*idősorok, változás detektálás*);
6. Zajos radarfelvételek hatékony feldolgozására;
7. Osztályozott objektumok kinyerésére (*pont, vonal, poligon*);
8. Feliratok, alakzatok méret és forgatás független felismerése;

Az előbbi kívánalmakon túl elvárjuk, hogy az osztályozó legyen programozható, gyors, megismételhető, és minimális tudás is elegendő legyen a használatához.

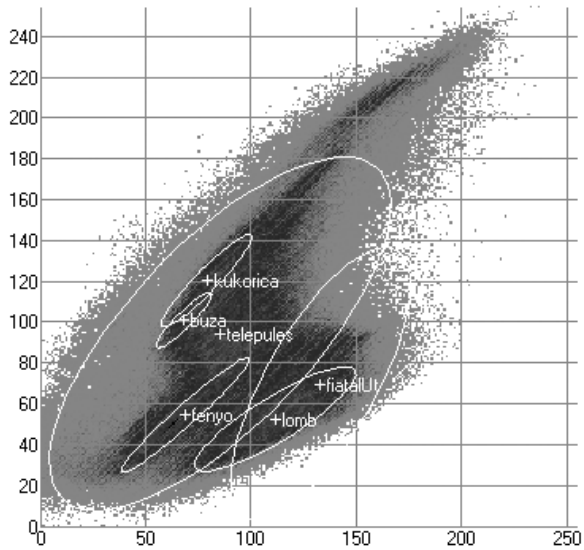
2 Képosztályozás

A képosztályozás célja, hogy a távérzékelt felvételről minél hatékonyabban határozzuk meg a felszínborítási kategóriákat (Csornai, Dalia 1991). A hagyományosnak tekinthető pixel alapú osztályozók kisebb felbontású felvételeken a mai napig is nagy pontossággal alkalmazhatók. Ilyenek az

[*]*NYME, EMK, FTT, 9400 Sopron, Bajcsy Zs. u. 4.*
E-mail: czimber@emk.nyme.hu

átlagtól való távolság, a legközelebbi szomszéd, a legnagyobb valószínűség, vagy a neurális hálózat osztályozók, de fuzzy logikát használó, pixel alapú szakértői osztályozók is ide sorolhatók.

Nagy felbontású felvételeken viszont ezek az osztályozók zavarba jönnek. A nagy felbontás miatt olyan részletek jelennek meg a képen, melynek pixeleit ezek az osztályozók más-más osztályba sorolják. Nagy felbontású felvételből előállított szóródási diagramon látható, hogy az osztályok 86.6%-os valószínűségi szintjeit jellemző ellipszisek jelentősen átfednek (1. ábra). Nagy felbontású felvételeknél a pixelek helyett valamilyen szempont szerint képzett nagyobb egységeket, homogénnek tekinthető pixelekből felépülő képobjektumokat célszerű osztályozni.

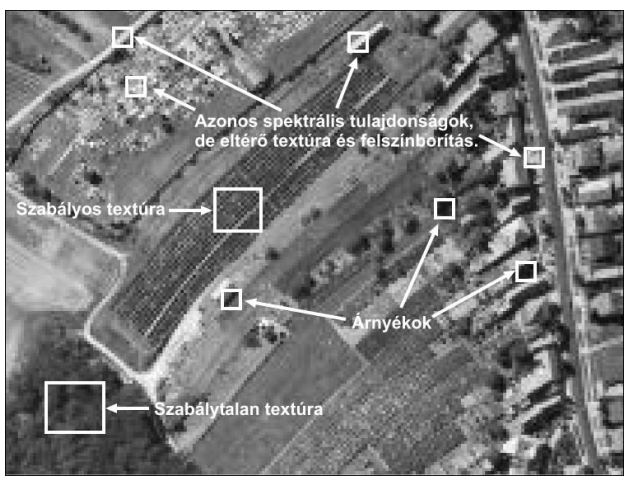


1 ábra. Nagyfelbontású felvétel szóródási diagramja az osztályok 86.6%-os valószínűségi szintvonalaival

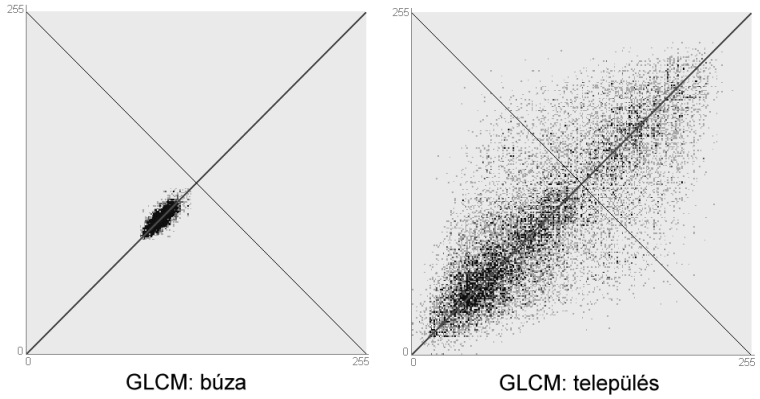
2.1 Textúra

Távérzékelt felvételek textúrája a kép részleteinek ismétlődése, az intenzitások szabályos vagy szabálytalan változása. A textúrát célszerű egy homogénnek tekinthető képobjektumon belül vizsgálni, ami egybeesik az osztályozni kívánt felszínborítási kategóriával. A textúra létrejöhet, ha a képobjektumon belül eltérő reflektanciájú felületek keverednek, vagy a felületek eltérő irányultsága miatt azok megvilágítása más. Előfordulhat az is, hogy a képobjektumon belüli tereptárgyak eltérő magassága árnyékokat hoz létre. Nagyfelbontású képeken a spektrálisan azonos tulajdonságú képobjektumoknak is lehet eltérő textúrája (2. ábra).

A textúra mérésére alkalmasak a képobjektumon belüli pixelek intenzitás értékeinek elsődleges statisztikái (*átlag, szórás, minimum, maximum*), és a másodlagos statisztikák. Utóbbihoz tartoznak például a differencia kép statisztikái (*minden pixel intenzitásértékének kétszereséből kivonjuk a tőle jobbra és lefelé lévő pixel értékeit*), valamint az intenzitás értékek keresztelőfordulási mátrixának (*GLCM –Grey Level Co-occurrence Matrix*) statisztikái.



2. ábra. Textúra egy nagyfelbontású digitális légifényképen



3. ábra. Kereszt előfordulási mátrix két felszínborítási kategória esetén

Egy *R* számú pixelből felépülő képből a kép sávjaival megegyező számú keresztelőfordulási mátrixot lehet előállítani. A négyzetes mátrix mérete megegyezik a kép szürkeárnyalatainak számával (*N, általában 256*). A kép pixeleiből és a pixel 8 szomszédjának intenzitásértékeiből párokat kell képezni. A szimmetrikus mátrix *i,j* (*i és j=0…255*) eleme megadja, hogy egy *i,j* intenzitásértékű pár milyen valószínűséggel fordul elő a képen. Két felszínborítási kategória keresztelőfordulási mátrixát grafikusan ábrázolja a 3. ábra (*sötétebb rész gyakoribb pixelpár előfordulást jelent*).

A kereszt előfordulási mátrix alapján Haralick (1979) dolgozott ki 13 textúra jellemzőt. A jellemzők előállítása számításigényes. Bizonyos jellemzőket gyorsan, a mátrix előállítása nélkül is lehet számítani (Miyamoto és Merryman: Fast Calculation of Haralick Texture Features, http://www.ece.cmu.edu/~pueschel/teaching/18-799B-CMU-spring05/material/eizan-tad.pdf). A textúra szempontjából azok a legfontosabb jellemzők, amelyek a pixelpárok előfordulásának kiterjedését írják le mátrix főátlója és mellékátlója mentén. A Haralick jellemzők a következők (Wagner 1999):

Nyomaték: $$f_1 = \sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{N-1} p(i,j)^2 \quad (1)$$

Kontraszt: $$f_2 = \sum_{n=0}^{N-1} n^2 p_{x-y}(n) \quad (2)$$

Korreláció: $$f_3 = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y}\sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{N-1}(ij)p(i,j) - \mu_x \mu_y \quad (3)$$

Négyzetösszeg: $$f_4 = \sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{N-1}(i-\mu)^2 p(i,j) \quad (4)$$

Inverz különbség nyomaték: $$f_5 = \sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{N-1}\frac{1}{1+(i-j)^2} p(i,j) \quad (5)$$

Átlag összeg: $$f_6 = \sum_{n=0}^{2N-2} n p_{x+y}(n) \quad (6)$$

Variancia összeg: $$f_7 = \sum_{n=0}^{2N-2}(n - f_6)^2 p_{x+y}(n) \quad (7)$$

Entrópia összeg: $$f_8 = -\sum_{n=0}^{2N-2} p_{x+y}(n)\log p_{x+y}(n) \quad (8)$$

Entrópia: $$f_9 = \sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{N-1} p(i,j)\log p(i,j) \quad (9)$$

Variancia különbség: $$f_{10} = \sum_{i=0}^{N-1} p_{x-y}(i)\left(i - \sum_{j=0}^{N-1} j p_{x-y}(j)\right)^2 \quad (10)$$

Entrópia különbség: $$f_{11} = -\sum_{i=0}^{N-1} p_{x-y}(i)\log p_{x-y}(i) \quad (11)$$

Korrelációs információ 1: $$f_{12,1} = \left(HXY - HXY1\right) / \max\left(HX, HY\right) \tag{12}$$

Korrelációs információ 2: $$f_{12,2} = \sqrt{1 - \exp\left(-2\left|HXY2 - HXY\right|\right)} \tag{13}$$

Maximális korreláció: $$f_{13} = \sqrt{\text{Q második legnagyobb sajátértéke}} \tag{14}$$

Rövidítések a Haralick jellemzők számításához:

$$p_x(i) = \sum_{j=0}^{N-1} p(i,j) \quad , \quad p_y(j) = \sum_{i=0}^{N-1} p(i,j) \tag{15}$$

$$p_{x-y}(n) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} p(i,j), \text{ahol} \left|i-j\right| = n \tag{16}$$

$$p_{x+y}(n) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} p(i,j), \text{ahol} \, i+j = n \tag{17}$$

$$\mu = \left(\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} p(i,j)\right) / R \quad , \quad \mu_x = \sum_{i=1}^{N} i p_x(i-1) \quad , \quad \mu_y = \sum_{j=1}^{N} j p_y(j-1) \tag{18}$$

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (i-\mu_x)^2 \, p_x(i-1)} \quad , \quad \sigma_y = \sqrt{\sum_{j=1}^{N} (j-\mu_x)^2 \, p_y(j-1)} \tag{19}$$

$$HXY = -\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} p(i,j) \log p(i,j) \tag{20}$$

$$HXY1 = -\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} p(i,j) \log\left(p_x(i) p_y(j)\right) \tag{21}$$

$$HXY2 = -\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} p_x(i) p_y(j) \log\left(p_x(i) p_y(j)\right) \tag{22}$$

$$HX = -\sum_{i=0}^{N-1} p_x(i) \log p_x(i) \quad , \quad HY = -\sum_{j=0}^{N-1} p_y(j) \log p_y(j) \tag{23}$$

$$Q(i,j) = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{p(i,k) p(j,k)}{p_x(i) p_y(j)} \tag{24}$$

2.2 Szegmentálás

A textúra vizsgálata céljából a képet homogén részekre, szegmensekre kell bontani. A szegmensek spektrálisan hasonló pixelekből épülnek fel. A kép homogén részekre bontását szegmentálásnak hívjuk. A szegmentálás előnye, hogy a homogén részleteket egy egységként kezeli. A szegmens a pixelek spektrális jellemzőin kívül számos statisztikai és geometriai ismérvet is tárol, amelyek bonyolultabb osztályozási eljárások alapjául szolgálhatnak. A szegmentálásnak megismételhetőnek és gyorsnak kell lenni. A szegmentálás eredménye legyen elfogadható az emberi szem számára.

Az első szegmentálási eljárások a spektrális térben képeztek a spektrális közelség alapján halmazokat. Az azonos halmazba tartozó és egymás melletti pixelekből alkották a szegmenseket.

Más eljárások a szegmensek határait igyekeznek felderíteni élmegőrző szűrőkkel. Ezek az eljárások problémába ütköznek, ha az egymás melletti pixelek között nincsenek éles határok.

A harmadik szegmentálási csoportba azok az eljárások tartoznak, amelyek kezdetben az egész képet egy szegmensnek tekintik, és ezt a szegmenst rekurzív módon részekre bontják legtöbbször piramisképek segítségével. Ez a csoport a fentről-lefelé (*Top-down*) szegmentálás nevet viseli.
Ezzel ellenkező a lentről-felfelé (*Bottom-up*) eljárások csoportja, mely a pixelekből indul ki. A kiinduló pixelek összekapcsolásával egyre növekvő területű szegmenseket hoz létre. Ennél a negyedik csoportnál a legnagyobb gondot az okozza, hogy mi legyen a kiinduló pont. Az eljárások egyik része magpontokat keres a képen (*homogén képterületek*), a másik része viszont minden pixelt egy magpontnak tekint. A kutatáshoz ezt az utóbbi típust választottuk.

2.3 Lentről-felfelé területnövesztő szegmentálás

Ez a szegmentálási típus kezdetben minden pixelt egy szegmensnek tekint. A szegmentálás során a leginkább hasonló szegmenseket összekapcsoljuk. A két egymás melletti leghasonlóbb szegmens kiválasztása történhet lokálisan és globálisan. Utóbbinak nagyon nagy a számításigénye, ezért a lokális kiválasztás javasolt.

Egy szegmensen belüli homogenitás mérésére legalkalmasabb az intenzitásértékek szórása (Baatz, 2000). Többsávos kép esetén a sávok szórásának súlyozott átlagát kell képezni. Célszerű a szórást egy alakjellemzővel is kiegészíteni, hogy ne képződjenek szabdalt alakzatok. Erre legalkalmasabb a szegmens kerületének és területének viszonyát kifejező alakszám. Egy szegmens h homogenitása, b számú sáv, sávonként σ_i szórás és w_i súly, a alakjellemző súly, l szegmens kerület, és n szegmensen belüli pixelszám esetén a következőképp írható fel:

$$h = (1-a)\frac{\sum_{i=1}^{b} w_i \sigma_i}{\sum_{i=1}^{b} w_i} + a\frac{l}{\sqrt{n}} \tag{25}$$

A szegmensek összevonásánál a lokális környezetben azt a két szegmenst kell kiválasztani, amelynél az összevonás utáni homogenitás és az összevonás előtti homogenitások különbsége a legkisebb, vagyis a homogenitás változása minimális. A szegmensek összevonása akkor ér véget, amikor már nem található két olyan egymás melletti szegmens, ahol a homogenitás változása egy előre megadott értéknél kisebb. Kezdetben ez az érték nagy, mivel a szegmensek mérete néhány pixel. Az összevonás során azonban ezt az értéket csökkenteni kell. Erre legalkalmasabb, ha a homogenitást a szegmensek területével összeszorozzuk (Baatz, 2000) és a súlyozott értéket hasonlítjuk egy konstans küszöbértékhez. Ha az összevont szegmens homogenitása h_m, pixelszáma n_m, a kiinduló két szegmens homogenitásai h_1, h_2 és pixelszámai n_1, n_2, akkor a homogenitás változása a következő módon számítható:

$$\Delta h = h_m n_m - h_1 n_1 - h_2 n_2 \tag{26}$$

Nagyméretű képfájlok esetén nem kivitelezhető az, hogy kezdetben minden pixel egy szegmens legyen. Egy 4600x4600 pixel méretű színes képnél (*60 Megabájt*) a szegmensek memóriaigénye 2 Gigabájt lenne. Ezt a hatalmas memóriaigényt úgy kerülhetjük el, ha a képet soronként olvassuk. Az újonnan beolvasott sorok pixeleiből létrehozott szegmenseket a meglévő szegmensekhez kötjük. Az új szegmensek megjelölésével pedig azt szabályozhatjuk, hogy első körben ne vegyen részt a szegmens összevonásban, amíg az alatta levő szegmensek létre nem jönnek.

A korábbi szegmenseket egy geometriai kód szerinti sorrendben vizsgálunk és keressük a lokálisan legjobb összevonási lehetőséget. A geometriai kód gondoskodik arról, hogy a sorrendben egymást követő szegmensek minél távolabb helyezkedjenek el a képen. Ezzel elkerülhető a sodródás, melynek következtében az első szegmensek magukhoz ragadják a következő szegmenseket. A szegmentálás véget ér, ha a kép minden sorát átolvastuk és nem maradt két összevonásra alkalmas szegmens, ahol a homogenitás változása kisebb, mint a küszöbérték. Egy szegmentálási eredményt mutat a 4. ábra.

4.4 Szegmens jellemzők

A szegmentálás során a szegmenseket egy olyan adatszerkezetben tároljuk, ahol az összes szegmentáláshoz és később az osztályozáshoz szükséges jellemző helyet kap. Ezen kívül a szegmens geometriáját is tárolni kell az alakfelismerés és a képobjektum kinyerése miatt. A szegmensek esetleges nagy száma miatt célszerű csak a legfontosabb jellemzőket tárolni az adatszerkezetben, és a többit igény szerint számítani.

A szegmens legfontosabb adatai a terület (*pixelszám*), a kerület és pixelek sávonkénti átlag és szórás adatai. A szegmensek összevonásához minden szegmensnél tárolni kell a szomszédos szegmensek azonosítóit, a határosság hosszát és geometriáját. Utóbbit egy kezdőpont és iránykódok (*2*



4. ábra. UltraCAM-D digitális légifényképező kamerával készült felvétel és a szegmentálás határvonalai. Küszöbérték=160, alakjellemző súlya=0,5.

biten ábrázolt négy égtáj iránya) sorozatával célszerű rögzíteni. Két szegmens összevonásakor a határt törölni kell, a kerület és terület adatokat, valamint a sáv statisztikákat frissíteni. A törölt szegmens szomszédjait és geometriáját a megmaradt szegmens örökli.

Sok szegmensjellemző számítható a tárolt adatokból, úgymint sáv maximum, szaturáció, sávok átlagértékeinek hányadosai, alakszám, geometriai kiterjedés, geometriai középpont.

A szegmens szomszédjainak spektrális és alakjellemzői a szomszédokat tároló tömb alapján számíthatók. Ezeket a jellemzőket lehet számítani irány szerint, súlyozni a határosság hosszával, de a szegmens és a szomszédok közötti viszonyszámmal is megadható.

A Haralick textúra jellemzőket viszont a végleges szegmensek kialakítása után kell számítani. Ehhez az eredeti képet soronként újra kell olvasni. Minden egyes pixelt a szegmens geometriája alapján meg kell határozni, hogy melyik szegmensbe esik, majd a pixelpárok képzése után a jellemzők számíthatók. Csak azokat a textúra jellemzőket számítjuk, amelyek a GLCM előállítása nélkül is meghatározhatók.

Az alakfelismeréshez szükséges sajátértékek, nyomatékok számítása elegendő az osztályozás után, a szegmens geometriája alapján számítani.

2.5 Szegmensek adaptív osztályozása

A szegmensekben tárolt és számítható jellemzők nagy száma miatt egy szegmens osztályba sorolásához az optimális jellemzők kiválasztása komoly szakértelmet igényel. Egy szakértői osztályozóban például a következő feltételeket szerepelhetnek:

1. Erdő: sötétzöld, nagy kiterjedés, szórás közepes, textúra közepes,
2. Magányos fa: sötétzöld, kis méret, szórás közepes, mellette adott irányban árnyék,
3. Erdei út: világossárga, hosszúkás, szomszéd sötétzöld, nincs textúra,
4. Település: kis méret, szomszédok szórása nagy, textúra nagy,
5. Szántó: világoszöld, vagy drapp, vagy sárga, kis szórás, nagy méret, textúra kicsi.

A hagyományos képosztályozásban az operátor tanulóterületeket és teszterületeket jelöl ki az osztályozó felállítására és tesztelésére. A szakértői megállapítások helyett mi is ezt az utat követjük. A hasonló spektrális tulajdonságú tanulószegmensek alapján a jellemzőket automatikusan súlyozzuk, az osztályozót automatikusan paraméterezzük. Ez az alapja az új képosztályozó működésének. Tesztszegmensek alapján az osztályozó pontossága vizsgálható. Két *i*,*j* szegmens *f* jellemzőjének a σ_f szórással normalizált távolsága:

$$D(i, j, f) = \left| f_i - f_j \right| / \sigma_f \tag{27}$$

Hatékonyabban lehet dolgozni, ha a jellemzők távolságát a fuzzy-logika exponenciális tagsági függvényével (Kóczy, Tikk 2000) fejezzük ki (*k=20*):

$$S(i, j, f) = \exp\left(-kD(i, j, f)^2\right) \tag{28}$$

Egy szegmens elsődleges jellemzői a sávonkénti átlagértékek. Az átlagértékek eltérése alapján számítható két szegmens spektrális közelsége. A fuzzy-logika algebrai *ÉS (AND)* művelete alapján két szegmens spektrális közelsége a μ átlagok közelségének szorzataként írható fel:

$$C(i, j) = \prod_{b=1}^{sávok} D(i, j, \mu_b) \tag{29}$$

Két szegmens spektrálisan közel van, ha a *C(i,j)* érték egy megadott ε (ε = 0…1) küszöbértéknél nagyobb. Az osztályozó paraméterezése és a szegmensek osztályozása a spektrálisan közeli szegmensek alapján történik, mivel egy osztály tartalmazhat spektrálisan eltérő szegmenseket is.

A másodlagos jellemzők közé tartozik a sávok átlagértékein kívül minden más jellemző. Az adaptív osztályozó paraméterezése a másodlagos jellemzők súlyozásából áll, amit tanulószegmensenként és jellemzőkként két súlyértékkel állítunk be. Az első súly értékét az azonos osztályba tartozó, spektrálisan közeli szegmensek közeli jellemzői növelik. Egy *i* tanulószegmens *f* jellemzőjének *A* súlya az azonos osztályba tartozó spektrálisan közeli *m* számú szegmens alapján a következő módon számítható:

$$A_{if} = \sum_{j=1}^{m} C(i, j) S(i, j, f) \Big/ \sum_{j=1}^{m} C(i, j) \tag{30}$$

A második súly az eltérő osztályba tartozó, de spektrálisan közeli szegmensek elkülönítése szempontjából fontos jellemzőket választja ki. Ha a szegmensek *f* jellemzője egymástól távol van, akkor ez a jellemző szignifikáns az elkülönítés szempontjából. Egy *i* tanulószegmens *f* jellemzőjének *B* súlya az eltérő osztályba tartozó, de spektrálisan közeli *n* számú szegmens alapján a következő módon számítható:

$$B_{if} = \sum_{j=1}^{n} C(i, j)(1 - S(i, j, f)) \Big/ \sum_{j=1}^{n} C(i, j) \tag{31}$$

Az osztályozó paraméterezése után a tanulószegmenseken kívüli szegmensek osztályozása következik. Először a szegmensekhez kiválogatjuk a spektrálisan közeli tanulószegmenseket. A szegmenst abba az osztályba soroljuk, amelyhez a legközelebbi tanulószegmens tartozik. Az i tanulószegmens és j szegmens közelsége *F* számú jellemző esetén:

$$G_{ij} = C(i, j) \frac{\sum_{f=1}^{F} \left(A_{if} + B_{if}\right) S(i, j, f)}{\sum_{f=1}^{F} \left(A_{if} + B_{if}\right)} \tag{32}$$



5. ábra. A 4. ábrán látható szegmentált kép osztályozásának eredménye

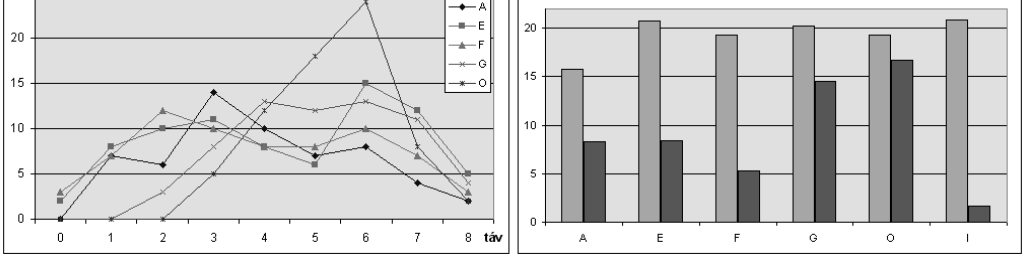
Az osztályozás egyfajta legközelebbi szomszéd osztályozónak is felfogható (*nearest neighbourhood*), de ez a módszer a spektrális hipertér helyett a jellemzők osztályonként változó dimenziójú hiperterét használja.

Ha minden egyes szegmenshez kiválasztjuk a legközelebbi tanulószegmenst, akkor az osztályozással készen vagyunk. Az osztályozás eredménye (5. ábra), az osztályba sorolás szintje, az osztályozás stabilitása (*első két legközelebbi osztályba sorolás közötti különbség*), grafikusan és numerikusan is megjeleníthető.

Az osztályozás paraméterezése és az osztályozás, köszönhetően a szegmensek kis számának, egy gyors folyamat. Ezért az osztályozás után bármikor lehetőségünk van további tanulószegmensek kijelölésére, vagy meglévő tanulószegmensek törlésére. Az osztályozást ezért interaktívan is végezhetjük. Az osztályozás további előnye abban rejlik, hogy nem kell a jellemzőket manuálisan kiválasztanunk, nem kell a jellemzők szignifikancia vizsgálatát elvégeznünk.

2.6 Alakfelismerés

A szegmensek osztályozása után következhet az egymás melletti és azonos osztályba sorolt szegmensek összevonása, majd ezeknek az összevont objektumoknak a kinyerése. A kinyerés előtt beilleszthető az alakfelismerés művelete. Ilyenkor az objektum geometriája helyett az objektumhoz hozzárendeljük a felismert alakzat azonosítóját, méretét, elforgatását. Az alakfelismerés alkalmas betűk, út felfestések, autók, háztetők, fák, illesztőpontok, vonalas létesítmények azonosítására.



6. ábra. 16 pixel magas betűk pixeleinek distogramjai és sajátértékei

A distogram egy tapasztalati sűrűségfüggvény, mely megmondja, hogy az alakzat középpontjától számított távolság-intervallumokba hány pixel esik. A távolságot az alakzat méretével célszerű normalizálni. A 6. ábra karakterek néhány felhasználható alakjellemzőjét mutatja grafikusan.

Hu (1962) dolgozott ki hét invariáns nyomatékok az alak eltolás-, forgatás- és méretarány-független leírására. Az invariáns nyomatékokhoz szükséges három rövidítés:

$$\mu_{pq} = \sum_i (x_i - \bar{x})^p (y_i - \bar{y})^p \quad , \quad \eta_{pq} = \mu_{pq} / \mu_{00}^{\gamma} \quad , \quad \gamma = 1 + (p+q)/2 \tag{33}$$

A hét invariáns nyomaték ezek után a következő:

$$M_1 = (\eta_{20} + \eta_{02})^2 \tag{34}$$

$$M_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2 \tag{35}$$

$$M_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \tag{36}$$

$$M_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \tag{37}$$

$$\begin{aligned} M_5 = {} & (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})\left[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2\right] + \\ & (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})\left[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2\right] \end{aligned} \tag{38}$$

$$M_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})\left[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2\right] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \tag{39}$$

$$\begin{aligned} M_7 = {} & (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})\left[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2\right] - \\ & (\eta_{30} + 3\eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03})\left[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2\right] \end{aligned} \tag{40}$$

Ha a képobjektumhoz a jellemzők hasonlósága alapján megtaláljuk a legjobban hasonlító referencia alakzatot, és ez a hasonlóság egy megadott küszöbérték feletti, akkor a képobjektum alakfelismerését sikeresnek tekinthetjük.

3 Összefoglalás

Célkitűzések alapján összeállt egy általános képosztályozó, mely tetszőleges geometriai és radiometriai felbontású képet képes feldolgozni, és eredményesen osztályozni, tekintettel a textúrára is.

Az osztályozást egy szegmentálás előzi meg, mely a képet kisebb, homogén részekre bontja. Az osztályozó lényege abban rejlik, hogy a szegmentálás során kapott szegmensek nagyszámú jellemzőit automatikusan súlyozza, ezáltal kiválasztva a szignifikáns jellemzőket. Az osztályozó tanításához elegendő csak tanulóterületeket kijelölni. Az osztályozást követően lehetőség van referencia alakzatok alapján alakfelismerésre is.

A kutatás során egy program is készült az eredmények teszteléséhez. A kutatást még nem lehet lezártnak tekinteni, lehetőség van a szegmentálást finomítani és továbbfejleszteni a többfázisú szegmentálás irányába. Az osztályozásba további jellemzők vonhatók be. Az osztályozót további mintaállományokon kell tesztelni. Az alakfelismeréshez könyvtárak fejleszthetők.

Köszönetnyilvánítás. Köszönetet mondok a kutatás támogatóinak: NYME Erdő és Fahasznosítási Egyetemi Tudásközpont, OTKA, DigiTerra Kft.

Hivatkozások

Baatz M, Schäpe A (2000): Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: Strobl, J. and Blaschke, T. (Eds.): Angewandte Geogr. Informationsverarbeitung XII, Wichmann, Heidelberg, pp. 12-23.

Csornai G, Dalia O (1991): Távérzékelés, Jegyzet, Székesfehérvár.

Czimber K (2000): Geoinformatika. Jegyzet, Sopron.

Haralick R (1979): Statistical and structural approaches to texture. Proc. IEEE, 67; 5, 786-804.

Hu M K (1962): Visual pattern recognition by moment invariants, IEEE T. Inf. 8; 2, 179-187.

Kóczy L, Tikk D (2000): Fuzy rendszerek. Typotex Kiadó, Budapest.

Wagner T (1999): Texture analysis. Handbook of computer vision and applications, chapter 12, pages 275-308. Academic Press, San Diego.

KÖZELFOTOGRAMMETRIAI KAMERÁK MINŐSÍTÉSE ÁTLAGOS KÉPKOORDINÁTA KÖZÉPHIBA-TÁRGYTÁVOLSÁG FÜGGVÉNNYEL

Fekete Károly[*]*, Mélykúti Gábor*[**]*, Schrott Péter*[*]

Qualification of close range photogrammetry cameras using average image coordinate rms error vs. object distance function – *In this publication, the concept of image coordinate RMS error derived from object side average RMS error is introduced. In the course of derivation, data of network geometry and redundancy were taken into consideration; thereby camera output for a given object distance was characterized by this quantity independent of the shooting arrangement. If this value is determined for several object distances, a function of average image coordinate RMS error vs. object distance is yielded, which, in our opinion, properly characterizes the photogrammetric potential of a given camera. This function was determined – using new measurement results – for a mobile phone with a camera and for a digital camera frequently applied in our days; in addition, the function was generated for a professional camera used in the 1990s, KODAK DCS, using former results.*

Keywords: close range, accuracy analysis, non-metric camera, network design

Jelen publikációnkban bevezettük az átlagos tárgytéri középhibából levezetett képkoordináta középhiba fogalmát. A levezetésünk során figyelembe vettük a hálózati geometriára és a redundanciára vonatkozó adatokat és ezáltal a fényképezési elrendezéstől független mennyiséggel tudtuk jellemezni egy kamera adott tárgytávolságra vonatkozó teljesítményét. Ha ezt az értéket több tárgytávolságra meghatározzuk, kapunk egy átlagos képkoordináta középhiba-tárgytávolság függvényt, ami megítélésünk szerint jól jellemzi egy adott kamera fotogrammetriai potenciálját. Ezt a függvényt új mérési eredmények felhasználásával meghatároztuk egy kamerás mobiltelefon és egy napjainkban sűrűn alkalmazott digitális fényképezőgép esetében, valamint régi eredmények felhasználásával előállítottuk a 90-es évek professzionális gépére, a KODAK DCS-re.

Kulcsszavak: közelfotogrammetria, pontossági vizsgálat, nem-metrikus kamera, hálózattervezés

1 Bevezetés

A digitális eszközök kizárólagossá válása a közelfotogrammetriában, a fényképezési kultúra igen széles elterjedése, új eszközök megjelenése, mint például a kamerás mobil telefonok, webkamerák (Ebrahim 2004) felvetik a kérdést, hogy melyik eszközt tulajdonképpen mire tudjuk használni fotogrammetriai szempontból. Jelen publikációnkban erre a kérdésre keressük a választ és egy lehetséges megoldást megadunk az átlagos képkoordináta-középhiba – tárgytávolság függvény felhasználásával. Megítélésünk szerint ez a függvény jól jellemzi egy felvevő fotogrammetriai potenciálját, tehát a felhasználó megállapíthatja belőle, hogy tulajdonképpen milyen feladatra használhatja fel eszközét.

2 A vizsgálat módszere

2.1 Az átlagos tárgytéri középhibából levezetett képkoordináta középhiba

A közelfotogrammetriai hálózatokat pontjaikkal helyettesítjük. A hálózat meghatározása ezen pontok koordinátáinak a meghatározását jelenti. A hálózatok minősítése a pontkoordinátákhoz kötődik. Ha keressük az összefüggést a tárgyoldali pontok és a képkoordináták pontossága között, akkor könnyen beláthatjuk, hogy ezek egyenes arányban vannak, de azt is egyszerűen beláthatjuk, hogy ez az érték más tényezőktől is függ. A közelfotogrammetriai szakirodalom szerint (Fraser 1996; Mason

[*]*BME Fotogrammetria és Térinformatika Tsz., 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.*
E-mail: feketekaroly@mail.bme.hu
[**]*NyME GEO, 8000 Székesfehérvár, Pirosalma u. 1-3.*

1995) ezek a tényezők elsősorban a kép méretaránya, a hálózati redundancia mértéke és egy a hálózat alakjára jellemző ún. tervezési faktor. Az összefüggést Fraser (1996) képletben a következő formában adta meg:

$$\overline{\sigma}_c = \frac{q}{\sqrt{k}} S\sigma = \frac{q}{\sqrt{k}} d\sigma_a \tag{1}$$

ahol $\overline{\sigma}_c$ az *X,Y,Z* tárgyoldali koordináták tapasztalati hibája,
S a méretarányszám; $S = d / c$,
d a tárgytávolság,
σ a képkoordináták átlagos hibája,
σ_a a szögmérés hibája,
q a hálózatra jellemző tervezési faktor,
k a hálózati redundancia mértéke.

Az (1) összefüggésben q a tapasztalati úton történő közelfotogrammetriai hálózattervezésnél a hálózati készlet egyes alap hálózataihoz megadott konkrét számértékek, konvergens több álláspontú közelfotogrammetriai hálózatok esetében értéke kisebb, mint 0.8. A k értékét egy alap hálózatnál többnyire egynek adják meg, és szükség esetén új képek készítésével értéke növelhető, de értéke a korreláció függvényében lehet nem egész szám is. A közelfotogrammetriai hálózattervezés kérdéseiről és q, valamint k értékeinek felvételéről részletes magyar nyelvű publikáció létezik (Fekete 2006). Ha az (1) egyenletből kifejezzük a tárgytávolságot, akkor a következő összefüggést kapjuk:

$$d = \frac{\overline{\sigma}_c \sqrt{k} c}{q\sigma} \tag{2}$$

Ez a tárgytávolság adott pontossági viszonyok fenntartása mellett vehető maximális tárgytávolságnak, mert ha távolabb visszük a kamerát a tárgyoldali koordináták tapasztalati középhibája is nő azonos kameraállandó esetében.

Az (1) összefüggés a (2) figyelembevételével magában hordja a lehetőséget, hogy bizonyos tárgytávolsági tartományokban egy kamera, mint felvételi egység minősítését elvégezzük. Az összefüggésben szereplő a hálózat geometriájára és a redundanciára vonatkozó értékek ráadásul megadják a lehetőségét annak, hogy értékeinket ezektől a paraméterektől függetlenítsük. Különböző, más elrendezésű hálózatok felhasználásával az is lehetővé válik, hogy ezeket a mennyiségeket ne egyetlen számként adjuk meg, hanem a pontokra illesszünk egy függvényt, ahol a változó mennyiség a tárgytávolság. Megítélésünk szerint ez a függvény jól jellemzi az illető felvevő fotogrammetriai potenciálját.

Publikációnk további részében több digitális felvevő minősítéséről számolunk be. A minősítés módszere, hogy ismert koordinátákkal rendelkező különböző teszt-területeket fényképezve a bemért pontok közül többet a fotogrammetriai tárgyoldali rekonstrukció során új pontként meghatározva valódi hibákból számíthatunk átlagos tárgyoldali középhibát:

$$\sigma_X^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_X} \Delta X_i^2}{n_X}, \quad \sigma_Y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_Y} \Delta Y_i^2}{n_Y}, \quad \sigma_Z^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_Z} \Delta Z_i^2}{n_Z}, \tag{3}$$

ahol σ_X^2, σ_Y^2, σ_Z^2 varianciák,
$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ koordináta különbségek,
n_X, n_Y, n_Z darabszám.

A (3) összefüggésből kapott varianciák összegének négyzetgyöke adja a keresett átlagos tárgyoldali középhibát. Ha ezt az értéket az (1) összefüggésbe behelyettesítjük, az egyenletet átrendezve meg-

kapjuk az erre a tárgytávolságra vonatkozó csak erre a felvevő berendezésre és erre a felvételi tartományra érvényes átlagos képkoordináta középhibát.

Elméletünket alátámasztandó többféle kamerával, többféle elrendezéssel és tárgytávolsággal méréseket végeztünk, és meghatároztuk ezen kamerák esetén a címben említett függvényt.

2.2 A vizsgálatba bevont kamerák

Három különböző kamerát használtunk a kísérleteinkben:

1. Egy viszonylag olcsó mobiltelefont (*Samsung SGH-D600E*) beépített 2 megapixeles fix f=3.35 mm-es kamerával (1. ábra)
2. Egy *Kodak DCS-420*–as kamerát, mely az egyik első digitális tükörreflexes fényképezőgép volt. A fényképezőgép egy hagyományos Nikon N90 fényképezőgép vázra szerelt 1.3 megapixeles érzékelővel rendelkező digitális hátfalból, az adatokat rögzítő merevlemezből és elektronikából állt, amit egy Nikon 50mm F1.8-as objektívvel használtunk. (2. ábra) Erről a fényképezőgépről a nemzetközi szakirodalom a ’90-es években igen elismerően nyilatkozott. Sajnos a fényképezőgép jelenleg nem működik, ezért a minősítéshez korábban ezzel a géppel készült felvételek kiértékelését végeztük el újra, az ehhez a vizsgálathoz szükséges szempontok figyelembevételével.
3. Egy *Sony DSC-R1* típusú fényképezőgép, mely egy korszerű, jó minőségű, de nem profesz-szionális kamera. 10.3 megapixeles CMOS szenzora és egy Carl-Zeiss 24-120mm F2.8-4.8 objektívje van. (3. ábra)

2.3 A felhasznált teszt-területek

Kis tárgyak felmérésére a közelfotogrammetriában szokásos módszer, hogy megépítenek egy szabatos nagy stabilitású hálózatot, azt pontosan bemérik és a különböző kisebb méretű tárgyakat ebbe az előre legyártott hálózatba helyezve fényképezik le és határozzák meg a szükséges geometriai paramétereket. Ilyen hálózat épült a BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszéken is, amely építéséről, beméréséről, a hozzá tartozó felvételezési terv készítéséről a korábbiakban magyar nyelven is beszámoltunk (Tóth et al. 2005). Jelen publikációban a kis, néhány tíz centiméterre vonatkozó kamera paramétereket is ennek a mobil teszt-területnek a felhasználásával nyertük. A teszt-területet hitelesítés közben az 4. ábra mutatja. A mobil teszt-terület fényképezését a Mason (1955) által megadott elrendezés szerint végeztük.

A 2-4 m-re vonatkozó kamera paraméterek meghatározása egy síkbeli elrendezésű beltéri teszt-terület felhasználásával történt. A síkbeli elrendezésből esetlegesen adódható feldolgozási nehézségeket ferde tengelyű felvételezéssel küszöböltük ki. A teszt-területet az 5. ábra mutatja. Mint az ábrából is látszik ennél a megoldásnál gyakorlatilag korlátlan számú, ismert koordinátájú pont felhasználása lehetséges. Ennek a teszt-területnek a fényképezése is a Mason-féle alap hálózati elrendezés szerint készült.



1. ábra Samsung SGH-D600E



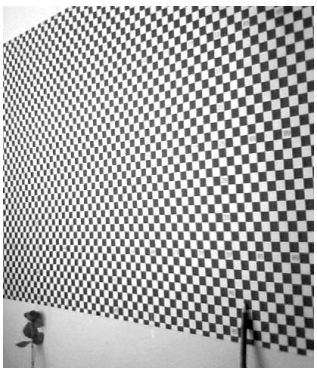
2. ábra Kodak DCS-420



3. ábra Sony DSC-R1



4. ábra Mobil teszt-terület hitelesítés közben



5. ábra Beltéri teszt-terület



6. ábra Földi teszt-terület

A nagyobb távolságú fényképezés vizsgálatára készült földi teszt-területet a 6. ábra szemlélteti. Ez a BME udvarán létesített teszt-terület geodéziai módszerrel lett bemérve, azaz az előzetesen jelölt pontok 3D koordinátája adva van. A pontok elhelyezkedése lehetőséget biztosít megfelelő számú és pontosságú, megfelelő mélységbeli eltéréssel rendelkező, a képeken egyenletesen elhelyezkedő illesztő- és kontrol pontok megválasztására. A földi teszt-terület fényképezését a Schlögelhofer (1989) által megadott elrendezés szerint végeztük.

2.4 A képkoordináták meghatározása és a tárgyoldali rekonstrukció megoldása

A fotogrammetriai mérések értelemszerűen nem magán a tárgyon, hanem a róla készült képeken történnek. A digitális fényképezés végtermékei képfájlok, melyeket jellemzően monitoron értékelnek ki. Ugyanakkor a kiértékelés nem azonos pusztán a kiértékelendő pixel sor és oszlopszámának meghatározásával, ennél ugyanis pontosabb meghatározás is lehetséges. A szakirodalom szerint megfelelő módszerekkel 0.1 pixel alatti pontosságot is el lehet érni. (Fraser 1996)

A szakirodalom hangsúlyozza (pl. Luhmann 2000) a pontjelölés fontosságát a fotogrammetriai kiértékelés pontossága szempontjából. Esetünkben kézi kiértékelés, ék alakú pontjelek és megfelelő pixel alatti pontosságot lehetővé tevő módszerek használatával ugyanazon pontot többször megmérve a pontok szórása a tárgytávolságtól függetlenül 0.3 pixel alatt maradt, így ezt az értéket fogadtuk el, mint a képkoordináta kiértékelés hibáját.

A képkoordináták kiértékeléséhez a BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszékén fejlesztett, Direkt Lineáris Transzformációt (DLT) alkalmazó szoftvert használtunk. (Schrott 2005) A DLT közvetlen kapcsolatot teremtet a pontok képkoordinátáinak komparátor koordináta-rendszeri koordinátái és tárgyoldali koordinátái között, így alkalmas nem-metrikus kamerák által készített képek feldolgozására is, szemben a hagyományos sugárnyaláb-kiegyenlítéses módszerrel. A tanszéki DLT program nem teljes kiértékelő szoftver, csak a képkoordinátákból számít tárgyoldali koordinátákat. A képkoordinátákat AutoCAD szoftver segítségével határoztuk meg.

3 A kapott eredmények értékelése

Dolgozatunkban a három vizsgált kamerára megadjuk a címben szereplő függvény képét. Jelen publikációban a minősítés módszerének leírására vállalkoztunk. A számszerű minősítést és a tényleges függvény-illesztés elvégzését jelen esetben nem láttuk szükségesnek, mivel a mérési eredmények pontjainak lineáris interpolációjával kapott függvény-jellegű görbe elemzése is választ tudott adni a kérdéseinkre. Az eredmények elemzéséből több következtetést vontunk le:

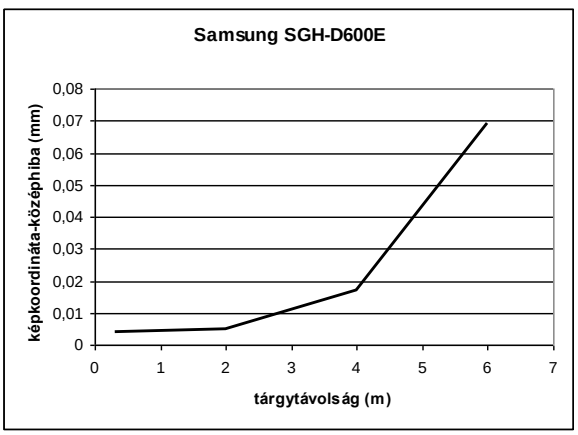
Kísérleteink során bebizonyosodott, hogy a tárgyoldali pontok homogenitását csak a negyedik, jó geometriai elrendezést adó kép bevezetésével és az illesztőpontok megfelelő redundanciájával érhetjük el. A pontosság növelése érdekében a negyedik kép igénybe vétele fontosabb, mint az il-

lesztőpontok számának a növelése. A redundancia növelésével a pontosság növekedése egy határnál lényegesen lelassul.

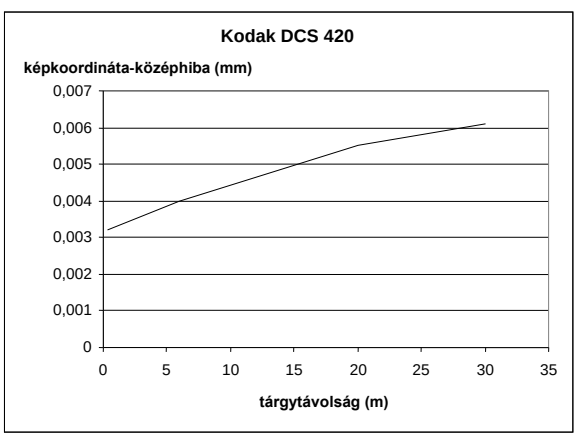
Ami a vizsgált kamerák fotogrammetriai potenciálját illeti, több meglepő eredményt is kaptunk. A kamerás mobiltelefon esetében igen kis, néhány tíz centiméteres tárgytávolságból végzett felvételekből relatív nagy és homogén pontosságú tárgyoldali adatok nyerhetők még ilyen egyszerűbb kamerás mobiltelefon felhasználása esetén is. A függvény parabola-szerű alakja azonban jól mutatja, hogy a fotogrammetriai felhasználhatósága a tárgytávolság növekedésével drasztikusan romlik. (7. ábra)

A mobiltelefonnal összemérhető felbontású Kodak kamera függvénye alátámasztja azokat a kiváló eredményeket, amelyekkel a szakirodalomban is éveken keresztül találkoztunk. (8. ábra) Nemcsak számszerűen jobbak az eredményei a mobiltelefonos kamerával szemben, de a függvény közel lineáris, vagyis a tárgytávolság sokkal kevésbé befolyásolja az eredmények pontosságát.

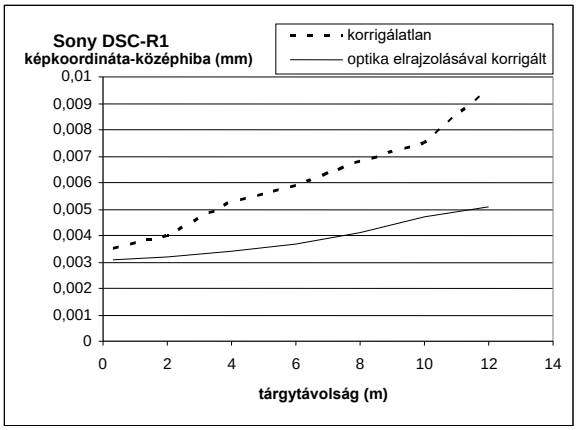
A Sony kamerának két függvényét is megadjuk. (9. ábra) Ennek oka, hogy ha a képkoordinátákat csak mint mérési eredményeket vittük be a számításainkba, akkor rosszabb eredményeket kaptunk, mint a Kodakkal – dacára a nagyságrendileg nagyobb felbontásnak és a kettő közti évtizedes korkülönbségnek. Ezt a kamera optikai hibáinak tulajdonítjuk, amely bebizonyosodott, mikor az optika radiális elrajzolását a beltéri teszt-terület felhasználásával készült felvételek alapján meghatároztuk, majd a számításokat az elrajzolási függvénnyel korrigált képkoordinátákra megismételtük. Az így kapott függvény egy fotogrammetriai célra sokkal jobban alkalmas kamerát mutat.



7. ábra Samsung kamerás telefon függvénye



8. ábra Kodak DCS 420 fügdgvénye



9. ábra Sony DSC-R1 függvényei

Hivatkozások

Ebrahim MA (2004): Using Mobile Phone Cameras in Digital Close Range Photogrammetry. The Photogrammetric Journal of Finland, 19; 1, 11-22.

Fekete K (2006): Hálózattervezési kérdések a közelfotogrammetriában. Geodézia és Kartográfia III, 12-23.

Fraser CS (1996): Network Design. In: Atkinson, K.B. (Ed.): Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles Publishing UK, 371, 256-280.

Luhmann T (2000): Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.

Mason S (1995): Conceptual Model of the Convergent Multistation Network Configuration Task. Photogrammetric Record 15(86), 277-299.

Schlögelhofer F (1989): Qualitas- und Wirschaftlichkeitsmodelle für die Ingenieurphotogrammetrie. Dissertation, Technische Universität, Wien, 156.

Schrott P (2005): Digitális képek feldolgozása DLT-vel. Tudományos Diákköri Dolgozat, BME Építőmérnöki Kar.

Tóth Z, Mélykúti G, Barsi Á (2005): Digitális videokamerák kalibrációja. Geomatikai Közlemények VIII, 1-6.

MÉRÉSI PONTOK OPTIMALIZÁCIÓJA EGY ARC FOTOGRAMMETRIAI KIÉRTÉKELÉSE SZÁMÁRA

Varga Emese[*], Hegedűs István[**], Földváry Lóránt[***], Fekete Károly[****]

Optimization of measurement points in case of a photogrammetric processing on a human face *- The scope of this research is the optimization of the required number and placement of measurement points on a stereophotograph of a face. A mathematical tool has been developed, which allows determination of the required point density at any place of the face considering the local curvature characteristics. The validation of the method has been done with using surface fitting methods. By applying the method developed in this study, the measurement time of a facial stereophoto can be reduced due to the omission of informationless points for the processing.*

Keywords: facial reconstruction, optimization, close range photogrammetry, surface fitting

Tanulmányunkban egy arcról készített képpár fotogrammetriai kiértékeléséhez szükséges pontok számát és helyét optimalizáljuk. A feladat megoldásához kidolgoztunk egy módszert, amely lehetővé teszi az arc görbületi viszonyai figyelembevételével a szükséges mérési pontok helyének és pontsűrűség igényének meghatározását. A módszer ellenőrzésére egy felületillesztési eljárást használtunk. A módszerrel a gyakorlat számára optimalizálni tudjuk a kiértékeléshez szükséges időt az információszegény pontok elhagyásával.

Kulcsszavak: arcrekonstrukció, optimalizáció, közel-fotogrammetria, felületillesztés

1 Bevezetés

Arcrekonstrukció alapvető feladata azonosítatlan néhai emberek arcának megjelenítése koponyájuk alapján. Az arc geometriai megjelenítése hagyományosan antropológiai megfontolásokat figyelembe véve, művészi eszközökkel készül (Kustár 2005), amelyet korunkban egyre inkább a számítógépes adatértelmezés és megjelenítés vált fel (Trezopoulos et al. 1997). A BME Biomechanikai Kooperációs Kutatóközpont gondozásában elindult egy arcrekonstrukciós szoftver kifejlesztését irányzó projekt, amelyben részt vesz a BME Fotogrammetria- és Térinformatika Tanszék is. Kutatásainkkal az utóbbi intézmény munkálataihoz kíván hozzájárulni.

Az arcrekonstrukciós folyamat számára első lépés az adatfelvétel. Kapcsolódó tanulmányok az adatfelvétel lehetséges módszereit elemezték különböző aspektusokból (Schrott 2008, Molnár et al. 2008, Fekete 2006, Schrott és Fekete 2008, Schrott et al. 2008). A tanulmányok az arcfelvétel lehetőségét vizsgálták CT-vel, lézerszkennerrel és közel-fotogrammetriával. Általánosságban ezek eredményei alapján elmondható, hogy a célra a leghatékonyabb a CT lenne, azonban ennek pontossága egyes alkalmazások számára nem feltétlenül elegendő. A közel-fotogrammetria arcrekonstrukciós célú alkalmazása biztosítaná ezt a pontossági igényt, azonban gyakorlati tömeges alkalmazását megnehezíti a kiértékelés nagy idő- és munkaigénye, mivel a kiértékelés csak részben automatizálható. A fotogrammetriai kiértékelés számára feltétlenül szükséges találni egy olyan pontfelvételi és feldolgozási eljárást, amellyel a kiértékelés munkaigénye optimálisra csökkenthető. Jelen tanulmányunkban bemutatott vizsgálatok egy korábbi munka újabb fázisát képezi (Varga 2007, Varga et al. 2008), amely a korábbi vizsgálatokhoz képest új megközelítést jelent egy jóval kifinomultabb feldolgozási technika alkalmazása, valamint a paraméterezés pontosítása. A tanulmány alapvetően az alábbi a módszert követi: egy jól ismert fej adataiból kiindulva az értékes információt tartalmazó részhalmazt meghatározva keressük az optimális pontok számát és helyét. Nyilvánvalóan az optimum kérdésköre a visszaállíthatóság szemszögéből szubjektív, és csak egy konkrét visszaállítási eljárással kapcsolatosan értelmezhető. A kiindulási adataink bemutatása után a pontok ritkításával a 3. fejezetben, a visszaállítást végző eljárással a 4. fejezetben foglalkozunk.

[*]*BME Építőmérnöki Kar, E-mail: vargeme@gmail.com*
[**]*SZTE Természettudományi és Informatikai Kar, E-mail: ist.hegedus@gmail.com*
[***]*MTA-BME Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport, E-mail: fl@sci.fgt.bme.hu*
[****] *BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék, E-mail: feketekaroly@mail.bme.hu*

2 Adatok

Kiindulásnak adathalmazunk (1. ábra) egy optikai szkennerrel mért kadaver fejen mért pontok koordinátái (Schrott 2008b). A mérés során összesen 149206 pontot határoztak meg. Ezt az adathalmazt kell leszűkíteni annyira, hogy egy tényleges fotogrammetriai kiértékelés számára kivitelezhető számú pontot jelentsen úgy, hogy közben az információveszteség is minimális legyen.

A számunkra szolgáltatott pontok koordinátái egy olyan derékszögű koordinátarendszerben vannak értelmezve, melynek origója a fej geometriai középpontjában található.

3 Adatritkítás

Az adatritkítást két lépésben végezzük el, Első lépésben az adatokat matematikai tulajdonságaik alapján két csoportra osztjuk (3.1), amit a csoportonkénti eltérő paraméterezéssel végzett tényleges adatritkítás (más megközelítésben: értékes adat „kiválasztása") követ (3.2).

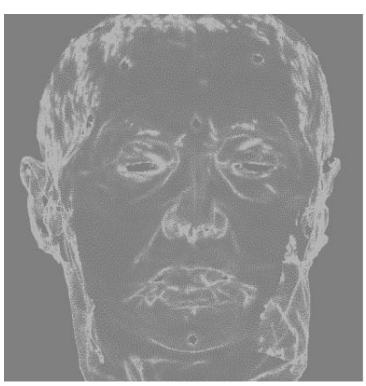
3.1 Leválogatás

A leválogatást két szempont figyelembevételével hajtottuk végre: egyrészt a vizsgált felületdarab görbületi tulajdonságai, másrészt alapvető antropológiai szempontok alapján. Ezek az elvek felhasználásával két csoportot készítettünk (2. ábra). Az egyiket matematikailag bonyolultabb felületnek nevezzünk el. Ide tartoznak a szem, száj, orr és az áll. A másik csoport az egyszerűbb felületek ide tartozik a homlok és az arc. Így összesen 41647 db pontot vizsgáltunk, felmért fej egyéb, arcfelületen kívül eső adataival nem foglalkoztunk. A következőkben ezt a két ponthalmazt vizsgáljuk.

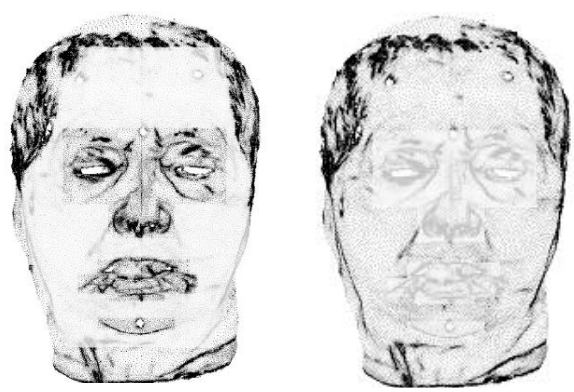
3.2 Kiválasztás

A kiválasztás során először a térbeli adathalmazt síkban értelmezhető adatokká alakítjuk. Először egyes koordinátasíkokkal párhuzamos metszeteket készítünk. Két metsző sík közötti pontokat levetítjük a két sík középsíkjára, így a fej görbült felületdarabjaiból síkbeli görbéket kapunk, amelyen könnyebb elvégezni a vizsgálatot (3. ábra). Szabadon választható paraméter a rétegszám, ami azt határozza meg, hogy a metszősíkokkal hány egyenlő részre osszuk a fejet. Ezt célszerű akkorának választani, hogy a vetítés során ne legyenek nagy torzulások, illetve hogy az egyes síkokra levetített ponthalmazok egy-egy összefüggő, vékony pontsorral közelíthetők legyenek.

A következő lépésben a kapott síkgörbéket vizsgáljuk. Az eljárás alapelve a 180°-tól való eltérés vizsgálata, vagyis egyfajta görbületi tulajdonság. A szemléltető ábrán a P2 pont a vizsgálat tárgya. A P2 pont akkor minősíthető elhagyhatónak, ha a P2P1 és P2P3 vektorok által közbezárt szög egy valamilyen szögértéknél nagyobb. Ez az eljárás második szabadon állítható paramétere. Az ismertetett eljárási metódust két koordinátasík irányában is elvégezzük.



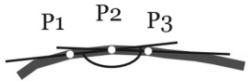
1. ábra. A kiindulási adathalmaz - 149206 db pont



2. ábra. Az egyszerűbb és bonyolultabb felületek - 41647 db pont

4 Pontossági vizsgálat

A pontossági vizsgálat keretében megnézzük, hogy mennyire pontosan lehet visszaállítani a fejet az általunk kiválasztott pontok alapján. A lépés során lényegében a kiszűrt pontok helyére a megmaradt pontokból új pontokat interpolálunk, és a pontossági vizsgálat az interpolált és az eredeti pontok statisztikai összehasonlítását jelentik.



3. ábra. A síkgörbék vizsgálata

Kiindulásként két megritkított ponthalmaz van a bonyolultabb és az egyszerűbb felületekből. A két halmazt először külön-külön vizsgáljuk, és az egyes eseteknek legjobban megfelelő paraméterezéssel dolgozunk. A visszaállított arcfelület birtokában a pontosság vizsgálatánál már összevonva elemezzük a felületeket. A pontosság vizsgálati módszerének egyes lépéseiben Katona (2000) doktori disszertációjára hivatkozunk.

Az eljárást egy variációs spline illesztési feladatként kezeltük. Membrán modellt alkalmaztunk. A módszer alkalmazása előtt azonban az iterációs lépések lecsökkentése érdekében a multigrid elvet használtuk.

4.1 Multigrid elv

Kiindulásként a kiválasztás során megmaradt pontokat egy 512×512-es mátrixba foglaltuk. A mátrix méretét azért vettük fel ekkorának, mert a multigrid eljáráshoz célszerű a $2^n \times 2^n$-es mátrix felvétele, és ez volt az a méret, amelynél az adatvesztés mértékét minimálisnak találtuk.

A mátrix az adathiányos helyeken üres cellákkal rendelkezik, míg azoknak a celláknak, amelyekbe esik kiválasztott pont, annak koordinátája alapján értéket adunk. A multigrid elv célja, hogy az üres celláknak értéket adjon. Ennél az eljárásnál az eredeti pontok értéke kötött, nem változtatható. A multigrid elv részletesebb leírására lásd Katona (2000).

