

ÉVFOLYAM
Volume

XX

2017

G E O M A T I K A I K Ö Z L E M É N Y E K

Publications in Geomatics

FŐSZERKESZTŐ
Editor in Chief

PAPP G

TANÁCSADÓ TESTÜLET
Advisory board

ÁDÁM J (*elnök/chair*)
BIRÓ P
BOZÓ L
MÁRTON P



HU ISSN 1419-6492

*MTA CSFK GEODÉZIAI ÉS GEOFIZIKAI INTÉZET
SOPRON*

Geomatikai Közlemények

Publications in Geomatics

kiadja az

MTA CSFK GEODÉZIAI ÉS GEOFIZIKAI INTÉZETE

9400 Sopron, Csatkai E. u. 6-8. Pf. 5.
tel.: 99 / 508-340 fax.: 99 / 508-355
e-mail: geomatika@ggki.hu
web: www.geomatika.ggki.hu
web programozó: Lovranits Tamás

felelős kiadó:

Szarka László Csaba
főigazgató

főszerkesztő:

Papp Gábor

angol nyelvi szerkesztő:

<i>Eperné Pápai Ildikó</i> 

technikai szerkesztő:

Rács Ágnes

készült a

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

megjelent 150 példányban
Sopron, 2017

HU ISSN 1419-6492

**GEOMATIKAI
KÖZLEMÉNYEK
XX.**

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

(Bessenyei György)

ÁLTALÁNOS INFORMÁCIÓK ÉS ÚTMUTATÓ

A Geomatikai Közlemények 1998 óta rendszeresen, általában évenként egy alkalommal megjelenő folyóirat. A kiadvány célja, hogy elsősorban magyar és esetenként angol nyelvű fórumot biztosítson a hazai ill. külföldi kutatóknak és szakembereknek, akik a geodézia, fotogrammetria, térinformatika, fizikai geodézia, geofizika, földmágnesség, geodinamika, a Föld belső szerkezete és a Föld körüli térség fizikája, tágabb értelemben véve a geomatika szakterületén elért tudományos eredményeiket szeretnék közzétenni. A kiadványban megjelenő cikkek és tanulmányok a mai normáknak megfelelő lektorálási folyamaton mennek keresztül, azaz mielőtt publikálásra kerülnek legalább kettő független bíráló véleményt alkot a közlésre benyújtott kéziratról. A bírálók nevét alaphelyzetben csak a szerkesztőbizottság ismeri, de a bírálók kérhetik anonimitásuk felfüggesztését. A bírálatok alapján a szerkesztőbizottság eldönti, hogy az adott kézirat megfelel-e a Geomatikai Közlemények formai és tartalmi követelmény-rendszerének, illetve, hogy az esetlegesen felmerülő hibák és hiányosságok kijavíthatók- és pótolhatók-e a kézirat kisebb-nagyobb átdolgozásával.

A Geomatikai Közlemények szerkesztését – amelyet 2011-től már egy, az Interneten keresztül elérhető és működtethető web felület is támogat (www.geomatika.ggki.hu/kozlemenyek) ©Lovranits Tamás és Papp Gábor – társadalmi munkában végző szerkesztőség nagy hangsúlyt fektet a lehető leggyorsabb minőségi munkára. Ez mind a szerzőktől, mind a bírálóktól erőfeszítéseket és fegyelmet kíván, amit a szerkesztőség előre is tisztelettel megköszön. Ennek biztosításához javasoljuk áttanulmányozni a következő anyagokat:

Geomatikai_Közlemények_instrukciók_szerzőknek.doc,
Geomatikai_Közlemények_instrukciók_bírálóknak.pdf,

amelyek a már fent megadott címre belépve letölthetők. A regisztrált felhasználók ugyanezen a címen keresztül végezhetik el a rendszer által koordinált aktuális feladataikat, akár szerzői, akár bírálói szerepkörben. Az új felhasználók ugyanitt regisztrálhatnak, felhasználói név és e-mail cím megadásával.

A feltöltött kéziratokat a szerkesztőség előbírálja, elsősorban az instrukciókban megfogalmazott formai szempontok szerint. Ha a kézirat formailag kielégítőnek bizonyul, akkor elindul a bírálati folyamat, amely általában több ciklust is képez, és egészen addig tart, ameddig a bírálók ill. a szerkesztőség ezt tartalmi-formai indokok miatt szükségesnek tartják. A bírálati fázisokról és az aktuális teendőkről mind a szerzők mind a bírálók automatikus üzenetekben értesülnek.

A Geomatikai Közleményeket az MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézete adja ki. A kiadás anyagi háttérét egyrészt a két évente Sopronban megrendezésre kerülő Geomatika Szeminárium, másrészt különböző pályázatok és tudományos szervezetek (pl. Soproni Tudós Társaság) támogatásai biztosítják. A XX. kötet megjelenését az MTA CSFK publikációs kerete tette lehetővé.

A Geomatikai Közlemények jelen kötetének felelős szerkesztői:

Benedek Judit, Geiger János, Kalmár János, Szabó Szilárd, Újvári Gábor.

A KÖTETBEN MEGJELENT CIKKEK BÍRÁLÓI

Ambrus	Bence
Bányai	László
Barta	Veronika
Brolly	Gábor
Busics	György
Kenyeres	Ambrus
Király	Géza
Kiszely	Márta
Kovács	István Péter
Laky	Piroska
Mucsi	László
Németh	László
Szabó	Szilárd
Wojtaszek	Malgorzata
Völgyesi	Lajos

TARTALOMJEGYZÉK

CONTENTS

Varga Péter	7
In memoriam Závoti József	
Mentes Gyula	11
In memoriam Eperné Pápai Ildikó	
Wirth Ervin, Czinkóczy Anna, Szabó György	13
Landcover change simulation in Hungary by cellular automaton <i>Magyarországi felszínborítás változás szimulációja sejtautomatával</i>	
Patkó Gergely András	21
Magyarország új topográfiai felmérése <i>New topographic mapping of Hungary</i>	
Juni Ildikó, Rózsa Szabolcs	29
Troposzféra modellek pontosságvizsgálata a sugárkövetés módszerével <i>Analysing the accuracy of tropospheric delay models using the ray tracing method</i>	
Jancsó Tamás	41
Méterarányszámokkal végzett hibaszűrés modell- és terepi pontok koordinátái alapján <i>Error detection with scale factors based on coordinates of model and control points</i>	
Takács Bence, Markovits–Somogyi Rita	47
GNSS – monitoring légi navigációs alkalmazások szempontjából <i>Analysis of GNSS – monitoring from the aspects of air navigation</i>	
Czirok Lili	55
A Pannon-medence feszültségviszonyainak vizsgálata a földrengések fészekmechanizmusának inverziójával <i>Analysis of stress relations in the Pannonian Basin using focal mechanism solutions</i>	
Szűcs Eszter, Bozsó István, Bányai László, Wesztergom Viktor	67
Recens tektonikus folyamatok megfigyelése műholdradar interferometriával, a Belső – Kárpát kanyar vizsgálata archív felvételek alapján <i>Observation of recent tectonic processes by means of satellite radar interferometry – investigation of the inner Carpathian Bend using archive SAR images</i>	
Barton Iván, Király Géza, Czimmer Kornél	87
Lékek kimutatása Sentinel–2A ürfelvétel-idősorok alapján tölgyerdőben <i>Treefall gap detection on Sentinel–2A satellite images in Oak type forest</i>	
Papp Erik	99
Geodéziai dátumtranszformáció kettős kvaternióval <i>Geodetic datum transformation by dual quaternion</i>	

IN MEMORIAM ZÁVOTI JÓZSEF

*Varga Péter**



Závoti József

2017. november közepén eltávozott közülünk Závoti József, aki sok éven keresztül volt kollégánk. Olyan munkatársunk hagyott itt minket, akit tiszteltünk szaktudásáért, tudományos meglátásaiért, eredményeiért, és akit szerettünk szerénységéért, jóindulatú, megértő és mindig segíteni kész természetéért.

1949. november 30-án született Szekszárdon, az általános iskolai tanulmányait az élete végéig imádott szülőfalujában, a Tolna megyében található Miszlán végezte. A székesfehérvári gimnáziumi éveket követően nyert felvételt az ELTE alkalmazott matematika szakára. Egyetemi tanulmányai 1974. évi befejezését követően, bár elmondása szerint maradhatott volna az egyetemen, Sopronba költözött. Felesége logopédus, a Soproni Egyetem docense, fia Zoltán közgazdász, lánya Zsuzsa angol-norvég szakon végzett bölcsész. 1975-től kezdett dolgozni a soproni, akkori nevén MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetben (MTA GGKI).

Kezdeti intézeti munkái számítógépes programfejlesztésekhez és a műszerfejlesztésekhez (szintezőlécek kalibrálása, giroteodolitok) szükséges matematikai feldolgozó eljárásokhoz kapcsolódtak. Első nagy kutatási projektje a térképek magasság ábrázolási pontosságát forradalmi módon megnövelő digitális terepmodellezéshez (DTM) kötődött. Rácsbázisú terepmodelljében olyan spline interpoláción alapuló végeelem magasságbecslést használt, mely a folytonosság mellett a differenciálhatóságot is biztosította, ami a törésmentes automatikus szintvonalrajzolás előfeltétele. Kollégáival együttműködve új eljárásokat, algoritmusokat fejlesztett ki a szomszédság relációra alapozott magasságbecslésre. Rácsbázisú terepmodelljére támaszkodva munkatársai különleges DTM alkalmazásokat fejlesztettek (pl. vízvázlat és vízgyűjtő vonalak kijelölésére), melyekhez speciális gráfelméleti algoritmusokat is felhasználtak. Kutatási eredményei alapján lett 1985-ben a műszaki tudományok kandidátusa (értekezésének címe: A digitális terepmodell matematikai alapjai és geodéziai alkalmazásai).

*MTA CSFK GGI, 9400 Sopron, Csatka u. 6-8.
E-mail: varga@seismology.hu

Közreműködése mellett fejlesztettek ki az MTA GGKI kutatói a hazai légi fénykép kiértékelési tevékenység támogatására egy nyalábkiegyenlítő programrendszert. A digitális fotogrammetria terén foglalkozott a mérések, a pontazonosítások automatizálásával illetve a projektív geometrián alapuló pontosság és egyszerűbb kiértékelési eljárások kifejlesztésével.

Tudományos pályafutásának következő jelentős állomása a különböző mérési hibák kiküszöbölésében meghatározó fontosságú robusztus becslési eljárások kutatása és fejlesztése lett. Célja volt csökkenteni a durva hibák és az adatszennyeződések hatását abban az esetben, mikor a mérési adatok nem normáloszlást követnek. A geodéziai hagyományoknak megfelelően gyakorlati célokra leginkább a súlyfüggvényeken alapuló újrásúlyozott legkisebb négyzetek módszert alkalmazott. A súlyfüggvényekkel rendelkező w-becslések területén az általa vezetett kutató csoport megalkotta a Soproni-módszert. Új, a geodéziai problémákkal adekvát robusztus becslési módszereket dolgozott ki a maximum-likelihood elv alapján, és a robusztus becslési módszereket a geodéziai alapfeladatok megoldására adaptálta. Fenti eredményekre támaszkodva 1998-ban a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar Térinformatikai Mérnöki Szakán megvédte habilitációs értekezését (értekezésének címe: „Robusztus becslési módszerek a geodéziában”) és nem sokkal ezt követően, 2000-ben a műszaki tudományok doktora lett (értekezésének címe: A geodézia korszerű matematikai módszerei)

Az 1990-es évek elejétől foglalkozott idősorok analízisével. Az ezen a téren elért eredményeit német, osztrák, belga és magyar szakemberekkel együttműködve a földforgás változás, a föld árapály és árapály sűrűlódás kutatások témaköreiben használták fel. Az árapály sűrűlódás jelenségének vizsgálata során sikerrel alkalmazta a robusztus becslési eljárásokat, melynek köszönhetően a nemzetközi kutatócsoportnak sikerült megmutatnia, hogy a földi nap hosszúságának növekedésében a földtörténet során ugrásszerű változások mentek végbe. A globális GPS megfigyelések idősorának elemzése során kollégáival együttműködve elsőik között tudták detektálni a Föld pólus mozgásának magas frekvenciájú komponenseit és ezek között az egyes fél és egész napos árapályhullámokat.

A kétezres évek elején D. Fritsch professzorral (Stuttgarter Egyetem) közösen a fotogrammetriai külső tájékoztató – a Helmert transzformáció - egy új alternatív megoldását dolgozták ki. Ugyancsak Stuttgarthoz kötődik egy, a földrajzi információs rendszerekkel kapcsolatos, kutatási eredménye is. A földrajzi információs rendszerek esetében a feldolgozandó adatok hatalmas mennyisége és a tárolás költsége kikényszerítik, hogy az adatokban rejlő információt tömörítsük. Erre a célra wavelet transzformáción alapuló tömörítési eljárást fejlesztett ki németországi tartózkodása során.

Tudományos eredményeit 166 1977 és 2017 között írt tudományos közleményben foglalta össze, melyek jelentős része elismert nemzetközi (Journal of the Geodetic Society of Japan, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Österreichisches Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, Journal of Geodynamics) és hazai (Acta Geodetica et Geophysica, Geophysical Transactions, Geodézia és Kartográfia, Geomatikai Közlemények) szakfolyóiratban jelent meg.

Szakmai előmenetelének fontos állomása volt, hogy a GGKI kutatói közösségének ajánlása és az MTA X. Földtudományok Osztálya támogatása alapján az MTA elnöke 2000-től kezdődően megbízta az Intézet vezetésével. Az igazgatói munkakör ellátására szakmai felkészültsége mellett különösen alkalmassá tette körütekintő, megfontolt alaptermészete, humánus, kollégái és a GGKI sorsa iránt érzett felelősségérzete. Irányítása alatt az Intézet tovább fejlődött, szakmai elismertsége itthon is, nemzetközi téren is növekedett. Igazgatói munkájának sikerességét mutatja, hogy az intézet kutatói javaslatára az MTA elnöke igazgatói megbízását többször is meghosszabbította. Igazgatói tevékenységet 2012-ig vállalt. Ezt követően tudományos tanácsadóként dolgozott tovább.

Nagy fontosságot tulajdonított az egyetemi oktatásban való részvételnek. A Nyugat-magyarországi Egyetem (NymE) Erdőmérnöki Karának keretében működő Matematikai Intézet munkájába docensként 1993-ban kapcsolódott be. 1999-ben egyetemi tanárnak nevezték ki, majd 2002-től a NymE Közgazdaságtudományi Karán oktatott, ahol megszervezte és évekig vezette a Matematikai és Statisztikai intézetet. Oktatási feladatként a valószínűségszámítás, a statisztika és az operációkutatás tárgyak előadásait tartotta, valamint a több doktori iskola tagjaként részt vett a doktoranduszok képzésében is.

A tudományos közélet mindvégig aktív szereplője volt. A Geodéziai és Geoinformatikai Tudományos Bizottság elnöki tisztét 2002 és 2008 között töltötte be. 2003-2015 között Sopron város támogatásával működő MTA VEAB Soproni Tudós Társaság ügyvezető elnöke. Az *Acta Geodaetica et Geophysica* főszerkesztője 2008 és 2013 között volt. Kezdeményezésének eredményeként indult meg a földtudományi kutatások eredményeit bemutató Geomatika Szemináriumok sorozata, és a Geomatikai Közlemények című folyóirat, melynek szerkesztését intézeti kollégáival közösen végezte 1998 és 2013 között. A Dimenziók: Matematikai Közlemények elnevezésű egyetemi kiadvány szerkesztésében is részt vett.

Számos alkalommal részesült kitüntetésben (2000-ben Akadémiai Díj, 2006-ban egyetem kiváló oktató, 2011-ben Széchenyi István Emlékérem, 2017-ben Lámfalussy Sándor Emlékérem), és 2014-ben vehette át a Magyar Érdemrend Tiszti Keresztjét Pálincás József MTA elnöktől.

Tragikus hirtelenséggel bekövetkezett halála mindenkit megrendített, aki ismerte. Emlékét szeretettel megőrizzük.

Kedves Jóska, nyugodj békében!



Závoti József átveszi Pálincás Józseftől, az MTA elnökétől a Magyar Érdemrend Tiszti Keresztjét 2014-ben

IN MEMORIAM EPERNÉ PÁPAI ILDIKÓ

*Mentes Gyula**



Eperné Pápai Ildikó

Eperné Pápai Ildikó kedves, mindig segítőkész kollégánk a Geomatikai Közlemények angol nyelvi szerkesztője, hosszú és méltósággal viselt súlyos betegség után 2017. február 10-én örökre eltávozott közülünk.

Ildikó 1965. december 15-én született Miskolcon. Általános és középiskolai tanulmányait is itt végezte. Egy évig laborasszisztensként a Miskolci Egyetem Ásvány- és Kőzettani Tanszékén dolgozott. Egyetemi tanulmányait 1985 és 1990 között a Miskolci Nehézipari Műszaki Egyetem, Bányamérnöki Kar, geofizikai ágazatán végezte, ahol bányamérnöki oklevelet szerzett. Diplomamunkájának témája „Love-típusú telephullámok diszperziós analízise” volt. A végzést követően 1994-ig az Eötvös Loránd Geofizikai Intézetnél dolgozott szeizmikus adatfeldolgozás területén. Kiváló angol nyelvi tudásának köszönhetően már itt tevékenyen vett részt az intézeti kiadványok, különösen a Geophysical Transactions, szerkesztésében.

Soproni kötődésű, bányamérnök végzettségű férjével 1994-ben került Sopronba, ahol fiatal kutatói ösztöndíjjal kezdett dolgozni az akkori nevén MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetben. Itt 1994-től 1995-ig GPS mérések feldolgozásával foglalkozott, majd ezt követően geodinamikai mérési adatok feldolgozásában és értelmezésében vett részt. Fő kutatási területei: a deformáció méréseket befolyásoló környezeti paraméterek mérésre gyakorolt hatásának vizsgálata, a földi és az atmoszférikus árapályhatás, valamint monitorozott vízkutakban regisztrált árapály változások okainak vizsgálata voltak. Szinte haláláig lelkiismeretesen végezte a Sopronbátfalvi Geodinamikai Observatóriumban mért extenzométeres-, mikrobarográf-, radon- és hőmérséklet adatok, valamint a mátyáshegyi gravitációs és geodinamikai, továbbá a vyhnei (Szlovákia) árapály obszervatóriumokban mért extenzométeres adatok feldolgozását, hőmérséklet és légnyomás korrekcióját, árapály feldolgozását és értelmezését. Az árapályával kapcsolatos kutatásokban szorosan együttműködött a pozsonyi Geofizikai Intézet és a Jénai Egyetem munkatársaival.

*MTA CSFK GGI, 9400 Sopron, Csatai u. 6-8.

E-mail: mentes@ggki.hu

2001-től a Geomatikai Közleményeknek angol nyelvi szerkesztője volt. Saját kutatómunkája mellett sokat segített kollégáinak is. Szívesen végzett nekik számításokat és ellenőrizte angol nyelvű cikkeiket. 2001-ben jelentkezett a Nyugat-magyarországi Egyetem Kitaibel Pál Környezettudományi Doktori Iskolájába. Doktori munkájának témája „Extenzométeres mérésekből történő árapály deformációk meghatározásában szerepet játszó helyi földtani és környezeti hatások vizsgálata” volt. Doktori szigorlatát 2006-ban tette le, disszertációjának befejezésére azonban már nem került sor. Ma már tudjuk, hogy súlyos betegségével 2008 óta vívott bátor és fegyelmezett harcot. Ennek ellenére intézeti munkáit is úgy végezte, hogy csak a gyakori orvosi vizsgálatokból és kezelésekből sejthettük, milyen emberfeletti küzdelmet folytat. Egyre romló állapota miatt 2015-ben nyugdíjba vonult, de úgy búcsúzott, hogy otthon is szívesen segít mindenkinek. 2016 közepéig aktívan dolgozott egy OTKA kutatásban, amelynek résztvevője volt. Elhivatottságát mutatja, hogy még halála előtt két hónappal is lektorálta a Geomatikai Közlemények kéziratait.

Ildikó kutatási témáiból összesen 23 tudományos közleményt írt. 19-et tudományos folyóiratban, amelyekből 13 nemzetközi, 2 hazai idegen nyelvű és 4 magyar nyelvű folyóiratban jelent meg. Továbbá a „Landslide monitoring of loess structures in Dunaföldvár, Hungary” című könyvnek egyik szerkesztője volt, 1 könyvfejezetet írt és 2 cikke konferencia kiadványban jelent meg. Ezekon kívül 5 konferencia absztraktot jelentetett meg. Kutatómunkája során számos hazai OTKA pályázatnak és az OASYS “Integrated Optimization of Landslide Alert Systems” EU FP5-ös pályázatnak volt hasznos és eredményes résztvevője.

Férjével nagy szeretettel nevelték gyerekeiket, Nórit (1996) és Miklóst (1999). Egészsége megromlása mellett élete mindennapjait nehezítette az is, hogy férjét 2007-ben áthelyezték Sopronból Veszprémbe és férje csak a hétvégeket tudta Sopronban tölteni. Nagyon ügyelt arra, hogy ennek a család ne lássa kárát. Mindvégig, boldog, szeretetteljes légkört biztosított családjá számára. Nóra jelenleg a Miskolci Egyetem Egészségügyi Karán tanul, Miklós pedig a Budapesti Műszaki Egyetemen matematikusnak készül.

Ildikó tragikusan korán ment el, mégis teljes életet élt.

Kedves Ildikó, örökké szívünkben élsz! Nyugodj békében!



Ildikó a Sopronbánfalvi Geodinamikai Observatórium bejárata előtt
Corinna Kroner (Jénai Egyetem) és a szerző társaságában

LANDCOVER CHANGE SIMULATION IN HUNGARY BY CELLULAR AUTOMATON

Wirth Ervin*, Czinkóczy Anna**, Szabó György***

In the paper a modelling procedure of the change of the land use in the case of a randomly picked test area by means of geosimulation using cellular automata is described. The complexity of the simulation is highlighted and a clear methodology is given. The objective of the research is to find a natural equilibrium of the land use (the possible greatest heterogeneity) which could be interpreted as a sustainable landscape supported and favoured by EU regulations and environmental policy.

Keywords: cellular automaton, geosimulation, propagation, CORINE Land Cover, environmental policy

Magyarországi felszínborítás változás szimulációja sejtautomatával – Jelen cikk diszkrét modellen – sejtautomatán – keresztül mutatja be egy véletlenszerűen kiválasztott teszterület – alföldi táj – felszínborítás változásának geoszimulációját. A dokumentáció ezen túlmenően megvilágítja a szimuláció komplexitását, továbbá felvázol egy letisztult módszertant. A szimulációk célja a maximális diverzitás minimális idő alatt történő elérése, ezáltal egy - az EU szabályozással összhangban lévő - hatékonyabb és fenntarthatóbb tájgazdálkodást kialakítva.

Kulcsszavak: sejtautomata, geoszimuláció, terjeszkedés, CORINE Land Cover, környezetvédelmi politika

1 Landscape diversity

A landscape is a mosaic of heterogeneous land forms, vegetation types, and land uses (Urbanet al. 1987). The spatial structures of landscapes are associated with the composition and configuration of landscape elements. Composition refers to the number and occurrence of different landscape types while the configuration means the physical distribution or spatial character within a landscape (McGarigal and Marks 1995). The spatial configuration and composition of landscape elements play an important role in the ecological functionality and biological diversity.

This paper gives an overview about how to use computer simulation – cellular automata – on land cover content in order to generate short-term plans deal with higher diversity. The simulation is based on the spatial connections of the land cover classes, which can highlight the effects of corresponding regulations (afforestation, greening, etc.).

Our test area lies on the Great Hungarian Plain, which can be considered a typical Hungarian area. Nevertheless, it is also an arid and problematic place which was a fertile and productive land long time ago.

2 Cellular automata, geosimulation

Cellular automata (CA) are a specified type of a more general class of entities known as automata. Automata process information input to them from their surroundings, and their characteristics are altered according to rules that govern their reaction to those inputs (DeSmith et al. 2007). In our case the CA is modelled as a 2-dimensional rectangular lattice of cells.

Geosimulation (Benenson and Torrens 2004) is a rather new and innovative research method, which uses mathematical modelling and continuously expanding sets of software tools to describe the behaviour of cellular automata or agent-based models. Geosimulation provides an almost costless, yet

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
E-mail: wirth.ervin@epito.bme.hu

**Szent István Egyetem,
E-mail: annaczkoczky@gmail.com

***Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
E-mail: szabo.gyorgy@epito.bme.hu

very effective method to predict the long-term effects of a new regulation or even climate change. Some geocomputational research relates to the problems of inferring land cover and land-use from data obtained by remote sensing, as well as the quest for better understanding the dynamics of land-use changes.

3 Setting up world and software components

We have chosen the QGIS software to subsample the test area located in Great Hungarian Plain. In addition to this we used a Python script file that could be parameterised to subsample the given test area in proper format (ASCII grid). This method could be extended to any other randomly chosen area considered for similar investigation purposes. In the next step, the raster image obtained with GDAL (Geospatial Data Abstraction Library), an open-source GIS function library was loaded into NetLogo (Wilensky 1999) – which is an integrated modelling environment for simulating – and can be visualised with Wolfram Mathematica Link (Bakshy and Wilensky 2007) according to Figure 1.

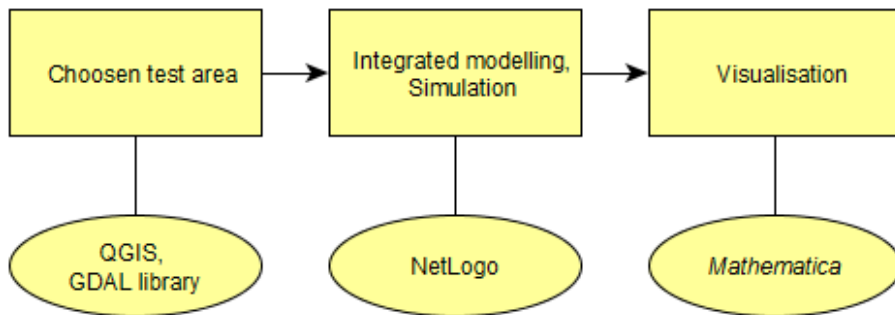


Figure 1. Software environment for analysis

Having performed the necessary steps of geoprocessing mentioned above we obtained the CORINE Land Cover (EEA 2006) suitable for the predefined extent and resolution (Fig.2).

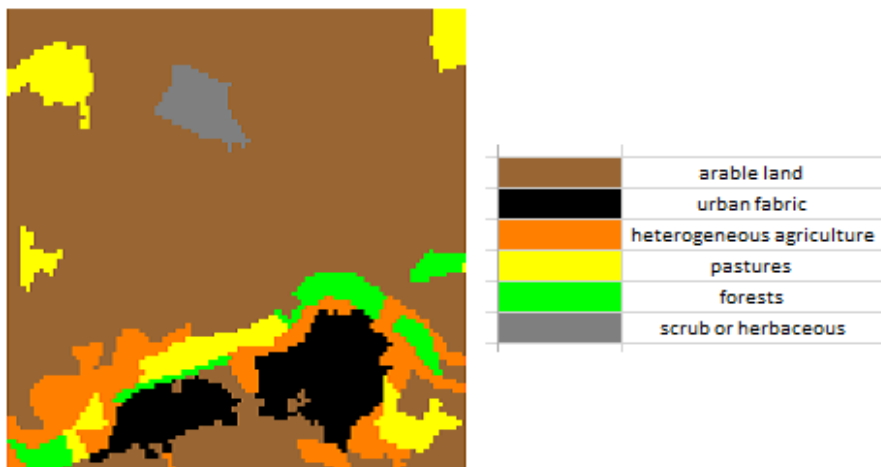


Figure 2. Land covers of the sample region – Gyomaendrőd town near Békéscsaba county – represented in Mathematica

We can get the land cover decomposition of the world sorted by frequencies of occurrence according to Table 1.

Please note that the table contains the land cover types ordered by frequencies, and the first entry is the most common land cover type (arable_land), followed the second most frequent land cover type (urban_fabric), etc.

Table 1. Landscape decomposition of the world introduced in Figure 2

Land cover type (level-2)	Cell count
Arable land	7072
Urban fabric	848
Heterogeneous agricultural areas	829
Pastures	701
Forests	348
Scrub and or herbaceous vegetation associations	202

4 Topology, propagation, generation

Concerning the topology of the model space the following holds: The model world is a 100 x 100 pixel size “box” (a patch in NetLogo) with clear edges as borders. Hence it has no wrapping on the edges (like a torus-like world). Thus if a CORINE Land Cover (CLC) pixel size is 100 m x 100 m, then a world represents 100 square kilometres on the ground. It is possible to use different neighbourhood models (i.e. von Neumann, Moore) as it is illustrated by Figure 3. One can use different radii depending on the model and the inclusion of the centre pixel is optional.

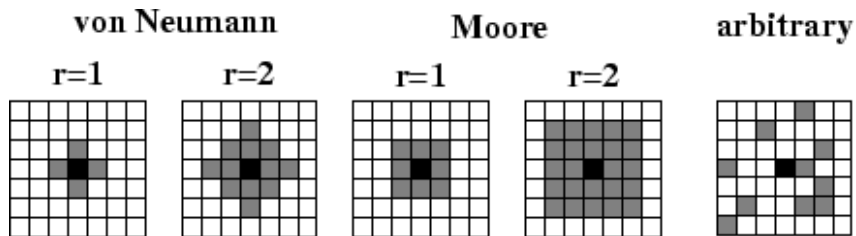


Figure 3. Neighbourhood models

First we shall present a simulation to illustrate the spreading of the urban sprawl. The Moore neighbourhood model is used with $r = 1$ and the centre pixel is left out (3rd case in Fig. 3), which means that a patch or a cell has 8 neighbours. For the sake of simplicity, first we are considering the change effect between two land cover types which occur in Table 1. Suppose that a one-way propagation of land cover “a” (forests) to the neighbouring cover “b” (arable land) is of a probabilistic nature, i.e. it can be assumed that the probability of propagation is proportional with the number of cells of the layers:

$$P(\text{propagation}) = \frac{\text{cell count of land cover "a" in } N}{\text{cell count sum of land cover "a" and "b" in } N} \quad (1)$$

In Equation (1) N indicates the total number of cells in neighbourhood, in our case $N = 8$. The propagation occurs in the adjacent “b” cells in terms of Moore-adjacency, if P (propagation probability) is less than a randomly generated float value (a random value between 0 and 1) in order to increase diversity. In case of strict propagations (without stochastic part) or simple neighbourhood models (i.e. von Neumann $r = 1$) very odd shapes (e.g. straight lines) could be generated.