4.2 Variációs spline illesztés

A folyamat során a megmaradt pontokra illesztünk egy felületet. Terzopoulos (1986) ezt a feladatot egy energiaminimum kereséssel helyettesíti. Munkájában meghatároz egy *r*-ed fokú spline energiaformulát (1), amelynél ha r = 1-et helyettesítünk be, akkor jó közelítéssel a membrán modellt kapunk. Az energia értéke (E^r_f) annál kisebb, minél pontosabban veszi fel az $f(x,y)$ függvény az adott $(x_1,y_1),\ldots,(x_m,y_m)$ pontokban a megfelelő $d_1,\ldots,d_m$ értéket.

$$\boldsymbol{E}_f^r = \iint \left[\sum_{i=0}^{r} \binom{r}{i} \left(\frac{\partial^r f}{\partial x^i \partial y^{r-i}} \right)^2 \right] dxdy \ , \tag{1}$$

$$\boldsymbol{E}_f^r = \iint \left(f_x^2 + f_y^2 \right) dxdy \ . \tag{2}$$

Ha a variációs feladatot végeselem feladatként oldjuk meg, levezetve az egyenletet membrán modell esetén az 4. ábrán látható maszk lesz a megoldás. Az ezzel a maszkkal végzett konvolúciót addig folytatjuk, amíg két egymást követő lépés között az eltérés 0.5 mm-nél kisebb nem lesz.

	0,25	
0,25		0,25
	0,25	

4. ábra. A membrán modell konvolúciós maszkja

4.3 A szélek kezelése

A mátrix szélein ahhoz, hogy megfelelő értékeket kapjunk a konvolúció után módosítani kellene a maszkot (Katona 2000). Mi ehelyett az 512×512-es mátrixot módosítottuk. Vizsgálataink alapján ez a változtatás nem befolyásolja lényegesen a kapott eredményt.

1. táblázat. Megmaradt pontok száma a bonyolult felületen

szögeltérés (˚)	rétegszám: 300	rétegszám: 400
150	444	609
140	1022	1179
130	1094	1260
120	1150	1329
110	1303	1446
100	1682	1801
90	2056	2075
80	2384	2289
70	2680	2515
60	3053	2853
50	3497	3290
40	4133	3846
30	5088	4692
20	6875	6433
10	10825	10387
5	15858	15090
1	22326	22302



5. ábra. A bonyolult felület

2. táblázat. Megmaradt pontok száma az egyszerűbb felületen

szögeltérés (˚)	rétegszám: 300	rétegszám: 400	rétegszám: 500
80	1922	1844	1861
70	2033	1938	1977
60	2149	2045	2100
50	2310	2195	2264
40	2558	2453	2506
30	2972	2876	2962
20	3714	3672	3747
10	5801	5808	6018
5	8878	8907	9160
1	14244	14324	14473

5. Eredmények

Első lépésben külön vizsgáltuk a két ponthalmazt (bonyolult és egyszerű), hogy a pontosság szempontjából a két ismertetett változtatható paraméter (lásd 3.2 fejezet) optimálisnak válasszuk. Az optimális paramétereket több paraméter párossal elvégezve a számítás, a visszaállított arcfelület eredeti felülettől való eltérésének meghatározása után, a felület szórásának a függvényében választottuk ki (5-6. ábra).

A vizsgálatok során a rétegszámot 300, 400, 500 értékűeknek a 180˚-tól megengedett szögeltérést pedig 1˚, 5˚, 10˚, …, 150˚-nak vettük fel. A kapott eredményeket az 1-4. táblázatba foglaltuk a paraméterek függvényében. A táblázatban a megmaradt pontokat, majd a középhibákat írtuk eredményként.

Az 1. és a 2. táblázatban látható értékek alapján elmondhatjuk, hogy a várakozásoknak megfelelően a megengedett szögeltérés növelésével a kiválasztott pontok száma csökken. A 3. és a 4. táblázatokból megtudjuk azonban, hogy ezzel együtt a visszaállított felület pontossága csökken. Ugyanezt a jelenséget tapasztaljuk minden rétegszám esetén. Ez arra utal, hogy a rétegszám választás reális, az egy síkra leképződött közel görbe vonalaknak tekinthetők.



6. ábra. Az egyszerűbb felület

3. táblázat. Középhiba a bonyolult felületen [mm]

szögeltérés(˚)	rétegszám: 300	rétegszám: 400
150	7.69	7.24
140	7.99	6.78
130	7.82	6.51
120	7.77	6.64
110	7.85	5.91
100	7.00	6.55
90	3.56	3.72
80	3.68	3.37
70	3.37	3.29
60	3.11	3.27
50	2.64	2.92
40	2.49	2.46
30	2.27	2.32
20	2.19	2.18
10	1.94	1.96
5	1.92	1.90
1	1.86	1.84

4. táblázat. Középhiba az egyszerűbb felületen [mm]

szögeltérés (˚)	rétegszám: 300	rétegszám: 400	rétegszám: 500
80	12.45	16.71	16.13
70	11.71	12.89	10.62
60	9.72	7.41	6.67
50	8.75	7.95	5.54
40	7.19	5.96	5.15
30	5.03	4.80	4.16
20	3.79	3.69	3.61
10	3.15	3.16	3.14
5	2.99	2.97	2.95
1	2.88	2.80	2.78

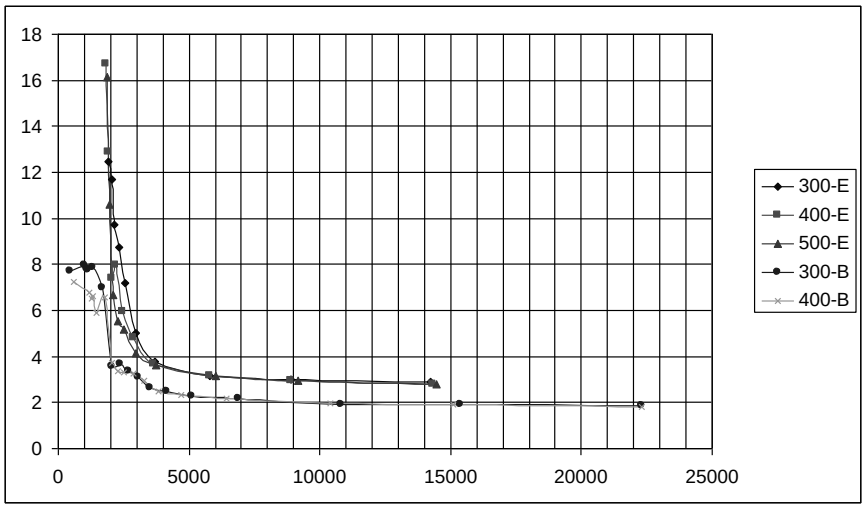
6. Eredmények értékelése

Az előző pontban lévő táblázatok alapján diagramot készítettünk, úgy hogy az *x* tengelyen a megmaradt pontok számát ábrázoltuk, az *y* tengelyen pedig a középhiba értékét mm-ben (7. ábra). A különböző jelöléssel ellátott görbék magyarázatában a háromjegyű szám a választott rétegszámra, míg a kötőjellel utána következő betű („E" vagy „B") a felület egyszerűbb vagy bonyolult voltára utal. A diagramról leolvasható tetszőleges pontosság igényhez a tanulmányban alkalmazott módszerrel szükséges mérendő pontok száma. A diagram látszólagos ellentmondása, hogy az egyszerűbb felületek kezelése számára nagyobb pontszámigény tapasztalható valamennyi paraméterezés mellett, mint a bonyolult felületek esetén.

Valójában az egyszerűbb felületek jóval nagyobb területet fednek le, mint a bonyolultnak minősített felületek, így pontsűrűség szempontjából az egyszerűbb felületek visszaállítására jóval kevesebb pont szükséges.

Az arcrekonstrukció számára a pontosság tág határok között mozoghat; lágyrészről lévén szó. nagy pontosság esetén sem haladja meg a $\sigma = \pm 5$ mm-es értéket. Ehhez a 9. ábra alapján leolvasható, hogy részenként 2000-2500 db pont szükséges. A különböző paraméterezési görbék lefolyásának vizsgálata alapján, az 5. táblázatban összefoglalt paraméterezést találtuk legmegfelelőbbnek.

Ha a két ponthalmazt összegezzük, a megmaradt pontok száma 4562 db pont, ez a kiindulási ponthalmaz 10.95 %-a (8. ábra). Ha ebből az összegzett ponthalmazból állítjuk vissza az arcot, a



7. ábra. Megmaradt pontok száma - középhiba diagramok

középhiba $\sigma = \pm 3.81$ mm. A 8. ábrán az eredeti pontfelhőt fehérrel, a megmaradt pontokat pirossal jelenítettük meg. Az ábráról látható, hogy a megmaradt pontok a felületek peremeire és a bonyolultabb részekre összpontosulnak.

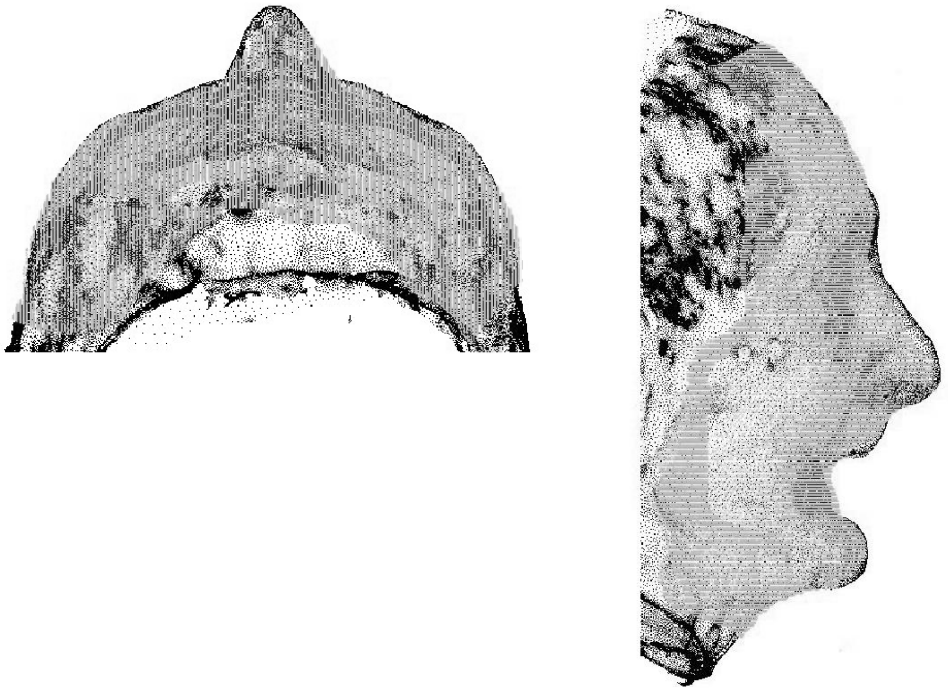
5. táblázat. A vizsgálat számára meghatározott két felülettípus optimális paraméterei, és az azok következtében tapasztalt megmaradt (tehát mérendő) pontok száma és a visszaállítás középhibája

felület típus	180˚-tól való eltérés	réteg-szám	megmaradt pontok száma	középhiba [mm]
bonyolult	90˚	300	2056	±3.56
egyszerűbb	40˚	500	2506	±5.15

A 9. ábrán a megmaradt pontokból visszaállított ponthalmazt jelenítettük meg két különböző irányból. A fehér pontok az eredeti adathalmaz pontjait jelentik, míg pirossal a visszaállításból kapott pontok láthatók. Az ábra tanúsága szerint a megoldás egyik hibája, hogy jellemzően az arc kisimul, a magassági eltérést adó idomvonalak (pl. orrnyereg) visszaállítása nem teljes. Ez az automatizált



8. ábra. A megmaradt pontok-4562 db (10.95%)



9. ábra. A visszaállított ponthalmaz

pontkiválasztás következménye. A továbbiakban ezen hibahatás kiküszöbölése végett fontosnak tartjuk egy-egy idomvonal jellemző pontjainak kényszerkénti felvételét. Ettől azt várjuk egyrészről, hogy az itt bemutatott ellaposodás mértéke enyhül, másrészről a megmaradt pontok számának csökkenését is magával vonja, ugyanis a lokális minimum és maximum idomvonalainak rögzítésével természetesnek adódik a közéjük kifeszülő felület alakja, amely mentén már a kiválasztás is jóval hatékonyabban működhet.

7. Összegzés

A tanulmányunkban kidolgozott eljárással az arcfelület ±1 cm-es visszaállításához mintegy 2000 pont mérése szükséges. Ez a fotogrammetriai gyakorlat számára még mindig sok pontot jelent. Ettől függetlenül az itt bemutatott eredmények a korábbi állapothoz, a TDK dolgozathoz képest előrelépést jelentenek. A tanulmányban arcrekonstrukciós célra először alkalmaztunk egy már magassági interpolációra bizonyítottan hatékony eljárást (Katona 2000). A membrán-modell mellett érdekesnek tartjuk a vékonylemez modell ilyen célú alkalmazását is.

Részleteiben vizsgálva a két módszer eltéréseit, a TDK dolgozatban az adatoknak kizárólag arcrészenkénti felbontását végeztük, ezt most arcrészenkénti és görbületi viszonyok szerinti osztályozásra váltottuk fel. A több alcsoport alkalmazása helyett a kettőre egyszerűsített megoldás oka az, hogy a TDK-ban tapasztaltak alapján nem találtuk teljesen indokoltnak az arcrészenkénti felbontást, ugyanis egy-egy arcrész önmagában akkora különbségeket mutatott felület matematikai (görbületi) tulajdonságaiban, hogy az általánosítás indokolatlannak tűnt. Viszont a csak görbületi viszonyok alapján történő osztályozás lehetőségét annak gyakorlatiatlan jellege miatt vetettük el: a későbbi fotogrammetriai kiértékelést végző személy számára a bemérendő pontokra vonatkozóan valamilyen antropológiai vonást kell megadni ahhoz, hogy be tudja azonosítani.

A jövőben vizsgálataink során az aprólékosabb osztályozhatóság érdekében el tudjuk képzelni a mostani arcrészenkénti és görbületi viszonyok szerinti osztályozás módszerének továbbfinomítását az arcrészek antropológiai alapon történő további felbontásával.

A több felülettípusra bontásnak van egy további hátránya: a felületeket külön vizsgálva a kiválasztás során az egyes felületek peremén rengeteg pont marad meg. Ezek valójában sok esetben nem jellemző idompontok, csak a felület lehatárolását szolgálják. Várhatóan a mérendő pontok száma jelentősen csökkenthető a külön kezelt felületek határvonalainak együttes újraelemzésével és pontjainak ritkításával. Erre különösen nagy hangsúlyt kell majd fektetni egy esetleges még több felületre bontást alkalmazó eljárás vizsgálatakor.

További pontcsökkentés várható a tanulmányban már említett kényszerpontok felvételével, amelyeket egy-egy antropológiai idomvonal mentén definiálnánk. Megjegyezzük, hogy a kényszerpontok felvétele a gyakorlati fotogrammetriai kiértékelés számára sem jelenthet nehézséget. Ezek a pontok, mint lokális minimum és maximum pontok jellemzően olyan elhelyezkedésűek, amelyek jól beazonosíthatók, így a kiértékelés számára várhatóan amúgy is kiválasztott helyek lennének.

Köszönetnyilvánítás. A kutatás a 73251 és 73441 számú OTKA pályázatok, valamint a Bolyai ösztöndíj támogatásával folyt.

Hivatkozások

Fekete K (2006): A Közel-fotogrammetria és Néhány Orvosi Alkalmazása. Phd értekezés, BME, Budapest.

Katona E (2000): Automatikus térkép-interpretáció. Phd értekezés, Szegedi Tudományegyetem.

Kustár Á (2005): Humán Morfológiai Variációk az Arcon és a Koponyán – A Koponya és az Arc Morfológiai Összefüggéseinek Alkalmazása a Plasztikus Arcrekonstrukcióban. Phd értekezés, ELTE, Budapest.

Molnár B, Schrott P, Fekete K (2008): Comparative accuracy survey of 3D medical models made by photogrammetric, CT and scanning methods. Proceedings of the Third Hungarian Conference on Biomechanics, Budapest, 211-216.

Schrott P (2008a): Investigation of Measurement Methods for Facial Reconstruction Purposes. The 7th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics (CD), Wroclaw, Lengyelország.

Schrott P (2008b): Geometric Data Gathering From Cadaver Human Head. Proceedings of the Third Hungarian Conference on Biomechanics, Budapest, 301-307.

Schrott P, Fekete K (2008): Subpixel Photgrammetric Evaluation Methods for Face Reconstruction Purpose. Proceedings of the Third Hungarian Conference on Biomechanics, Budapest, 309-314.

Schrott P, Szabó Gy, Fekete K (2008): Data Acquisition Possibilities for face Reconstruction Purpose. International Archives of Photgrammetry and Remote Sensing, XXXVII; B5, 817-822.

Terzopoulos D (1986): Regularization of Inverse Visual Problems Involving Discontinuities. IEEE Trans, on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8; 4, 413-423.

Varga E (2007):Mérési pontok optimalizációja egy arc fotogrammetriai kiértékelése számára. TDK dolgozat, BME.

Varga E, Hegedű I, Földváry L (2008): Optimization of Density and Distribution of Stereograph Measurement Points for a Face Assessment. Proceedings of the Third Hungarian Conference on Biomechanics, Budapest, 387-394.

FÖLDHASZNOSÍTÁS VÁLTOZÁSÁNAK KÖVETÉSE TÁVÉRZÉKELÉSSEL A VELENCEI-TÓ VÍZGYŰJTŐJÉBEN

*Verőné Wojtaszek Malgorzata**

Land use change detection by remote sensing in the Lake Velence catchment area *- In our work we used remote sensing as mapping tools to classify land use in the Lake Velence catchment area. The satellite images give homogenous, detailed and actual data of wide areas and give a wide time range archive also. Multi-temporal images provide up-to-date information for change detection analyses.*

The IDRISI Land Change Modeler was applied for analyzing land use, as well as to predict land use change. The LCM provides a set of tools for analysing land use (cover) change, including graphs of gains and losses, net changes and contributions experienced by any category. A simple one-click interface provides the ability to generate rapid maps of change, persistence, specific transitions and exchanges between categories.

The analysis of two land use maps of different dates showed that between 1990 and 2004 the amount of urban land, rural cover types of agriculture and water class increased. The urban area increased by 13% of the total area, the agriculture area by 15% and the water class by 8%. The water area increase is dependent on drought. The meadow field, the forest and vine-orchard categories decreased. Decreasing of the forest area is connected with forestry and means change in land cover, but not in land use.

Keywords: remote sensing, land use detection, Land Change Modeler

A Velencei-tó vízgyűjtője földhasználat változásainak vizsgálatához távérzékelési módszereket alkalmaztunk. A több időpontban készült multispektrális felvételek ellenőrzött osztályozásával a vizsgált terület földhasználatára vonatkozó adatokat nyertünk és a változásokat 14 éves időintervallumban vizsgáltuk. A műholdas felvételek kiértékeléséhez IDRISI ANDES térinformatikai rendszert, valamint az adatok elemzéséhez Land Change Modeler-t alkalmaztunk. Az LCM széles adatelemző eszköztárával időben lezajló folyamatok több szempont szerint vizsgálhatók.

Az 1990 és 2004 időszakban bekövetkezett változások összefüggésben vannak az utolsó rendszerváltozással bevezetett reformokkal, az urbanizáció, az iparosodás és a vele járó tevékenységekkel. Az űrfelvételek klasszifikációjával nyert földhasználati kategóriák között a szántó, a beépített és a víz tematikus osztályok növekedését mutattuk ki. A vízzel borított területek ingadozása összefügg a csapadék mennyiségével, az aszállyal. A területcsökkenés a szőlős-gyümölcsös, a rét és erdős kategóriákban következett be. Az erdős területeknél ilyen jellegű tendencia inkább a felszínborítás, mint földhasználat változását jelenti, ami az erdőgazdálkodás (véghasználat, erdőfelújítás) következménye.

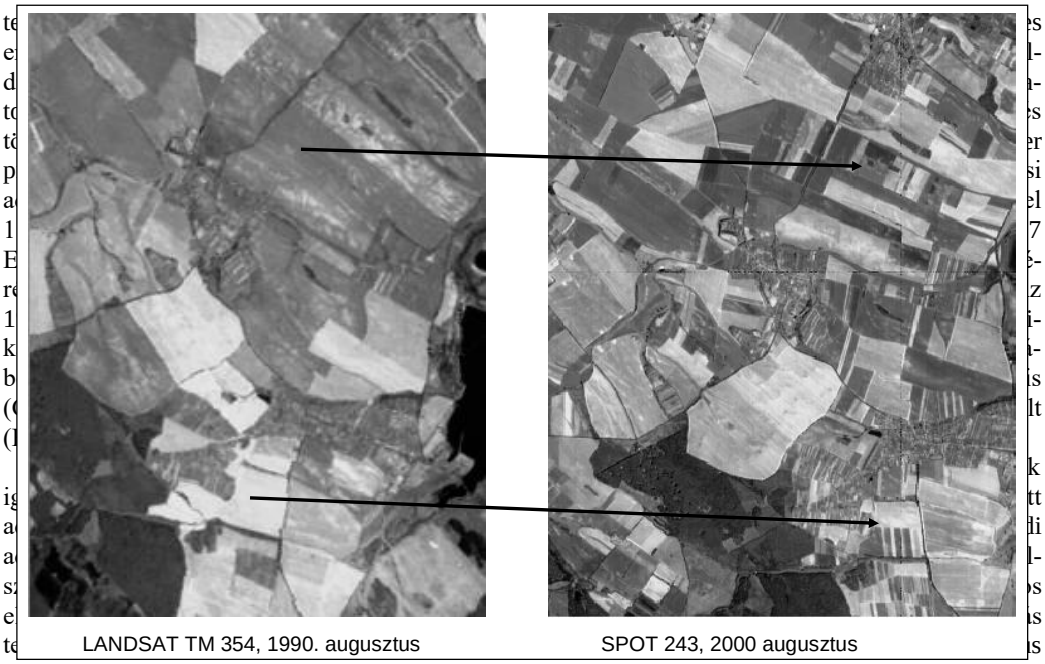
Kulcsszavak: távérzékelés, földhasználat, Land Change Modeler

1 Bevezetés

A Föld megfigyelő műholdak megjelenésével újfajta adatnyerés és szolgáltatás kezdődött meg. A műholdak szenzorai folyamatosan pásztázzák Földünk felszínét, részletes (pl. 1×1 m - 30×30 m-es négyzetháló, földfelszín-elemek) és ugyanakkor nagy (pl. 5000 - 36 000 km^2) területekről homogén, periodikusan ismétlődő adatokat biztosítanak. Olyan adatokat, melyek hűen tükrözik a földfelszínt, felszíni objektumokat és azok állapotát. A távérzékelési adatok alapján nemcsak a terület aktuális állapotát tudjuk vizsgálni, de az archivált felvételek időben visszatekintési lehetőséget is biztosítanak. A több időpontú felvételek kiértékelésével adott időintervallumban bekövetkezett változások követhetők nyomon, valamint a változásokból trendek állapíthatók meg a jövőre nézve is.

A gyors ütemben fejlődő informatika és a távérzékelés - mint adatnyerés - megváltoztatta a kutatást minden téren és sok gyakorlati probléma megoldását eredményezte. Ezért a használata világszerte

*NyME Geoinformatikai Kar, 8002 Székesfehérvár, Pirosalma u. 1-3.
E-mail: margo@geo.info.hu*



1. ábra. A talajművelés (kis- és nagytáblás művelés) formában bekövetkezett változások privatizáció hatására - multitemporális űrfelvételeken. A felvételek a FÖMI archívumából származnak.

földhasználati statisztikai adatbázis létrehozásában. A CLUSTER (Classification for Land Use Statistics, Eurostat Remote Sensing project - *Klasszifikáció földhasználati statisztikák számára)* Eurostat projekt vizsgálja a távérzékelés alkalmazhatóságát a statisztikai adatnyerésben (Pilot Project - Delimitation of European agglomerations by remote sensing: Results and conclusions. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities).

A földhasználat kisebb mértékű változásai az emberi tevékenység következménye. A teljes ország területét érintő földhasználati változások történelmi átalakításokhoz köthetők, mint pl. az 1947 utáni kollektivizálás, vagy az utolsó rendszerváltással járó reformok hatása. Az utóbbi években a földhasználati viszonyokban jelentős változások következtek be. Az urbanizáció, az iparosodás és a vele járó tevékenységek a mezőgazdasági művelés alól kivett területek növekedését eredményezte. A használat ilyen jelegű változása főleg a lakóterületek közelébe eső külterületekre vonatkozik. A mezőgazdasági művelés alatt álló termőföldek többségét – tulajdonviszonyok változása mellett - ugyanúgy hasznosítják. A multitemporális űrfelvételeken nagyon jól láthatók a talajművelési (kis- és nagytáblás művelés) formában bekövetkezett változások. A 1. ábra egy terület privatizáció előtti és utáni talajművelési formáit mutatja. A felvételek ebben az esetben tíz év eltéréssel készültek (Verőné Wojtaszek 2007).

Jelenleg a távérzékelési adatokat nemcsak tények megállapításához, valamint természetes vagy ember tevékenysége által eredményezett folyamatok vizsgálatához használjuk. Egyre gyakrabban az egyes folyamatok környezetre gyakorolt hatásának elemzéséhez, modellezéséhez is nélkülözhetetlen adatforrást jelentenek. A környezeti problémák kezelését, megoldását, a természet adottságait figyelembe vevő földhasználat megteremtését egyre több környezet-tanulmány, kutatási program célozza meg. Ilyen jellegű nemzetközi kutatások egyik példája a WAREMA (Vízkészlet-gazdálkodás védett területeken).

A WAREMA projekt célja a Velencei-tó vízgyűjtőjének olyan komplex elemzése, melynek eredményeivel elősegíthető a tó vízminőségének javítása, a terület védelme. A vízgyűjtő komplex vizsgálatának egyik része a földhasználat felmérése, a földhasználat változásának nyomonkövetése.

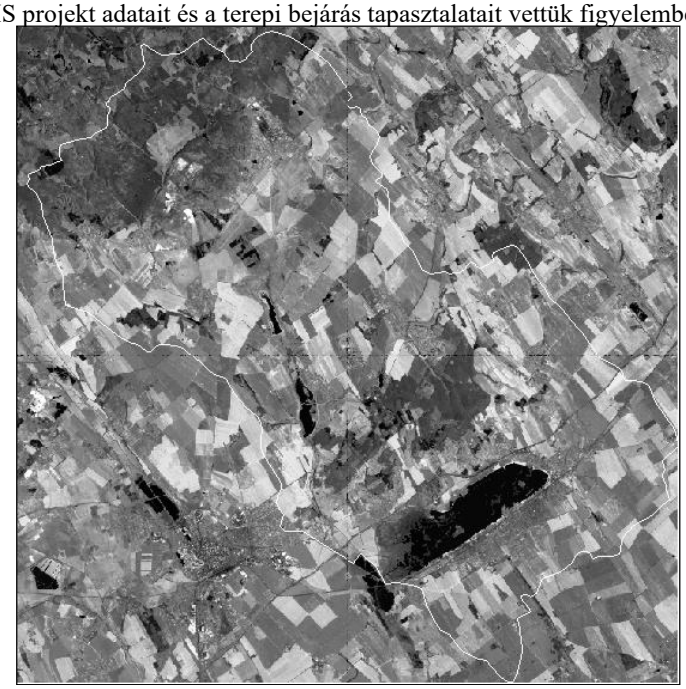
A Velencei-tó vízgyűjtője - mint a vízminőséget befolyásoló egyik tényező - földhasználat változásainak vizsgálatához több időpontban készült multispektrális felvételeket használtunk fel.

2 Anyag és módszer

2.1 A mintaterület jellemzése

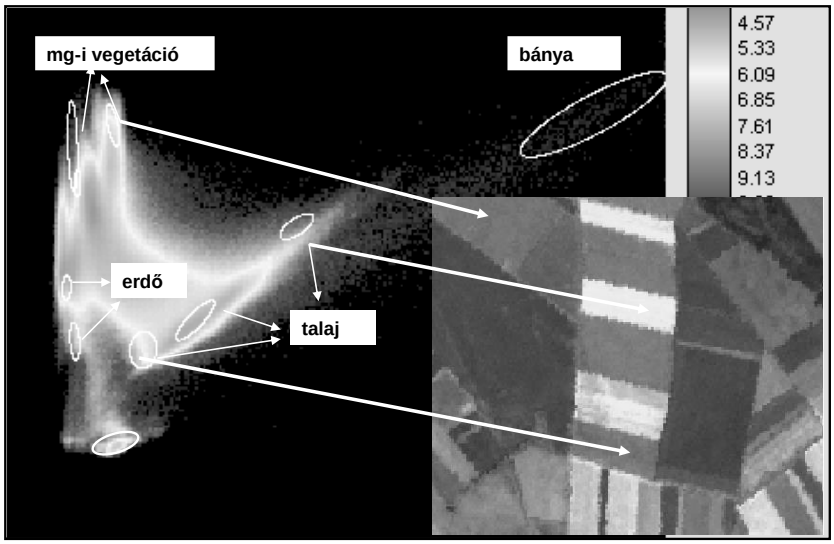
A Velencei-tó a Velencei-hegység lábánál lévő tektonikus törésben alakult ki. A tó területe 27 négyzetkilométer, átlagos mélysége pedig 1.6 méter. A vízgyűjtő területéhez tartoznak a Vértes délkeleti lejtői, a Mezőföld északi része és a Velencei hegység (2. ábra). Vízrendszere három fő részből áll, ezek a Császár-víz, a Vereb-Pázmándi víz, illetve a közvetlenül a vízgyűjtőbe érkező vizek. A vízgyűjtőnek különleges része a Dinnyés környéki terület, ahol több védett növény és állatfaj él. A madárrezervátum jelentős telelő és pihenőhely a madarak számára. A terület a Ramsari Egyezmény oltalma alatt áll.

A Velencei-tó vízgyűjtője földhasználatának felméréséhez multitemporális műholdas felvételeket használtunk fel. A különböző szenzorok által rögzített és archivált adatok lehetővé tették a földhasználat térbeli változás vizsgálatát 14 éves időintervallumban. A felhasznált távérzékelési adatok részletes paramétereit az 1. táblázat tartalmazza. Az űrfelvételek kiértékelése az ERDAS és IDRISI Andes szoftverek alkalmazásával történt. A felvételek klasszifikációját megelőzte az előfeldolgozás, melynek során geometria transzformációt, a vizsgálathoz legalkalmasabb sávok kiválasztását, a szinkompozitok létrehozását, valamint intenzitási műveleteket végeztünk el. A geometriailag transzformált felvételek osztályozása tanulóterületek alapján történt, amit a spektrális adatok vizsgálata előzött meg. Egyes spektrálisan heterogén kategóriák (mint pl. lakóterület) meghatározásához számítógéppel segített interpretációt alkalmaztunk. A feldolgozáshoz szükséges referenciaadatokként 1:10 000-es méretarányú topográfiai térképeket, a CORINE felszínborítási adatbázis adatait, a VINGIS projekt adatait és a terepi bejárás tapasztalatait vettük figyelembe.



2. ábra. Velencei-tó vízgyűjtő területe 2000-ben készült SPOT (243) űrfelvételen

1. táblázat. A kutatáshoz felhasznált műholdas felvételek egyes tulajdonságai



3. ábra. Egyes tanulóterületek eloszlása az intenzitási térben (a közeli infravörös és a látható spektrum tartományban)

Szenzor	Idő	Spektrális felbontás	Geometriai felbontás	Vizsgálathoz felhasznált spektrális tartomány
LANDSAT TM	1990. augusztus	7 sáv	30 m	a látható, a közeli és a közepes infravörös
SPOT multispektrális	2000. augusztus	4 sáv	10, 20 m	a látható, a közeli és a közepes infravörös
TERRA/ASTER hiperspektrális	2004. április	14 sáv	15, 30, 90 m	a látható és a közeli infravörös tartományban

2.2 LAND USE MODELER alkalmazása a földhasználat kiértékelésében

Az IDRISI raszter alapú térinformatikai (GIS) és képfeldolgozó rendszert a Clark University (USA) fejlesztette ki. A 20 éves folyamatos fejlesztésnek köszönhetően igen hatékony térinformatikai és képfeldolgozó eszköztárral rendelkezik A legújabb Idrisi 15 The Andes Edition verzióban a térbeli elemzések eszközeit továbbfejlesztették. Ebben lehetőség nyílik a környezetvédelmi monitoringra, változás- és idősoros elemzésekre, összetett és több szempontot figyelembe vevő döntés előkészítésre, bizonytalanság elemzésre (Bayes és Fuzzy elemzések), helyzetelemzésre és modellezésre. A LAND USE MODELER egy adott idő intervallumban bekövetkezett változások statisztikai kiértékelésének és a változások térbeli elemzésének biztosít új eszközöket.

3 Vizsgálati eredmények és értékelésük

A földhasznosítás összefüggésben van a felszínborítással, ami felhasználható a felméréshez. Az egyes földhasználati kategóriák elkülönítése az űrfelvételeken viszonylag egyszerű és egyértelmű (3. ábra), azonban a felmérés tematikus pontosságát a felvétel időpontja befolyásolja. A távérzékelési adatok alapján történő földhasznosítás felmérése során a terület felszínborítás eltéréseit és a felszín egységeinek egymáshoz való viszonyát, összefüggéseit vizsgáljuk. Előfordulhat, hogy egy adott időpontban egyes tematikus kategóriák spektrális tulajdonságai hasonlóak vagy egyformák, ami téves osztályozást eredményezhet. Ilyenkor a probléma megoldása más időpontban készült vagy nagyobb geometriai felbontású felvételek felhasználásával oldható meg.

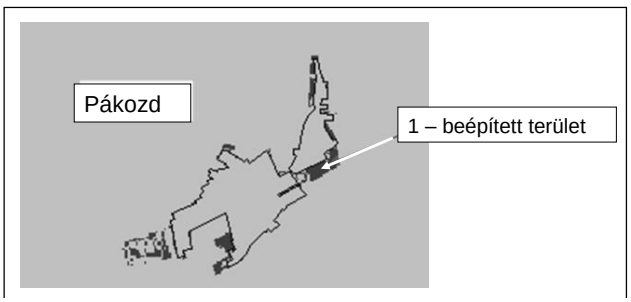
A lakóterületek, a szőlős-gyümölcsös kategória elkülönítéséhez (meghatározásához) számítógéppel segített interpretációt használtunk. Erre azért volt szükség, mert a lakóterület, mint tematikus

kategória heterogén, ide tartoznak a kisebb, nagyobb méretű lakóépületek, ipari létesítmények, utak, rekreációs területek, parkok, stb., amik együttesen befolyásolják az elektromágneses energia visszaverődését. Az intenzitási értékek ismétlődése a lakóterületre jellemző textúrát eredményez, ami vizuálisan jól elkülöníthető más kategóriáktól. A meghatározásnál a beépített terület folytonosságát vettük figyelembe.

A rendelkezésünkre álló műholdas felvételekből az ellenőrzött osztályozással tematikus térképeket készítettünk és azokat a továbbiakban a földhasználat változásának elemzéséhez input adatként használtuk fel. A Velencei-tó vízgyűjtőjének földhasználatát a 2004. évben a 4. ábra mutatja. Az 1990 és 2004-es felmérések statisztikai adatait a 2. táblázat tartalmazza.

3.1 Földhasználat változásának elemzése

Az utóbbi években a földhasználati viszonyokban jelentős változások következtek be. Ezek a változások az egész országra jellemzőek, így a vizsgált területen is tapasztalhatóak.

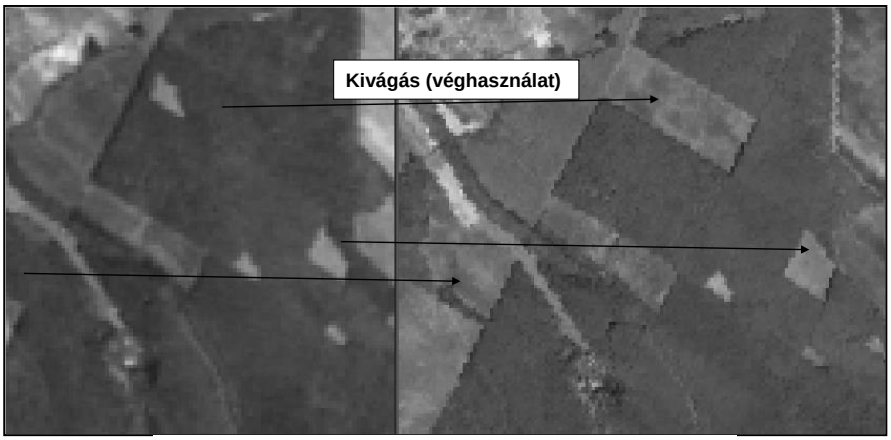


4. ábra. Lakóterület növekedése. A vektoros állomány a topográfiai térkép adatait, a raszteres pedig a 2004-es felvételből származtatott adatokat ábrázolja

2. táblázat. A Velencei-tó vízgyűjtőjének földhasználat változása (1990-2004 között)

Kategória	Terület (km^2) 1990-es felmérés	Terület (km^2) 2004-es felmérés	Változás
1. szántó	268.9	308.2	+39.3 (+15%)
2. rét	115.4	108.6	-6.8 (-5%)
3. erdő	148.5	112.1	-36.4 (-24%)
5. víz	26.4	28.4	+22.1 (+8%)
6. szőlős-gyümölcsös	9.7	7.5	-2.2 (-23%)
7. település	29.5	32.8	+3.3 (+13%)

- Az urbanizáció, az iparosodás és a vele járó tevékenységek a *mezőgazdasági művelés alól kivett területek növekedését eredményezte*. A használat ilyen jellegű változása a lakóterületek közelébe eső külterületekre jellemző. Egy lakóterület kiterjedését a 4. ábra mutatja.
- Országos szinten megfigyelhető az *erdőterületek* növekedése, ami összefüggésben van az erdőgazdálkodásban folyamatosan végzett erdőműveléssel (véghasználat, felújítás és új telepítések). Az új erdőterületek egy része a korábbi mezőgazdasági táblákon fordul elő. A vízgyűjtő területén több helyen az erdő kivágására került sor, ami a felszínborítás változásával jár és egyértelműen elkülöníthető a fás területektől (5.ábra). A véghasználat alá kerülő területek spektrális tulajdonságai a szántó és a rét kategóriák spektrális tulajdonságaival átfedésbe kerültek, ami az utóbbi két kategória javára melléosztályozást eredményezett. Az erdő kategóriára nézve a kihagyási hiba az erdővel borított terület csökkenését okozza. A természetes és mesterséges *tavak* a vizsgált spektrum tartományokban egyértelműen azonosíthatók. A Velencei-tó nagy részét azonban szigetszerűen nád borítja. A spektrális adatosztályok vizsgálata során kiderült, hogy az általunk használt augusztusi felvételeken az erdő és a nád intenzitási értékei átfedésben vannak, ami a két kategória keveredését, téves osztályozását eredményezte. A Velencei-tó víz és nád borítását topográfiai térkép felhasználásá-



5. ábra. Erdőterület változása műholdas felvételeken (1990-2004)

val és az űrfelvételek vizsgálatának együttes alkalmazásával lehetett a legnagyobb megbízhatósággal meghatározni. A tapasztalatok azt mutatják, hogy más időpontban készült felvételeken ez a két kategória egyértelműen elkülöníthető (Király 2008)

- A szőlő-, gyümölcsös területek osztályba sorolási pontosságát a termesztett gyümölcsfaj, a fák, szőlők állapota befolyásolja. Ezekre a területekre jellemző intenzitási értékek sok esetben keveredtek a parlagon hagyott területekkel, gyepterületekkel és egyes esetekben szántókkal.
- A mezőgazdasági művelés alatt álló termőföldeken a tizennégy év eltéréssel készült űrfelvételeken nagyon jól láthatók a talajművelési (kis- és nagytáblás művelés) formában bekövetkezett változások. A szántóterületeket vizsgálva, azokra nézve több alkategóriát hoztunk létre. Az osztályozás során külön vettük figyelembe a vegetációval borított és a vegetációmentes táblákat. Figyelembe vettük továbbá az erózióra vagy a magas víztartalomra levezethető táblán belüli heterogenitásokat is. A végeleges térképszerkesztés előtt az alkategóriák összevonásra kerültek.

3.2 A földhasználat változásának elemzése a LAND CHANGE MODELER segítségével

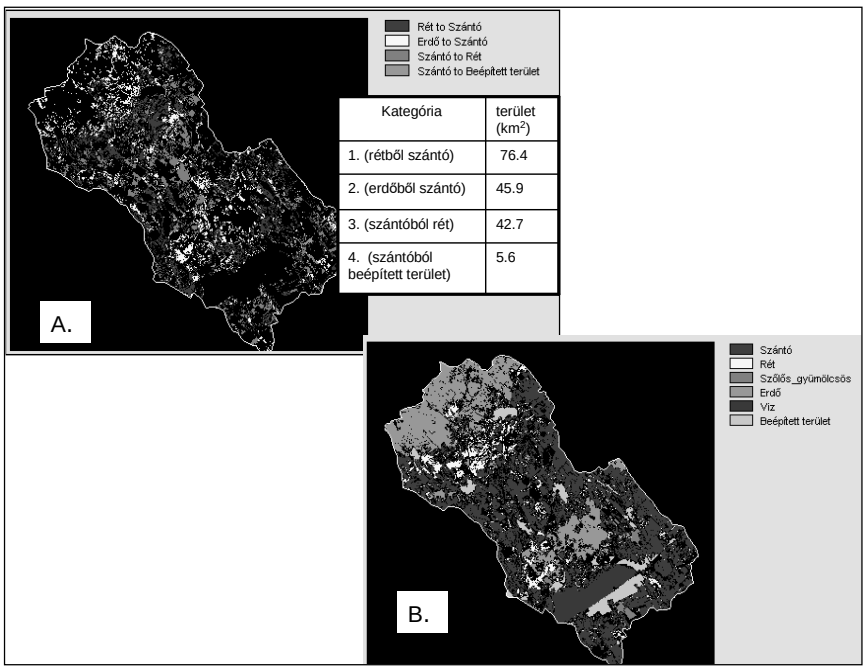
Az IDRISI Andes program Land Change Modeler moduljával - a két különböző időpontban készült tematikus térképek alapján - az érintett terület változásának elemzését végezhetjük el. Az LCM modullal a változásokat mutató grafikonokat és térképeket lehet elkészíteni, melyekről leolvasható az egyes kategóriák változásának mértéke. Az adatok elemzését a következő szempontok szerint vizsgálhatjuk:

- kategóriánkénti területcsökkenés, illetve növekedés,
- kategóriánkénti változás (területnövekedés és csökkenés különbözete),
- adott kategória átmenete egy meghatározott (vagy bármely) kategóriába.

Ezeket a változásokat, valamint a kategóriák stabilitását térképen is tudjuk ábrázolni (6. ábra). A terület változásaiból trendek állapíthatók meg a jövőre nézve is.

4 Összefoglalás

A távérzékelésnek, mint adatforrásnak az egyik alapvető alkalmazása a megújuló természeti erőforrások vizsgálata, monitoringja. A termőföld is ilyen erőforrásokhoz tartozik. A talajdegradáció és ezzel összefüggő környezeti problémák egyértelműen mutatják, hogy ahhoz, hogy a termőföld valóban megújuló természeti erőforrás legyen, a természet adottságait figyelembe vevő földhasználatot kell megteremteni. A természeti erőforrások kitermelésénél nemcsak gazdasági hasznot, de a környezet teherbíró képességét is figyelembe kell venni. A terület természeti adottságai és használata



6. ábra. A.) Az 1990 és 2004 földhasználat változásának térképi megjelenítése
B.) Az 1990 és a 2004 év földhasználat stabilitásának térképi megjelenítése

egyensúlyának megteremtéséhez a területi adottságainak, a terület jellemzőinek felmérése, és olyan térinformatikai adatbázis felépítése szükséges, amely aktuális, objektív, pontos és több szinten felhasználható adatokat biztosít. Az adatokkal szemben egyre növekvő mennyiségi és minőségi igényeket hagyományos módszerekkel nem lehet teljesíteni. A távérzékelési technológia és informatika gyors fejlődése új adatnyerési és kiértékelési eszközöket ad.

A földhasználat felmérésében, változásainak vizsgálatában a távérzékelési adatokat eredményesen alkalmazzuk. A LAND CHANGE MODELER-ben a térbeli elemzések eszközeit továbbfejlesztették, ami új lehetőség ad a környezetvédelmi monitoringra, változás- és idősoros elemzésekre.

Hivatkozások

Büttner Gy (2003): Elkészült Magyarország 1:50000-es léptékű felszínborítási adatbázisa; Magyar Ipari és Környezetvédelmi Magazin, II (5), 8.

Büttner Gy (2004): Új felszínborítási adatbázis Európára; Magyar Ipari és Környezetvédelmi Magazin, III (6), 7.

Király G (2008): A távérzékelés erdészeti alkalmazása. NYME EMK, PhD értekezés, 54-60.

Mikus G, Csornai G, Mihály Sz, Vass T (2008): Agrártámogatások és a nemzeti téradat infrastruktúra. Geodézia és Kartográfia, LVI (8), 3-37.

Verőné Wojtaszek M (2007): Távérzékelés. Jegyzet, NYME GEO, Székesfehérvár, 160-162.

Winkler P (2003): Magyarország digitális ortofotó programja (MADOP) és nagyfelbontású digitális domborzat modell (DDM) az ország teljes területére. Geodézia és Kartográfia, LV (12), 3-11.

FÖLDI LÉZERSZKENNEREK ALKALMAZHATÓSÁGA MÉRNÖKI SZERKEZETEK DEFORMÁCIÓ MÉRÉSÉBEN

Lovas Tamás[*]*, Berényi Attila*[*]*, Barsi Árpád*[*]*, Dunai László*[**]

Applying terrestrial laserscanning in deformation measurements of engineering structures *- This paper deals with the potential of terrestrial laserscanning in the field of displacement and deformation measurements of engineering structures. It also discusses the experiences of the quality test laboratory measurements. Furthermore we show two examples of real applications (bridge load test measurements) and we confirm the usage and validate the potential of this technology in such engineering projects.*

Keywords: displacement/deformation measurement, terrestrial laserscanning, engineering structures

Cikkünk a földi lézerszkennerek alkalmazhatóságát vizsgálja mérnöki szerkezetek mozgásvizsgálati és deformáció méréseiben. Először a laboratóriumi körülmények között elvégzett minősítő projekt eredményeit taglaljuk, majd két valódi példán (hidak terheléspróbája) keresztül próbáljuk meg bebizonyítani a technológia alkalmazhatóságát a hasonló mérnöki feladatok megoldásában.

Kulcsszavak: mozgásvizsgálat/deformációmérés, földi lézerszkennelés, mérnöki szerkezetek

1 Bevezetés

Napjaink rohamosan fejlődő világa a geodézia mellett sem ment el anélkül, hogy változásokat ne hozott volna. A folyamatos fejlesztéseknek köszönhetően napról napra pontosabb, jobb, gyorsabb adatokat kapunk a legkülönfélébb eszközök segítségével. Ennek a folyamatnak az eredménye a cikkben tárgyalt lézerszkenneres felmérési technológia is, hiszen csupán a 90-es években nyert teret a geodéziában. A máig eltelt idő alatt sokan sokféleképpen bizonyították, hogy ez a mérési eljárás megállja a helyét a műemlékvédelem, a bányászati alkalmazások és a minőség-ellenőrző mérések terén egyaránt.

A szerzők célja a módszer alkalmazhatóságának vizsgálata mérnöki szerkezetek mozgásvizsgálata és deformáció mérése kapcsán. Ennek fényében a Magyarországon megépült utolsó két Dunahíd (Pentele híd, Megyeri híd) terhelépróbáin végeztünk méréseket és próbálunk meg állást foglalni pro és kontra.

2 Technológia

A lézerszkennelés eredménye egy plasztikus 3D-s pontfelhő, a szkenner által meghatározott koordinátarendszerben. A műszer a pontok koordinátáit lézer fény segítségével határozza meg. A kibocsátás és a visszaverődés között eltelt idő meghatározásával az adott pont távolságát, míg a műszerfejezet állásából a pont helyzetét rögzíti, így kapva meg a pontok háromdimenziós koordinátáit. Mivel ezt a műveletet a lézerszkennerek típustól függően több tízezerszer is képesek elvégezni egy másodperc alatt, így viszonylag rövid idő alatt rengeteg információt szerezhetünk a környezetünkről. Az aktív távérzékelési technológiák előnyeivel ez a módszer is rendelkezik, miszerint nehezen, vagy egyáltalán nem megközelíthető helyekről is gyűjthetünk információt, amennyiben az optikai rálátást biztosítjuk és az adott terület hatótávolságon belül van. További előnyként említendő, hogy aktív távérzékelési módszer lévén a felmérés éjszaka is végezhető.

Amennyiben több pozícióból végezhető csak el a kívánt objektum felmérése, akkor illesztő pontokat, ún. prizmákat (reflektorokat) kell alkalmaznunk. Ezekkel a nagy visszaverő képességgel rendelkező pontjelekkel kapcsolhatjuk egymáshoz a különböző pozíciókat és – amennyiben igény mu-

[*]*BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.*
[**]*BME Hidak és Szerkezetek Tanszék, 1111 Budapest, Bertalan Lajos utca 2.*
E-mail: tlovas@mail.bme.hu

tatkozik rá – transzformálhatjuk a pontfelhőt az általunk választott tetszőleges koordinátarendszerbe.

3 Pontosság

Mint minden új technológia bevezetése esetében, így ebben az esetben is fontosnak tartottuk, hogy megfelelő, hitelt érdemlő módon bizonyítsuk a műszer pontosságát, más szóval hitelesítsük a (gyári) technológiai leírásában foglaltakat, különös tekintettel a mérési pontosságra. A Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék 2006-ban végzett vizsgálatai igazolták az alkalmazott Riegl LMS-Z420i típusú lézerszkenner ±5 mm-es távmérési középhibáját (1. ábra).

Ez a középhiba determinálja a felhasználhatóságot. Azonban a hídmérések példáiból kiindulva, amikor a szerkezet alakváltozása több deciméteres nagyságrendű, az alkalmazás jogosságához nem férhet kétség (Maksó 2006).

4 Alkalmazások – hidak terhelléspróbája

Hidak terhelésvizsgálatánál a hídpálya függőleges irányú elmozdulását és az egyéb szerkezeti elemek térbeli elmozdulásait diszkrét pontokban mérik. A tartószerkezeti elemek és a pálya változásait felsőrendű szintezéssel, a háromdimenziós elmozdulásokat – előre meghatározott pontokban – mérőállomásokkal, a jellemző pontokban az alakváltozásokat és feszültségeket nyúlásmérő bélyegekkel mérik.

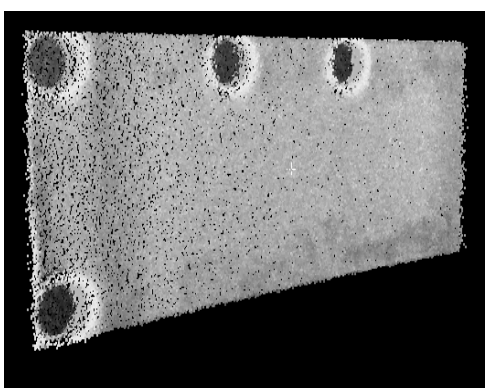
4.1 Pentele híd

A Pentele híd esetében a terhelléspróba során az egyes állapotokat a Duna partján felállított lézerszkennerrel mértük (2. ábra). A híd három fő részből áll: két szerkezeti elem az ártéri rész fölött, a fő hídelem a Duna fölött ível át. Az itt elvégzett mérések a híd középső részére koncentráltak, ami egy ún. kosárfülű híd; 307.8 méteres fesztávjával és 48 méteres magasságával a maga nemében világrekordnak számít (Domanovszky 2007; Horváth 2007)!

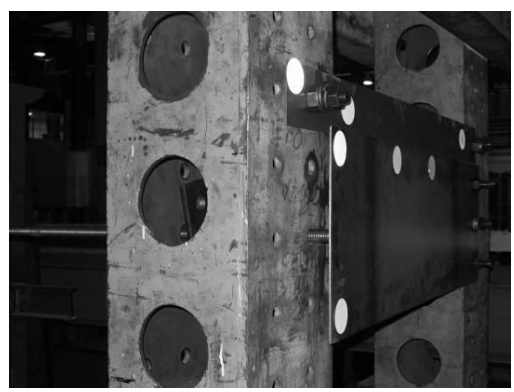
Az első terhelléspróba 2007. június 28-án este 9 órakor kezdődött és 9 órán át tartott. A geodéziai mérések időszükségletének megfelelően minden egyes teherállás 20-30 percig tartott, ez határozta meg a lézerszkennelés maximális időtartamát is.

A terhelléspróba első napján 17 teherállásban végeztek méréseket, ezek közül a fontosabbak:

1. az 1. teherállás terheletlen állapot – nullmérés
2. a 7., 9., 15. és 17. teherállás ismét terheletlen állapot – az addigi terhelésekből keletkező maradandó alakváltozások vizsgálatára
3. a 8. és 16. teherállás a híd teljes leterhelése 24 db 40 tonnás teherautóval



Prizmák (reflektorok) a pontfelhőben



…és a valóságban a lemez hajlítása közben

1. ábra. Minősítő mérések



2. ábra. A Pentele híd és a lézerszkenner

Az első napi 17 teherállásból lézerszkenneléssel az első 8-at sikerült felmérnünk. Az egyes teherállások alatt ugyanolyan felbontással végeztük el a méréseket, melynek részleteit tartalmazza az 1. táblázat.

1. táblázat. A szkennelés során alkalmazott pontsűrűséget befolyásoló paraméterek

Szkennelés ideje (mérésenként)	15’ 45”
Pontok száma (mérésenként)	~290 000
Szkennelési tartomány (vízszintesen)	~50°
Szkennelési tartomány (függőlegesen)	~17°
Szögfelbontás (vízszintes és függőleges)	0.017°

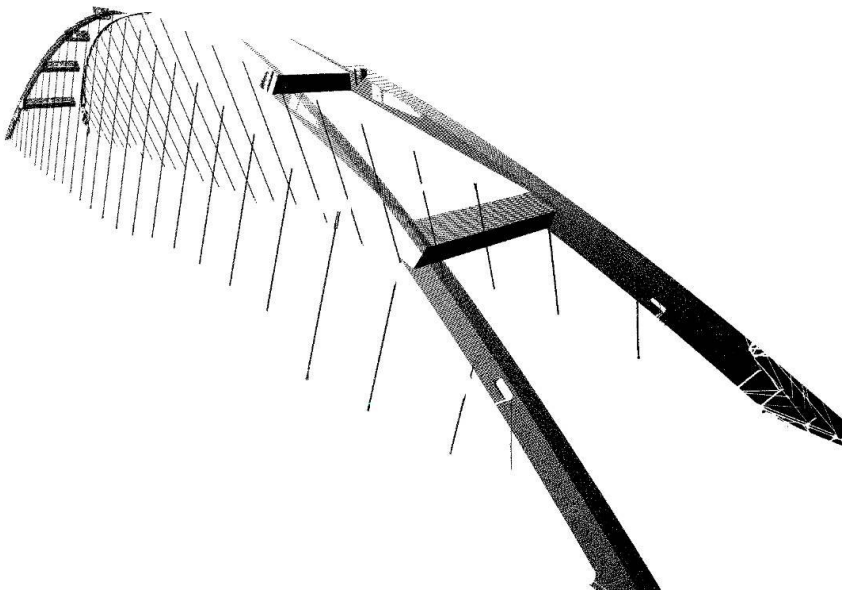
Mivel a teherállások csak rövid ideig tartottak és megismétlésükre nem adódott lehetőség, így az egyetlen álláspontból végzett lézerszkennelés felbontását csökkentenünk kellett, aminek hatásait a későbbiekben tárgyaljuk. A mérés során a pálya alsó részét és az északi kosárívet mértük fel, és a kiértékelés során a helyi koordinátarendszerünk kezdőpontját a kosárív és a pálya bal parti találkozásánál vettük fel (Polgár 2007, Lovas et al. 2007b).

A 3. ábrán láthatóak a kitakarási viszonyok. Jól látható a Dunaújvárosi oldalon a kisebb pontsűrűség, ami az egy teherállásban mérésre fordítható időtartam rövidsége miatt alakult ki, hiszen a felbontást 0.017°-ban kellett meghatároznunk (a műszer maximális felbontása 0.002°).

Az eredmények kiértékelésénél referenciának a terheléspróba alatt végzett felsőrendű szintezés által szolgáltatott eredményeket tekintettük. A szabatos szintezés 1 mm-es középhibájához képest a földi lézerszkenneres felmérés jellemző középhibája – a gyári specifikáció szerint, melynek helyességét korábban igazoltunk – ±5 mm, azonban az 4. ábrán látható apró eltérések elsődleges oka nem a két technológia közötti mérési pontosságbeli eltérésben keresendő.

A görbéknél tapasztalható oszcilláció elsődleges oka a korábban említett felbontás-redukció eredménye, amit a rajtunk kívül álló okok miatt nem tudtunk befolyásolni. Ennek hatása az eredmény pontfelhőben igen nehéz feladatok elé állított bennünket, mivel különösen nehéz volt éleket és síkokat illesztenünk a geometriai elemekre. Emellett azonban megállapítható, és a görbék trendjei is igazolják a lézerszkenneres mérések alkalmasságát.

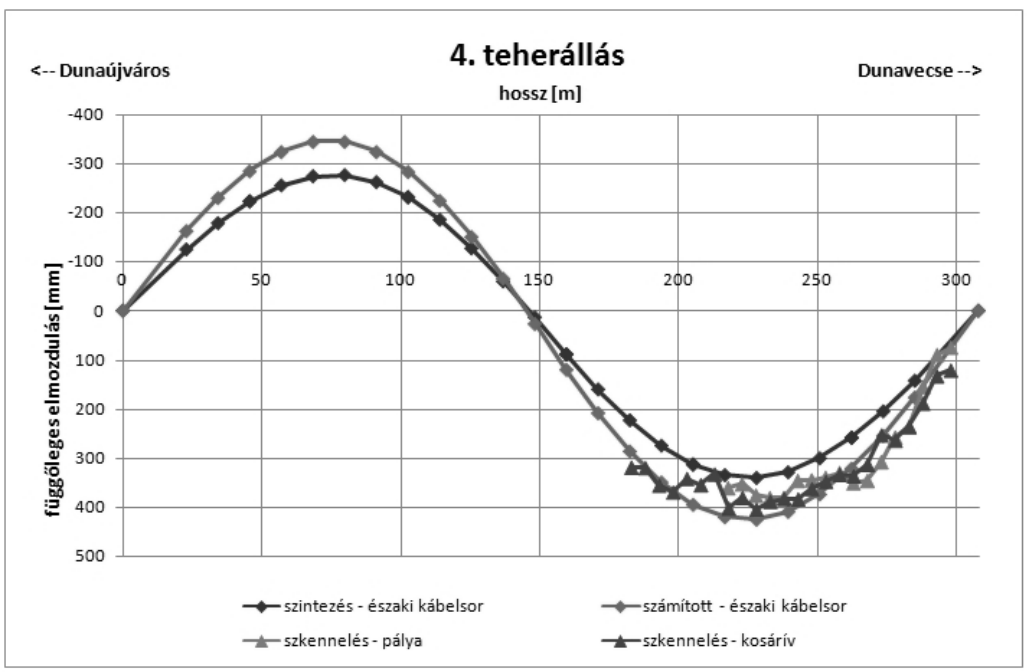
Ennek bizonyítéka, hogy a lézerszkennelésből nyert adatok erős korrelációban állnak a hagyományos technológiák által szolgáltatott (pl. felsőrendű szintezés) adatokkal. A maximális elmozdulás



3. ábra. A Pentele híd pontfelhője

(~35 cm) mindkét felmérési technológia esetén a negyedik teherállás alatt adódott, amikor a híd dunavecsei oldalát terhelték 6 db 40 tonnás teherautóval (4. ábra).

Meg kell jegyeznünk, hogy a pálya függőleges elmozdulását közvetlenül a kábeleknél mérték a szintezést végző szakemberek, míg a lézerszkenner a pálya alatt futó hossztartó élét rögzítette, de a két szerkezeti elem mozgása azonosnak tekinthető (Lovas et al. 2007a).



4. ábra. A negyedik teherállás során fellépő elmozdulások (pálya és északi kosárív) – különböző technológiák

4.2 Pentele híd – további elemzések

A pontfelhők alapján előállítható a felmért objektum 3D-s modellje. Ezen modellek, mivel geometriai primitívek alkotják őket sokkal több elemzési lehetőséget biztosítanak, mint a normális nélküli pontokból álló pontfelhők. Egy nagyon fontos elemzési lehetőség lehet az, ha a tervekből előállított modellt vetjük össze a pontfelhővel. Ehhez nem csupán a méréseket kell megfelelő elővigyázatossággal és gondossággal megtervezni, előkészíteni és végrehajtani, de a terveket is 3D-ban kell előállítani, vagy 2D-s tervek: hossz-, és keresztszelvények valamint alaprajzok segítségével kell a térbeli modellt előállítani. Fontos kitétel még a mérések és a tervek közös koordináta rendszerének biztosítása.

Ha a fent említett feltételeket kielégítjük, lehetőségünk nyílhat a teljes szerkezet egészét érintő változások és folyamatok modellezésére, valamint nyomon követésére. Mivel jelen esetben nem állt rendelkezésünkre ilyen tervdokumentáció, ezért a beúsztatás után végzett próbamérés során mért pontokból állt elő a híd térbeli modellje, amit az 5. ábra mutat (Lovas et al. 2008a, 2008b).

4.3 Megyeri híd

A Megyeri híd valójában 5 híd együttese (9 hídszerkezeti elemből áll), melyek közül a legnagyobb fesztávú, a Dunán átívelő (a pesti oldalt és a Szentendrei szigetet összekötő), 591 méter hosszú (acélszerkezetű, vasbeton pilonokkal) részének terheléspróbája során volt alkalmunk méréseket végezni. A terhelésvizsgálat során a főtartók függőleges mozgását felsőrendű szintezéssel, a befolyási (északi) és kifolyási (déli) oldalon 10-10 műszerállásban, Zeiss Ni007 és MOM Ni A31 típusú műszerekkel mérték. A közel 100 m magas pilonok hídtengely irányú mozgását geodéziai mérőállomással, a pilonok tetején elhelyezett 2-2 mérőbélyegre való méréssel határozták meg (Molnár 2009).

Lézerszkennelési módszerünket sikerült továbbfejlesztenünk. Az alakváltozásokat ezúttal 2 álláspontban elhelyezett szkennerekkel rögzítettük. Az egyes mérések között, valamint a két egymástól több mint 600 méterre lévő álláspont között a kapcsolatot a prizmák EOV koordinátáinak bemérésével sikerült biztosítanunk. Ezzel a módszerrel a híd mindkét végéről nagy pontsűrűségű, ezáltal



5. ábra. A Pentele híd 3D-s modellje

pontosabban kiértékelhető pontfelhőt nyertünk. Az egyik műszert (Riegl Z420i) a pesti oldalon, a másikat (Riegl Z390i) a Szentendrei szigeten helyeztük el, 50, illetve 35 méter (merőleges) távolságra a hídtól, a mederhíd szélei közelében (6. ábra). A mérést 2008. augusztus 23–án este 19-től 22 óráig végeztük. A 15 teherállásból lézerszkenneléssel csak az első 4 teherállás felvétele történt meg, mivel a heves esőzés miatt a mérést meg kellett szakítani.

Az egyes teherállások (7. ábra):

1. nullmérés, terheletlen állapot,
2. a híd terhelése a pilonok és a part közti szakaszon (12-12 db 42 tonnás teherautóval),
3. a híd terhelése a pilonok között (24 db teherautóval),
4. a maradó alakváltozás mérése, terheletlen állapot.

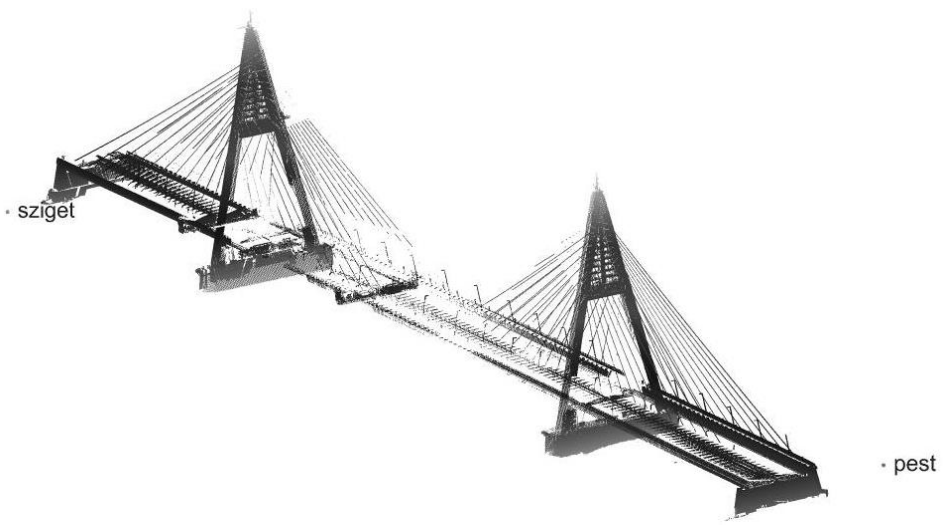
A felmérés során a két műszer a 2. táblázatban látható paraméterekkel végezte a felmérést. A pontok számára és a pontsűrűségre kiható felbontás az egyes teherállásokban a pályalemez mozgásának mérésére alkalmazott felsőrendű szintezésre rendelkezésére álló idő alapján lett beállítva, ami hozzávetőlegesen 25 perc volt. Figyelembe véve azt, hogy a hídszerkezet mérésén túl az illesztőpontokat is meg kellett mérnünk, így alakult ki a 0.03°-os felbontás.

2. táblázat: Lézerszkennelések paraméterei

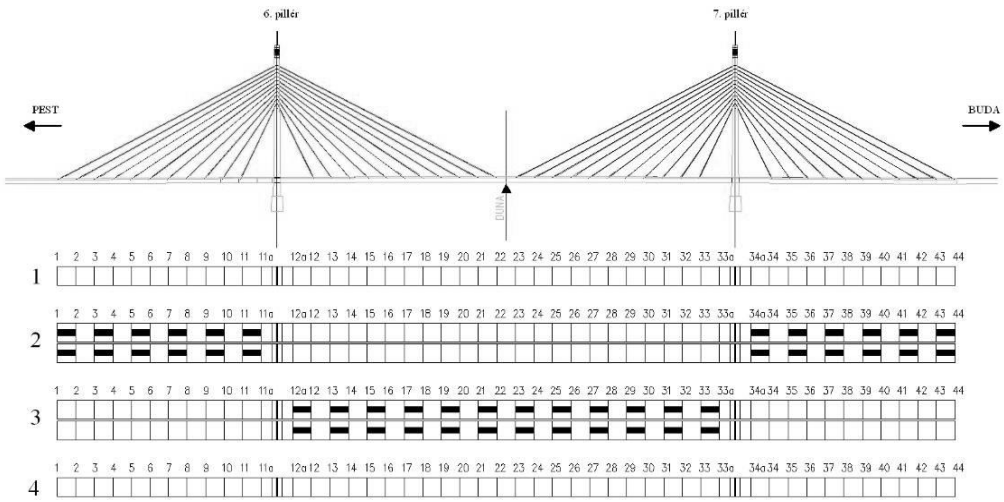
	Pest (Riegl Z420i)			Sziget (Riegl Z390i)		
scan	idő	felbontás	pontszám	idő	felbontás	pontszám
áttekintő mérés	1'30”	0.20˚	716 604	1'29”	0.20˚	713 216
részletes felmérés	21'41”	0.03˚	5 756 028	21'14”	0.03˚	6 407 291

A két álláspontból végzett mérés eredményeként előállt pontfelhőn könnyen felismerhetők még az olyan viszonylag kisebb méretű, karcsú szerkezeti elemek is, mint a kábelek. A műszerek elhelyezésénél említett okok miatt a műszerektől távolodva az egységfelületen értelmezett pontsűrűség csökken, melyet tovább ront a kedvezőtlen beesési (túl hegyes) szögek okozta lézer pontjel szóródás. Ezen kívül a híd közepe tájékán a hídszekrény oldala még felületkezelés előtt állt, az anyag visszaverési képessége pedig alapvetően függ a színétől és felületétől (6. ábra).

Az eredmények értékeléséhez itt is érdemes a pályalemez mozgását mérő felsőrendű szintezés eredményeit referenciaértékeknek tekinteni. Megállapítható, hogy a két technológiával előállított eredmények jól korrelálnak. A híd közepén tapasztalt kisebb pontsűrűség és pontosság miatt e szakasz kiértékelését elvetettük (8. ábra).



6. ábra. Eredmény pontfelhő az álláspontok jelölésével és a híd közepén tapasztalható kisebb pontsűrűség

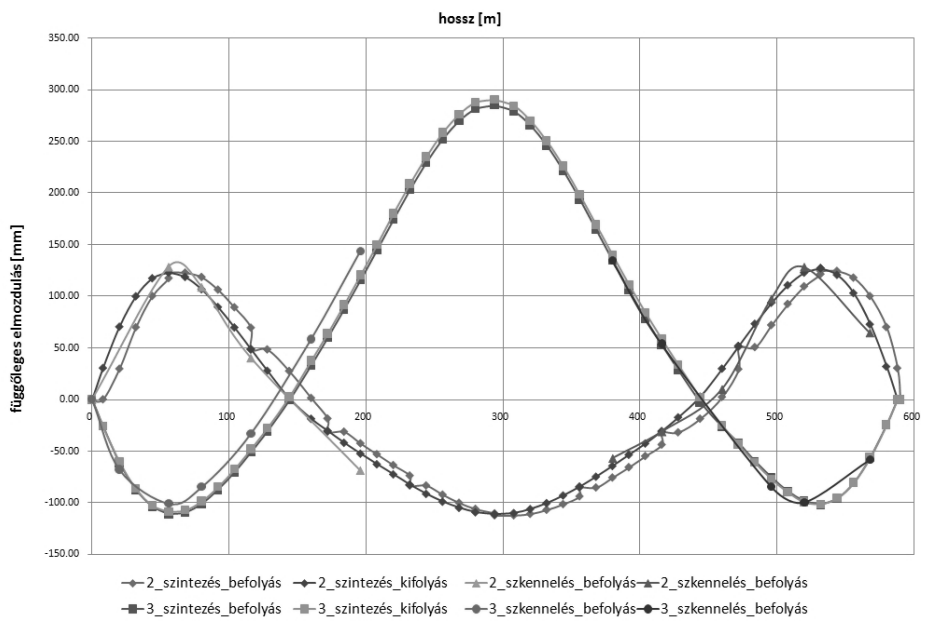


7. ábra. Lézerszkenneléssel felmért teherállások

Az egyes pontokban található eltéréseknek legfőbb okai:

- A szintezés során diszkrét pontok elmozdulását mérik, lézerszkennelésnél a pontfelhőre illesztett egyenesek, ívek elmozdulását.
- Szintezéssel közvetlenül az útpálya mozgását mérik, lézerszkenneléssel a híd alja látszik, a pályalemez alatti kereszttartókra illesztett íveken keresztül mérjük a pályalemez mozgását.
- A teherállások szintezése alatt a lézerszkenner a mederhidat az egyik parttól a másik partig 22 perc alatt mérte fel. A híd a terhelés során mozgott, azaz a lézerszkennelt állomány nem pillanatképet adott, hanem „tartalmazta" a híd mérés során szenvedett alakváltozásait is.

A befolyási oldal szintezési és lézerszkennelési eredményeinek összevetéséből (8. ábra) érdekes következtetést lehet levonni. A teherállások mérése során, miután a teherautók elfoglalták helyüket, oldalanként a pályákon egyidőben (!) 10-10 állásponton felsőrendű szintezést hajtanak végre, mely



8. ábra. Összesített eredménye

körülbelül 25 percig tart. A szintezési jegyzőkönyvekből és a pilonmérésekből is kitűnik, hogy a híd eközben még mozog, azaz a mérési intervallum elején és végén nem ugyanaz az alakja!

Az eredmények alapján megállapítható, hogy azon az oldalon, ahol a szkennelés kezdődött (befolyási oldal esetén a pesti oldalon), az eredmények jobban korrelálnak a szintezési eredményekkel (Lovas et al. 2008c). A felmérés közben tapasztalható elmozdulás, a mérési körülmények (éjszakai mérés, sok műszerállás és lécleolvasás) és az elmozdulások (dm-es) nagyságrendje miatt a lézerszkennelés biztosította középhiba alapvető mérnökgeodéziai alapelveket és gyakorlati szempontokat figyelembe véve elegendőnek értékelhető a híd mozgásának felméréséhez.

A lézerszkennelés terhelésvizsgálatok során való alkalmazásának jelentősége nem a pályalemez vizsgálatában emelkedik ki, hiszen arra a jól bevált szintezés is alkalmazható. A továbbiakban olyan példákat mutatunk, melyeket hagyományos geodéziai módszerekkel nem, vagy csak rendkívül költséges módon lehetne elvégezni.

4.4 A terhelés hatása a pilonokra

A lézerszkennelés előnye terhelésvizsgálatok során olyan területeken domborodik ki, melyet hagyományos módszerekkel nem lehet vagy nem érdemes mérni. A terhelésvizsgálat alatt a pilonok mozgását geodéziai módszerekkel diszkrét pontokban mérik, lézerszkenneléssel a teljes felület mozgása leírható, az esetleges deformáció kimutatható.

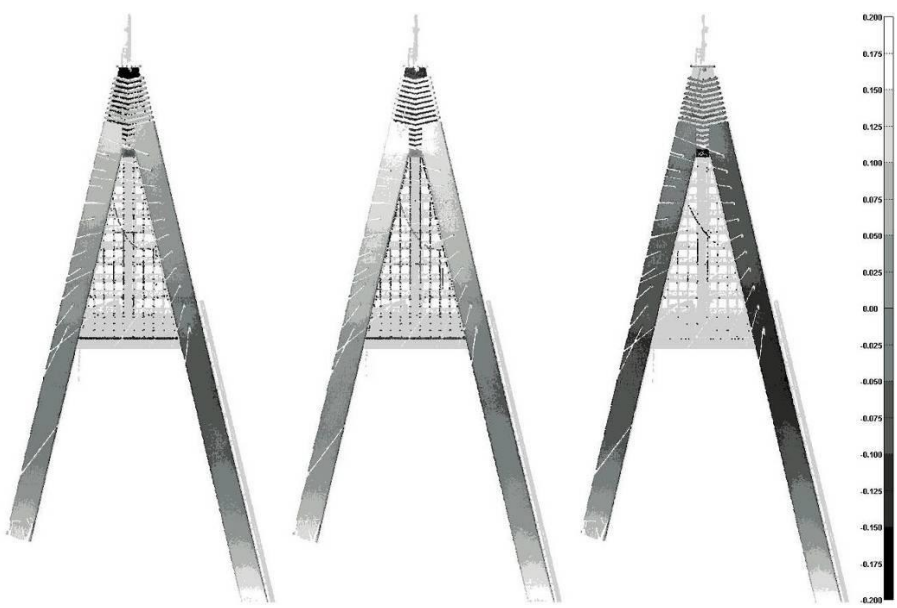
A 9. ábrán a pesti pilon part felőli oldalára legjobban illeszkedő referencia síkhoz viszonyított eltéréseket ábrázolja, azaz megfigyelhető a pilon keresztmetszetének változása a terheletlen állapotban (bal oldali, nagy kép).

A 2. és 3. teherállásokban jól megfigyelhető a pilon part irányú és azzal ellentétes dőlése (középső és jobb oldali kép, 9. ábra).

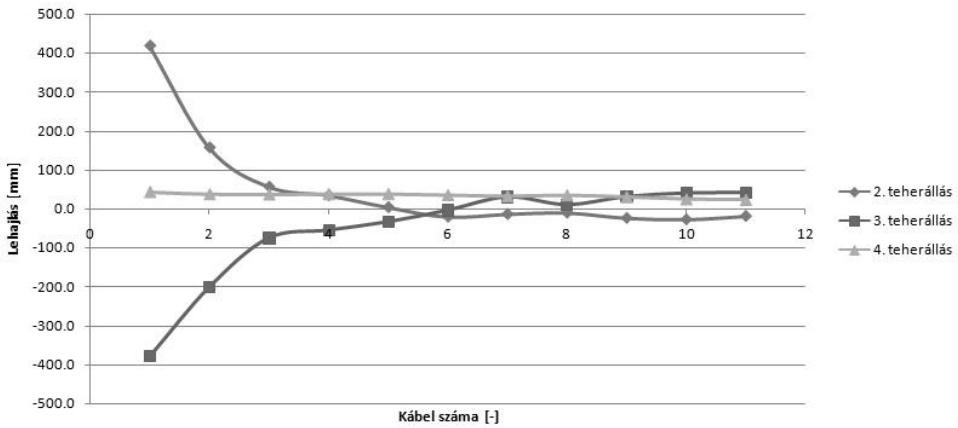
4.5 Kábelek mozgásának vizsgálata

A lézerszkennelt pontfelhő pontsűrűsége és felbontása lehetővé teszi a kábelek modellezését és így a kábelmozgások kiértékelését. Ez olyan alkalmazási terület, melyet geodéziai módszerekkel nem mérnek a terhelésvizsgálat során.

A legnagyobb alakváltozást, illetve a terheletlen állapotban felmért kábelhelyzethez viszonyított



9. ábra. Pilon alakja, eltérések a referenciasíkhoz képest 1-3 teherállás (balról jobbra) [mm]



10. ábra. Kábelek elmozdulása

legnagyobb elmozdulást a leghosszabb kábelek szenvedték, hiszen ezeknél a pályalemez oldali befogásuknál (a pillér felett) a pálya nem tudta „lekövetni" az elmozdulást, így azt teljes mértékben a kábeleknek kell felvenniük.

Az eltérések pontos meghatározásához – akárcsak a pályalemez esetén – nem elég a pontfelhőt, vagy a pontfelhő segítségével előállt modellt vizsgálni, hanem célszerű meghatározott pontokon konkrét elmozdulás értékeket megmérni. Ezt a kábelek függőleges síkra értelmezett vetületén végzett mérésekkel végeztük el.

A kábelek elmozdulásai tetszőleges pontokban mérhetők pl. CAD rendszerben. A nullmérési állapotukhoz képest a kábelek felezőpontjain felvett keresztmetszetekben kiértékeltük az elmozdulásokat. Természetesen ezek nem a legnagyobb elmozdulások, azok kiértékeléséhez a kábelek alakját legjobban közelítő függvényeket kell elemezni; a kézi módszerrel végzett mérések szerint a felezőpontokban számolt elmozdulásokhoz viszonyítva nagyságrendi eltérés nem tapasztalható. Az egyes kábelek elmozdulásait grafikonon ábrázoltuk (10. ábra, Lovas et al. 2008c).

5 Összefoglalás

Cikkünkben bemutattuk, hogy a földi lézerszkennelés miként segítheti a hidak terhelésvizsgálati méréseit. A hagyományos geodéziai módszerekkel való összevetés kimutatta, hogy a lézerszkenneres felmérés eredményei jól korrelálnak a szabatos geodéziai eredményekkel. A lézerszkennelés azonban nem a hagyományos módszerek kiváltásával, hanem azok kiegészítésével támogathatja legjobban a mérnöki szerkezetek mozgás- és deformáció vizsgálatát. A távérzékelési technológia sajátosságaiból fakadóan a szkennelés a felmérő és kiértékelő személyzettől nagy mértékben független, eredményként nagy pontosságú, térbeli pontfelhő áll elő a felmérendő objektumról.

A különböző állapotokban rögzített szerkezet alakján utólag, a feldolgozás során határozhatók meg azok a pontok, ahol pl. a legnagyobb elmozdulás történt.

Érdemes a technológia hátrányairól is szót ejteni. Az eleredő eső gátolja, megzavarja a lézersugarak egyenes terjedését és megköveteli a szkenner és kiegészítő berendezései (laptop, áramellátás, stb.) vízvédelmét.

A jelenleg elérhető földi lézerszkennerek pontossága nem éri el a geodéziai műszerek milliméteres vagy milliméter alatti pontosságát, biztonsággal csak ±5mm-es középhiba érhető el. Sok esetben azonban az elmozdulások (több cm-es vagy dm-es) mértéke esetleg indokolatlanná is teheti az ennél nagyobb pontossági követelményeket.

Bár a korábbi vizsgálatokkal szemben, Magyarországon elsőként két lézerszkennerrel párhuzamosan rögzítettük az egyes teherállásokban jelentkező elmozdulásokat, a távolságok és beesési szögek miatt a pályalemez mozgásának vizsgálata során a pesti oldalon csak a befolyási, míg a szigeti oldalon csak a kifolyási oldalon születtek értékelhető eredmények. Hasonló nagyságú szer-

kezet esetén megfontolandó még több szkenner bevetése, lehetőség szerint állandó tájékozó pontok (reflektorok) alkalmazásával akár a pályán elhelyezett szkennerrel történő mérés is.

Köszönetnyilvánítás. A cikkben tárgyalt kutatás a Bolyai János Kutatási ösztöndíj támogatásával készült. A szerzők köszönetet mondanak a Burken Kft.-nek (www.laservision.hu) a felmérés és feldolgozás során nyújtott értékes közreműködésért.

Hivatkozások

Domanovszky S (2007): Tudósítás a Dunaújvárosi Duna-híd acél felszerkezetének építési munkálatairól. Magész Acélszerkezetek, Magyar Acélszerkezeti szövetség, IV; 1, 24–42.

Horváth A (2007): A tervező a híd beúsztatásáról. Hídépítők melléklet, VÉ-KA, XXXVI. 1, 10–13.

Lovas T, Barsi Á, Detrekői Á, Dunai L, Csák Z, Polgár A, Berényi A, Kibédy Z, Szőcs K (2008a): Terrestrial Laserscanning in Deformation Measurements of Structures. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXVII, B5, 527-531.

Lovas T, Barsi Á, Polgár A, Kibédy Z, Berényi A, Detrekői Á, Dunai L (2008b): Potential of Terrestrial Laserscanning Deformation Measurement of Structures. Proc. ASPRS Annual Conference, Portland, USA, April 28 – May 2, p.10.

Lovas T, Berényi A, Kandra L, Barsi Á (2008c): A Megyeri híd terhelésvizsgálatának támogatása földi lézerszkenneléssel. tanulmány, p. 19.

Lovas T, Barsi Á, Polgár A, Kibédy Z, Detrekői Á, Dunai L (2007a): A dunaújvárosi Pentele híd terhelésvizsgálatának támogatása földi lézerszkenneléssel. Geodézia és Kartográfia, Budapest, LIX, 10-11, 32-39.

Lovas T, Barsi Á, Polgár A (2007b): A Dunaújvárosi Duna-híd terhelésvizsgálatának támogatása földi lézerszkenneléssel. tanulmány, p. 14.

Maksó M (2006): Mérnöki szerkezetek deformációjának meghatározása földi lézerszkenneléssel. diplomaterv, p. 45.

Molnár B (2009): M0 Északi Duna-híd pilonépítés geodéziai irányítása. Geodéziai és Kartográfia, Budapest (megjelenés alatt)

Polgár A (2007): Hídszerkezet terhelésvizsgálatának támogatása földi lézerszkenneléssel. diplomaterv, p. 45.

FAÁLLOMÁNYOK MAGASSÁGI MODELLJEINEK ELŐÁLLÍTÁSA TÁVÉRZÉKELÉSI ELJÁRÁSOKKAL

Brolly Gábor, Király Géza*, Márkus István**

Derivation of Crown Height Models by remote sensing techniques *- Crown Height Models contain tree heights above ground level. Based on aerial photos and aerial laser scanning two Crown Height Models were calculated over two forested sample area (Sopron and Hanság). Both data sources are for general purposes, moreover the laser scanning was flown under leaf-off conditions. Present study primarily focuses on two different crown surface reconstruction methods, which are fundamental for Crown Height Models. In case of aerial photos an image matching based technique was adopted, while a filtering algorithm was developed for laser scanning data. Stand heights were calculated from Crown Height Models and were validated against forest inventory data. The model extracted from stereo photos is suitable for forest mapping applications only due to its limited accuracy, but the model from laser scanning is sufficient for operational stand height estimation.*

Keywords: forestry, laser scanning, photogrammetry, surface model Extraction, DEM/DTM

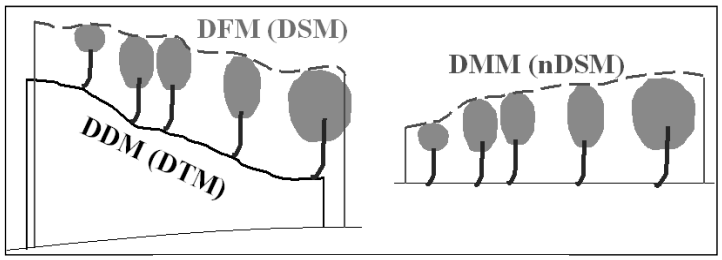
A magassági modellek tereptárgyak talajtól mért magasságait tartalmazzák. Kétféle távérzékelési forrásadat – légifelvételek és légi lézeres letapogatás – alapján állítottunk elő magassági modelleket egy soproni és egy hansági erdőterületen. Mindkét forrásadat általános célú felhasználásra szánt, továbbá a lézeres letapogatás lombtalan állapotban történt. Munkánkban elsősorban a magassági modellek létrehozásához szükséges lombkorona-felületmodellek előállításának két módszerét vizsgáltuk részletesen. Légifelvételek esetén egy képegyeztetésen alapuló eljárást adaptáltunk, míg a lézeres letapogatás feldolgozásához saját szűrési algoritmust fejlesztettünk ki. Az ezek alapján előállított magassági modellekből erdőrészletenként átlagmagasságot határoztunk meg, melyek pontosságát erdőtervi adatok alapján értékeltük. A légifelvételekből előállított modell erdészeti célú felhasználására leginkább csak erdőtérképezésben látunk lehetőséget, ezzel szemben a lézeres letapogatás alapján előállított modell átlagmagasság meghatározására is alkalmas.

Kulcsszavak: erdészet, lézeres letapogatás, fotogrammetria, felületmodell-előállítás, DDM

1 Bevezetés

A faállományok magasságának ismerete erdőgazdálkodási szempontból nélkülözhetetlen, azonban az ehhez szükséges mérések sok terepi munkát igényelnek, időigényesek, gyakran körülményesek. Egyetlen fa magasságának meghatározásához a fa tövének és csúcsának magasságkülönbségét kell megmérni. Faállomány esetén leggyakrabban mintavételes famagasságmérésekkel, majd a mérési eredmények súlyozott átlagolásával történik az állományra jellemző átlagmagasság (H_L) meghatározása. Az átlagmagasságok fafajtól és kortól függően 5-10 év alatt elavulnak, ezért számos helyen csak közelítő pontossággal állnak rendelkezésre. Távérzékelési módszerekkel azonban lehetőség van a faállomány-magasságok modellezéséhez szükséges forrásadatok nagy területről történő rendszeres beszerzésére, és magas fokon automatizált feldolgozására. Munkánkban azt vizsgáltuk, hogy milyen módszerekkel és milyen pontossággal lehet faállományok magasságát modellezni néhány olyan adatforrás felhasználásával, melyek jelenleg nagy területen rendelkezésre állnak, illetve potenciálisan, a közeljövőben rendelkezésre állhatnak. A modellek alapegysége az erdőgazdálkodásban használatos erdőrészlet volt, mely általában 1-20 hektáros, szerkezetében viszonylag egységesnek mondható faállományt takar. Egy erdőrészletet ezért egy átlagmagassággal jellemeztünk. A becsléseket Digitális Magassági Modellek (DMM) alapján végeztük olyan állományokra, melyek egyetlen lombkoronaszintet tartalmaznak. A DMM a tereptárgyak talajszinthez viszonyított magasságát írja le, használatos rá még a Normalizált Felületmodell és Objektummagasság Modell elnevezés is. Előállításához szükség van a területen található tereptárgyak magasságát tartalmazó digitális

*NYME, EMK, GEVI, Földmérési és Távérzékelési Tanszék
E-mail: gbrolly@emk.nyme.hu



1. ábra. A magassági modell és előállítása

felületmodellre (DFM), valamint a terület digitális domborzatmodelljére (DDM). A DMM e két felületmodell magassági különbségét tartalmazza raszteres formátumban (1. ábra). Fontos megemlíteni, hogy faállományok esetén sem a DFM, sem a DMM fogalma nem egységes (Pfeifer 2003). Sok esetben nem a felület és magasság klasszikus – fizikai – értelemben vett modelljeiről van szó, csupán statisztikai eljárásokhoz szolgáltatnak bemenő adatokat (pl. Popescu et al. 2002). Jelen munkában a DFM erdőterületen a lombkoronák tetején húzódik, a magassági modellel pedig torzításmentesen a fák magasságát kívánjuk leírni, hasonlóan mint Yu et al. (2004) vagy Koch et al. (2006). Egy erdőrészletre – az erdőrészlet határainak ismeretében – a területen található rasztercellák magasságainak számtani átlagával becsülhetjük a részlet faállományának átlagmagasságát. Ez a számítási eljárás csak akkor vezethet pontos eredményre, ha az állományt alkotó egyedek méretei nem térnek el lényegesen egymástól. Ekkor közelíthető ugyanis a súlyozással számítandó valós átlagmagasság a modellből számított egységsúlyú átlaggal. Egy lombkoronaszintes állományokra ez a feltétel többnyire teljesül. Az általános eljárás vázlatát a 2. ábra szemlélteti.

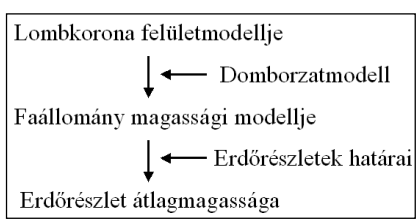
Két mintaterületen kétféle forrásadattal dolgoztunk. Az első mintaterületen, a Soproni-hegységben, olyan állami alapadatokat használtunk fel, melyek országosan rendelkezésre állnak: a Földmérési és Távérzékelési Intézet (Nagyfelbontású digitális domborzat modell az ország teljes területére: http://fish.fomi.hu/termekekhonlap/adathaz/termekek/domborzat/DDM5_reszletek.pdf) által forgalmazott Légi2005 projekt légifelvételeit és a DDM5 digitális domborzatmodellt. A második mintaterületet a Hanságban jelöltük ki. Itt egy olyan légi lézeres letapogatás adatai álltak rendelkezésre, melyet kimondottan nagypontosságú domborzatmodell előállításának céljából készítettek. Az erdészeti célú felhasználás tehát mindkét esetben csak kiegészítő ugyan, de utal a különböző szektorok összefogásával létrejövő, nagyobb távérzékelési projektekben rejlő lehetőségekre.

2 Anyag és módszer

2.1 Forrásadatok

A légifelvételek a tájékozási adatokkal együtt a FÖMI Légi2005 felméréséből származnak. A színhelyes színes felvételek 2005 nyarán készültek, a digitális formátumú képek terepi felbontása 0.6 méter. A domborzatmodell a FÖMI ELK-DDM5 (előzetes, sztereókiértékeléssel készített Digitális Domborzatmodell) adatbázisából származik. Az 1:10’000 méretarányú topográfiai térképek domborzatrajzának digitalizálásával előállított modell domborzatábrázolási pontossága megfelel a T.1. Szabályzatban foglaltaknak. Ez a Soproni-hegység erdővel fedett területeire ±2.0 m-es középhibát jelent (MÉM 1976). A Soproni-hegyvidéken a legfrissebb erdőtervi felmérés 2004-ben történt, mely során terepi famagasságmérések alapján az átlagmagasság is meghatározásra került.

A lézerszkennelést a Bécsi Műszaki Egyetem Fotogrammetria és Távérzékelés Intézete (IPF) megbízásából a TopScan GmbH végezte a SISTEMaPARC (INTERREG III B) nemzetközi projekt keretében. A repülésre 2004 novemberében került sor, az adatgyűjtés egy ALTM2050-es szenzorral történt 1.5 mérés/m^2-es mintavételi sűrűséggel. A felmérés során az első és az utolsó visszaverődések



2. ábra. A munkafolyamat vázlata

kerültek rögzítésre. A ponthalmaz tájékozását és a domborzatmodell előállítását az IPF végezte (Attwenger és Chlaupek 2006). A domborzatmodell alapján, 0.5 méteres magassági küszöb alkalmazásával leválogattuk a vegetációról érkezett első visszaverődésből származó méréseket. A megmaradt ponthalmaz sűrűsége az erdővel borított területeken így négyzetméterenként 0.5-re csökkent. A mintaterületeket tartalmazó erdőrészletek erdőtervi felmérése a repülést megelőző évben történt.

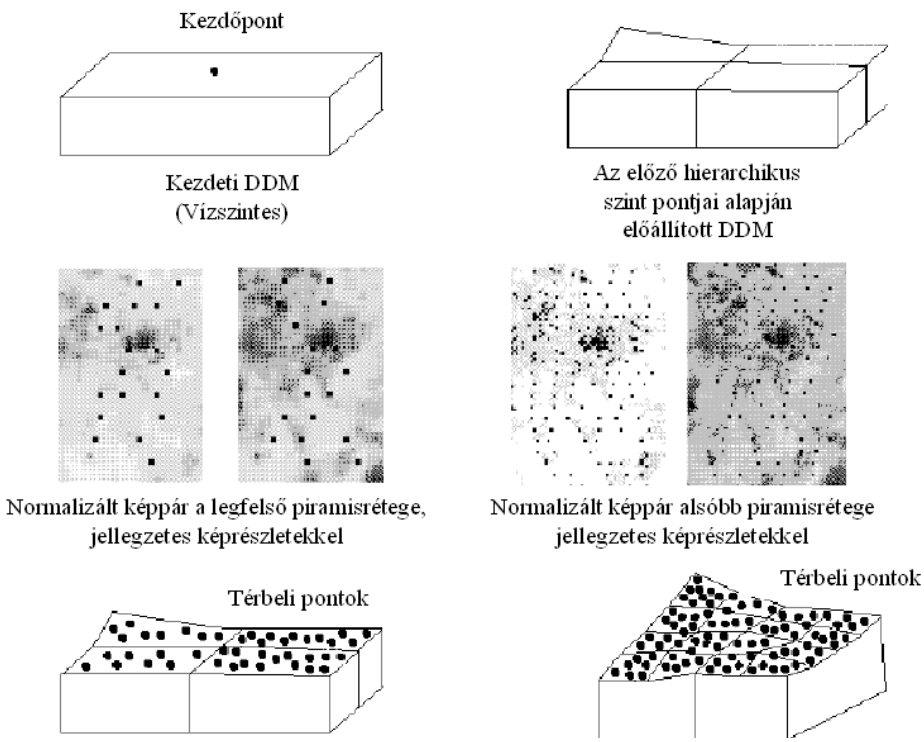
2.2 DMM előállítása fotogrammetriai úton

A mintaterületként szolgáló erdőrészleteket Soprontól nyugatra, Brennbergbánya közelében jelöltük ki. A 2.5 × 4.0 km-es befoglaló téglalapba eső erdőrészletek közül az erdőtervi leíró adatok alapján kizártuk az elemzésből a többszintes, vagy 5 méteresnél alacsonyabb állományokat. Vizuális értékelést követően eltávolítottuk azokat az erdőrészleteket, melyeknél nem volt teljes az erdőborítottság. Ezt követően összesen 102 erdőrészlet erdőtervi átlagmagassága állt rendelkezésre a vizsgálatokhoz.

Az erdőrészletek vektoros poligonjait 10 méteres belső pufferzónával csökkentettük a szegélyhatások kiküszöbölése céljából. A mintaterületet 3 felvételből álló sor fedi le 60%-os átfedéssel.

A lombkorona felületének előállításához a Z/I Imaging (2004) ImageStation® programcsomag Automatic Elevations modulját használtuk. A szoftver elsődleges rendeltetése domborzatmodellek előállítása sztereóképpárok alapján, de a rugalmas és sokoldalú paraméterezhetőségnek köszönhetően borított felszínek modellezésére is jól használható (Aguilar et al. 2007). A program a tájékozási elemek ismeretében a képrészletek közötti korreláció alapján keres fel homológ pontokat, melyekből az epipoláris geometria szerint térbeli koordinátákat számol. A modellezni kívánt felület jellegének megfelelő pontszűrést követően, bilineáris interpolációval áll elő a modell. A folyamat a képek piramisrétegei szerint hierarchikus módon, a modell fokozatos finomításával történik (Z/I Imaging, 2004) (3. ábra).

A modellezési folyamat paramétereinek kiválasztásához a modellezni kívánt borított felületmodell „topográfiai" sajátosságaiból indultunk ki. A területen található faállományok korban és méretben széles tartományban helyezkednek el, ami a felvételeken a textúráltság változásaként jelentke-



3. ábra. Az ImageStation automatikus domborzatmodellező algoritmusa. (Z/I Imaging ®, 2004 nyomán)

zik. A képek 0.5 méteres terepi felbontása miatt a fiatalabb állományok már csak alacsony textúráltsággal jellemezhetők, emiatt a képrészlet-egyeztetések sűrűségét megnöveltük. A lombkorona felületét követve helyenként éles letöréseket találunk, jellemzően az állományszéleken és eltérő magasságú faállományok határán. Egy-egy állományon belül kiemelkedő vagy visszamaradt facsoport esetén számítani lehet kis kiterjedésű, de jelentős magasságkülönbségekre is. Ezeknek a jellegeknek a megtartása végett a pontszűrést és a felület simítását minimálisra korlátoztuk. Mivel a lombkoronában tapasztalható fény- és árnyékviszonyok a képrészlet egyeztető algoritmusokat könnyen megtévesztik, az alapértelmezettnél nagyobb, 7×7-es korrelációs ablakkal, és magasabb korrelációs küszöbbel (0.85) dolgoztunk. A modell végső terepi felbontása 5 méter. Az eredményt vizuális úton ellenőriztük, ahol elsősorban a vágásterületek és szélesebb nyiladékok menti letörések meglétét vizsgáltuk. A DMM előállításának további lépései és az átlagmagasságok levezetése a bevezetőben leírtak szerint történtek.

2.2 DMM előállítása lézeres letapogatás adataiból

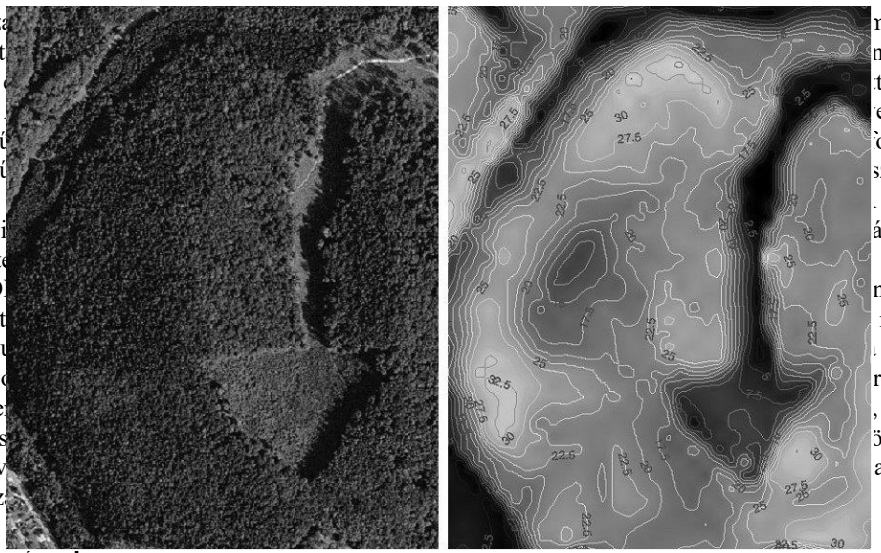
A mintaterületek kijelölésénél minden erdőrészletet figyelembe vettünk, melynek teljes területét lefedi a lézerszkennelés, továbbá az erdőrészlet átlagmagassága az erdőtervi adatok szerint meghaladja az 5 métert. Ezeknek a feltételeknek 53 erdőrészlet felelt meg. Mivel az itt jellemző fafajokra fiatalkorban rendkívül gyors növekedés jellemző, az erdőrészletek átlagmagasságának számításakor a főfafajok erdőtervből vett magasságát Sopp (1974) szerint egy évre növedékesítettük (előrejeleztük). A termőhelyi sajátosságok nyomán az erdőrészletekben gyakran találunk pusztuló foltokat, 5-10 méteres átmérővel jellemezhető cserjés tisztásokat, melyek kis méretük miatt nem szerepelnek a térképi adatbázisban. Az erdőgazdálkodás miatt mesterségesen létrehozott közelítőutak, keskeny nyiladékok területét és elhelyezkedését szintén nem ismertük. Mivel ezek fátlan területek, itt nincsenek lombkoronából mért pontok. A magassági modell előállításánál ezért biztosítani kell, hogy a fátlan területek minél kevésbé befolyásolják a felületmodell magasságait. A fátlan területek helyét, kiterjedését azonban nem ismerjük pontosan, így hatásukat nem lehet teljesen kiküszöbölni. A legalacsonyabb vegetációpontok gyors leválogatására 3 méteres magassági küszöböt alkalmaztunk.

A téli felvétel egyik jellemző sajátossága, hogy a vegetációpontok jelentős része a lombtalan ágak között átjutva nem a korona tetejéről, hanem alsóbb ágakról, vagy a törzsekről verődik vissza. A lombkorona felületének modellezéséhez ezeket a pontokat egy szűrési művelettel el kell távolítani. Kraus és Wagner et al. (1999) e célra domborzatmodellezésre használt módszerük adaptálását javasolják, melyben a pontok szűrése és a felület előállítása közös lépésben, hierarchikus módon történik. Mivel az eredeti eljárás csak az alacsonyabb pontokat vonja be a domborzatmodell előállítására, ezért az adaptálás első lépéseként minden nyers mérési pontra a magasság ellentettjét veszik. Így az eredetileg alacsonyabb, talajról mért pontokat a domborzatmodellező algoritmus eltávolítja, a felület interpolációjához pedig a lombkoronából származó pontokat használja fel. Az eredmény felületmodell – negatív előjelű – magasságait ezután újra meg kell szorozni -1-gyel. Barilotti et al. (2007) először egy TIN felületmodellt állítanak elő az összes vegetációpont felhasználásával, majd a háromszögek csúcsainak magasságkülönbségére adnak meg feltételeket, melyek alapján a magasabb pontok maradhatnak meg, és csak ezek vehetnek részt a szűrést követő interpolációban.

A szűrési algoritmussal szemben a következő elvárásaink voltak: (1) Zárja ki a törzstérből és a korona alsóbb részeiről visszavert pontokat (2) A szűrést követően a ponthalmaz területi eloszlása maradjon egyenletes, mert az átlagmagasságnak az egész erdőrészletet jellemeznie kell (3) Az erdőrészletben található, és az előszűréssel el nem távolított cserjés foltoknak minél kevésbé legyen hatása a tényleges faállomány felületmodelljére. Az utolsó két célkitűzés alapján egy lokális szűrési algoritmuson alapuló megoldás körvonalazódott, mely szerint a szűrési feltételt minden nyers mérési pontra a szomszédos pontok magasságai alapján fogalmaztuk meg. A szomszédok kiválasztása a síknegyedenkénti legközelebbi pontok lekérdezésével történt. Ezzel biztosítható, hogy a vizsgált pont a kiválasztott szomszédok által meghatározott négyszög területén belül legyen. A négy szomszéd magassága alapján bilineáris interpolációval számítjuk a vizsgált pontra vonatkozó magassági küszöbértéket. Ha a pont magassága ezt nem éri el, akkor környezetéhez viszonyítva alacsony, vagyis feltehetően nem a lombkorona felületéről verődött vissza, ezért kizárjuk. Fátlan foltokban

vagy sz… nérések.
Ezek elt… növelés-
ével az … ti távol-
ság nő. … enlőtlen
pontsűrű… olyásol-
ja. A szű… szereken
alapuló … szűrést
követő i… ávolság-
négyzete…

A D… n leírtak
szerint t… méteres
belső pu… szűrési
szintek … ra külön
tanulóte… , 1, 2, és
3 szűrés… össze az
erdőterv… a felület
létrehoz…



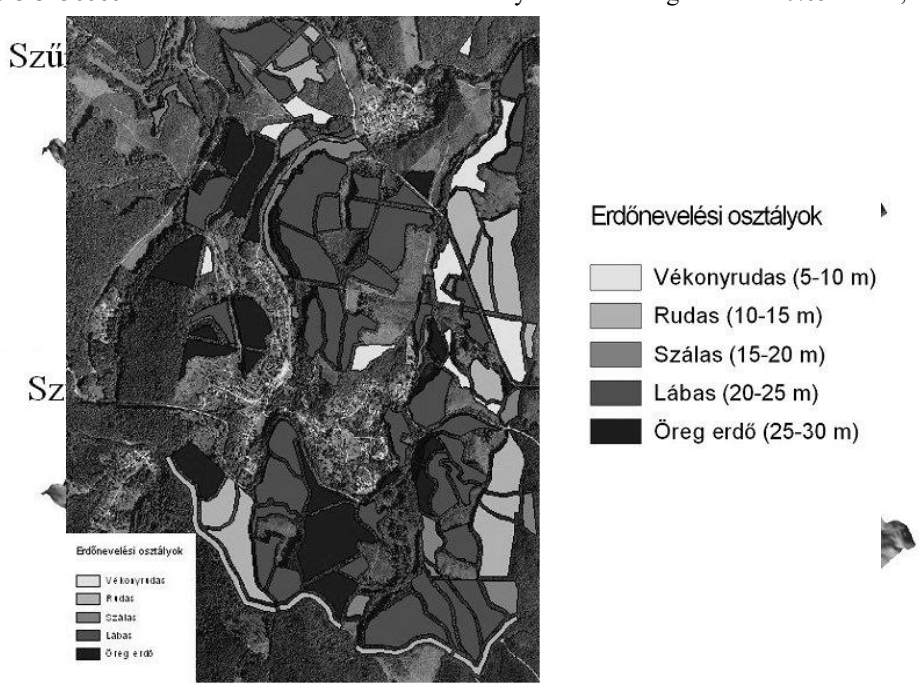
5. ábra. A soproni mintaterület egy részlete a légifelvételen (FÖMI) és felvételpárokból előállított DMM

3 Ere…

3.1 Fotogrammetriai úton előállított DMM

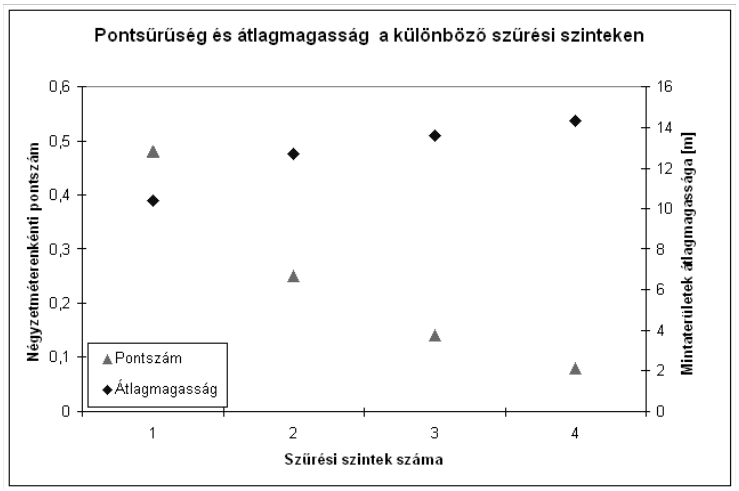
A magassági modellt az egész befoglaló területre elkészítettük. A képrészlet-egyeztetésből származó térbeli pontok száma az interpolációt megelőzően hektáronként átlagosan 237, ami 6.5 méteres átlagos ponttávolságnak felel meg. A hektáronkénti pontszám szórása 137, terjedelme [13, 645], vagyis meglehetősen egyenetlen eloszlásról van szó.

A szintvonalas ábrázolásról (5. ábra) látszik, hogy az állományok határán a magassági átmenet határozott, míg a faállományokon belül a felület sokkal simább, a magasság viszonylag lassan változik. A referenciaadatokkal való összehasonlítás eredményeként az átlagos hiba +0.65 méter, míg az



6. ábra. A különböző szintű pontszűrések után előállított lombkorona felületmodellek

előzetes középhi-
ba ±3.49 méter.
Az erdő- gazdál-
kodási gyakorlat
számára még
megfele- lő, 2
méteres hibahatá-
ron belül van az
erdőrész- letek
53%-a. 10 mété-
res nagy- ságren-
dű, kiug- ró-
jellegű hibát 3
erdőrész- letnél
találtunk, az erdő-
részletek fennma-
radó 44%-a
2…6 méteres
hibával jelle-



7. ábra. A pontsűrűség és átlagmagasság változása a szűrési szintek szerint a teljes területre

mezhető. Tekintettel a hibák mértékére a módszer alkalmazása nem javasolt közvetlen magasságbecslésre, így az eredmény tematikus állománymagasság-térképet az erdőgazdálkodásban használatos erdőnevelési osztályok szerint készítettük el (6. ábra). Az erdőnevelési osztályozás a faállomány közelítő magassága alapján végez korosztálybesorolást. Ezekhez az elnevezésekhez köti az erdészeti gyakorlat a különböző erdőművelési eljárások időszerűségét.

A hibák összetételében egyaránt jelen lehetnek a domborzatmodell hibái, a képek tájékozási pontatlanságai, a képegyeztetésből eredő hibák és a terepi famagasságmérések hibái. Jelenleg nem ismert az egyes hibaforrások összetételi súlya. A kiugró hibák főleg a kimondottan alacsony ($n < 50$) hektáronkénti pontszámú területeken fordulnak elő, így mintaterületünkön a pontszámra vonatkozó korlát alkalmazása a megbízhatóság növekedését eredményezi.

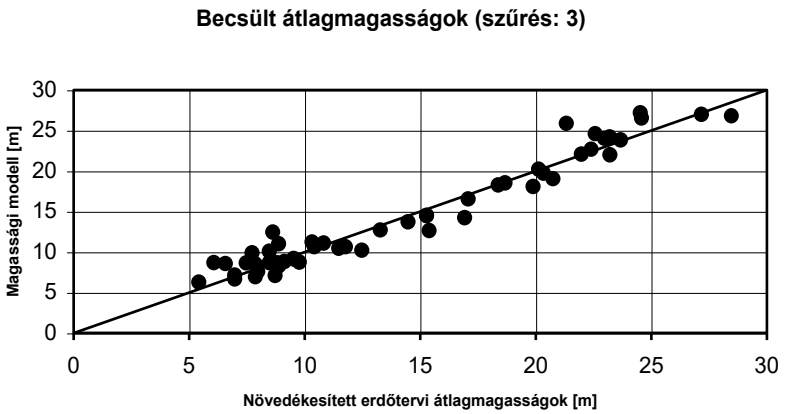
3.2 Lézeres letapogatás feldolgozásával előállított DMM

A mintaterületek teljes átlagára nézve a DMM-ből számított átlagmagasság és a modellhez felhasznált pontok száma a 7. ábra szerint változik a szűrési szintek függvényében. Az átlagmagasság egy-egy szűrést követően 0.9–2.3 méterrel nő. Az előző szinthez képesti magasságkülönbség a szűrések számának növekedésével egyre csökken. Az átlagos pontsűrűség szűrési ciklusonként jó közelítéssel feleződik. A különböző szintű szűrési eljárások során előállított magassági modellekből számított átlagmagasságok erdőtervi átlagmagasságokkal történő összehasonlításának eredményét az 1. táblázat tartalmazza. Fontos tapasztalat, hogy a hibák szórása az első szűrést követően alig változik, így elmondható, hogy a további szűrések hatása – az átlagmagasság-becslés szempontjából – csak a szisztematikus hiba csökkenésében jelentkezik. Az átlagos hiba a harmadik szűrést követően érte el minimumát. Az itt jelentkező pontsűrűség alapján az első visszaverődések 5%-a és a vegetációpontok 15%-a érkezett vissza a lombtalan koronák tetejéről. A modell pontossága figyelembe véve a téli lézerszkennelést és az alacsony pontsűrűséget jónak mondható. Wagner et al. (2004) szerint a DMM-ek egyik legfőbb hibaforrása rendszerint a digitális domborzatmodell (DDM). Esetünkben a mintaterület sík jellege és a forrásadatként felhasznált nagypontosságú DDM ezt a hibahatást elhanyagolhatóvá tette.

1. táblázat. A különböző szűrések után előállított DMM-ek hibái

Hiba / Szűrés	0	1	2	3
Min	-7.61	-5.03	-3.84	-2.86
Max	1.51	2.61	3.30	4.44
Terjedelem	9.12	7.64	7.14	7.29

Átlag	-3.93	-1.66	-0.70	0.01
Szórás	1.90	1.53	1.50	1.51



8. ábra. Az erdőtervi adatok és a DMM alapján számított átlagmagasságok összehasonlítása 53 erdőrészletre

A pontosság értékelésénél figyelembe kell venni, hogy a terepi mérésekből meghatározott átlagmagasságok mintavételi hibáját nem ismerjük. A termőhelyi mozaikosság és térben változó faállomány-szerkezet miatt a mintavételi hiba több erdőrészletnél is számottevő lehet.

A 8. ábrán a 3. szűrési szint után készített DMM-ből számított átlagmagasságokat hasonlítottuk össze az erdőtervi átlagmagasságokkal. Az ábráról leolvasható, hogy a minták darabszáma nagyon egyenlőtlenül oszlik meg, hiszen az erdőrészletek közel 40%-a az 5–10 méteres átlagmagassági tartományba került. Sajátos a negatív előjelű hibák nagymértékű túlsúlya a 10–20 méteres tartományban, aminek épp ellenkezőjét tapasztaljuk a szomszédos, 5–10 és 20–25 méteres magassági tartományokban. Az alacsonyabb állományoknál tapasztalható fölébecslések egyik oka feltételezéseink szerint állományszerkezeti eredetű. Az ilyen fiatalkorú állományok még rendkívül sűrűk lehetnek, a lassabban növő egyedek koronája rendszerint a magasabbak közé szorul.

Az alacsony mérési pontsűrűség miatt amúgy is alulreprezentált fák a szűrések után végképp eltűnnek a modellből, az átlagmagasságnál azonban őket is figyelembe kell venni. A hibák előbb említett szisztematikus jellegzetességei arra utalhatnak, hogy magassági osztályonként külön-külön kell ezt a hibát meghatározni. Ennek magyarázatához és az eljárás automatizálásának kidolgozásához azonban további vizsgálatok szükségesek.

4 Összefoglalás

Munkánkban faállományok digitális magassági modelljeinek automatikus előállítását mutattuk be. A magassági modelleket erdőrészletek átlagmagasság-becslésére használtuk, pontosságukat erdőtervi terepi mérések alapján meghatározott adatok alapján vizsgáltuk.

Az ország teljes területére rendelkezésre álló légifénykép-sorozat és digitális domborzatmodell alapján, a Soproni-hegység mintaterületén előállított magassági modell átlagos hibája +0.65 méter, középhibája ±3.49 méter. Ez a pontosság erdőbecslési felhasználásra csak korlátozott lehetőséget nyújt, azonban a lombkorona felületmodellje erdőtérképezésnél, ortofotó-készítésénél jól hasznosítható.

Hansági mintaterületünkön egy domborzatmodell készítésére optimalizált légi lézerszkennelés adatait használtuk fel. A lombkorona felületéről visszaverődött lézerpontok leválogatására egy iteratív, morfológiai szűrésen alapuló eljárást fejlesztettünk ki. Megállapítottuk, hogy a becslés pontosságát az első ciklus befolyásolja lényegesen, ahol a vegetációról visszavert pontok közel fele kiszűrésre kerül. A véletlen hiba ±1.51 méter, ami az adatnyerés körülményeit figyelembe véve jónak mondható. A szűrés után fennmaradó szisztematikus hiba kiküszöbölése gyakorlati alkalmazás esetén mintaállományok mérése alapján történhet.

Köszönetnyilvánítás. A kutatás a T048999 számú OTKA pályázat támogatásával történt.

Hivatkozások

Aguilar A, Aguilar J, Carvajal F, Agüera F (2007): Comparison of two commercial solutions for generating DSMs from QuickBird stereo imagery. Proceedings of the 2007 Annual Conference of the Remote Sensing & Photogrammetry Society, Newcastle upon Tyne, 11 - 14 September 2007. (http://www.ceg.ncl.ac.uk/rspsoc2007/papers/128.pdf)

Attwenger M, Chlaupek A (2006): Erstellung eines grenzüberschreitenden digitalen Geländemodells im Nationalpark Neusidler See-Seewinkel/Fertő-Hanság aus Laserscanner-Daten. Angewandte Geoinformatik, Beiträge zum 18. AGIT-Symposium. 16-23.

Barilotti A, Sepic F, Abramo E, Crosilla F (2007): Improving the morphological analysis for tree extraction: a dynamic approach to LIDAR data. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, September 12-14, Finland, 26-31.

Koch B, Heyder U, Straub C, Weinacker H (2006): 3D data for forest and environmental planning. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14th-15th Feb. 2006, Vienna. 1-14.

Kraus K, Wagner W (1999): Processing of laser scanning data for wooded areas. In: Fritsch and Spiller (ed.) Photogrammetric Week '99, Wichmann Verlag, Stuttgart, Germany. 221–231.

MÉM Országos Földügyi és Térképészeti Hivatal, Földmérési Főosztály (1976): T. 1. Szabályzat az 1:10000 méretarányú földmérési topográfiai térképek felújítására az egységes országos térképrendszerben. Budapest, p.70.

Naesset E (2005): Assessing sensor effects and effects of leaf-off and leaf-on canopy conditions on biophysical stand properties derived from small-footprint airborne laser data. Remote Sensing of Environment 98, 356-370.

Pfeifer N (2003): Oberflächenmodelle aus Laserdaten. Vermessung und Geoinformation 91, 4. 243-253.

Popescu S, Wynne R, Nelson R (2002): Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. Computers and Electronics in Agriculture 37, 71-95.

Sopp L (1974): Fatömegszámítási táblázatok (fatermési táblákkal). Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.

Wagner W, Eberhöfer C, Hollaus M, Summer G (2004): Robust filtering of airborne laser scanner data for vegetation analysis. International Archieves of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI, Part 8/W2, 56-62.

Yu X, Hyyppa J, Kaartinena H, Maltamo M (2004): Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. Remote Sensing of Environment 90, 451–462.

Z/I Imaging (2004): ImageStation ® Automatic Elevations (ISAE), User's Guide.

ÚTHÁLÓZAT FELMÉRÉSE BUDAPESTEN KAMERÁS MOBIL TÉRKÉPEZŐ RENDSZERREL

Kertész Imre, Lovas Tamás*, Barsi árpád**

Road detection in Budapest with mobile mapping system *- State-of-the-art mobile pavement detection systems application is expanding in the developed countries. However, due to financial limitations, there are no such systems in regular use in Hungary. The Department of Photogrammetry and Geoinformatics has developed an experimental system that can be affordably produced and operated and therefore can be potentially used in Hungary. This paper briefly introduces the system and reports about the test measurements.*

Keywords: mobile mapping system, road measurement

A modern útfelmérő rendszerek egyre jobban elterjednek a fejlett országokban. Magyarországon a korlátozott pénzügyi erőforrások miatt, azonban ebből nem sokat tapasztalhatunk. A BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék kifejlesztett egy kísérleti rendszert, melynek előállítási és üzemeltetési költsége vonzóvá teheti a hazai használatra. Ez a cikk röviden bemutatja a rendszert és a mérések során szerzett tapasztalatokat.

Kulcsszavak: mobil térképező rendszer, útburkolat felmérés

1 Bevezetés

A Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék által fejlesztett útburkolat felmérő rendszer fejlesztése 2008 nyarán befejeződött. Ekkor érte el a rendszer stabilitása és kezelhetősége azt az állapotot, amikor megbízhatóan alkalmazható lett akár nagyszámú mérés lebonyolítására is. Hangsúlyozzuk azonban, hogy egy kísérleti rendszerről van szó, így bizonyos kalibrációs feladatok elvégzésére gyakrabban kell sort keríteni, valamint nagyobb odafigyelést igényelnek az üzemeltetés és karbantartás során a beépített hardver elemek.

2 A felmérő rendszer és a felmérés menete

A felmérő rendszer két kamerából, lézerdiódákból álló vetítősorból, GPS vevőből és a rögzítést vezérlő laptopból áll. A kamerapár és a lézerek az úgynevezett felmérő-hídon helyezkednek el, a pozíciójuk egymáshoz képest állandó. A képek rögzítése során egy trigger felel azért, hogy a kamerák azonos időpillanatban készítsék el a képeket. Az áramellátást a hordozó jármű platóján elhelyezett aggregátor biztosítja (Kertész és Barsi 2006).

A felméréshez két ember szükséges, az egyik a mérőjárművet vezeti, a másik pedig a számítógépet kezeli. A felmérés megkezdése előtt mindenképpen ellenőrizni kell, hogy a kábelek megfelelően vannak-e csatlakoztatva. Ha ez megtörtént a tápellátást kell biztosítani az aggregátor beindításával. Ha a két felmérendő útszakasz között hosszabb a távolság célszerű az aggregátort leállítani vagy a főkapcsolót lekapcsolni, hogy a kamerák élettartamát növeljük. A leállítás üzemanyag takarékossági okokból is hasznos lehet. Miután a kamerák és a lézer vetítősor is üzemel, a notebook elindítása következik, majd megkezdődhet az útburkolat felmérés.