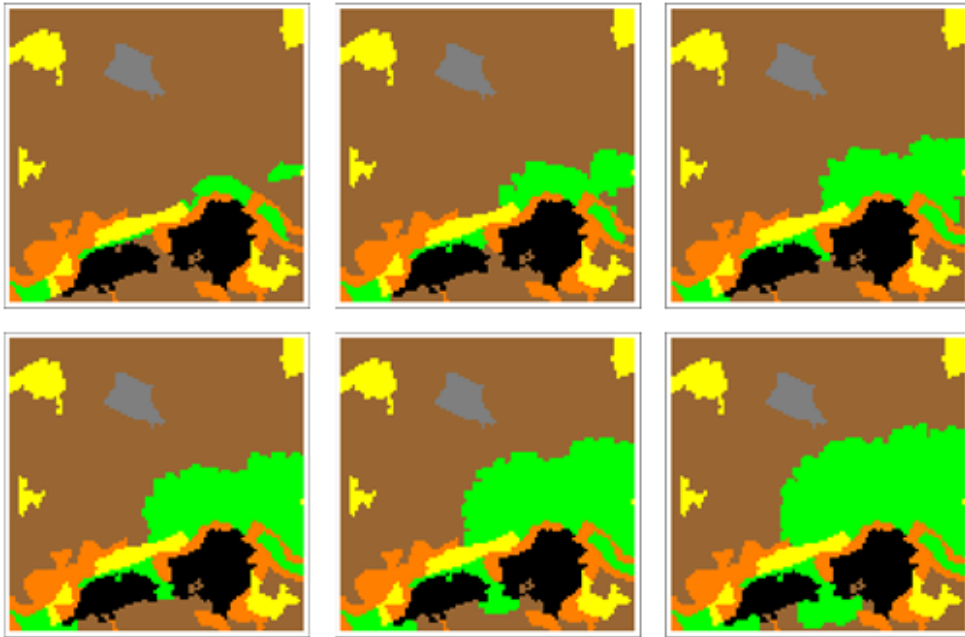


Figure 4. Propagation of the forests on arable lands

Figure 4. displays the forest sprawl, it shows how the cells change from arable land state to forest state. The subsequent pictures show the change occurring in ticks (5 time periods) ranging from 0 to 25. The output was produced with Mathematica program, as agent-based modelling environments generally have a basic unencumbered appearance (Kornhauser et al. 2007). The propagation can be briefly written in the highly abstracted NetLogo language (Figures 5 and 6).

```
ask patches with [covername = source][
  let s count patches at-points nearby with [covername = source]
  let t count patches at-points nearby with [covername = target]
  if s != 0 and t != 0 [
    let p ( s / (s + t))
    if p < random-float 1 [
      spread source target
    ]
  ]
]
```

Figure 5. The nearby variable stores the adjacent patches. The source was the forest, and the target was the arable land

```
to spread [source target]
  ask patches at-points nearby [
    if covername = target [
      set covername source
      set pcolor table:get cover2color covername
    ]
  ]
end
```

Figure 6. The propagation between the adjacent cells

5 Matrix representation of the change model

Propagation and simulation are described by Equation (1) and realized by NetLogo program according to Figure 5 and Figure 6 can be efficiently combined using a matrix notation. In complex systems self-modification is necessary as the model would otherwise produce linear or exponential growth (Clarke et al. 1996). To model changes with higher complexity, we introduce the so called Booming matrix, which is defined as follows:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ b_{n2} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

The values of the matrix are obtained from Table 1. according to the occurrences. The first element of the first row b_{11} is the most frequent value (since Table 1 is sorted by occurrences). The size of $\mathbf{B}$ is $n \times n$, where n is the number of possible land cover types (in our case $n=6$). The b_{ij} -th element of the matrix means that i -th row cover type of the world (derived from CLC) becomes the j -th column cover type with the frequency of the value (see Figure 7). For example b_{13} (the third element of the first row) means that the arable land is becoming heterogeneous agricultural area in the next period. The value of 2 means that the changing process occurs twice in a simulation time unit (tick); i.e. the change function is called twice by the computational algorithm. If the value occurs under the diagonal (the row index is greater than the column index) a less frequent land cover takes over a more frequent one. In this case the heterogeneity (more exactly the composition) increases.

Hence, we can say that by introducing matrix $\mathbf{L}$ (lower triangular matrix of $\mathbf{B}$), we can observe a change where a less frequent land cover type will take over a different land cover type and will become more frequent in the next period.

As it was mentioned above, the matrix representation can be effectively used to represent the change processes. The elements of the main diagonal would indicate unchanged landcover, so if we are to seek heterogeneity, it is straightforward to divide matrix $\mathbf{B}$ into upper and lower part ($\mathbf{U}$, $\mathbf{L}$) respectively. Both matrices $\mathbf{U}$ and $\mathbf{L}$ have triangular property (Fig.7).

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{L} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{U} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Figure 7. The land cover propagation matrix (Booming matrix) $\mathbf{B}$ on the left. The matrices on the right are defined as $\mathbf{L}$ (lower triangular matrix which induces heterogeneity) and $\mathbf{U}$ (upper triangular matrix which implies homogeneity)

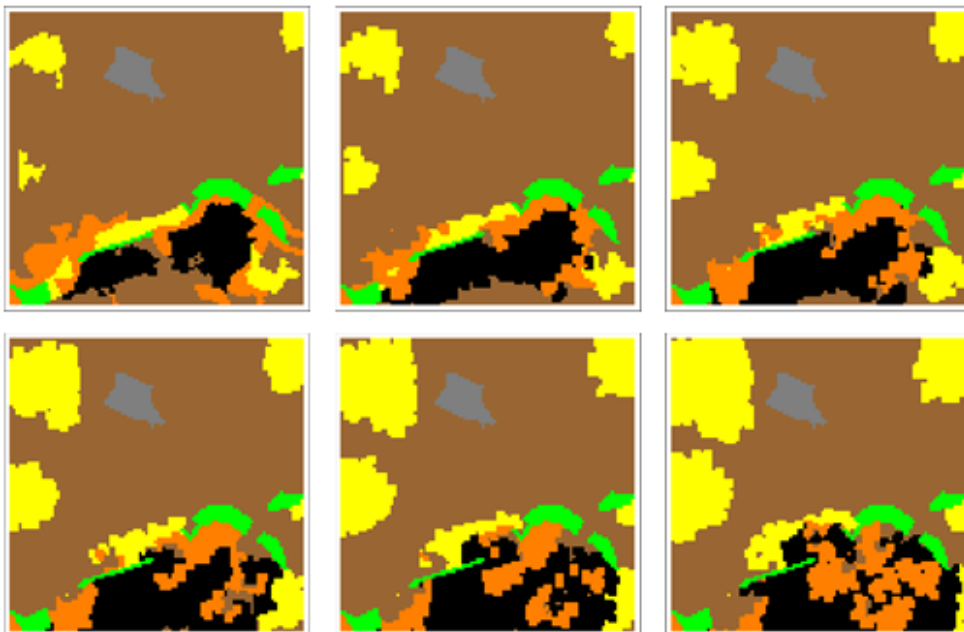


Figure 8. Representing the change processes according to B during the period of 10 ticks (tick 0 to 10 with interval 2 ticks)

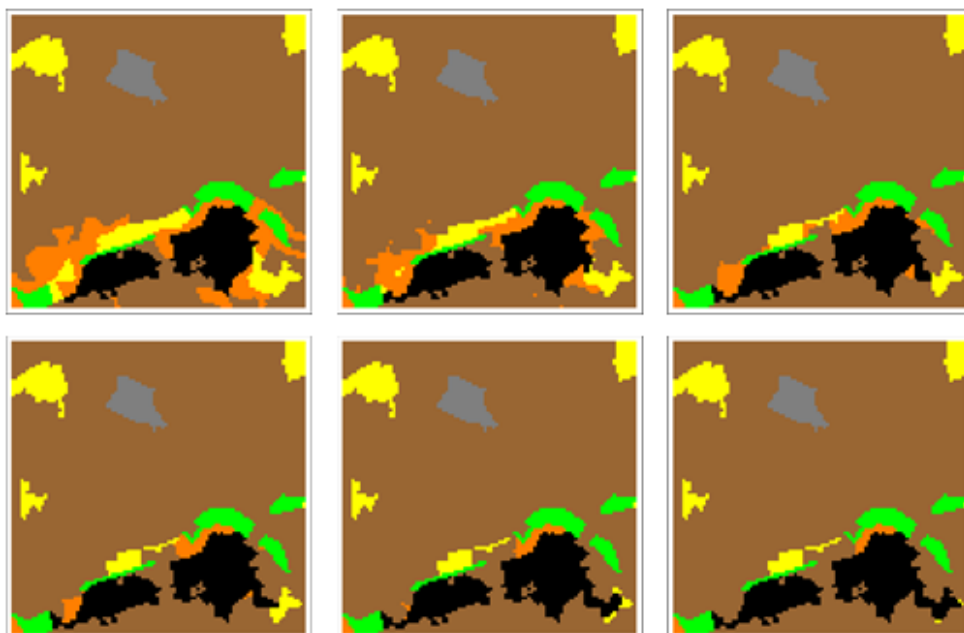


Figure 9. Represents the change processes according to U during the period of 10 ticks (tick 0 to 10 with interval 2 ticks)

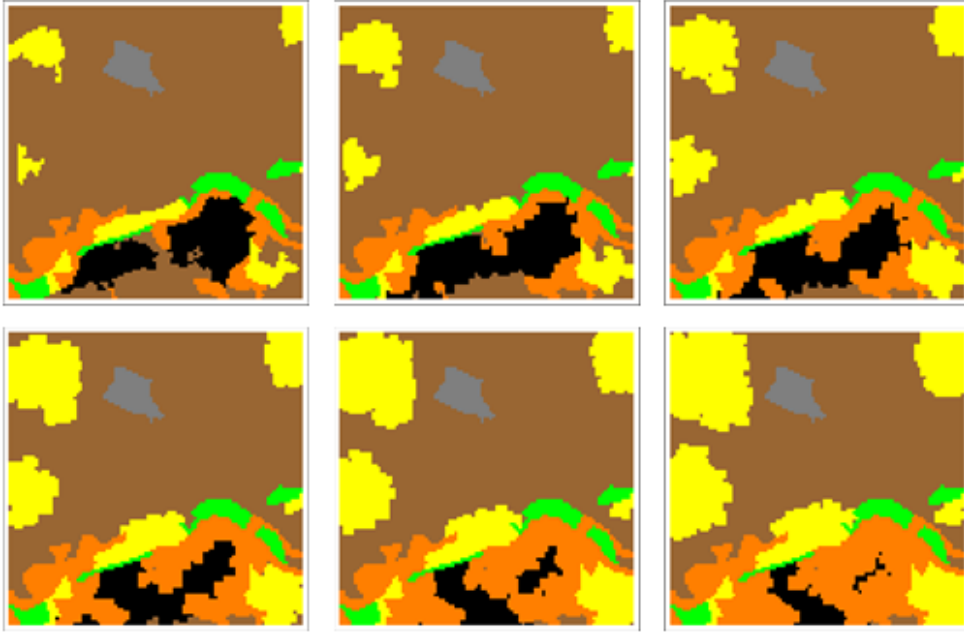


Figure 10. Representing the change processes according to L during the period of 10 ticks (tick 0 to 10 with interval 2 ticks)

6 Conclusion

Summarizing our results, we can say that the B matrix (Figure 8.) increased the heterogeneity (or diversity) the greatest level, instead of the matrix L (Figure 10.). It may be due to the fact that the B matrix has more elements than others, hence there are more propagation steps are called. Generally we can state that propagation function has an effect on the configuration (i.e. it will determine how the propagation will take place), while Booming matrix makes change in the composition (i.e. it will govern the rate of change). Thus a two-way propagation has a larger effect on heterogeneity, since then the dominance of some land cover types have a further lasting effect and the configuration can be extended. Consequently, our hypothesis is that the following matrix would increase the diversity the most (Fig. 11).

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 0 & 1 & 1 \\ 3 & 2 & 2 & 2 & 0 & 1 \\ 3 & 3 & 2 & 2 & 2 & 0 \end{pmatrix}$$

Figure 11. The best Booming matrix, which has bigger values below the diagonal increasing toward the last row's first element on the corner

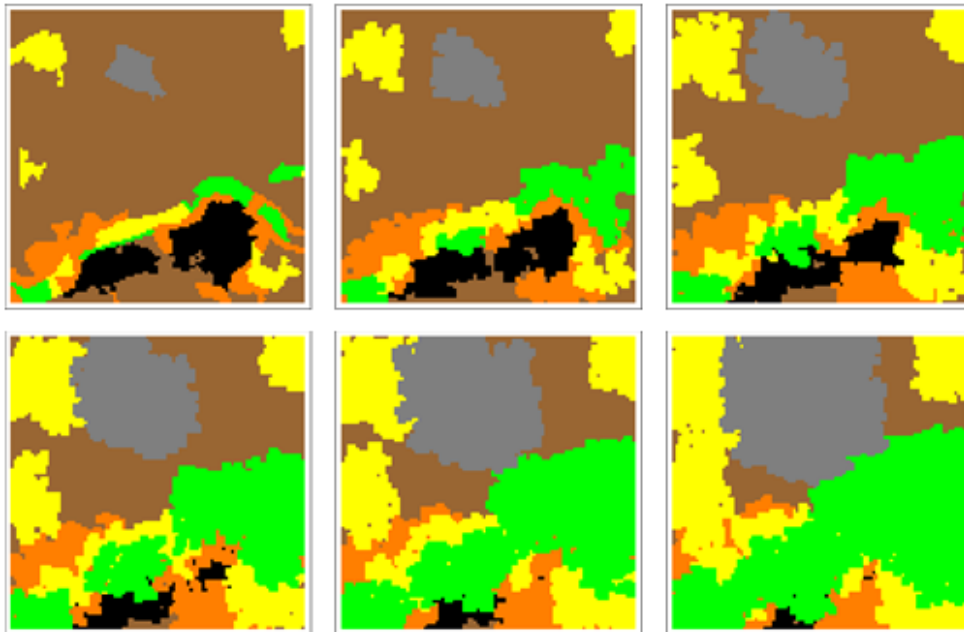


Figure 12. Simulation with the best assumed Booming matrix
(year 0 to 10 with interval 2 ticks)

We can conclude that the simulation had started efficiently and increased the diversity rapidly, but later the diversity started to decrease. Since we can say that our approaches concerning the propagation function and matrix seem to be feasible, only we have to implement a feature to supervise the simulation. Our future plan is to monitor the change process with appropriate metrics (e.g. cardinality as a composition metrics and spatial correlation as a configuration metrics) of land cover types. Therefore, our goal is to modify the values of the Booming matrix during the simulation with fine tuning to reach the maximum diversity or entropy in the least amount of time. It would correspond to achieving the largest heterogeneity close to initial state of the landscape as fast as possible. Our methods can be used for any type of land, consequently this simulation can be valuable for problematic regions, or to areas of focus in a revitalisation program.

References

- Bakshy E, Wilensky U** (2007): NetLogo-Mathematica Link. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/mathematica.html>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- Benenson I, Torrens PM** (2004): Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena, John Wiley & Sons, 312.
- Clark KC, Hoppen S, Gaydos L** (1996): Methods and techniques for rigorous calibration of a cellular automaton model of urban growth, Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling.
- European Environment Agency (EEA)** (2006): CLC 2006 technical guidelines.
- European Environment Agency (EEA)** (2014): Greening Europe's agriculture <http://www.eea.europa.eu/themes/agriculture/greening-agricultural-policy>
- McGarigal K, Marks BJ** (1995): FRAGSTATS -Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure. US Forest Service General Technical Report. 10.2737/PNW-GTR-351.
- Kornhauser D, Rand W, Wilensky U** (2007): Visualization tools for agent-based modeling in netlogo, Proceedings of the Agent 2007 Conference on Complex Interaction and Social Emergence, Evanston.
- DeSmith MJ, Goodchild MF, Longley PA** (2007) Geospatial Analysis, The Winchelsea Press, Leicester, 516.
- Urban DL, O'Neill RV, Shugart HH** (1987): Landscape ecology: a hierarchical perspective can help scientist understand spatial patterns. BioScience, 37, 119-127.
- Wilensky U** (1999): NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.

MAGYARORSZÁG ÚJ TOPOGRÁFIAI FELMÉRÉSE

*Patkó Gergely András**



New topographic mapping of Hungary – The 7th military mapping with a data content and accuracy corresponding to 1:50 000 and 1:25 000 scales, respectively is being carried out in Hungary. The technology is based on both the updating of the content and geometry-specifying of DTA-50 database. In this process the DTA-50 is becoming more consistent with the real world and a new digital mobile mapping system is being developed for field applications. The documents and primary data of the new military mapping, as well as the new field mobile mapping system (hardware, software, database, GUI) are presented. The future of topographic mapping and the experience of the practical application of the mobile mapping system are also discussed.

Keywords: topography, GIS, military mapping, DTA-50, DITAB-50



Jelenleg folyik Magyarország területén az 1:50 000 méretarányú megfelelő adattartalmú és adatsűrűségű, 1:25 000 méretarányú megfelelő pontosságú térképészeti adatbázis létrehozására irányuló, VII. katonai felmérés. A technológia alapvetően a DTA-50 adatbázis tartalmi felújítására és geometriai pontosítására épül. A munka során nem csak az új felmérés történik meg, hanem modernizálásra kerül a DTA-50 rendszere is, valamint kialakításra kerül egy digitális topográfiai adatgyűjtő rendszer. Írásomban bemutatom a térképfelújítás alapanyagait, a felméréshez használt adatgyűjtő rendszert (hardver, szoftver, adatbázis, grafikus felület), annak fejlesztését és a jövőbeni lehetőségeket. Kitérek a rendszer terepi körülmények közötti használatára és a használatból adódó tapasztalatokra.

Kulcsszavak: topográfia, térinformatika, katonai térképezés, DTA-50, DITAB-50

1 Bevezetés

A II. világháború előtti négy katonai felmérést (melyből egy a mai Magyarország területét nem érintette) az 1953-1959 közötti új felmérés követte, majd 1984-1996 között egy új felméréssel egyenértékű felújítás következett, melyet VI. felmérésnek neveztek. A jelenlegi felújítás és felmérés teljes értékű elődje ez az 1984 és 1996 közötti 1:25 000 méretarányú, Gauss-Krüger vetületi rendszerű teljes felújítás (1. táblázat). A táblázatban is használt fogalmak tisztázása érdekében meg kell említeni, hogy helyesbítésről akkor beszélhetünk, ha a térképi tartalomban csak kisebb változások következtek be, így ezeket minimális terepi munkával, csak szemrevételezéssel vagy lokális mérésekkel át tudjuk vezetni. Felújításról akkor beszélünk, ha a térképi tartalom egy része olyan mértékben változott, hogy gazdaságosabb új felmérést végezni, ugyanakkor a többi térképi tartalom nem vagy csak igen kis mértékben változott (Mélykúti 2010). A felújítás általában a síkrajzot és a hozzá tartozó domborzatot érinti.

Az 1990-ben befejeződött felújítás után mindössze két említésre méltó változás történt a katonai topográfiai térképekkel kapcsolatban: egyrészt megtörtént a digitalizálása az 1:25 000 méretarányú felújításból levezetett 1:50 000 méretarányú térképeknek, és ezzel létrejött a DTA-50 (Digitális Térképi Adatbázis). A DTA-50 alapfelülete a WGS84 ellipszoid, vetülete UTM, a magasságok balti alapszint felett értelmezettek. A 2000-es évek legelején megtörtént a DTA-50 gyorshelyesbítése.

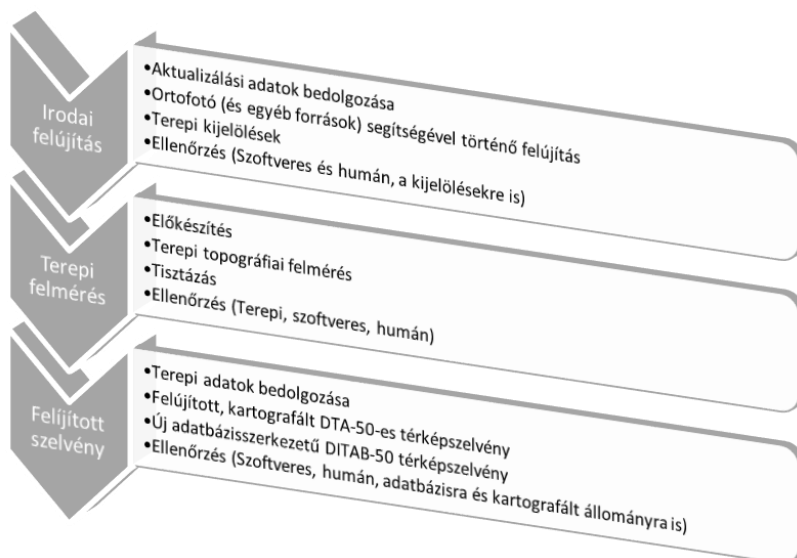
1. táblázat. Topográfia történeti áttekintése a II. világháború után (Mélykúti, 2010 alapján)

Módszer	Térképtípus, vetületi rendszer	Méretarány	Időszak
Újfelmérés	polgári, vegyes	1:10 000	1952 – 1980
Felújítás	polgári, EOVI	1:10 000	1976 – 1999
Újfelmérés	katonai, Gauss-Krüger	1:25 000	1953 – 1959
Helyesbítés	katonai, Gauss-Krüger	1:25 000	1968 – 1982
Felújítás	katonai, Gauss-Krüger	1:25 000	1984 – 1996
Helyesbítés	katonai, UTM	1:50 000	1998 – 2003

A Magyar Honvédség Geoinformációs Szolgálat (a továbbiakban: MH GEOSZ) és a Honvédelmi Minisztérium Zrínyi Térképészeti és Kommunikációs Szolgáltató Nonprofit Kft (a továbbiakban: HM Zrínyi NKft.), illetve jogelődjeinek kezdeményezése alapján, – a Honvédelmi Minisztérium utasítására – a 2010-es évek elején kezdődött el a DTA-50 adatbázis modernizációjának, az újfelmérésnek valamint egy új topográfiai adatbázis kialakításának a tervezése. Ennek a modernizációnak köszönhetően a felújított szelvények egy új adatbázisszerkezetbe fognak átkerülni, mely jobban megfelel a XXI. századi térinformatikai követelményeknek (pl.: egy szelvényhez 10 helyett már csak 1 adatbázisfájl fog tartozni). A munkák várhatóan 2019-ben fejeződnek be.

2 A munkafolyamat

A terepi felmérés megkezdése előtt az DTA-50 térképszelvényekre bontott adatállománya irodai felújításon esik át. Ez tulajdonképpen több munkafolyamatot foglal magába (1. ábra.). Az irodai felújítás legfontosabb alapanyaga az ortofotó, mely legalább 0,5 m terepi felbontású és 3 évnél nem régebbi. Ez alapján történik a legtöbb elem elhelyezkedésének javítása, régi elemek módosítása, új elemek felvétele. A munkafolyamat első lépése az aktualizálási adatbázisok alapján a nagyfeszültségű elektromos vezetékek, a gáz- és olajvezetékek nyomvonalának felvétele, frissítése, a szénhidrogén-kutak, bányatelkek, kilométerkövek, hidak ellenőrzése és számos más vasúti, közúti, közmű szakági, bányászati, közigazgatási adat bedolgozása. Ezek az aktualizálási adatbázisok olyan térinformatikai adatbázisok, melyeket más állami szervezetek, vagy vállalatok hoztak létre saját infrastruktúrájuk térbeli leltározására. Ezen adatbázisok felhasználása nagyban megkönnyíti akár a kiértékelést, akár a terepi felmérést. (Ezeket az átvett adatokat természetesen ellenőrizni kell.) Érdekességgént megjegyezhető, hogy bizonyos állami alapadatok (pl. a közigazgatási vagy természetvédelmi területek határai) automatizálva kerülnek az adatbázisba.

**1. ábra.** Munkafolyamat vázlatosan

Az aktualizálási adatbázisok és az ortofotó mellett nagy segítséget nyújt az 1:25 000 méretarányú térképszelvények szkennelt változata. Igaz ugyan, hogy ezek java része a '80-as években készült – így nagymérvű erkölcsi, tartalmi avulás jellemző rájuk – ugyanakkor mégis sok kérdéses helyzet megoldásában tudnak segíteni az ortofotó kiértékelése során. Ennek oka pedig nem másban keresendő, mint magában a DTA-50 létrehozásában. A DTA-50 ugyanis úgy jött létre, hogy az 1:25 000 méretarányú térképekből levezették az 1:50 000 méretarányú térképszelvényeket, melyeket először szkennelték, majd vektorizálták. Mind a levezetés, mind a digitalizálás, mind a vektorizálás folyamata rejthet magában hibákat, melyek később a térképen, az adatbázisban is megjelenhetnek. A felújítás során ezek előkerülhetnek és sokszor az ortofotó, valamint a régi 1:25 000 méretarányú térkép segítségével lehet őket kijavítani.

A mai térképfelújítási munkában (összevetve azt elődeink lehetőségeivel) nagy segítséget nyújt az internet. Támaszkodhatunk például a Google Earth idősoros megjelenítésére, a Street View-ra vagy egyéb interneten elérhető adatbázisokra (pl.: kunhalmok, turistautak,...). A nem állami alapadatok a terepi ellenőrzés után válhatnak az adatbázis részévé.

Az irodai munkának megvannak a maga korlátai. Sokszor ütközik a kiértékelő olyan ellentmondásba a térképen, amelyet az ortofotó és más segédanyagok sem tudnak megoldani. Továbbá számos olyan információt is tartalmaz a topográfiai térkép, amelyet csak a terepi felmérés alkalmával lehet begyűjteni. Ilyenek például az erdők adatai, az adatbázisban nem lévő hidak adatai, bizonyos objektumok magasságai, utak adatai, stb. Vannak olyan területek, amelyekről az ortofotó nem nyújt elegendő értelmezhető információt ahhoz, hogy el tudjuk dönteni, milyen elem található ott (építkezések, ritkán előforduló növényzet-típusok, stb.). Gyakran találkozunk olyan esetekkel is, amikor a különböző adatforrások ellentétes információkat adnak egy területről, objektumról. Ilyenkor mindezeket a kérdéses objektumokat a kiértékelést végző személy kijelöli terepi felmérésre. A munkafolyamatban (1. ábra) ezt nevezzük kijelölésnek.

Mindezek után kezdődhet a terepi újfelmérés. Még a terepre kiutazás előtt a topografus az irodában áttekinti, szemrevételezi, tanulmányozza a szelvényt, a felmerült kérdéseket és alkalom-adtán az aktualizálási adatbázist (ha az új, vagy nagyban segíti a terepi felmérést). Ez a művelet a „gyorsáttekintés”. Gyakran előfordul ugyanis, hogy a korábbi terepi munka tapasztalatai segítségével egyes kérdéseket már irodában meg lehet válaszolni, vagy akár bővíteni is lehet azokat, ha a topografus más nem egyértelmű dolgokat fedez fel a térképen vagy az ortofotón. A terepi felmérés tulajdonképpen egyfajta ellenőrzése is az irodában végzett munkának.

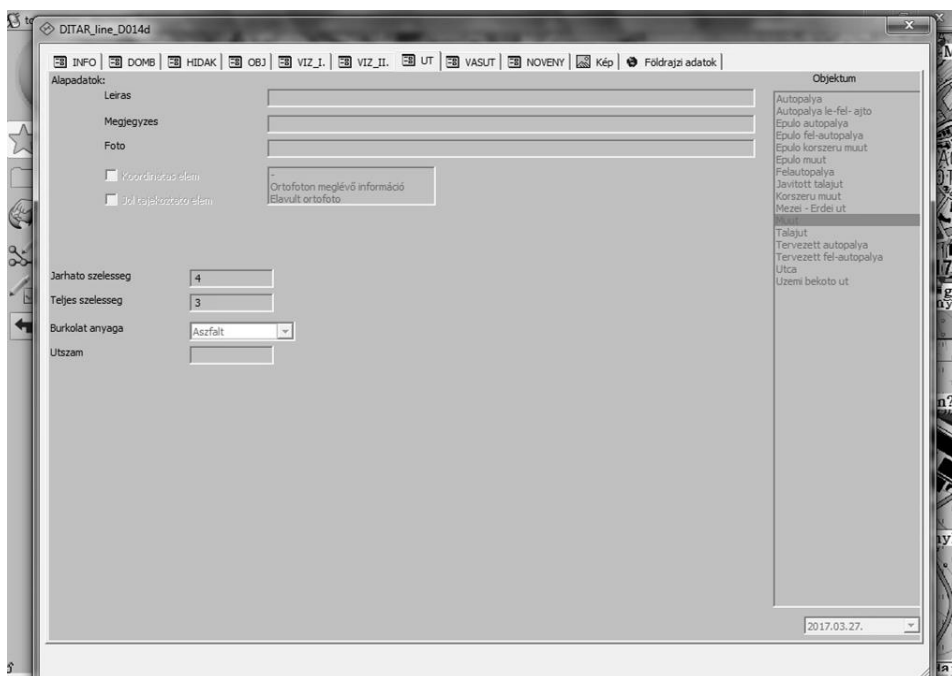
3 A DITAR

A terepi felmérés során használt rendszer a DITAR, azaz a Digitális Terepi Adatgyűjtő Rendszer. A rendszer hardverből, szoftverből (2. ábra), adatbázisból és felhasználói felületből (3. ábra) áll. A térképezés koordinátarendszere ugyan úgy az UTM 33 illetve UTM 34 szelvények rendszere, mint a DTA-50 esetében.