A rögzítést a PHORMS 1.0 szoftver végzi melyről a későbbiekben részletesen lesz szó. Minden felmérési nap elején ellenőrizni kell a kamerákat és a lézer vetítősor láthatóságát. A kamerák fix objektívvel rendelkeznek így ezeknél a blende elállítódása okozhat problémát; a vetítősor egyes lézerdiódáinál probléma lehet a nem megfelelő fókuszáltság. Ha a lézerek nincsenek helyesen beállítva a kiértékelés nem fog megfelelően működni, mivel bizonytalanná válhat az automatikus pontazonosítás. Ha az ellenőrzés megtörtént megkezdhető a felmérés. Célszerű rövidebb útszakaszokat felmérni egyszerre, így ha valamiért nem sikerült az adott szakaszt megfelelően kiértékelni, akkor

**BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.*
E-mail: ikertész@mail.bme.hu
barsi@eik.bme.hu

csak azt a rövid szakaszt kell újramérni. A felmérés után az adatok kiértékelése megtörténhet a helyszínen vagy akár később irodai környezetben. A helyszíni kiértékelés nagy előnye, hogy rögtön látható, a felmérés sikeres volt e (ha a kezelő nem találja megfelelőnek az eredményt azonnal meg lehet ismételni a mérést), hátránya, hogy így kevesebb útszakasz felmérése lehetséges egy éjszaka alatt (Lovas et al. 2007).

2.1 BEI mérőszám

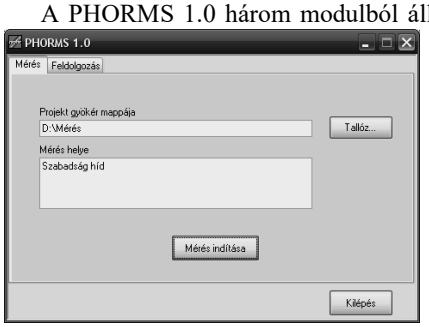
A BEI (Burkolat Egyenetlenségi Index) az útburkolat minőségének jellemzésére használható mérőszám. A fejlesztés megkezdésekor a terv az volt, hogy egy nemzetközileg elfogadott útburkolat minősítő mérőszámot fog szolgáltatni a rendszer. Ez a mérőszám az IRI (*International Roughness Index*, Nemzetközi Érdességi Mutató) volt. Az IRI már az 1940-es években is használt mérőszám volt, azonban akkor még nehezen voltak összehasonlíthatók a különböző járművekkel végzett IRI mérések. Kezdetben mechanikus rendszereket használtak, később az 1970-es évek végén megalkottak egy matematikai modellt (*quarter-car*), hogy kalibrálni lehessen a különböző rendszereket. A mechanikus rendszerek elterjedtsége miatt a matematikai modellt ezen rendszerek kimenő adataihoz igazították. Működése során kiszámítja egy szimulált mechanikus rendszerben lévő felfüggesztés összenyomódását, aminek az eredménye hasonló a valódi jármű felfüggesztésének összenyomódásával. A mérőszám úgy adódik, hogy a rendszer a felfüggesztés (rugó hosszváltozás) összenyomódásait összegzi, majd elosztja a megtett út hosszával (Sayers és Karamihas: http://www. umtri.umich.edu/content/LittleBook98R.pdf). A minőségi mutató mértékegysége m/km – angolszász területen in/mi – (Kertész és Barsi 2006).

Az átadást megelőzően azonban vita alakult ki arról, hogy a kátyúfelmérő rendszer által szolgáltatott IRI érték összehasonlítható-e más rendszerek által számolt IRI értékekkel. A probléma azért merült fel, mert ennek a rendszernek a mintavételezési frekvenciája sokkal alacsonyabb (5 Hz) mint más rendszereké (pl. RST, ahol akár kHz-es is lehet (Magyar Útügyi Társaság 1998)). Így meg kellett változtatni a minősítő szám nevét BEI-re. A BEI-t ugyanazzal a számítási módszerrel lehet előállítani, mint az IRI értéket, a különbség annyi, hogy kevesebb adat felhasználásával számítjuk a végeredményt. A BEI tehát – megfelelő kalibrációt követően – a burkolat minősítésére alkalmas mérőszám, amint az a 4. fejezetben majd látható lesz.

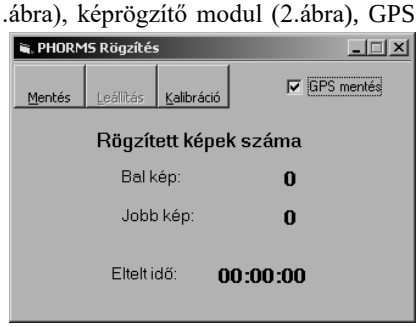
3 PHORMS szoftver, rögzített adatok

A rendszer fejlesztésénél fontos volt olyan vezérlő szofvert kifejleszteni mely könnyen kezelhető és a legkevesebb emberi beavatkozást igényli. A korai verzióknál ez nem volt biztosított, ezért kezdetben sok mérés kiértékelhetetlen lett a felhasználók hibájából. Ekkor még a rögzített adatokból nem minősítő mérőszámot generáltunk, hanem a felmért útszakasz felületmodelljét állítottuk elő. Mivel a felmérés nagy adatmennyiséggel járt és az útburkolat osztályozása alapvetően vizuális kiértékelésen alapult, ezért nem volt alkalmas az útburkolat megfelelő jellemzésére. A PHORMS 1.0 fejlesztésekor már megalkottuk a BEI mérőszámot, ami az útburkolat egy adott szakaszának jellemzésére szolgál (Kertész et al. 2008).

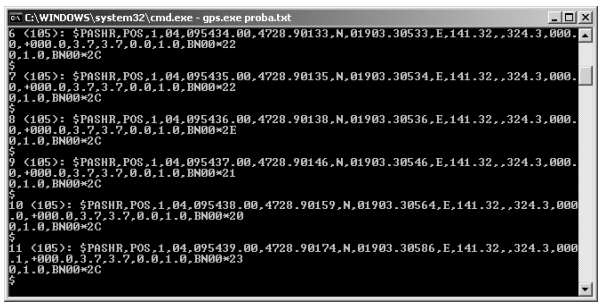
A PHORMS 1.0 három modulból áll: keret program (1.ábra), képrögzítő modul (2.ábra), GPS



1. ábra. PHORMS 1.0 keretprogram



2. ábra. Képrögzítő program



3. ábra. GPS koordináta rögzítő programA keretprogramban lehet megadni a mérés helyét (pl. mely úton, melyik sávban stb.), valamint rögzítés paramétereit. Minden projekt egy sorszámozott mappába kerül, így nem történhet meg a korábbi projekt felülírása.

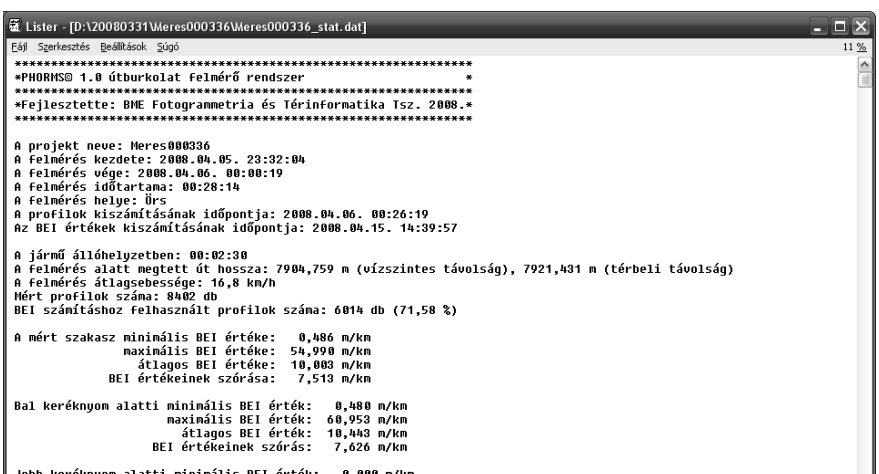
koordináta rögzítő modul (3.ábra).

3.1 Mért adatok feldolgozása

A keretprogram segítségével lehet kiértékelni az egyes projekteket. A kiértékelés során előáll

1. egy statisztikai adatokat tartalmazó jelentés fájl (4. ábra),
2. egy lisp fájl, aminek a segítségével AutoCAD-ben térképezni lehet az útvonalat; az útszakaszok megfelelő színezése a minőségre utal,
3. valamint az adatok más rendszerekbe történő importálását elősegítő fájl (ebben részletesen benne vannak a koordináták és a szakaszokra vonatkozó BEI értékek).

A jelentés fájl tartalmazza a felmérés kezdetét és végét, időtartamát, az útvonal hosszát, az átlagsebességet, a BEI értékek statisztikáit (maximum, minimum, átlag) valamint azoknak a szakaszoknak



4. ábra. Statisztikai adatokat tartalmazó jelentés fájl

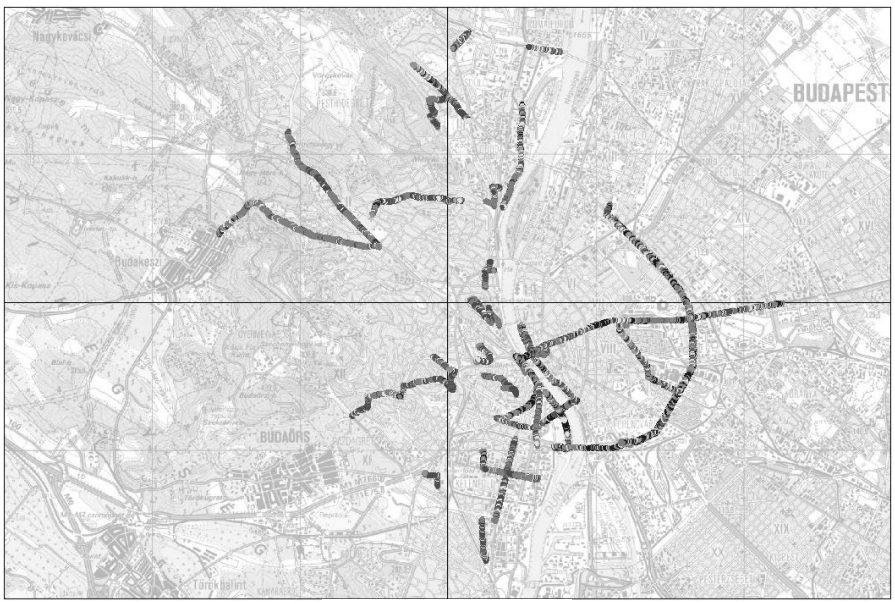
a koordinátáit, amelyeknél a BEI érték a legrosszabb kategóriába esett. Az útszakaszok a 6 kategória egyikébe kerülnek besorolásra, amelyek közül 5 minőségi kategória egy pedig azokra a szakaszokra vonatkozik, amelyek esetén a BEI értéket nem lehetett kiszámítani (vagy GPS jelkimaradás miatt, vagy a lézerpont relatív magasságának hiánya, pl. ponteltűnés miatt). A BEI érték kiszámításának első lépéseként a rögzített képeken térbeli előmetszés segítségével meghatározásra kerül a lézerpontok relatív magassága (20 lézerpont van a vetítősorban). Ezután a kép rögzítésének időpontját felhasználva az egyes szakaszokhoz hozzá kell rendelni azokat a keresztszelvényeket (egy képpár egy keresztszelvényt tartalmaz), amelyek a szakasz két végpontja között lettek rögzítve. Ez általában 5 keresztszelvényt jelent, azonban az időcsúszás miatt lehet 6 illetve 4 is. Ha a hozzárendelés megtörtént, akkor a két keréknyom alatti 8 lézerpontot felhasználva kiszámítható 8 BEI érték, amelyek átlaga adja a szakaszra vonatkozó BEI értéket. Ahhoz, hogy a BEI érték kiszámítható legyen, legalább 4 keresztszelvény adataira van szükség. A keresztszelvények távolsága nagyjából 1 m kell, hogy legyen. Mivel a kamerák sebessége csak 5 képkocka/másodperc, ezért ahhoz, hogy sűrűn számíthatóak legyenek a keresztszelvények a mérőjárműnek viszonylag lassan kellene haladnia. Ez több szempontból is hátrányos: egyrészt a forgalmat jelentősen akadályozná, másrészt a felmérést nagyon lassúvá tenné. Ezért egy minimális és egy maximális sebességhatárt kellett megszabni (a maximális azért kell, mert ha túl gyors a jármű nagyon messze kerülnének egymástól a keresztszelvények). A felmérések során a minimális sebességet 4 m/s-ban (~15 km/h), a maximális sebességet 6 m/s-ban (~22 km/h) határoztuk meg. Azok a szakaszok, ahol a mérőjármű sebessége nem esik a két érték közé ott a BEI értéket nem számítjuk ki. Ezekkel a sebességhatárokkal elérhető, hogy csak azok a szakaszok felelnek meg, amelyeknél a keresztszelvények távolsága kb. 1 m. A mérés közben tehát nagyon kell ügyelni a megfelelő sebességre, különben meg kell ismételni az adott útszakasz felmérését; ez a forgalom miatt gyakran még éjszaka is problémát okoz.

4 Teszteredmények elemzése

A tesztidőszak alatt összesen 125 feldolgozható mérés történt, a fontosabb adatok az 1. táblázatban találhatók (BEI 1-es kategória a legjobb, a BEI 5-ös kategória pedig a legrosszabb burkolat minőséget jelzi). Az 5. ábrán látható az összes tesztmérés útvonala az útminőségnek megfelelően színezve, a sötét színek jelentik a jó, a világosak pedig a rosszabb minőségű burkolatot. Az egyes mérések hossza igen változatos volt, a néhány száz métertől a több kilométerig. A hosszabb útvonalak főleg a stabilitás ellenőrzése miatt voltak szükségesek. A mérések során a tapasztalat az volt, hogy a GPS sokszor akadozott, ami természetesen a városi környezet számlájára írható (természetesen ez az önálló GPS-vevő ismert tulajdonsága). Ezért a felmérő rendszert igen korlátozottan lehet használni magasabb épületek környezetében. Amint az a táblázatból is látszik a rögzített lézerpontok majdnem 99 %-ának meg lehetett határozni a relatív magasságát. A legtöbb probléma a szélső pontokkal adódott, ennek több oka is lehet.

1. táblázat. Néhány statisztikai adat a tesztekről

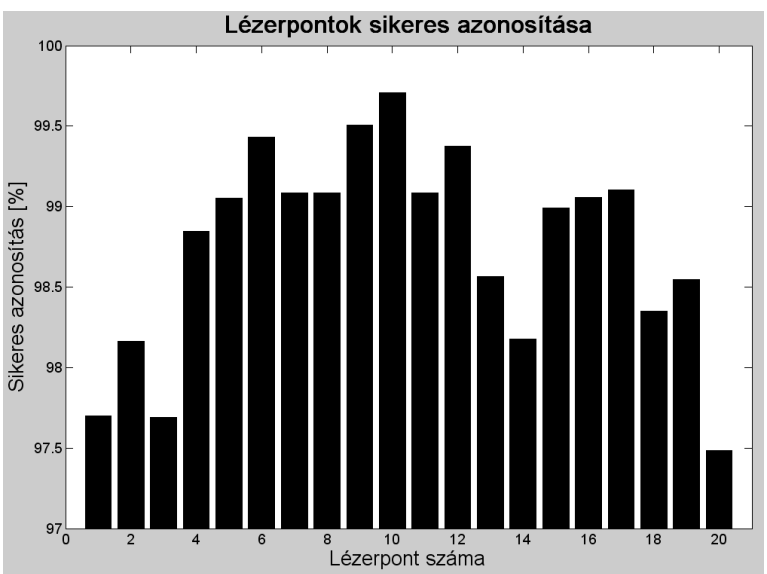
Mérések száma	125
Teljes hossz	162.6 km
BEI 1. kat.	19.6 km (12.1 %)
BEI 5. kat.	31.2 km (19.8 %)
BEI 6. kat.	19.6 km (27.9 %)
Átlagsebesség	16.67 km/h
Összes mérési idő	9:44:12
GPS jelkimaradás	0:57:40 (9.9 %)
Összes állásidő	0:37:03 (6.3 %)
Mért profilok száma	168767 db
Profilszám/km	1038 db
Pont megtalálás százaléka	98.80 %
BEI számításhoz felhasználható profilok	94.50 %



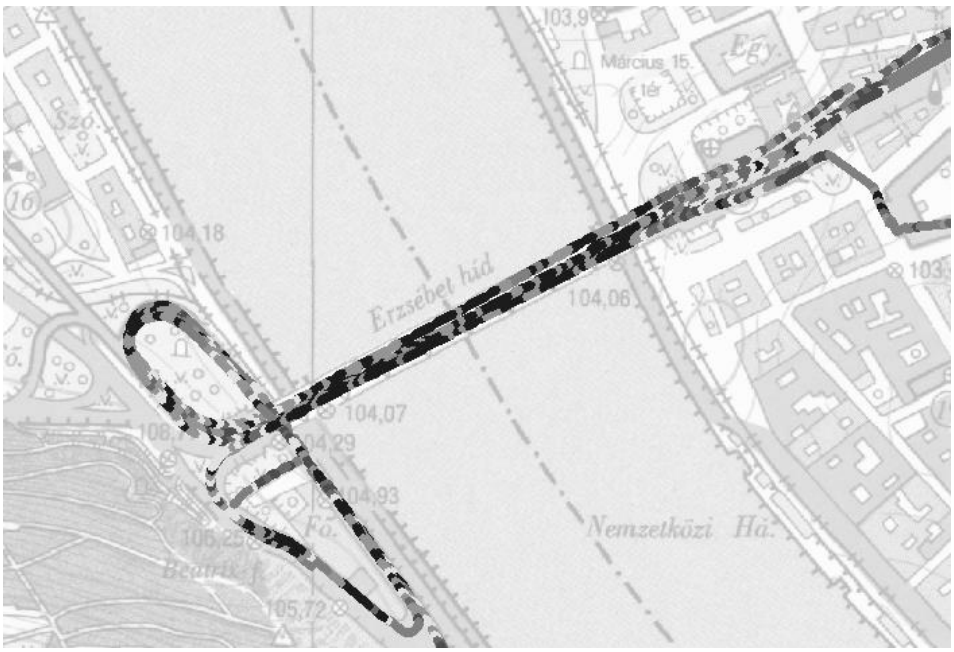
5. ábra. Tesztek útvonala

Egyrészt a pontjel könnyen eltűnik az útszéli csapadéknyelőkben, másrészt a jel az emelt padkáról rosszul verődhet vissza (nem lesz kör alakú a lézerpont). Ezen kívül azokon a helyeken ahol olyan objektumok vannak, amelyek az útburkolatnál jobb fényvisszaverő képességgel rendelkeznek (pl. vasúti sín, csatornafedél) szintén probléma lehet a lézerpont relatív magasságának a meghatározása, mert a pontjel nagyobb kiterjedésű és csillag alakú lesz a képen. A 6. ábra mutatja, hogy a 125 mérés során az egyes lézerpontok relatív magasságát hány százalékban sikerült meghatározni. A tesztmérések kiértékelése azt mutatta, hogy a kátyúfelmérő rendszer alkalmas a különböző minősé-gű útburkolatok megkülönböztetésére. Erre mutat egy szemléletes példát a 7. ábra: jól látszik, hogy az Erzsébet híd burkolata jobb minőségű, mint az észak-keleti irányban folytatódó Rákóczi úté.

A legnagyobb kérdés persze az volt, hogy az ismételt méréseket össze lehet-e hasonlítani egy-



6. ábra. Sikeres pontazonosítás aránya a 125 mérés során

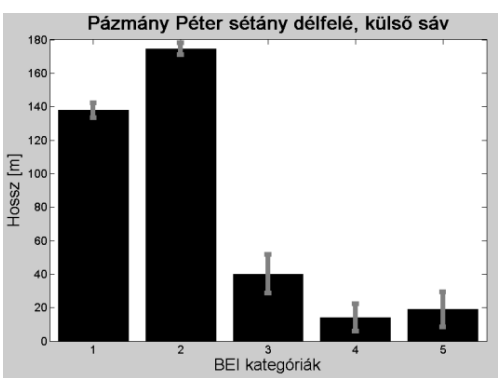


7. ábra. Erzsébet híd és Rákóczi út összehasonlítása

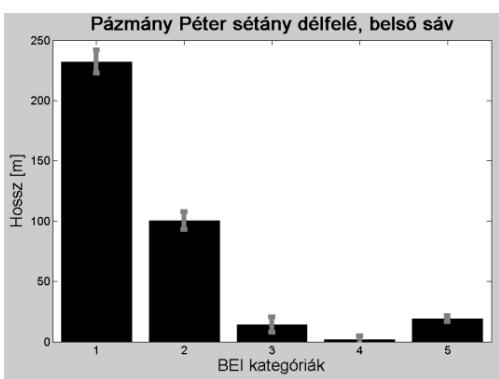
mással, hiszen ez utal a rendszer megbízhatóságára. Ennek vizsgálata érdekében többször kell végig menni ugyanazon az útvonalon és a kiértékelt eredményeket össze kell hasonlítani. Ehhez Budapesten a XI. kerületben található Pázmány Péter sétányon történtek többszöri mérések.

A sétány 2x2 sávos; mind a négy sávon háromszor végigment a mérőjármű, ezek kiértékelt eredménye a 2. táblázatban látható. Mindegyik iránynál és sávnál az egyes minőségi kategóriák átlagos hosszát kiszámítottuk a hozzátartozó szórással együtt. A 8. és a 9. ábrán látható a déli irány két sávjának elemzése, ahol szürke színnel jelöltük az ismételt mérések szórását. Általánosságban elmondható, hogy az ismételt mérések egészen jól megközelítik egymást, bár a szórás értéke változó. Ennek egyik oka, hogy a mintavételezés sűrűsége miatt az egyes mérések szakaszai (két GPS pont közötti útszakasz) egymáshoz képest eltolódhatnak és az azonos sorszámú keresztszelvények sem kerülnek egymás fölé. Így előfordul, hogy a kapott BEI értékek a burkolaton nem ugyanazt a felületdarabot jellemzik.

Megállapítható, hogy az azonos útszakaszra vonatkozó, különböző időpontokban végzett mérések eredményei jól korrelálnak egymással, azaz a mérőrendszer az egymástól eltérő időpontokban végzett mérések segítségével alkalmas a burkolatminőség bizonyos fokú változásának kimutatására.



8. ábra. Minőségi kategóriák hossza és a szórás (külső sáv)



9. ábra. Minőségi kategóriák hossza és a szórás (belső sáv)

2. táblázat. Pázmány Péter sétányon történt ismételt mérések adatai

	BEI kategória					
	1	2	3	4	5	
Déli irány, külső sáv	137.84	174.46	40.00	14.02	18.89	átlag [m]
	4.44	3.49	11.56	8.08	10.47	szórás
Déli irány, belső sáv	232.20	100.26	14.05	1.77	18.93	átlag [m]
	9.53	7.55	6.40	3.07	2.62	szórás
Északi irány, belső sáv	299.25	79.21	0.00	0.00	0.00	átlag [m]
	13.84	11.56	0.00	0.00	0.00	szórás
Északi irány, külső sáv	121.23	157.79	55.19	17.29	27.62	átlag [m]
	26.47	24.06	5.82	7.78	6.20	szórás

5 Konklúzió

125 mérés (~163 km) tapasztalatai alapján elmondható, hogy a rendszer megérett a terepi mérésekre. Stabilitása már megfelelőnek mondható nagyszámú mérés elvégzéséhez és kiértékeléséhez. A megismételt mérések eredményei ugyanazon az útszakaszon közel voltak egymáshoz, ami azt mutatja, hogy a rendszer használható útburkolat felmérésre és az útállapot változásának nyomon követésére. Nagy előnye, hogy egyszerű és könnyen beszerezhető hardver elemeket tartalmaz, a kezeléséhez elég kétfős személyzet, valamint az eredmények azonnal kiértékelhetők a helyszínen. Így ha pótolni kell az adott szakasz felmérését, akkor azt a kiértékelés után közvetlenül meg lehet tenni.

Másrészt nem szabad megfeledkezni arról, hogy mivel a GPS-vétel bizonytalan (csak egy vevő van a mérőjárművön), ezért a nyomvonalak még az egymást közvetlenül követő mérések során sem biztos, hogy elkülöníthetőek (ez szakaszolással és gondos adminisztrációval nem okoz gondot), valamint sűrűn beépített környezetben a helymeghatározás bizonytalanná válhat.

A rendszerrel szerzett tapasztalatok alapján bízunk abban, hogy a hasonló jellegű fejlesztések folytatódnak és Magyarországon is szélesebb körben elterjednek a mobil felmérő rendszerek.

Hivatkozások

Kertész I, Lovas T, Barsi Á (2008): Photogrammetric pavement detection system, ISPRS XXXVII, (B5), 897-902.

Lovas T, Kertész I, Fi I, Barsi Á (2007): New Concept of Profile Based Pavement Measurement System, Proc. ASPRS Annual Conference, Tampa, USA, May 7-11, p.6.

Kertész I, Barsi Á (2006): Inerciális mérések mobil térképező rendszerben, Geomatikai Közlemények X, 89-98.

Magyar Útügyi Társaság (1998): RST-mérés és -értékelés, Útügyi műszaki leírás ÚT 2-2.116.

A HGTUB2007 ÚJ MAGYARORSZÁGI KOMBINÁLT KVÁZIGEOID MEGOLDÁS

Tóth Gyula[*]

The Hungarian combined quasigeoid solution HGTUB2007 *- A new quasigeoid solution was computed for Hungary by combining geopotential model, gravimetric, GPS/levelling, astrogeodetic deflection, gravity gradients and DTM datasets. Least-squares collocation technique was used with planar logarithmic auto- and cross-covariances and a high degree (n=720) geopotential reference model. In the final solution high weights were assigned to the 95 levelled points of the Hungarian GPS Network (OGPSH) for practical reasons. The estimated prediction errors are below 2 cm inside Hungary.*

Keywords: least-squares collocation, geoid, gravity gradients, deflections of the vertical

Új kvázigeoid megoldást határoztunk meg Magyarország területére geopotenciál modell, gravimetriai, GPS/szintezés, függővonal elhajlás, Eötvös-inga és DTM adatok kombinálásával. A számítás a legkisebb négyzetes (LKN) kollokáció módszerével, síkbeli logaritmikus auto- és keresztkovariancia függvényekkel és magas fokszámú (n=720) referencia geopotenciál modell felhasználásával történt. A végső megoldásban gyakorlati okokból nagy súllyal szerepeltek az Országos GPS Hálózat (OGPSH) 95 szintezett pontjának mérései. Az elkészült geoidmegoldás becsült predikciós hibái az ország területén 2 cm alattiak.

Kulcsszavak: legkisebb négyzetes kollokáció, geoid, Eötvös-inga mérések, függővonal elhajlás

1 Bevezetés

Egy nagy pontosságú és az egész ország területére vonatkozó kvázigeoid meghatározásának napjainkban gyakorlati okokból általában mindig az a célja, hogy megteremtse a kapcsolatot a tengerszintre (Balti alapszintre) vonatkozó normálmagasságok és a GPS által előállított ellipszoid feletti magasságok között. Habár hazánk mérsékelt domborzati viszonyainak köszönhetően a legnagyobb eltérés a kvázigeoid és a geoid felülete között csak 25 mm (Ádám et al. 2002), ezt az eltérést a nagy pontosságú geoid meghatározásánál már tekintetbe kell venni (mivel normálmagasságaink vannak), így a továbbiakban a rövidség kedvéért a „geoid" elnevezés alatt is mindig a kvázigeoidot értjük.

Magyarország területére már számos gravimetriai geoidmegoldás született a Stokes integrál és az FFT számítási eljárások segítségével (HGEO2000: Völgyesi et al. 2005, HGTUB2000: Tóth és Rózsa 2000). Ezek közül néhányat illesztettek az Országos GPS Hálózat (OGPSH) GPS/szintezési pontjaira azért, hogy lehetővé váljon a GPS felhasználása a magyar országos magassági rendszerben történő magasságmeghatározás céljára (HGGG2000&2004: Völgyesi et al. 2005).

A gravimetriai adatainkon kívül azonban még számos, a gravimetriához közvetetten kapcsolódó adatrendszer is létezik, pl. asztrogeodéziai függővonal elhajlások és Eötvös-inga mérések (földfelszíni gravitációs gradiensek), ezért kívánatos lenne ezeket is felhasználni a gravimetriai adatokkal együtt egy pontosabb geoidmegoldás érdekében. Az eltérő adattípusokat együtt feldolgozó eljárásnak egy további előnye, hogy így *közvetlenül* már a megoldás számítása *közben* fel tudjuk használni a GPS/szintezési adatainkat, nem pedig csak *közvetett* módon, *utólag*, valamilyen ad hoc illesztési eljárással. Ha a GPS/szintezési adatainkat nagy súllyal látjuk el, ezzel lényegében illesztjük is a megoldást abba a magassági rendszerbe, amelyet a GPS ellipszoidi illetve a szintezési hálózat pontjainak normálmagasságai valósítanak meg a gyakorlatban (Marti 2006).

2 A felhasznált adatok és redukálásuk

A számításaink során – a geopotenciális modellen és a domborzatmodellen kívül – az alábbi adatrendszerekkel dolgoztunk:

[*]*MTA-BME Fizikai Geodéziai és Geodinamikai Kutatócsoport, BME ÁFGT, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.*
E-mail: gtoth@sci.fgt.bme.hu

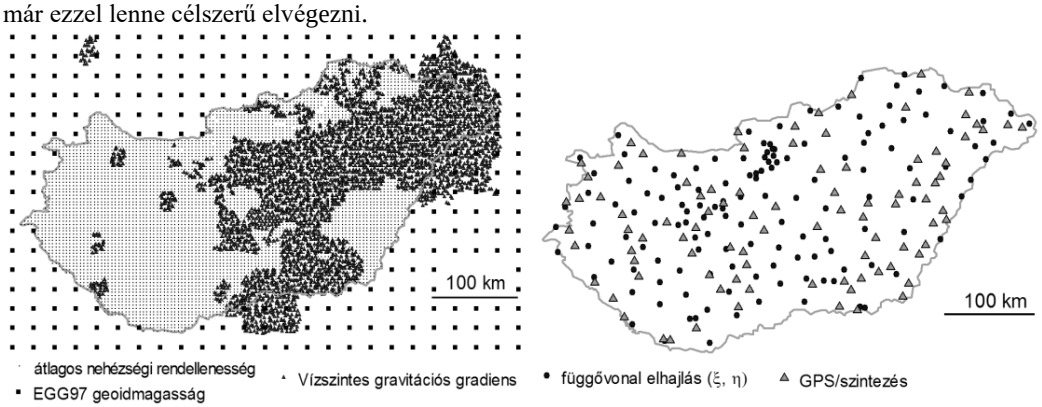
- átlag szabadlevegő nehézségi rendellenességek 1'×1.5'-es blokkokra, több mint 300 000 pontbeli nehézségi rendellenesség alapján számítva (az ELGI adatbázisából)
- 138 asztrogeodéziai függővonal elhajlási pontban a (ξ , η), azaz É-i és K-i irányú összetevők a HD72-es dátumról GRS80 rendszerbe átszámítva
- Eötvös-inga mérések (felszíni nehézségi gradiensek, azaz a nehézségi erő változásának É-i és K-i irányú összetevői) 27 005 pontban
- az Országos GPS Hálózat (OGPSH) 340 pontbeli GPS/szintezésből származó kvázigeoid magasságai (H-G. Wenzel részére tesztelésre átadott OGPSH340.DAT állomány, Kenyeres (1999))

Az említett adatok némelyikét egyenletesen ritkítottuk, egyrészt azért, mert az eljárás során a felhasznált adatok számával azonos méretű egyenletrendszert kell megoldanunk, másrészt pedig azért, mert a célunk elsősorban az alkalmazott számítási eljárás gyakorlati ellenőrzése és kipróbálása volt. A kombinált megoldásban végül a következő adatok szerepeltek (1. ábra):

- 6678 átlag szabadlevegő nehézségi rendellenesség 2'×3' méretű (kb. 3.5 km × 3.5 km-es) blokkokra
- 276 (2 × 138) asztrogeodéziai függővonal elhajlás összetevő
- 7452 Eötvös-inga nehézségi gradiens összetevő
- 95 GPS/szintezési pont (ezek azok, amelyek nem túl régen meghatározott szintezett magasságokkal rendelkeznek)

Mindezeken kívül bevontunk még a megoldásba az ország területén kívül az EGG97-es modellből (Denker és Torge, 1997) származó 267 kvázigeoid magasságot. Ennek az eljárásnak az volt az egyedüli célja, hogy megakadályozza a megoldás „elcsúszását" az ország területén kívül, pontosan úgy, ahogy a svájci CHGEO2004-es számítás esetében történt (Marti 2006). Az EGG97-es modellből származó kvázigeoid magasságok súlyozását úgy választottuk meg, hogy ne legyenek hatással Magyarország területén belül a megoldásra. Ezt azáltal értük el, hogy mesterségesen megnöveltük ezeknek a pontoknak és a valódi GPS/szintezési pontoknak a távolságát a legkisebb négyzetes kollokáció számítása során. Így értelemszerűen a kétféle kvázigeoid unduláció adatrendszer esetleges illeszkedési problémái sem okozhattak szabályos hibát a megoldásban az ország területén belül.

Az adatok redukálását két, 720 maximális fokig és rendig előállított geopotenciális modellel is elvégeztük. Ez a két modellel összesen 14-féle redukció számítását jelentette. Az egyik a GPM98CR modell volt (Wenzel 1998) (amely egyébként 180 fokig és rendig azonos az EGM96 modellel). A másik a GRACE GGM02C modell együtthatóit tartalmazta 200 fokig és rendig, azon felül pedig a GPM98CR modell együtthatóit, amelyeket a 180-200 fokszám tartományban lineáris átmenettel kombináltunk (GGM02CB modell). Ezt az eljárást azért alkalmaztuk, hogy a modellek eltérő maximális fokszáma ne befolyásolja az adatok redukcióját, másrészt pedig kíváncsiak voltunk arra, hogy az új GRACE modell mennyire javítja a megoldást. Miután 2008-ban megjelent a nagy felbontású EGM2008-as geopotenciális modell, amely a GRACE újabb mérésein alapul, a számítást már ezzel lenne célszerű elvégezni.



1.ábra. A kombinált megoldáshoz felhasznált adatok

Az adatok további redukciójához a 3” (kb. 90 m) felbontású SRTM3 digitális domborzatmodellt használtuk fel (Farr és Kobrick 2000, Tímár et al. 2003). Ezzel a modellel RTM korrekciókat számítottunk (Forsberg és Tscherning 1981) mind a 7 adatrendszerre külön-külön, figyelembe véve a geopotenciál modellek maximális fokszámát.

Korábbi vizsgálataink (Tóth és Rózsa 2006) azt jelezték, hogy a GRACE mérésein alapuló geopotenciál modellekből számított nehézségi rendellenességek az ország területén, az eltérések szórása és az átlagos eltérés tekintetében jobban illeszkednek a mérésekhez, mint a korábbi modellek (pl. EGM96). A GRACE alapú modellekből számított kvázigeoid undulációk ezzel szemben rosszabbul illeszkedtek az OGPSH szintezett pontjaiban a mérésekhez, mint a korábbi EGM96 alapú modellek, természetesen azonos fokszám mellett. Az adatredukció során most is azt tapasztaltuk, hogy a felhasznált GRACE alapú modellből számított erőtér paraméterek, a nehézségi rendellenességek kivételével, kissé nagyobb szórással és átlagos eltéréssel illeszkedtek (1. táblázat).

1. táblázat. Az eredeti valamint a redukált adatok szórása és átlaga

adatrendszer	nehézségi rendellenesség [mGal]	ξ ["]	η ["]	GPS/szintezés [m]
eredeti adatok	±17.92/ 14.90	± 2.47/ 0.55	± 2.17/ 2.85	±0.12/ 0.23
GPM98CR + RTM	± 7.77/ -4.41	± 1.22/ 0.02	± 1.06/ -0.06	±0.12/ 0.23
GGM02CB + RTM	± 7.69/ -1.06	± 1.20/ -0.24	± 1.09/ -0.11	±0.14/ 0.61

A táblázatban az Eötvös-inga mérések nem szerepelnek, mert az alkalmazott modellek felbontása (kb. 28 km) nem elégséges ezeknek az adatoknak az érdembeli redukciójához. Ezt jelzi, hogy a gradiensek szórása ±15 E volt a redukció előtt, és ez a szórás maradt a redukció után is. A nagy (9 km-es) felbontású (2160/2190 maximális fokszámú) EGM2008-as modell változtatni fog ezen a helyzeten.

3 A kvázigeoid meghatározása

A redukálással előállított maradék adatokra illeszkedő nehézségi erőtérre a legkisebb négyzetes kollokáció eljárásával adtunk optimális becslést a Forsberg (1987) által javasolt sík logaritmikus kovariancia modell alkalmazásával, amely azonban térbeli modellezésre is alkalmas, hiszen a távolságot nemcsak a referencia síkban értelmezi. Egyrészt azért ezt a modellt választottuk, mert a geoid undulációk, nehézségi rendellenességek, függővonal elhajlások és a potenciálfüggvény második deriváltjainak (a gravitációs gradienseknek) az auto- (ACF) és kereszt-kovariancia (CCF) függvényei viszonylag egyszerű összefüggésekkel jellemezhetők mind a modell referencia síkjában, mind pedig a fölötte elhelyezkedő pontokban. Másrészt a választott magas fokszámú (n_{max} = 720) referencia geopotenciális modell és a számítási terület kisebb kiterjedése (3.5º × 7º) is lehetővé teszi egy ilyen modell használatát (Forsberg 1984).

A nehézségi zavar (rendellenesség) ACF-e:

$$C(\Delta g^{h_1}, \Delta g^{h_2}) = -C_0 \sum_{i=1}^{4} \alpha_i \ln\left(D_i + h_1 + h_2 + \sqrt{s^2 + (D_i + h_1 + h_2)^2}\right) \tag{1}$$

mind a két pont h_1 , h_2 magasságától, mind s vízszintes távolságától függ. C_0 a nehézségi rendellenességek varianciája, az α_i -k egész számok (1, –3, 3, –1), $D_i = D + (i - 1)T$ (Forsberg 1984).
Ezen kívül nem szinguláris az *összes* számítandó mennyiségre nézve, ami csak nagyon kevés kovariancia modellről mondható el, mivel az ilyen modellekkel általában csak a nehézségi rendellenes-

ségeket, geoid undulációkat, és legfeljebb még a függővonal elhajlásokat lehet modellezni, de a nehézségi gradienseket már nem.

A modell α_i és D_i állandóin keresztül végső soron csak a következő három szabadon választható paramétertől függ: C_0, D és T. Az első paraméter, C_0, skálatényezőül szolgál a nehézségi rendellenesség ACF számára, a D paraméter elnyomja az erőtér magasabb frekvenciájú, a T paraméter pedig az alacsonyabb frekvenciájú összetevőit. A potenciálzavar függvényét modellező ACF és CCF részletes leírását, valamint annak első és második deriváltjai számítási összefüggéseit Forsberg (1987) függelékében találhatjuk meg.

A kovariancia modellezés során a fenti három ACF paramétert határoztuk meg oly módon, hogy az (1)-es modellt illesztettük a maradék nehézségi rendellenességek tapasztalati ACF függvényéhez. Elfogadható illeszkedést tapasztaltunk a modell és a tényleges adatok között a 2. táblázat tanúsága szerint az alábbi paraméter értékek esetében: $C_0 = 57.7$ mGal^2, $D = 5$ km, $T = 9$ km.

2. táblázat. A $C_0 = 57.7$ mGal^2, $D = 5$ km, $T = 9$ km paraméterű kovariancia modellből számított és a redukált adatok szórásai. A nehézségi rendellenességek szórása megegyezik C_0 értékével

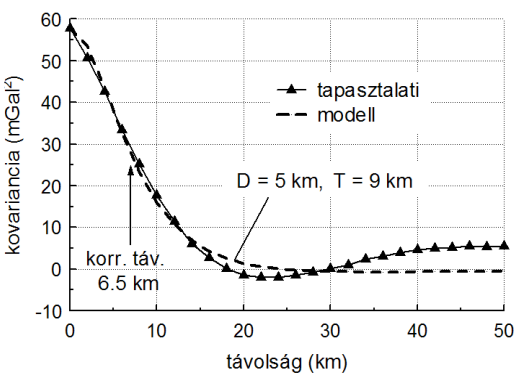
mennyiség	redukált adatok szórása	modellből számított szórás
magassági rendellenesség	±0.120 m	±0.083 m
függővonal elhajlás	±1.1-1.2 "	±1.13 "
vízszintes gravitációs gradiens	±14-15 E	±15.2 E

A 2. és 3. ábrákon láthatók a nehézségi rendellenességek és kvázigeoid undulációk (GPS/szintezés) modellből számított ACF-jei. A következőkben ismertetett számításokhoz ezeket az ábrán feltüntetett ACF paramétereket használtuk fel. A kovariancia modell paramétereinek változására a tapasztalataink alapján a függővonal elhajlások és a nehézségi gradiensek voltak a legérzékenyebbek.

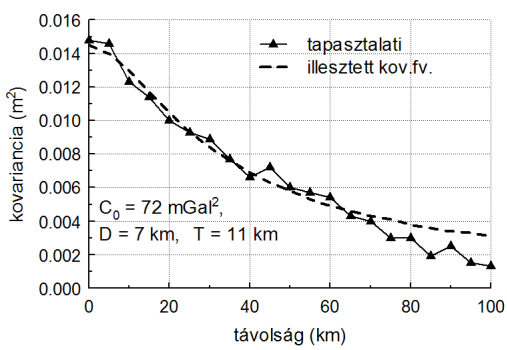
Ezek után a nehézségi rendellenességek, függővonal elhajlások és GPS/szintezési adatok már további nehézségek nélkül kombinálhatóak voltak a kollokációs becslés elvégzése céljából a választott konzisztens kovariancia modell segítségével. A különböző jellegű adatok egymáshoz viszonyított súlyozását tapasztalati úton végeztük, megfigyelve a predikcióból kapott eltéréseket a számított pontokban. A vízszintes nehézségi gradienseket (Eötvös-inga méréseket) azonban egy kétlépéses eljárásban hasznosítottuk. Először a kiválasztott 3726 pontbeli vízszintes gradiensekből, amelyeket ±5 E középhibával jellemeztünk, és a maradék csillagászati függővonal elhajlásokból függővonal elhajlás predikciót végeztünk mind a 3726 pontban. Ezt a ±5 E középhiba értéket a nehézségi rendellenességekkel és vízszintes nehézségi gradiensekkel végzett tesztszámításaink eredményezték.

A mért csillagászati függővonal elhajlásokat pedig a ±0.3"-es mérési középhibával vittük be a fenti predikcióba.

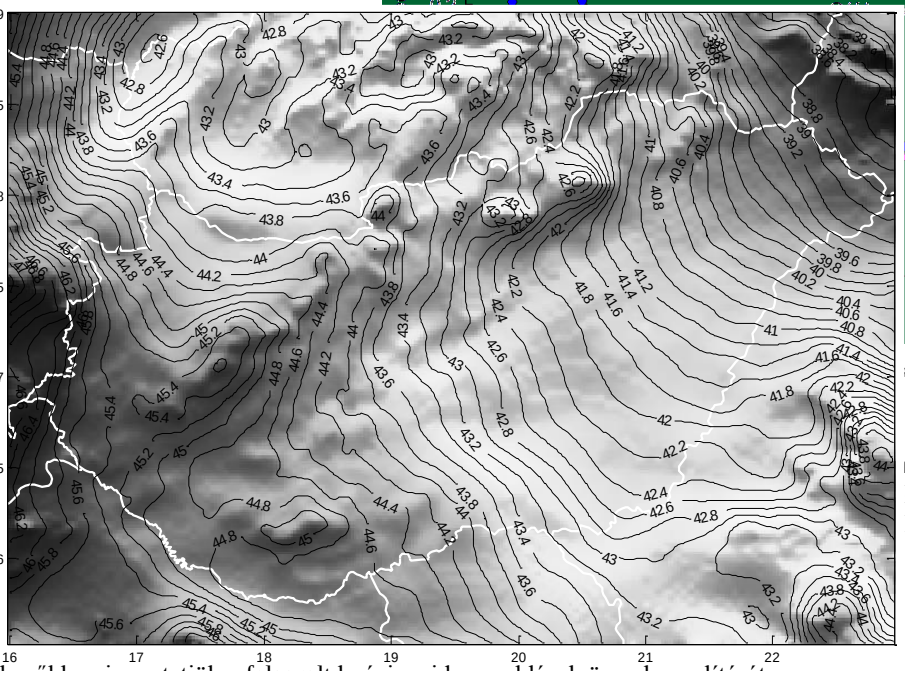
A második számítási lépésben ezeket a becsült fiktív függővonal elhajlásokat a predikciós hibáikkal együtt bevittük egy közös LKN kollokációs megoldásba a nehézségi rendellenességek, függővonal elhajlások és GPS/szintezési adatok mellett. Ebben a lépésben LKN kollokációval 14 700 pontban számítottuk ki a kvázigeoid undulációkat.



2. ábra. RTM nehézségi rendellenesség ACF és tapasztalati ACF

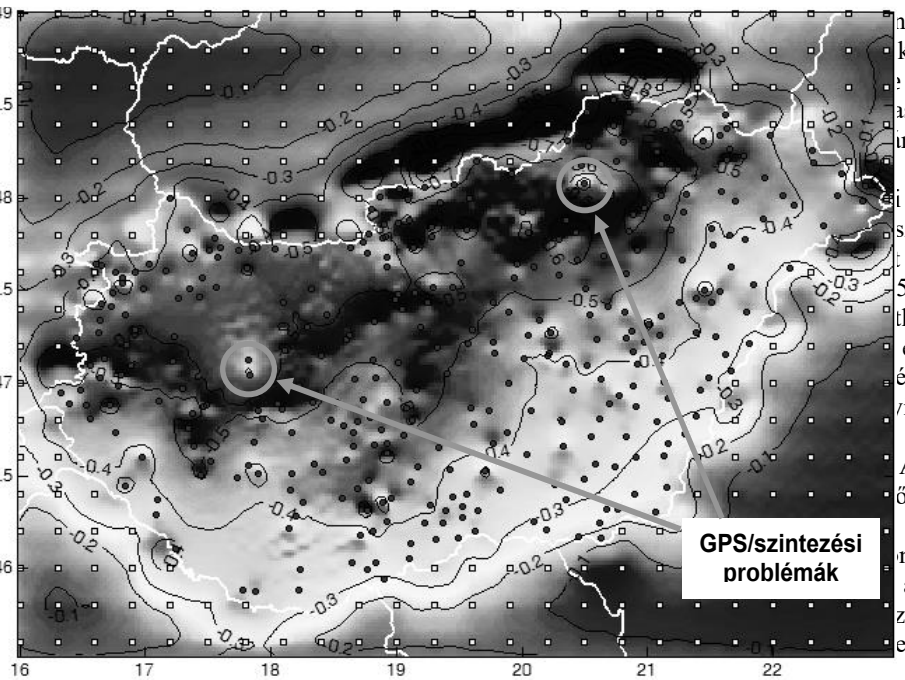


3. ábra. GPS/szintezés ACF – tapasztalati és modell

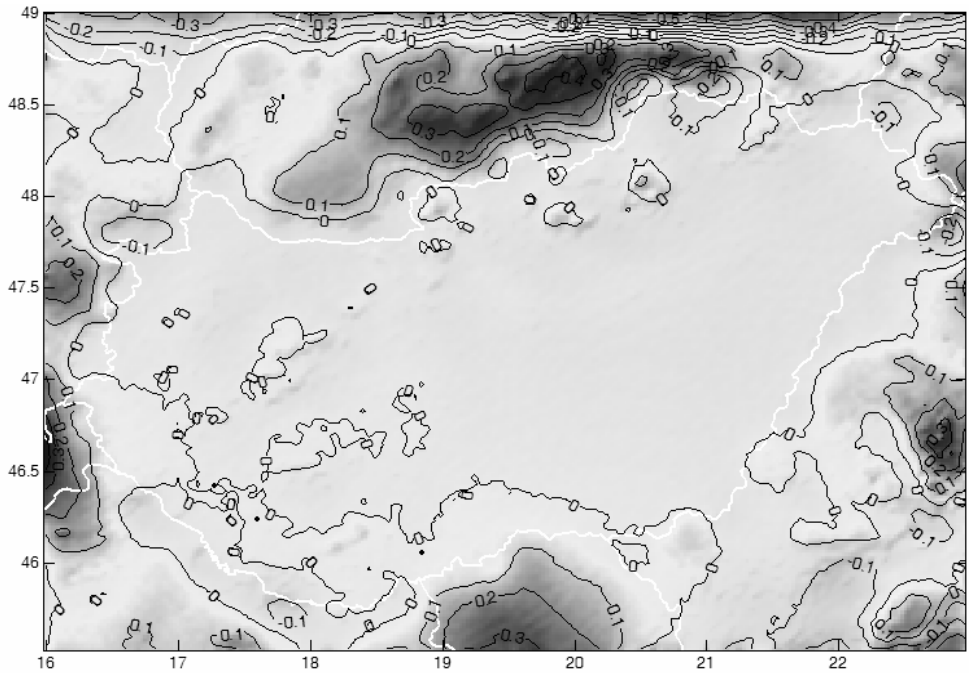


5. ábra. HGTUB2007 kvázigeoid undulációk (m). Ez egy GPS/szintezési adatokhoz illeszkedő asztrogravimetriai és vízszintes gravitációs gradiens (AGGG) megoldás, amelyik a GGM02CB geopotenciális modellre és az SRTM3 magasságokra épül.

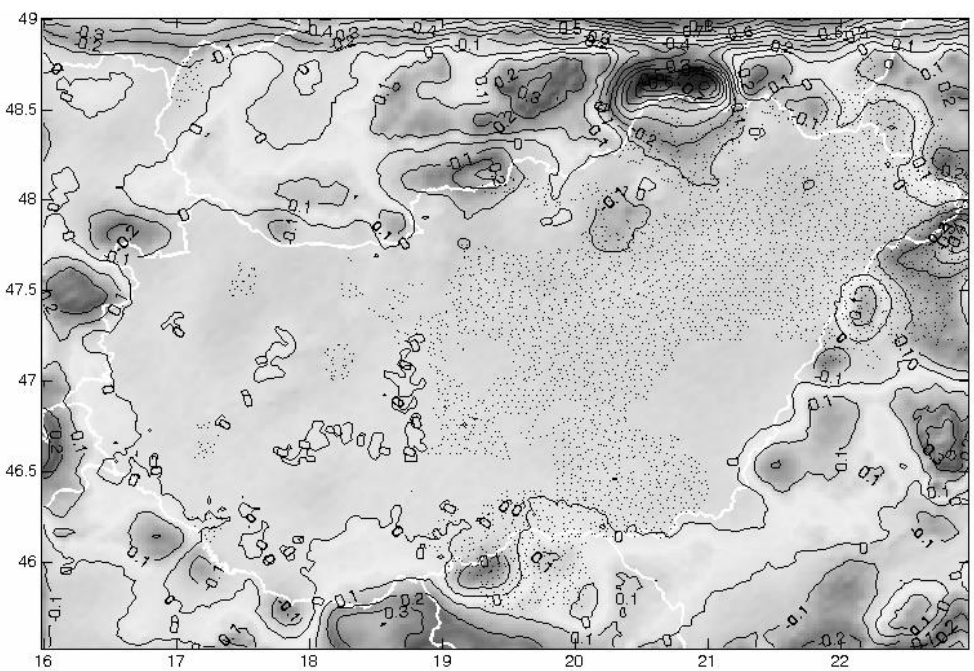
- asztrogravimetriai, GPS/szintezési és vízszintes gravitációs gradiens (AGGG)



6. ábra. Az asztrogravimetriai és a GPS/szintezéshez illeszkedő asztrogravimetriai kvázigeoid megoldások különbsége (m). A szürke pontok jelölik a GPS/szintezési adatok helyét és az ország területén kívüli négyzetek a mindkét megoldáshoz felhasznált EGG97-es kvázigeoid undulációkat. A nyilak azokat a helyeket jelzik, ahol a két megoldás jelentősen eltér egymástól, ami a GPS/szintezési adatok problémáira utal.



7. ábra. A GPM98CR és GGM02C geopotenciális modelleken alapuló és a GPS/szintezési adatokra illeszkedő AGG megoldások eltérései (m)



8. ábra. A vízszintes gravitációs gradiensek bevonásából eredő kvázigeoid unduláció különbségek az AGG és AGGG illeszkedő megoldása esetében (m). Az ábrán látható pontmező a felhasznált gradiens mérések eloszlását szemlélteti.

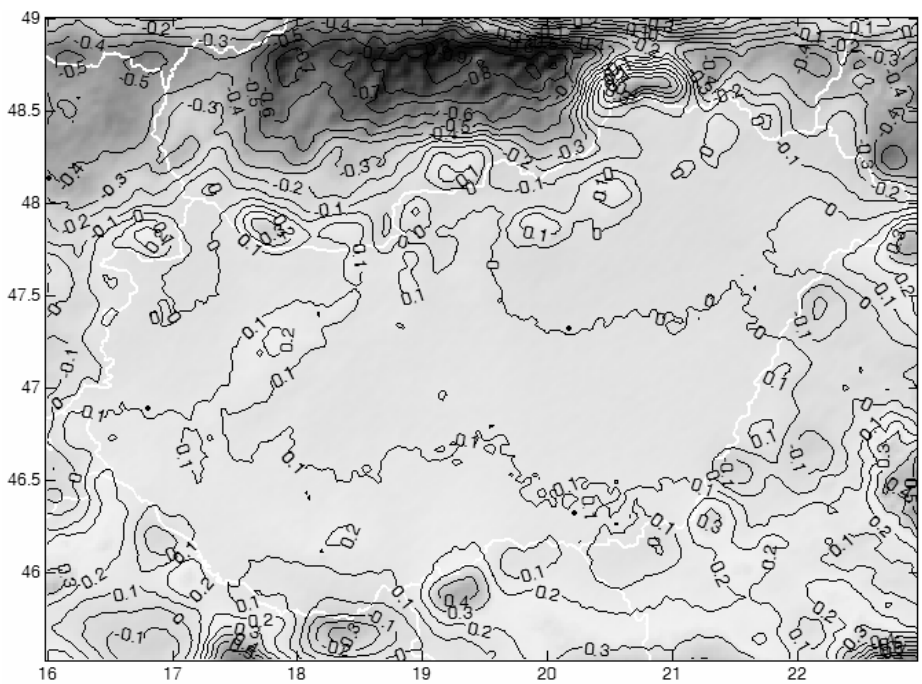
Utolsóként említjük meg azt az összehasonlítást, amelyet a korábbi HGTUB2000B jelű gravimetriai geoidmegoldásunkkal végeztünk el (Tóth és Rózsa 2000, Völgyesi et al. 2005). Ezt a megoldást spektrális kombinációs eljárással határoztuk meg, ugyanúgy, mint ahogy az európai EGG97-es geoid számítása is történt. Az eltérések az ország területén kívüli magas hegyvidéken elérik a 90 cm-t is, de az ország területén belül jóval kisebbek, általában 10 cm alattiak (9. ábra). Ezek a nagyobb eltérések feltehetően abból adódtak, hogy a HGTUB2000B megoldásban az adatok között Magyarország területén kívülről is voltak nehézségi rendellenesség értékek, és valószínűleg a felhasznált geopotenciális modellek is különböztek.

A kombinált megoldás becsült predikciós hibái az országon belül 1-2 cm-esek, az OGPSH felhasznált pontjain a választott súlyozás miatt gyakorlatilag nulla értékűek (10. ábra). Az EUVN GPS/szintezési pontjaiból (Ádám et al. 2000, Ihde et al. 2000) 7 esik a számítási területre és ezekben szintén ellenőriztük a számított AGGG megoldást. Ez esetben az átlagos eltérés – 0.136 m és az eltérések szórása ± 4.2 cm. Megjegyezzük, hogy ez az átlagos eltérés megegyezik azzal a 14 cm-es eltéréssel, amelyik az UELN és a magyar felsőrendű szintezési hálózat magasságai között van (http://crs.bkg.bund.de/evrs/Relations.html).

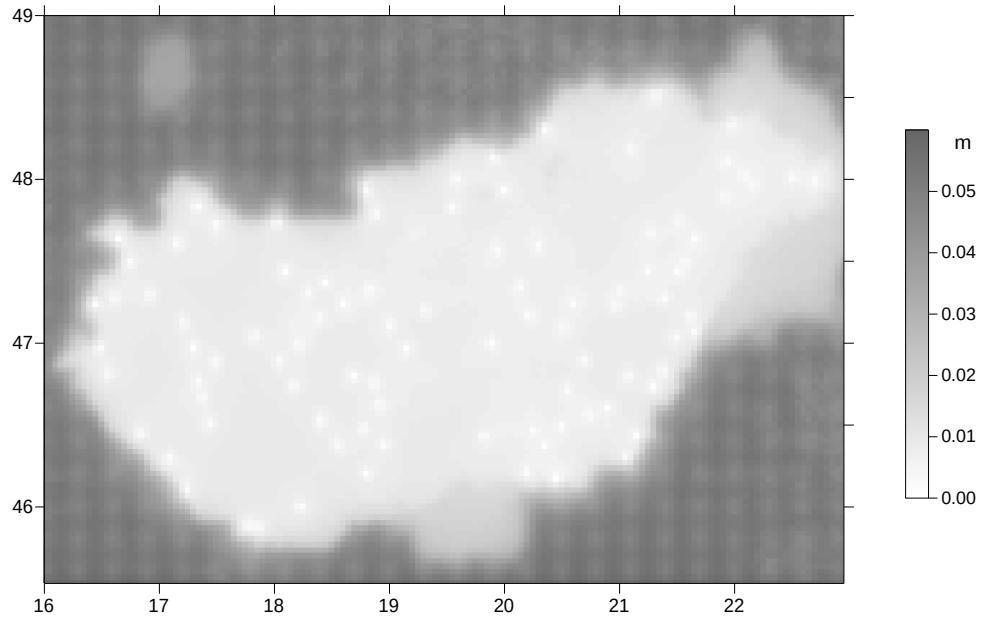
5 Következtetések és további feladatok

Tanulmányunkban bemutattunk egy kísérleti kvázigeoid modellt, amely Magyarországon elsőként úgy készült, hogy abban különböző gravimetriai, csillagászati geodéziai, GPS/szintezési és felszíni nehézségi gradiens mérések együttesen egy *közös* számítási eljárásban lettek felhasználva. A megoldás jelentős újdonsága az, hogy abban már – bár közvetetten, függővonal elhajlás predikción keresztül – de szerepelnek a hazai Eötvös-inga mérések is.

Amint arra már utaltunk, a számításban felhasznált GPS/szintezési adatok némelyike nem jól illeszkedett az asztrogravimetriai adatokból számított megoldáshoz. Nyilvánvaló, hogy a jövőben a cm pontos geoid meghatározásához fontos lenne olyan GPS hálózati pontok létesítése illetve felhasználása, amelyeknek a szintezett magasságai felsőrendű magassági alappontokból vannak levezetve. Ez remélhetően meg fog valósulni az országos magassági alaphálózatunk újramérése kap-



9. ábra. A HGTUB2007 és a HGTUB2000B geoidmegoldások eltérései (m)



10. ábra. A HGTUB2007 megoldás becsült predikciós hibái. A súlyozás miatt a felhasznált OGPSH szintezési pontokon ezek gyakorlatilag zérus értékűek.

csán. Másrészt mivel a függővonal elhajlás adatok közvetlen információt szolgáltatnak a geoidfelület normálvektorának helyzetéről, ezért a svájci példa nyomán (Marti 2006) a pontosság növelését lehetne elérni további ilyen jellegű mérések felhasználásával. Erre a célra jól használható lenne pl. egy digitális zenitkamera.

Habár a rendelkezésre álló gravimetriai adatok száma megfelelő, továbbra is szükség lenne néhány területen a hiányzó gravimetriai adatok sűrítésére, illetve ilyen területeken előnyösen lehetne felhasználni a már rendelkezésre álló Eötvös-inga méréseket is.

Amint már a 2. részben említettük, egy következő kvázigeoid megoldás számításához a nagy felbontású EGM2008-as geopotenciális modellt fogjuk felhasználni. Ugyanis a legújabb, folyamatban levő vizsgálataink szerint ez a modell már sokkal jobban illeszkedik a meglevő adatainkhoz, nem csak a megnövelt felbontása, hanem a számításához felhasznált legújabb mesterséges holdas mérések miatt is.

Előnyös lenne szintetikus tömegmodellek, különösen a Pannon medence litoszféra modelljének az alkalmazása is, elsősorban a számítási eljárás és szoftver tesztelése céljára (Papp és Kalmár 1996). Az LKN kollokáció számítási eljárása megfelel a jövőbeni GOCE mesterséges hold méréseinek a felhasználására is egy kombinált geoid meghatározása céljából.

A fent említett problémák és okok miatt a bemutatott új kvázigeoid megoldás csak előzetesnek tekinthető és tervezzük egy újabb és még pontosabb megoldás elkészítését a felmerült nehézségek megoldása után.

Köszönetnyilvánítás. Ez a kutatást támogatta az Országos Tudományos Kutatási Alap (OTKA) a T046718 és K60657 sz. pályázatok keretében. A felhasznált adatokat részben az ELGI és a FÖMI szolgáltatta tudományos együttműködés keretében. Ezen kívül megköszönjük C.C. Tscherning-nek és R. Forsberg-nek a GRAVSOFT programcsomag felhasználásának lehetőségét az elvégzett számítások során, továbbá Kenyeres Ambrusnak és Papp Gábornak a cikk átnézése során tett értékes észrevételeit.

Hivatkozások

Ádám J, Augath W, Brouwer F, Engelhardt G, Gurtner W, Harsson BG, Ihde J, Ineichen D, Lang H, Luthardt J, Sacher M, Schlüter W, Springer T, Wöppelmann G (2000): Status and Development of the European Height Systems. In: Proceedings of the IAG General Assembly, Birmingham, July 18-30, In: IAG Symposia, 121, 55-60, Geodesy Beyond 2000, Springer, Berlin Heidelberg, New York.

Ádám J, Tokos T, Tóth Gy (2002): Magassági mérőszámok és azok kapcsolata Magyarországon. Geodézia és Kartográfia, 54;1, 5-10.

Denker H, Torge W (1997): The European Gravimetric Quasigeoid EGG97 - An IAG Supported Continental Enterprise. In: R. Forsberg, M. Feissel, R. Dietrich (eds.): Geodesy on the Move - Gravity, Geoid, Geodynamics and Antarctica. In: IAG Symposia, 119, 249-254, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Farr TG, Kobrick M (2000): Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. Eos, Trans. American Geophys. Union 81, 583–585.

Tímár G, Telbisz T, Székely B (2003): Űrtechnológia a digitális domborzati modellezésben: az SRTM adatbázis. Geodézia és Kartográfia, 55; 12, 11-15.

Forsberg R (1984): Local Covariance Functions and Density Distributions. Reports of the Department of Geodetic Science and Surveying, Report No. 356, The Ohio State University, Columbus, Ohio.

Forsberg R (1987): A New Covariance Model for Inertial Gravimetry and Gradiometry. Journal of Geophysical Research, 92; B2, 1305-1310.

Forsberg R, Tscherning CC (1981): The Use of Height Data in Gravity Field Approximation by Collocation. Journal of Geophysical Research, 86; B9, 7843-7854.

Ihde J, Ádám J, Gurtner W, Harsson BG, Sacher M, Schlüter W, Wöppelmann (2000): The EUVN Height Solution – Report of the EUVN Working Group – Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung, 61., München 2000, ISBN 3 7696 9623 9.

Kenyeres A (1999): 340 GPS/levelling derived height anomalies in Hungary. File OGPSH340.DAT, Status: 2004.08.05. (personal communication).

Kenyeres A, Virág G (1998): Testing of Recent Geoid Models with GPS/Leveling in Hungary. Proceedings of the Second Continental Workshop on the Geoid in Europe. Vermeer M. and Ádám J. (Eds.), Reports of the FGI, 98:4, 217-223.

Marti U (2006): Comparison of High Precision Geoid Models in Switzerland. Proceedings of the IAG Scientific Assembly, Cairns. Proceedings of the IAG, 130, 377-382, Springer Verlag, Hamburg.

Papp G, Kalmár J (1996): Toward the physical interpretation of the geoid in the Pannonian basin using 3-D model of the lithosphere. IGeS Bulletin, 5, 63-87.

Tóth Gy, Rózsa Sz (2000): New Datasets and Techniques – an Improvement in the Hungarian Geoid Solution. Paper presented at Gravity, Geoid and Geodynamics Conference, Banff, Alberta, Canada July 31-Aug 4, 2000. (available from www.agt.bme.hu/gtoth).

Tóth Gy, Rózsa Sz (2006): Comparison of CHAMP and GRACE geopotential models with terrestrial gravity field data in Hungary. Acta Geod. Geoph. Hung., 41(2), 171-180.

Völgyesi L, Kenyeres A, Papp G, Tóth Gy (2005): A geoidmeghatározás jelenlegi helyzete Magyarországon. Geodézia és Kartográfia, 56; 1, 4-11.

Wenzel G (1998): Ultra hochauflösende Kugelfunktionsmodelle GPM98A und GPM98B des Erdschwerefeldes. In: Freeden W (ed.): Progress in Geodetic Science at GW 98 - Geodätische Woche in Kaiserslautern. Shaker Verlag, 323-331.

KÉPFELDOLGOZÁSI ALGORITMUSOK A LÉGIFELVÉTELEK AUTOMATIKUS KIÉRTÉKELÉSÉBEN

Tóth Zoltán[*]

Computer vision algorithms in automatic evaluation of aerial images *- Hough-transformation and active contours are widely used methods in computer vision. The possible applications of the Hough-transformation and active contour algorithms in photogrammetry are presented. A procedure was developed on the basis of the Hough-transformation, which is capable of automatic identification of intersections. The identified intersection can be used as an initialization point for other methods (for example a procedure based on Kalman-filter). From many possibilities of using the active contours technic, the article instances the surveying of reeds. In this case, we can use the previous state as an initialization point, making the process absolutely automatic as well.*

Keywords: Hough transformation, active contours

A Hough-transzformáció és az aktív kontúrok a gépi látás tudományterületén széleskörűen alkalmazott eljárások. A cikkben bemutatom a fenti két algoritmus felhasználásának lehetőségeit légifényképek automatikus kiértékelésénél. Hough-transzformációra épülő eljárást fejlesztettem, mely alkalmas útkereszteződések automatikus felismerésére. A felismert csomópontok inicializálási helykén felhasználhatóak más, pl. Kálmán-szűrésen alapuló eljárások számára. Aktív kontúrok alkalmazási lehetőségei közül a cikk a nádasok térképezési lehetőségeit mutatja be példának. Azokban az esetekben, amikor az előző állapotot fel tudjuk használni inicializálási helyként, akár teljesen automatikus kiértékelésre is módunk van.

Kulcsszavak: Hough-transzformáció, aktív kontúrok

1 Bevezetés

A digitális légifényképező kamerák ezredfordulóra tehető megjelenésével, a GPS és inerciális navigációs műszerek (INS) elterjedésével a fotogrammetria tájékozási, kiértékelési eszközparkja már egy valós, vagy közel valós idejű, zárt láncú feldolgozási folyamatként is elképzelhető a képek elkészítésétől egészen a térképezés alapját képező ortofotók előállításáig. További, igazán nagy áttörést a kiértékelések élőmunka-igényének megszüntetése, vagy legalábbis ésszerű szintre csökkentése jelentené. Nem véletlen tehát, hogy napjaink fotogrammetriai témájú kutatásainak jelentős része foglalkozik az automatikus, vagy félautomatikus objektum felismeréssel.

Az említett kutatások általában két nagy témakört érintenek, ezek:

- épületek,
- utak, úthálózat felismerése.

A mesterséges tereptárgyakon túl kutatások folynak a vegetáció pl. fák lombozatának felismerésére is. A cikkben bemutatásra kerül két – képfeldolgozás témaköréből ismert – eljárás, amely része lehet ezen problémák megoldását szolgáló eszközparknak.

2 Úthálózat felismerése

Egyes tanulmányok (Lovas 2005) szerint a navigációs adatbázisokban tárolt információk legalább 15%-a évente megváltozik. Az előző becslés minden bizonnyal a geometriai és a hozzájuk kapcsolódó leíró adatokra együtt vonatkozik, de mindenképpen rámutat arra, hogy például az autó navigációs rendszerek terjedése, mint felhasználói oldal, nagy volumenben kívánja meg a navigációs adatbázisok geometriai tartalmának rendszeres frissítését. Ez az igény igazolhatja azon algoritmusok kifejlesztését, amelyek az úthálózat automatikus, vagy félautomatikus térképezésével foglalkoznak.

[*]*NyME Geoinformatikai Kar, 8000 Székesfehérvár, Pirosalma u.1-3.*
E-mail: tothz@geo.info.hu

Az úthálózat felismerésével kapcsolatos eljárások az információtartalom összetettsége: kitakarások, járműforgalom, útburkolati jelek, a környezet zavaró hatásai (pl.: épületek) miatt elsősorban külterületi utak detektálására korlátozódnak. Több ilyen eljárás ismert (Detrekői et al. 2003) a teljesség igénye nélkül:

- Neurális hálózatok
- Kálmán szűrő
- Aktív kontúrok
- Speciális képoperátok.

Az egyik legszellemesebb megoldást a Kálmán-szűrésen alapuló eljárások nyújtják. (Vosselmann et al. 1995.) Ezekben a rendszer paramétereit többek között az út szélességéből, sugarából, textúrájából vezetik le. Egy humán operátor által kijelölt útszakaszon (vektor) történik a szűrő állapotvektorának feltöltése, majd inicializálást követően a szűrő minden pozícióra becsli az úttengely pozícióját, valamint profilillesztéssel meg is határozza azt.

Az *eljárás előnye*, hogy jól használható zajos környezetben, még abban az esetben is, ha a zajt az úthálózat többi eleme jelenti. Érdekes példa lehet erre az esetre az autópályák külön szintű csomópontjainak térképezési problémája, amelyeknél az egyébként térben egymástól elkülönülő útszakaszok „álcsomópontként" jelentkeznek a képen. Ilyen algoritmus futási eredményére mutat példát az 1. ábra. Fekete szakasz jelöli az inicializáló szakaszt, szürke a profilillesztéssel meghatározott úttengelyt, sötétszürke pedig azokat a szakaszokat, ahol a szűrő által becsült tengely lett térképezve, mivel a hasonló textúrájú csomóponti ág miatt nem sikerült a profilillesztés.
Hátrányának tekinthető, hogy „csak" félautomatikus: szükség van inicializálásra.

Az ehhez hasonló, inicializálást igénylő algoritmusok vetik fel olyan eljárások kifejlesztésének igényét, amelyek minimális emberi közreműködéssel, vagy akár emberi közreműködés nélkül képesek az úthálózat egyes elemeinek felismerésére, kiindulást jelentve a többi, pl. a fent ismertetett Kálmán-szűrésen alapuló technikának.

Ilyen algoritmusra jó példa a neurális hálózatokra elvén működő JEANS alkalmazás (Barsi et al. 2002.), valamint az önszerveződő neurális hálózatokra épülő úthálózat-felismerő eljárás (Barsi 2004).

A cikkben bemutatok egy általam fejlesztett, a képfeldolgozás eszköztárából ismert Hough-transzformációra épülő programot, amely kiegészítése lehet az előbbi rendszereknek, növelve a felismerés robosztusságát.

2.1 Hough transzformáció

Az eredeti algoritmust – amely bináris képen alkalmas paraméteresen adott egyenesek, görbék detektálásra – meglehetősen régen 1959-ben publikálta P.V.C. Hough. Az eljárás lényege, hogy a bináris kép értékes pixeleit a detektálandó görbét leíró paraméterek számának megfelelő dimenziójú ún. Hough-térbe transzformálja.

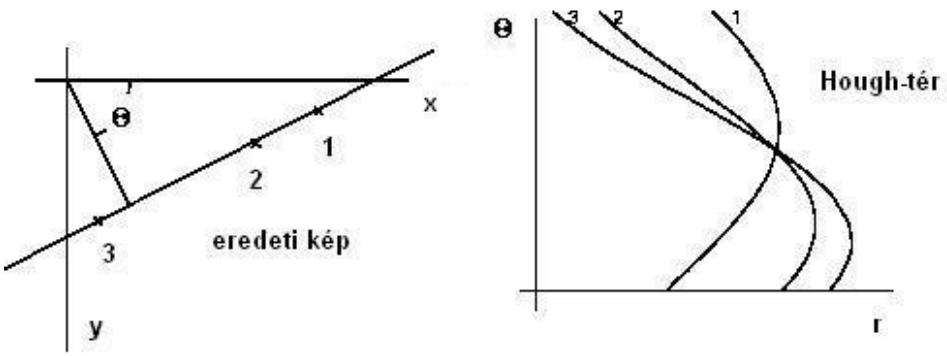
Az algoritmus legegyszerűbb esetben egyenesek detektálására alkalmazva a következő (Duda et al. 1972):

$$r = x\cos(\theta) + y\sin(\theta), \tag{1}$$

ahol a két paraméter közül θ az egyenes normálisának irányszöge, míg r az egyenes távolsága az origótól. A Hough-paraméterteret is ez a két paraméter definiálja. Egyenes detektálásánál a kapcsolat (transzformáció) a képtér és a Hough-tér között azt jelenti, hogy a képtér valamilyen képfeldolgozási eljárással pl. élkereséssel kijelölt minden egyes értékes pixele a Hough-térben megfelel a rajta átmenő összes lehetséges – végtelen sok – egyenest reprezentáló (θ, r) paraméter párok által meghatározott görbének. Három kollineáris pont esetére az eljárást a 2. ábra szemlélteti.



1. ábra. Kálmán szűréssel meghatározott útszakasz zajos környezetben (Vosselmann et al. 1995)



2. ábra. Eredeti kép három értékes pixellel, valamint a megfelelő Hough-tér

Ilyen módon az eredeti problémát, azaz egyenesek adott ponthalmazra történő illesztését visszavezettük görbék metszéspontjának meghatározására. A gyakorlatban a paraméterek ésszerűen kvantáltak, a Hough-tér ennek megfelelően nem folytonos, hanem egy, a paraméterek számának megfelelő dimenziójú, az egyes paraméterek kvantáltságának megfelelő méretű akkumulátor tömb. A transzformáció során a képtér pixeleinek megfelelő tömb elemeit növeli, majd lokális maximumkereséssel határozza meg a metszéspontot (metszéspontokat).

2.1 Hough-transzformáció csomópontok detektálására

Az objektum felismerés első lépése a kép szegmentálása, ennek elengedhetetlen eszköze az él keresés, él felismerés. Utak, csomópontok detektálásánál is feltételezzük, hogy az adott szakasz a környezetétől eltérő textúrájú; jelentős intenzitáskülönbség van az úttest, és környezete között, az út határvonala tehát élként jelentkezik, ezt tekintjük első feltételének. Ilyen élkereső algoritmusok az első-, valamint másodrendű deriváltak számításán alapuló, pl. Prewitt, Sobel vagy Laplace nevű ún. konvolúciós szűrők, valamint speciális képoperátorok, mint pl. Canny-operátor.

Az utóbbi tapasztalataim szerint feladatonként jól paraméterezhető, további előnye, hogy eredményül bináris képet ad.

Sajnos még a viszonylag kis információtartalommal rendelkező, külterületet ábrázoló digitális ortofotó-kivágatoknál is pl. a mezőgazdasági művelés, vagy a növényzet (fasor) határai az utak széleihez hasonló határozott élként jelentkeznek, ami jelentős zajjal terheli az élkeresést. Indokolt lehet tehát első lépésként egy simító konvolúciós szűrő alkalmazása. Tapasztalatok mutatják, hogy az utak éleinek megtalálásán ez a lépés nem sokat ront, jelentősen csökken viszont a hibás detektá-

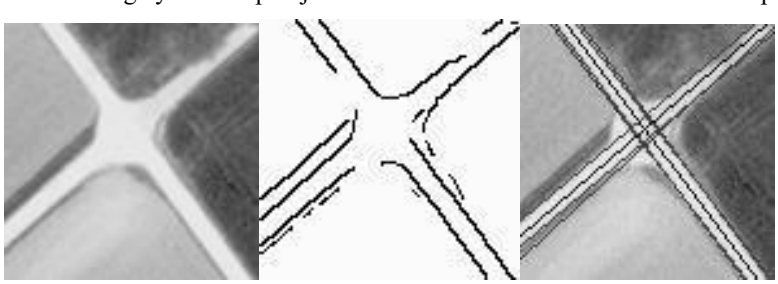
lások száma. Ha egy bináris képen a fenti módon elkülönítettük a számunkra értékes élként jelentkező pixeleket, akkor feladatunk ezekre az éleket jelentő pixelekből kiválogatni és csoportosítani az egy egyenesre (pl. azonos útszélre) esőket; feltételezzük ugyanis, hogy az utak szélei a csomópont közvetlen közelében közel egyenesek. Erre alkalmas eszköz lehet a fent említett Hough-transzformáció.

További feltételt jelenthet annak feltételezése, hogy az utak közel 90°-ban metszik egymást. Ilyen módon ki tudjuk válogatni az útkereszteződések közelében az utak széleit jelentő pixeleket, ezzel meghatározzuk magát az útkereszteződés helyét is. A fenti algoritmus alapján egy eljárást készítettem általános célú, nyílt forrású képfeldolgozó függvénykönyvtárban, amely alkalmas digitális ortofotókon automatikus csomópont-felismerésre. A programban egy, a kép méretarányának megfelelő méretű érdeklődési területet (ROI) definiáltam, amely mint egy kernel pixelenként, vagy más felbontásban végigfut a kép teljes területén, és elvégzi a következő lépéseket:

- Simítás
- Élkeresés
- Hough-transzformáció (határozott egyenesként jelentkező élek detektálása)
- Egyenesek csoportosítása meredekség szerint.

Ha az érdeklődési terület tartalmaz megfelelő számú, párhuzamos, valamint egymást közel 90°-ban metsző egyenest, amelyek metszéspontja átmegy a kernel középpontján, akkor a pixelt csomópont részének tekintjük.

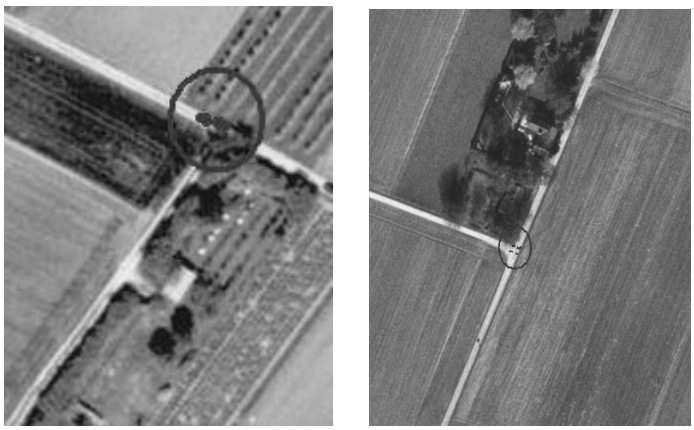
A program két jellemző futási képét négy, illetve háromágú csomópont esetére a 3. illetve a 4. ábra, egy teljes légifelvétel területére a 6. ábra tartalmazza. Az eredeti Hough-transzformáció előnyeként említhető annak elforgatás, valamint méretarány függetlensége (rotation invariant, scale invariant), melyek közül az elforgatás-függetlenséget az általam fejlesztett alkalmazás megőrizte, a méretarány-függő paraméterek (pl. a keresőablak mérete, a Hough-transzformáció paraméterei) a kép méretarányából, valamint a detektálandó út rendűségéből jól becsülhetőek. További előnye, hogy ha maga a csomópont részben „takart" (növényzet, árnyék stb.) a képen, akkor is van esély a helyes felismerésre (5. ábra), amely más eljárások számára gyakran rejtve marad. Hátránya viszont, hogy néhány speciális mezőgazdasági művelés esetén („nadrágszíj" parcellák, kordonos művelés) annak határát és az úttengely metszéspontját szintén útkereszteződésként értékelheti a program.



3. ábra. Négyágú kereszteződés képe, az élkeresés eredménye (inverzkép), valamint a detektált egyenesek visszavetítve az eredeti képre



4. ábra. Háromágú kereszteződés képe, az élkeresés eredménye (inverzkép), valamint az útszélként detektált egyenesek visszavetítve az eredeti képre



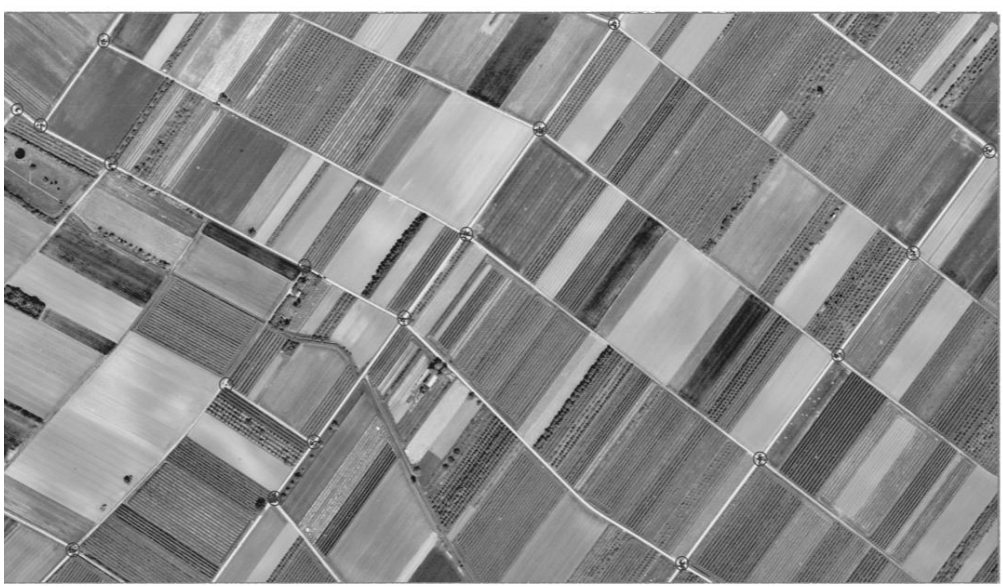
5. ábra. Helyes csomópont felismerés zajos környezetben (körrel kiemelve)

3. Aktív kontúrok térinformatikai alkalmazási lehetőségei

A térinformatikai rendszerek geometriai adatainak változásvezetésének érdekes és hasznos eszköze lehet az ún. aktív kontúrok (más néven snake-algoritmusok) elvén működő eljárások, melyeket a gépi látásban elsősorban zajos képek szegmentálásra, élek detektálásra, videojelen mozgáskövetésre használnak.

3.1 Aktív kontúrok tulajdonságai

Az eredeti algoritmus (Kass et al. 1988) szerint az aktív kontúr egy paraméteresen adott görbe – a gyakorlatban sokszögvonal –, amelyhez az alakjától függő belső, valamint a környezetéből származó külső, más megközelítésben helyzeti energiát rendelünk. Ezeket az energiákat úgy definiáljuk, hogy a keresendő éleken legyen a kontúr energiája minimális. Az élek keresése, szegmentálás, objektumdetektálás problémaköre így energia minimum meghatározásává alakul át. Az aktív kontúr



6. ábra. Digitális ortofotó a felismert csomópontokkal (körrel kiemelve)

paraméteres egyenlete:

$$v(s)=(x(s),y(s)). \tag{2}$$

A hozzá rendelt energia:

$$E_{teljes} = E_{belső} + E_{külső}. \tag{3}$$

A belső energia két részből áll (Kass et al. 1988):

$$E_{belső} = E_{nyúlási} + E_{hajlító}, \tag{4}$$

$$E_{nyúlási} = \frac{1}{2}\cdot\int_s \alpha(s)\cdot|v_s|^2 ds,\ v_s = \frac{dv(s)}{ds}, \tag{5}$$

$$E_{hajlító} = \frac{1}{2}\cdot\int_s \beta(s)\cdot|v_{ss}|^2 ds, \tag{6}$$

a nyúlási és a hajlító energiából, melyeknek a kontúr alakjának szabályozásában van szerepe (nem nyúlhat meg, illetve nem hajolhat meg akármilyen mértékben), a képletekben $\alpha(s),\beta(s)$ súlyfüggvények, melyekkel a kontúr alakváltozását tudjuk szabályozni. A képből származó külső energiát többféleképpen definiálhatjuk:

$$E_{külső} = \int_s E_{Kép}(v(s))ds, \tag{7}$$

ahol $E_{Kép}$ értéke legegyszerűbb megoldásként (pl.: bináris képen):

$$E_{Kép} = I(x,y) \tag{8}$$

$$E_{Kép} = G_\sigma(x,y)\cdot I(x,y) \tag{9}$$

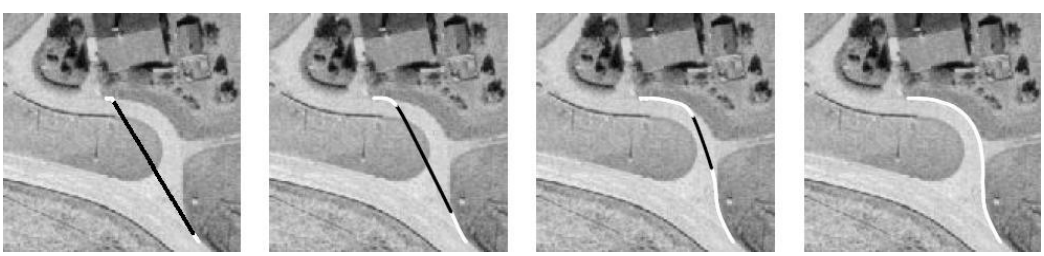
Minden megoldás esetében $E_{Kép}$ értéke az értékes területeken (pl. objektumok határán) minimális.

A külső energia mozgatja a kontúrt a számunkra értékes (kis helyzeti energiájú) helyekre, miközben a kontúr teljes energiáját minimalizálja:

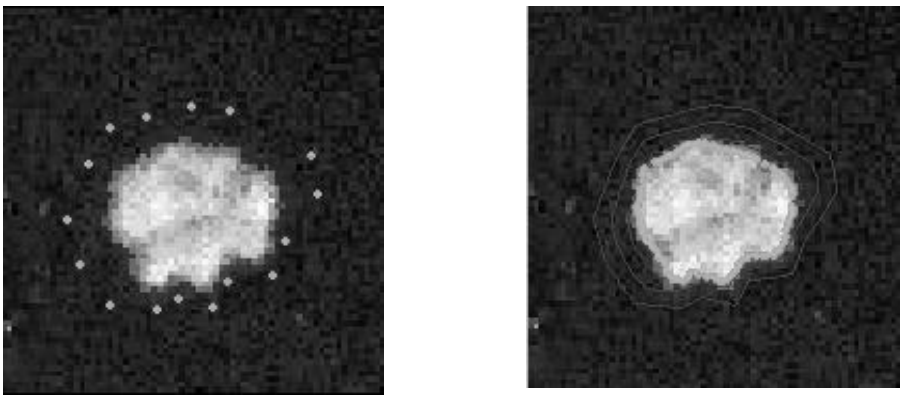
$$E_{teljes} = \int_s \frac{1}{2}\cdot(\alpha(s)|v_s|^2 + \beta(s)|v_{ss}|^2) + E_{Kép}(v(s))ds \rightarrow \min. \tag{10}$$

3.2 Gyakorlati alkalmazási lehetőségek

A gyakorlatban $v(s)$ nem egy folytonos görbe, hanem sokszögvonal, $\alpha(s),\beta(s)$ értékét egy-egy konstansnak vehetjük fel a feladat függvényében, vagy minden sokszögponthoz külön-külön hozzárendelhetünk értéket. A gyakorlati alkalmazási lehetőségek közül elsőnek az előző témához kapcsolódóan az úthálózat detektálás témaköréből mutatok egy példát (7.ábra).



7. ábra. Útszakasz detektálása aktív kontúrokkal: 4 iterációs állapot (Baumgartner 2002)



8. ábra. Nádsziget kontúrjának félautomatikus detektálása: inicializálás, valamint az aktív kontúr alakja 2-4-8-10 iterációs lépés után

A fenti gondolatmenet szerint az aktív kontúr algoritmusoknak minden esetben szükségük van inicializálásra, ezért szerepük véleményem szerint elsősorban a geometriai adatok változásvezetésében lehet. Ekkor ugyanis az előző állapotot, mint inicializálási helyet tudjuk felhasználni. Példaként nádasok felmérésnek esetére mutatok példát (8. ábra). A légifelvételen a nádas közelében vettem fel a kontúr inicializálási helyzetét (ami lehet egy korábbi felmérés eredménye) ennek helyét a 8. ábra bal oldali képén pontok jelzik. Az algoritmus ezután automatikusan megkeresi a nádfolt új helyzetét (határvonalát). Az egyes iterációs állapotot jelentő sokszögvonalakat a 8. ábra jobb oldala mutatja be. Az alkalmazott Matlab program (Tomazevic et al. 2002) egy speciális (gradient vector flow-GVF) (Xu et al. 1998) vektormezőt használ külső erőként, lehetővé téve a konkáv alakzatok jobb felismerését, valamint az éltől távoli inicializálás esetén is helyesen működik.

4 Összefoglalás

A raszter alapú adatgyűjtési módszerek terjedésével együtt célszerű vizsgálni a képfeldolgozási algoritmusok térinformatikai alkalmazási lehetőségeit.

A cikkben a képfeldolgozásban használt Hough-transzformáció egy lehetséges alkalmazási területét: az automatikus csomópont-felismerést ismertettem, gyakorlati fejlesztés keretén belül. Speciális kernelt definiáltam, mely egy-egy ortofotó teljes területét vizsgálva kijelöli a feltételezett útkereszteződések helyeit. A fejlesztés során néhány alapvető összefüggésből indultam ki. Feltételezem, hogy az utak szélei a légifényképeken egymással közel párhuzamos élként jelentkeznek, illetve útkereszteződésekben közel merőlegesek egymásra. Az élképet alkotó pixelekből Hough-transzformáció segítségével jelölhetőek ki a nagy valószínűséggel útszéleket jelentő képrészek.

Geometriai adatok változásvezetésének egy hatékony eszközére mutattam a cikkben példát az aktív kontúrok eljárásra alapozva. A gépi látás témaköréből ismert módszer alapvetően félautomatikus: szükség van inicializálásra. Abban az esetben, ha a térképezésnél rendelkezésünkre áll a megelőző állapot, akkor ezt fel tudjuk használni inicializálási helyként. Ilyen módon akár teljesen automatikussá is tehetjük a kiértékelést.

Célszerűnek látom az inicializálás, valamint a konkáv alakzatok problémakörének további vizsgálatát.

Hivatkozások

Detrekői Á, Barsi Á, Mélykúti G, Paláncz B, Winkler G (2003): Digitális ortofotók készítése és alkalmazási lehetőségei. Geodézia és Kartográfia, LV, 3-7.

Baumgartner A (2002): Automatische Extraktion von Strassen aus digitalen Luftbildern. Disszertáció, TU München.

Barsi Á, Heipke C, Willrich F (2002): Junction extraction by artificial neural network system – JEANS, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXIV, Part 3B, 18-21.

Barsi Á (2004): Object detection using neural self-organization. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXV, Part 3, 366-371.

Duda RO, Hart EP (1972): Use of the Hough Transformation to detect lines and curves in images. Graphics and Image Processing, 3, 11-15.

Kass M, Witkin A, Terzopoulos D (1988) Snakes: Active Contour Models. International Journal of Computer Vision, 1, 321-331.

Tomazevic D, Chenyang Xu, Prince LJ (2002)**:** GVF Snake demo. Matlab alkalmazás, http://iacl.ece.jhu.edu/projects/gvf/snakedemo/

Vosselman G, J de Knecht (1995): Road tracing by profile matching and Kalman filtering. Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, 1, 265-274.

Xu C, Prince LJ (1998): Snakes, Shapes, and Gradient Vector Flow. IEEE Transactions on Image Processing, 7, 359-369.

TÉRINFORMATIKA A KÜLSZÍNI BÁNYÁSZATBAN

Ládai András Dénes[*]

Geoinformational applications in quarry *- Modern mining technology cannot work without digital modelling environment. Geoinformatics can give solutions in 3D modelling, score of mineral deposit and its quality and volume computing. The "digital mining-world" using geoinformational methods is able to assist the future planning of everyday mining task. This paper presents the mentioned geoinformational methods.*

Keywords: Geoinformatics, mining, mine surveying, 3D modelling

A modern külszíni bányászat ma már nem lehet meg a digitális modellezés világa nélkül. A bányatelken belüli kitermelhető ásványvagyon nyilvántartása, 3D modellezése, az ásványvagyon minőségének számbavétele, a bányászatban oly gyakran előforduló különböző célú térfogatszámítások mind-mind megkívánják a helyhez kötött adatok kezelhetőségére kifejlesztett térinformatika használatát. A bánya életének jövőbeni tervezéséhez, a már kitermelt tömegek elszámolásához a digitális bánya világa nyújt segítséget. A dolgozat ezen feladatok részletezésével és lehetséges megoldások felvázolásával foglalkozik.

Kulcsszavak: térinformatika, bányászat, bányamérés, 3D modellezés

1 Bevezetés

A térinformatika egy külszíni bánya életét teljes körűen kiszolgálhatja: térképezés, modellezés, fejtés menetének tervezése, dokumentálás, térfogat elszámolások. Geoinformatikai alkalmazások az első fejtési munkálatok megkezdése előtt megjelenhetnek már a bányatervezésben, hiszen a geológiai megkutatások feldolgozása digitális modellezéssel történik és az első, környezetről gyűjtött adatok értékelése és az előzetes környezeti hatástanulmányok elkészítése digitális térképezés nélkül már elképzelhetetlen. A bánya bezárása pedig rekultivációs munkálatokkal végződik, amihez szintén nagy segítséget nyújthat a digitális modellezés. Ott lehet tehát a születésnél, végigkísérheti a mindennapi életet, és asszisztálhat a bezárásnál. Azért használtam feltételes módot, mert alkalmazása nem szükségszerű. Minden bánya maga dönti el, hogy mennyire kívánja, vagy inkább tudja megkönnyíteni és tervezhetőbbé tenni saját életét. Természetesen mindez a befektetett költségek függvénye. Az, hogy mennyit tud szánni egy üzem erre a célra, a költség-hatékonysági elemzésekből derül ki.

A teljes körű kiszolgálás azonban igen komplex feladatot jelent. A különböző célú munkálatok más-más minőségű nyers adatokat igényelnek és eltérő minőségű végtermékeket kívánnak meg. Hogyan lehet mégis minél egységesebb térinformatikai rendszert kiépíteni erre az igen összetett kihívásra? „Mindenre jó" térinformatikai rendszer nem létezik, de törekedhetünk annak elérésére. Az adatok megfelelő kezelésével és csoportosításával a feladat célszerűen leegyszerűsíthető. Munkámban ennek lehetőségeit vázolom fel, a lehetséges megoldásokat ismertetem.

2 A térinformatika szükségessége és lehetséges alkalmazásai a külszíni bányászatban

A geoinformatika alapszintű alkalmazása megkerülhetetlen a külszíni bányászatban. A bányaművelés térképezése kötelező. Ezt minden bányaüzemnek tudomásul kell vennie és az ezzel járó munkálatokat elvégeztetnie. A felmérés és adatkezelés digitális módon történik, évente frissül. A térképet hites bányamérő által hitelesíttetni kell (Bt. 33. § (1) bekezdés, valamint Vhr. 20. § (1) (2) és (3) bekezdés). Ezzel máris megtörtént a terepi adatok gyűjtése, a térinformatikai rendszer felépítéséhez szükséges hiteles alapadatok rendelkezésünkre állnak (1. ábra). Ez természetesen nem csak Magyarországon igaz, mindenhol ugyanaz a cél, csupán a kormányzati- és jogrendszerek, a lehetőségek, módszerek követelmények térnek el egymástól.

[*]*BME FTT, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.*
E-mail: alada@mail.bme.hu

A bányaüzem köteles minden év végén elszámolni a kitermelt ásványvagyon mennyiségével. A számított tömeget hites bányamérőnek kell jóváhagynia. Geodéziai mérésekből kell igazolni az éves termelést (54/2008. (III. 20.) Korm. Rendelet, 2.§, c) és d) pontjai). Ennek korszerű megoldása a 3D terepmodell alkalmazása, azaz az előfelvételből és az aktuális állapot felméréséből kialakított modellek különbségéből nyert mennyiség számítása. Amennyiben az üzem rendelkezik hitelesített mérleggel - mely a beérkező és távozó teherautók tömegét méri -, akkor érdeke a felhalmozott és még el nem adott készlet tömegének meghatározása, mely szintén geodéziai mérésekből és 3D modellekből számítható.

Meghatározandó a kitermelt meddő kőzet tömege. Ez nem tartozik az adóköteles ásványvagyonba, ezért a bányavállalkozó érdeke ennek kiszámítása. Fedű esetén ez a letakarítás előtti és utáni állapot rögzítésével történik. Beágyazott meddő esetén már bonyolultabb eljárásra van szükség, melyre később térek ki. E feladatok 3D terepmodell elkészítését igénylik, melyet legalább évente frissíteni kell, de a fedűletakarítások miatt gyakrabban szükség lehet az aktualizálásra.

Minden bányanyitást geológiai kutatások előznek meg, a bányaterület bővítésekor, vagy a felmérések pontosítása céljából pedig folyamatosan újabb megkutatások történhetnek. A megkutatások célja a hasznos ásványvagyon településének helyének és irányának meghatározása, valamint az előforduló kőzetek minősítése. A felmérések korszerű feldolgozása 3D tömör modellel történik. A modellben tárolható információk (kőzettípus, különböző minőségi attribútumok) segítségével döntéstámogató rendszer építhető ki: fejtési munkálatok irányát, határozhatjuk meg, költségelemzést végezhetünk segítségével. További, mindennapos bányaüzemeltetési feladatok lehetnek, amelyeket a térinformatikai modellünkkel támogathatunk:

- lefolyásvizsgálatok, amely a munkálatokat veszélyeztető felszíni vizekre, illetve a bányaudvarban összegyűlő csapadékvíz elvezetésére irányulhatnak
- összelátás-vizsgálatok, a mérések megkönnyítése céljából
- kiszolgáló műszaki létesítmények elhelyezésének és kivitelezésének megtervezése
- közlekedés, anyagszállítás megtervezése

3 A külszíni bányászatban alkalmazott térinformatikai rendszer végtermékei és az azokhoz szükséges alapadatok

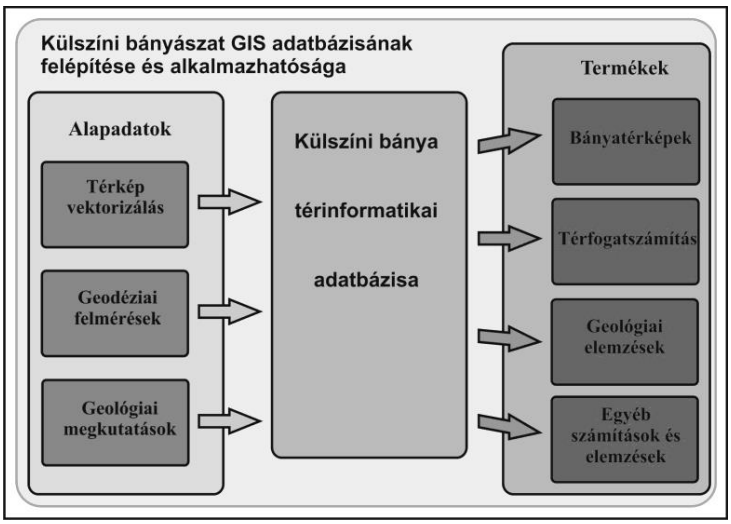
3.1 Térképek

A külszíni bányaművelés térképeinek tartalmát határozatok írják elő. Fajtái: átnézeti térkép, bányaművelési térkép és tervtérkép.

Az átnézeti térkép szükséges tartalmát a 69/1995. (XII. 26.) IKM rendelet „Bányabiztonsági Szabályzat a bányatérképek méretarányáról és tartalmáról” című mellékletének 19. §-a írja le. Az átnézeti térkép alapjául tökéletesen megfelel az 1:10000 méretarányú EOV topográfiai térkép. Szkennelt változatát az őrháló segítségével a helyére transzformálhatjuk, és mint raszteres háttér használhatjuk a megjelenítendő vektoros adatainkhoz. A vektoros adatok koordinátásan adottak, vagy szerkesztet, vagy felmért állományból valók.

Az IKM 69/1995. (XII. 26.) rendelet 20. §-a írja elő a bányaművelési térkép kötelező tartalmát. Magyarországon egy érdekes helyzet alakult ki: a legtöbb közepes és nagyméretű külszíni bányaüzem a digitális technika elterjedése előtt már működött. Ezeknek a bányáknak működésük közben kellett áttérniük digitális térképezési technikára. Költség/hatékonyság mérlegelésüktől függően erre már talán sor került részben, vagy egészben minden jelentősebb üzem életében. Ha a váltás még nem történt meg, az analóg térkép adatai részben átvehetők. Ez egy költségkímélő döntés a bánya részéről, mert gazdaságosabb megoldás a digitalizálás, mint a régóta művelésen kívül eső mérhetetlen területek mérhetővé tisztítása és felmérése. A művelés alatt álló területeken és környezetükben azonban mindenképpen geodéziai méréseket kell alkalmaznunk, hiszen az aktív területen a lehető legnagyobb pontosságra kell törekedni.

Az állami alapadatok használatát rendelet írja elő. Mégsem mindegy, hogy milyen „hiteles” forrást használunk. Ahol lehetséges, vektoros állományt vegyünk át, illetve koordinátajegyzéket használjunk!



1. ábra. A külszíni bányászatot kiszolgáló GIS adatbázis felépítése és alkalmazhatósága

A hiteles térképmásolatok vektorizálása hatóságilag ugyan helyes, mégis ahol tudjuk, a megbízhatóbb digitális állományt érdemes használnunk.

A bányabiztonsági szabályzat nem tér ki az érintett földrészletek ábrázolására - művelési ágakkal együtt. Pedig kényes téma: a bányászati tevékenység sok kellemetlen mellékhatással is jár (robbantás, por, zaj, terjeszkedés a szomszédos területekre, stb.) és az érintettséget, valamint a hatás forrását, helyét csak így lehet azonosítani, a felesleges vitákat elkerülni. A bányavállalkozók egy részének nagy a pereskedési hajlandósága egymással, a bérlővel, a bérbeadóval és a szomszédos földrészletek tulajdonosaival.

Az IKM 69/1995. (XII. 26.) rendelet 21. §-a határozza meg a tervtérkép tartalmát. A bányaművelési térkép másolatára kell felvezetni a műszaki üzemi tervben előirányzottakat, a robbantásos biztonsági övezet határvonalát, stb. A szabályzat nem említi, de valójában többféle tervtérkép létezik: kutatási, üzemeléskor évenkénti, vagy ötévenkénti, szüneteltetési, felhagyási, stb. (Pikli 2005). Ha tehát a bányaművelési térképünk elkészült, csupán kiegészítéseket kell szerkesztenünk rá.

3.2 A 2+1D földtani megkutatás

Részleges modernizációról van szó. Egy bánya régi földtani megkutatásából szerkesztett készletszámítási térképek digitalizálása és aktualizálása a következő témakör.

Mindenképpen költségkímélő modernizációs módszer, hogy a korábbinál pontosabb képünk legyen a még kitermelhető ásványi vagyonról és átvezethessük rá a bányaüzem aktuális állapotát. A további fejtések tervezhetősége kétségkívül könnyebbé válik.

Röviden ismertetem a korabeli térfogatszámítási módszert. A kutatott terület határainak kijelölése után felosztották „kutatólétesítmények körül kialakított sokszögekkel". A sokszögek oldalai a kutatólétesítményeket összekötő szakaszok felezőmerőlegeseiből állnak. Ezek a poligonok készletszámítási tömböket határoznak meg. A tömbök vízszintes határait a megállapított bányaszintek képezik. A példámban három szintet határoztak meg: az első szintet adta a már megkezdett bányaszint, a többi Z magassága a tervezett szinttávolságból adódott. A legfelső tömbök vastagsága eltérő, hiszen azok a terepszint és az első bányaszint között helyezkedik el. Ezekre átlagvastagságokat határoztak meg. Az alsóbb tömbök vastagsága egyezik a szinttávolságokkal. A tömbökre minőségi osztályokat határoztak meg ki (a minősítő szakvélemény egyetemünk Ásvány- és Földtani Tanszéke készítette): kiváló (K), jó (J), közepes (Kö), csak keverve felhasználható (Csk). Egy tömbbel meghatározott kőzettérfogat minősége tehát homogénnek tekintendő, ami a megkutatási adatok generalizálását jelenti (gyakorlatilag a legközelebbi szomszéd interpoláció elvét követi). A megbízhatósá-

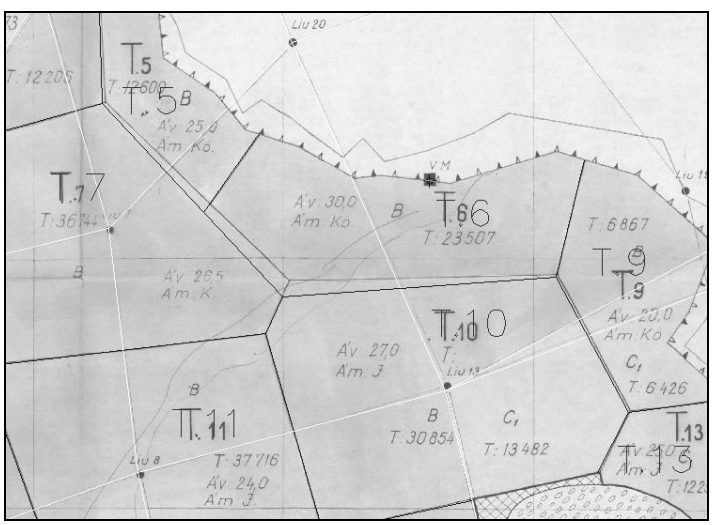
got is osztályozza a korabeli módszer. A megbízhatóság a megkutatási módszer függvénye, az összefoglaló földtani jelentés tartalmazza a megbízhatósági osztályba sorolás elvét, ezt itt nem ismertetem. Csupán annyit: a megbízhatósági osztályba sorolás a sokszögeket tovább bontotta. A sokszögek területe planiméterrel került meghatározásra. A 4. ábrán láthatók a kutatási poligonok (színek különbözetik meg a megbízhatóságot) a minőségi osztályok és területek feltűntetésével.

A megkutatás két részletben történt (1975-ben és a bányatelek bővítéssel csatolt területen 1990-ben), hasonló módszerekkel, néhány részletben azonban eltérően. A kőzetek besorolása különböző szemlélettel történt. Ez a későbbiekben okoz majd problémát. Ami azonban szembetűnő: a két megkutatási terület között körülbelül 50-70 méter széles vizsgálatlan sáv helyezkedik el. Az egységesítést ez nehezíti, ugyanis a módszer nem alkalmas új modell létrehozására, csupán a különböző kampányban készült munkákat együtt láttatja.

A digitalizálás mindenekelőtt a papír alapú szerkesztést pontosítja. A fúrások helye koordinátásan áll rendelkezésünkre, ezért pontosan a bemérés által meghatározott helyükre kerülnek. Minden további, ebből levezetett adat szintén mentes marad a szerkesztési hibáktól, hiszen analitikus módszerről van szó. A két pontot összekötő szakasz felezőmerőlegese egész biztosan a felezőmerőleges lesz, a belőlük alkotott poligon területét pedig a CAD-es környezetben pontosan meghatározhatjuk. A digitalizálás tehát nagymértékben újraszerkesztéssel történik. Amiket a régi térképről kell átvennünk: korabeli bányafalak (semmiképpen nem hagyható el a korabeli bányafalak digitalizálása, hiszen az érintett szintnek a kutatási határáról van szó), a nyitott bányafalon történt mintavételezés helye (nincs koordinátás adat róla) valamint a kutatási határvonal.

Az analóg, de gondos szerkesztési munka hibahatáron belül van, nagy eltérést nem mutat. Tévedni azonban emberi dolog, néhány kiugró hiba bele-bele került a munkába. Egy ilyen kiugró hiba látható a 2. ábrán. A digitális módszereknek a gyorsaság mellett a legnagyobb előnye talán pont a „tévedhetetlensége", azaz az automatizálás és az adatok mozgatása számos emberi tévedés kizárásával. A korábbi szerkesztési tévedések és a digitális állomány eltérésének vizsgálatára legjobb módszer a poligonok területeinek összevetése. Az 1. táblázat néhány statisztikai adatot ismertet a területek megváltozásáról.

A kutatási terület meghatározásának szerkesztési irányelveiről vagy ahhoz tartozó koordinátalistáról egyértelmű információt nem találtam a dokumentumban. Ezért végül annak határait vektoros újrarajzolással határoztam meg minden szinten. A kutatási terület ebből adódó megváltozása a papír alapú térkép deformációjának, szkennelési hibának és a vektorizálás pontatlanságának tudható be. Ez azonban nem jelentős. A területváltozások maximumai elég durva hibát mutatnak, de nem ez a jellemző, amit az eltérések abszolút értékének vett átlaga is mutat. A kutatási területen belüli változások a poligonok határainak mozgását jelenti, azaz a kategóriahatárok vándorolnak.



2. ábra. A korabeli és a digitális változat együttes megjelenítése

Tömegek kerülhetnek át más minőségi osztályba. Ennek a vándorlásnak a mértékét mutatják a területi összehasonlítások, melyeket részletezve a termelést tervező mérnöknek kell értékelnie. A részletes kimutatás természetesen munkám része volt.

Az utolsó lépés a bányaüzem aktuális állapotának integrálása a rendszerbe. Ez nem más, mint a legutolsó felmérésnek megfelelő állapot. Az új állapot új területszámításokat tesz lehetővé, vagyis az elkészült rendszer alkalmas a még fejthető készletek minőségének és mennyiségének meghatározására. A 3. ábrán az aktualizált térfogat-számítási térképből látunk egy részletet.

3.3 A 3D geológiai modell

A 3D földtani modell fő alapját a geológia megkutatás mérési eredményei képezik. Úgymint a magfúrásokból kapott kőzetminták, a geofizikai mérésekből levezetett eredmények valamint a felszínen – már megkezdett bányafalakon – megfigyelhető kőzetek. A modellalkotáskor felhasználásra kerül a már elkészített domborzatmodell is.

A piacon számos szoftver található, amelyet geológiai fúrások digitalizálására és az abból való modellalkotásra fejlesztettek ki. A kiválasztást meghatározza a kifejtendő ásványvagyon típusa (szilárd kőzet, ércek, kőolaj, földgáz), a megkutatás adatainak minősége és mennyisége, a kívánt megbízhatóság és az ár/érték arány. Léteznek olyan kis alkalmazások, amelyek már digitális adatokból csupán egy interpolációs eljárást alkalmazva előállítják a modellt (ezeket speciálisan egy-egy kőzettípusra fejlesztették ki) és akadnak olyanok, amelyek matematikai módszerek széles skáláját kínálják fel. A piaci ár is igen változatos: kevésbé értékes ásványkincsek bányászatára csupán az olcsóbb szoftverek használata kifizetődő, de nagy olajcégek saját fejlesztésű programjaik gyakorlatilag megfizethetetlenek és elérhetetlenek más vállalatok számára.

Én a RockWorks nevű szoftveren végeztem kutatásaimat. Meglepően olcsón beszerezhető, sokféle célú földtani modellezésre alkalmas, éppen ezért különféle bemeneti adatokat képes fogadni és interpolációs eljárások széles skáláját kínálja felhasználásra. A program egy átlagos mai személyi számítógépen futtatható.

A következőkben a magfúrási eredmények digitalizálását ismertetem, de előtte nézzünk meg néhány statisztikai adatot a fúrólyukakra (2. táblázat)!

A digitális fúrólyukak a következő adatokból építhetőek fel:

- alapadatok (X, Y, felszíni Z koordináta, teljes mélység)
- irányultság (aktuális mélységben az azimut és az elhajlás értéke)
- a magfúrás rétegződése (réteg teteje és alja, kulcsszó, valamint általános leírás)

Néhány megjegyzés a fúrólyukakkal kapcsolatban. Az én vizsgálati anyagomban az irányultságra nincs adat, ami arra a feltételezésre kényszerít, hogy a fúrások függőlegesek és elhajlástól mentesek. A megkutatás két különböző kampányban történt, más-más szemlélettel, emiatt a kőzetek minősítése eltérő. A modellalkotás azonban csak akkor lehet sikeres, ha egységesítjük az adatokat! Az egyes kőzettípusokat azonos osztályrendszerbe kell sorolni. Geológus szaktudással ez a probléma könnyen megoldható. A szoftver minden további modellt erre az adatbázisra alapozva épít fel. A fúrólyukak elhelyezkedése determinálja a kutatási terület kiterjedését, ami esetünkben 980x1240 m^2, a kutatási „test” magassága 110 m. A szomszédos magfúrások közti átlagos távolság 178,8 m-re adódik. A kutatási terület felbontását számítógépünk kapacitása határozza meg. Ha az X-Y kiosztást 5 méterre, a mélységet 2 méterre választjuk, a 980x1240x110 m^3-es térfogatra 196x248x55 téglatest esik, ami 21387520 byte tárhelyet igényel. Ennek kiszámítása csupán percekbe kerül, 3D megjelenítése azonban már problémásabb. Kapacitás szempontjából jelenleg ez a végső határ. Nézzünk meg néhány statisztikai adatot a kutatási térfogatra (3. és 4. táblázat)!

Mindenekelőtt el kell döntenünk, hogy litológiai modellt, avagy rétegmodellt szeretnénk készíteni. A vulkanikus kiömléses bazalt települése igen bonyolult: az egymásra rétegződés semmiképp sem lehet szabályos, és tovább formálta később a kőzetmozgás. Egyszerű rétegmodellel tehát nem boldogulunk. A számítás eredménye egy szolid modell, mely kitölti a teljes kutatási teret. Ezt a felszínmodell segítségével formálhatjuk a valósághoz hasonlóvá: a felszínmodellt felső határfelületként használva kimetszhetjük a nem kívánt részt (4. ábra). A modellből automatikusan előállítható

tetszés szerint kiválasztott irányban földtani szelvény (5. ábra), vagy „ablakszelvény” (fencediagram), generálható a felszínről földtani térkép, de bármely magasságban elmetszhető egy vízszintes síkkal. A keresztszelvényen megfigyelhető egy tipikus hiba, amire számítani is lehetett: a fedő réteg jócskán benyomul az ásványvagyonba (6. ábra). Ez azért történhet meg, mert nem rétegmodellt hoztam létre.

1. táblázat. a megkutatási poligonok területének változása

	Első szint		Második szint		Harmadik szint		A teljes
	1975	1990	1975	1990	1975	1990	munkára
A teljes terület megváltozása [%]	0,4	2,3	1,3	1,6	0,7	-0,9	1,1
A maximális területcsökkenés [%]	14,9	1,8	26,8	4,8	4,1	6,9	26,8
A maximális területnövekedés [%]	31,2	13,0	37,1	13,0	8,7	1,2	37,1
A területváltozások abszolút értékének vett átlaga [%]	4,8	3,5	5,6	3,8	2,3	1,8	4,4



3. ábra. Részlet a második szint aktualizált megkutatási térképéről

2. táblázat. Statisztikai adatok a fúrólyukakról

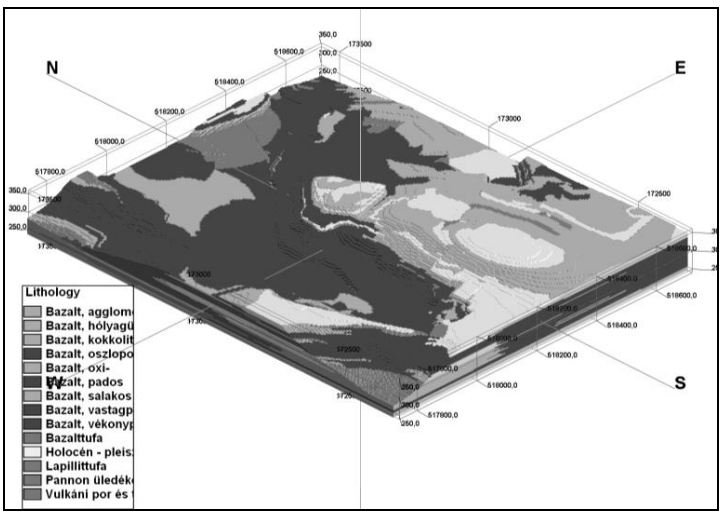
Kampány	Fúrólyukak száma [db]	Összes hossz [m]	Legnagyobb hossz [m]	Legkisebb hossz [m]	Átlagos hossz [m]	Medián
1975	32	1587,2	93,6	7,5	49,6	42,0
1990	6	491,0	94,6	66,2	81,8	82,5
Teljes	38	2078,2	94,6	7,5	54,7	48,5

3. táblázat. A megkutatási tér felépítése

Irány	Minimum [m]	Maximum [m]	Köz [m]	Csomópontok [db]	Hossz [m]
X	517740	518720	5	197	980
Y	172320	173560	5	249	1240
Z	250	360	2	56	110

4. táblázat. A megkutatási tér geometriai adatai

Távolságok	Grid jellemzők	Test jellemzők	Középpont
Vízsszintes lapátló [m]	Csomópontok [db]	Csomópontok [db]	X [m]
1581	49053	2746968	518230
Testátló [m]	Cella terület [m^2]	Voxel térfogat [m^3]	Y [m]
1584	25	50	172940
	Grid területe [m^2]	Test térfogat [m^3]	Z [m]
	1226325	137348400	305



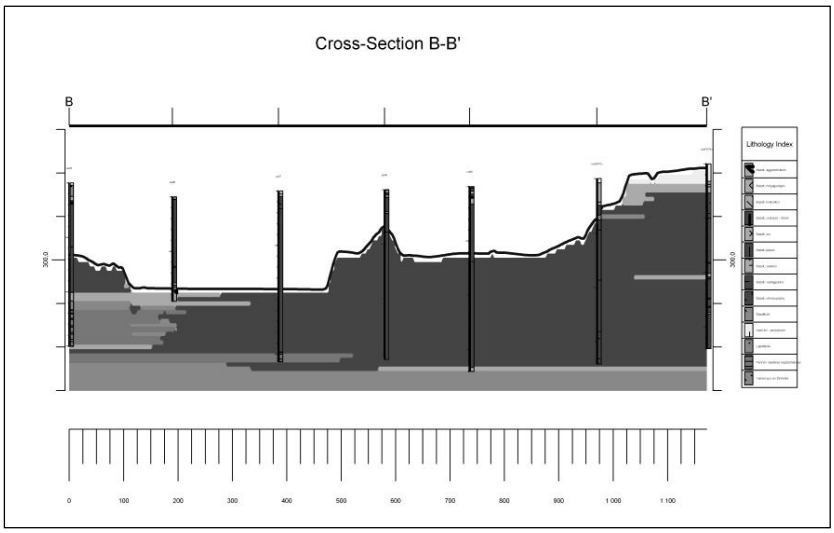
4. ábra. A litológiai szolid modell a bányaüzem aktualizált állapotával

Ez egyértelműen modellhiba, amit ki kell küszöbölni! A legkézenfekvőbb megoldás, hogy szétbontom a modellt réteg- és litológiai modellre. Leválasztom a fedűt és a fekűt egy-egy felületmodellel, a közbeékelődött vulkanikus kőzeteket pedig továbbra is litológiai modellként kezelem. Megfigyelhető a 7. ábra szerinti szelvényen: a vulkanikus kőzetektől jól elkülöníthető a fedűréteg (holocén-pleisztocén) és a fekűréteg (pannon üledékes kőzetek). Ez utóbbi nem folytonos, hiszen a vulkanikus kőzet felszínre nyomuláskor ezt áttörte. Hogy a fekűréteg felületmodellje teljes legyen, közelítéssel éltem: ahol nincs fúrási adat, ott olyan mélyre vittem, hogy az az alsó bányasíktól megfelelően távol essen. Akár a modelltér alja is lehet ez a mélység. A következő felületmodellek adják a rétegmodellt:

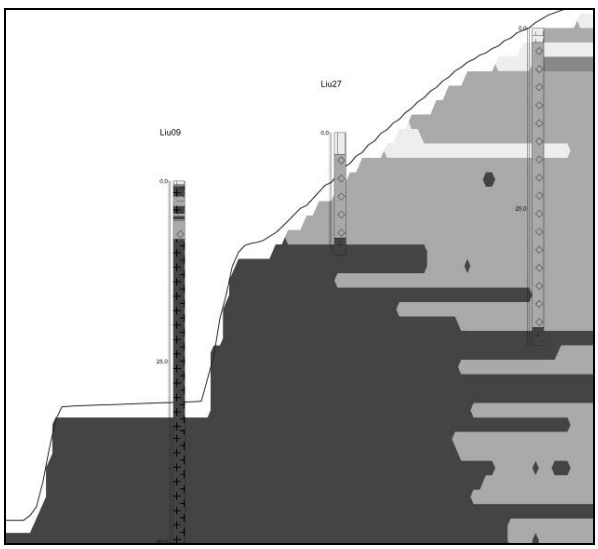
- az aktuális terepmodell,
- fedű alja,
- fekű teteje,
- modelltér alja.

Ebben az esetben a rétegek nem metszhetik egymást. Ez ellenőrizhető a rétegek egymásból való kivonásával. A fedű alját természetesen átmetszi az aktuális terepmodell. Emiatt a két réteg minimumát veszem, így kapom meg az aktuális fedűréteget. A modelltér alja réteg a Z = 250.00 m vízszintes sík.