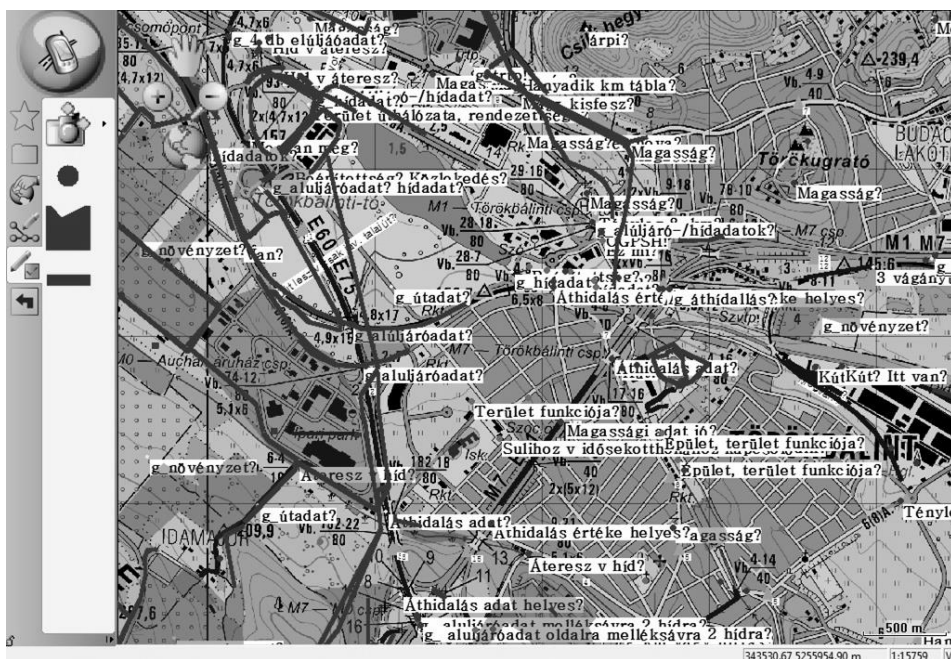
A hardver a Logic Instrument által gyártott Fieldbook B1-es tablet, egy megerősített terepi adatgyűjtő eszköz. A felmérés szempontjából fontos, hogy megerősített, azaz forráságban, extrém hidegben, porban és esőben is használható. Integrált GNSS vevője fogja a GPS és a GLONASS műholdak jeleit is, rendelkezik SBAS támogatással. A vevőre vonatkozó belső tesztelés alapján elmondható, hogy $\pm 4,5$ m-es a pontossága. Rendelkezik SIM-kártya hellyel, azaz wifi nélkül is képes internetelésre. Továbbá van benne fényképező eszköz is. A szoftver (4. ábra) az ESRI által fejlesztett ArcPad 10.2 (Kovács és Szabó 2015, 2013).



2. ábra. Hardver és szoftver használat közben



3. ábra. Felhasználó adatfelvevő felület (egy út adataival)



4. ábra. Képernyőkép terepi felmérés közben. A háttérben a szelvény előkartografált nézete látszik [1:50 000, UTM34]

Erre a külön terepi rendszerre azért van szükség, mert a DTA-50 adatbázis-struktúrája egyrészt elavult, másrészt nem teszi lehetővé a gyors terepi munkavégzést. Mivel a terepi munka jóval költségesebb, mint az irodai, törekedni kellett annak rövidítésére. Ennek érdekében került kialakításra egy új adatbázis a DITAR-hoz, amely lényegileg megfelel a DTA-50-nek, de mégis gyorsabb, könnyebb terepi munkavégzést biztosít (Patkó 2015). Ezek a könnyítések a topografusnál elsősorban a felhasználói felületnél jelennek meg. Eredménye képpen csökkent az egy elem felvételéhez szükséges kattintásszám, a félrekattintások száma, valamint letisztultta, topográfiai szemlélet szerint átláthatóbbá vált a felvételi ablak. Ezeket az eredményeket például olyan változtatásokkal is javítani lehet, mint az irodai körülmények között kiválóan működő, és a DITAR első verziójában is megtalálható legördülő menük, melyek mára kivezetésre kerültek. A rendszer mögött lévő adatbázis elsősorban úgy lett kialakítva, hogy később a felhasználói felület minél inkább megfeleljen a céloknak.

Ez az adatbázis és a hozzá tartozó GUI (grafikus felhasználói felület) folyamatos fejlesztés alatt áll. Ennek oka az, hogy ez az első alkalom Magyarországon, hogy a topográfiai felmérés elejétől a végéig digitálisan történik. Az eredetileg irodában megtervezett rendszert a gyakorlatban megszerzett tapasztalatok alapján többször is módosítani kellett. Mára elmondhatjuk, hogy a felület ténylegesen elősegíti a gyors terepi munkavégzést, de a rendszer fejlesztése továbbra is indokolt, hiszen a használat közbeni tapasztalatok alapján például tovább lehet minimalizálni a kattintások, ezzel együtt a mozgás közbeni félrekattintások számát.

Miután egy-egy szelvény terepi helyszínelése befejeződött, az irodai feldolgozás (bedolgozás) során válnak a terepen gyűjtött adatok az adatbázis részévé. Ez azt jelenti, hogy az irodai előkészítést végző személy felújítja a szelvény adatbázisát a terepről behozott adatok alapján. Ezzel le is zárul a topográfiai felmérés folyamata. A feldolgozás eredményeként válik felújítottá, újra-felmértté a topográfiai térképszelvény adattartalma.

A munkafolyamat során háromszintű tartalmi és pontossági ellenőrzést hajtunk végre. Az ellenőrzés alapja az ISO 9001 szabvány szerinti minőségbiztosítási rendszer.

Az így elkészített adattartalom egy új adatbázisba kerül. Ez az adatbázis a DITAB-50 (Digitális Topográfiai Adatbázis), mely sokkal inkább megfelel a XXI. századi térinformatika követelményeinek, mint a DTA-50. A papír alapú topográfiai térképszelvények kiadása érdekében az adatállományt kartografálni kell.

4 A fejlesztés

A topográfiai felmérés folyamatának több pontján van még lehetőség fejlesztésre. Folyamatos a DITAR rendszerének verziófejlesztése. Ezt egyrészt a terepi munka végzése során, a topografusok által gyűjtött tapasztalatok, másrészt a bedolgozást végző munkatársak jelzései segítik.

A DITAR rendszere alkalmas lehet valós idejű (real-time) felmérésre is, valamint arra, hogy a gyűjtött felmérési adatokat naponta tovább küldje a kollégáknak irodába, hiszen mind wifi-vevővel, mind SIM-kártyával rendelkezik. Erre ugyan a jelenlegi felmérés során még nincs szükség, de más típusú munkák, más méretarányok vagy egy következő helyesbítés során már hasznos lehet ez a lehetőség. Van rá példa, hogy a rendszert egy másik adatbázissal és felhasználói felülettel más munkára is felhasználta a HM Zrínyi NKft.

További kutatás kérdése lehet az, hogy érdemes-e a felhasználói felületet – a mai korban népszerű – csempés megoldásra alakítani. Ezt a megoldást többek között a Microsoft vezette be a Windows 8 operációs rendszerében, hogy a telepített szoftverek, és egyéb funkciókat, mappákat egy palettáról csempékre kattintva lehet elérni. Ez nagyban gyorsíthatja a terepi felmérés menetét. Továbbá a fejlesztési trendek abba az irányba mutatnak, hogy a terepi adatgyűjtés már nem csak Windows-os operációs rendszeren, hanem akár Androidon is folyhat. A DITAR fejlesztését megelőző kutatásoknál még nem találtunk erre megfelelő hardvert és szoftvert, de ez nem zárja ki, hogy a későbbiekben, ne térhessünk át erre az amúgy sokszor egyszerűbben beszerezhető, fenntartható és pótolható technológiára.

5 A jövő

A topográfia jövőjéről elmondható, hogy továbbra is szükség van friss topográfiai térképekre mind a katonai tevékenységek során, mind a hétköznapi életben. Települmérnökként több mérnöki, szakmai tárgy esetében találkoztam azzal a ténnyel, hogy a tervezés végrehajtásához esszenciálisan fontos a topográfiai térkép. Ez minden olyan esetben igaz, mikor túllépünk egy-egy település szintjén és települések között, regionálisan vagy országos szinten kell terveznünk (Patkó 2015).

Annak érdekében, hogy a topográfiai térképek felújításának eredményeit gazdaságilag is kiaknázzuk, szükséges egyrészt keresleti oldalról piackutatást végezni. Azaz meg kell vizsgálni, mely elemek lehetnek azok, melyek eddig a topográfia történetében nem voltak részei a térképnek, de mutatkozik rájuk igény (pl.: kerékpárutak, országos jelentőségű túraútvonalak, elektromos töltőállomások, stb.).

Arról sem szabad elfeledkezni, hogy a térképek sokszor, mind díszítő elemek jelennek meg a piacon. Ezek esetében sem szerencsés, ha elavult az alapanyagnak számító térképi állomány. Ilyen dekorációs elemek például a dombortérképek és a naptárak.

A civil szféra igényei mellett gondolnunk kell arra, hogy a DITAB-nak a katonai térképek készítését is szolgálnia kell. Friss térképekre mindig szükségük van a katonáknak, hiszen a hadviselés technológiája folyamatosan változik. Ezekhez a változásokhoz új térképészeti igények párosulnak, melyek kielégítése csak akkor lehetséges, ha maguk a felhasználók, a katonák is ismerik felhasználói szinten a modern térképészet, a térinformatika lehetőségeit. Az IBH (Ideiglenes Biztonsági Határzár) kiépítésénél is sokszor jelentett problémát a rendelkezésre álló térképek elavultsága.

Végül, de nem utolsó sorban beszélni kell arról, hogy a térinformatika fejlődésével, milyen jövője van a topográfiában a kartografált térképszelvényeknek. Egyáltalán meddig állja meg a helyét a szelvények rendszerében való gondolkodás. A kartografálás automatizáltsága egyre hatékonyabb, de egyelőre sok humán utómunkát követel. Az előző topográfiai felmérés még abszolút hagyományos, papíralapú felmérés volt. Ott a topografusnak kellett döntenie arról – a terepen – hogy mi fog ráférni a térképre az adott méretarányban. Mai gondolkodásunk túlmutat ezen. Ha egy felhasználónak például nincs szüksége híd- vagy erdőadatokra, az eredményezheti azt, hogy más, jól tájékoztató elemek (pl.: kereszt, kisértékvezeték), melyek a generalizálás során a helyhiány miatt eltűnnének, hasznosak lehetnének számára, azaz visszakérülhetnének a térképre. A korábbi térképészeti szabályok szerint az előbb leírt esetben változik a térkép célja. Ugyanakkor, ha változik a térkép célja, akkor a generalizálás szabályait is különböző súllyal és sorrendben kell alkalmazni (Klinghammer 2015).

Véleményem szerint számos fejlesztési lehetőség van, mind a terepi felmérés, mind az előkészítés, mind az adatbázis-szerkezet, mind a felhasználás tekintetében.

Hivatkozások

- Kovács E, Szabó T** (2015): Digitális Terepi Adatgyűjtő Rendszer (DITAR) fejlesztése, rendszerbeállítása és használata. *Geodézia és Kartográfia*, 67(5-6), 14-20.
- Kovács E, Szabó T** (2013): Terepi Adatgyűjtési Rendszer Fejlesztési Dokumentáció. HM. Zrínyi Térképészeti és Kommunikációs Szolgáltató Közhasznú Nonprofit Kft., 5-30.
- Klinghammer I** (2015): A kartográfia alapjairól: a generalizálás. *Geodézia és Kartográfia*, 67(1-2), 7-10.
- Mélykúti G** (2010): Topográfia. Nyugat-magyarországi Egyetem, Egyetemi jegyzet, Székesfehérvár.
- Patkó G** (2015): Magyarország korszerű topográfiai felmérése, Debreceni Egyetem, Diplomamunka.

TROPOSZFÉRA MODELLEK PONTOSSÁGVIZSGÁLATA A SUGÁRKÖVETÉS MÓDSZERÉVEL

Juni Ildikó*, Rózsa Szabolcs*



Analysing the accuracy of tropospheric delay models using the ray tracing method – The electrically neutral zone in the atmosphere cause significant signal delay in the observations of the global navigation satellite systems (GNSS). Various models can be used to calculate these effects for the proper processing of satellite-receiver ranges used for navigation or even geodetic applications. Usually these models provide the delay in the zenith direction, which is later converted to slant satellite-receiver delay using the mapping functions based on either standard atmosphere models or numerical weather models (NWM). When atmospheric profile observations of meteorological parameters (air pressure, temperature, dew point) are available, even the slant delays can be directly calculated using ray tracing. This paper studies its application in atmospheric profiles obtained from radiosonde observations. The results are used to study the accuracy of the most commonly used tropospheric models in GNSS processing, such as GPT2W and ESA GALTROPO models. The studies showed that the delays computed from the analysed models agree well with the data derived ray tracing procedure at higher elevation angles. The mean residuals of the modelled values are between $-0.1 - 0.4$ m. However the good agreement is not true for the lower elevation angles. The average differences are nearly 4 m and 3 m for the ESA and the GPT2W models, respectively, at the elevation angle of 2° . The results showed that GPT2W is considerably more accurate of the two analysed models below the elevation angle of 10° .

Keywords: troposphere model, ray tracing method, radiosonde, tropospheric delay

A globális helymeghatározó rendszereknél a troposzféra és a felette lévő elektromosan semleges légköri zóna jelentős jelkésleltetést okoz. A geodéziai és navigációs célú mérések feldolgozása során a troposzférikus késleltetés meghatározására különböző modellek használhatók fel. Ezeknél a zenitirányú késleltetés műhold irányúra számítható, a használt leképzési függvények viszont valamilyen sztenderd atmoszféra modellen vagy pedig numerikus időjárási modellen alapulnak. Ha rendelkezésre állnak a meteorológiai állapothatározók (pl. légnyomás, hőmérséklet, harmatpont) vertikális profiljai, akkor a troposzférikus késleltetés közvetlenül is meghatározható a sugárkövetés eljárásával. Tanulmányunkban ennek az eljárásnak az alkalmazását mutatjuk be rádiószondás méréseket felhasználva. Eredményeinket a geodéziai helymeghatározásban leggyakrabban használt troposzférikus késleltetés modellek pontosságvizsgálatához alkalmaztuk: GPT2W illetve ESA GALTROPO modellje. A vizsgálatok kimutatták, hogy nagyobb magassági szögek esetén az elemzett modellek jól közelítik a sugárkövetés eljárásával meghatározott referenciaértékeket, a vizsgált modellek referenciamodelltől vett eltéréseinek átlagértékei $-0.1 - 0.4$ m között alakulnak. Alacsonyabb magassági szögeknél ez már nem mondható el, az átlagos eltérések 2° -nál az ESA modellnél 4 m, míg a GPT2W-nél 3 m-t éppen meghaladó. 10° alatt a két modell közül a GPT2W-vel számottevően pontosabb eredményt kapunk.

Kulcsszavak: troposzféra modell, sugárkövetés módszere, rádiószonda, troposzférikus késleltetés

1 Bevezetés

Életünknek szinte mindennapos részévé vált a globális műholdas navigációs rendszerek (GNSS) használata. A troposzféra és a felette található elektromosan semleges légköri réteg jelentős jelkésleltetést okoz a GNSS rendszerek távméréseire, ami a horizonthoz közeledve ugrásszerűen megnő.

A troposzférikus késleltetés a geodéziai és a navigációs méréseknél különböző troposzféra modellek alapján határozható meg. Célunk ezek közül néhány, a helymeghatározásban leggyakrabban alkalmazott modell pontosságvizsgálata mért atmoszférikus profilok felhasználásával.

Az atmoszférikus profilokból a sugárkövetés eljárását alkalmazva referencia értékeket határozunk meg a műhold-vevő távolságokra kifejtett késleltetések értékére, majd ezeket összevetjük a vizsgált modellek által becsült értékekkel. A sugárkövetés módszerénél rádiószondás mérések illetve nagyobb magasságban a sztenderd atmoszféra adatait vesszük figyelembe.

Elemezzük, hogy a különféle módszerekkel előállított késleltetések egyrésről milyen nagyságú hatást fejtenek ki az észlelésekre, másrésről vizsgáljuk a modellek pontosságát, amely során kitérünk a műhold magassági szögének, illetve a meteorológiai adatok szezonális változásainak hatására is.

2 A troposzféra, troposzféra modellek

A légkört a mikrohullámú jelterjedés szempontjából két részre oszthatjuk, a troposzférára és az ionoszférára. A troposzféra a legsalsó, átlagosan 10 km vastag réteg, itt található a légkör tömegének jelentős része és a benne lévő vízpára teljes mennyisége is. Smith és Weintraub (1953) szerint a troposzférikus késleltetést külön számíthatjuk a hidrosztatikus egyensúlyban lévő levegőre és a vízpára hatására, így beszélhetünk hidrosztatikus és nedves troposzférikus késleltetésről. A kétfajta késleltetés összege adja meg a teljes troposzférikus késleltetés nagyságát.

A késleltetések megadására különféle modelleket használhatunk, ilyenek többek között a Hopfield, a Black, a Saastamoinen, a finomított Saastamoinen, az ESA Galileo troposzféra modellje illetve a GPT2 és a GPT2W, utóbbiak meteorológia paraméter modellek, amelyeket az Askne-Nordius troposzféra modellben alkalmazunk. Az elemzésekhez ezek közül egy klasszikust, a Saastamoinen-t valamint a közelmúltban kifejlesztett modelleket választottunk: a GPT2 továbbfejlesztését a GPT2W-t valamint a Galileo műholdrendszerénél alkalmazandó ESA-t. Továbbiakban csak a vizsgálatban résztvevőket mutatjuk be részletesen.

2.1 Saastamoinen modell

A troposzféra modellek többségével a zenitirányú késleltetést határozzuk meg, amit aztán a modellekhez tartozó leképzési függvényekkel átszámítunk a műhold irányára. Ezekkel ellentétben a Saastamoinen modellel (Saastamoinen 1973) már a tényleges műholdirányú troposzférikus késleltetés is meghatározható:

$$TD_{Saas} = \frac{0.002277}{\cos z} \cdot \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) \cdot e - \tan^2 z \right], \quad (1)$$

ahol z a műhold irányának zenitszőge, p a nyomás, T a hőmérséklet és e a vízgőz parciális párányomása. Meg kell említenünk, hogy (1)-nél pontosabb késleltetés értéket kaphatunk, ha a Saastamoinen-modellt csak a zenitirányú késleltetés meghatározására használjuk külön-külön a hidrosztatikus (ZHD) és a vízpára okozta összetevőre (ZWD):

$$ZHD_{Saas} = \frac{0.0022768 \cdot p}{1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0.00000028 \cdot h}, \quad (2)$$

$$ZWD_{Saas} = 0.002277 \cdot \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) \cdot e, \quad (3)$$

ahol φ a földrajzi szélesség és h a tengerszint feletti magasság. Ezek után a Niell leképzési függvény segítségével számítjuk ki a műhold irányú hatás mértékét:

$$F_{h,w}(E) = \frac{1 + \frac{a_{h,w}}{1 + \frac{b_{h,w}}{1 + c_{h,w}}}}{\sin E + \frac{a_{h,w}}{\sin E + \frac{b_{h,w}}{\sin E + c_{h,w}}}}, \quad (4)$$

ahol $F_{h,w}(E)$ a hidrosztatikus és a vízpára okozta késleltetés leképzési függvénye, a képletben szereplő a , b és c együtthatók eltérők a két esetben. A hidrosztatikus késleltetés esetén a_h , b_h és c_h míg a nedves leképzési függvényben a_w , b_w és c_w értékek megadhatók a földrajzi szélesség, a tengerszint feletti magasság és a felszíni hőmérséklet függvényeként.

2.2 A GPT2 és GPT2W modellek

A GPT2 egy földfelszíni meteorológiai paraméter modell, amelyben a meteorológiai adatokat az European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központ) értékei alapján számítják a havi közepes profilokból, 1° -os vízszintes felbontással, a 2001-2010-es időszak felhasználásával. A felszíni meteorológiai paraméterek modellezése az évi, sőt a féléves változásokat is becsli, ezzel növelve a pontosságot. A régebbi modellek kiátlagolják ezeket és az év minden napjára ugyanakkora paramétereket használnak. A GPT2 modell a Saastamoinen modellnél már megismert (2)-es és (3)-as képleteket használja a zenitirányú késleltetések számítására, de a VMF1 (Boehm és Schuh 2003) leképzési függvényt alkalmazza a Niell helyett. A GPT2 modell hátránya volt, hogy nem vonta be a számításokba a vízgőz gradiensét, a GPT2W modell – a GPT2 továbbfejlesztése – már ezt is figyelembe veszi. A hidrosztatikus késleltetést változatlanul a (2)-es képlettel kapjuk, míg a nedves érték (Askne és Nordius 1987):

$$ZWD_{GPT2W} = 10^{-6} \cdot \left(k'_2 + \frac{k_3}{T_m} \right) \cdot \frac{R_d}{(\lambda + 1) \cdot g_m} \cdot e_s, \quad (5)$$

ahol $k'_2 = 16.5221 \text{ K/hPa}$ és $k_3 = 377600 \text{ K}^2/\text{hPa}$ tapasztalati konstansok, illetve T_m a vízgőz középhőmérséklete, R_d a száraz levegő specifikus gázállandója, g_m a gravitációs gyorsulás középértéke, e_s a vízgőz felszíni parciális párányomása és λ a vízgőz gradiense. A GPT2W változatlanul a VMF1 leképzési függvényt használja a nem zenitirányú késleltetések meghatározásához.

2.3 Az ESA Galileo troposzféra modellje

A modellt Martellucci (2002) alapján ismertetjük. A szabványos Galileo vevőket nem szerelik fel meteorológiai szenzorokkal és a rendszer sem sugároz troposzférára vonatkozó paramétereket a navigációs üzenetben. Egy troposzféra modellt alkalmaznak, általános bemeneti adatokkal, mint például a földrajzi szélesség, a hosszúság, a tengerszint feletti magasság, hogy az adott nap hányadik az évben. Majd ezek alapján 21 darab ERA15 klimatológiai térképet használva meghatározhatók a számításokhoz szükséges meteorológiai paraméterek: a felszíni nyomás (p_s), a vízgőz felszíni parciális párányomása (e_s), vízgőz gradiense (λ), a hőmérsékleti gradiens (α_m) és a felszíni hőmérséklete (T_s). Többek között az utóbbi tényezők szükségesek az ESA hidrosztatikus és nedves zenitirányú késleltetések megadásához, ami hasonló az RTCA-MOPS troposzféra modell formuláihoz:

$$ZHD_{ESA} = 10^{-6} \cdot k_1 \cdot \frac{R_d \cdot p_s}{g_m}, \quad (6)$$

$$ZWD_{ESA} = \frac{10^{-6} \cdot k_2 \cdot R_d \cdot e_s}{g_m \cdot (\lambda + 1) \cdot T_{ms}}, \quad (7)$$

ahol $k_1=77,604 \text{ K/hPa}$ és $k_2=370100 \text{ K}^2/\text{hPa}$ tapasztalati konstansok, g_{ml} a helyi gravitációs gyorsulás, ami a földrajzi szélesség és a tengerszint feletti magasság függvénye. T_{ms} a vízgőz felszíni hőmérsékletének középértéke, függ a felszíni hőmérséklettől, hőmérsékleti gradienstől, a száraz levegő specifikus gázállandójától és a helyi gravitációs gyorsulástól. A zenitirányú késleltetés műholdirányúra számításához a Niell leképzési függvényt alkalmazza az ESA. A modell a felszíni meteorológiai paramétereket az éves és napi változásokat modellezve becslék, így a GPT2W-höz hasonló pontosság érhető el.

3 Felhasznált adatok

A troposzférikus késleltetés számításához egyrészt rádiószonda által gyűjtött adatokat használunk. A jelterjedésre a troposzféra mellett a felette található elektromosan semleges légköri zóna is hatással van, így annak adatait is bevonjuk a számításokba.

3.1 Rádiószondás mérések adatai

A rádiószonda egy ballonból és ezzel a ballonnal a légkörbe emelt műszerekből áll, amely a mért értékeket egy rádióadóval juttatja az észlelő állomásra. Rádiószondával közvetlenül mérjük a lég hőmérsékletet, a légnyomást, a légnedvességet, a szélirányt és a szélsébséget a troposzférában és a sztratoszféra alacsonyabb részein is (Horváth et al. 2014). Magyarországon két rádiószondákat felbocsájtó meteorológiai állomás, azaz rádiószonda állomás van: Szeged és Budapest Pestszentlőrinc, mindkettő Vaisala RS92-SGP (Vaisala 2015) szondát használ. Szegedről egyet, míg Pestszentlőrincről napi két észlelést végeznek. Számításainkat a pestszentlőrinci állomás, 2014. július 1. és 2014. augusztus 31 közötti méréseivel végeztük el, átlagosan napi 2 rádiószonda felbocsájtás fájljait futtatva, összesen 124 észlelést feldolgozva. Az adatok ingyenesen letölthetők NOAA/ESRL rádiószonda adatbázisból.

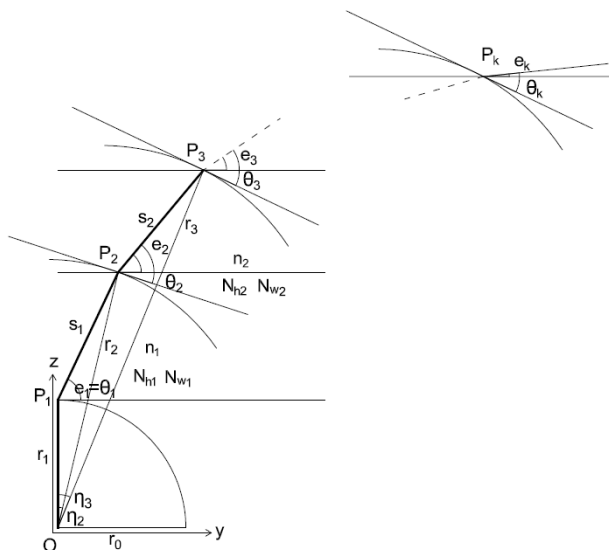
Alacsonyabb nyomáson – nagy magasságban - lévő mérések jelentősen növelik a költségeket, másfelől gyorsan nő a hőmérsékletmérés hibája is. Ezek befolyásolják a ballon maximális mérési magasságát, ami általában 35 km, de előfordul, hogy csak 25 km. A ballon mérete – a csökkenő légnyomás mellett- egyre nő, majd kipukkad és visszazuhan a Földre.

3.2 International Standard Atmosphere (ISA) adatok

A rádiószondás adatok megszűnésétől - körülbelül 33-36 km-es magasságtól - az ISA adatokat vesszük figyelembe. Vizsgálatok (Rózsa et al. 2012) kimutatták, hogy az ISA adatokkal meghatározott magasabb légrétegek is cm-es nagyságrendű troposzféra késleltetést jelentenek. A számításainkat így egészen 86000 km-ig kiterjeszthetjük (ISO 2533: 1975 szabvány). Az ISA egy légköri modell, ami leírja, hogyan változik a Föld légkörének nyomása, hőmérséklete, sűrűsége és viszkozitása a magasságtól függően. A Nemzetközi Szabványügyi Szervezet (ISO) teszi közzé, mint egy nemzetközi szabványt, az ISO 2533: 1975 néven.

4 A sugárkövetés módszere

A sugárkövetés módszerét Boehm és Schuh (2003) és a számításnál alkalmazott lépések alapján tekintjük át. A módszer homogén egymás felett elhelyezkedő, eltérő jellemzőkkel rendelkező légrétegeket feltételez (1. ábra).



1. ábra. A sugárkövetés módszere Boehm és Schuh (2003) alapján

A Föld felszínéről tetszőleges magassági szöggel induló sugár az első rétegváltozásnál a Snellius-Descartes törvénynek megfelelően megtörik és új irányba folytatja útját. A további rétegváltozásoknál ez ismétlődik és ezek a tört sugárhosszak minden légrétegnél számíthatók. Emellett meghatározhatók a hidrosztatikus és a nedves refraktivitás értékek is a rétegekben. A teljes troposzférikus késleltetés a tört sugárhosszak és a refraktivitások szorzatösszegeként számítható. A sugárkövetés számításához a rádiószondás és nagyobb magasságban az ISA adatokat használjuk. A módszerhez megadott sűrűségben szükségesek a meteorológiai paraméterek, hogy a leírt numerikus integrálás minél pontosabb eredményt adjon. A számításokat a MATLAB R2014a segítségével végeztük el.

4.1 A rádiószondás mérések felhasználása

A rádiószondás mérések FSL formátumú fájljait használtuk fel a számításokhoz. Ezekben a fejléc - az első négy sor - a mérés főbb információit tartalmazza, többek között itt szerepel az észlelés dátuma, a szonda indításának pontos ideje, a rádiószondaállomás WMO azonosítója és helye (földrajzi szélesség és hosszúság) valamint az alkalmazott rádiószonda kódja. Ezután következnek az adatsorok, amelynek oszlopai a sorazonosítót, a nyomást, a magasságot, a hőmérsékletet, a harmatpontot a szél irányát illetve sebességét tartalmazzák. A fejléc adatai mellett a meteorológiai adatok közül a nyomást, a magasságot, a hőmérsékletet illetve a harmatpontot használtuk fel. Valamint bevontuk a számításba a harmatpont hőmérséklete alapján számított parciális párányomás értékét is.

4.2 Az ISA adatok bevonása

A számításokhoz a geometriai magasságot, a hőmérsékletet, a légköri nyomást alkalmaztuk. Mivel az ISA adatait csak a rádiószonda mérések legfelső szintje – általában 33-36 km – felett vesszük figyelembe, ezért a parciális párányomás nagyságát innentől zérusnak tekintjük. Ezeket az adatokat a rádiószondás mérésekkel összevonjuk, az utolsó rádiószondás mérés magassága feletti adatoktól az ISA adatait az előzőkhöz kapcsoljuk.