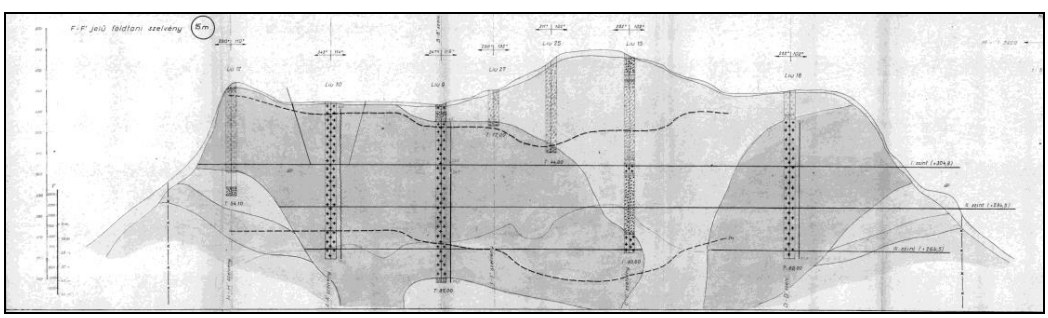
A litológiai modellalkotó módszer a fekű alja és a fedű teteje között továbbra is alkalmazható. Ennek számítása természetesen már a megújított fúrólyuk adatokból történik, azaz a fedű és fekű adatok elhagyásával. Az így összeintegrált modell alkalmas térfogatszámításokra, szemlevételezésekre, a termelés tervezésére. Az egyes réteginformációk külön is alkalmasak egyéb tervezési előszámításokra. A fedűalj és fekűtető kivonásával megtekinthetjük a vulkanikus kőzet településének vastagságát (8. ábra). Ugyanígy szemléltethető a fedűréteg vastagsága (9. ábra). Minden ilyen információ egyszerűsíti és tovább segíti a tervezést.



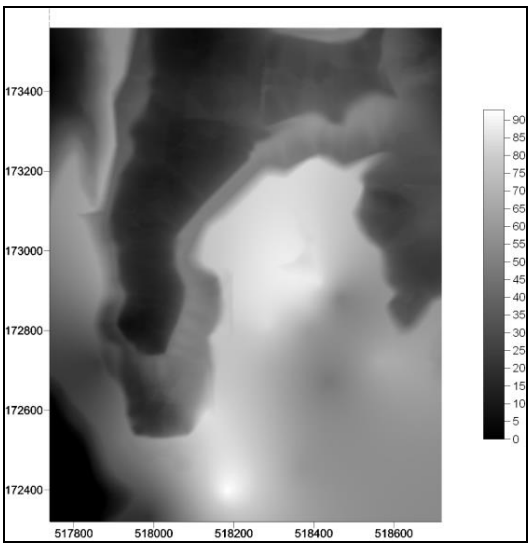
5. ábra. Automatikusan előállított keresztszelvény a bányafalak aktuális helyzetével



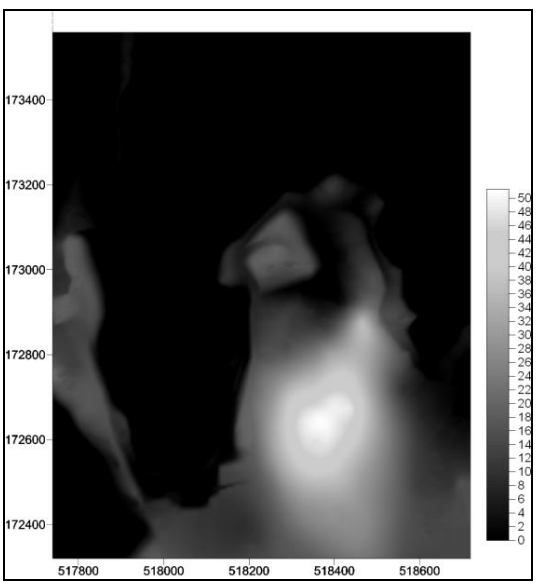
6. ábra. A fedőréteg (világos) benyomulása az ásványvagyonba



7. ábra. Egy korabeli földtani szelvényen a fedő és fekű között elhelyezkedő ásványvagyon



8. ábra. Fedű alj - Fekű tető”



9. ábra. „Felszín – Fedű alj”

4 Összefoglalás

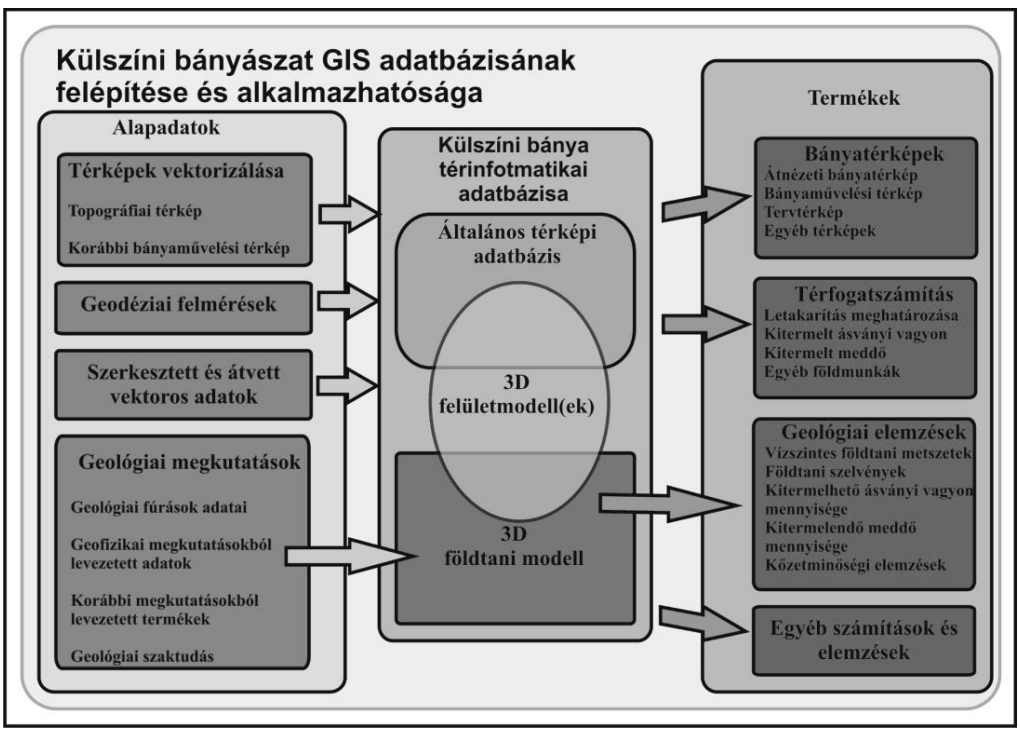
Mint láttuk, a külszíni bányászatot kiszolgáló térinformatikai rendszer igen összetett is lehet. Kiépítésének alapjai adottak, mert a kötelező, hatóság felé leadandó geomatikai termékek már biztosítják. A kiépítés mértékét a gazdasági érdekeltség határozza meg.

A rendszer összetett: CAD-es adatbázist, különböző célú felületmodelleket, földtani modelleket foglal magába. Az alapadatok hitelesek, szabályzat határozza meg forrásukat.

Az alapvetően térképezési céllal készült CAD-es adatbázis alapadatai térkép vektorizálásból, szerkesztésből, mért és átvett adatokból áll. A terepmodell alapja ez a CAD-es adatbázis. Felületmodellek készülnek vegyesen a vektoros adatainkból és földtani kutatások eredményeiből is. A 3D

földtani modell létrehozásakor pedig felhasználunk már meglévő felületmodelleket is. A rendszerből exportálható termékek a bányaüzem kötelező, előírásoknak megfelelő jelentéseit támogatja, biztonságosabbá teszi a termelés tervezhetőségét, valamint egyéb kultúrmérnöki tervezéseket is kiszolgál: úttervezés, anyagmozgatás tervezése, földmunkák, csapadékvíz elvezetés, stb. A 10. ábra eredményeim összefoglalását szemlélteti.

A 3.2 és 3.3 részekben bemutatott eredményeimhez az adatokat az Országos Földtani Kutató és Fúró Vállalat (1975), a Kőbánya Vállalatok Földtani Szolgálata (1990) és a Veszprémi Szénbányák Földtani Kutató és Fúróüzem (1990) jelentéseiből vettem.



10. ábra. Külszíni bányászatban alkalmazható GIS adatbázis felépítése és alkalmazhatósága

Hivatkozások

Pikli K (2005): A bányatérképekről és a bányamérői becsületről. XLIV. Bányamérő Továbbképző és Tapasztalatcsere, Konferencia kiadvány, Salgótarján, 2005 május 18-20.

Barátosi K (2007): Bányamérés. Mine surveying, XLVI. Bányamérő Továbbképző és Tapasztalatcsere, Konferencia kiadvány, Gyula, 2007 május 23-25.

TEREPMODELL PONTOSSÁGÁNAK HATÁSA PERMANENS HIDRAULIKAI MODELL SZÁMÍTÁSÁBAN

*Kugler Zsófia**

Terrain uncertainty analysis for hydraulic calculations *– This paper introduces an analysis on the impact of digital terrain model inaccuracy for one-dimensional steady-state hydraulic modelling. The study assesses the effect of both hydraulic parameter and geometric (terrain) data uncertainty on one-dimensional steady flow calculation. Obtained elevation data was corrupted in two urban built-up study area and hydraulic calculations were performed to evaluate the impact of terrain inaccuracy. In both cases elevation data was analysed in a spatial context. Results of terrain uncertainty were compared to roughness parameter sensitivity of the one-dimensional hydraulic calculations performed in HEC-RAS.*

Keywords: one-dimensional steady-state hydraulic calculation, sensitivity analysis, spatial analysis, digital terrain model accuracy, Manning's roughness parameter, HEC-RAS

A tanulmány terepmodell megbízhatóságát vizsgálja egy-dimenziós permanens hidraulikai modellek támogatására. A cikk elemzi a permanens vízfelszín számítás bemenő geometriai- (városi terepmodell) és hidraulikai (érdességi) adatainak érzékenységét és bizonytalanságát. Magassági információ pontosságának rontásával, két különböző, városi épített mintaterületen mutatja be a terepmodell változásának vízfelszín számításra gyakorolt hatását. Mindkét vizsgálat esetében a terepmodell, mint bemenő adat érzékenységét térinformatikai eszközök segítségével ismerteti. A elemzés eredményét térbeli módszerekkel összehasonlítja a hidraulikai érdességi paraméter bizonytalanságának hatásával.

Kulcsszavak: egy-dimenziós permanens hidraulikai modell, érzékenység vizsgálat, térinformatikai elemzések, terepmodell bizonytalanság, érdességi együttható, HEC-RAS

1 Bevezetés

Az elmúlt években hazánk területén levonuló sorozatos árvizek komoly problémát okoztak. A kis- és nagy folyóink környezetében élőknek hatalmas anyagi terhet jelent az évről évre visszatérő természeti csapás. Hosszú távú éghajlat előrejelzések alapján ezen szélsőséges meteorológiai és hidrológiai események gyakorisága és erőssége az elkövetkezendő évtizedekben növekedni fog (Szlávik, 2005). Hazánk medence jellegű földrajzi adottsága miatt különösen érintett ebben a problémában, így az árvízvédelem a jövőben is kiemelkedő figyelmet érdemel. Megfelelő megelőzéssel és jól előkészített védekezéssel a gazdasági károk enyhíthetőek, az elöntött területek mértéke csökkenthető. Műszaki tervezési és védekezési feladatok mellett jelentős szerepet játszik ebben az egyes hidrológiai események hatásának tanulmányozása.

A technológia fejlődésével egyre több lehetőség nyílik arra, hogy árvízi jelenségek kutatásában döntéstámogató térinformatikai rendszereket és távérzékelt adatokat használjunk. Ezen tanulmány célja a városi környezetben, távérzékeléses módszerekkel kinyert magassági adatok vízfelszín számítás céljából történő elemzése. A cikk vizsgálja a magasságmodellek pontosságának hatását, összehasonlítva azt a vízfelszín számítások további empirikus érdességi paraméterének befolyásával.

2 Egy-dimenziós, permanens vízmozgás felszíngörbéjének számítása nyílt mederben

A digitális terepmodellek pontosságának egy-dimenziós permanens felszíngörbe számításra gyakorolt hatását két mintaterület bevonásával vizsgáltam. Az egyik vizsgált terület Budapest belvárosa mentén a Duna völgye volt, a másik kiválasztott terület az angliai Cambridge-en keresztülfolyó Cam-folyó medre volt. Mindkét területen távérzékelési módszerekkel előállított terepmodellen történt a számítás. Budapest területére a 2000. évi országos légi felmérés képeinek kiértékeléséből

BME, Fotogrammetria és Térinformatika tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.
E-mail: zsofia.kugler@mail.bme.hu

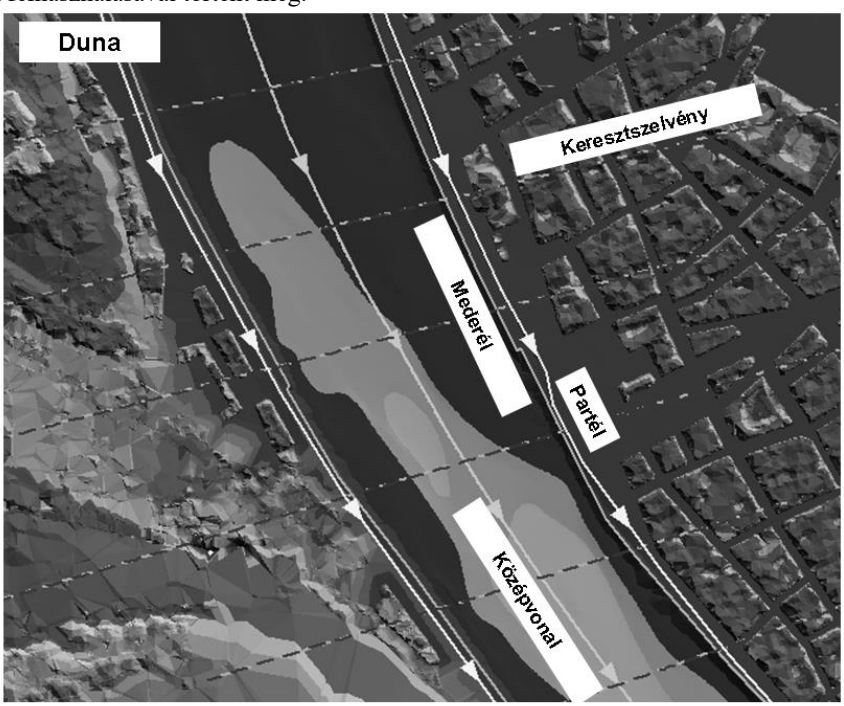
származott a magasság modell. A felvételek 1: 30 000 méretarányban 60%-os átfedéssel készültek. Cambridge esetében légi lézerszkennelt állomány állt rendelkezésemre. Mindkét mintaterületen az épületek, illetve épülettömbök leválasztásával a nyers távérzékelt felszínmodell adatokból városi terepmodell készült.

A terepmodellek vízfelszín számításra gyakorolt hatását a HEC-RAS egy-dimenziós hidraulikai szoftver segítségével végeztem el. A széles körben használt és napjainkban is mérnöki gyakorlatban alkalmazott programot a US Army Corps of Engineers katonai mérnökiroda fejleszti az 1970-es évektől (Brunner 2002). A nagy múlttal rendelkező szoftver legújabb verziói kiegészítő programokkal támogatják a térinformatikai adatok hidraulikai számításba történő közvetlen átvitelét (1. ábra) (Ackerman 2002). Ezzel megkönnyítve a rendelkezésre álló távérzékelt terepi vagy térbeli folyómeder adatok egy-dimenziós hidraulikai modellben történő közvetlen alkalmazását.

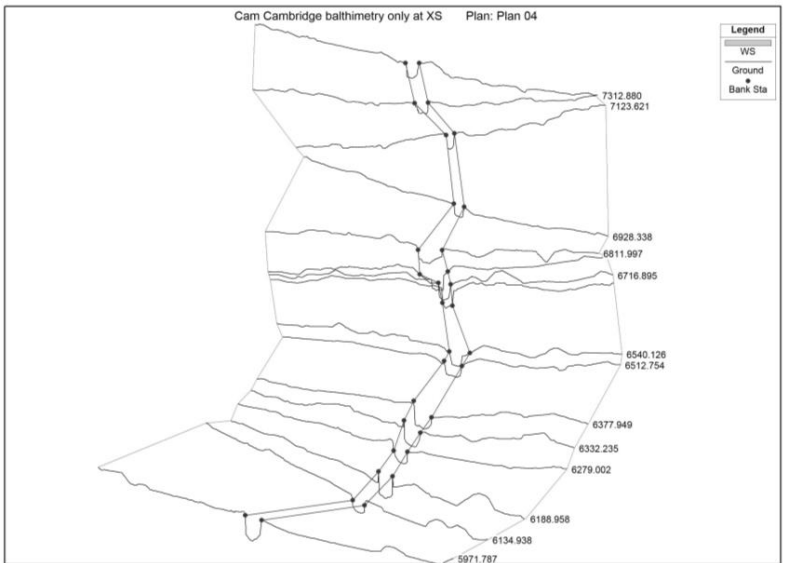
Nyíltfelszínű medrekben történő vízmozgás esetén súrlódási veszteség lép fel. A fellépő energiaveszteség a mederfal menti súrlódás eredménye, melyet a HEC-RAS Manning képleten alapuló permanens vízmozgás számítása során a Manning-féle *n* érdességi együtthatóval jellemez (Haszpra, 1997). Ezen teljes mértékben empirikus együttható érékének megválasztása jelentősen befolyásolja a vízfelszín számítások eredményét, ahogyan azt ezen tanulmány is vizsgálja.

A permanens vízfelszín számításhoz szükséges érdességi együtthatóra vonatkozó modellkalibrációt a budapesti mintaterület esetében terepi mérések segítségével végeztem el. A 2006. évi tavaszi duna-tiszai nagy árvíz idején ideiglenes kijelölt észlelési pontokon folytattunk vízszint megfigyeléseket (Kugler et al. 2006). A mérésből kapott vízállás idősorok segítségével a modell empirikus, Manning-féle érdességi együtthatóját kalibráltam.

Ezzel szemben a Cam-folyó esetében sem lefolyási adat, sem vízállás idősor nem állt rendelkezésre, így az alkalmazott modellt kalibráció nélkül vizsgáltam. A számításokhoz feltételezett 50 és 100 éves csapadékhoz tartozó lefolyás adatokat használtam fel (McMillan és Brasington 2007). A folyóra vonatkozó meder adatokat az angol Vízügyi Hatóság terepi felmérése során készített keresztszelvényekből vezetem le (2. ábra). A Duna esetében ez a VITUKI által készített folyómedertérképek felhasználásával történt meg.



1. ábra. Térinformatikai adatok átvitele HEC-RAS hidraulikai modellbe



2. ábra. Cam-folyó térinformatikai eszközökkel keresztszelvény és terepmodell adatokból levezetett meder és ártér geometriája HEC-RAS hidraulikai modell 3D perspektív nézetében

3 Terepmodell pontosságának vizsgálata

A tanulmány célja a terepmodell pontosság egy-dimenziós hidraulikai számításra gyakorolt hatásának elemzése volt. Az érzékenység vizsgálathoz a HEC-RAS program nyílt felszínű, fokozatosan változó, permanens vízmozgásra vonatkozó felszíngörbe számítási modulját használtam fel.

A városi terepmodell pontatlanságának szimulációjára a meglévő magassági értékeket megváltoztattam, majd vizsgáltam a hidraulikai modell vízfelszín számítására gyakorolt hatását. Azonos érdességi együttható mellett sokszorosan ismételve változtattam a terepfelszín magassági értékeit, majd minden egyes módosított terepmodellen vízfelszín számítást végeztem.

A magassági adatok rontásához a MATLAB program RANDN függvényének felhasználásával normál eloszlású véletlenszerű számokat generáltam. Az eredeti magassági adatokat az így létrehozott magassági hibával (zajjal) a következő elv szerint terheltem (1):

$$DTM_{hibás} = DTM_{eredeti} + RANDN \tag{1}$$

A véletlen számok generálásához a program a Marsaglia-Ziggurat-algoritmust használja (Marsaglia és Tsang 2000). Mint ismeretes az ilyen automatizált függvények álvéletlen számokat hoznak létre, így a kapott számok bizonyos mértékig determinisztikusak.

A hidraulikai számítások érzékenységének vizsgálatához a terepi adatokat ezekkel a véletlenszerű hibákkal terheltem. A sztohasztikus hibákat különböző statisztikai tulajdonságok alapján hoztam létre. A zajt Gauss-féle normál eloszlással generáltam, melynek várható értéke minden esetben 0 volt. A többszörösen futtatott számítások során különböző – 0.3, 0.5, 1, 2, 5 m szórású – hibát alkalmaztam.

A magassági pontatlanság szimulálására a kiindulási adatot azonos statisztikájú hibával terheltem többszörös számítással. Minden egyes futtatás során kapott, hibával terhelt magassági adaton egy-dimenziós permanens vízfelszín számítást végeztem. Minden szórási kategóriát addig ismételtem, amíg az *n+1-szeres* hibás terepmodellen futatott vízfelszín számítások vízszintkülönbségeinek számtani közepe meghatározott, Δz -nél kisebb vagy egyenlő mértékben közelítették az előző *n-szeres* számítások számtani közepét (2).

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} z_i - z_{n+1} \le \Delta z \tag{2}$$

A maximális vízszintkülönbség (Δz) nem haladhatta meg a 0.005m szintet. A különböző statisztikájú hibával terhelt magassági modellek átlagosan 40-szeres iteráció során érték el ezen meghatározott küszöbértéket.

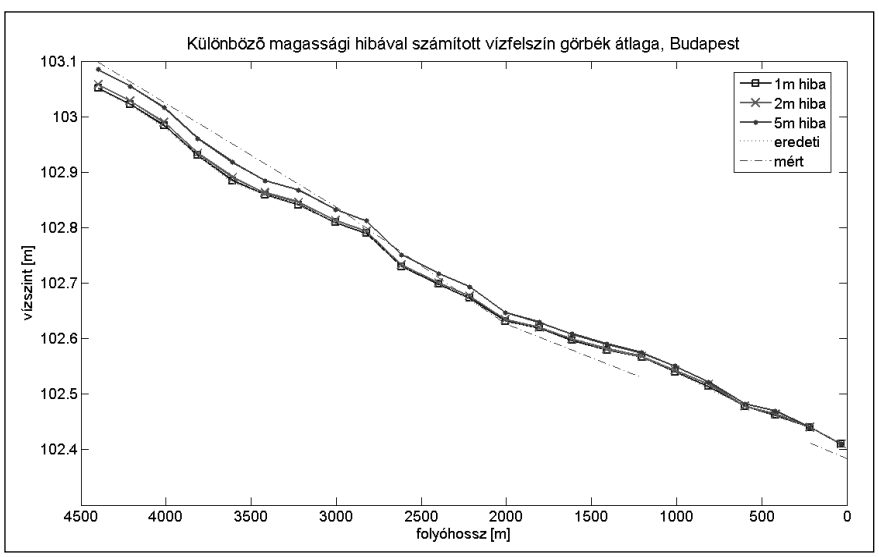
3.1 Vízfelszín számítás a budapesti alkalmazott modellen

A budapesti alkalmazott hidraulikai modell esetében 7450 m^3/s mértékű, árvízi vízhozammal számoltam, mely a 2006 évi esemény során a tetőzés előtti napon mért vízszinthez tartozó közelítő lefolyás érték volt. A modell kalibrációja során a Manning-féle *n* érdességi együtthatóra kapott 0.03 mederre vonatkozó és 0.08 ártérre vonatkozó értékkel számoltam. Peremfeltételként a szelvény kifolyási vízszintjét határoztam meg. A szükséges további meder geometriai adatokat a már említett medertérkép alapján határoztam meg. Az ártér geometriai viszonyait a távérzékeléssel nyert városi terepmodell adta. A szimuláció során többszörösen, különböző statisztikájú zajjal terheltem az eredeti terepmodellt.

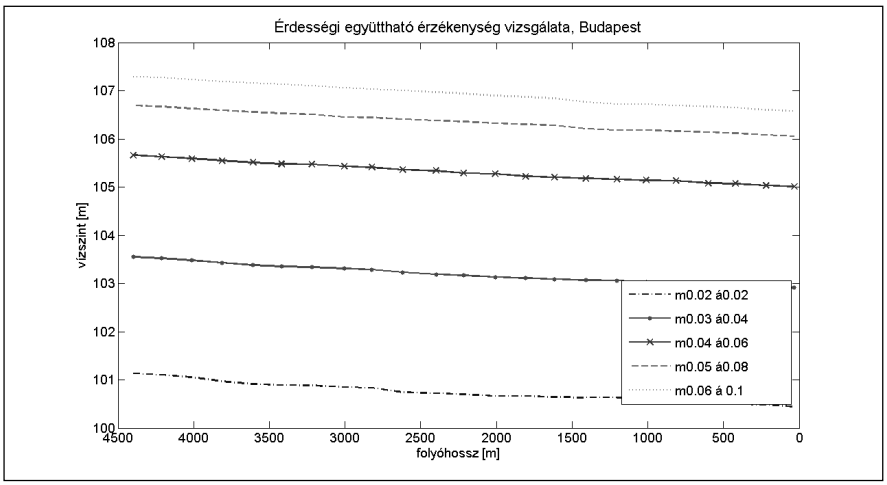
Az egyes magassági hibakategóriákhoz az iteratív számítások során kapott vízszintek számtani közepét rendeltem hozzá (3. ábra). A hibával terhelt terepen számolt felszíngörbéket összehasonlítottam az azonos vízhozam mellett mért vízszintekkel, illetve a hibával nem terhelt, eredeti magassági modellen számított vízfelszín eséssel.

A legnagyobb vízszint eltérést a folyószakasz felső részénél tapasztaltam, melyet értelemszerűen az alsó szakasznál rögzített vízszint peremfeltételből következik. A legnagyobb vízszint eltérés, 0.043 m az 5 m hibával szimulált magassági modellen adódott, mely az alsó szakasz felé csökkent. Az eredeti terepmodellen számolt vízszinthez mért különbség minimális volt az 1 m illetve 2 m hibával terhelt terepmodellek esetén, itt az eltérés nem haladta meg a 0.003 m illetve a 0.006 m értéket. Ez a modellezett szakaszon közel 10 m mély folyó esetén csekély eltérés, melyet a 4. ábrán bemutatott három görbe (eredeti, 1m hiba, 2 m hiba) majdnem azonos lefutása is jól szemléltet.

A permanens vízmozgást leíró modell további bizonytalansággal bíró paramétere az empirikus Manning-féle érdességi együttható. Ennek értéke az ártérre, illetve a folyómederre külön szakaszonként meghatározható. A terepmodell hibájából adódó vízszintkülönbségeket összehasonlítottam ezen hidraulikai paraméter bizonytalanságából adódó eltérésekkel. Figyelmen kívül hagyva a kalibráció során meghatározott érdességi tényezőket, ismételt számításokat végeztem különböző érdességi tényezőkkel azonos meder geometriai feltételek és terepmagassági adatok mellett.



3. ábra. A budapesti, hibával terhelt terepmodellen számított felszíngörbék számtani közepe

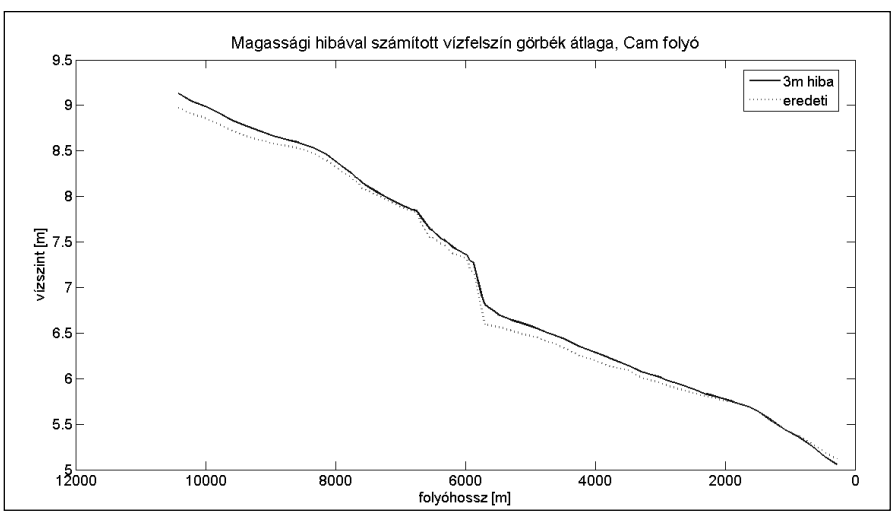


4. ábra. A budapesti modellen különböző érdességi értékek mellett számított felszíngörbék folyó menti hosszszelvénye

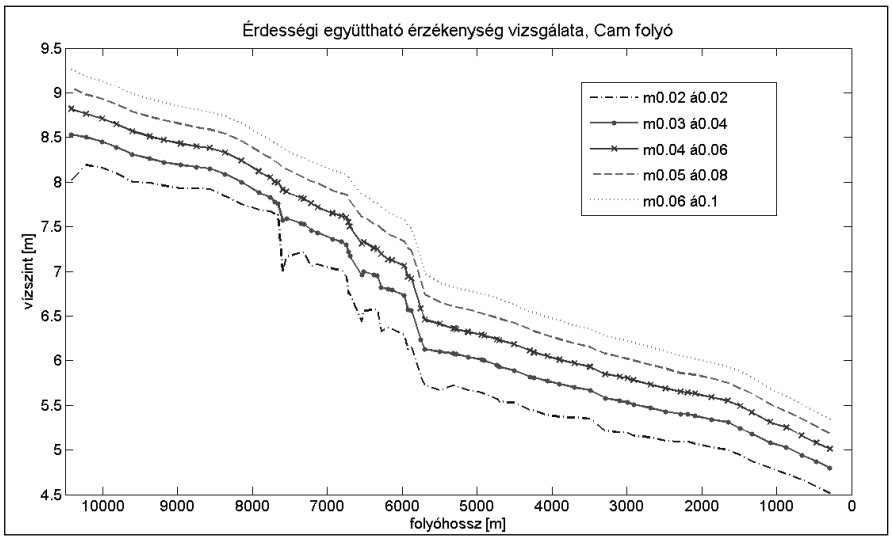
3.2 Vízfelszín számítás a cambridge-i alkalmazott modellen

Fentiekhez hasonló számításokat végeztem a Cambridge és környékére készített városi terepmodellen. Mivel a vizsgált Cam-folyón lefolyásadat nem állt rendelkezésre, ezért kalibrációs adatok hiányában a Manning-féle érdességi együtthatót a mederre 0.04, az ártérre 0.06 értékként határoztam meg. Ezen értékeket kísérleti úton végzett vizsgálatok alapján összeállított tapasztalati táblázatból vettem (Chow 1959). A magassági adatokat a budapesti terepmodellhez hasonlóan különböző statisztikájú hibával terheltem. A többször ismételt, zajjal terhelt magassági adaton egy-dimenziós permanens vízfelszín számítást végeztem.

Az eredményben a budapesti modellen számított értékekhez hasonló nagyságrendű eltérést tapasztaltam a hibával terhelt és nem terhelt adatokból levezetett felszíngörbék alakulásában. A 5. ábra a 3 m szórású, 0 m számtani közepű hibával terhelt magassági adaton végzett hidraulikai számítás eredményét emeli ki. A 0.18 m-es legnagyobb vízszintkülönbséget a vizsgált folyószakasz befolyásánál kaptam, melynek oka itt is a kifolyásnál rögzített peremfeltétel volt.



5. ábra. A cambridge-i, 3 m szórású hibával terhelt terepmodellen számított felszíngörbék számtani közepe



6. ábra. A cambridge-i modellen különböző érdességi értékekkel számított vízfelszínek hosszmenti változása

A zajjal terhelt magassági adatokon futtatott vízfelszín számítások eredményét összehasonlítottam az empirikus érdességi együttható bizonytalanságának hatásával. Hasonlóképpen a budapesti modellen végzett iteratív számításokhoz itt is 0.02 - 0.06 és 0.02 - 0.1 közötti értékeket vettem fel és változtattam 0.01 és 0.02 lépésközökkel egységesen a meder és az ártér teljes szakaszára. A kapott felszíngörbék alakulását a 6. ábra mutatja.

Az ábrán jól megfigyelhető, hogy a magasabb érdességi értékek esetén nagyobb a folyómeder vagy az ártér ellenállása, vagyis a kapott vízszint értékek magasabbak. A legalacsonyabb felszíngörbét a 0.02 érdességi értéknél számoltam. A következő érdességi értéknél – 0.03 meder és 0.04 ártér érdességnél – átlagosan 0.34 m vízszint eltérést tapasztaltam. A választott maximális – 0.06 meder és 0.1 ártéri – érdességi érték a legalacsonyabb kombinációhoz képest már átlagban 1.07 m vízszintkülönbséget adott, mely az átlagosan 3 m mélységű folyónál számottevőnek tekinthető. A kapott különbség mindenképpen jelentősebb, mint a terepmodell bizonytalanságából származtatott maximális 0.18 m-es eltérés.

4 Összefoglalás, következtetés

Ezen tanulmány a digitális terepmodellek pontosságának egy-dimenziós nyílt felszínű, permanens vízfelszín számításra gyakorolt hatását elemezte két mintaterület bevonásával. A választott mintaterületeken távérzékeléses módszerekkel előállított terepmodellen végeztem hidraulikai számításokat. A vizsgálat célja volt meghatározni, milyen mértékben befolyásolja a számítás eredményét a terepmodell pontatlansága, illetve a modell másik fő bizonytalansága, az empirikus Manning-féle érdességi együttható helyes megválasztása.

A számítások során tapasztaltak szerint mind a Duna, mind a nála jóval kisebb Cam-folyó esetében nagy különbség adódott az érdességi bizonytalanság és a terepmodell pontatlanság között. Míg ez előbbi jelentős vízszintkülönbséget okozott a hidraulikai modellezés során, addig a magassági adat bizonytalansága ellenére a számított vízszintek alakulása nagyon hasonló volt. A közöttük lévő eltérés még egy 5 m szórású hibával terhelt terepmodellen történő számítás esetén sem haladta meg az 5 cm vízszintkülönbséget. Eszerint levonható a következtetés, hogy az egy-dimenziós, permanens vízfelszín számítás empirikus érdességi tényezőjének helyes megválasztása jelentősebben befolyásolja a számítás kimenetelét, mint a bemenő magassági adatok bizonytalansága.

Köszönetnyilvánítás. A szerző köszönettel tartozik a FÖMI-nek a légifelvételekért, illetve a Cambridge-i egyetemnek a lézerszkennelt terepi és további térinformatikai adatokért.

Hivatkozások

Ackerman CT (2002): HEC-GeoRAS An extension for support of HEC-RAS using ArcView. Users's Manual, Version 3.1, October 2002, Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, Davis, CA.

Brunner GW (2002): HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual. Version 3.1, November 2002, Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, Davis, CA.

Chow VT (1959): Open channel hydraulics. McGraw-Hill Book Company, New York.

Haszpra Ottó (1997): Hidraulika 1. egyetemi jegyzet, Budapest, Műegyetemi Kiadó, 1997.

Marsaglia G, Tsang WW (2000): The Ziggurat Method for Generating Random Variables. Journal of Statistical Software.

Kugler Zs, Lovas T, Ládai A, Barsi Á (2006): Tavaszi árvizek a térinformatika és a távérzékelés tükrében. Térinformatika, 2006, XVIII; 4, Budapest, 16-20.

McMillan HK, Brasington J (2007): Reduced complexity strategies for modelling urban floodplain inundation. Geomorphology, 90(3-4), 226-243.

Szlávik Lajos (2005): Szélsőséges hidrológiai helyzetek és az árvízi-belvízi biztonság. Magyar Tudomány, 166, 7. szám.

KORSZERŰ GRAFIKUS ESZKÖZÖK LEHETŐSÉGEI A DOMBORZATMODELLEK TÉRHATÁSÚ MEGJELENÍTÉSÉBEN

*Nagy Gábor**

Using advanced graphic cards in 3D visualisation of the elevation models *- Today, most of graphic cards have new advanced functions for 3D visualisation, like pixel shaders or vertex shaders. The article aims to introduce the possibilities of the functions in the 3D visualisation of digital elevation models.*

Keywords: elevation model, visualization, computer graphics

Napjainkban már szinte minden grafikus kártya lehetőséget nyújt a térhatású képek előállítását gyorsító klasszikus eszközök mellett olyan további lehetőségekre is, mint a pixel-árnyalók vagy a csúcspont árnyalók alkalmazása. Ez a cikk azzal foglalkozik, hogyan lehet ezeket a lehetőségeket felhasználni a domborzatmodellek megjelenítésekor.

Kulcsszavak: domborzatmodell, megjelenítés, számítógépes grafika

1 Bevezetés

A digitális domborzatmodellek megjelenítésének egyik gyakran igényelt formája, hogy a domborzatmodell által leírt felületnek a valós arányokkal vagy valamilyen arányú magassági torzítással a térhatású képét állítjuk elő. A térbeli felületen megjelenhet a terület digitális ortofotója, valamilyen térképe, vagy akár a domborzat színfokozatos ábrázolású képe is.

A térhatású megjelenítéshez a domborzatmodell egyes alapelemeit megfelelő transzformációk után a kívánt textúrával (például az ortofotó megfelelő részlete) és megvilágítási jellemzőkkel (a fényforrás vagy a fényforrások helyzete és egyéb jellemzői) kell a számítógépnek kirajzolni. Az egyes alapelemek ilyen módon előállított képeiből áll össze a domborzatmodell térhatású képe.

A bemutatott módszereknek jelentős számításigénye lehet, ami különösen akkor jelent problémát, ha a térhatású képet egy másodpercen belül sokszor kell előállítani a folyamatos mozgás látszatának vagy a megjelenítést végző program interaktív használatának érdekében. A feladat segítésére ezért léteznek olyan grafikus társprocesszorok (GPU), amelyek a szükséges számításokat a számítógép processzoránál sokkal gyorsabban, azt tehermentesítve tudják elvégezni. Ezek az eszközök jellemzően a számítógép grafikus kártyáján találhatóak.

Napjainkban a már a teljesen átlagosnak mondható személyi számítógépek is nagy teljesítményű, a térhatású modellek megjelenítését támogató grafikus gyorsító szolgáltatásokkal rendelkező eszközöket tartalmaznak. Ezek erőforrásait a digitális domborzatmodellek térhatású megjelenítésekor is ki lehet használni.

2 Az inkrementális képszintézisről

A térhatású kép előállításának egyik módja az inkrementális képszintézis. Az inkrementális képszintézis során a sugárkövetéssel ellentétben a képet nem pixelenként állítjuk elő, hanem nagyobb egységekben, ami jelentős sebességnövekedést eredményez.

A térhatású képet interaktív módon megjelenítő alkalmazások a fenti okból szinte kivétel nélkül az inkrementális képszintézis elvén dolgoznak, és a hardveres gyorsítást lehetővé tévő eszközöket is ennek a képelőállítási módszernek a támogatására fejlesztették ki. A képszintézis egységes, a hardver típusától független vezérlése érdekében hozták létre az OpenGL nyelvet, ami tulajdonképpen egy többféle programozási nyelvből is használható felület (Segal M, Akeley K: The OpenGL Graphic System: A Specification (Version 2.1), http://www.opengl.org/).

**NYME GEO, 8000 Székesfehérvár, Pirosalma utca 1-3*
E-mail: ng@geo.info.hu

Az OpenGL állapotgép elvén működik. A képszintézis sokféle paraméterét lehet a megfelelő függvényekkel beállítani. Ezek mind befolyásolják a megjelenítendő elemek kirajzolásának módját.

Egy domborzatmodell megjelenítése például úgy történhet, hogy a szükséges paraméterek (fényforrások elhelyezkedése és jellemzői, képszintézis egyéb tulajdonságai) beállítása után pontok sorozatát adjuk át egy megfelelő tömbben vagy az erre használható függvények egymás utáni meghívásával. A korábban beállítottak szerint a kapott pontokból hármasával egy-egy háromszögként kirajzolódnak a TIN modell háromszögei, melyek összességében ki fogják adni a domborzat térhatású képét. Azt, hogy a kapott pontokból hármasával kell egy-egy háromszöget létrehozni szintén egy paraméterként tudjuk előzőleg beállítani.

Az inkrementális képszintézisről Szirmay-Kalos et al. (2003) könyvében részletesen olvashatunk. Az OpenGL nyelvnek egy magyar nyelvűre lefordított és kezdők számára is ajánlható bemutatása található Martz (2007) könyvében.

3 A bucka leképezés

Ha egy tárgy (ez lehet akár egy domborzatmodell is) virtuális másáról jó minőségű képet akarunk készíteni, akkor a modellezés során minél részletesebben kell annak a felületét megadnunk, ami a felszín leírására használt alapelemek számának rohamos növekedésével jár. Ha a felületek egyenetlenségeiből adódó hatásokat is szeretnénk megjeleníteni a képen, az a felület részletességének növelésével csak rendkívül sok háromszög használatával lenne megoldható, ami képszintézis számításigényét is jelentősen megnövelné, teljesen lehetetlenné téve a valós idejű képmegjelenítést.

A probléma megoldását az jelenti, ha a felület apróbb részleteinek modellezését nem a felületdarabok számának növelésével oldjuk meg, hanem egészen más elvet alkalmazunk.

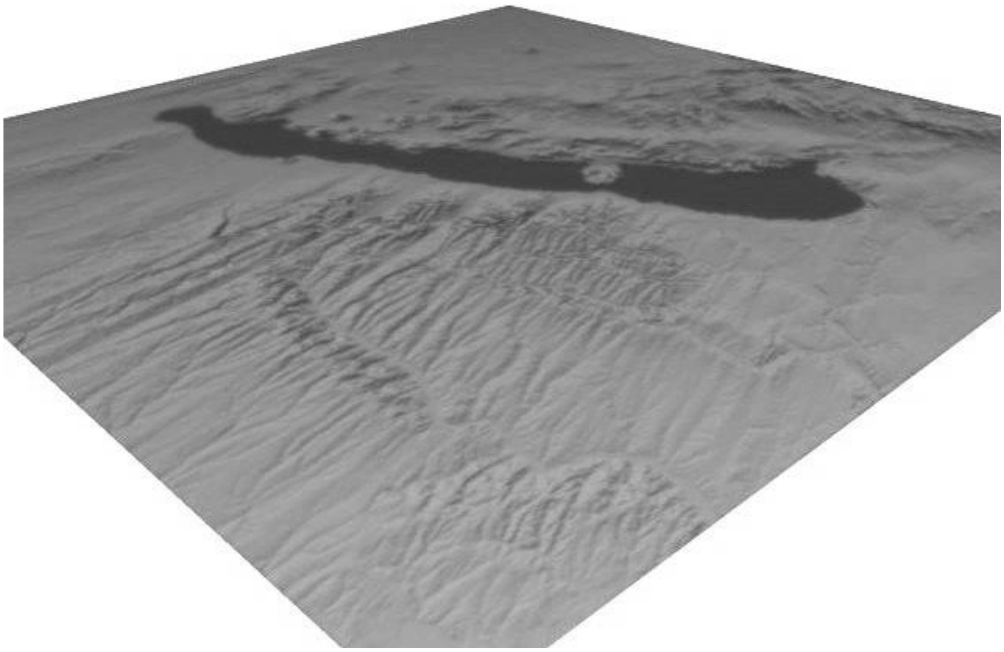
Egy felület egy pixeljének megjelenítésekor a képre kerülő pixel színét sok más egyéb jellemző mellett a fényforrás irányának és a felületre merőleges iránynak (a normálvektornak) az egymáshoz viszonyított helyzete határozza meg. Amikor egy felület részleteinek megjelenítése érdekében növeljük a modellezett felület alapelemeinek számát, akkor azt tulajdonképpen azért tesszük, hogy az egyes kis felületdarabokon megfelelő legyen a felület normálvektorának az iránya, így azok a megvilágítás hatására a megfelelő színben (árnyalatban) jelenjenek meg. Ezt viszont úgy is el tudjuk érni, ha egy kevésbé részletes felülethez textúraszerűen hozzárendeljük a felület normálvektorának az eltérését egy részletesebb felület normálvektorától, majd a megjelenítés során a kevésbé részletes felületre számított merőleges irányokat korrigáljuk ezzel az értékkel. Az árnyalási egyenlet számításakor (a pixel színének meghatározásakor) már az így módosított normálvektorokat használjuk fel.

A normálvektor eltérésének tárolásához pixelenként két adat is szükséges. Ha a két felület távolságát tároljuk, abból parciális deriváltként megkaphatjuk az egyszerűsített geometriából számított normálvektor módosításához szükséges két adatot úgy, hogy csak egy adatot kell pixelenként tárolnunk. A felületek közötti eltéréseket ilyen módon tároló adathalmazt buckatérképnek (angolul bump map) nevezzük (Blinn 1978).

Az 1. és a 2. ábrán látható képeken megfigyelhető, hogy milyen jól képes a buckatérkép visszaadni a térhatású kép árnyalással jelentkező eltéréseit különböző helyzetű fényforrások esetén.

Bucka leképezés alkalmazását a fejlettebb grafikus gyorsító eszközök is támogatják. Ez a támogatás a pixel árnyalónak (pixel shader) nevezett szolgáltatáson keresztül valósítható meg. A pixel árnyaló lehetővé teszi, hogy az árnyaló egység alapértelmezett algoritmusát egy saját kis programra cseréljük le, amivel bucka leképezés támogatását túl még sokféle egyéb dolgot is meg lehet oldani (például a textúrákkal vagy különféle vizuális hatásokkal kapcsolatosan).

Az OpenGL mellett létezik egy külön programozási nyelv, az OpenGL Shading Language (Kessenich J: The OpenGL Shading Language, http://www.opengl.org/), amelyben a C nyelvre hasonlító módon tudjuk a pixel árnyalók működését programozni. Ez a nyelv legfontosabb előnyében is hasonlít a C nyelvre: a benne írt programok többféle hardveren is hatékonyan tudnak működni.



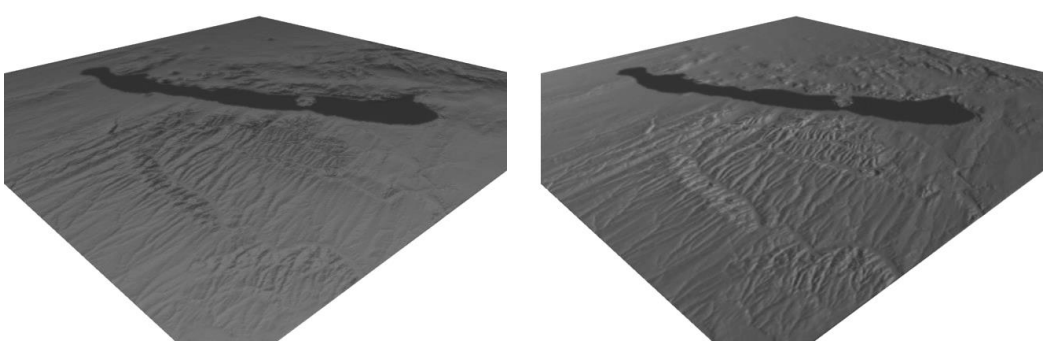
1. ábra. A Balaton környékének nézete. A bucka leképezés hatásosságát mutatja, hogy az alkalmazott modellben a terület geometriáját síknak tekintettük, a képen megjelenő domborzat így kizárólag a bemutatott módszer eredménye. A kép a Blender 3D programmal (http://www.blender.org/) készült.

A buckatérkép alkalmazása a számítógépes grafika területén elterjedt, mindennaposnak mondható módszernek számít. A továbbiakban arról lesz szó, hogy ez a módszer a digitális domborzatmodellek megjelenítésekor hogyan alkalmazható.

4 A bucka leképezés alkalmazása digitális domborzatmodell megjelenítésekor

A digitális domborzatmodelleknek többféle típusa létezik. A következőkben a TIN (Triangulated Irregular Network) típusú domborzatmodellekkel kapcsolatos lehetőségekről lesz szó, bár a bemutatott elvek akkor is alkalmazhatóak, ha kiindulási (részletesebb) felület egy GRID (szabályos rácsháló) modell.

A lehetőség kézenfekvő: készítsük el a domborzatmodell egy egyszerűsített (tehát kevesebb háromszöget tartalmazó) változatát, és állítsuk elő a két felület különbségét, vagyis a buckatérképet. A



2. ábra Az 1. ábrán látható modell két változata eltérő helyzetű fényforrással

megjelenítés során így a bucka leképezés elvét tudjuk alkalmazni.

Nagyon fontos kérdés, hogy hogyan származtatjuk az összetett felületből az egyszerűsített felületet. Erre a feladatra többféle algoritmus is létezik, melyek általában a következő két elv valamelyike alapján működnek:

- Az eredeti felületből kiindulva megkeresik azt a pontot, aminek eltávolítása a legkevésbé változtatja meg a felületet, majd eltávolítják. A műveletet addig ismétlik, amíg kellőképpen le nem csökken a felület elemeinek száma.
- Kiindulnak egy az eredeti felülettel azonos méretű, azt közelítő elemi felületből, majd azon a ponton, ahol a leginkább eltér a két felület felvesznek egy újabb pontot. Ezt addig ismétlik, amíg az egyszerűsített felület kellőképpen nem hasonlít az eredetire. (De még jóval kevesebb elemből áll)

Bármelyik módszert alkalmazzuk is, a kulcskérdés az lesz, hogy milyen elvek alapján választjuk ki azt a pontot, ahol a két felület leginkább hasonlít, vagy leginkább eltér egymástól. A mi esetünkben a cél a bucka leképezéssel történő megjelenítés szempontjából leginkább megfelelő felület előállítása. Ennek következtében az ezzel a módszerrel létrehozott kép szempontjából leginkább (ha az egyszerű felületből indultunk ki) vagy legkevésbé (ha az eredeti felületből indultunk ki) jelentős pontokat célszerű kiválasztanunk.

Az árnyalással jelentkező hatásokat a buckatérkép nagyon jól vissza tudja adni, a kitakarás által okozott hatásokkal viszont nem tud mit kezdeni. Ebből következik, hogy a felület egyszerűsítése során a kitakarás szempontjából fontos részletekre jelentősebb figyelmet érdemes fordítani.
Egy domborzatmodell ábrázolásakor a csúcsok és hátak fogják elsősorban eltakarni a mögöttük lévő részeket, ezért az egyszerűsített felületnek ezeknek a környékén részletesebbnek kell lennie, mint máshol. A fenti területeket leginkább a felszín, mint kétváltozós függvény második differenciálhányadosaival lehet jól megfogni, tehát úgy kell a két felület eltérését összehasonlítani, hogy ezeknek az értékeit is figyelembe vesszük, és a jelentősebb negatív értékkel jellemezhető területeket (ezek lesznek a csúcsok és a hátak környezete) előnyben részesítjük.

5 Összefoglalás

A napjaink számítógépeiben már alapfelszereltségnek számító nagy teljesítményű grafikus eszközök jól használhatóak a digitális domborzatmodellek megjelenítésére is. A korszerűbb eszközökben megjelenő pixel árnyalók (pixel shader) lehetővé teszik az ún. "bucka" leképezés (bump mapping) alkalmazását is, ami a domborzat esetében rendkívül jól használható a megjelenítéshez.

A cikk bemutatta ezeket az új lehetőségeket, majd javaslatokat tett arra, hogy a számítógépes grafika területén már mindennaposnak mondható módszert hogyan lehetne a digitális domborzatmodellek megjelenítésére hatékonyan alkalmazni.

A domborzatmodellek sajátosságait figyelembe véve a cikk javaslatot tesz arra, hogy a felület egyszerűsítése során fokozott figyelmet kell fordítani a kitakarás szempontjából fontosabb részletekre. Ennek oka az, hogy míg az árnyalással jelentkező hatásokat a buckatérkép nagyon jól le tudja képezni, a kitakarással nem tud mit kezdeni.

A javasolt módszerek gyakorlati megvalósítása és eredményességük értékelése további kutatásokat igényel.

Hivatkozások

Blinn JF (1978): Simulation of wrinkled surfaces. Computer Graphics, pp. 286-292.
Martz P (2007): OpenGL röviden. Kiskapu Kft., Budapest ISBN 978 963 9637 25 2
Szirmay-Kalos L, Antal Gy, Csonka F (2003): Háromdimenziós grafika, animáció és játékfejlesztés. ComputerBooks, Budapest. ISBN 963 618 303 1

GÍMSZARVASOK MOZGÁSÁNAK TÉRINFORMATIKAI ELEMZÉSE ÉS MODELLEZÉSE GPS-NYAKÖRV ÁLTAL SZOLGÁLTATOTT, VALAMINT KIEGÉSZÍTŐ ADATOK ALAPJÁN

Király Géza, Náhlik András**

GIS analysis of the movement of red deers based on GPS-collars and supplementary data *- The movements of four red deers have been analysed by means of data supplied by GPS-collars, in the Sopron Mountains, located in Western Hungary. The animals' motion activity, the habitat utilisation and the home ranges have been studied according to the different time interval of the GPS positioning. The sampling interval has been varied between 1 hour and 14 days. The motion activity has been analysed on the ground of summed up daily rambling distances, and digital elevation model has also been involved for three-dimensional investigations. The variation of the home ranges have been studied by the Minimum Convex Polygon (MCP) and Kernel-methods. Our results showed that eight-hourly positions are sufficient for motion activity investigations. The three-dimensional analysis of the motion has not given any surprising results, but indicated the possibility of identifying erroneous points on the basis of DEM. For the home range estimations two positions per day is adequate. A sparse, 6-8 hourly position sampling of the GPS collars is sufficient for most of our investigations, resulting in a much longer time-span and efficiency than before. Since the home range are characterised by significant differences, the home range sizes from older, sparser and less reliable radio-telemetry data should be treated with care.*

Keywords: red deer, GPS telemetry, home range, samplings, GIS Analysis

Vizsgálatainkban négy gímszarvas mozgását elemeztük a felhelyezett GPS nyakörvek által szolgáltatott adatok alapján, a Soproni-hegységben. Az állatok mozgásaktivitását, élőhely-használatát és mozgáskörzetét vizsgálatuk a GPS nyakörvek mintavételezésének függvényében. A mintavételezést 1 óra és 14 nap között változtattuk. A mozgásaktivitást a napi megtett úthosszak alapján elemeztük, továbbá digitális domborzatmodellt is bevontunk a mozgás három-dimenziós elemzéséhez. A mozgáskörzetek nagyságának változásait a minimum konvex befoglaló terület (MCP) és a Kernel módszer segítségével elemeztük. Kimutattuk, hogy a mozgásaktivitást még a 8-óránkénti pozíciók alapján is megfelelően előállíthatjuk. A mozgás három-dimenziós elemzése nem hozott meglepő eredményeket, ugyanakkor a DDM alkalmazásával hatékonyan szűrhetjük a hibás pozíciókat. A mozgáskörzet meghatározásához a napi két pozíció megfelelő. Vizsgálataink eredményeként tehát a jelenlegi gyakorlatunktól – ahol óránként rögzítjük a pozíciókat – eltérően a nyakörveket 6-8-óránkénti pozíció-rögzítéssel sokkal hosszabb vizsgálati időszakban, hatékonyabban lehetne használni. Mivel a mozgáskörzetek jelentős eltéréseket mutathatnak, célszerű a régebbi, ritkább és kevésbé megbízható rádiótelemetriás mérési adatokból származó mozgáskörzet területnagyságokat fenntartásokkal kezelni.

Kulcsszavak: gímszarvas, GPS telemetria, mozgáskörzet, mintavétel, GIS elemzés

1 Bevezetés

A gímszarvas (*Cervus elaphus*) gazdasági jelentőségét tekintve hazánkban a legjelentősebb nagyvad. Magyarországon nagyon jó minőségű állományok találhatók, ezek közül is kiemelkedik a dél-dunántúli populáció. A gímszarvas elterjedése erdőhöz kötött, de időszakosan szívesen vált ki mezőgazdasági területekre is. Az élőhelyének megváltozása vezetett oda, hogy a jelenlegi – mintegy nyolcvanezres – állomány a vadkár miatt csak aktív vadgazdálkodással tartható fenn. A hosszú távon sikeres vadgazdálkodás alapvető feltétele, hogy megismerjük az adott faj élőhely-

**NYME EMK, 9400 Sopron, Bajcsy-Zs u. 4.*
E-mail: kiraly.geza@emk.nyme.hu

preferenciáját és használatát, tudjuk a mozgáskörzetének nagyságát, és ezek ismeretében javítsunk a gazdálkodáson, csökkentsük a felmerült erdő- és mezőgazdasági károkat.

Az állatok mozgáskörzetét GPS-nyakörvek segítségével határoztuk meg, amelyeket a Soproni-hegységben helyeztünk el 4 egyeden. A Soproni-hegység, amely a Rozália-hegység keleti nyúlványának is tekinthető, közepesen magas (legmagasabb pontja a Magas-bérc 556 m), völgyekkel erősen szabdalt, általában metamorf alapkőzetű terület, 750-850 mm közötti évi csapadékkal. A magas, mintegy 85 %-os erdősültségű területen az erdőgazdálkodásnak nagy hagyománya van, ennek eredményeként alakult ki a mai, hazai viszonylatban nagyon magas, körülbelül 50 % tűlevelű állományokat is tartalmazó, igen változatos erdőkép.

Jelen vizsgálatunk elsődleges célja nem magának a mozgáskörzetnek a meghatározása volt, hanem az, hogy a GPS-nyakörvek által különböző időközönként mért adatok segítségével milyen pontos adatokat kaphatunk a vizsgált egyed mozgás-aktivitására, mozgáskörzetére és élőhely-használatára.

A nemzetközi szakirodalomban számos, GPS-telemetriával foglalkozó cikk található. Ezek jelentős része a pozícionálás sikerességét és pontosságát vizsgálja, pár tanulmány ezeket különböző felszínborítások mellett taglalja. Rempel és társai (Rempel et al 1995) kimutatták, hogy a legtöbb faállomány-paraméternek (mint például fafaj, törzsszám, körlapösszeg, záródás és magasság) nincs hatása a pontosságra, jelentősen befolyásolja azonban a sikerességet. Egy másik tanulmány (Dussault et al 1999) arra hívja fel a figyelmet, hogy a faállomány-típusokon és -paramétereken kívül az évszakok és a napszakok is jelentősen befolyásolhatják a sikerességet, éppen ezért a kiértékelésnél ezeket az eltéréseket figyelembe kell venni.

Vannak olyan tanulmányok is, amelyek a mozgáskörzet méretét vizsgálják a különböző módszerekkel és mintavételezéssel. Girard és munkatársai (Girard et al 2002) szerint jávorszarvas esetén 100-300 pozícióra van szükség évente, és 33-100 pozícióra évszakonként, hogy a mozgáskörzetet megbízhatóan határozhassuk meg. Beland és Follman tanulmányában (Beland – Follmann 2002) nagy elemszámmal (72 nyakörv) amerikai barna- és feketemedvéket vizsgáltak Alaszkában, és kimutatták a mozgáskörzet évszakos, de különösen napszakok szerinti eltéréseit, ez alapján óvatosságra int a hagyományos, VHF alapú adatokból levont messzemenő következtetésekkel kapcsolatban.

Mintegy öt éve jelentek meg azok a tanulmányok, amelyek az állatok mozgását részletesebben vizsgálják. Ezek közül említést érdemel Pepin és csapatának (Pepin et al 2004) cikke, amelyben a legelésző állatok által megtett utakat egy aszimptotikus függvénnyel közelíti. Mills és társai (Mills et al 2006) az észak amerikai keleti erdei farkas (*Canis lupus lycaon*) által megtett utakat és territórium méretét vizsgálták különböző mintavételű (5 perc – 24 óra) GPS adatok alapján. Legfőbb következtetésük szerint mindig az adott vizsgálati cél szerint kell megválasztani a pozícionálás gyakoriságát.

Az egyre sűrűbb mintavételezés lehetővé teszi nemcsak az mozgáskörzet meghatározását, hanem az élőhely-használat és a táplálkozási és vándorlási útvonalak helyreállítását is. Ryen és csapata (Ryen et al 2004) 1 mp-es GPS-es adatrögzítőket használtak afrikai pingvineken, és ezek, valamint egyéb kiegészítő adatok alapján vizsgálták az állatok táplálkozási útvonalát. Trembley és csapata (Trembley et al 2006) még ennél is továbbment, és különböző interpolációs módszerekkel közelítették gerincesek mozgáspályáit tengeri környezetben, a GPS- és Argos-adatokból, valamint ezek újramintavételezéséből.

2 Alkalmazott módszerek

A gímszarvas mozgása már régóta fontos és jelentős a vadgazdálkodással foglalkozók számára. Az állatok hagyományos megfigyelése igen nagy tapasztalatot igényel, időigényes, gyakran nehézkes, ugyanakkor sokszor csak megbízhatatlan adatokat szolgáltat. A hetvenes években jelent meg a rádiótelemetria, amely jelentős lendületet adott az állatokkal kapcsolatos kutatásoknak, ugyanakkor az ezúton történő pozícionálás – különösen domborzatos terepen – meglehetősen bizonytalan. A GPS telemetria a kilencvenes évek közepétől jelent meg, és forradalmasította a vadállatokkal kapcsolatos kutatásokat.

2.1 A GPS telemetria eszközei

A GPS telemetria legfontosabb része a nyakörv, amely tartalmaz egy GPS-vevőt, antennát, adattárolót, akkumulátort; általában rádióadót, valamint tartalmazhat egyéb kommunikációs eszközöket (pl. rádiót, GSM modemet, műholdas telefont) és leoldóegységet. A nyakörvön kívül fontos még az adatvételi eszköz, amelynek segítségével még az állaton lévő nyakörvről tudjuk valamilyen kommunikációs csatornán letölteni az adatokat, valamint az adatok feldolgozását lehetővé tévő számítógépes munkakörnyezet. Mára a rendszer széles körben elterjedt, mivel jelentősen pontosabb és megbízhatóbb adatokat szolgáltat az eddigi technológiáknál, ugyanakkor számos technológiai korlát jellemzi. Ezek közül talán a legfontosabb az áramellátás, mivel ennek megoldása jelentősen befolyásolja a nyakörv súlyát és méretét, valamint azt, hogy mennyi ideig, és hány GPS pozíciót tud rögzíteni, összefoglalóan a használhatóságát.

Jelen vizsgálatunkban éppen ezért azt tűztük ki célul, hogy megvizsgáljuk azt, hogy a különböző időközökkel rögzített GPS pozíciók milyen területeken hogyan használhatók fel. A gímszarvas vizsgálatokban a GPS telemetria által szolgáltatott adatokat a következő területeken tudjuk felhasználni:

- Mozgáskörzet meghatározása
- Az élőhely-használat becslése
- Mozgásaktivitás becslése
- A zavarás hatása a gímszarvas mozgására és károkozására
- Olyan erdőművelési módszerek kidolgozása, melyek segítségével az erdei kár csökkenthető
- Olyan mesterséges takarmányozási és vadföld-művelési módszerek kidolgozása, melyek segítségével az erdei és mezőgazdasági vadkár csökkenthető.

Ezek közül jelen munkánkban az első hármat vizsgáltuk meg részletesebben, valamint azt, hogy ezeket hogyan befolyásolja a GPS-pozíciók gyakorisága.

A GPS-nyakörveket ahhoz, hogy használni tudjuk, szükséges feltenni az állatra. A felhelyezéshez az állat befogására van szükség, amely gyakran nem egyszerű feladat. A két leggyakrabban alkalmazott módszer gímszarvas esetén a befogóháló és az altatólövedék. A mi esetünkben hálóval történt az egyedek befogása (1. ábra). Vizsgálataink során 4 egyed mozgását vizsgáltuk, ezek áttekintése a következő táblázatban található (1. táblázat).

1. táblázat. A vizsgált egyedek adatai

Nyakörv	Állat	Befogás módja	Befogás időpontja	Levétel időpontja	Mérés tartama	Pozíciók száma	Megjegyzés
Tellus1	tehén	Háló	2005.03.01.	2006.03.31.	390	8 534	ellőtt lábú
Tellus2	tehén	Háló	2005.03.01.	2006.04.01.	390	8 503	
Tellus3	bikaborjú	Háló	2005.03.01.	2006.04.19.	408	8 662	
Tellus4	tehén	Háló	2005.03.01.	2005.09.20.	198	4 400	elhullott

A nyakörv felhelyezése után a GPS az előre beállított rendszerességgel gyűjti a pozíciókat, esetleg egyéb kiegészítő adatokat. A rögzített adatokat rádióhullámok segítségével tudjuk a nyakörvről letölteni. Az időközben letöltött adatok valójában csak tájékoztató jellegűek, gyakran hibásak és hiányosak, ezért a teljes adatsort csak a nyakörv visszaszerzése után tudjuk elemezni. A nyers mérési adatok közül a legfontosabbak a földrajzi koordináták (szélesség-hosszúság-magasság), amelyeket kiegészít a dátum és idő. Az általunk



1. ábra. Gímszarvas hálós befogása és a nyakörv felhelyezése

használt Televilt gyártmányú Tellus nyakörvek ezeken kívül rögzítik a pozícionáláshoz szükséges időt (Time To Fix – TTF), a felhasznált műholdak számát (SVs), a DOP értéket, valamint a hőmérsékletet (Temp). A földrajzi koordinátákat a további feldolgozáshoz célszerű Egységes Országos Vetületbe (EOV) transzformálni, mind az egyszerűbb kezelhetőség, mind az egyéb, elemzésbe bevonni kívánt kiegészítő adatok miatt. A transzformációt Sopron környékére érvényes lokális paraméterkészlettel valósítottuk meg.

2.2 A mintavételezés

Vizsgálataink középpontjában az állt, hogy meghatározzuk az – adott felhasználás szempontjából – optimális GPS helymeghatározás időközét. Ehhez az elérhető leggyakoribb, 1-órás pozíciókból kiindulva különböző ritkább mintavételezéseket valósítottunk meg. A mintavételezésekhez használt időközöket a 2. táblázat tartalmazza. Megemlítjük, hogy a nemzetközi szakirodalomban már megtalálhatók a 4 Hz-es adatok is (Swain et al 2008), ugyanakkor a mi nyakörveinknek a leggyakoribb mintavételezése 15 perc, de sajnos a kísérleti, 15 perces nyakörvről nem tudtuk letölteni az adatokat, így csupán az 1-órás adatokat volt lehetőségünk vizsgálni.

2. táblázat. A mintavételezések időközei

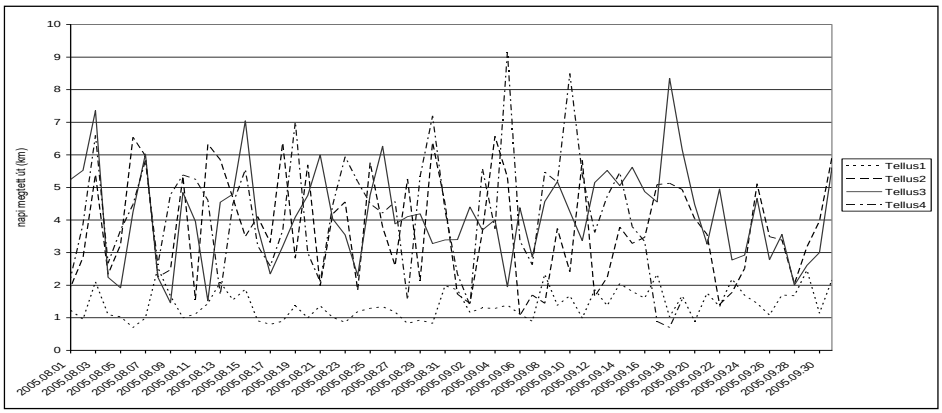
Név	Időköz óra	Megjegyzés	Név	Időköz óra	Megjegyzés	Név	Időköz óra	Megjegyzés
1 órás	1	eredeti	12 órás	12		1 nap n	13-36	nappal véletlen
2 órás	2		24 órás 0	24	éjfélkor	2 nap	37-60	nappal véletlen
3 órás	3		24 órás 6	24	6 órakor	3 nap	61-84	nappal véletlen
4 órás	4		24 órás 12	24	délben	7 nap	157-180	nappal véletlen
6 órás	6		24 órás 18	24	18 órakor	14 nap	325-348	nappal véletlen
8 órás	8		1 nap én	1-48	véletlen			

A mintavételezések során sok apró probléma merült fel. Az egyik ilyen a sikeresség kérdése. A 12-órás mintavételezésig bezárólag, amennyiben nem volt mért pozíció a következő mintavételi időpontban, úgy a következő lehetséges pozíciót választottuk, de ezt az eltolódást a következő mintavételnél már nem vettük figyelembe. A 24-órás mintavételeknél minden esetben az adott órájú pozíciót választottuk (pl. a 6 órakorit), amennyiben ez hiányzott, úgy a maximum 3 órával későbbi pozíciót választottuk (pl. 7, 8, vagy 9 órakorit). A következő napon azonban ezt az esetleges eltérést már nem vettük figyelembe, így a tényleges időköz itt a két mérés között 21-27 óra lehet. Amennyiben hosszabb intervallumban hiányoznak a mérések, akkor két mintavétel között akár több nap is lehet az eltérés, de esetünkben ilyen nem fordult elő. Az 1-napos mintavételeknél alkalmaztunk egy, a teljes napon belül véletlenszerű mintavételt („1 nap én”), valamint egy csak nappali véletlenszerű mintavételt („1 nap n”), az előbbinél a 0-23, az utóbbinál a 6-17 óra közötti helyzetekből választottunk ki egyet véletlenszerűen.

Az 1 napnál is ritkább mintavételezéseknek – feltételezésünk szerint – ott van jelentősége, ahol régebbi, más forrásból származó adatok (pl. rádiótelemetriás mérések) alapján határoztak meg mozgáskörzetet, és mivel ezek a mérések általában nappal történtek, ezért itt a véletlenszerű nappali mintavételezést választottuk.

3. táblázat. A megtett utak

Nyakörv	Pozíciók száma	Időtartam	Sikeresség	Összes út	Napi út Min.	Napi út Max.	Napi út Átlag
	db	nap	db/nap	m	m/nap	m/nap	m/nap
Tellus1	8 522	393	21.7	496 280	295	3 868	1 263
Tellus2	8 490	394	21.5	1 459 376	699	11 339	3 704
Tellus3	8 643	412	21.0	1 735 960	805	12 021	4 213
Tellus4	4 377	200	21.9	615 761	700	9 150	3 079



2. ábra. A napi utak változása. Részlet

3.1 A megtett út

A gímszarvas mozgását többféle módszerrel is elemezhetjük, az egyik legkézenfekvőbb eljárás a mért pozíciók alapján számított megtett út. A pozíciók között számíthatjuk a távolságokat, és ezek összesítésével a megtett utat.

Már ez az egyszerű számítás is érdekes eredményt mutat (3. táblázat). A GPS mérés sikeressége az ~22/nap, ami mintegy 91 %-nak felel meg. Az állatok naponta minimum 700 m-t, maximum ~10 km-t tettek meg. A napi átlagos megtett út 3.1 km és 4.3 km között változott, utóbbi a bikaborjú esetében. A Tellus1 nyakörv egy ellőtt lábú, sánta tehénen volt, ami a megtett utakban is szignifikánsan megmutatkozik.

Érdekes mintázatot mutatnak a napi megtett utak, általában 2-4 napos periódus jellemző rájuk (2. ábra). Ennek oka egyelőre még ismeretlen, lehetséges, hogy az időjárás befolyásolja, esetleg egyéb zavaró tényezők, de akár élettani háttere is lehet.

A különböző mintavételezésekkel választott pozíciókból is számolhatjuk a megtett utat, ilyenkor vizsgálni tudjuk azt, hogy ritkább helymeghatározással hogyan változna az állat által megtett út általunk számított hossza. Másik lehetőség, hogy azt feltételezzük, hogy az egyre sűrűbb mintavételezésekkel a számított út hossza aszimptotikusan közelíti a ténylegesen megtett utat. A Pepinék (Pepin et al 2004) által alkalmazott módszer azonban az esetünkben azért nem volt alkalmazható, mert ahol a függvény közelítené az aszimptotát, pl. az 1440 pozíció/nap alapján, ott a mi esetünkben a maximum 24 pozíció/nap volt, az előző érték pedig csak 12 pozíció/nap. Így az érték meghatározása nagyon bizonytalan lett volna.

3.2 A mozgás vizsgálata

A mozgás vizsgálatára további lehetőséget kínál az, hogy a pozíciókat, és a közöttük lévő távolságot ne csak két dimenzióban, hanem térben értelmezzük és elemezzük. Mivel a szintkülönbségek legyőzése jelentősen több energiát igényel az állattól, ezáltal pontosabb képet kaphatunk az állat mozgásáról, a különböző elérhető táplálékforrásokról, és a közöttük felhasznált energiákról. Ugyanakkor a mozgás magassági leírásához a pozíciók nem elegendők, szükséges kiegészítő adat beszerzése is.

4. táblázat. A Tellus4 napi mozgása

Param.	Dátum nap	Sikeresség db/nap	Napi út m/nap	Napi szint m/nap	Napi lejt % %
Min	03.02	19	700	35	1,3
Max	09.08	24	9 150	394	15.2
Átlag		21.9	3 079	167	5.4
Össz.	200	4377	615 761	33 445	

Elemzéseink során mi különböző Digitális Domborzat Modelleket (DDM) használtunk fel, amelyek segítettek a hegyvidéki terepen az állatok mozgási profiljainak elkészítéséhez. A Tellus4 állat magassági mozgását az 4. táblázat foglalja össze.

3.3 Mozgáskörzet alapján

A telemetriai vizsgálatoknak sokszor elsődleges célja az állatok mozgáskörzetének a meghatározása. A meghatározott helyekből a szakirodalomban számtalan különböző módszert említenek a mozgáskörzet meghatározására. Eddigi vizsgálataink alapján (Király és Náhlik 2005) jelen vizsgálatban a legkisebb konvex befoglaló terület (Minimum Convex Polygon – MCP) módszerét (Mohr 1947) és az un Kernel-módszert (Silverman 1986) választottuk ki az elemzések elvégzéséhez.

A legkisebb konvex poligon módszere általánosan alkalmazott a mozgáskörzet-meghatározások során. A legnagyobb előnye, hogy semmilyen paraméterre nincs szükség az alkalmazásához, valamint, hogy nagyon egyszerűen előállítható. Legnagyobb hátránya, hogy érzékenyen reagál a minta elemszámára, és a kiugró, gyakran hibás pontokra; valamint nem tesz különbséget a területek használata között. A kiugró pontok szűrésére többféle módszer is ismert, pl. a különböző átlagtól való eltérések alapján (Kenward 1987), amelyek a hibás pontokat jobban, ugyanakkor ritkán használt területeket kevésbé jól képesek szűrni.

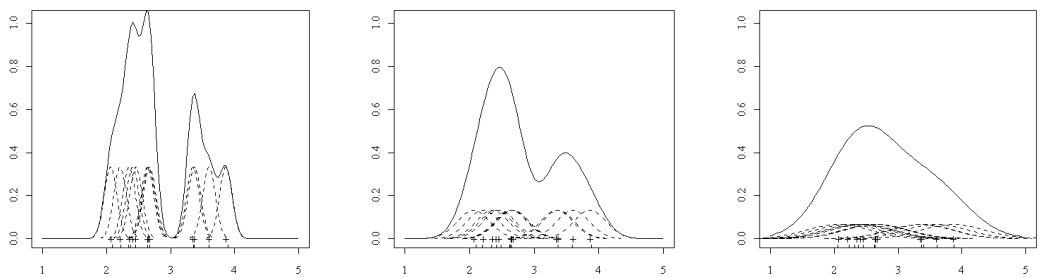
Vizsgálataink során mi egy olyan szűrést alkalmaztunk, amelynek segítségével a biztosan hibás pontokat kiszűrtük, a többit azonban mind felhasználtuk.

A Kernel-módszer egy sűrűség-becslési módszer, amelynél a diszkrét pontok körül egy meghatározott függvény szerint – amely gyakran a Gauss-görbe – csökkentjük a gyakoriságot a ponttól, a simítási tényező (*bandwidth: h*) által meghatározott távolságig. Ez a simítási tényező lehet a normál eloszlás szórása, vagy a haranggörbe „sugara" is. Utána ezeket az egyes gyakoriságokat összesítjük, és így kapjuk meg a gyakoriság térbeli eloszlását. Az eredmény esetében beszélünk nem kellően simított, megfelelően simított és túlsimított becslésről (3. ábra)

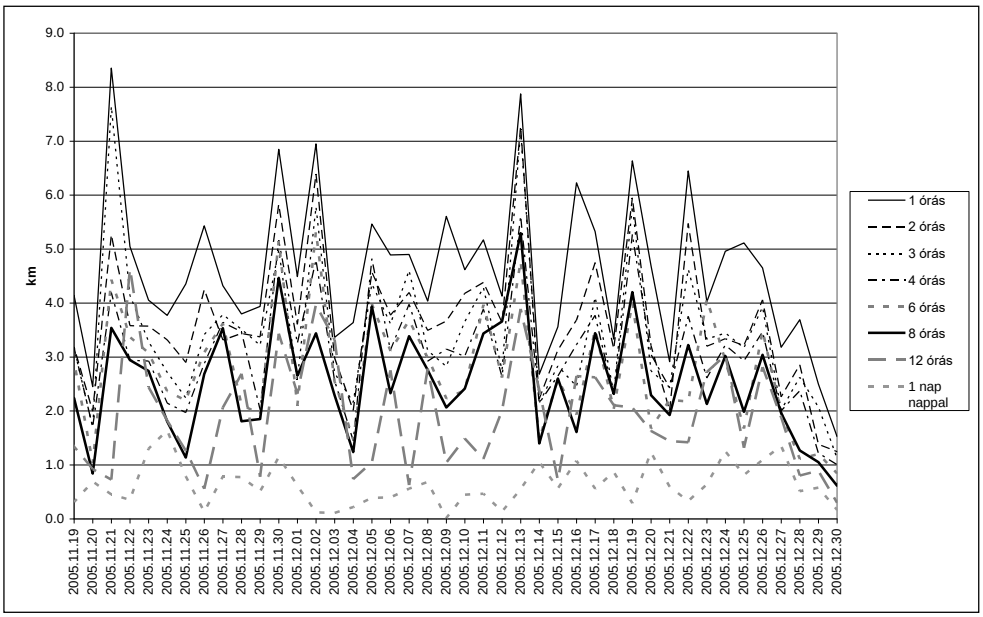
Látható, hogy a módszer kulcspontja a megfelelően megválasztott simítási faktor, amelyet mi egyrészt Silverman javaslata alapján az un LSCV (*Least Squares Cross Validation*) módszer segítségével, másrészt tapasztalati úton 500 m-nek határoztunk meg (H=500). A mozgáskörzethez pedig a 95%-os, 75%-os és az 50 %-os gyakoriságú területek nagyságát határoztuk meg.

4 Eredmények

Az állatok által megtett út hosszát a ritkább mintavételezés egyre kevésbé reprezentálta, mint ahogy ez várható is volt. Ugyanakkor még a 24 órás mintavételezéssel is kimutatható a 2. ábrán már bemutatott 2-3 napos ciklus (4. ábra). A ritkább mintavételezések és az 1-órás adatok közötti összefüggésről ad áttekintést az 5. táblázat, amelyben a lineáris regressziós egyenes meredeksége, és a korrelációs együttható is fel van tüntetve. Statisztikailag a 8 órás mintavételezés még ~ 60 %-os korrelációt mutatott az 1 órással, körülbelül 0.51-es meredekség mellett (5. táblázat). Az 1-órás mintavételezéshez viszonyított relatív úthosszak, és a mintavételezés ideje között szoros összefüggést talál



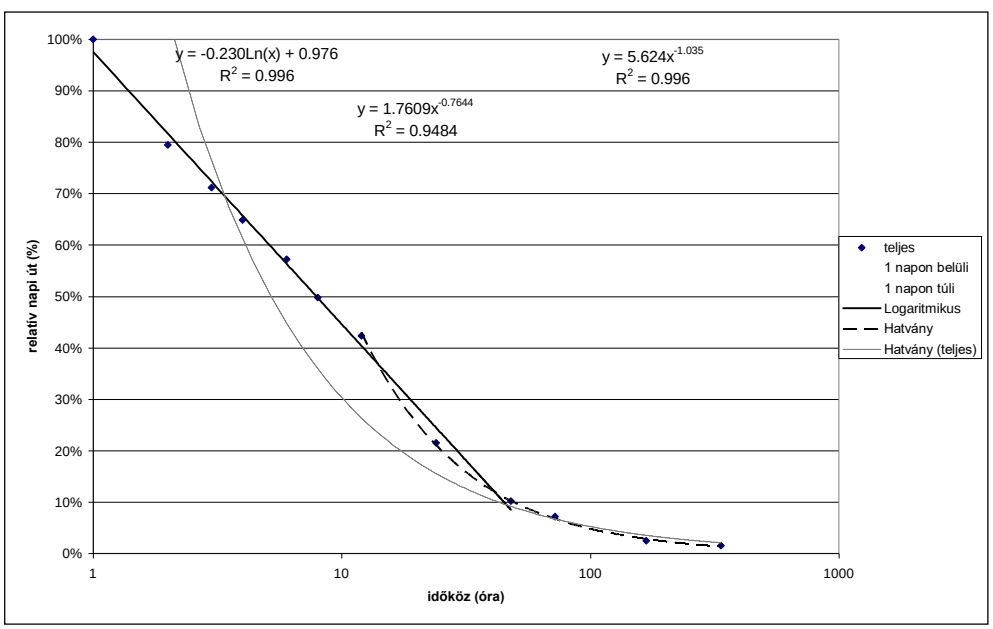
3. ábra. A Kernel-módszer különböző simítási értékek esetében. Nem kellően (0.1), megfelelően (0.25), és túlsimított (0.5) sűrűség (http://www.maths.uwa.edu.au/~duongt/seminars/intro2kde/ nyomán)



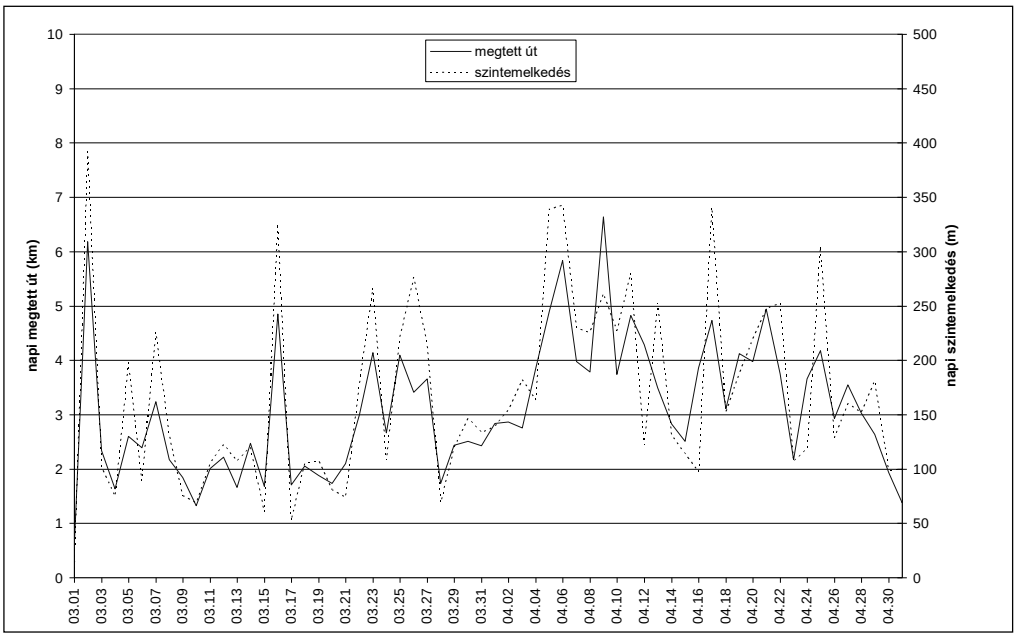
4. ábra. A napi megtett utak változása különböző mintavételezéssel a Tellus2 nyakörv esetében. Részlet.

5. táblázat. A Tellus4 napi mozgása

Mintavétel	1 órás	2 órás	3 órás	4 órás	6 órás	8 órás	12 órás	24 órás 12
Összes út (km)	1 452	1 154	1 033	942	831	722	614	312
Relatív út	100%	79.5%	71.2%	64.9%	57.2%	49.8%	42.3%	21.5%
Meredekség	1.00	0.81	0.73	0.66	0.59	0.51	0.42	0.13
R^2	100%	90.8%	80.7%	79.9%	67.8%	60.5%	39.1%	20.7%

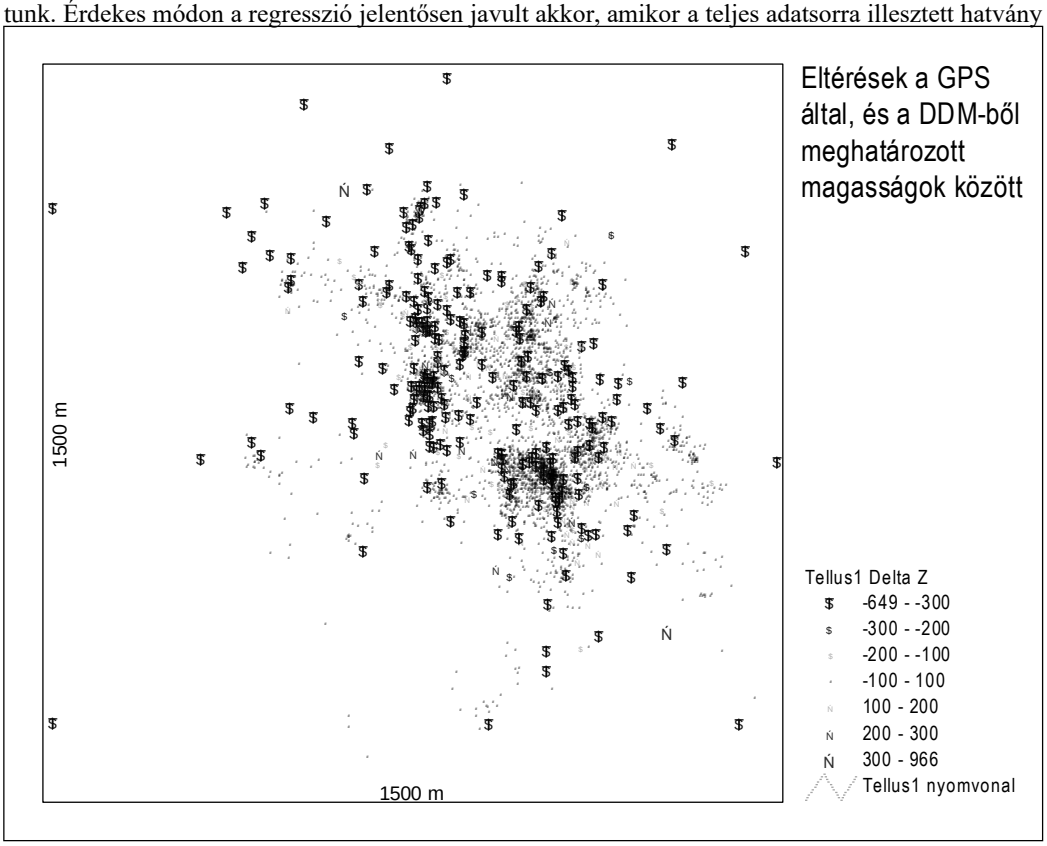


5. ábra. A napi relatív utak és a mintavételezés időköze közötti összefüggés

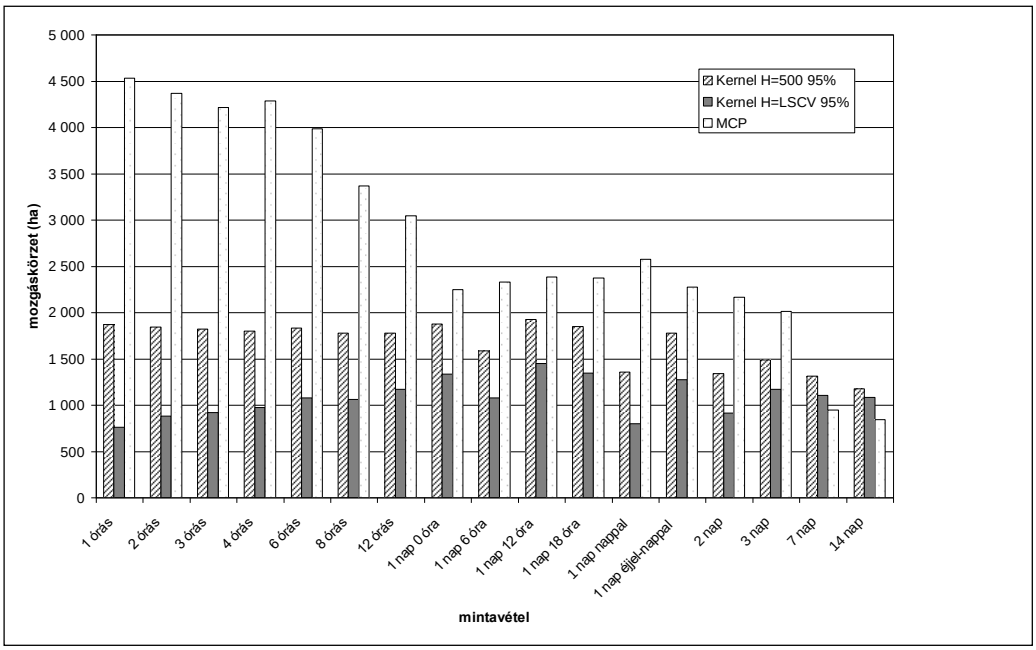


6. ábra. A Tellus4 napi mozgása. Részlet

tunk. Érdekes módon a regresszió jelentősen javult akkor, amikor a teljes adatsorra illesztett hatvány



7. ábra. Eltérések a Tellus1 nyakörv által GPS-szel meghatározott és a DDM-ből számított magasságok között



8. ábra. A különböző módszerekkel és mintavételezésekkel meghatározott mozgáskörzetek nagysága a Tellus3 nyakörv esetében

alapú regresszió (94.8 %) helyett két lépcsőben, az 1 napon belüli, és az 1 napon túli mintavételezést szétválasztottuk, és az első részére logaritmikus, a második részére hatvány alapú regressziót illesztettünk, így 99.6 %-os korrelációs együtthatót tudtunk elérni (5. ábra). A DDM bevonásával kimutattuk, hogy a napi megtett út, és a napi szintemelkedés között szoros a kapcsolat, így e miatt a DDM bevonása nem lenne indokolt (6. ábra).

A domborzatmodell alkalmazása során figyeltük meg azt, hogy sok esetben azok a pontok, ahol a GPS által mért magasság és a terepmodellből számított magasság jelentősen eltér, ott valószínűleg hibás, kiugró pontokról van szó (7. ábra). Leggyakoribb hiba a zéró vagy negatív GPS magasság volt, ezeknél negatív előjelű az eltérés.

Ezeknél a hibás, kiugró pontoknál kérdéses a vízszintes pozíció pontossága is, éppen ezért a DDM alkalmazásával lehetővé válik a pontok szűrésére is. Ugyanakkor nem mindig megfelelő csak az eltérések alapján szűrni sem, mert van, hogy a GPS csak vízszintes koordinátákat tudott meghatározni.

A mozgáskörzet meghatározásánál a minimum konvex befoglaló terület módszerével meghatározott mozgáskörzetek mérete a mintavételezéssel csökken, mint ahogy ez a csökkenő elemszám miatt várható is volt. Ennél a módszernél a 100%-hoz tartozó területeket ábrázoltuk. A Kernel-módszer esetében a 95%-os valószínűségű területeket ábrázoltuk. A tapasztalati úton meghatározott, egységesen alkalmazott simítási faktor esetében a terület nagysága a 24 órás mintavételezésig jelentősen nem változik, ritkább mintavételezéssel csökkenő tendenciát mutat. Ez a simítási faktor (H=500) ugyanakkor a gyakoribb mintavételezésnél jelentős túlsimítást, a ritkább mintavételezésnél akár nem megfelelő simítást is eredményezhet, bár esetünkben általában a 14 napos mintavételnél kaptunk hasonló értékeket az LSCV módszerrel. Az LSCV módszerrel meghatározott simítási faktorral a mozgáskörzet a 24 órás mintavételezésig határozottan növekszik, ritkább mintavételezéssel enyhén csökken (8. ábra). A ritkább mintavételezés kevesebb elemszámot jelent, így az LSCV módszer magasabb simítási tényezőt határoz meg, részben ez okozza a mozgáskörzetek területének növekedését. Érdekes kérdés az is, hogy a 24-órás mintavételezés esetében melyik az ideális mintavételi időpont, ugyanis ennek tükrében jelentős eltérés mutatkozhat a területek között. Itt nem csak a különböző mintavételek, hanem az egyes nyakörvek között is jelentős eltérés volt.

5 Következtetések

A napi megtett hosszak alapján végzett vizsgálataink megmutatták, hogy 99.6 %-os korrelációval lehetőség van a ritkább mintavételű adatokból előállítani az órás mintavételezés alapján számított napi megtett utakat. Az állatok napi mozgására jellemző 2-3 napos ciklust még a 24 órás adatokból is ki lehetett mutatni, de amennyiben ez a cél, akkor azért minimum 8 óránkénti pozíciót javasolunk.

A DDM bevonásával kimutattuk, hogy a napi megtett út, és a napi szintemelkedés között szoros a kapcsolat, így e miatt a DDM bevonása nem lenne indokolt. Ugyanakkor jelentős segítséget nyújthat ez a kiegészítő adat a hibás pontok kiszűréséhez, bár az automatikus úton történő, hatékony szűrési eljárás kidolgozása még további kutatásokat igényel.

A mozgáskörzet méretével kapcsolatos vizsgálataink alapján kijelenthető, hogy a minimum 12-óránkénti pozíció elegendő a mozgáskörzet meghatározásához. A napi 1 pozíció esetében azonban már jelentős eltérések mutatkozhatnak a mintavétel időpontja és az adott egyed függvényében.

A többnapos mintavételek esetében a mozgáskörzet nagysága csökken a ritkább mintavétellel, ugyanakkor az összefüggés nem túl szoros, gyakran mutatkoznak jelentős eltérések, az eredmények szórása nagy. Éppen ezért különösen körültekintően kell eljárni, amennyiben régebbi, ritkább és kevésbé megbízható rádiótelemetriás mérésekből származó mozgáskörzetekkel szeretnénk a jelenlegi adatokat összehasonlítani, ugyanakkor itt még további vizsgálatok is szükségesek a szimulált méréseken kívül tényleges mérések bevonásával.

Köszönetnyilvánítás. A kutatást részben az ERFARET program támogatta.

Hivatkozások

Beland JL, Follmann E (2002): Sampling considerations for American black and brown bear home range and habitat use. In Ursus 13, 299-315.

Dussault C, Courtois R, Ouellet JP, Huot J (1999): Evaluation of GPS telemetry collar performance for habitat studies in the boreal forest. In Wildlife Society Bulletin 27;4, 965-972.

Girard I, Ouellet JP, Courtois R, Dussault C, Breton L (2002): Effects of sampling effort based on GPS telemetry on home-range size estimations. In Journal of Wildlife Management 66;4, 1290-1300.

Kenward RE (1987): Wildlife Radio Tagging. Academic Press, London.

Király G, Náhlik A (2005): Szarvasok GPS telemetriás mérése és az adatok térinformatikai feldolgozása az élőhely-használat vizsgálatához. Geomatikai Közlemények VIII, 257-263.

Mills KJ, Patterson BR, Murray DL (2006): Performance of a GPS animal location system under boreal forest canopy. In Wildlife Society Bulletin 34;5, 1463-1469.

Mohr CO (1947): Table of equivalent populations of North American small mammals. American Midland Naturalist, 37; 1 223-249.

Pepin D, Adrados C, Mann C, Janeau G (2004): Assessing real daily distance traveled by ungulates using differential GPS locations. In Journal of Mammalogy 85;4, 774-780.

Rempel RS, Rodgers AR, Abraham KF (1995): Performance of a GPS animal location system under boreal forest canopy. In Journal of Wildlife Management 59; 3, 543-551.

Ryan PG, Petersen SL, Peters G, Gremillet D (2004): GPS tracking a marine predator: the effects of precision, resolution and sampling rate on foraging tracks of African Penguins. In Marine Biology 145; 2, 215-223.

Silverman BW (1986): Density estimation for statistics and data analysis. Chapman and Hall, London, UK.

Swain DL, Warkb T, Bishop-Hurleya GJ (2008): Using high fix rate GPS data to determine the relationships between fix rate, prediction errors and patch selection. In Ecological Modelling 212, 273-279.

Tremblay Y, Shaffer SA, Fowler SL, Kuhn CE, McDonald BI, Weise MJ, Bost CA, Weimerskirch H, Crocker DE, Goebel ME, Costa DR (2006): Interpolation of animal tracking data in a fluid environment. In Journal of Experimental Biology 209; 1, 128-140.

BUDAPESTI ASMI (ÁLLANDÓ SZÓRÓPONTÚ MŰHOLDRADAR INTERFEROMETRIA) ADATOK INTERNETES INFORMÁCIÓS RENDSZERÉNEK KIÉPÍTÉSE

*Oberle Zoltán**

Development of a web-based information system of the Persistent Scatterers Radar Interferometry (PS-InSAR) data base for Budapest *- Basic principles of the satellite radar interferometry (InSAR) technique, a state-of-the-art tool for local geokinematic studies, are summarized. The paper introduces the PS-InSAR data base for one of our areas under investigation. It is shown how the data base is built up step-by-step, and the future perspectives of its use from scientific, social and economic points of view are given.*

Keywords: PS-InSAR, radar interferometry, aperture synthesis, motion detection

A cikk röviden összefoglalja a mai lokális mozgásvizsgálati módszerek csúcsának számító InSAR rendszerek működési elveit. Ismerteti egy kutatási terület InSAR (PS-InSAR, ASMI) mérési adatai adatbázisba való rendezésének lépéseit, valamint részletezi az adatbázis további felhasználásának lehetőségeit tudományos, társadalmi és gazdasági szempontokból.

Kulcsszavak: ASMI, PS-InSAR, radar interferometria, apertúraszintézis, mozgásvizsgálat

1 Bevezetés

Az apertúra szintézisű műholdradar interferometria (*Synthetic Aperture Radar Interferometry, InSAR*) hazai bevezetését a Földmérési és Távérzékelési Intézet Kozmikus Geodéziai Obszervatóriuma (FÖMI-KGO) kezdeményezte 2000-ben a Magyar Űrkutatási Iroda támogatásával. Az MTA keretein belül a BME és a FÖMI-KGO 2007-ben közösen létrehozta a Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoportot, aminek egyik kutatási területe a műholdradar interferometria. A kutatócsoportban eltöltött időm nagy részét a módszerhez kapcsolódó automatizálási és feldolgozási problémák megoldásával töltöttem. A cikk második bekezdésében a teljesség igénye nélkül röviden ismertetem a módszer elméleti és technikai hátterét, a harmadikban bemutatom a rendelkezésünkre álló adatrendszert és a kiépített ASMI adatbázis felépítésének lépéseit, majd a negyedikben ismertetem az adatbázis felhasználásának további lehetőségeit.

2 InSAR

Az InSAR méréstechnika az 1990-es évek elejétől létező, az aktív mikrohullámú távérzékelési rendszerek közé sorolható módszer. Az InSAR technikának több válfaja létezik. Attól függően, hogy a radarrendszert repülőgépekre vagy műholdakra építik, beszélhetünk légi vagy műholdas radar interferometriáról. A cikk további részében az InSAR rövidítés alatt műholdas apertúra szintézisű radar interferometriát értünk. Az InSAR technikát tovább csoportosíthatjuk a radarképek feldolgozási módszerei szerint. DInSAR *(differenciális műholdradar interferometria)*: két radarkép pontjai közötti fázisdifferencia okozta interferenciát állítja elő. (Didier Massonnet, Kurt L. Feigl 1998) PS-InSAR *(állandó szórópontú műholdradar interferometria, ASMI)*: sok radarkép pontjai közötti fázisdifferencia okozta interferenciát állítja elő. (Ferretti et al. 2000, Ferretti et al. 2001, Werner et al. 2003) Az ASMI technikát alkalmazva példa nélküli felbontásban (akár 500-1000 pont/km^2) és nagy pontossággal (akár 0.1-0.2 mm/év) lehet vertikális sebességet meghatározni. A módszer óriási előnye, hogy egyedülálló módon a múltba lát, hiszen mozgásvizsgálatra is alkalmas felvételeket 1992-ben már készített az Európai Űrügynökség (European Space Agency, ESA) European Remote-Sensing Satellite (ERS-1) távérzékelési műholdja. A módszer nem igényel pontállandósítást, terepi méréseket. A módszer épp a sűrűn beépített területeken használható jól, szemben a többi hagyomá-

*MTA Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport, 1521 Budapest, Pf. 91
és FÖMI Kozmikus Geodéziai Obszervatóriuma, 1592 Budapest, Pf. 585
E-mail: z.oberle@gmail.com

nyos módszerrel, amelyek ilyen területeken csak bizonyos korlátozásokkal, vagy egyáltalán nem használhatóak. Az első üzembe helyezett műhold óta az InSAR technika rohamos fejlődésnek indult és széles körben elfogadottá vált. Az eredményeit a tudomány és a gazdaság sok területen hasznosítja, amit igazol az azóta pályára állított számos műholdradar rendszer.

2.1 Az InSAR alapjai

Ha egy tárgyat radarjelekkel pásztázunk, és rögzítjük a tárgyról visszaverődő jelek amplitúdóját és fázisát, akkor több méréssel (elegendő kettő is) megállapíthatjuk, hogy a tárgy közeledett, távolodott, vagy esetleg mozdulatlan volt a radarjelet kibocsátó tárgyhoz képest a vizsgált időtartamon belül. (Legalábbis abban az esetben, ha a tárgy radarirányú elmozdulása nem volt nagyobb a radarjel hullámhosszánál a vizsgálat ideje alatt, és az elmozdulás mértéke meghaladta a detektálható legkisebb elmozdulást.) Ezt könnyen megtehetjük, ha ismerjük a radarjel hullámhosszát, és a tárgyról visszaverődő jelek fázisát (radiánban), ugyanis ha az elsőként és az utolsóként rögzített fázisok különbségének értékét megszorozzuk a hullámhossz felével, akkor megkapjuk a tárgy radarirányú elmozdulásának nagyságát. Az amplitúdó nagyságának vizsgálatára azért van szükség, hogy el tudjuk dönteni, érkezett-e vissza feldolgozható mennyiségű jel a tárgyról. A visszavert jel erőssége (amplitúdója) nagyban függ a vizsgált tárgy geometriájától. A szóró objektumnak rendelkeznie kell megfelelő méretű olyan felülettel, ami a radar irányába veri vissza a ráeső jeleket. A reflektált jel nagysága függ a radar és a tárgy távolságától (a tárgyról visszavert jel nagysága és ugyanennek a jelnek a detektálás helyén vett nagysága fordított négyzetes összefüggésben van a radar-tárgy távolsággal), a tárgyra jellemző dielektromos állandótól (reflexiós képesség), a felület minőségétől (érdes felületek diffúz módón szórják a ráeső jeleket). A gyakorlatban természetesen számos egyéb fizikai és technikai akadálya van annak, hogy mekkora az a minimális visszavert jelnagyság, amit még detektálni tudunk. Tovább nehezíti mérésünket, hogy a radarjel többnyire valamilyen közegen halad át (esetünkben a légkörön), ami megváltoztathatja a terjedő jel fázisát, így rontva a mérésünk megbízhatóságát. A gyakorlatban nem egyetlen tárgyról, hanem nagyobb kiterjedésű, akár több száz négyzetkilométer nagyságú területekről készítenek radarfelvételeket. A detektált jeleket a radarműhold a komplex számábrázolási formában továbbítja a földi megfigyelő állomásokhoz, ahol azokat feldolgozzák és rögzítik. A földi megfigyelő állomásokon elkészített radarkép egy-egy pixeléhez rendelt amplitúdó a műhold által szolgáltatott komplex szám abszolút értéke, míg a fázis a képzetes rész és a valós rész hányadosának arcus tangense (vagy másképpen fogalmazva, a képzetes rész és a valós rész által bezárt szög). Az így elkészített radarképeket fedésbe hozva egymással (georeferálás, geokódolás), a fázisadataink segítségével elkészíthetjük a területet lefedő interferogramot. Itt az amplitúdóképeknek nagy szerepe van. Az interferogramból megállapíthatjuk a terület vertikális elmozdulásának nagyságát mm-es pontossággal. Ezt a mérési eljárást hívják műholdradar interferometriának. Fontos megjegyezni, hogy a műholdak nem a közvetlenül alattuk elhelyezkedő területet pásztázzák a rájuk jellemző nyílásszögű radarjelekkel, hanem jobbra, vagy balra tekintenek, ugyanis ha az alattuk lévő területet vizsgálnák, akkor nem lehetne eldönteni, hogy a visszaverődő jel pontosan honnan érkezik.

2.2 Felbontóképesség

A műholdradaroknak kétféle felbontóképessége definiálható: a radar haladási irányával megegyező (azimut), és a haladás irányára merőleges (range). A haladásra merőleges felbontását az alábbi egyszerű formula adja:

$$\Delta r_r = \frac{c \cdot \tau}{2 \cdot \sin \Theta} \ , \tag{1}$$

ahol c a vákuumbeli fénysebesség, τ a kibocsátott radarimpulzus időtartama, Θ pedig a radar oldalirányú látószöge. Látható, hogy a radar ilyen irányú felbontóképességét úgy lehet növelni, ha a radarimpulzusok idejét csökkentjük. Ennek azonban technikai akadályai vannak. Szokásos értékeket behelyettesítve, a pályára merőleges felbontóképességre körülbelül 440 m-t kapunk. Ahhoz, hogy a

felbontóképességet tovább növeljük, frekvenciamodulált radarimpulzusokat kell használnunk. Ha ezt tesszük, akkor a pályára merőleges felbontásra az alábbi összefüggést kapjuk:

$$\Delta r_r = \frac{c}{2 \cdot SZ \cdot \sin \Theta} \ , \tag{2}$$

Ahol *SZ* a kibocsátott radarimpulzus sávszélessége. Szokásos értékeket behelyettesítve, a felbontóképességre körülbelül 20 m-t kapunk, ami a gyakorlatban már elegendő. Az azimut irányú felbontást csak a radar iránykarakterisztikája befolyásolja. Az antenna elméleti azimut irányú felbontását az alábbi összefüggés adja:

$$\Delta r_A = \frac{\lambda}{L} R \ , \tag{3}$$

ahol λ a radarjel hullámhossza, *L* a radar iránykarakterisztikája (a mozgásiránnyal megegyező lineáris kiterjedése), *R* pedig a műhold repülési magassága. A képletből látszik, hogy felbontás növekedést csak a radar karakterisztikus méretének növelésével érhetünk el, ugyanis nem csökkenthetjük egy bizonyos érték alá sem a repülési magasságot, sem a radarjel hullámhosszát. A radar antenna méretét sem növelhetjük tetszés szerint, mert annak technikai és pénzügyi akadályai vannak. Ha a képletbe beírjuk a ma a világűrbe szállítható legnagyobb méretű antenna méretét, legkisebb repülési magasságot (ne felejtsük el, hogy a szóban forgó műholdak közel körpályán, napszinkron pályán keringenek a Föld körül) és a radarjel hullámhosszát, akkor az azimut irányú felbontóképességre körülbelül 14-16 km-t kapunk, ami nem megfelelő. Egy lehetséges megoldást a felbontás növelésére Graham (1974) javasolt. Megoldásának kulcsa, hogy a műhold mozgását kihasználva szimulálni lehet nagyobb iránykarakterisztikájú antennát. Az eljárás bonyolult számításokat és nagyon komoly számítástechnikai hátteret igényel. A radar azimut irányú felbontóképességét ezzel a módszerrel növelni lehet, tipikusan 20 m-es felbontásig. A Graham által javasolt eljárást nevezik apertúra szintézisnek, innen is a neve az egész eljárásnak: InSAR, azaz apertúra szintézisű radar interferometria.

3 Budapesti ASMI adatrendszer

A budapesti ASMI adatainkat az EU/ESA GMES Terrafirma projekt keretében kaptuk. 73 darab radarkép került feldolgozásra, amiket az ERS és ENVISAT műholdak rögzítetek, az elsőt 1995. május 6-án, az utolsót 2005. december 30-án (1. ábra). A feldolgozás eredményeként előállt a Budapest területét lefedő több mint 370 000 szórópont idősora.

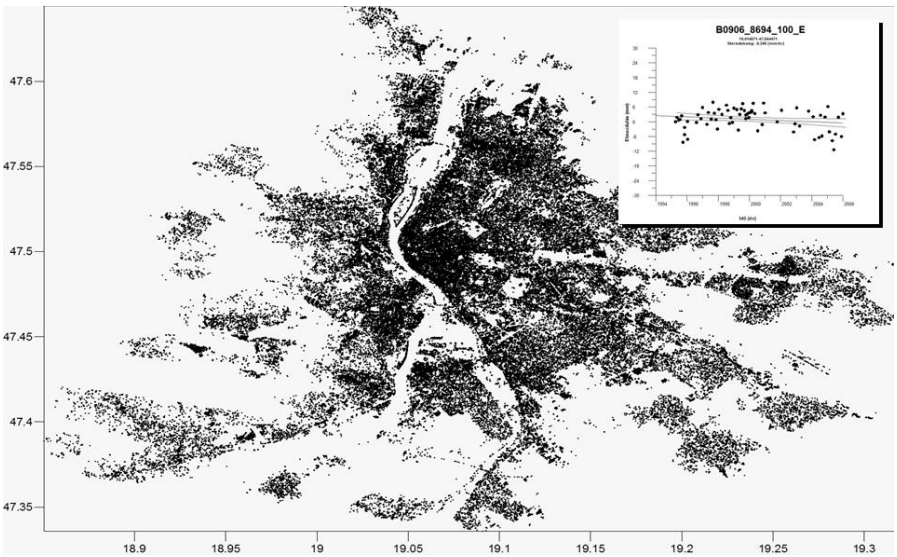
Az adatok felhasználásával Magyarországon elsőként a FÖMI-KGO munkatársai végezték el az ASMI pontosságvizsgálatát, szélső pontosságú GPS mérésekkel és földi szabatos szintezéssel (Grenerczy et al. 2008). A pontosságvizsgálathoz szükség van az ASMI mérési adatokra, az egyes szórópontok idősoraira illesztett egyenesek paramétereire és egyéb statisztikai adatokra. A korábbi, hagyományos szöveges formátumban tárolt adatrendszer nem tette lehetővé az adatok gyors grafikus megjelenítését. Ekkor merült fel a gondolata annak az automatikus ábrázoló programnak, ami képes az ASMI adatainkat megjeleníteni, az idősorra a legkisebb négyzetek módszerével egyenest illeszteni és az eredményeket elmenteni (2. ábra). Mindezt természetesen automatikusan kell végrehajtania, hiszen több mint 300 000 szórópont idősorán elvégezni a lineáris regressziót emberi beavatkozással nem hatékony. A program első verziója a kapott grafikonokat és illesztési eredményeket (meredekség, meredekség hibája, tengelymetszet, tengelymetszet hibája, szignifikanciaszint, elemszám és Student kvantilis) egy, a program által futás közben létrehozott könyvtárszerkezetbe mentette. Fontos szempont volt, hogy az elkészült grafikonok valamilyen vektoros formátumúak legyenek a tárolásukhoz szükséges tárhely csökkentése végett, ezért a program futása közben *gif* (Graphics Interchange Format) formátumra konvertálta a képeket *bmp* (Bitmap) formátumból mentés előtt. Ez a képformátum megmaradt a program későbbi változataiban is.

Az így kiépített adatrendszer azonban nem tette lehetővé az adatok gyors hozzáférését. Elkészült ugyan egy program, ami ebből az adatrendszerből kikeresi a megadott szórópont idősorát és az illesztések eredményeit, de a keresés időtartama eltarthatott akár 30 másodpercig is. A lassú keresés

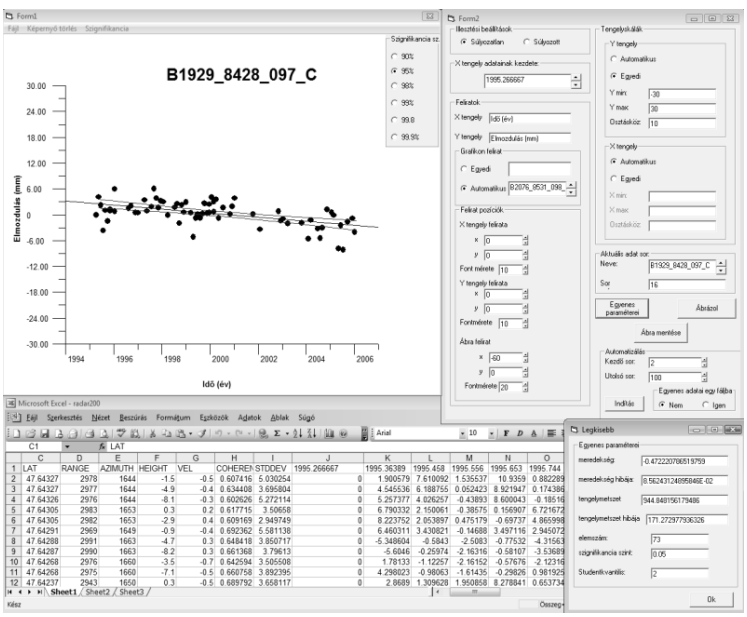
kiküszöbölése érdekében döntöttünk úgy, hogy adatainkat MySQL adatbázisba rendezzük. Az adatbázis segítségével a keresés időtartama a másodperc törtrészére csökkent.

A keresőprogram segítségével nem csak egyetlen szóródpont adatait kérhetjük le az adatbázisból, hanem egy szélesség-hosszúság koordinátákkal megadott, téglalap alakú területen megtalálható összes szóródpont grafikonját és illesztési eredményeit.

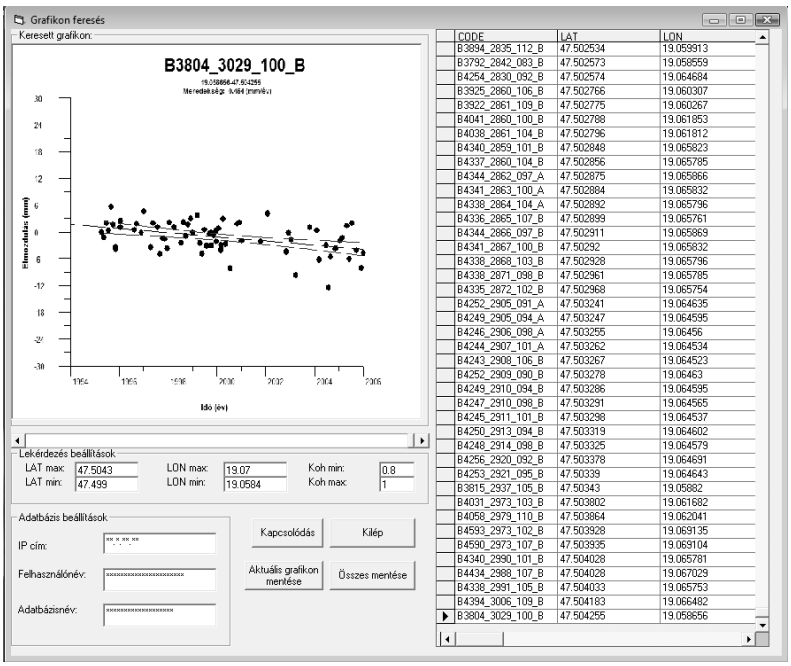
A program alkalmas a találatok szűkítésére koherencia szint szerint is. A keresés eredményei (egyenként, vagy automatikusan) a kiválasztott könyvtárba menthetők. Az eddig elkészült adatrendszer és keresőprogram már jelentős könnyítést jelentett a munkánkban, de grafikus keresést nem tett lehetővé (3. ábra).



1. ábra. Budapest több mint 370 000 radarszóródpontja és egy véletlenszerűen kiválasztott szóródpont elmozdulás adataira illesztett egyenest ábrázoló grafikon

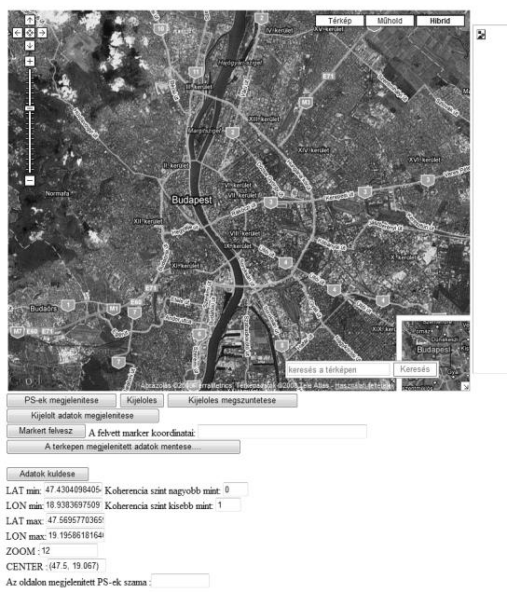


2. ábra. Az automata lineáris regressziót végrehajtó program egyik futási képe

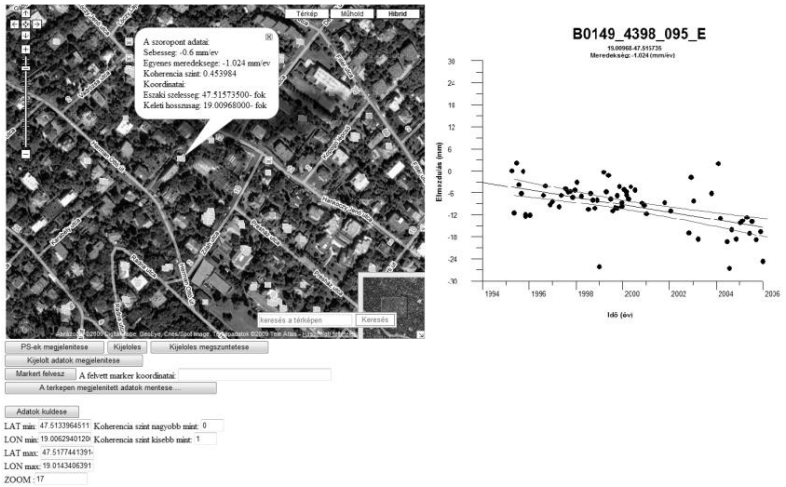


3. ábra. MySQL adatbázisban a keresést lehetővé tevő program egyik futási képe

A grafikus keresés megvalósításához a *Google Maps* nyújtott segítséget. A Google Maps nyilvános API (Application Programming Interface) hívásainak segítségével írtunk egy *php* (Hypertext Preprocessor) kódot, ami a Google Maps térképeken megjeleníti Budapest állandó szórópontjait. A megírt kód lehetővé teszi a szórópontok utca-házszám szerinti keresését és a találatok szűkítését koherencia szint szerint (4. ábra).



4. ábra. Az internetes információs rendszer nyitó oldala

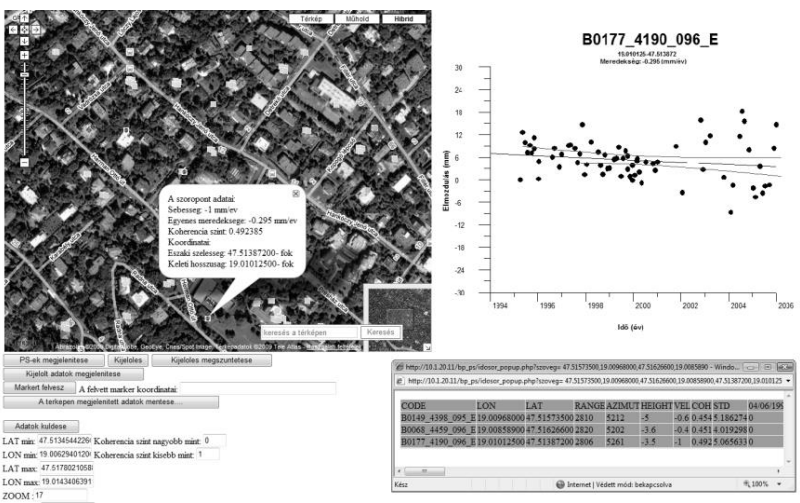


5. ábra. A megjelenített szórópontok és a kiválasztott pont idősorát ábrázoló grafikon

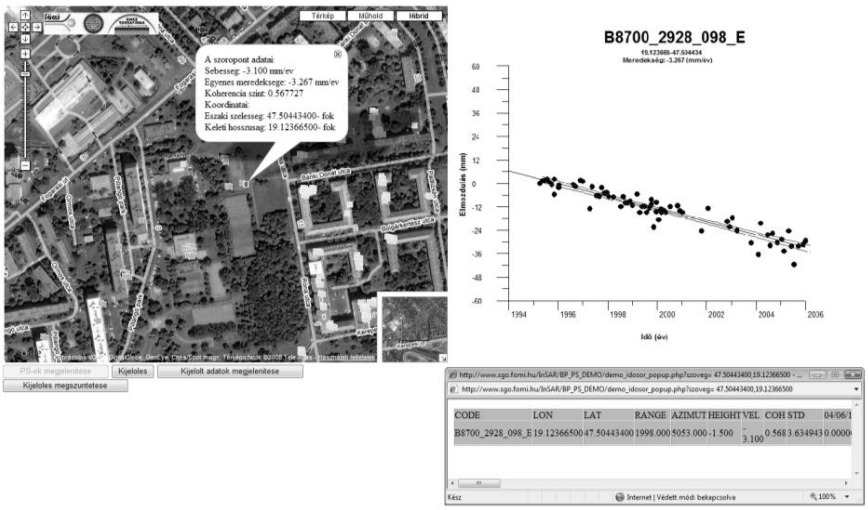
Ha az oldalon kiválasztottuk a vizsgált területet, akkor az *„Adatok küldése”* majd a *„PS-ek megjelenítése”* gomb lenyomása után sebességük szerint színkódolva jelennek meg a térképen az állandó szórópontokat jelölő ikonok. A szóróponthoz tartozó idősor és a fontosabb paramétereket megjelenítő almenü az ikonra való kattintás után automatikusan megjelenik (5. ábra).