4.3 A meteorológiai paraméterek sűrítése, interpolálás

Az így rendelkezésünkre álló adatok alapján bizonyos magasságokban ismerjük a hőmérséklet, a légnyomás, a harmatpont és a vízgőz parciális párányomásának értékeit. A sugárkövetés numerikus megoldása azonban ezeknél sűrűbb adatokat igényel, ezért az előbb említett meteorológiai állapotváltozókat interpoláltuk. A sűrített hőmérséklet értékeket lineáris interpolációval számítottuk, míg a légnyomást és a vízgőz parciális párányomását exponenciálisan interpoláltuk, hiszen ezek vertikális változását a fizikai összefüggések alapján az exponenciális függvény írja le megfelelően.

4.4 A refraktivitás számítása

A refraktivitás számításánál Ádám et al. (2004)-nél levezetett képleteket alkalmaztuk. A hidrosztatikus refraktivitás a következő képlettel írható fel:

$$N_h = k_1 \cdot \frac{R}{M_d} \cdot \rho, \quad (8)$$

ahol k_1 tapasztalati konstans, értéke: 0.77604 K/Pa, $R=8.314$ J/(mol*K) az egyetemes gázállandó, $M_d=0.0289644$ kg/mol a száraz levegő moláris tömege, ρ a levegő sűrűsége.

A nedves refraktivitás is levezethető:

$$N_w = \left(k_2 - k_1 \cdot \frac{M_w}{M_d} \right) \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2}, \quad (9)$$

ahol k_2, k_3 tapasztalati konstansok, értékük 0.64790 K/Pa és 3776 K²/Pa, $M_w=0.0180152$ kg/mol a nedves levegő moláris tömege. A refraktivitás számítható a hidrosztatikus és nedves refraktivitások összegeként. A refraktivitás segítségével kifejezhető a törésmutató, minden egyes - a magassági felbontással megadott – légköri rétegre:

$$n = \frac{N}{10^6} + 1. \quad (10)$$

4.5 A sugárkövetés számítása

A számításokhoz most már rendelkezésünkre áll a besűrített magassági szintek közötti légrétegeknek a refraktivitása és a törésmutatója. A rétegek jellemzői alapján nyomon tudjuk követni a fénysugár útját. A számításokat bármilyen nem negatív magassági szöggel indíthatjuk, amely az első két légréteg határán megtörik a Snellius-Descartes törvénynek megfelelően, majd az újabb rétegváltásnál ismét irányt vált és így tovább. A troposzferikus késleltetés számításához minden egyes rétegben meghatározzuk a jel ténylegesen megtett útját. Az első rétegváltás jellemzői speciálisak, de utána analóg módon végezhető a számítás. A hidrosztatikus troposzferikus késleltetést a rétegekben kialakult úthosszak és a megfelelő hidrosztatikus refraktivitások szorzatösszege adja meg. A nedves troposzferikus késleltetés a nedves refraktivitás segítségével fejezhető ki. A két képlet együtt felírva:

$$ds_{h,w} = \sum_{i=1}^{k-1} s_i \cdot N_{h,w i}. \quad (11)$$

A számítás részletes menetét Boehm és Schuh (2003) tartalmazza.

A számításokat 2014. július 1. és 2014. augusztus 31. közötti időszakra végeztük el, - 2 esettől eltekintve - napi 2 rádiószonda felbocsájtás állományait futtatva. Így 124 észlelés adatait használtuk fel, több magassági szög - 2°, 5°, 8°, 10°, 15°, 20°, 30°, 60°, és 90° - esetén is kiszámítottuk a késleltetés értékeit, amelyeket a későbbiekben az egyes troposzféra modellek pontosságvizsgálatához használtunk fel referenciaértékként.

5 A vizsgált troposzféra modellek számítása

A troposzféra modellek általában empirikus modellek, amelyek a troposzferikus késleltetéseket a vevő környezetre érvényes meteorológiai paraméterek (hőmérséklet, légnyomás, páratartalom) alapján határozzák meg. A modelleket felhasználhatjuk „vak” illetve „kiegészítő” üzemmódban is. Az előbbi esetben mért meteorológiai paraméterek nem állnak rendelkezésünkre, így egyes modelleknél a sztenderd atmoszféra modellekből számított meteorológiai paraméterekkel (pl. Saastamoinen) míg másoknál a troposzféra modellbe illesztett empirikus meteorológiai paraméterek felhasználásával végezhetjük el a számításokat (GPT2W, ESA Galileo) „Kiegészítő” üzemmódban a vevő közelében mért meteorológiai paraméterek segítik a nagyobb pontosságú késleltetések meghatározását. A Saastamoinen modell számításánál felszíni rádiószondás méréseket használtunk fel, így ez most nem vak modell, a GPT2W-t és az ESA-t vak modellként futtattuk le. Az ESA Galileo modelljének és a GPT2W-nek a számítását már megírt MATLAB scriptekkel végeztük el. Martellucci és Blarmino (2003) valamint Lagler és Boehm (2012) alapján. A GPT2W és ESA Galileo modelljeivel a hidrosztatikus és a nedves késleltetések értékei külön megadhatók, míg a Saastamoinen modellel csak a teljes troposzferikus késleltetés.

6 Az eredmények ábrázolása

Mint ahogy a számítást, úgy az eredmények ábrázolását is MATLAB R2014a-val végeztük. Elemeztük, hogy egy észlelésnek az eredményei hogy alakulnak különböző magassági szögek esetén, majd számítottuk a vizsgált modellek sugárkövetéstől vett eltéréseinek statisztikai jellemzőit. Végül megvizsgáltuk az összes észlelésből kapott teljes késleltetéseket néhány magassági szög függvényében.

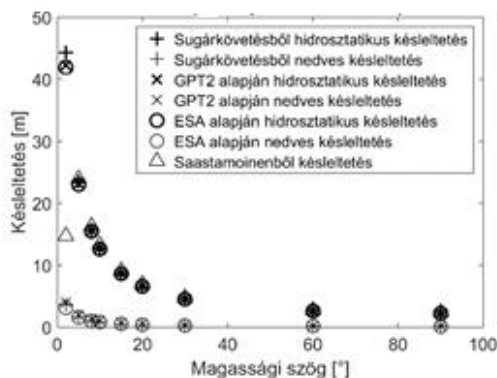
6.1 Késleltetések és a sugárelhajlás jellemzőinek egy észlelésre vonatkozó vizsgálata

Először megvizsgáltuk, hogyan függnek az egyes modellekből számított hidrosztatikus, nedves és teljes késleltetések a magassági szögtől. Az eredmények kimutatták, hogy a késleltetés nagysága jelentősen nő a horizonthoz közeledve.

Az 2. ábrán megjelenítettük az összes késleltetést, amit 2014.07.02-án 12 órás észlelés esetén számítottunk ki. Látható, hogy a hidrosztatikus és nedves késleltetések értéke egy nagyságrenddel eltér egymástól. Arról ne feledkezzünk meg, hogy a többi modellel ellentétben a Saastamoinen modellnél a teljes késleltetést mutatja az ábra, ezért magasabbak az értékei. Az is megfigyelhető, hogy a magassági szög csökkenésével nőnek a különböző modellek hidrosztatikus és nedves értékei. A Saastamoinennél viszont az tapasztalható, hogy ez a növekedés visszaesik 5° után, 2°-nál a vártnál jóval alacsonyabb késleltetést kaptunk. Megvizsgáltuk más észlelési időpontra is a késleltetéseket, de 2°-nál ismét lecsökkent a Saastamoinen eredménye. Így megvizsgáltuk hogyan alakulnak pontosan a késleltetések ennél a modellnél az alacsonyabb magassági szögek esetén.

Az 1. táblázatban az látható, hogy 3°-ig emelkedtek az értékek, majd utána hirtelen esni kezdenek és egy idő után már negatív számot kapunk. Ennek oka, hogy az (1)-es képletben a $\tan^2 \theta$ tag nagyobb lesz, mint a $p + \left(\frac{1255}{T} + 0.05\right) \cdot e$, így a zárójeles mennyiségből negatív értékhez jutunk. Az eredmények alapján kijelenthető, 3° alatt semmiképpen nem használható ez a modell.

A továbbiakban a nagyságrendbeli eltérések miatt külön vizsgáltuk a hidrosztatikus és nedves késleltetéseket. A 3.a. ábrán a hidrosztatikus troposzferikus késleltetéseket jelenítettük meg. Megfigyelhető, hogy a GPT2W és ESA modellek is nagyobb magassági szögeknél a sugárkövetéssel majdnem egyező eredményt adnak, de 10° alatt már jelentős az eltérés. Az ábra alapján viszont nem olvashattunk le elég pontos eredményt a modellek különbségeiről.



2. ábra. Troposzférikus késléltetések magassági szögtől való függése 2014.07.02. 12-kor

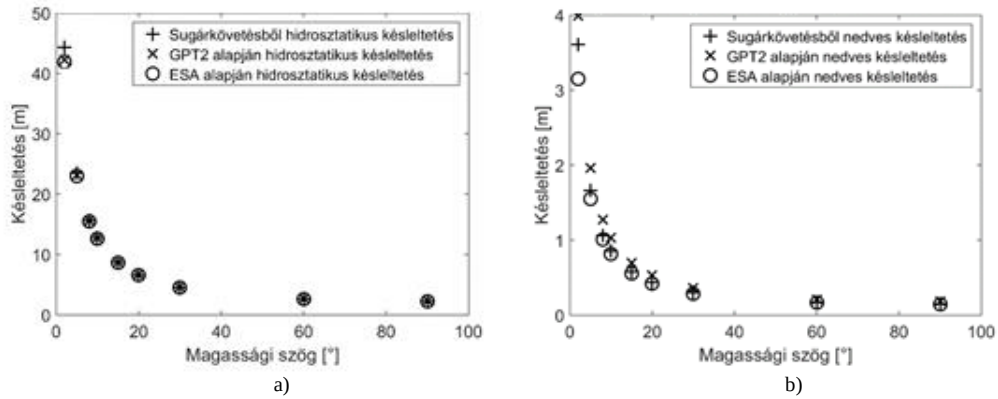
1. táblázat. A Saastamoinen modellből kapott késléltetésértékek alacsony magassági szögeknél 2014.07.02-án 12 órakor

magassági szög [°]	Saastamoinen modell késléltetés értéke [m]
5	23.91
3	29.66
2.9	29.53
2.8	29.26
2.5	27.21
2	14.73
1.5	-35.89
1	-291.77

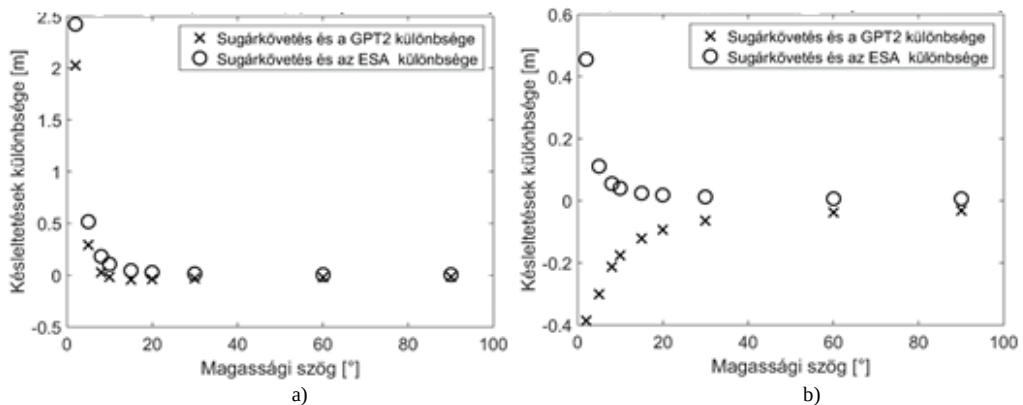
A 3.b. ábra a nedves késléltetéseit a 3.a. ábrával összevetve jól látszik a nagyságrendbeli különbség. Emellett a nedves értékek jobban eltérnek egymástól, már a nagyobb magassági szögek esetén is, ennek az oka, hogy a nedves rész becslése bizonytalanabb, mint a hidrosztatikusé. Látható még, hogy a GPT2W és ESA modellje ellentétes irányban térnek el a sugárkövetéses eredményektől.

Pontosabb következtetések levonásához előállítottuk a hidrosztatikus és a nedves késléltetések esetén is a referenciamodellnek tekinthető sugárkövetéses modellről vett eltéréseket a GPT2W és az ESA modell esetén is. A 4.a. ábrán a hidrosztatikus különbségeknél leolvasható, hogy az ESA modell mindig jobban alulbecsli a sugárkövetéses értékeket, mint a GPT2W. Nagyobb magassági szögeknél elég pontos a GPT2W és az ESA is, de 10°-tól kezdve a referenciamodellről vett eltérések már jelentősebbek. 2°-nál a különbségek a GPT2W-nél 2 m fölé, az ESA esetében pedig majdnem 2.5 m-re nő, ami százalékosan körülbelül 5%, illetve 6%-os eltérést jelent a referenciamodellről.

Az 4.b. ábrán a sugárkövetés és a GPT2W valamint sugárkövetés és az ESA nedves különbségértékei jól mutatják, hogy a GPT2W modell folyamatosan alul, míg az ESA mindig túlbecsüli a sugárkövetéses késléltetéseket. Az ESA modell viszont a 2°-os magassági szög kivételével kevésbé becslül alul, mint amennyire a GPT2W túl. 2°-nál a sugárkövetés eredményét az ESA 13%-kal alulbecsli, míg a GPT2W 11%-kal meghaladja. 5°-os magassági szögnél csak 7 %-kal marad el az ESA a sugárkövetéstől, de GPT2W-nél 17%-os túlbecslés. Azt viszont fontos megjegyeznünk, hogy itt csak egy észlelést vizsgálunk, ezek alapján nem vonhatunk le messzemenő következtetéseket.



3. ábra. a) Hidrosztatikus troposzférikus késleltetések magassági szögtől való függése 2014.07.02. 12-kor
b) Nedves troposzférikus késleltetések magassági szögtől való függése 2014.07.02. 12-kor



4. ábra. a) Hidrosztatikus troposzférikus késleltetések különbségének magassági szögtől való függése 2014.07.02. 12-kor
b) Nedves troposzférikus késleltetések különbségének magassági szögtől való függése 2014.07.02.12-kor

6.2 A vizsgált modellek referenciamodelltől való eltérését leíró statisztikai jellemzők elemzése

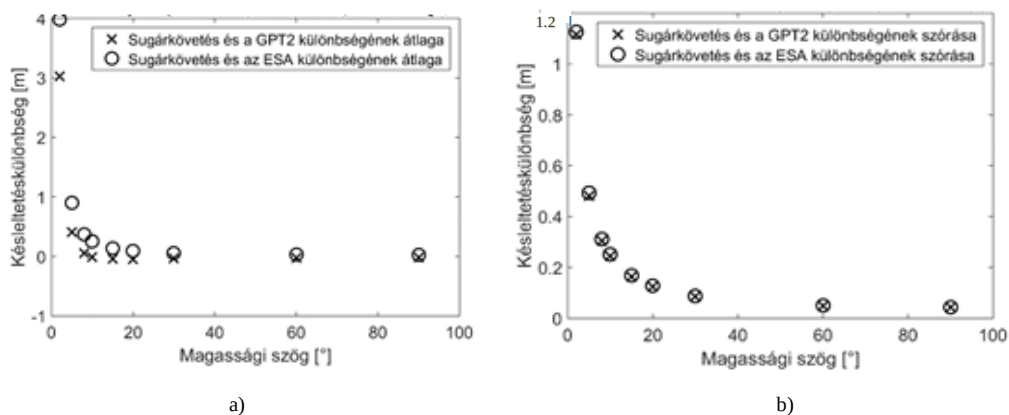
Egy-egy nap vizsgálata alapján nem beszélhetünk konklúzióról, ezért kiszámítottuk és ábrázoltuk a GPT2W és az ESA teljes troposzférikus késleltetéseinek a sugárkövetéses modell teljes késleltetésétől való eltérését kifejező statisztikai jellemzőket. Az egyes magassági szögekre külön-külön meghatároztuk ezeket, hogy a nagyságrendi különbségek ne hamisítsák meg az eredményeket.

A modellek referenciamodelltől vett eltéréseinek átlagértékei (5.a. ábra) -0.1 és 0.4 méter között alakulnak 8° és 90° közötti magassági szögek esetén, ami azt mutatja, hogy nagyobb szögeknél jól közelítik a sugárkövetés eredményeit a vizsgált modellek. Az is látható, hogy a GPT2W-val számított különbségek átlagértékei 8°-ig 0 körül ingadoznak, és 8° alatt is kevésbé különböznek a sugárkövetéstől vett átlagos eltérések, mint az ESA modell esetén. Az átlagértékek azt mutatják, hogy a GPT2W minden magassági szögnél jobb közelítést ad a sugárkövetéses késleltetésekre, mint az ESA modell. Ennek oka lehet a GPT2W pontosított nedves késleltetés számítási módszere valamint, hogy újabb adatokat használ, mint az ESA Galileo modellje.

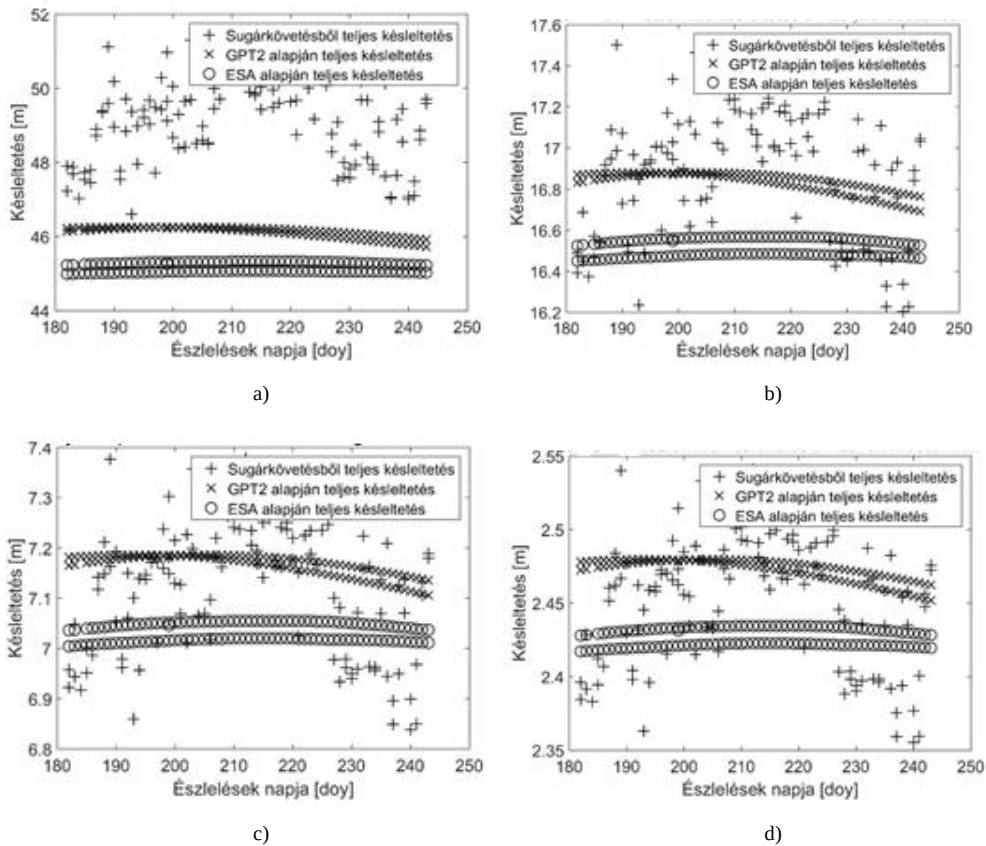
A két modell referenciamodelltől vett eltéréseinek szórásai (5.b. ábra) nagyon hasonló értékűek illetve az eredmények ugyanolyan módon változnak. Kis mértékben a GPT2W modell szórásai alacsonyabbak. Meg kell jegyeznünk, hogy a statisztikai jellemzők 10°-os magassági szög alatt egyre nagyobb értékeket vesznek fel, ami azt jelenti, hogy a vizsgált modellek a magassági szög csökkenésével egyre rosszabbul közelítenek.

6.3 A vizsgált időszak észleléseinek teljes késleltetési különböző magassági szögek esetén

A következőkben ábrázoltuk a vizsgált időszak összes észleléséből nyert teljes késleltetés értékeit a sugárkövetés, a GPT2W és az ESA Galileo modellje esetén is, néhány magassági szögre vonatkozóan (6. ábra). Az elemzéseket 2° , 8° , 20° és 90° esetén végeztük el. Az észlelések időpontjait doy-ban adtuk meg, ami meghatározza, hogy az adott nap hányadik az évben január 1-től számítva. Az ábrákon megfigyelhetjük a késleltetések nagyságának változásait a magassági szöggel illetve azt is láthatjuk, hogy a magassági szög növekedésével egyre közelebb kerülnek egymáshoz a különböző modellekből számított eredmények. A GPT2W és az ESA is 2° -nál alulbecslik a sugárkövetési eredményeket, de a magassági szög növekedésével egyre jobban közelítenek. Elmondható, hogy kisebb magassági szögeknél a GPT2W jobban közelít a sugárkövetési eredményeit, mint az ESA. A GPT2W és az ESA késleltetési kettő, a széleinél kicsit görbülő egyenest rajzolnak ki, a napi 2 észlelés alapján. A GPT2W eredményei keresztezik egymást, az ESA 2 közel párhuzamos adatsort mutat. A most vizsgált két hónapos adatsor nem jeleníti meg teljes mértékben a GPT2W és az ESA szezonális változásait, de nagyobb időintervallum vizsgálatánál ez már egyértelműbben látszik (Rózsa 2014).



5. ábra. a) Teljes troposzférikus késleltetés-különbségek (sk.-GPT2W) és (sk.-ESA) átlagának magassági szögtől való függése b) Teljes troposzférikus késleltetés-különbségek (sk.-GPT2W) és (sk.-ESA) szórásának magassági szögtől való függése



6. ábra. a) 2°-os magassági szögénél számított teljes troposzférikus késleltetés a vizsgált időszakban b) 8°-os magassági szögénél számított teljes troposzférikus késleltetés a vizsgált időszakban c) 20°-os magassági szögénél számított teljes troposzférikus késleltetés a vizsgált időszakban d) 90°-os magassági szögénél számított teljes troposzférikus késleltetés a vizsgált időszakban

7 Összegzés

Jelen tanulmányunkban sorra vettük a troposzféra modellek rádiószondás adatok alapján végzett pontosságvizsgálatához szükséges jelenségeket, fogalmakat és a számítási módszer főbb lépéseit. A vizsgálatokat 2014.07.01. és 2014.08.31. közötti időszakra végeztük el, rádiószondás fájlok és nagyobb magasságban ISA adatokat segítségével. A jellemzőket különböző magassági szögekre határoztuk meg: 2°, 5°, 8°, 10°, 15°, 20°, 30°, 60°, és 90°.

Egy észlelésre vonatkozó vizsgálatokkal kimutattuk, hogy az eredmények milyen mértékben változnak a magassági szög függvényében. Megfigyeltük a hidrosztatikus és a nedves késleltetések nagyságrendbeli eltérését, valamint a vizsgált modellek különbözőségét is. A troposzférikus késleltetés nagyobb részét a hidrosztatikus érték adja, ami pontosabban megadható, mint a tized akkora nedves eredmény. 10°-tól kezdve az alacsonyabb magassági szögek esetén a vizsgált modellek egyre pontosabb eredményt adnak. A hidrosztatikus késleltetésnél a GPT2W 5 %-os, míg az ESA 6%-os eltéréssel becsülte az értékeket. A nedves késleltetések vizsgálatánál a GPT2W 5°-nál már 17%-kal haladja meg a referenciamodellt, míg az ESA csak 7%-kal marad el a sugárkövetés eredményeitől, a GPT2W 2°-nál viszont jobban közelít, mint az ESA. A Saastamoinen modell 3° alatt téves eredményt ad.

Meghatároztuk a vizsgált modellek referenciamodelltől vett eltéréseinek statisztikai jellemzőit: az átlagot és a szórást. Az átlagértékek alapján megállapíthatjuk, hogy a GPT2W pontosabban becsüli a

késleltetések értékeit, mint az ESA modell. A statisztikai jellemzők 10° -tól az alacsonyabb szögek felé egyre nagyobb értékeket vesznek fel, mindkét vizsgált modell egyre rosszabbul adja meg a késleltetéseket az alacsonyabb magassági szögeknél.

Végül tanulmányoztuk a vizsgált időszak összes észleléséből számított teljes késleltetés nagyságát 4 magassági szögre: 2° -ra, 8° -ra, 20° -ra és 90° -ra. Ez alapján is kimutatható, hogy a magassági szög csökkenésével egyre rosszabbak a vizsgált modellek becslései. GPT2W és az ESA adatai 2-2 enyhén hajlott vonalat rajzolnak ki, a szezonális változások egy hosszabb időszak vizsgálatával lennének bizonyíthatók.

Mindent összevetve a GPT2W és az ESA is jól közelíti a sugárkövetés eredményeit nagyobb magassági szögeknél, de alacsonyabbaknál már érdemesebb a sugárkövetéssel számolni a pontosabb eredmény érdekében. Valamint a GPT2W és az ESA modellt összehasonlítva a GPT2W-vel kapunk jobb értékeket.

Hivatkozások

- Ádám J, Bányai L, Borza T, Busics Gy, Kenyeres A, Krauter A, Takács B (2004): Műholdas helymeghatározás. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 100-105.
- Askne J, Nordius H (1987): Estimation of Tropospheric Delay for Microwaves from Surface Weather Data. Radio Science, 22(3), 379-386. doi: Doi 10.1029/Rs022i003p00379.
- Boehm J, Schuh H (2003): Vienna Mapping Functions. 16. Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, 131-143.
- ISO 2533: 1975 szabvány, Standard Atmosphere (1975).
- Lagler K, Boehm J (2012): GPT2W modell. <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/SOURCE/> – MATLAB kódok.
- Martellucci A (2002): Galileo Reference Troposphere Model for the User Receiver ESA. ESA Document Reference ESAAPPNG-REF/00621-AM-Iss. 2 / Rev. 7, 2012.
- Martellucci A, Blarmino G (2003): ESA model. ESA/ESTEC – MATLAB kódok.
- Horváth T, Viengdavanh R, Rózsa Sz (2014): Négydimenziós vízgőzmodellek előállítás GNSS tomográfiával. Geomatikai Közlemények 17. 69-78.
- Rózsa Sz (2014): Modelling Tropospheric Delays Using the Global Surface Meteorological Parameter Model GPT2. Periodica Polytechnica Civil Engineering 58(4), 301–308, doi: 10.3311/PPci.7267.
- Rózsa Sz, Weidinger T, Gyöngyösi AZ, Kenyeres A (2012): The role of GNSS infrastructure in the monitoring of atmospheric water vapor. IDŐJÁRÁS / Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service 116, 1-20.
- Saastamoinen J (1973): Contributions to the theory of atmospheric refraction. Bulletin Géodésique, 13-34.
- Smith EK, Weintraub S (1953): The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. Proceedings of the Institute of Radio Engineers 41, 1035-1037.
- Vaisala (2015): Vaisala Radiosonde RS92-SGP User's Guide.

MÉRETARÁNYSZÁMOKKAL VÉGZETT HIBASZŰRÉS MODELL- ÉS TEREPI PONTOK KOORDINÁTAI ALAPJÁN

Jancsó Tamás*



Error detection with scale factors based on coordinates of model and control points –
In photogrammetry the model coordinates of control points can be calculated and they can be used effectively to detect gross errors located in control points. To reach this goal triangles are formed from points in every combination and the residuals of scale factors defined by the ratio between the model and control lengths of the respective triangle sides are calculated. The triangle where the sum of squared scale factor residuals is the smallest one is searched for. Adding the rest of points to this triangle one by one tetrahedrons are formed. Using the edges of these tetrahedrons equations of constraint conditions can be compiled and the geodetic coordinates of the examined point can be determined. These calculated coordinates can be compared to the given geodetic control coordinates and the residuals can be calculated. By this way the points with errors can be identified unambiguously.

Keywords: relative orientation, absolute orientation, exterior orientation, orientation elements



A fotogrammetriában a modellen számíthatók az illesztőpont modell koordinátái, melyeket eredményesen felhasználhatunk az illesztőpontokon jelentkező durva hibák szűrésére. Bármely két illesztőpont és modellbeli képe alapján méretarányszámot képezhetünk a szakasz hosszak hányadosaként. Az illesztőpontokból háromszögeket képezve a méretarányra már 3 becslés is rendelkezésre áll, vagyis átlagot és ellentmondásokat (szórást) is számíthatunk. Az illesztőpontokból összes lehetséges háromszöget képezve keressük meg azt a háromszöget, ahol a méretarányszámok ellentmondásainak négyzetösszege a legkisebb. A megmaradt pontokat egyenként hozzávéve az etalonháromszöghöz tetraédereket alkotunk, melyek oldaléleire kényszerfeltételeket tudunk felírni és a vizsgált pont geodéziai koordinátáit meghatározhatjuk. Ezeket a számított koordinátákat összehasonlítva az adott geodéziai koordinátákkal ellentmondásokat képezünk, amelyek alapján egyértelműen kiszűrhetjük a hibás pontokat.