A térképen megjeleníthetünk saját jelölő ikonokat is a *„Markert felvesz”* gomb lenyomása után. A felvett új markert az egér segítségével bárhova elhelyezhetjük a térképen. A felvett új marker koordinátái egy külön szövegdobozban jelennek meg fok egységben. Erre azért van szükség, hogy azokat a szórópontokat tudjuk egyszerűen megkeresni, amelyek egy bizonyos koordinátájú ponthoz legközelebb esnek (pl. GPS állomások, szintezési csapok). A rendszer lehetőséget ad több szórópont idősorának egyidejű kiválasztására. Ha egy kiválasztott szórópontra kattintunk a térképen, majd a megnyomjuk a *„Kijelölés”* gombot, akkor a szórópont ikonja megváltozik, jelezve a kijelölést. Több kijelölés után a *„Kijelölt adtok megjelenítése”* gomb lenyomásával megjeleníthetjük a szórópontok idősorainak pontos számszerű értékeit egy táblázatban (6. ábra).

A fentiekben bemutatott információs rendszer teljes egésze egyelőre nem érhető el mindenki számára, azonban készítettünk egy bemutató verziót, ahol a rendszer főbb részeit szabadon elérhetővé tettük (www.sgo.fomi.hu/InSAR/BP_PS_DEMO/bp_ps_demo.php – 7. ábra.) Az oldal megtekintéséhez Microsoft Internet Explorer szükséges.



6. ábra. A kijelölt szórópontok adatainak megjelenítése és az „aktív” kiválasztott pont idősorát ábrázoló grafikon



7. ábra. Az elkészített bemutató verzió egy lehetséges futási képe

4 Az adatrendszer hasznosítási lehetőségei

A budapesti ASMI információs rendszer kiépítésével hozzájárulhatunk a tudomány egyéb területein dolgozó szakemberek munkájához is, hiszen az így elérhető mozgásadatokat felhasználva geológusok, geofizikusok, mérnökök fontos információt kaphatnak Budapest felszínmozgás-történetéről. Az eredmények közzétételével biztosítótársaságok kockázatelemzéseket végezhetnek, nagyberuházók előzetes információkat gyűjthetnek a beépítendő területről, önkormányzatok a városfejlesztésnél és tervezésnél figyelembe vehetik a mozgások okozta nehézségeket, magánszemélyek tudhatják meg ingatlanaik elmozdulását, a műemlékvédelem időben felkészülhet a mozgások okozta károk enyhítésére, megelőzésére az adatok segítségével. A teljes adatbázis elérése még nem lehetséges. Ahhoz, hogy a rendszer teljes egészében elérhető legyen, tisztázni kell a felmerülő jogi és pénzügyi problémákat, ez azonban túlmutat a kutatócsoport feladatán és hatáskörén.

5 Összefoglalás

A cikkben röviden összefoglaltam az InSAR technika elméleti alapjait és bemutattam az egyik kutatási területünk ASMI adatainak adatbázisba rendezését, a folyamat lépéseit. Ismertettem az adatbázis további felhasználási lehetőségeit.

Hivatkozások

Didier Massonnet, Kurt L Feigl (1998): Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. Reviews of Geophysics, 36, 4 / November 441-500.

Ferretti A, Prati C, Rocca F (2000): Non-linear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing, 38, 5, 2202-2212.

Ferretti A, Prati C, Rocca F (2001) Permanent Scatterers in SAR Interferometry. IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, 39/1, 8-20.

Graham LC (1974): Synthetic interferometer radar for topographic mapping. Proc. IEEE,62,763-768.

Grenerczy Gy, Frey S, Virág G, Oberle Z (2008): Budapest műholdas mozgástérképe a PSInSAR/ASMI technika hazai bevezetése és ellenőrzése. Geodézia és Kartográfia, 60 (11), 3-9.

Werner C, Wegmüller U, Strozzi T, Wiesmann (2003): Multi-temporal interferometric point target analysis, in Analysis of Multi-temporal remote sensing images. Smits and Bruzzone (ed.), Series in remote Sensing, Vol.3, World Scientific (ISBN 981-238-915-61), pp. 136-144

AZ IDŐ KEZELÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI A HADTÖRTÉNETI GIS REKONSTRUKCIÓKBAN

Juhász Attila[*]

Managing the time issue in military historical GIS *– My research theme is the military historical reconstruction using GIS and remote sensing. I developed methodology which contains three well separated parts in the process, the period environment, the military object and the military event reconstruction. In connection with the third part I investigated the solutions of managing the time issue in GIS. I collected the widely known concepts developed to solve special problems; there is no general and comprehensive solution to manage time. For the geoinformatical analysis of military events I used the combination of several concepts.*

Keywords*: GIS, time, military historical reconstruction*

Az idő komplex kezelése a térinformációs rendszerekben még nem megoldott. Az ismert koncepciók valamilyen speciális probléma megoldására jöttek létre. Kutatómunkám során, melynek tárgya a hadtörténeti rekonstrukciók térinformatikai megvalósítása, az események modellezése kapcsán kerültem szembe az idő kezelésének problematikájával. Áttekintve a létező koncepciókat magállapítottam, hogy önmagában egyik sem alkalmas a hadtörténeti rekonstrukciók esetében, együttes használatukkal azonban már megvalósítható a folyamatok bemutatása.

Kulcsszavak: térinformatika, idő, hadtörténeti rekonstrukció

1 Bevezetés

Az utóbbi években a kutatási témám a hadtörténeti rekonstrukciók végrehajtása térinformatika és távérzékelés segítségével volt. A XIX-XX. századi, magyarországi hadtörténeti folyamatok és a hozzájuk kapcsolódó tábori erődítések vizsgálata során szerzett tapasztalatok alapján kidolgoztam egy általánosságban használható módszertant és egy adatgyűjtési stratégiát, technológiai sort a hadtörténeti jellegű GIS adatrendszerek kialakításához (Juhász 2004). A rekonstrukciót három lépésre bontottam: a korabeli környezet, az erődítési objektumok és a hadtörténeti események rekonstrukciója. Ez utóbbi lépés esetében szükséges volt az időtényező figyelembe vételére is. Megvizsgálva a legismertebb koncepciókat az idő kezelésére a térinformatikában megállapítottam, hogy önmagában egyik sem oldja meg a hadtörténeti rekonstrukciók során fellépő problémákat. Több koncepció együttes alkalmazása azonban már megoldásra vezethet, megfelelve ennek a tudományos határterületet érintő feladat elvárásainak.

2 Az idő kezelésének lehetőségei a GIS-ben

Egy térkép a valóság egyetlen időpontjáról készített pillanatfelvétel. Sok feladat esetében, azonban egy adott időpontban fennálló állapot vizsgálata kevésnek bizonyulhat. A környezetünkben zajló vagy a múltban történt folyamatok megismerése sokszor nagyobb időintervallumban, több egymást követő állapot rögzítését követeli meg (Halls és Miller: Of todes and worms: An Experiment in bringing Time to Arcinfo, http://gis2.esri.com/library/userconf/europroc96/PAPERS/PN35 /PN35F .HTM). Az elemzést ekkor az egymást követő időpontokban készített térképek összehasonlítása jelentheti, de egyes folyamatok valósághű modellezéséhez, ez a módszer is alkalmatlannak bizonyulhat. A térképekhez hasonlóan, a térinformációs rendszereknél is problémát jelent a változások követése. Az időbeli folyamatok feldolgozásához a térinformációs rendszerek két fő komponensét, a helyzeti és az attribútum információkat ki kell egészíteni az idővel. A feladattól függően általában az egyik komponens meg van kötve, egy másik kontrollált (egy értéktartományban mozog) és csak a

[*]*BME Fotogrammetria és Térinformatika Tsz., 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.*
E-mail: atjuhasz@eik.bme.hu

harmadik komponens kerül meghatározásra. Az 1. táblázatban néhány jellemző példa látható a három komponens egyes alkalmazásokban betöltött szerepének függvényében.

Az idő, mint a negyedik dimenzió kezelésére több módszer is kialakult a térinformációs adatbázisok keretein belül. Elsőként érdemes tisztázni azokat a korlátokat, melyek sokszor alkalmatlanná teszik a hagyományos GIS adatbázisokat az idő kezelésére és a változások szemléltetésére:

1. T_0 időponthoz egy állapotkép tartozik és T_1 időponthoz egy újabb állapotképet rendelünk hozzá, ami tartalmazza a változásokat és a változatlan adatokat is, így a többszörös tárolás egy idő után kezelhetetlenné teheti az adatbázis.
2. Logikusnak tűnik az állapotképeknek adott, szabályos időközönkénti készítése. Azonban előfordulhat, hogy egy részfolyamat két egymást követő állapotkép felvételi időpontja között zajlik le. Az ilyen folyamatok nem jelennek meg az adatbázisban.
3. Sokszor csak az állapotok és nem a változások jelennek meg.

A fenti korlátokat figyelembe véve a szakirodalom, alapvetően a funkcióik alapján megkülönböztet időbeli (temporal), és hagyományos (atemporal) adatbázisokat. E funkciók Langran (1993) alapján:

Adatnyilvántartás: A vizsgált területet teljes egészében leíró jellemzők tárolását jelenti, térbeli vagy időbeli problémák megoldására, ahol kötött az idő, illetve a helyszín. A térbeli rendszerek kevésbé alkalmasak időbeli folyamatok vizsgálatára, és fordítva. A tér és az idő együttes kezelése komplex feladat, amire nincsen még kiforrott módszer.

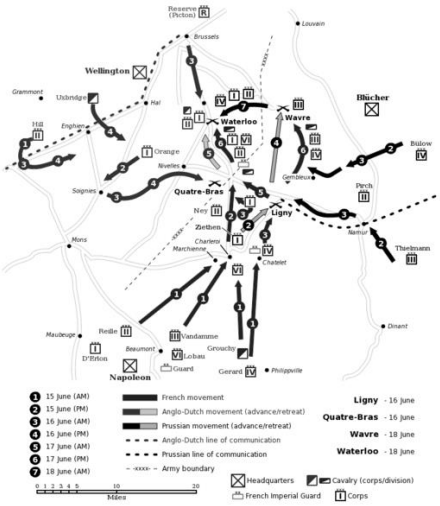
Adatelemzés: A nyilvántartási funkció már önmagában megoldás néhány problémára, de különböző elemzések is végrehajthatók. Az időbeli GIS rendszerek lehetővé teszik, hogy a földrajzi adatokat a helyszín és az idő megkötése nélkül vizsgáljuk. Ez viszont az attribútum adatok megkötésével jár. Megértve egy vizsgált folyamat változásait, lehetőség van szcenáriók készítésére is.

Adatfrissítés: Ezzel kapcsolatban két alapvető GIS adatbázis típus létezik. Az „ad hoc" jellegű adatbázisok egyedi feladatok kapcsán jönnek létre és a probléma megoldása után lezártnak tekinthetők. A „permanens" adatbázisok folyamatos működés mellett újabb és újabb információkkal és a hozzájuk tartozó műveletekkel egészülnek ki. Különbség van a hagyományos és az időbeli GIS adatbázisok között a frissítések módozataiban is. Hagyományos esetben a régi információt törlik vagy felülírják (navigációs rendszerek), az időbeli GIS-ben pedig az új adatok helyettesítik a régieket, azok megőrzése mellett (banki tranzakciók). A szakirodalom szerint az adatfrissítések ráfordításai egy GIS teljes élettartama alatt elérhetik az eredeti adatgyűjtés ráfordításainak 80 %-át is.

Adatminőség: A logikailag konzisztencia, az eredet, a teljesség, a geometriai és az attribútum pontosság vizsgálatát jelenti. Az időbeli topológia, mint strukturális kényszer úgy jelenik meg, hogy egy adott entitásnak csak egyetlen megelőző és csak egyetlen következő verziója lehet. Érdemes kiemelni még az aktualitást, amely önmagában is időbeli információt hordoz, így befolyásolva a többi tényezőt is. Az aktualitás biztosítása nehéz feladat, mert a különböző objektumok változásának mértéke különböző lehet (Detrekői és Szabó 2004). A múlt eseményeinek rekonstrukciója esetében azonban az aktualitást érdemes megvizsgálni, mivel ezekben az alkalmazásokban már befejeződött, lezárult folyamatokat elemzünk. A rekonstrukció aktuális feldolgozottsági szintje nem azonos a hagyományos aktualitás fogalommal (5. fejezet).

1. táblázat. Földrajzi adatok megjelenítése Langran (1993) alapján

Alkalmazás	Megkötött	Kontrollált	Meghatározandó
Talajtani adatok	Idő	Attribútum	Hely
Topográfiai térképek	Idő	Attribútum	Hely
Népesség adatok	Idő	Hely	Attribútum
Képi adatok	Idő	Hely	Attribútum
Időjárási adatok	Hely	Idő	Attribútum
Árvízi adatok	Hely	Idő	Attribútum
Légügyi menetrend	Hely	Attribútum	Idő
Mozgó objektumok	Attribútum	Hely	Idő
Mozgó objektumok	Attribútum	Idő	Hely



1. ábra. Tematikus szimbólumok használata statikus térképeken (http://en.wikipedia.org/wiki/Battle_of_Waterloo).

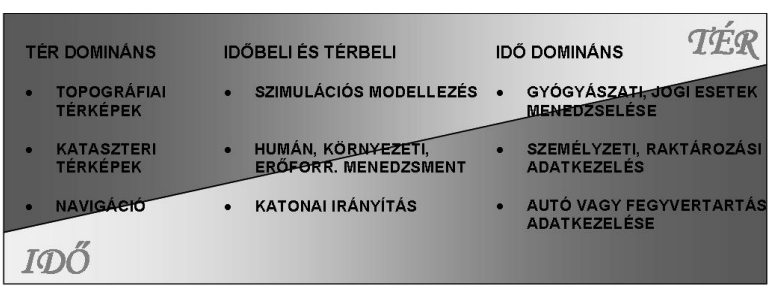
Adatmegjelenítés: Négy fő technikája:

1. Időszekvenciák, idősorok alkalmazása
2. Az adatok grafikus, illetve szöveges módosítása, kiegészítése
3. Statikus térkép, események, időpontok tematikus szimbólumaival (1. ábra)
4. Animáció alkalmazása (2. ábra)

Az időbeli GIS adatbázisokban azonos jelentőséggel bírnak a helyzeti, az attribútum és az idő komponensek, de más-más hangsúllyal szerepelnek a megoldandó probléma függvényében. Különösen igaz ez a tér és az idő tekintetében. A különböző alkalmazásokat Langran (1993) szerint három alosztályba sorolhatjuk: tér-domináns, idő-domináns, idő és térbeli alkalmazások (3. ábra).
A tér-domináns alkalmazások a jelen idejű állapotok minél pontosabb ábrázolására törekednek és a



2. ábra. Animált állapotképek (http://www.bbc.co.uk/religion/tools/civilisations/index.shtml).



3. ábra. Tér-idő dominancia a különböző alkalmazásokban.

segítségükkel végrehajtható műveletek döntően térbeli vonatkozásúak (pl. topográfiai térkép). A múlt idő, tulajdonképpen régi térképek formájában jelenik meg. A jövő idő kérdésével kapcsolatban, pedig a navigációt érdemes megemlíteni, ahol megjelennek olyan várható változások, tippek, amelyeket tekinthetünk a jövőre vonatkozó információknak, a jelen időbe ágyazva. Összességében tehát nem mondhatjuk, hogy ezek az alkalmazások teljesen nélkülöznék az időbeliséget.

Az idő-domináns alkalmazásokkal kapcsolatban a szakirodalom a különböző egészségügyi vagy személyzeti adatbázisokat említi példaként, melyek alapvetően tényleg nélkülözik a térbeli információkat, azonban előfordulhatnak olyan elemzési szempontok, amelyeknél a helyzeti információk is fontosak. Például a lakosság egészségügyi állapotának és a lakhelynek a kapcsolata.

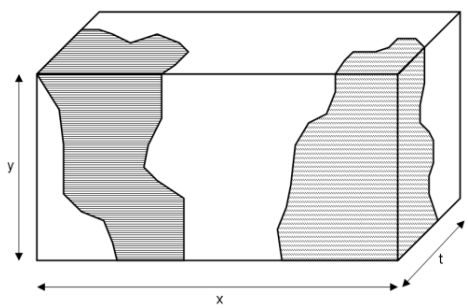
Az időbeli és térbeli alkalmazások nem részesítik előnyben egyik komponenst sem. Az ilyen adatbázisoknak mindkét kritérium szerint folyamatosnak kell lenniük. Példaként a különböző földhasználati, felszínborítottsági térképeket, „real time" szenzorokból származó adatok feldolgozását, vagy a környezeti vizsgálatokat lehet megemlíteni.

Mivel napjainkig még nem létezik egy mindenki által elfogadott, időbeli adatbázisok létrehozására kidolgozott egységes modell, ezért a következőkben röviden áttekintem a legjellemzőbb koncepciókat.

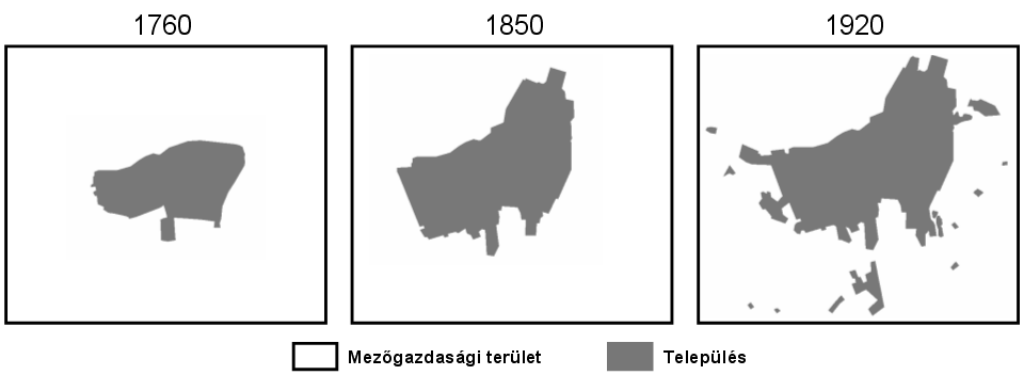
3 Koncepciók az idő térinformációs rendszerekben történő kezelésére

Tér-idő kocka: Két térbeli dimenzióban történő folyamatokat ábrázolja az idő függvényében. Az információ kinyerése egy referencia pont, egy vektor, egy metszet vagy egy kisebb kocka kijelölésével történhet (4. ábra).

Szekvenciális állapotképek: Adott időpillanatokban készített állapotképek sorozata. A hagyományos térképészet jelenti a gyökereit, és hasonlít a lepergő filmkockákra is, azonban ebből a megoldásból hiányzik a változások megjelenítése. T_i időpontokhoz tartozó állapotokat jelenít meg és nem változásokat, így két különböző időpontbeli állapot közötti különbség meghatározása nehézkes. Két legfőbb hátránya, a rejtett struktúra és a redundáns adattárolás (5. ábra).



4. ábra. Tér-idő kocka.

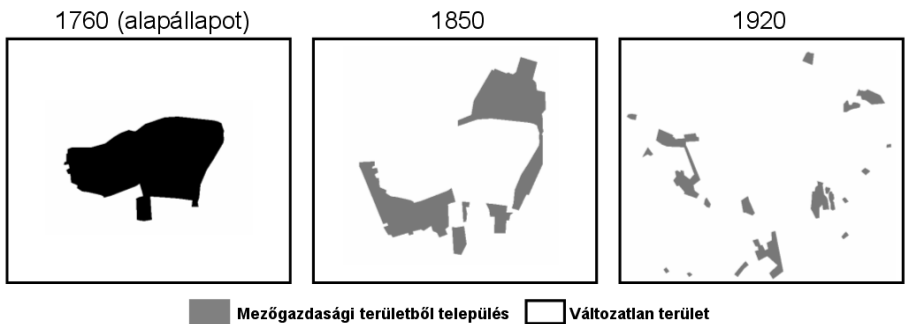


5. ábra. Kunmadaras fejlődése szekvenciális állapotképeken.

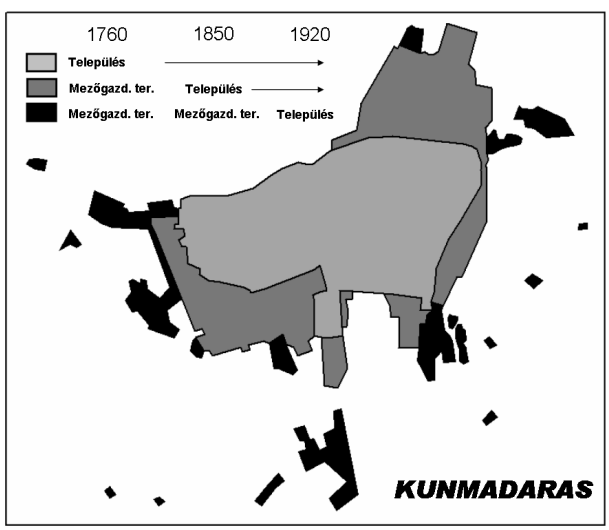
Alapállapot módosításokkal: A koncepció állapotképek sorozatát jelenti, kiemelve a különböző időpontok közötti változásokat. Előnye, hogy az egyes időpontokhoz kapcsolódóan nem szükséges a teljes vizsgálati terület objektumait tárolni, hanem csak a változásokat. A változások típusa, időzítése, illetve sorrendje jelenti az időbeliség tulajdonképpeni lényegét, ezért ezeknek az adatoknak a tárolása jóval logikusabbnak tűnik, mint a szekvenciális állapotsorok használata. E megoldás további előnyei a nyilvánvalóan időbeli adatstruktúra és a minimális redundancia (6. ábra).

Tér-idő kompozit: Ez a megoldás az „Alapállapot módosításokkal" koncepcióból indul ki és további – különösen adattárolási – célokat valósít meg. Az egyes entitások jellemezhetők a teljes „történetükkel", azaz attribútum típusú adatokkal. Egy tér-idő kompozit generálása egy időbeli állapotsorból a három dimenzió kettőre történő redukálását jelenti, ami lehetőséget teremt a térbeli komponens kezelésére az idő kizárásával, illetve az idő kezelésére a helyzeti információk nélkülözésével. A koncepció legfőbb hátránya, hogy egy idő után a kompozitban egyre növekvő számú és egyre kisebb területű entitásokat kell ábrázolni, így csak viszonylag kis terület és kis időintervallum esetén alkalmazható hatékonyan (7. ábra).

Mindegyik koncepció esetében talán a legfontosabb kérdés a T_i időpontok helyes megválasztása, azaz a megfelelő időintervallumok kijelölése. Minden szaktudományban alapvető jelentőségű az adatnyerés, amely a technika mai színvonalán digitális adatnyerést vagy mintavételezést jelent. A mintavételezés folyamatának megértése nagy jelentőségű, mivel az adatokból levonható következtetések függhetnek a mintavételezés módjától (Elek 2004). Ezen kívül érdemes megállapítani a vizsgált folyamat várható teljes időtartamát, ha az nem ismert, mert így meghatározható a felhasználandó állapotképek darabszáma (Langran 1993). E tekintetben két alapvető lehetőség van.



6. ábra. Kunmadaras fejlődése az „Alapállapot módosításokkal" koncepcióban.



7. ábra. Kunmadaras fejlődése tér-idő kompoziton.

Ha eredendően csak néhány darab állapotkép áll rendelkezésre, akkor nincs sok választásunk, hiszen az intervallumok ez esetben adottak, ha azonban állapotképek nagyobb sorozata áll rendelkezésre, akkor mi dönthetjük el, hogy milyen intervallumokat választunk. Érdemes körültekintően megválasztani ezeket az értékeket a következő szempontok figyelembe vételével:

1. Szabályos időközöket választva könnyebb lesz a folyamatok és változások értelmezése.
2. Feltétlenül figyelembe kell venni a vizsgált folyamat változásainak sebességét:
    a. Lassú változásoknál nagy időintervallumok használata célszerű, azonban túl nagy intervallumok esetén kimaradhatnak a vizsgálatból egyes részfolyamatok, és érzékelhetetlenné válhat, hogy mikor történnek a döntő változások.
    b. Gyors változásoknál a kis intervallumok jelentik a megoldást. Ez esetben az adathalmaz nagyságának drasztikus növekedése jelentheti a problémát.

Ideális esetben ismert az időbeli folyamat időtartama, gyorsasága és elegendő adat áll rendelkezésre a mintavételezési időintervallumok meghatározásához. Ilyen folyamatok vizsgálatakor a mintavételezés periódusának meghatározására, a szakirodalom a Nyquist-feltételt említi (Detrekői 1991). A 8. ábra a mintavételezés folyamatát mutatja be, ahol *x(t)* az időben lejátszódó folyamatot és *m(t)* a mintavételezést jelöli. Az u_h határfrekvencia és a τ mintavételi távolság segítségével a Nyquist-feltétel:

$$\tau \leq \frac{1}{2u_h}, \tag{1}$$

amely szerint az előforduló legnagyobb frekvencia minden periódusára legalább két mintavételi helynek kell esnie.

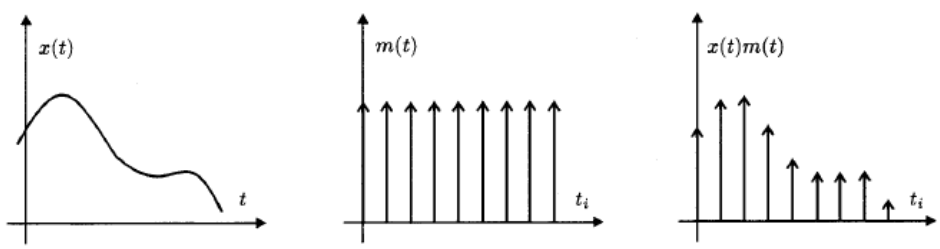
Összefoglalva az idő kezelésének lehetőségeit a térinformációs adatrendszerekben, kijelenthetjük, hogy még nincs kikristályosodott, általánosnak tekinthető megoldás erre a problémára. Döntően adat és feladat specifikus megoldások ismertek előnyeikkel, hátrányaikkal. A legfontosabb kérdések egy kialakítandó adatrendszer esetében, hogy:

1. az objektumok két vagy három dimenziósak-e
2. van-e összefüggés az egymást követő vizsgált időpontokban az objektumok között
3. milyen sűrűségben állnak rendelkezésre az adatsorok.

4 Az események megjelenítése a hadtörténeti rekonstrukcióban

A hadtörténeti folyamatok térinformatikai feldolgozása során az idő kezelésének kérdése kiemelt jelentőséggel bír, hiszen e nélkül az események vizsgálata és megjelenítése nem lehetséges. Azonban több ok miatt közvetlenül nem használható egyetlen ismert koncepció sem. Az alábbiakban összefoglalom azokat a sajátosságokat, melyeket figyelembe kell venni, az ilyen típusú térinformációs rendszer kialakításakor.

A hadtörténeti események vizsgálatát két fő irányból érdemes megközelíteni. Elsőként az időtartamot, majd a mintavételezés módját kell meghatározni. Az időtartamok általában ismertek - hiszen a múltban befejeződött eseményekről van szó - és nagyon változatos képet mutatnak: a középkori néhány órás csatáktól, az évekig tartó újkori háborúkig. Hagyományos adatrendszerek esetében a vizsgált folyamat időtartama az egyik legfőbb szempont az időintervallumok kiválasztásában.



8. ábra. A mintavételezés folyamata.

Hadtörténeti rekonstrukció végrehajtásakor az időtartam mellett figyelembe kell vennünk, hogy milyen források állnak a rendelkezésünkre. Ha csak néhány időpontbeli állapotról van információ, akkor ezeket kell, hogy felhasználjuk és ezzel egyszersmind az intervallumokat is definiáltuk. Ha azonban az információk egy nagyobb idősorozathoz kötődnek, akkor van lehetőségünk a megfelelő intervallumok kiválasztására. Nem kapcsolódik szorosan az időhöz, de érdemes azzal is foglalkozni, hogy milyen szinten ábrázoljuk a hadtörténeti eseményeket az alakulatok szempontjából, különösen a modernkori háborúk esetén. Az adatbázis részletességét az alakulatok tekintetében is a források határozzák meg és előfordul, hogy csak részletinformációink vannak a harcoló felek alakulatairól, vagy csak egy szintig jól dokumentáltak. Véleményem szerint, az adatbázisnak az alakulatok szempontjából tartalmaznia kell minden fellelhető információt.

Az adatmegjelenítés technikáit áttekintve felmerül néhány speciális kérdés a GIS hadtörténeti alkalmazások esetében. A feladat az alakulatok, az arcvonalak adott időpontbeli elhelyezkedésének és mozgásainak megjelenítése. Előbbi egyszerűbb, hiszen általában egy alakulat egy időben csak egy pozícióban van és ezt különböző alakulatjelekkel ábrázolni lehet. Az arcvonalak tekintetében a vonalas és a felületszerű ábrázolás is szóba jöhet a feldolgozott terület nagysága és az események vizsgálatának mélysége függvényében. A felületi ábrázolás áttekintő jellegű, míg a részletes (pl. napi szint) elemzéshez a vonalszerűen ábrázolás szükséges. Az arcvonalak változása az időben, már önmagában elég informatív, ezt azonban a hagyományos térképekhez hasonlóan érdemes kiegészíteni a mozgásokat jelentő nyilakkal, tematikus szimbólumokkal (9. ábra).

Összességében látható, hogy a hadtörténeti események rekonstruálásához egyfajta vegyes koncepciót kell megvalósítani. Az adatbázisnak tartalmaznia kell:

1. A fontos időpontokat a megfelelő objektumok attribútumaként.
2. Az időintervallumoknak és alakulatok szintjének megfelelő részletességű rétegeket.
3. A domináns változásokat bemutató áttekintő jellegű és részletességű rétegeket.
4. Lehetőség szerint animációkat, a minél szemléletesebb megjelenítés miatt.

A második és harmadik kritérium azt jelenti, hogy bizonyos eseményekhez kapcsolódóan regionális és lokális megjelenítésre is szükség van, különböző rétegeken, eltérő méretarányú és más jelkulcsi beállításokkal rendelkező objektumokkal. A már említett GIS funkciók a hadtörténeti rekonstrukciók szempontjából megközelítve:

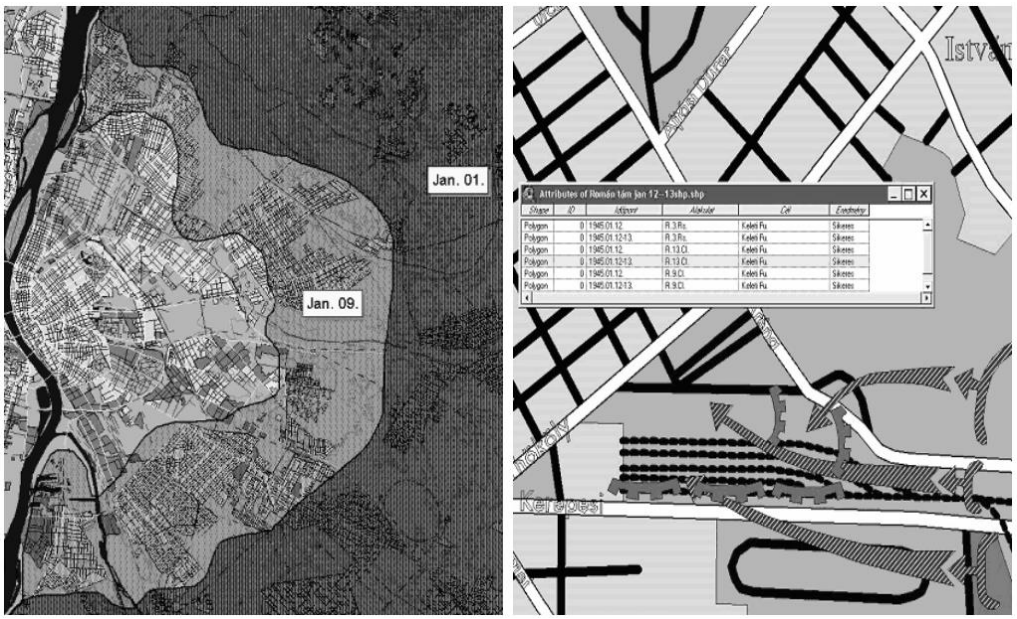
Adatnyilvántartás: A hadtörténeti térinformációs rendszerek egyik legfőbb funkciója, hiszen a különböző információk egységes keretek közötti nyilvántartása már önmagában komoly eredmény. Az időtényező a nyilvántartásban alapvetően attribútumként jelenik meg. Az objektum rekonstrukciónál, az egyes erődítéselemek építésének különböző időpontjait, az események nyilvántartását kezdő és befejező időpontokkal rögzítve lehet így tárolni.

Adatelemzés: A rekonstrukció egy lezárult eseménysort vizsgál, így az elemzések tárgyát a folyamaton belüli mozzanatok, résztvevők pozíciójának változása jelenti. A jellemző időpontok attribútumként történő tárolása mellett célravezetőbbnek tűnik a kiválasztott időpontokhoz állapotképek rendelése és összehasonlítása. Az alakulatok túl részletes feldolgozása nagy mennyiségű felesleges információ tárolásához vezethet.

Adatfrissítés: A hadtörténeti rekonstrukciót az „ad hoc" adatbázisok közé sorolhatjuk. A frissítésről olyan értelemben beszélhetünk, hogy az eredetileg ismert adatok alapján végrehajtott rekonstrukció befejezése után új információkhoz jutunk, de ez inkább a teljesség szempontjából lehet fontos.

Adatminőség: A hagyományos és a hadtörténeti alkalmazások között az aktualitás kérdésében mutatkozik eltérés. A befejeződött eseményeket vizsgálata miatt az aktualitás fogalma átértékelődik (5. fejezet). A további jellemzők közül érdemes kihangsúlyozni a teljességet, a topológiát.

Adatmegjelenítés: A nyilvántartás mellett a legfajsúlyosabb funkció, hiszen a felhasználó elsődlegesen a képi megjelenítésen keresztül ismerheti meg a folyamatokat. Az események rekonstruálása csak a korabeli környezeti állapotokat és a kapcsolódó erődítéseket is ábrázoló keretek között lehetséges. Az eseményeknek áttekinthetően, plasztikusan megjelenítve, a legfontosabb attribútumokkal együtt kell rendelkezésre állniuk.

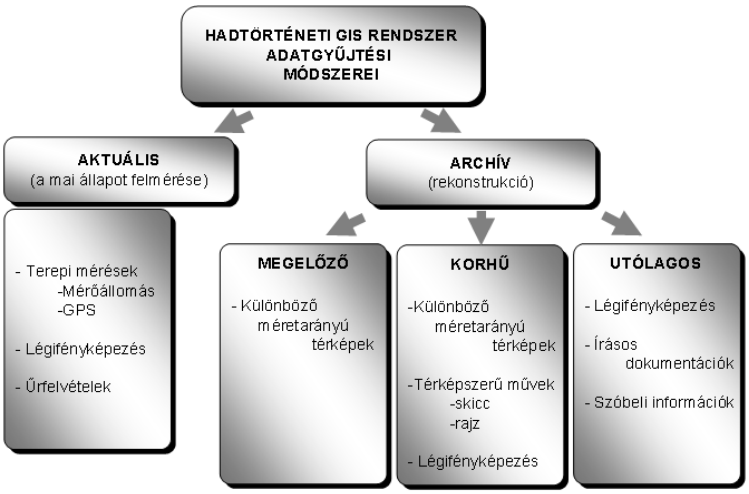


9. ábra. Hadtörténeti események a GIS adatbázisban.

A korábbiakban (2. fejezet) említett digitális megjelenítési technikák az animáció kivételével nem jelentenek igazán nagy áttörést az analóg megoldásokhoz képest, hiszen a térképeken használt szimbólumrendszer digitalizálása jelenti a legkézenfekvőbb megoldást. Az alakulatokat pontszerű szimbólumokkal, az arcvonalakat lineáris objektumokkal, a csapatok mozgását nyilak segítségével ábrázoljuk. Az animációk csatolásával a kiválasztott eseményt folyamatában mutathatjuk be, ami informatívabb a statikus ábrázolásnál. Térbeli elemzések, lekérdezések végrehajtására azonban nem alkalmas ez a technika.

5 Az aktualitás és a korhűség kérdése a rekonstrukcióban

A GIS hadtörténeti célú felhasználásakor befejeződött eseményekre fókuszálunk, ellentétben az általános alkalmazásokkal. Ez megköveteli a térinformatika adatgyűjtési eljárásainak ebből a szempontból történő megközelítését, csoportosítását. A rekonstrukció térinformatikai környezetben történik, ezért az elsődlegesen geometriai és attribútum jellegű adatgyűjtési eljárásokat különválasztjuk. A csoportokon belüli elsődleges és másodlagos eljárásokat szintén megkülönböztetjük. Ez a csoportosítás alapvetően a módszerek technológiai megközelítéséből adódik, a közvetlen vagy közvetett információgyűjtésből. E hagyományos csoportosítás mellett szükségesnek tartom az adatforrások időbeliség és aktualitás szerinti vizsgálatát is, mely szerint az eljárásokat két nagy csoportra oszthatjuk: aktuális és archív adatforrások. A csoportok definíciója mellett azonban már nem ilyen egyszerű a belőlük származó adatok csoportosítása. A ma is zajló folyamatok esetében, egy adat akkor aktuális, ha az adatgyűjtés óta nem következett be változás az objektum geometriájában vagy attribútumaiban. Egy múltbéli hadtörténeti folyamatnál azonban már nem érvényes ez a definíció, mert nagy valószínűséggel a lezajlott folyamat után mind a környezeti elemek, mind az erődítési objektumok megváltoztak. Az ilyen vizsgálatok során az archív adatforrásokból származó információk jelentik az aktualitást, a korabeli valós állapotot, amit kiegészíthet az erődítések mai állapotának felmérése. A hagyományos megközelítés így kissé összezavarja az „aktuális" és „archív" fogalmakat. Érdemes új megnevezéseket bevezetni ezeknek az alapvetően archív adatforrásoknak a csoportosítására (10. ábra). Három csoportba tagoltam az eljárásokat: a hadtörténeti eseményt *megelőző*, a folyamat időszakában készült *korhű,* és a kérdéses időszakot követő *utólagos adatforrásokra*. Ritkán fordul elő, hogy mindhárom típusú forrás a rendelkezésre áll, különösen a gyors lefolyású

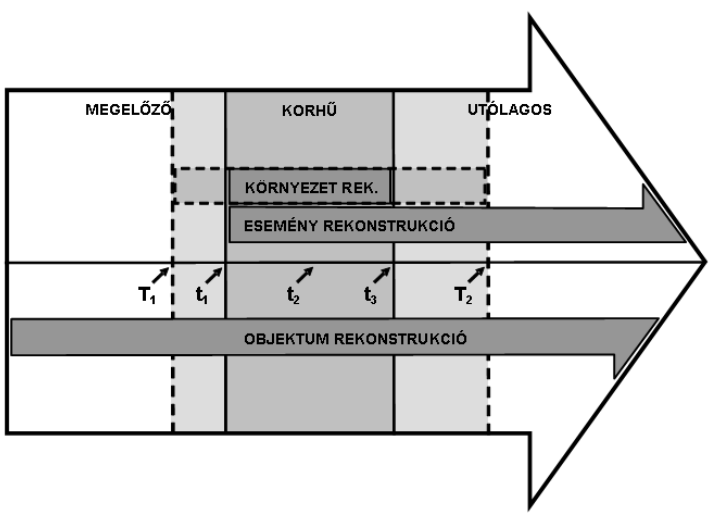


10. ábra. Adatgyűjtési módszerek csoportosítása az időbeliség és az aktualitás alapján.

folyamatok esetében, így jellemzően utólagos információkat kell felhasználnunk. Az alábbiakban a hadtörténeti rekonstrukció három fő lépésének jellemző adatgyűjtési eljárását közlöm.

Környezet rekonstrukció. A hadtörténeti folyamatok időbeli lefolyása változatos képet mutat a különböző történelmi korokban, de az események környezete állandónak tekinthető. Azaz, akár egy időponthoz (t_2) is köthetjük ezt az állapotot (11. ábra). Szerencsés esetben rendelkezésre állnak olyan korhű források, amelyek a vizsgált folyamat időszakában készültek, ilyenkor ezeknek az adatoknak a feldolgozása jelenti a környezteti rekonstrukciót. Sokszor azonban csak megelőző vagy utólagos információkkal rendelkezünk. Ilyenkor a legfontosabb minőségi szempont, hogy milyen időtávolságban készült a forrás a vizsgált folyamathoz képest és előtte vagy utána.

Az objektum rekonstrukciónál mindhárom forráscsoport felhasználható. A topográfiai térképek általában a nagyobb kiterjedésű erődítésrendszerek előzetes azonosításában nyújtanak segítséget, míg a korhű katonai térképvázlatok részletesebb adatokat tartalmaznak. Fontos információk nyerhetők az utólagos csoportba tartozó légi fényképekből és űrfelvételekből. Az archív légi fényképek nem csak a készítéskor fennálló állapotokról, hanem korábban létrehozott objektumokról is tartal-



11. ábra. A rekonstrukció lépéseinek, az adatforrások csoportjainak és az időnek a viszonya.

maznak információkat. Utólagos források az archív írásos (könyvtári, levéltári, térképtári) dokumentációk, melyek többségét attribútum forrásként tudjuk felhasználni, valamint a szóbeli információk (kutatók, események résztvevőinek, szemtanúinak visszaemlékezései, memoárjai).
Az események rekonstruálása esetében *megelőző* adatforrásokról nem beszélhetünk. A *korhű* információk közül a katonai térképvázlatok, míg az *utólagos* források szinte teljes tárháza használható.

Eddig azzal a feltételezéssel éltem, hogy a vizsgált hadtörténeti folyamattal kapcsolatban minden típusú adatforrás a rendelkezésre áll. A gyakorlatban, azonban az időben visszafelé haladva a rendelkezésre álló információk mennyisége és minősége is nagyságrendekkel romolhat. A 11. ábrából kiindulva a rekonstruált folyamat lehet gyors (t_2), vagy lassú ($t_1 \rightarrow t_3$) lefolyású. Ebben az esetben:

1. A megelőző adatforrások t_1 időpont előtt
2. A korhű adatforrások t_1 és t_3 időpontok között
3. Az utólagos adatforrások t_3 időpont után keletkeztek.

Ha ragaszkodnánk az eredeti módszerhez, akkor sokszor nem lehetne végrehajtani a feladatot, mert nincs korhű információnk. A cél érdekében, tehát bővíteni kell a t_1, t_3 időintervallumot, különös tekintettel a környezeti rekonstrukcióra. Legyen a T_1 és a T_2 az a két időpont a t_1, t_3 időintervallum előtt és után, amelyek között még elfogadjuk az adatforrásokat korhűnek, azaz felhasználhatjuk a korabeli környezet modellezésére. A T_1 és T_2 időpontokat a rendelkezésre álló adatforrások határozzák meg. Ezeknek az időpontoknak a felhasználásával bevezethetjük a korhűséget, mint új minőségi tulajdonságot, ami a rekonstrukciót jellemzi. A rekonstrukció korhűsége annál nagyobb, minél kisebb a $T_i - t_i$ különbség abszolút értéke.

6 Összefoglalás

Az időtényező komplex, adatbázis szintű kezelése a térinformációs rendszerekben még nem megoldott. Léteznek feladatspecifikus koncepciók, de egyikük sem használható általánosságban. A hadtörténeti folyamatok térinformatikai rekonstrukciója során az események vizsgálatakor szembesültem az idő kezelésének problémájával. Megvizsgálva az egyes megoldásokat arra a következtetésre jutottam, hogy önállóan egyik sem, de több eljárás együttes alkalmazása már eredményes lehet. Szükséges az időadatok attribútumként történő kezelése, az alakulatok és mozgásaik megjelenítésében a tematikus szimbólumok használata és a szekvenciális állapotképek koncepció alkalmazása az arcvonalak ábrázolásában. Csoportosítottam a különböző térinformatikai adatgyűjtő eljárásokat az időbeliség és az aktualitás szempontjából is. Az adatminőség tekintetében, az adatfrissesség és az aktualitás átértékelődik, a múltban lezajlott és befejeződött folyamatok miatt. Bevezettem a korhűséget, mint új adatminőségi szempontot, amellyel a múltban történt folyamatokat és a hozzájuk kapcsolódó objektumokat, valamint a környezeti elemeket feldolgozó rekonstrukciókat jellemezhetjük. Összességében megállapítottam, hogy a térinformációs rendszerek az időbeliség kezelésének szempontjából is alkalmas a hadtörténeti rekonstrukciók végrehajtására.

Hivatkozások

Juhász A (2004): A XIX-XX. századi tábori erődítések a Kárpát-medencében. Hadtörténeti rekonstrukció térinformatikával. TINTA Könyvkiadó, Budapest.
Langran G (1993): Time in Geographic Information Systems. Taylor & Francis, London, Washington.
Detrekői Á, Szabó Gy (2004): Térinformatika. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.
Detrekői Á (1991): Kiegyenlítő számítások. Tankönyvkiadó, Budapest
Elek I (2004): Domborzati modellek és a mintavételi tétel (I. rész). Geodézia és Kartográfia 10. LVI., 21-24.

STANDALONE FRAMEWORK FOR MOBILE GIS

Mohamed Eleiche, Béla Márkus**

A mobil GIS önálló környezete *- A mobil eszközök egyre gyorsabban terjednek, a felhasználóik száma exponenciálisan növekszik. Az eszközbe építetett digitális kamera mellett, a GPS vevő és a drót-nélküli kommunikáció jelentik a fő komponenseket. A mobil felhasználói tábor igényli a GIS szolgáltatásokat. A tanulmány elemzi a kliens/szerver környezetre alapuló mobil GIS jellemzőit, és fogalmi szintű javaslatot tesz egy új önállóan is működő mobil GIS szolgáltatásainak kialakítására.*

Kulcsszavak: mobil GIS, helyfüggő szolgáltatások

The mobile devices are expanding, and their user base is increasing exponentially. GPS receiver and wireless communications in addition to hardware architecture and digital camera are the main components of mobile devices. GIS functionalities are required to mobile users for many purposes. This paper analyses the current framework of mobile GIS based on client/server architecture and proposes a new conceptual framework for the implementation of GIS functionalities on mobile devices.

Keywords: mobile GIS, location-based services

1 Introduction

In 1980, when the IBM Corporation established the first Personal Computer (PC) from different hardware components, a new page in the history of human innovation started, and triggered a new technological revolution by creating the machine that according to Thomas Freidman made the world flat. Little bit earlier, the first trial for commercial cellular network started in Chicago (Wikipedia) and even earlier in 1971, Ray Tomlinson sent the first e-mail. These actions triggered the information and communication technology (ICT) revolution and shaped our present and will shape our future.

Many experts agree that the exponential evolution of mobile devices and mobile networks (up to 4th Generation in 2008) will trigger a similar revolution to PC impact in the early eighties (Berners-Lee 2007). The traditional PC is vanishing, notebooks and laptops are replacing traditional PCs, as published by MAIT (Manufacturers Association for Information Technology) in 2007, 114% growth in the sales of laptops compared to 1% growth in the sales of desktops. Notebooks have smaller shapes, powerful capabilities, and most notably cheaper price. The expectation is that the mobile device and the notebook will converge to a certain degree creating a new machine in the size of a mobile device and with notebook's capabilities or closer.

Maps and geospatial data are essential information for everyone, and GIS provides the required technology for enabling them digitally. GIS invaded also the mobile market, and the mobile GIS is known as the GIS technology used for displaying and manipulating geospatial data on mobile devices.

The purpose of this paper is to present and analyse the current framework of mobile GIS technology, and how it works. Also, the paper proposes a new framework for mobile GIS by means of which the user can use GIS functionalities offline when the internet connection is lost or while working outside coverage area. A definition for mobile GIS is proposed, and the mobile device is introduced.

* *University of West Hungary, Faculty of Geoinformatics*
8000 Székesfehérvár, Pirosalma u. 1-3.
E-mail: mb@geo.info.hu

2 Definition of mobile GIS

The mobile GIS does not have a concrete definition, the same thing happened to GIS many years ago. There are many disciplines and technologies that can be related to mobile GIS, such as LBS (Location Based Services), and telegeoinformatics (Li et al. 2002, Karimi and Hammad 2004, Fangxiong and Zhiyong 2004). The same feature applies to mobile devices, which have many characteristics that differ from one device to another.

Assuming that a mobile device is a portable device with mobile communication capabilities, processor, RAM, and local storage hard disk, it can surf the internet and it is connected to GPS device. Smartphone, PDA (Personal Data Assistant) and Pocket PC are samples of mobile devices.

Mobile GIS will be defined as the ability of mobile device to display geospatial data, and receive, process, and retrieve the GIS requests of mobile user. The most common framework for mobile GIS is to be considered as an extension to Web-GIS, where the GIS requests of the mobile user are processed via internet web browser. This framework was extended and tailored to display geospatial data and perform GIS operations on mobile device. The comparison between laptop and mobile devices are given in Table 1.

Table 1. Comparison between laptop and mobile device

Item	Laptop	Mobile Device
RAM	2 – 4 GB	16 – 384 MB
Hard Disk	100 – 700 GB	0.5 – 16 GB
Processor	2000 – 2700 MHz	400 – 800 MHz
Screen Size	10" – 17"	2" – 5"
Screen Resolution	600 x 800 – 1920 x 1200	240 x 320 – 352 x 800
User Interface	Mouse – standard keyboard – camera – voice – remote control	Small size keyboard – pen stylus – voice – camera -
Operating System	Matured established OS: Microsoft, Apple, Linux	High competing market, changing dynamically main OS: Symbian OS, Windows mobile, RIM Blackberry, iPhone, Linux, and many others
Communication	Wire, wireless	Wireless only
Power	Electricity/Battery	Battery only
Market Sales (2007)	18 millions unit (PC magazine)	120 millions unit (Information Week) (increase 60% than 2006)
GIS Functionalities	Many free and commercial GIS software and tools	Available via Web-GIS and limited number of GIS softwares with limited capabilities

2.1 Characteristics of mobile device

The mobile device is similar to a small notebook, as some experts like to call it mini-laptop. This new device is a mix between mobile phone device - which is used for GSM communication, and in the same time it has its own processor - and RAM and hard disk which are the main components of the PC. Usually, the mobile device has a GPS-receiver attached to it, which provides its positional awareness and a digital camera. In the past, the mobile device was used as mobile phone and as advanced organizer, and with advancement in technology development, it became an important device that links to databases, perform transaction operations, browse the internet, and display geospatial data.

The main characteristics of GIS mobile device are wireless communication to the internet, GPS equipments, and its hardware. The GIS mobile device has to be connected to GIS server where the geodatabase that interests the user resides.

3. Current mobile GIS framework

The mobile GIS is used for many purposes. Two major purposes can be identified as geospatial data entry and GIS operations. The data entry use of mobile GIS allows the GIS user/operator to collect geospatial data and store it on the mobile device, to be edited/retrieved/analysed later on the mobile device or stored on GIS server. The second major use is the GIS operations, in the cased of which the GIS user displays the geospatial data on his mobile device then selects a GIS operation to be performed on a set of geospatial data.

The current mobile GIS is practically an enhanced version of Web-GIS, where the GIS users can explore and process GIS operations through an internet browser or via a special tailored application such as the famous Google Earth.

As shown in Fig. 1. the current mobile GIS framework is a client/server architecture based on wireless communication between the mobile device and GIS server where the geospatial database is resident. In this framework, the GIS user displays the geospatial data, commonly in georeferenced raster format with low resolution to be suitable to the limited hardware capabilities of mobile device. The GIS user initiates a GIS operation using the GUI (Graphical User Interface) on the mobile device. The request is sent to the GIS server via wireless communication, and then the GIS server provides the required geospatial data and processing power for the request. After the request is processed, the results are sent to the mobile device for display.

3.1 Analysis of current framework

The current framework's characteristics are:

- The framework is defined as Client/Server architecture.
- The full dependence on the wireless communications, once disconnected the mobile GIS user cannot perform GIS analysis.
- The wireless communication of the mobile device consumes the battery power and reduces its working time.
- The communication server is exhausted by dedicating the required bandwidth to transmit the mobile GIS requests in both directions.
- All the client requests and server replies can be monitored.
- The GIS server should supply the required processing power for each GIS request.
- The GIS functionalities available for the user are limited and controlled by the server side.
- The cartographic output is out of control of the user of mobile GIS.
- The performance of this framework is slow, and depending on many elements and parties such as mobile device itself, wireless communication, working environment, and GIS server.

4 Proposed conceptual framework for standalone mobile GIS

The proposed mobile GIS framework is designed to overcome the limitations of the current framework, and extend the functionalities of GIS to mobile users even in offline mode when the mobile user is outside the coverage area or when the GIS server is down.

The proposed framework is based on sending the part of interest from the geodatabase to the mobile device where it will be stored, and then the second step is to build GIS applications for mobile device to access the locally stored partial geodatabase in the hard disk of mobile device.

As shown in Fig. 2, the proposed mobile GIS framework is designed to extract a part of interest from the geodatabase and send it to the mobile device to be stored on its local hard disk, a part of

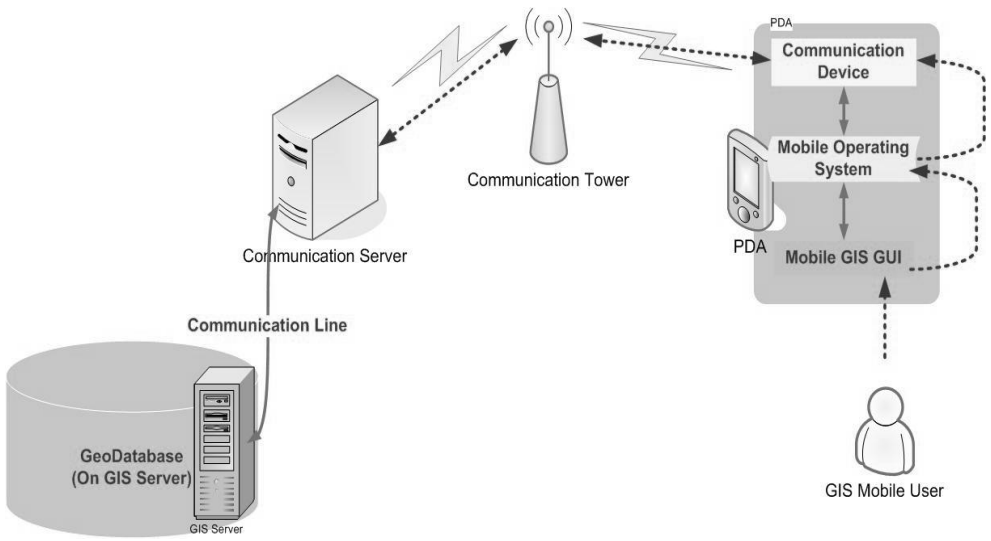


Fig. 1. Current Framework for Mobile GIS

data is extracted from geodatabase (1), then sent to internet server (2), then moved to communication server (3), then finally stored on the hard disk of mobile device (4). The mobile device will have mobile GIS application to perform GIS operations on the part of geodatabase resident on mobile device.

4.1 Advantages of proposed mobile GIS framework

The proposed conceptual framework for mobile GIS has several advantages, first it allows the mobile GIS user to work in offline mode, which impacts on reducing the bandwidth load on the communication network and decreases the operation cost. Secondly, the performance of the GIS operation will increase, due to its dependence only on RAM-Processor-Hard Disk rather than depending on the performance of both the communication and GIS servers in the current framework. Thirdly, the GIS user can perform the required analysis, edit the geospatial data, and runs the required tailored GIS applications according to his needs more precisely than the limited GIS functionalities enabled from GIS server to the mobile client. The security of the mobile GIS user is achieved in the proposed framework, since only the transmission of data from server to client can be monitored not the requests nor the results of mobile GIS operations.

It is evident that the proposed framework will provide for mobile GIS users in case of emergency and loss of wireless communications with servers a valuable tool for navigation and decision support, especially if it is equipped with GPS receiver.

4.2 Requirements for the Proposed Framework

- Re-engineer GIS applications to accommodate the limited hardware capabilities of mobile device such as limited RAM, small processor and limited hard disk space. Mobile GIS applications should perform the same functionalities as traditional GIS applications but on the basis of the limited hardware resources of the mobile device.
- Implement mobile cartographic methodology to display geospatial data on the small size screen of mobile device with its limited resolution.
- Dense and compact geospatial data models to reduce its storage size on the mobile device and increase processing performance.
- Interoperability for geospatial data between GIS server and mobile device.

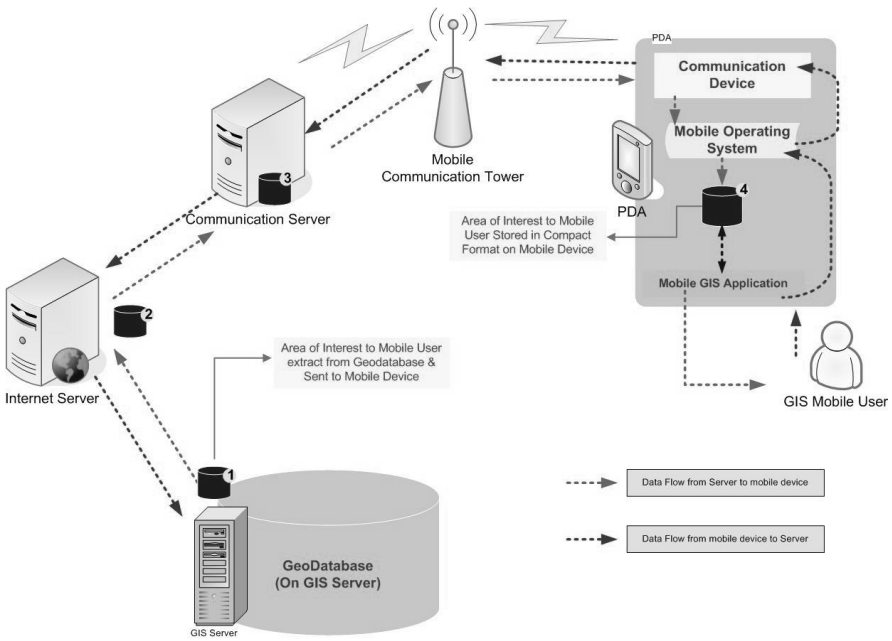


Fig. 2. Proposed Framework for Standalone Mobile GIS

- Sophisticated update techniques and capability for new versions of main geodatabase on GIS server due to receiving several versions of the same data from several mobile GIS users.
- Standards to enable the re-use of data and applications for the immense and heterogeneous base of mobile device users.

The possible GIS functionalities for mobile device are summarized in Table 2.

Table 2. Possible GIS functionalities for mobile device

GIS Functions	Description
Geospatial data collection	Bottom-up geospatial data collection including multimedia and positioning can be performed using mobile devices with GIS functionalities for geospatial data editing and update
Indoor navigation	Navigation in large buildings such as university campus, malls, airports, railway stations is a challenge, where spatio-temporal actions are critical, and GNSS signals are not available
Pedestrian navigation	Pedestrian navigation is different than vehicle navigation, and it has its own characteristics and algorithms
Bicycle navigation	Bicycle navigation is different than vehicle navigation, and it has its own criteria and routes
Mobile tracking	Tracking people is important in mobile and real time operation, for example children in a trip or tourists in foreign place
Car navigation	Car navigation is related to online traffic data, which changes the chosen route and requires online update for the new path
Emergency	Emergency cases where servers are not available and fast decisions based on spatial data are necessary
Trip planning	Planning of trips or change of plans is a decision based on geospatial data and needs special GIS functionalities

5 Conclusion

The proposed conceptual framework for standalone mobile GIS is conforming to the future vision of the convergence between mobile devices and notebooks, and establishes a basis for the future implementation of GIS with a wide range of users equipped with mobile device enhanced with a GPS-receiver. The GIS applications based on immense amount of hardware resources is not applicable to the proposed framework. A new design of GIS applications for mobile devices is required to perform selected GIS functionalities using limited hardware resources and reduce size of geodatabase. Also, the mobile geospatial data model needs to be compacted for reducing the required bandwidth during data transmission and to accommodate the limited hard disk space on the mobile device.

References

Li L, Li C, Lin Z (2002): Investigation on the Concept Model of Mobile GIS. Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa.

Karimi HA, Hammad A (2004): Telegeoinformatics: Location-Based Computing and Services, Chapter 10, Taylor & Francis CRC Press, Florida, USA.

Fangxiong W, Zhiyong J (2004): Research on a Distributed Architecture of Mobile GIS based on WAP, XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey.

Berners-Lee T (2007): The Mobile Web, Mobile Internet World conference, Boston.