Kulcsszavak: modell-koordináták, illesztőpont, méretarány, hibaszűrés

1 Bevezetés

Egy képpár tájékozásakor a relatív tájékozás során létrehozuk a térmodellt, vagyis minden mért illesztőpont modell koordinátája is számíthatóvá válik. Ugyanakkor az (1) kollinear egyenletek matematikailag pontosan leírják a képpont (ξ, η) képpontkoordinátái és a képpontnak megfelelő terepi pont (X_G, Y_G, Z_G) geodéziai koordinátái között (Albertz és Kreiling 1975), ezért ezt a módszert előnyben részesítik a terepi pontok koordinátáinak kiszámításánál, vagyis a modell koordinátákat a továbbiakban nem kell felhasználnunk.

$$\begin{aligned}\xi &= -c_k \frac{r_{11}(X_c - X_0) + r_{21}(Y_c - Y_0) + r_{31}(Z_c - Z_0)}{r_{13}(X_c - X_0) + r_{23}(Y_c - Y_0) + r_{33}(Z_c - Z_0)} \\ \eta &= -c_k \frac{r_{12}(X_c - X_0) + r_{22}(Y_c - Y_0) + r_{32}(Z_c - Z_0)}{r_{13}(X_c - X_0) + r_{23}(Y_c - Y_0) + r_{33}(Z_c - Z_0)}\end{aligned}\quad (1)$$

Az (1)-ben használt jelölések magyarázata: ξ, η - képpontkoordináták, X_G, Y_G, Z_G - geodéziai koordináták, X_0, Y_0, Z_0 - vetítési centrum geodézia koordinátái, c_k - kamera állandó (kalibrált fókusz távolság), r_{ij} - a forgatási mátrixot alkotó iránykoszinusz.

* Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar, Geoinformatikai Intézet
8000 Székesfehérvár, Pirosalma u. 1-3., E-mail: jancso.tamas@amk.uni-obuda.hu

Ugyanakkor a modell koordinátákat eredményesen felhasználhatjuk az illesztőpontokon jelentkező durva hibák szűrésére. Korábbi cikkemben (Jancsó 2006) már vizsgáltam ezt a problémát. Az akkori kutatásnál következtetésként levonható volt, hogy a kidolgozott módszernél a Z koordinátákban jelentkező hibák hatása jóval kisebb volt, mint az X, Y sík koordinátákban jelentkező hibáké. Ennek kiküszöbölésére egy új módszert dolgoztam ki, melyet jelen cikkben ismertetek.

2 Hibaszűrés menete

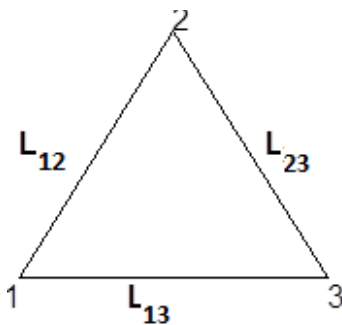
Tételezzük fel, hogy elvégeztük a képpár relatív tájékozását és számítani tudjuk az illesztőpontok modell koordinátáit. Legyen adott az illesztőpontok modell- és geodéziai koordinátája. Ha a pontok száma n , akkor az ezekből összeállítható háromszögek száma $\frac{n!}{(n-3)!3!}$.

Továbbá egy háromszögből (1. ábra) háromféle méretarányt számíthatunk az összetartozó oldaléleket egymással elosztva. Ezekből a méretarányokból ellentmondásokat számolhatunk (2) szerint.

$$\begin{aligned} m_{12} &= \frac{L_{12}}{l_{12}}, \\ m_{13} &= \frac{L_{13}}{l_{13}}, \\ m_{32} &= \frac{L_{32}}{l_{32}}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} dm_1 &= m_{12} - m_{13} = dm_2 - dm_3, \\ dm_2 &= m_{12} - m_{32} = dm_1 + dm_3, \\ dm_3 &= m_{13} - m_{32} = dm_2 - dm_1. \end{aligned}$$

A (2)-ben használt jelölések magyarázata: dm_1, dm_2, dm_3 - ellenmondások a méretarányokban, m_{12}, m_{13}, m_{32} - méretarányszámok, $L_{12}, L_{13}, L_{32}, l_{12}, l_{13}, l_{32}$ - ferde távolságok a terepen és a modellen.



1. ábra. Egy háromszögben számolható oldalélek

Kérdésként felvetődik, hogy mekkora ellentmondás jelent durva hibát a koordinátákban.

Első lépésként meg kell adni az illesztőpontok koordináta meghatározásának m_x, m_y, m_z közép-hibáit, valamint ezekhez egy σ_0 szorzótényezőt, mely a megengedhető hiba mértékét állítja be. Jellemzően $\sigma_0 = 3.0$, ha 99.7%-os valószínűséget tételezünk fel a hibák normális eloszlására.

Minden háromszögnél képezzük a méretarányszámok ellentmondásainak négyzetösszegét, amit megszorozunk az adott háromszög terepi területével. Az így kapott sorozatból kiválasztjuk a legkisebb

értéket. Ehhez az értékhez tartozó háromszöget kinevezzük etalon háromszögnek és ennél a háromszögnél számolt méretaránszámok súlyozott átlagát pedig m_e etalon méretaránszámnak tekintjük. A súlyozott átlag számításánál a súlyok az adott háromszögben szereplő terepi távolságok reciprok értékei lesznek.

A megmaradt pontokat egyenként az etalontháromszöghöz adva tetraédereket alkotunk. Ezeknek a tetraédereknek az oldaléleire a távolság képletek analógiájára (3) szerint kényszerfeltételeket tudunk felírni:

$$\begin{aligned} m_e^2((x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2 + (z_i - z_1)^2) &= (X_{ki} - X_1)^2 + (Y_{ki} - Y_1)^2 + (Z_{ki} - Z_1)^2, \\ m_e^2((x_i - x_2)^2 + (y_i - y_2)^2 + (z_i - z_2)^2) &= (X_{ki} - X_2)^2 + (Y_{ki} - Y_2)^2 + (Z_{ki} - Z_2)^2, \\ m_e^2((x_i - x_3)^2 + (y_i - y_3)^2 + (z_i - z_3)^2) &= (X_{ki} - X_3)^2 + (Y_{ki} - Y_3)^2 + (Z_{ki} - Z_3)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

A (3)-ban használt jelölések magyarázata: m_e - etalon méretaránszám, x_i, y_i, z_i a vizsgált pont modell koordinátái, X_{ki}, Y_{ki}, Z_{ki} a vizsgált pont számított geodéziai koordinátái, $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3$ az etalon háromszög pontjainak modell koordinátái, $X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2, X_3, Y_3, Z_3$ az etalon háromszög pontjainak geodéziai koordinátái.

A (3)-ban felírt egyenletek közvetlenül megoldhatók X_{ki}, Y_{ki}, Z_{ki} koordinátákra (4), (5) és (6) szerint.

$$\begin{aligned} c_1 &= X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2, & c_2 &= X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2, & c_3 &= X_3^2 + Y_3^2 + Z_3^2, \\ c_4 &= b^2 - a^2 + c_1 - c_2, & c_5 &= c^2 - a^2 + c_1 - c_3, \\ t_1 &= 2(X_1 - X_2), & t_2 &= 2(Y_1 - Y_2), & t_3 &= 2(Z_1 - Z_2), \\ t_4 &= 2(X_1 - X_3), & t_5 &= 2(Y_1 - Y_3), & t_6 &= 2(Z_1 - Z_3), \\ k_1 &= \frac{(c_5 t_2 - t_5 c_4)}{(t_4 t_2 - t_5 t_1)}, & k_2 &= \frac{(t_6 t_2 - t_5 t_3)}{(t_4 t_2 - t_5 t_1)}, \\ k_3 &= \frac{(c_5 t_1 - t_4 c_4)}{(t_5 t_1 - t_4 t_2)}, & k_4 &= \frac{(t_6 t_1 - t_4 t_3)}{(t_5 t_1 - t_4 t_2)}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} u_a &= 1 + k_2^2 + k_4^2, \\ v_a &= 2(k_2 X_1 + k_4 Y_1 - k_1 k_2 - k_3 k_4 - Z_1), \\ w_a &= c_1 - a^2 + k_1^2 + k_3^2 - 2(k_1 X_1 + k_3 Y_1), \\ u_b &= 1 + k_2^2 + k_4^2, \\ v_b &= 2(k_2 X_2 + k_4 Y_2 - k_1 k_2 - k_3 k_4 - Z_2), \\ w_b &= c_2 - b^2 + k_1^2 + k_3^2 - 2(k_1 X_2 + k_3 Y_2), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} u_c &= 1 + k_2^2 + k_4^2, \\ v_c &= 2(k_2 X_3 + k_4 Y_3 - k_1 k_2 - k_3 k_4 - Z_3), \\ w_c &= c_3 - c^2 + k_1^2 + k_3^2 - 2(k_1 X_3 + k_3 Y_3). \end{aligned}$$

$$Z_{ki} = \frac{-v_a \pm \sqrt{v_a^2 - 4u_a w_a}}{2u_a} = \frac{-v_b \pm \sqrt{v_b^2 - 4u_b w_b}}{2u_b} = \frac{-v_c \pm \sqrt{v_c^2 - 4u_c w_c}}{2u_c}, Z_{ki} > 0, \quad (6)$$

$$X_{ki} = k_1 - k_2 Z_{ki},$$

$$Y_{ki} = k_3 - k_4 Z_{ki}.$$

Megjegyzendő, hogy a (6) képletek alkalmazásával a számított koordinátákra két megoldást is kaphatunk, ilyenkor azt fogadjuk el, ahol a kapott ellentmondások négyzetösszege kisebb.

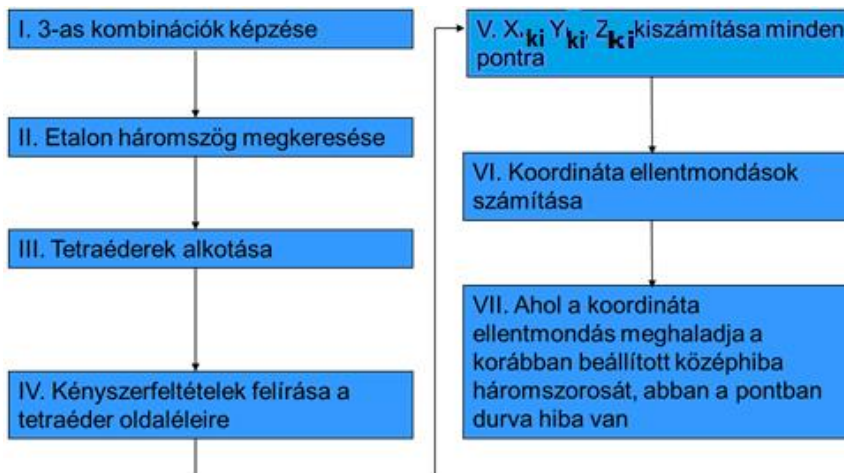
Ezeket a számított koordinátákat összehasonlítva a pont adott geodéziai koordinátaival, képezhetjük az ellentmondásokat :

$$\begin{aligned} dX_i &= X_i - X_{ki}, \\ dY_i &= Y_i - Y_{ki}, \\ dZ_i &= Z_i - Z_{ki}. \end{aligned} \quad (7)$$

A kapott ellentmondások abszolút értékeit összehasonlítva a megengedhető hibák mértékével, egyértelműen kiszűrhetjük a hibás pontokat, illetve a hibás koordinátákat. Tehát durva hibás pont esetén a (8) egyenlőtlenségek közül legalább egy teljesül:

$$\begin{aligned} |dX_i| &> \sigma_0 m_X, \\ |dY_i| &> \sigma_0 m_Y, \\ |dZ_i| &> \sigma_0 m_Z. \end{aligned} \quad (8)$$

A 2. ábra foglalja össze a teljes folyamatot.



2. ábra. A hibaszűrés folyamata

3 Számpélda

Az 1. táblázat mutatja a kiinduló adatokat, melyek valós mérésből származnak (Schwidewski és Ackermann 1976). A táblázatban x, y, z jelöli a modell koordinátákat, X, Y, Z pedig az illesztőpontok geodéziai koordinátáit. A dX, dY, dZ oszlopok értékei mutatják a szándékosan elkövetett durva hibák értékeit három pont esetében.

1. táblázat. Kiinduló adatok: a hibaszűrés módszer vizsgálatához (Schwidewski és Ackermann 1976)

Pont- szám	x [mm]	y [mm]	z [mm]	X [m]	Y [m]	Z [m]	dX dY dZ [m]
11	10.018	79.931	-149.872	5085.205	5852.099	527.925	+2
13	79.962	79.949	-147.890	5780.020	5906.365	571.549	
31	10.022	-79.955	-151.915	5210.879	4257.446	461.810	
33	80.000	-79.948	-154.922	5909.264	4314.283	455.484	-1
12	44.977	79.959	-148.889	5431.477	5879.399	559.658	
21	10.025	0.001	-151.885	5147.362	5055.701	484.961	
22	45.002	0.010	-150.904	5495.767	5082.880	506.654	+10
23	79.977	0.015	-149.910	5844.151	5110.013	528.474	
32	45.013	-79.955	-152.929	5559.933	4286.193	463.540	

Az m_x, m_y, m_z értékek rendre 0.1 m, 0.1 m és 0.3 m. A $\sigma_0 = 3.0$. A teljes variációt átszámolva az etalon háromszöget a 21, 23 és 32 pontok alkotják, ugyanis ennél a háromszögnél adódik a legkisebbre a méretaránszámok ellentmondásaiból számított négyzetösszeg, az átlagolással számított etalon méretaránszám értéke 10006.529-re adódik. A (3) - (8) képleteket alkalmazva a 2. táblázat foglalja össze a kapott ellentmondásokat.

2. táblázat. Számított koordináta ellentmondások

Pontszám	dX [m]	dY [m]	dZ [m]
11	1.948	0.064	-0.198
13	0.055	-0.018	-0.085
31	0.128	-1.025	0.022
33	-0.115	-0.004	-0.019
12	0.013	0.013	9.778
22	0.004	0.004	-0.065

A 2. táblázatban vastaggal ki vannak emelve azok az értékek, melyekre teljesül a (8) képletek szerinti durva hiba feltétele. Látható, hogy a valódi hibákhoz közelítő ellentmondásokat kaptunk és ezzel a módszerrel hatékonyan kiszűrhetők a durva hibával terhelt pontok.

4 Összefoglalás

A cikkben levezetésre került, hogyan lehet a durva hibával terhelt pontokat a modell- és geodéziai koordinátaiból számolt méretarányok összehasonlításával kiszűrni. Látható, hogy ez a viszonylag egyszerű számítás kiegészítője lehet a koordináta kiegyenlítések során alkalmazott statisztikai módszereknek (pl. a Baarda-féle data snooping) a durva hibával terhelt pontok szűrése során. A módszer alkalmazható sík- vagy térbeli Helmert transzformációnál, ahol csak egy méretaránnal kell számolnunk. A módszernél a pontokon jelentkező hibákat koordináta-hoz kapcsolódva tudjuk kiszámolni. A vizsgálat során nem elszigetelten, az egyes távolságok hosszát hasonlítjuk össze közvetlenül, hanem

háromszögenként a távolságok arányában (a méretarányokban) bekövetkezett változásokat vizsgáljuk. Az etalon háromszög kiválasztásánál igyekszünk figyelembe venni a terepi távolságok hosszát azzal, hogy a méretarány különbségek négyzetösszegét megszorozzuk az adott háromszög kerületének hosszával. Valamint az etalon méretarány kiszámításánál a háromszöget alkotó oldalak távolságának reciprok értékét súlynak tekintve, súlyozott átlagot számolunk. Ennek ellenére előfordulhatnak olyan esetek, amikor az etalon háromszög kiválasztása téves lesz vagy tévesen, durva hibával nem terhelt pontok is kiszűrésre kerülnek. Például problémát jelent, ha egy háromszögben mind a három pont hibás és a hibák nagysága és előjele közel egyforma, valamint az irányuk a háromszög súlyvonalaira illeszkedik vagy ahhoz közeli. Ebben az esetben a háromszögön belül kapott méretarány különbségek ugyanolyan kicsik lehetnek, mint egy ugyanilyen (alakra megegyező, de méretre nem), de hibátlan háromszögben. További bizonytalanságot jelent, ha egyre több a hibás pont, mivel a hibák több kombinációban is szerepelnek, ami azt eredményezheti, hogy durva hibával nem terhelt pontok is kiszűrésre kerülnek. A többértelműségek feloldására és téves kiszűrések elkerülésére jelenthetnek megoldást a koordináta kiegyenlítések során alkalmazott statisztikai módszerek.

Hivatkozások

Albertz J, Kreiling W (1975): Photogrammetrisches Taschenbuch. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 223.

Jancsó T (2006): Durva hibák felderítése modell- és terepi koordináták alapján számított méretarányszámok összehasonlításával. *Geodézia és Kartográfia*, LVIII (2006/3), 9-11.

Schwidewski K, Ackermann F (1976): Photogrammetrie. BG Teubner, Stuttgart, 185.

GNSS-MONITORING LÉGI NAVIGÁCIÓS ALKALMAZÁSOK SZEMPONTJÁBÓL

Takács Bence*, Markovits-Somogyi Rita **



Analysis of GNSS-monitoring from the aspects of air navigation - The use of GNSS solutions and the satellite based augmentation system EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) can provide a cost-efficient alternative to the standard instrument landing systems applied at airports. The GNSS based approach procedures were designed and presented in Hungary during the year 2016 by the support of a H2020 project called BEYOND. In parallel the performance of EGNOS-augmented positioning was investigated by post-processing of both static and kinematic raw measurements. This paper presents our most important results and experience.

Keywords: GNSS, EGNOS, Galileo, air navigation, monitoring, procedure design, flight validation

GNSS alapú, műholdas kiegészítő rendszerek (pl. EGNOS) szolgáltatásaival támogatott helymeghatározás a műszeres repülés költséghatékony eszköze lehet. Magyarországon a 2016-os év során került sor GNSS alapú eljárások tervezésére és bemutatására egy európai H2020 projekt (BEYOND) támogatásának köszönhetően. Ezzel egy időben vizsgáltuk az EGNOS korrekciókkal segített helymeghatározás pontosságát, integritását, rendelkezésre állását és folytonosságát statikus és kinematikus mérések utófeldolgozásával. Cikkünkben beszámolunk a fontosabb eredményekről, tapasztalatainkról.

Kulcsszavak: GNSS, EGNOS, Galileo, légi navigáció, monitoring, eljárás tervezés, repülés validálás

1 Bevezetés

A GPS-technika élet és vagyonbiztonság szempontjából kritikus (*Safety-of-Life, SOL*) alkalmazásai során, így a repülésben is biztosítani kell a rendszer *integritását* (önellenőrző képességét), más megfogalmazásban a meghatározott pozíciók *megbízhatóságát* (durva hiba mentességét). Ez történhet a földi mérések adta lehetőség kihasználása útján valamilyen a vevőbe épített statisztikai eljárással (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring, RAIM*), vagy kiegészítő rendszerek alkalmazásával. Ennek lényege, hogy földi követő állomások folyamatosan veszik a műholdak jeleit, a durva hibával terhelt méréseket szűrik és szükséges esetben erre a felhasználókat rövid időn (néhány másodpercen) belül figyelmeztetik. A felhasználók felé az üzenetek eljuttathatók geostacionárius műholdakon keresztül (*Satellite Based Augmentation System, SBAS*) vagy földi rádióadók útján (*Ground Based Augmentation System, GBAS*). A rendszer továbbá a pontosság fokozását is lehetővé teszi, ugyanis a földi követő állomások mérései alapján a főbb szabályos hibákat modellezik, majd a modellek paramétereit eljuttatják a felhasználókhoz és a nyers mérések feldolgozása során a szabályos hibák hatását korrekciók formájában figyelembe veszik. A kiegészítő rendszerek jellemzően kontinensnyi területeket látnak el a szükséges korrekciókkal. Több ilyen rendszer működik a világban, Európában az EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) (Ádám et al. 2004), amely 2011. óta használható hivatalosan is a légi közlekedésben.

Ahhoz, hogy a repülésben bizonyos műveleteket, pl. a repülőterek megközelítését műholdas navigációra lehessen alapozni, a műholdas navigációnak szigorú követelményeknek kell megfelelnie a pontosság (*accuracy*), az integritás (*integrity*), a rendelkezésre állás (*availability*) és a folytonosság (*continuity*) területén egyaránt. A műholdas navigáción alapuló eljárások bevezetése növeli a repülés biztonságát, kiválthatja a meglehetősen drágán üzemeltethető földi rádió navigációs eljárásokat (*Instrument Landing System, ILS*), valamint kisebb repülőtereken is lehetőséget teremt kedvezőtlen időjárási körülmények mellett a biztonságos megközelítéshez.

*BME,1111 Budapest, Műgyetem rakpart 3.

E-mail: takacs.bence@epito.bme.hu

**HungaroControl, 1185 Budapest, Igló u.33-35.

E-mail: rita.markovits-somogyi@hungarocontrol.hu

Európában most már számos repülőtéren (1. ábra) van lehetőség műholdas alapú eljárással a repülőtér megközelítésre. A környező országokban néhány évvel korábban már bevezették ezeket az eljárásokat, a bevezetés és a bevezetéssel egyidőben végzett tesztmérések tapasztalatairól számolnak be szlovák és lengyel kollégák pl. (Ciečko et al. 2015) vagy (Grunwald et al. 2016) tanulmányban.

Az elmúlt bő másfél évben Magyarországon a Budapesti Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtérre, valamint a Debreceni Nemzetközi Repülőtérre készültek el az ehhez szükséges eljárások. Az eljárások bevezetését megelőzően vizsgáltuk az EGNOS korrekciókkal segített navigáció hatékonyságát, valamint a szigorú nemzetközi előírásoknak való megfelelőségét. Nagyon lényeges információ, hogy mostanra Magyarország teljes területe biztonsággal az EGNOS korrekciókkal lefedett területen található.

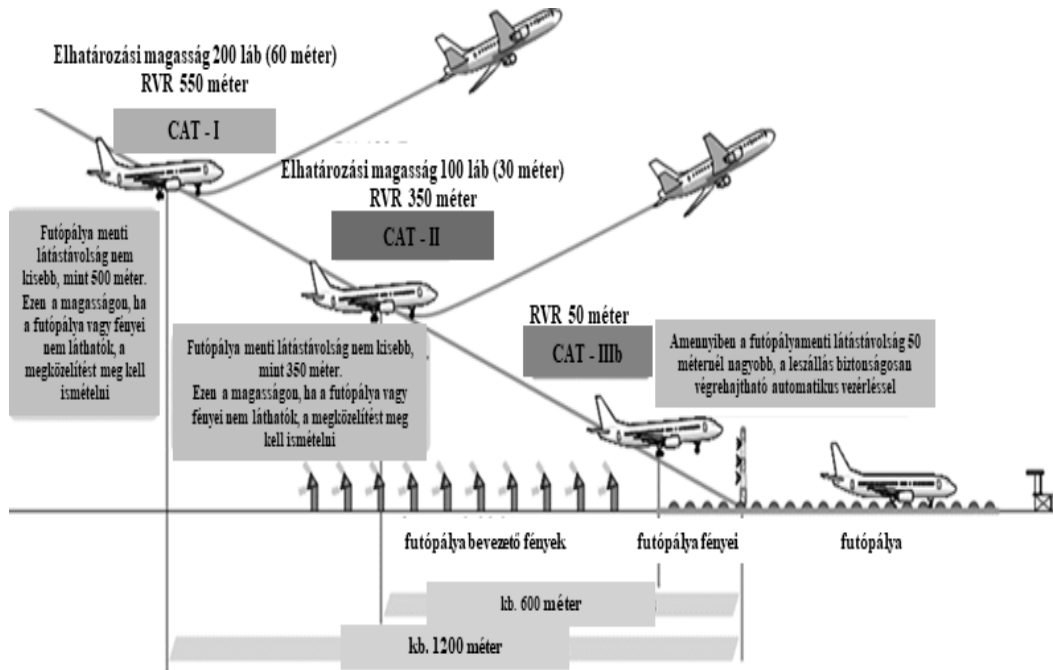


1.ábra. Tervezett és működő műholdas alapú eljárások Európa repülőterein (2016. október)

2 A navigáció hatékonyságának mérőszámai

A repülésben a vizuális navigációnak még mindig alapvető a jelentősége. A repülőtér megközelítése során van egy pont, ahol a pilótának látnia kell a futópályát vagy annak fényeit és ez alapján el kell döntenie, hogy a leszállás műveleteit megkezdi, vagy megfelelő látási viszonyok hiányában átstartol. Ez a pont vagy inkább magasság az *elhatározási magasság* (*decision height, DH*). A futópálya menti látástávolság (*Runway Visual Range, RVR*), az elhatározási magasság, valamint a hagyományos rádió navigáción alapuló műveletek kategóriáinak összefüggése az 2. ábrán látható.

A műholdas helymeghatározáson alapuló navigáció követelményeit a *Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet* (*International Civil Aviation Organization, ICAO*) a 10. Annexében adja meg (1. táblázat). Megjegyezzük, hogy az LPV-200-as szint megfelel az ILS alapú navigációban a CAT-I kategóriának. A pontosság meghatározásához ismernünk kell a meghatározott pozíciók hibátlan értékét. Erre egyik kézenfekvő megoldás permanens állomások méréseink feldolgozása, vagy kinematikus mérések esetén az útvonal meghatározása a navigációs eljárásnál lényegesen pontosabb helymeghatározási módszerrel (pl. szabatos abszolút helymeghatározással).



2. ábra. Elhatározási magasság és futópályamenti látástávolság kategóriák szerint

A navigáció megbízhatóságának számszerű meghatározása érdekében bevezették a *védelmi szint* (protection level) fogalmát. Földi követő állomások (Ranging and Integrity Monitoring Station, RIMS) mérései alapján a szabályos hibák hatásának csökkentése érdekében alkalmazott modelleket határoznak meg, valamint a modellek pontossági mérőszámait (középhibáit) is. A középhibák összegzéséből, valamint megfelelő biztonsági tényezőkkel történő felszorzás után kaphatjuk meg a védelmi szint értékét, a képletek megtalálhatók az RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics) 2013. szabványban. Amennyiben a védelmi szint értéke eléri a riasztási határértéket (alarm limit), akkor az adott művelet során a műholdas helymeghatározás nem teljesíti a navigációval szemben támasztott követelményeket. A pozíció hiba értéke elvben minden esetben bőven a védelmi szint értéke alatti kell, hogy legyen. Amennyiben a pozíció hiba értéke meghaladja a védelmi szint értékét, akkor ezt integritási eseménynek nevezzük. Tapasztalataink szerint erre egészen ritkán van példa, a BME EGNOS monitor állomásán az elmúlt 10 évben egyetlen ilyen eseményt sem rögzítettünk.

A rendelkezésre állás számítása során azokat az epochákat vesszük figyelembe, amikor az EGNOS korrekciókkal segített helymeghatározás teljesíti a követelményeket, azaz lényegében a helymeghatározás megfelelően pontos és a védelmi szint értéke mind vízszintes, mind magassági értelemben a riasztási határérték alatt marad. A követelmények szerint a rendelkezésre állásnak legalább 99% százalékosnak kell lennie.

Folytonossági eseménynek (continuity event) nevezzük azt, amikor a helymeghatározás vagy a helymeghatározással szemben támasztott követelmények teljesítése valamiért megszakad, azaz a vizsgált epochában nem áll rendelkezésre a követelményeknek megfelelő SBAS alapú pozíció. A folytonossági kockázat (continuity risk) annak a valószínűségét fejezi ki, hogy folytonossági esemény egy vizsgált időtartam alatt, a repülésben jellemzően 15 másodpercen belül mekkora valószínűséggel fordulhat elő. Ezt a folytonossági események számát elosztva a vizsgált időszak epocháinak számával számíthatjuk. A gyakorlat szerint a folytonossági követelmények teljesítése esetenként nehézségekbe ütközik, ezért az ICAO előírásai szerint a műholdas navigáción alapuló megközelítési eljárás a folytonossági követelmények nem teljesítése esetén is kiadható.

3 BME EGNOS monitor állomásán rögzített mérések feldolgozása

Vizsgálataink során először a BME központi épületének tetején elhelyezett EGNOS monitor állomás nyers méréseinek feldolgozását és az eredmények elemzését végeztük el. Az EGNOS monitor állomás tulajdonképpen egy permanens állomásnak tekinthető, ami a nap 24 órájában másodpercenként rögzíti a nyers mérési eredményeket.

1. táblázat. A repülésben a műholdas navigációval szemben támasztott követelmények

szolgáltatási szint	pontosság [m] 95%		riasztási határérték [m]		folytonossági kockázat	rendelkezésre állás
	vízszinti	magassági	vízszinti	magassági		
APV-I	16	20	40	50	1-8x10 ⁻⁶ 15 másodperc alatt	0.99- 0.99999
LPV-200	16	5	40	35	1-8x10 ⁻⁶ 15 másodperc alatt	0.99- 0.99999

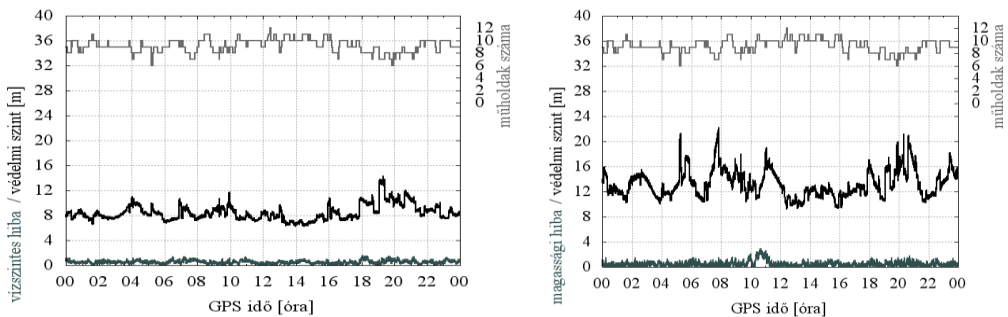
Állomásunkon egy NovAtel ProPak V vevő Trimble Zephyr geodéziai antennával mér, vevőnk egyfrekvenciás, GPS és GLONASS jelek mérésére egyaránt alkalmas. A vizsgálathoz tulajdonképpen bármely permanens állomás mérései felhasználhatók, illetve szükség esetén az EGNOS korrekciók utólag is letölthetők, pl. az EDAS (*EGNOS Data Access Service*) szolgáltatás ftp szerveréről. A rögzített nyers méréseket utólag dolgoztuk fel, 24 órás periódusokban. A kapott pozíciókat összehasonlítottuk az állomás antennájának hibátlanul tekinthető pozíciójával, így kaptuk a pontossági mérőszámokat. A védelmi szintek értékét, illetve további mérőszámokat is, mint pl. a rendelkezésre állás vagy a folytonossági kockázat értékét a magicGemini szoftverrel számítottuk. Megjegyezzük, hogy a mérések feldolgozása teljesen automatizált üzemmódban is elvégezhető, az eredményekből jelentés készíthető és az közzétehető. A főbb mérőszámokat a 2. és 3. táblázatban mutatjuk be. A táblázatok adatai alapján megállapíthatjuk, hogy a pontosság, a védelmi szintek és a rendelkezésre állás tekintetében is az 1. táblázatban közölt követelményeket kielégítik a vizsgált adatok. A pozíció hiba és védelmi szint értékének napi alakulását egy jellemző napi idősoron a 3. ábrán mutatjuk be. Az EGNOS korrekciókkal elérhető hatékonyság folyamatos figyelésére több cég is nyújt szolgáltatásokat, többek között az EGNOS korrekciók szolgáltatója is.

2. táblázat. A BME EGNOS monitor állomásán rögzített nyers mérések feldolgozásával kapott főbb pontossági mérőszámok, valamint a védelmi szintek statisztikai jellemzése

dátum	vízszintes pontosság [m] 95%	magassági pontosság [m] 95%	vízszintes védelmi szint [m] 99%	magassági védelmi szint [m] 99%
2016.10.16.	0.85	1.48	14.26	19.14
2016.10.17.	0.71	1.33	14.94	21.54
2016.10.18.	0.74	1.32	13.40	18.89
2016.10.19.	0.80	1.22	15.16	19.06
2016.10.20.	0.73	1.24	12.76	18.76
2016.10.21.	0.80	1.28	12.55	20.46
2016.10.22.	0.87	1.41	12.67	20.13

3. táblázat. A BME EGNOS monitor állomásán rögzített nyers mérések feldolgozásával kapott rendelkezésre állási és folytonossági mérőszámok

dátum	rendelkezésre állás APV-I [%]	folytonosság APV-I
2016.10.16.	99.5715	0.0000e+00
2016.10.17.	99.1522	1.6354e-04
2016.10.18.	99.1533	1.6553e-04
2016.10.19.	99.5715	0.0000e+00
2016.10.20.	99.5715	0.0000e+00
2016.10.21.	99.5715	0.0000e+00
2016.10.22.	99.1429	1.6355e-04



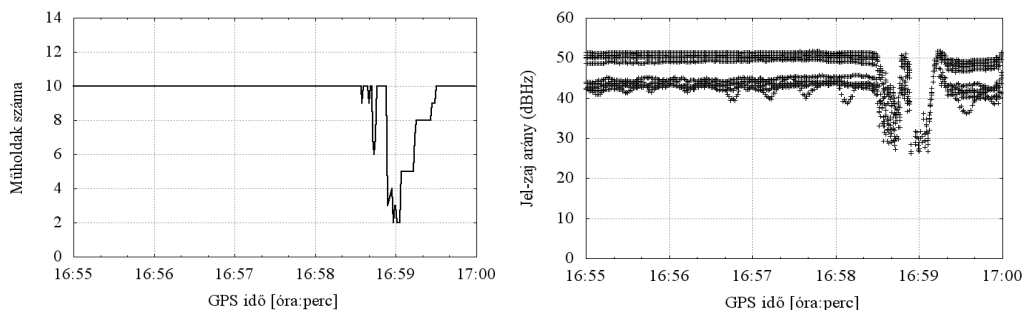
3. ábra. Védelmi szint vízszintes és magassági értelemben, valamint a helymeghatározás valódi hibáinak időbeli alakulása 2016. október 16-án, a BME EGNOS monitor állomásán rögzített nyers mérési adatok utófeldolgozásával

Honlapjukon tetszőlegesen kiválasztott RIMS állomásra vonatkozóan lekérhetők a pontosságra, integritásra, rendelkezésre állásra és folytonosságra vonatkozó főbb statisztikai adatok. Ugyanitt térképeken és grafikonokon is megjelenítik a főbb mérőszámokat. Az általunk tapasztalt adatok összhangban vannak a szolgáltató adataival. Érdekes, hogy a rendelkezésre állás a BME állomáson több napon is mindössze 99.57%, ugyanakkor a legközelebbi Warsaw RIMS állomáson a rendelkezésre állás a vizsgált időszak mind a hét napján 100%. Tapasztalataink szerint a mérések feldolgozása során a szoftver az első pontosan 370 epochára nem tud pozíciót számolni, a kódérések fázisméréssel történő szimulálásának inicializálása történik a jelzett időszakban és emiatt nem 100% a rendelkezésre állás.

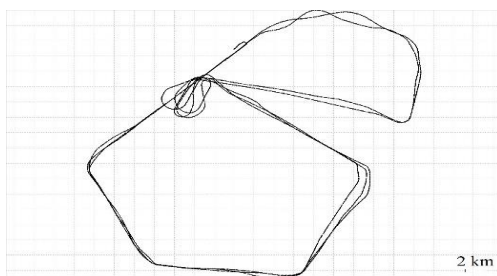
A vizsgált időszakban több napon is a helymeghatározás folytonossága néhány esemény erejéig megszakad, ennek oka helyi interferencia hatások (Pullen és Gao 2012, Takács 2017) (4. ábra). Ezen a napokon a rendelkezésre állás is ennek megfelelően értelemszerűen kis mértékben csökken.

4 Debreceni próbarepülés méréseinek feldolgozása

Statikus mérések feldolgozása és az eredmények értékelése után kisrepülőgépre szerelt GNSS-vevővel kinematikus méréseket végeztünk és a nyers méréseket a statikus mérésekhez hasonlóan utólag dolgoztuk fel. A mérések előtt kollégáink elkészítették a debreceni repülőtér műholdas helymeghatározáson alapuló navigációval történő megközelítési térképét. A mérések célja egyrészt a kinematikus GNSS-mérések feldolgozása és elemzése, másrészt a tervezett megközelítés berepülése, ellenőrzése. A méréseket 2016. július 12-én és 13-án végeztük, összesen 6 alkalommal repültünk be az előre tervezett útvonalat. A méréseket kétfrekvenciás, GPS- és GLONASS-jelek vételére egyaránt alkalmas vevővel (Topcon GR3) végeztük. Az egybeépített antennát és vevőt a PA-34 220T Piper Seneca repülőgép műszerfalára rögzítettük. Először a berepült útvonal (5. ábra) minél pontosabb meghatározását végeztük el. Ehhez szabatos abszolút helymeghatározást végeztünk. A meghatározott koordináták pontossága mind vízszintes, mind magassági értelemben néhány cm körüli. Ezután EGNOS korrekciók segítségével is feldolgoztuk a méréseket, majd a két megoldást összehasonlítva kaptuk az EGNOS korrekciókkal segített helymeghatározás valódi hibáit (6. ábra).



4. ábra. Interferencia esemény idején tapasztalható csökkenés a mért műholdak számában, valamint a jel/zaj arányban



5. ábra. A kinematikus mérés útvonala

A helymeghatározás pontossága vízszintes értelemben 1.65 m, magassági értelemben 2.54 m, ezek az értékek valamivel kedvezőtlenebbek a permanens állomás méréseinek feldolgozása során kapott értékeknél (2. táblázat).

A védelmi szintek értéke a kinematikus mérések esetén is számítható. A védelmi szintek értéke lényegében összhangban van a korábban tapasztalt értékekkel (6. ábra).

5 Vizsgálatok szimulált Galileo adatokkal

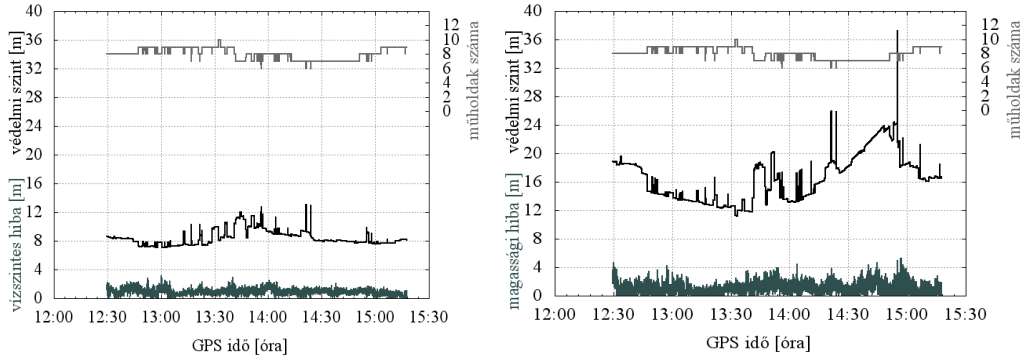
Az eddig bemutatott tapasztalatok alapján látható, hogy az LPV-200 kategóriának megfelelő követelmények jelen pillanatban is teljesíthetők az EGNOS korrekciókkal segített helymeghatározással. Ugyanakkor felmerül az igény az EGNOS korrekciókkal szemben, hogy még szigorúbb navigációs követelményeket is kielégítő megoldást lehessen elérni. Ehhez alapvetően a védelmi szintek értékének jelentős csökkentését kell megoldani, különösen magassági értelemben. A védelmi szintek értékének csökkentése elérhető egyrészt a szabályos hibák hatásának csökkentése érdekében meghatározott modellek pontosságának fokozása útján.

Egy másik, bizonyos szintig hatékonyabb megoldás lehet a helymeghatározásba bevont műholdak számának növelése, ezzel együtt a műhold-geometria kedvezőbbé tétele (Speidel et al. 2013). A műhold-geometria számszerű jellemzésére használt DOP érték és a védelmi szint értéke között ugyanis lényegében lineáris az összefüggése (7. ábra).

A műholdak számának növelése az amerikai GPS-műholdak mellett további rendszerek (pl. Glonass, Galileo) műholdjainak integrálásával oldható meg. Jelen pillanatban is már több Galileo műhold mérhető, illetve a műholdak száma öröndetes módon folyamatosan nő.

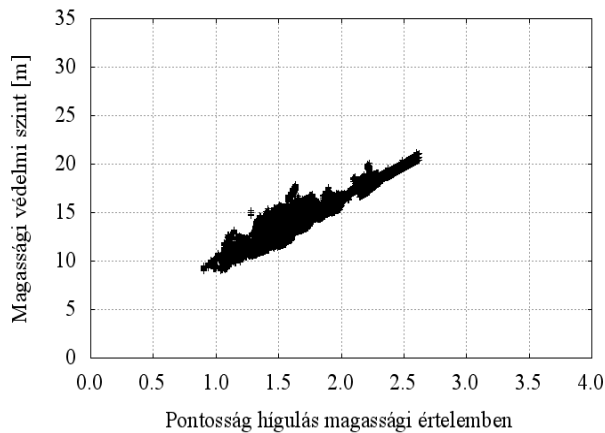
Sajnos vizsgálatainkhoz kellő számú valódi Galileo-mérés még nem áll rendelkezésünkre, ezért szimulált Galileo-mérésekkel dolgozunk a továbbiakban (8. ábra). A szimulált Galileo-méréseket is bevonva meghatároztuk az EGNOS-korrekciókkal segített helymeghatározás valódi hibáit és összehasonlítottuk a csak GPS-műholdakkal végzett helymeghatározás valódi hibáival (9. ábra). A pozíció hibák alig valamelyest csökkennek, vízszintes értelemben 0.59 m-ről 0.42 m-re, magassági értelemben 1.03 m-ről 0.97 m-re (95 %-os szinten).

Továbbá mindkét esetben meghatároztuk a védelmi szintek értékét is. A Galileo-műholdak bevonásával a védelmi szintek értékében jelentős a csökkenés, vízszintes értelemben 13.43 m-ről 9.87 m-re, magassági értelemben 21.34 m-ről 15.05 m-re. Különösen fontos, hogy a védelmi szintek rövid ideig tartó, hirtelen kiugró értékei lényegében eltűnnek, a görbék időben közel állandó, stabil értéket vesznek fel (10. ábra).

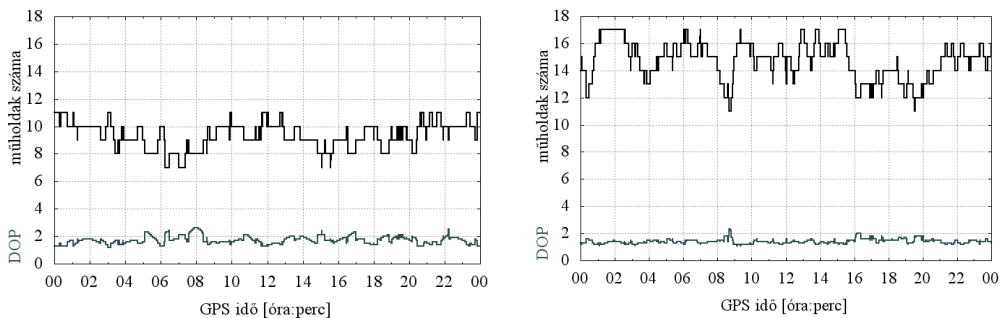


6. ábra. A kinematikus mérések során rögzített pozíciók valódi hibái és védelmi szintek.

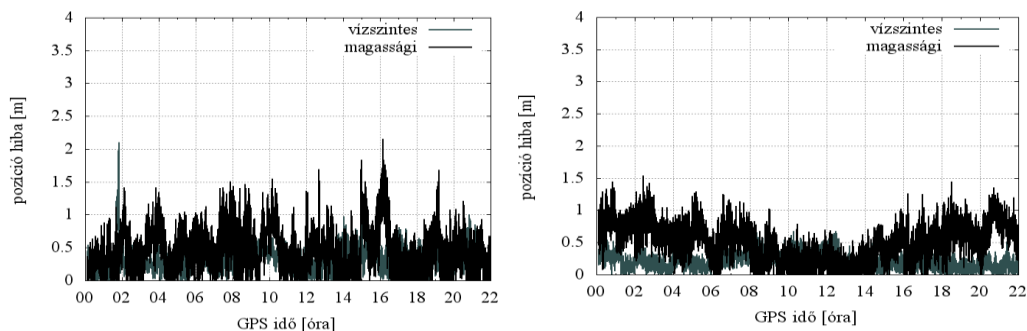
Az alsó görbe a vízszintes hibát, a középső görbe a védelmi szintet, a felső görbe a műholdak számát mutatja



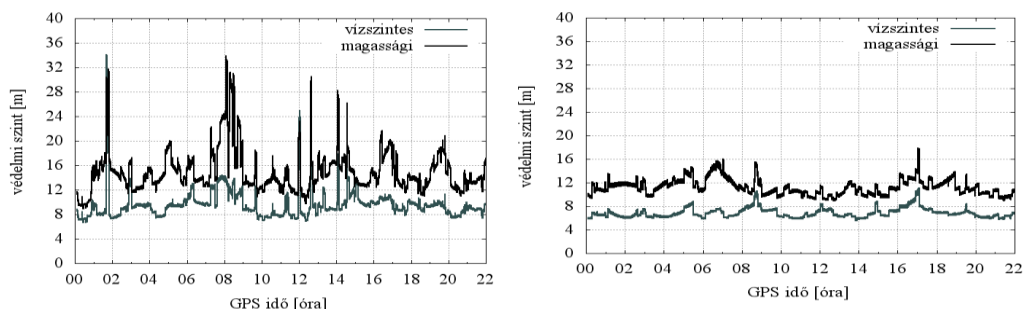
7. ábra. A védelmi szint és műhold-geometria közötti összefüggés csak GPS-műholdak esetén



8. ábra. Valódi GPS- és szimulált Galileo-műholdak száma, valamint DOP-értékek



9. ábra. EGNOS-korrekciókkal segített helymeghatározás valódi hibái csak GPS, valamint GPS és szimulált Galileo-mérések esetén



10. ábra. Védelmi szintek csak GPS, valamint GPS és szimulált Galileo-mérések esetén

4 Összefoglalás

Magyarországi LPV eljárások tervezésével párhuzamosan végeztük az EGNOS alapú helymeghatározás hatékonyságának vizsgálatát statikus és kinematikus mérések alapján egyaránt. Legfőbb megállapításunk, hogy a vizsgált mérések alapján jelen pillanatban a pontosság, integritás és rendelkezésre állás terén bőven teljesíthetők az ICAO előírásai LPV-200 szinten. A folytonosság terén ugyanakkor tapasztalhatók kisebb hiányosságok interferencia jelenségek miatt. Megvizsgáltuk továbbá Galileo adatok integrálásának hatását is. Galileo adatokkal a műhold-geometria valamivel kedvezőbb, ennek köszönhetően a védelmi szintek értéke is csökken. Galileo adatok bevonásával a 2 feletti VDOP értékek lényegében eltűnnek, ennek megfelelően a védelmi szintek értéke magassági értelemben 18 méter alá csökken.

Köszönetnyilvánítás. A szerzők hálásan köszönik a BEYOND projektben dolgozó munkatársak segítségét, támogatását.

Hivatkozások

- Ádám J, Bányai L, Borza T, Busics Gy, Kenyeres A, Krauter A, Takács B (2004): Műholdas helymeghatározás. műegyetemi Kiadó, Budapest, 458.
- Ciećko A, Grzegorzewski M, Oszcak S, Ćwiklak J, Grunwald G, Balint J, Szabo S (2015): Examination of EGNOS Safety-of-Life service in eastern Slovakia, Annual of Navigation, 22(1), 65-78, DOI: 10.1515/aon-2015-0021.
- Grunwald G, Bakula M, Ciećko A, Kaźmierczak R (2016): Examination of GPS/EGNOS integrity in north-eastern Poland, IET Radar, Sonar & Navigation, 10(1) 114-121, DOI: 10.1049/iet-rsn.2015.0053.
- Pullen S, Gao GX (2012): GNSS jamming in the name of privacy, InsideGNSS, 7(2), 34-43.
- Speidel J, Tossaint M, Wallner S, Ávila-Rodríguez JÁ (2013): Integrity for Aviation: Comparing Future Concepts, Inside GNSS, 8(4), 54-64.
- Radio Technical Committee for Aeronautics. Minimum Operational Performance Standards for Airborne Equipment Using Global Positioning System/Wide Area Augmentation System, Doc. DO-229D, 2013.
- Takács B (2017): GPS-zavarok vagy zavarok a GPS-jelvételezésben, Geodézia és Kartográfia, 69(3), 20-25.

A PANNON-MEDENCE FESZÜLTÉGVISZONYAINAK VIZSGÁLATA A FÖLDRENGÉSEK FÉSZEKMECHANIZMUSÁNAK INVERZIÓJÁVAL

Czirok Lili*



Analysis of stress relations in the Pannonian Basin using focal mechanism solutions – Altogether 160 focal mechanism solutions of earthquakes detected in the Pannonian basin were used to estimate stress relations by the application of “STRESSINVERSE” program code in MATLAB R environment. For the inversion the study area was divided into cells based on the orientations of principal stress trajectories (direction of the maximum horizontal compression) and the distribution of epicentres. Most of the results are similar to those published by previous studies.

Keywords: Pannonian Basin, earthquakes, focal mechanism solutions, stress inversion



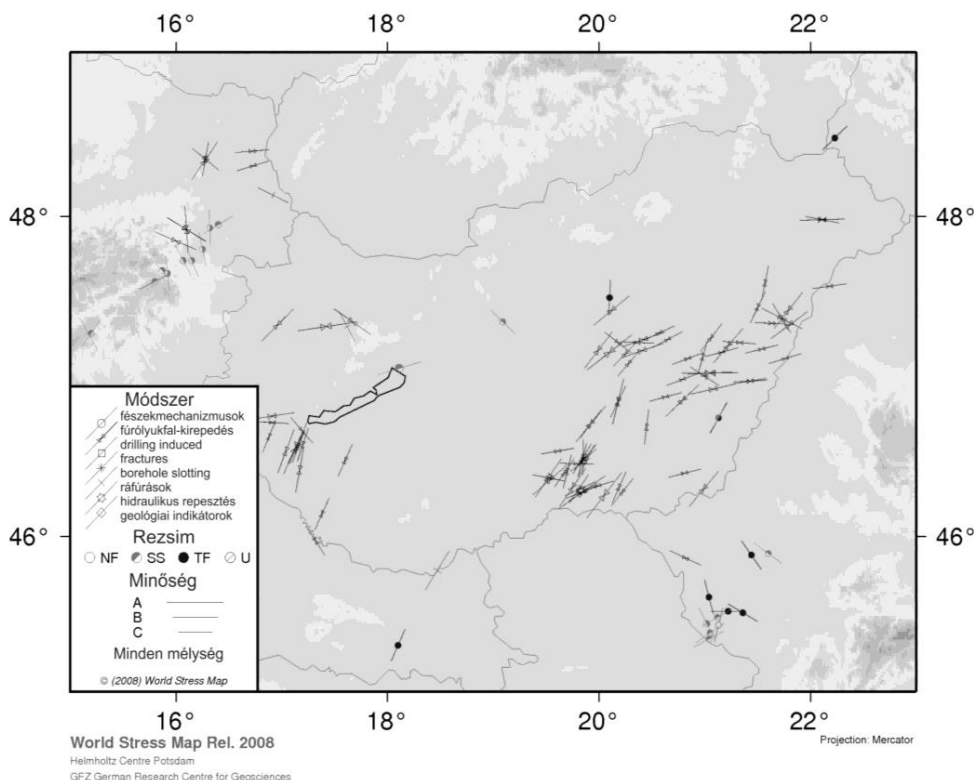
Jelen cikkben a Pannon-medence – főként hazánk és közvetlen környezete – feszültségviszonyaival kapcsolatos vizsgálat eredményeit mutatjuk be, amelyhez földrengések fészekmechanizmus-megoldásait használtuk fel. A számításokhoz összesen 160 fészekmechanizmus-megoldás került felhasználásra. A feszültséginverziókat a STRESSINVERSE nevű programban, MATLAB R környezetben végeztük el. Az inverziókhoz kisebb részekre osztottuk fel a vizsgált területet a feszültség-trajektóriák (maximális horizontális kompressziós irány, S_{hmax}) irányítottágának illetve a felhasznált események térbeli eloszlásának függvényében. A kapott eredmények többsége jó hasonlóságot mutat a korábban publikált eredményekkel.

Kulcsszavak: Pannon-medence, földrengések, fészekmechanizmus-megoldások, feszültséginverzió

1 Bevezetés

A Pannon-medence jelenkori feszültségeloszlása mind függőleges, mind vízszintes irányban változó képet mutat. Ez visszavezethető a kora-miocénben megkezdődő extenzióhoz, illetve az azt követő tektonikus inverzióhoz kapcsolódó litoszféra-meghajláláshoz és annak képlékeny deformációjához illetve törések keletkezéséhez és/vagy azok reaktiválódásához. Napjainkban a legfőbb hajtóerő az ún. „Adria-nyomás” (miszerint a Pannon medence térségére a legjelentősebb jelenkori lemeztektonikai hatást a meglehetősen merev Adriai mikrolemez vagy más néven *Adria tüske* gyakorolja a többé-kevésbé északi irányú- és az óramutató járásával ellentétes irányú forgó mozgásával). A Pannon-medencét jelenleg eltolódásos és kompressziós feszültségmező jellemzi (Gerner et al. 1999, Grenerczy et al. 2005, Bada et al. 2007a,b,c).

A World Stress Map Project 1986-ban jött létre, jelenleg ez a legfontosabb kutatási program a feszültségviszonyok tanulmányozásában. Adatbázisában megtalálhatóak fűrőlyukfál-kirepedésekből, ráfűrásos technikából származó főfeszültség-irányok (maximális horizontális irányok, S_{hmax}), műholdas geodéziai (GPS) mérésekből származó, vízszintes kéregmozgás sebességére vonatkozó adatok és fészekmechanizmus-megoldások, amelyekből a maximális horizontális kompressziós irányokra és az uralkodó tektonikai szerkezetre is lehet következtetni. A mérési adatok szórása egyes területeken nagy, így azokon a helyeken például numerikus modellezés segítségével is meghatározzák a feszültségviszonyokat (pl. Bada et al. 2007a,b,c). Az 1. ábrán a WSMP-weboldalán található CASMO-programmal létrehozott térkép látható Magyarországról és környezetéről.

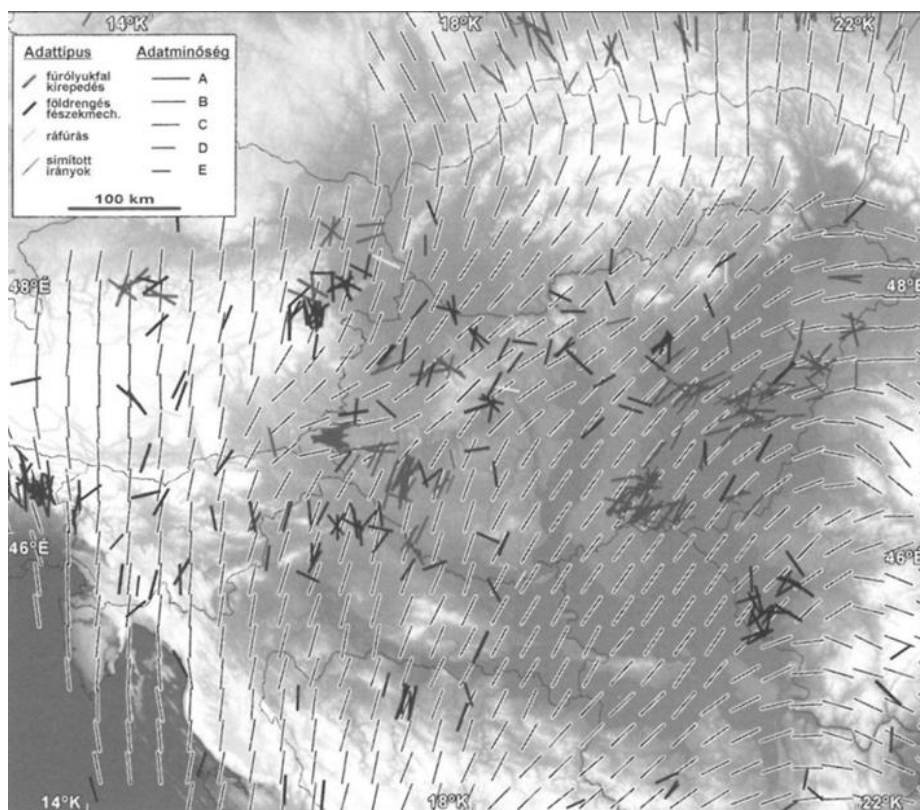


1. ábra. WSMP-adatbázisa Magyarországra és környezetére (Forrás: www.world-stress-map.org, 2008)

Az ábra magában foglalja a feszültségmező jellemzéséhez felhasznált mérési módszereket, valamint az azokból származó eredményeket, azaz a kapott maximális horizontális irányokat és a térségekre jellemző tektonikus rendszert. Magyarországon és a határterületeken elsősorban feszékmekanismus-megoldásokat (áthúzott kör) illetve fűrólyukfal-repedések méréséből (áthúzott, egymással szemben álló háromszögek) származó eredményeket használtak fel. Domináns tektonikai szerkezetek között megtalálható az oldaleltolódás (félíg beszínezett, áthúzott kör) és feltolódás (áthúzott fekete kör), a mért maximális horizontális irányok helyről helyre eltérnek, leginkább É-D-i illetve ÉK-DNy-i irányítottság a jellemző.

A 2. ábrán a Pannon-medencére elvégzett numerikus modellezés eredményei láthatók (Bada et al. 2007c). A számításokhoz a World Stress Map Project-adatbázisa mellett felhasználták a Magyarországi Földrendések Évkönyveiben addig publikált összes feszékmekanismust (Tóth et al. 1996-2007). A modellezés eredményét a szürke vonalak mutatják, ezek a kapott simított S_{hmax} -irányok. Jól látható, hogy a felhasznált mérési adatok szórása nagyobb, mint a simított irányoké, azok egységesebb képet mutatnak. Azonban néhány helyen látható, hogy az elvégzett számítások eredményei eltérnek a mért adatoktól.

A feszültségmezőt legmegbízhatóbban a földrendésekhez tartozó feszékmekanismus-megoldások segítségével lehet leírni, hiszen maga a feszültségmező okozza a szeizmikus eseményeket. A feszékmekanismusokat három szögadattal lehet jellemezni: dőlésszöggel, dőlésiránnyal és csúszásiránnyal (angolul: strike, dip, rake) és a megoldások meghatározhatók polaritás-adatokból (a földrendések első beérkezéseinek, a P-hullámoknak pozitív vagy negatív polaritása) illetve a teljes hullámformára elvégzett inverzió számításával.



2. ábra. A WSMP adatai illetve az ezekre elvégzett numerikus modellezés eredménye (Bada et al. 2007c)

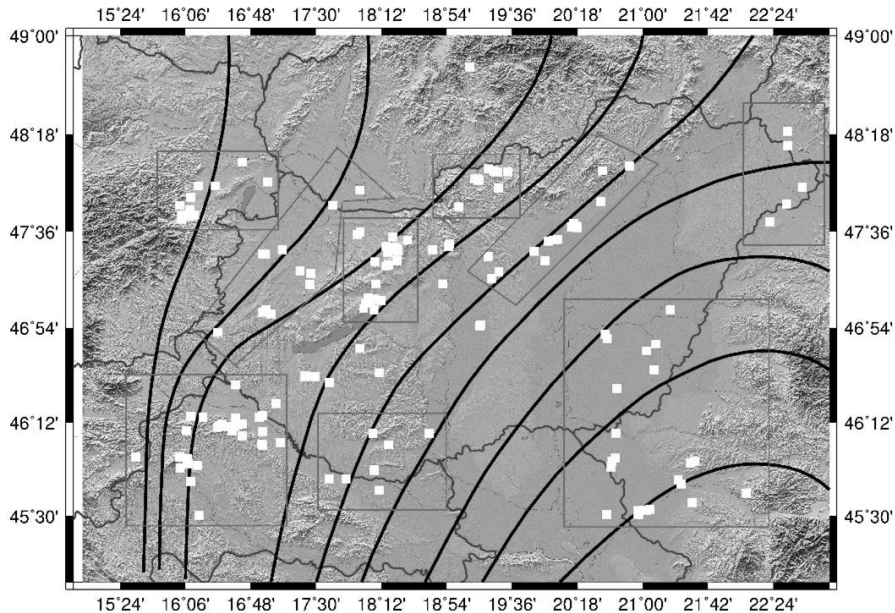
A kutatás legfontosabb célkitűzése az volt, hogy a Pannon-medence – különösen hazánk és környezete – feszültségviszonyairól és tektonikai háttéréről eddig ismert információkat megerősítsük vagy pontosítsuk. Ehhez a 2015. évig publikált összes, megbízható fészekmechanizmus-megoldásra feszültséginverziós számításokat hajtottunk végre, amelynek eredményeit összevetettük az eddig publikáltakkal (főként Bada et al. 2007a,b,c). A felhasznált megoldások hazai és nemzetközi adatbázisokból származnak.

2 Felhasznált adatok

A feszültséginverzióhoz szükséges fészekmechanizmusok többségét a Magyarországi Földrengések Évkönyveiből (Tóth et al. 1996-2015), a Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletinekből (Gráczner et al. 2012, 2013) és szakmai folyóiratokból gyűjtöttük ki (Wéber és Süle 2014, Wéber 2016a,b), de néhány megoldást az European Mediterrean Seismological Centre honlapjáról (<https://www.emsc-csem.org/#2>, 2016.05.21) is letöltöttünk. Ezeket a megoldásokat polaritás-adatokból illetve teljes hullámforma inverzióval számították ki.

Az adatok összegyűjtése után a megbízhatóságuk függvényében szelektálni kellett őket. Az első beérkezések alapján meghatározott fészekmechanizmusoknál, ha a pozitív (kompressziós) és negatív (dilatációs) polaritások eloszlásának vagy csekély számának következtében nem volt kijelölhető egyértelműen a két segédsík – és így a kompressziós és dilatációs ténnyegyed sem – akkor az a megoldás nem került alkalmazásra. Továbbá, ha egy szeizmikus eseménynél ismertem létezett mindkét típusú fészekmechanizmus, akkor a hullámforma inverzió segítségével meghatározott megoldással dolgoztunk, ugyanis ezek megbízhatósága jobb, ezáltal a számítások eredményeire is nagyobb pontosságot várhattunk.

A válogatás után 160 fészekmechanizmus-megoldás maradt. Még mielőtt a számításokat elkezdtük, fel kellett osztani több kisebb területre a Pannon-medencét az epicentrumok térbeli eloszlása és a feszültség-trajektóriák (Bada et al. 2007c) iránya alapján. A következő térségekre bontottuk fel a Pannon-medencét: Mur-Mürz-Zilina zóna (MMZ), Kisalföld, Komárom és Berhida közötti térség, Nógrád-Gömöri térség, Jászság, Nyírség, Horvátország északnyugati része, Dél-Dunántúl illetve Dél-Alföld és Bánság térsége. A 3. ábrán a kiválasztott szeizmikus események epicentrumai (fehér négyzetek) láthatók a 2007-ben publikált feszültség-izovonalakkal, ahol a szürke körvonalak jelölik a számításban részt vevő térségeket.



3. ábra. A feszültséginverziókhoz felhasznált megoldások és kijelölt területek a feszültség-izovonalakkal (Bada et al. 2007c)

A fehér négyzetek az epicentrumokat jelölik, a négyzetek a kijelölt vizsgálati helyszíneket mutatják. Jelen cikkben a Mur-Mürz-Zilina zónára elvégzett inverzió kerül bemutatásra, a többi kisebb területen kapott eredményeket összefoglaló térképeken illusztráljuk.

3 Alkalmazott módszer

Ahhoz, hogy egy terület főfeszültség-irányait feszültséginverzió segítségével kiszámíthassuk, teljesülnie kell három feltételnek:

- 1) A földrengéseknek már létező törések mentén, változó irányítottsággal kell kialakulniuk.
- 2) A vizsgált területre jellemző feszültségmezőnek homogénnek kell lennie.
- 3) A fészekmechanizmus-megoldás által megadott csúszási vektor és a keresett feszültségtenzor által a vetősíkon létrejövő nyírófeszültség iránya közötti eltérésnek a Wallace-Bott hipotézis szerint minimálisnak kell lennie (Vavryuk 2014).

Ha ezeket a feltételeket sikerül kielégíteni, akkor elkezdhetjük az inverziós feladat megoldását, azaz fészekmechanizmus-megoldások segítségével meghatározni a feszültségtenzort. Ez a tenzor magában foglalja a három főfeszültség (σ_1 , σ_2 , σ_3) irányát, továbbá az

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (1)$$

számot, amellyel ezeknek a tengelyeknek a relatív nagyságát jellemezhetjük (1).

Többféle feszültséginverziós eljárást dolgoztak ki, valamennyivel a tektonikai feszültség határozható meg a fészekmechanizmusokból. Ilyen eljárást fejlesztett ki és alkalmazott pl. Gephart, az FMSI program létrehozója (Gephart 1990), Jacques Angelier, aki a priori képes volt meghatározni a feszültségtenzort (Angelier 2002), (Michael 1984) és (Hardebeck és Michael 2006), akik egy lineáris, csillapított inverziót alkalmaztak, amit (Vavrycuk 2014) továbbfejlesztett.

A számítások során a Vavrycuk-féle módszerrel dolgoztunk, amely egy lineáris, iteratív inverzió. Ezen a módszeren alapszik a MATLAB környezetben működő STRESSINVERSE nevű függvénycsomag (Vavrycuk 2014), amellyel elvégeztük a 3. ábrán kijelölt területekre vonatkozó számításokat.

A Vavrycuk-féle módszernél megoldandó inverziós feladat ugyanaz, mint a többi feszültséginverziós módszernél – cél, hogy a bevitt fészekmechanizmusokhoz legjobban illeszkedő (2) feszültségtenzort találjuk meg (A továbbiakban a feszültségtenzor főátlójában lévő elemeket a következőképpen használom: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$).

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (2)$$

A (2) feszültségtenzor szimmetrikus, tehát mindössze 6 független eleme van.

Ez a módszer lineáris, amely azt jelenti, hogy a modellparamétereket tartalmazó $\mathbf{m}$ vektor és a $\mathbf{d}$ adatvektor között lineáris kapcsolat áll fenn. Az

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{33} \end{pmatrix}, \sigma_{33} = -(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (3)$$

vektorban a modellparaméterek találhatók, amely a (2) Σ feszültségtenzor elemeiből áll és

$$\mathbf{d} = \begin{pmatrix} s_{11} \\ s_{12} \\ s_{13} \\ \dots \\ s_{K1} \\ s_{K2} \\ s_{K3} \end{pmatrix} \quad (4)$$

az egy-egy eseményhez kapcsolódó egységnyi csúszási vektor, ahol K az események számát jelöli, s_{ij} pedig az i eseményhez tartozó csúszási vektor j összetevőjét mutatja.

Azt feltételezzük, hogy a feszültségtenzornak nincs izotróp komponense, mivel ha lenne, akkor minden főfeszültséghez azonos értéket adna, mely a fészekmechanizmus-megoldások alapján nem határozható meg. A (3) képletben ezért is tudjuk így kifejezni a σ_{33} főfeszültséget.

Ha ismerjük a feszültségtenzort és a vetősík $\mathbf{n}$ normálvektorát, akkor meg tudjuk határozni a $\mathbf{t}$ feszültségvektort, majd a feszültségvektorból levezethetjük a normál- és nyírófeszültségre vonatkozó összetevőket. Az inverziós feladat szempontjából a vetősíkon fellépő $\mathbf{t}_s$ nyírófeszültség-vektor játssza a fontosabb szerepet:

$$\mathbf{t}_s = \mathbf{G}\mathbf{m}. \quad (5)$$

Az (5) egyenletben $\mathbf{G}$ a normálvektor összetevőit magában foglaló mátrix. Ha az (5) egyenletet K szeizmikus eseményre írjuk fel és alkalmazzuk a Wallace-Bott hipotézist, akkor a

$$\mathbf{G}\mathbf{m} = \mathbf{d} \quad (6)$$

$3K$ tagból álló lineáris egyenletrendszerhez jutunk. A (6) egyenletrendszer túlhatározott probléma, megoldására a legkisebb négyzetek módszerét lehet alkalmazni:

$$\mathbf{G}^T \mathbf{G}\mathbf{m} = \mathbf{G}^T \mathbf{d}. \quad (7)$$

A módszer nemcsak lineáris, hanem iteratív is. Az iterációkra azért van szükség, hogy a Mohr-Coulomb törési feltétel segítségével megvizsgáljuk a bevitt fészekmechanizmusokhoz tartozó segédsíkok instabilitását és ez alapján meghatározzuk a valódi vetősíkot.

Az első iterációban az inverzió a vetősíkok irányítottságának ismerete nélkül kiszámítja a főfeszültség-tengelyek irányítottságát és az R-számot, amely lépés még Michael-módszerén alapszik. Ezután a második iterációs lépésben már figyelembe veszi a vetősíkok instabilitásának kényszerét – a Mohr-Coulomb törési feltétel segítségével a bevitt segédsíkok közül kiválasztja az instabilabbat és ezt felelteti meg a valódi vetősíknak. Ezután újra kiszámítja a feszültségtenzor tagjait. Ezek az iterációs lépések addig ismétlődnek és váltják egymást, amíg az eredmény nem közelít az optimális megoldáshoz. A Pannon-medencével kapcsolatos vizsgálatoknál minimum 10, maximum 60 iterációs lépésre volt szükség.

Az inverzió és az eredmények megbízhatóságának tanulmányozására különböző eseteket néztünk meg. Ezeknek lényege az, hogy a program adott fokos Gauss-eloszlásban hoz létre a bevitt adatok segítségével újabb adatokat, amelyekkel aztán ismét lefut. A legtöbb területen 100 különböző változatot vizsgáltunk meg, 5°-os eltéréssel, de olyan területeken, ahol kevesebb fészekmechanizmus-megoldásunk volt vagy a létező megoldások bizonytalansága magas volt, ott módosítottunk az alapbeállításokon (pl. a Kisalföldön az eltérés 8 fokos, a változatok száma pedig 200).

A STRESSINVERSE program az eredményeket négy ábrán szemlélteti. Egy sztereogram mutatja a bevitt adatok alapján megállapított P- (kompressziós) és T- (tenziós) tengelyek irányítottságát (lényegében véve a bemeneti adatokat szemlélteti). Egy másik sztereogram a kiszámított főfeszültség-tengelyeket mutatja a bizonytalanságukkal együtt, továbbá a hibavizsgálat alapján elkészül még az R-számok értékeire egy hisztogram, amelynek maximum helyéről leolvasható a legjobban illeszkedő érték, és egy Mohr-Coulomb diagram, amely a főfeszültségek által alkotott Mohr-köröket ábrázolja a lehetséges törési síkokkal (ez az inverzió megbízhatóságát prezentálja). Az eredmények leírásánál minden típusú ábrára látható példa.

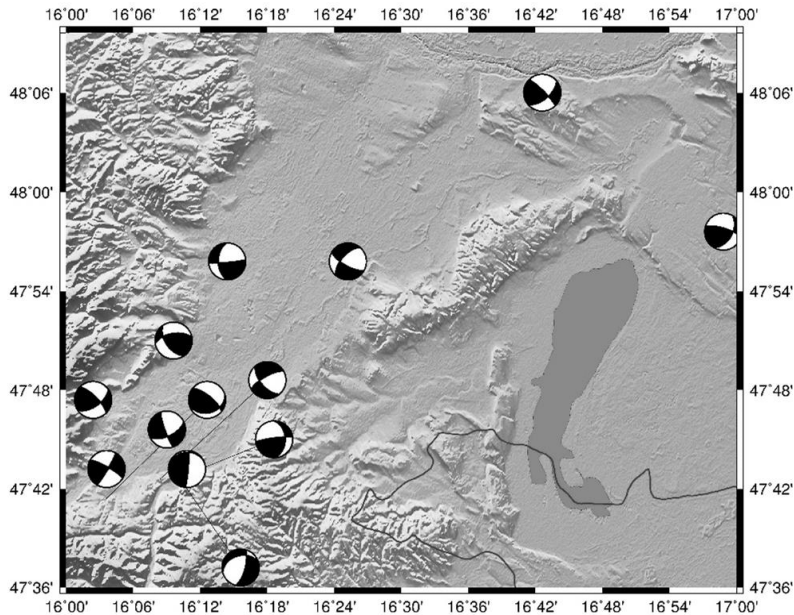
4 Eredmények

4.1 Mur-Mürz-Zilina zóna

A Mur-Mürz-Zilina (MMZ) zóna a Bécsi-medence déli részén fekszik és a vizsgált térségek közül az egyik legaktívabb szeizmicitású terület. Az itt elvégzett feszültséginverzió 13 földrengéshez tartozó fészekmechanizmus – sztereografikus projekciója az ún. „strandlabda” – felhasználásával lett végrehajtva. A 4. ábrán láthatók ezek a fészekmechanizmusok.

A „strandlabdák” feltételezéseket tehetünk arra vonatkozóan, hogy milyen kompressziós irányú tektonikai szerkezethez köthető a szeizmikus események kialakulása. A fekete rész jelöli a kompressziós, a fehér a dilatációs térsíkot. A dilatációs térsíkra merőlegesen behúzott tengely iránya megegyezik az S_{hmax} -iránnyal, a „strandlabdák” helyzetéből pedig a feszültségtér határozható meg. Ezen a területen leginkább közel É-D-i kompressziós irányú oldalelmozdulásokhoz kapcsolódhatott a legtöbb földrengés.

Ennél a térségnél az iterációk száma 10 volt, a hibavizsgálathoz kapcsolódó átlagos fokeltérést és a változatok számát nem módosítottuk.



4. ábra. A MMZ-területén kipattant rengések "strandlabdái"

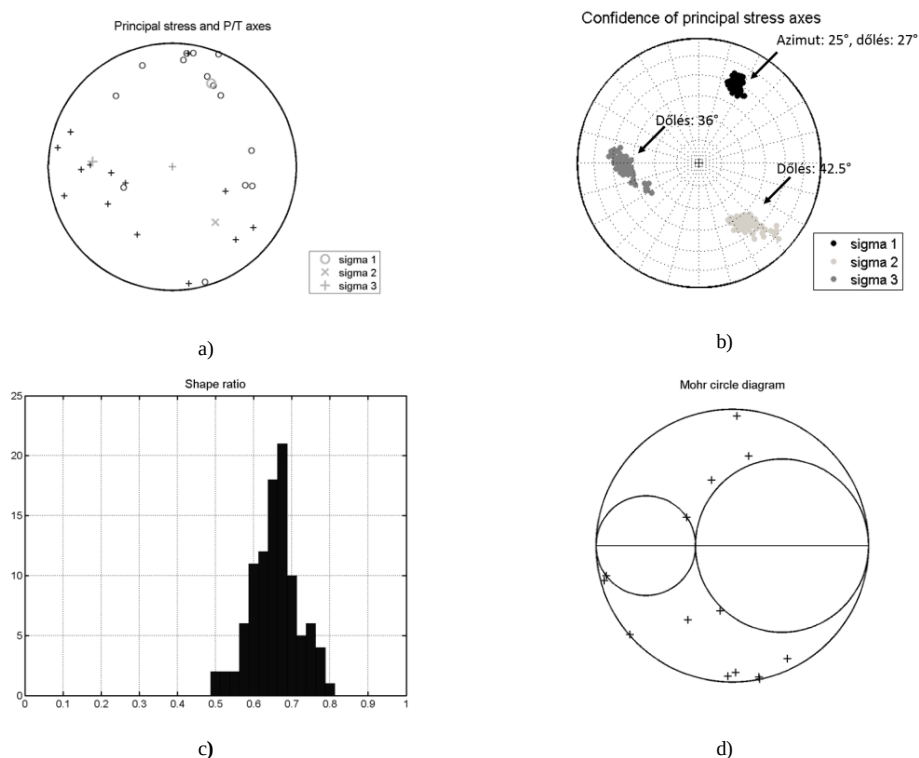
Az 5. ábrán a STRESSINVERSE-ben kapott eredmények láthatóak. A bal felső sztereogram tartalmazza a P- és T-tengelyek irányítottságával kapcsolatos adatokat, a jobb felső az ezekből kiszámított σ_1 , σ_2 - és σ_3 -tengelyek irányát bizonytalanságukkal együtt, a bal alsó az R-számokra elkészített hisztogram, a jobb alsó pedig a Mohr-körök diagramja a lehetséges irányítottságú törési síkokkal. A program az R-szám mellett a főfeszültségek azimutjára és dőlésére legjobban illeszkedő értékeket is kiszámítja.

A bevitt adatokat szemléltető P- (körök) és T-tengelyek (keresztek) sztereogramja alapján látható, hogy a legtöbb esemény közel É-D-i kompressziós irányítottságú. A főfeszültségekhez tartozó tengelyek helyzetét az azimut és a dőlés (plunge) határozza meg. Ezeknek pontos értékei a programban az iterációk lefutása után mátrix formájában jelennek meg, a sztereogramokról csak hozzávetőlegesen lehet meghatározni az azimutot és a dölést. A főfeszültség-sztereogramon (a 5b ábrán fekete színnel jelölt) σ_1 -főfeszültség azimutja 25° – azaz ÉÉK-DDNy-irányú –, ez jó egyezést mutat a fészekmechanizmusok kompressziós irányával, így megfeleltethető a térségre jellemző S_{hmax} -iránynak.

A főfeszültség-tengelyek dölései a következők: σ_1 esetében 27° , σ_2 esetében 42.5° (5b ábrán világosszürke) és σ_3 esetében pedig 36° (5b ábrán sötétszürke). Ez alapján a σ_2 -tengelye áll legközelebb a függőleges helyzethez, ami oldaleltolódást jelez.

A hibavizsgálat alapján elkészült hisztogramon az R-szám értéke 0.5 és 0.81 között változik, a hisztogram maximum helyén lévő érték 0.68 (5c ábra).

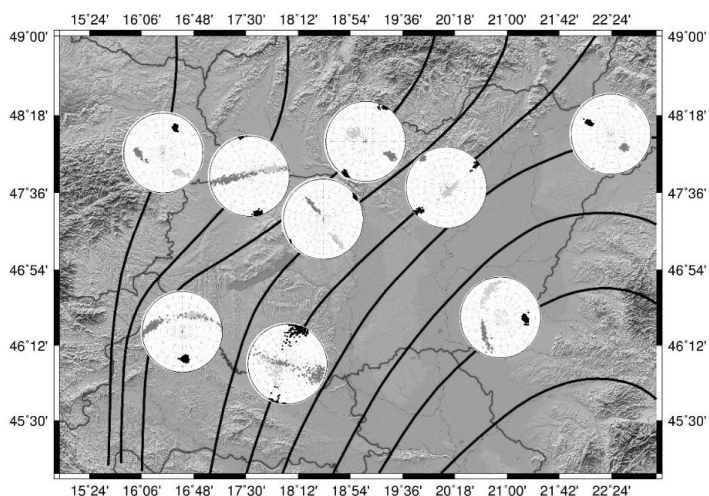
A 5d ábrán a Mohr-körök diagramján lévő keresztek a lehetséges irányítottságú törési síkokat jelölik. Minél közelebb vannak a σ_1 és σ_3 -főfeszültség által alkotott legnagyobb Mohr-körhöz, annál instabilabbak, tehát annál inkább azonosíthatóak a valódi vetősíkkal. Ez a diagram az inverzió megbízhatóságát mutatja be – a legtöbb lehetséges irányú törési sík a legnagyobb Mohr-körnél található, így az inverzió megbízhatónak tekinthető.



5. ábra. A MMZ-területén kapott eredmények a STRESSINVERSE-ben: a) P- és T-tengelyek sztereogramja, b) a főfeszültségekre kiszámított sztereogram, c) a hibavizsgálat alapján készült histogram az R-számokra, d) pedig a kapott Mohr-körök diagramja

4.2 További eredmények

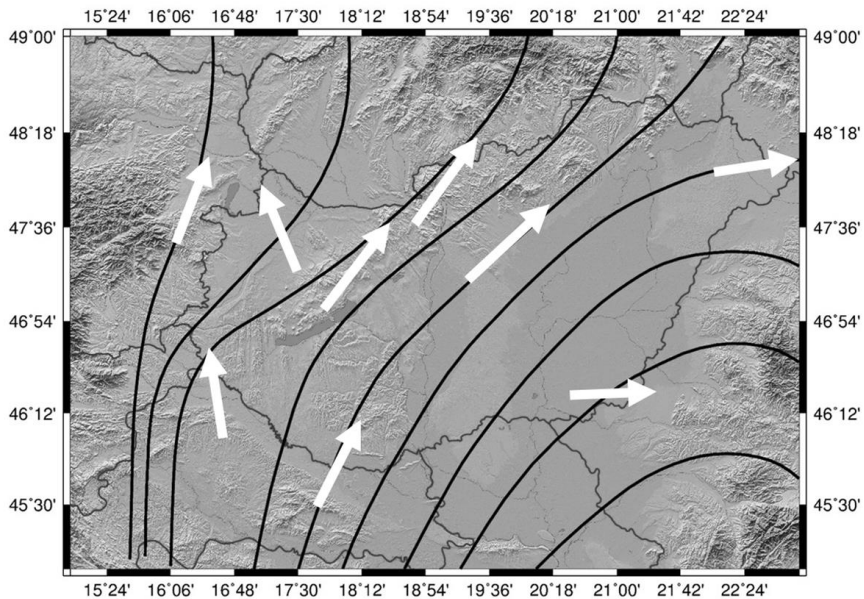
A 6. és a 7. ábra a vizsgált területekre kiszámított főfeszültség-sztereogramot és az S_{hmax} -irányokat, illetve a feszültség-izovonalakat (Bada et al. 2007c) szemlélteti.



6. ábra. A vizsgált területekre kapott főfeszültség-sztereogramok és a feszültség-izovonalak (Bada et al. 2007c) összevetése

Látható, hogy a sztereogramok többségén a σ_2 -főfeszültség-tengelye közel függőleges, míg a másik kettő közel vízszintes, mint pl. a Jászság és Nógrád-Gömöri térségben vagy az előbb bemutatott MMZ-zónánál. Ezen térségekben tehát az oldaleltolódások tekinthetők uralkodó tektonikus szerkezeteknek. A Nyírségben illetve a Dél-Alföld és Bánság területénél a σ_3 -főfeszültség lesz közel függőleges, ezeken a területen már inkább a kompressziós tektonika jellemző. Továbbá vannak olyan térségek, ahol a σ_2 - és σ_3 -főfeszültség tengelyei összemosódnak: ez leginkább a felhasznált fészekmechanizmusok bizonytalanságára, csekély számára vagy ezek változatosságára vezethető vissza (pl. ÉNy-Horvátországban aránylag sok megoldás volt, amelyek tektonikai értelemben nagyon változatos képet mutattak).

A 6. ábrán is jól kivehetők a σ_1 -főfeszültség azimutjai és ebből a maximális horizontális kompressziós irányok, de hogy még jobban látható legyen, elkészítettük a 7. ábrát, ahol fehér nyilak jelölik a kisebb területek feszültségmezőire jellemző irányokat.



7. ábra. A kiszámított σ_1 -főfeszültség tengelyeinek azimutjából meghatározott S_{hmax} -irányok (fehér nyilak) és a feszültség-trajektóriák (Bada et al. 2007c) összevetése

A meghatározott S_{hmax} -irányok alapján hazánk és környezetének feszültségmezeje nyugatról keleti irányba haladva észak-déli irányítottságból (pl. ÉNy-Horvátország és MMZ) kelet-nyugatiba (Nyírség, D-Alföld és Bánság) fordul át, a középső területeken ÉK-DNy-i S_{hmax} -irányú, mint pl. Komárom és Berhida között vagy a Jászság területén.

5 Összefoglalás

Hazánkat és határterületeit közepes szeizmikus aktivitás jellemzi, a földrengés-epicentrumok térbeli eloszlása inhomogén. Ezenfelül a szeizmikus mérőhálózat lefedettsége sem elég nagy, a mérőállomások elhelyezkedése egyenlőtlen (AlpArray projekt keretein belül a Dunántúlon további állomásokat telepítettek). Ennek következtében viszonylag kevés fészekmechanizmus-megoldást ismerünk és ezeknek megbízhatósága is olykor megkérdőjelezhető. Továbbá a Pannon-medencére – és központi részére is – jellemző feszültségmező irányítottsága helyről-helyre változásokat mutat, mind függőleges, mind vízszintes irányban.

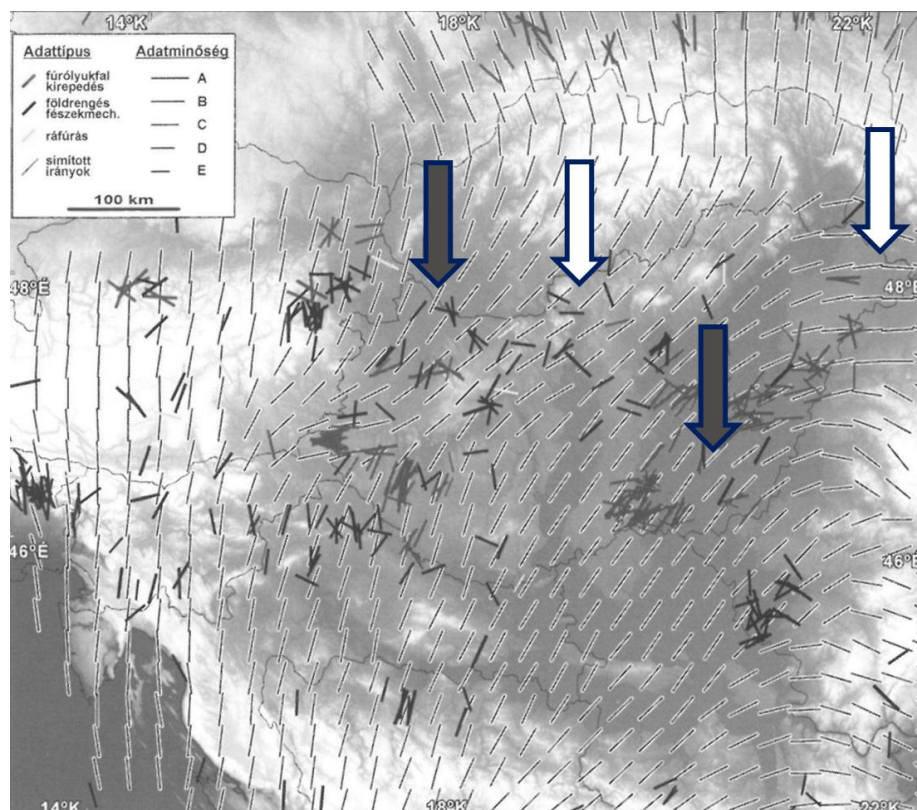
Ezeket a szempontokat figyelembe véve kisebb területekre kellett bontanunk országunkat a vizsgálathoz, teljes egészére nem volt lehetőségünk elvégezni a feszültség-inverziókat. Így

előfordultak olyan térségek, ahol vagy kevés volt az események száma (pl. Nyírség, ahol mindössze 5 megoldás volt) vagy a felhasznált fészekmechanizmusok nem voltak elég megbízhatóak (pl. Kisalföld), de volt olyan terület is - pl. a Nógrád-Gömöri térség - ahol az utóbbi néhány évben meghatározott megoldásokat is fel tudtuk használni a feszültséginverziókhoz.

A 8. ábra azt mutatja be, hogy mindezen hiányosságok és hibaforrások ellenére a legtöbb területre sikerült az eddig publikált eredményekhez hasonlókat kapnunk. Vannak olyan területek, ahol az adatbázist még bővíteni is lehetett, ezek az ábrán fehér nyilakkal jelölt Nógrád-Gömöri térség és Nyírség. Két olyan kirívó terület van, ahol a számítások által meghatározott legnagyobb vízszintes kompressziós irány merőleges a korábban publikált irányra: a sötétszürke nyilakkal jelölt Kisalföld, valamint Dél-Alföld és Bánság területe. Ez az eltérés visszavezethető a felhasznált fészekmechanizmusok bizonytalanságára vagy a tektonikai háttérre.

A kutatás során elvégzett feszültséginverziók eredményei alapján megállapítható, hogy az uralkodó tektonikus rendszerek az oldalelmozdulások és feltolódások, a feszültségmező pedig nyugatról keletre haladva észak-déli irányítottságából kelet-nyugatiba tér át. Ezen megállapítások alátámasztják az eltolódásos és kompressziós, legyezőhöz hasonló alakú feszültségmező létét, valamint a normálvetős tektonika hiányát.

Látható tehát, hogy a fészekmechanizmus-megoldások segítségével elvégzett feszültséginverziók jó hasonlóságot mutatnak az eddig publikált eredményekkel, az eredmények megbízhatósága a legtöbb területen megfelelő. Mindazonáltal érdemes tovább tanulmányozni a jelenkori feszültségmező változatosságait más mérési és számítási metódusokkal, pl. további földrengés-adatok segítségével, más geofizikai, felszíni és műholdas geodéziai módszerrel vagy numerikus modellezésekkel és a rendelkezésre álló információkat megerősíteni, pontosítani.



8. ábra. A számításaim során tapasztalt eltérések (fehér és sötétszürke nyilak) és ezek összevetése Bada és munkatársai (Bada et al. 2007c) által elvégzett numerikus modellezés eredményével

Köszönetnyilvánítás. Szeretném először is megköszönni Wéber Zoltánnak, az MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium tudományos főmunkatársának, a témavezetést, a sok segítséget és támogatást. Továbbá köszönettel tartozom a Szeizmológiai Observatórium többi munkatársának és a GeoRisk Kft. dolgozóinak az adatokért. És végül, de nem utolsón sorban köszönöm a lehetőséget a soproni Geodéziai és Geofizikai Intézetnek, hogy részt vehettem és bemutathattam munkámat a X. Geomatikai Szemináriumon!

Hivatkozások

- Angelier J** (2002): Inversion of earthquake focal mechanisms to obtain the seismotectonic stress IV – a new method free of choice among nodal planes, *Geophysical Journal International*, 150, 588-609.
- Bada G, Dövényi P, Horváth F, Szafián P, Windhoffer G** (2007a): Jelenkori feszültségtér a Pannon-medencében és alpidinári-kárpáti környezetében, *Földtani Közöny*, 137/3, 327-359.
- Bada G, Grenczy Gy, Tóth L, Horváth F, Stein S, Cloetingh S, Windhoffer G, Fodor L, Pinter N, Fejes I** (2007b): Motion of Adria and ongoing inversion of the Pannonian basin: Seismicity, GPS velocities, and stress transfer, in Stein, S., and Mazzotti, S., ed., *Continental Intraplate Earthquake Science, Hazard, and Policy Issues: Geological Society of America Special Paper*, 425, 243-262, doi:10.1130/2007-2425(16).
- Bada G, Horváth F, Dövényi P, Szafián P, Windhoffer G, Cloetingh S** (2007c): Present-day stress field and tectonic inversion in the Pannonian Basin, *Global and Planetary Change*, 58.1: 165-180.
- Gephart JW** (1990): FMSI: A FORTRAN program for inverting fault/slickenside and earthquake focal mechanism data to obtain the regional stress tensor, *Computers, Geosciences*, 16, 7, 953-989.
- Gerner P, Bada G, Dövényi P, Müller B, Oncescu MC, Cloetingh S, Horváth F** (1999): Recent tectonic stress and crustal deformation in and around the Pannonian Basin: data and models, in *The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen*, Geological Society, London, Special Publications, 156, 269-294.
- Gráczer Z, Czifra T, Kiszely M, Mónus P, Zsíros T** (2012): Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin 2011, Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium, MTA CSFK GGI, Budapest, 357.
- Gráczer Z (szerk.), Czifra T, Győri E, Kiszely M, Mónus P, Süle B, Szanyi Gy, Tóth L, Varga P, Wesztergom V, Wéber Z, Zsíros T** (2013): Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin 2012, Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium, MTA CSFK GGI, Budapest, 260.
- Grenczy Gy, Sella G, Stein S, Kenyeres A** (2005): Tectonic implications of the GPS velocity field in the northern Adriatic region, *Geophysical Research Letters*, 32(16).
- Hardebeck JL, Michael AJ** (2006): Damped regional-scale stress inversions: Methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence, *Journal of Geophysical Research*, 111, B11310, doi: 10.1029/2005JB004144.
- Michael AJ** (1984): Determination of stress from slip data: Faults and folds: *Jour. Geophys. Rs.*, 89, B13, 11,517-11,526.
- Tóth L, Mónus P, Kiszely M** (2014): Magyarországi földrengések évkönyve-Hungarian Earthquake Bulletin-2013, GeoRisk, Budapest, 136, HU ISSN 1589-8326.
- Tóth L, Mónus P, Kiszely M** (2015): Magyarországi földrengések évkönyve - Hungarian Earthquake Bulletin, GeoRisk, Budapest, 132, HU ISSN 1589-8326, doi:10.7914/SN/HM.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T** (1996): Hungarian Earthquake Bulletin, 1995., GeoRisk, Budapest, 73.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T** (1997): Hungarian Earthquake Bulletin, 1996., GeoRisk, Budapest, 67.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T** (1998): Hungarian Earthquake Bulletin, 1997., GeoRisk, Budapest, 68.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T** (1999): Hungarian Earthquake Bulletin, 1998., GeoRisk, Budapest, 71.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T** (2000): Hungarian Earthquake Bulletin, 1999., GeoRisk, Budapest, 71.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Bus Z, Kiszely M, Czifra T** (2007): Magyarországi földrengések évkönyve 2006., GeoRisk-MTA GGKI, Budapest, HU ISSN 1589-8326.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Bus Z, Kiszely M, Czifra T** (2008): Magyarországi földrengések évkönyve 2007., GeoRisk-MTA GGKI, Budapest, HU ISSN 1589-8326.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Bus Z, Kiszely M, Czifra T** (2009): Magyarországi földrengések évkönyve 2008., GeoRisk-MTA GGKI, Budapest, HU ISSN 1589-8326.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Bus Z, Kiszely M, Czifra T** (2010): Magyarországi földrengések évkönyve 2009., GeoRisk-MTA GGKI, Budapest, HU ISSN 1589-8326.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Bus Z, Kiszely M, Czifra T** (2011): Magyarországi földrengések évkönyve 2010., GeoRisk-MTA GGKI, Budapest, HU ISSN 1589-8326.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Kiszely M, Czifra T** (2003): Magyarországi földrengések évkönyve 2002. - Hungarian Earthquake Bulletin, 2002., GeoRisk-MTA GGKI, Budapest, 104, HU ISSN 1219-963X.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Kiszely M, Czifra T** (2004): Magyarországi földrengések évkönyve 2003., GeoRisk-MTA GGKI, Budapest, HU ISSN 1589-8326.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Kiszely M, Czifra T** (2005): Magyarországi földrengések évkönyve 2004., GeoRisk-MTA GGKI, Budapest, HU ISSN 1589-8326.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Kiszely M, Czifra T** (2006): Magyarországi földrengések évkönyve 2005., GeoRisk-MTA GGKI, Budapest, HU ISSN 1589-8326.
- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Kiszely M, Kosztu Z** (2001): Magyarországi földrengések évkönyve, 2000., GeoRisk, Budapest, 98.

- Tóth L, Mónus P, Zsíros T, Kiszely M, Kosztyu Z** (2002): Magyarországi földrengések évkönyve, 2001., GeoRisk, Budapest, 80, ISSN: 1219-963X.
- Vavrycuk V** (2014): Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms, *Geophys. J. Int.*, 199, 69-77.
- Wéber Z** (2016a): Probabilistic waveform inversion for 22 earthquake moment tensors in Hungary: new constraints on the tectonic stress pattern inside the Pannonian basin, *Geophysical Journal International*, 204, 236-249.
- Wéber Z** (2016b): Source parameters for the 2013-2015 earthquake sequence in Nógrád country, Hungary, *J Seismol*, 20, 987-999, doi: 10.1007/s10950-016-9576-6.
- Wéber Z, Süle B** (2014): Source Properties of the 29 January 2011 ML 4.5 Oroszlány (Hungary) Mainschock and Its Aftershocks, *Bulletin of the Seismological of America*, 104, 1, 113-127, doi: 10.1785/0120130152.

LÉKEK KIMUTATÁSA SENTINEL-2A ŰRFELVÉTEL-IDŐSOROK ALAPJÁN TÖLGYERDŐBEN

Barton Iván, Király Géza*, Czímber Kornél**



Treefall gap detection on Sentinel-2A satellite images in Oak type forest – *The optical Earth Observation satellite Sentinel-2A was launched as a part of Copernicus programme. With the 10 meter resolution bands it is possible to observe smaller scale forestry operations like artificial treefall gaps. Due to the higher temporal resolution of the satellite, multiple observations are available in a year. This allows us to create multiple maps with the same condition from the same state of the object investigated. The image capturing conditions are however changing along the year. We used a method during the research which could handle these different conditions, thus the created maps were comparable within a year.*

Keywords: Sentinel-2, forestry, treefall gap, spectral unmixing



A Sentinel-2A optikai földmegfigyelő műhold a Copernicus program keretében került pályára. 10 m-es felbontású felvételeivel lehetőség nyílt arra, hogy olyan kisebb mértékű erdészeti beavatkozásokat is megfigyelhessünk, mint a mesterséges lékek. A magas időbeli felbontást kihasználva évente több térkép készíthető egy adott állapotról, azonban ilyenkor a felvételek rögzítési körülményei különböznek. A kutatás során olyan módszert alkalmaztunk, amely képes kezelni a különböző felvételi körülményeket, így a létrehozott térképek összehasonlítható eredményt mutattak az adott éven belül.

Kulcsszavak: Sentinel-2, erdészet, mesterséges lékek, spektrális szétkeverés

1 Bevezetés

Mesterséges lékeket jellemzően a középhegységek őshonos lombos erdeiben, szálaló vagy átalakító üzeműben alkalmazták, többkorú állományok kialakítása céljából. A maktermő korú, homogén faállományban egy-egy közel famagasság átmérőjű csoportot kijelölnek, kitermelnek, aminek eredményeképpen a korábbi záródott korona borításban egy lék keletkezik. A lékvágással történő csoportos szálalás a természetközeli erdőgazdálkodás egyik módja, mely az őserdő természetes megújulásának azt a fázisát mintázza, amikor a hatalmas öreg fa elhal, helyén a fény lejut a talajra és a környező fák terméséből újulat indukálódik. Ritkább esetben, ha nem áll a közelben megfelelő anyafa, mesterségesen nevelt csemeték ültetésével segítik a felújulást. A facsemeték a megfelelő növekedéshez szükséges napfényt a léken keresztül közvetlenül kapják meg, míg lék nélkül csupán diffúz fényhez juthatnak. Ezzel a módszerrel lehetővé válik, hogy az erdőrészt határain belül folyamatosan erdő álljon hosszú – akár több száz éves – távon, nagyobb összefüggő vágásterület nélkül. A lékek nyitása több ütemben történik az erdőgazdálkodás során, ezzel biztosítva a folyamatos erdőborítást (A folyamatos erdőborítás fenntartása melletti erdőgazdálkodás alapjai (2013) Silva Naturalis 1. Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron. Szerkesztők: Bartha Dénes, Puskás Lajos és Varga Béla. Letöltés dátuma: 2017.02.20, forrás: <http://silvanaturalis.nyme.hu/kotetek> ISBN:978-963-334-111-7). Az ütemek beosztásához ismerni kell a faállomány paramétereit és az egyes állományrészek kiterjedését. A tartamos gazdálkodáshoz elengedhetetlen a lékek térképezése és nyilvántartása. A hagyományos terepi mintavételes erdőbecslési módszerek alkalmazásához az elkülönülő, különböző korú állományrészek területi részarányát ismerni kell. Magyarországon jelenleg közel 60 000 hektár olyan erdőterület van (NÉBIH, 2015 Erdővagyon és erdőgazdálkodás Magyarországon., forrás: https://nebih.gov.hu/data/cms/175/031/2015_leporello_magyar_web_300dpi.pdf, Letöltés dátuma: 2017. 02 20), ahol a korábbi vágások erdőműveléssel kezelt erdők vegyeskorúvá alakítása van előírva az érvényes körzeti erdőtervekben. Az átalakítás jellemzően mesterséges lékekkel történik, amelyeknek pontos számát és méretét sok esetben a gazdálkodó nyilvántartása sem követi.

*SOE EMK GEVI FTT, 9400 Sopron, Bajcsy-Zsilinszky út 4.

E-mail: bartonivan@gmail.com, czimber@emk.nyme.hu, kiraly.geza@emk.nyme.hu

Az egyes lécek területét a koronák vetülete által nem borított résszel lehet azonosítani (Kollár 2013). Az élő faegyedek koronája a lék körül folyamatosan változik, ezért ennek térképezése fontos feladat. A lécek felmérését hagyományos geodéziai módszerekkel csupán kutatási jelleggel szokták végezni. Hatékony megoldást nyújthatnak a távérzékelési módszerek. A hazai gyakorlatban légifelvételekből készült ortofotókat és borított felszínmodelleket alkalmaznak a lécek elkülönítésére (Tanács et al. 2017), azonban ezek magas költsége miatt nincs lehetőség a folyamatos térképezésre.

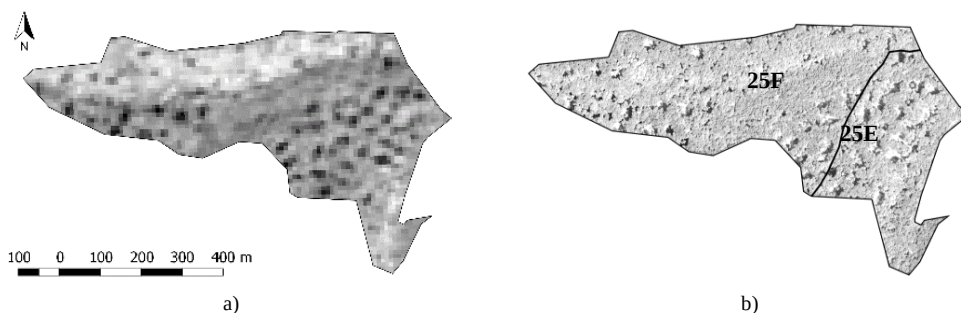
A nagyfelbontású (5-30 m) földmegfigyelő műholdak ingyenesen és folyamatosan elérhető űrfelvételei alternatívát nyújtanak az erdők térképezéséhez. Ezeken a felvételeken az átlagosan 15-20 m átmérőjű lécek jelenléte már kimutatható. Méretüket ezen a felbontáson lehetséges vizuálisan becsülni, így sub-pixel alapú vizsgálattal területük kimutatható. A lécek térképezésére ritkán alkalmaznak ilyen felbontású távérzékelési adatokat. Dél-Amerika Közép-Amazóniai térségében történt a módszer egy kísérleti alkalmazása, amelyben – bár különböző típusú erdőkben, de – sikeresen alkalmazták a sub-pixel alapú vizsgálatot a lécek kimutatására (Negron-Juarez et al. 2011). Amennyiben egy éven belül több űrfelvétel is rendelkezésre áll a vegetációs időszakból, akkor több megvilágítottsági állapot értékelhető ki. Az év során a lécek alján képződő vetített árnyékok állandóan jelen vannak geometriai formájukból kifolyólag, míg a koronaszint egyenlőtlenségein képződött kisebb vetített árnyékok a nap irányának függvényében mozognak az év során. Feltételezve, hogy az erdő területi kiterjedése nem változott az adott vegetációs időszakon belül, csupán a fenológiai állapot, szenzor betekintési szögek, a megvilágítottság és a légköri viszonyok változnak. A fenti tényezők közül az atmoszférikus tényező korrigálható (Chavez 1989), a megvilágítás és a szenzor betekintés modellezhető felületmodellek segítségével (Tan et al. 2013). A domborzaton megjelenő árnyalás és árnyékok befolyásolják az optikai távérzékeléssel gyűjtött spektrumot, így a megvilágítás előzetes ismeretében szétválasztható a lécekben képződött állandó vetített árnyék és a felszínen megjelenő domborzati árnyalás. A felület megvilágítottságának megfelelő mintaspektrumok alkalmazásával csökkenthető a mintaspektrumok szórás értéke, így pontosabb eredmény érhető el az erdő- és lék-pixelek osztályozása során feltételezésünk szerint.

Célunk az volt, hogy feltárjuk a különböző előfeldolgozottsági szintű Sentinel-2A felvételek alkalmazhatóságát az erdőgazdálkodás során létrehozott lécek kimutatására. Ennek részeként kvantitatív alapon határozzuk meg az előfeldolgozottsági szintek hatását az eredmények pontosságára. A domborzat megvilágítottsági állapotát figyelembe véve hajtottuk végre a képfeldolgozást.

2 Anyag

2.1 Mintaterület

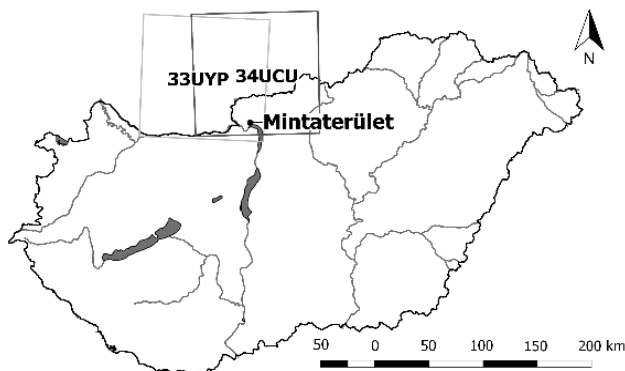
Mintaterületként a Dél-Börzsönyben lévő Kismaros község határához tartozó, egymással szomszédos, összesen 28.4 hektár területű, 25 E és F erdőrészteket választottuk (1. ábra). Különböző kitérítésű oldalak, gerinc és völgyformák alkotják a domborzatát. Átlagos tengerszint feletti magassága 160 m. Jellemzően gyertyános-tölgyes erdő társulás borítja kisebb bükkös foltokkal. Az erdőrésztelekben 2007-től kezdve nyitottak léceket. A lécek átmérője jellemzően 20-30 m. A lécek közepén több esetben is hagytak egy-egy úgynevezett magászóró fát, amelyek a lécek maggal való bevetésére szolgálnak. A lécekben található facsemeték mellett földiszeder (*Rubus fruticosus* L.) és nadragulya (*Atropa belladonna* L.) valamint különböző fűfélék és sások vannak jelen. A léken kívüli állományrészen a lombkorona többnyire záródottnak tekinthető. Természetes eredetű záródási hiány az E és F részlet határán található egy kis területen. Ezeknek a természetes léceknek a mérete jellemzően kisebb, mint a mesterségesen kialakított léceké. A folyamatosan jelen lévő árnyalás miatt a völgy mélyebb részét kizártuk a vizsgálatból (4. ábra). Ezen a részen olyan alacsony a megvilágítottság egész évben, hogy nem különíthető el egy űrfelvételen a természetes eredetű lék és a domborzati árnyalás. Az állományok átlagos kora 80 év, átlagmagasságuk 25 m. A változatos domborzati formáknak, kitérítéseknek és erdőtípusoknak köszönhetően ilyen kis területen is vizsgálni lehet a különböző megvilágítottsági körülmények között lévő léceket.



1. ábra. a) A lékekel szabdaltn mintaterület egy Sentinel-2A űrfelvétel közeli infravörös sávján (2016. 09. 07.) és b) 0.4 m terepi felbontású ortofotón 2016-ból.

2.2 Űrfelvételek

A felhasznált űrfelvételek a Sentinel-2A optikai földmegfigyelő műhold képei. A műholdon található MSI szenzor (Gatti és Bertolini 2015) 10 m-es felbontású kék, zöld, vörös és közeli infravörös tartományban rögzített sávjait használtuk fel a vizsgálatához. A szenzor 20 és 60 m-es felbontású sávjait a vizsgálatnál kihagytuk. Habár értékes információkat hordoznak a vörös él (Horler et al. 1983) és a rövidhullámú infravörös tartományban elhelyezkedő sávok is az erdő típusára, geometriai felbontásuk a legtöbb esetben már meghaladja a teljes lék méretét, amelyek további bizonytalanságot okoznának a kimutatott területekben. Tizenegy felvételen végeztük el a vizsgálatot, melyeknek az adatai az 1. táblázatban láthatók. Az R036 és az R079-es műhold pályák fedik le a mintaterületet. A 33UYP és 34UCU 100x100 km-es csempéket használtuk fel a lábnyomokból (2. ábra). A kétféle szelvény az előfeldolgozás során az UTM vetület két szomszédos zónájába került. A képeket a forrás vetületében hagytuk az újramintavételezés során fellépő információ-vesztés megelőzésének érdekében. A mintaterület felett a szenzor látószögének azimuth-értékei 180 fokkal térnek el a két sávban, azonban zenit-szögei közel azonosak a szenzor kialakításának köszönhetően. A 786 km-es átlagos pályamagasság és a 25 m-es famagasság mellett minimális a szenzor számára árnyékba eső rész a mintaterületen. A kutatás során L1C légkör tetején mért és L2A felszíni reflektancia termékeket használtunk, amelyek a Sen2Cor 2.3.0. programmal lettek feldolgozva (Louis et al. 2016). Az L2A felvételekből a topográfiai korrekció nélküli és az SRTM (Jarvis et al. 2008) 90 m-es cellaméretű domborzatmodell segítségével létrehozott topográfiai korrekcióval ellátott verziót (L2ADEM) alkalmaztuk. 2015-ből 2 db, 2016-ból 9 db felvételt használtunk fel a kutatás során, amelyek kettő kivételével teljesen felhőmentesek voltak a kiválasztott mintaterület felett. A Sentinel-2A műhold kezdeti pályára állítása után 4 nappal, 2015. 06. 29-én készítette első felvételét és a felhasználóknak 2016. 09. 09. óta szolgáltat operatív módon felvételeket. A felhasznált felvételek többsége még nem a végleges pályáról és beállításokkal készült. A kezdeti pályamódosítások és kalibráció hiánya miatt a korai felvételeknél gyakoriak a felvételek geometriai pontatlanságai. A műhold pályája és a felvételek készítésének ideje a fedélzetén található GNSS vevőpárnak köszönhetően pontosan ismert. Az egyes felvételekhez 5 km x 5 km felbontásban érhetők el metaadatok a szenzor látószögéről és a napállásról (1. táblázat). Ezek segítségével modelleztük a felületelemek megvilágítottsági állapotát.



2. ábra. A mintaterület elhelyezkedése Magyarországon és a Sentinel-2 33UYP és 34UCU ürfelvétel csempék lábnyomai

1. táblázat. A felhasznált ürfelvételek fontosabb metaadatai

Műhold pálya	Év	Hónap	Nap	Nap Azimuth(°)	Nap magasság(°)
R079	2015	08	07	156.426	56.682
R036	2015	10	03	165.487	37.171
R079	2016	03	24	161.834	42.314
R079	2016	07	22	154.092	60.170
R036	2016	08	28	157.515	49.635
R079	2016	08	31	161.918	49.220
R036	2016	09	07	159.994	46.283
R079	2016	09	10	164.188	45.738
R036	2016	09	27	164.459	39.094
R079	2016	09	30	168.162	38.374
R079	2016	10	10	169.693	34.666

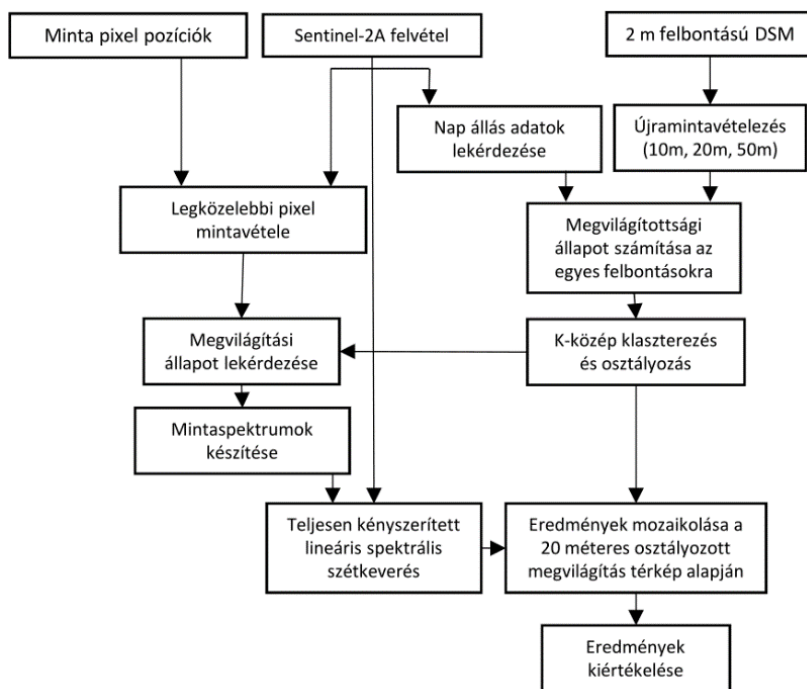
2.3 Referencia anyagok

A területre rendelkezésre állt egy 0.2 m terepi felbontással készült légifelvétel anyag 2015 augusztusából. Az ortofotó 0.2 m-es, az automatikusan előállított borított felszínmodell (DSM) 2 m-es pixel-mérettel készült el. A felszínmodell és az ortofotó az INPHO[©] szoftvercsomaggal készült. Ezen az anyagon már szerepelnek a 2015 előtt nyitott lékek. Az automatikusan létrehozott DSM a szoftvercsomag Match-T algoritmusával készült (Lemaire 2008), amelynél gyakran előfordul, hogy a kisméretű, az alján árnyalt lékekben lévő pixeleket nem tudja megfelelően egyeztetni a képpárokon. Ezért oda nem készülnek el az automatikus magassági mérések vagy hamis értékeket mutatnak. Az ezt követő felszín interpolációja pedig „betemeti” az itt kihagyott léket, mivel nincsenek talajpontok, amire le tudná vezetni az interpolált felületet. Így önmagában a létrehozott DSM nem alkalmas a lék területek pontos meghatározására. A 2016-os állapot térképezésére egy kereskedelmi forgalomban kapható 0.4 m terepi felbontású ortofotót használtunk, valamint GNSS pontméréseket végeztünk a kialakított lékek középpontjában Trimble Juno SB térinformatikai adatgyűjtővel. Hetvenkilenc mesterléknek vélt területet mértünk fel 2016 decemberében.

3 Módszertan

3.1 Árnyalás modellezés

A szakirodalomban az árnyalás kiküszöbölésére jellemzően topográfiai normalizációt alkalmaznak (Richter et al. 2009). Ebben az esetben az árnyalt és megvilágított részek spektrális értékei a domborzaton elfoglalt viszonyai (kitettség, lejtés) alapján kiegyenlítődnek, amire többféle eljárás létezik (Riaño et al. 2003). Ezek a módszerek megbízhatóan működnek regionális vizsgálatok esetén, de esetünkben további zajok forrásai lehetnek egy kisebb megbízhatósággal meghatározott korrekciós paraméter használata miatt. Ebből kifolyólag az árnyalt területeket lehatárolásával foglalkoztunk és az árnyalás mértékének megfelelően kezeltük a további lépéseknél (3. ábra.). A felvételen megjelenő domborzati árnyalást a borított felszínmodell alapján készítettük el. A megvilágítottság modellezéséhez a széles körben elterjedt „hill shade” módszert alkalmaztuk (Tan et al. 2013), ami az emberi szem számára is elfogadható természetes árnyalást hoz létre a felületen. A megvilágítottsági állapot számításához szükség van a felület meredekségére és kitettségére, melyeket a pixel 3x3-as méretű környezete alapján határozzunk meg.



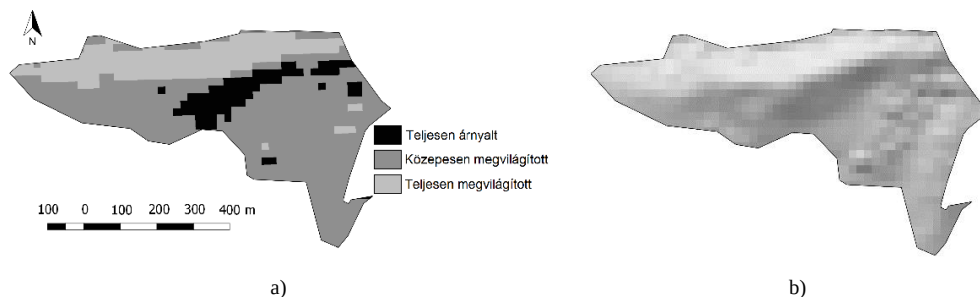
3. ábra. Az alkalmazott módszer folyamatábrája

Amennyiben az eredeti 0.5 m-es felbontású felszínmodellt használjuk fel a megvilágítottság modellezéséhez, akkor a 3x3-as méretű ablak oldalhossza 1.5 m. Az így létrehozott modell túl részletes ahhoz, hogy a 10 m felbontású űrfelvétellel összevethessük az eredményeket. Ennek érdekében a felületmodellt átlagolással újra-mintavételeztük 10, 20 és 50 m felbontásra, és ezeken hoztuk létre a megvilágítottsági modellt. A kapott megvilágítás térképek pixel-értékei -1.0 és 1.0 közé esnek (Tan et al. 2013).

$$IC = \cos(Z) \cos(S) + \sin(Z) \sin(S) \cos(\varphi_Z - \varphi_S), \quad (1)$$

ahol IC a megvilágítottsági állapot, Z a Nap zenit szöge, S a felületelem lejtőszöge, φ_Z a Nap azimuth szöge, és φ_S a felületelem kitettségének a szöge.

A megvilágítottság réteget k-közép algoritmussal (Jain 2010) 3 klaszterbe soroltuk (4. ábra.), mozgó osztályátlagokat alkalmazva. Majd az egyes pixeleket a legközelebbi klaszterközépponthez soroltuk az osztályozás során. Az egyes megvilágítás-képek vizuális vizsgálata alapján döntöttünk a 3 kategória mellett. Így létrejött egy teljesen árnyalt, semleges és teljesen megvilágított osztály. A már létező lécek 10 m felbontás mellett igen zajossá tették a kimeneteket, melyek az 50 m-es felbontásnál már elsimulnak.



4. ábra. a) Osztályozott megvilágítás térkép és b) megvilágítottsági állapot kép 20 m felbontással a mintaterületen

3.2 Spektrális szétkeverés

A lécek kimutatását spektrális szétkeveréssel végeztük el. Ezzel a módszerrel a szenzor által a pixelen rögzített spektrumot lehet szétbontani az öt alkotó elkülönülő spektrumokra (Keshava és Mustard 2002). A pixelt alkotó spektrumok részarányából következtetni lehet a felszínborítás típusok pixelen belüli előfordulásának arányára. A módszert a rugalmas osztályozók kategóriájába sorolják, ugyanis a pixelt több osztályhoz is hozzárendelheti (Wijaya 2006). Az úrfelvétel legnagyobb felbontású, 10 m-es sávjain is már kevert pixelként jelennek meg többnyire a vizsgálni kívánt lécek, ezért a pixel-alapú szigorú osztályozási módszerek nem adnak elfogadható eredményt kisméretű lécek esetén. A lineáris spektrális szétkeverés modelljét választottuk a vizsgálathoz. Ez a modell azt feltételezi, hogy a pixelen belül található spektrumok egyszerű lineáris kombinációja és a hozzájuk tartozó hiba alkotja a pixel spektrumát (Mucsi és Henits 2011). Spektrálisan jól elkülönül a lécben található fiatal erdő vagy erős gyom vegetáció az azt körülölelő erdőtől, így a módszer alkalmazható 10-méteres felbontás mellett. A jellemzően hiperspektrális felvételeknél alkalmazott spektrális szétkeverés során n darab lineáris egyenletet használunk pixelenként, ahol n a felhasznált felvétel sávjainak a száma. Az egyenletekben szereplő ismeretlen az egyes előforduló spektrális minták aránya a pixelen belül. Az egyenletrendszer megoldásához fontos, hogy ne legyen több ismeretlen, mint egyenlet. Ezért a pixel vizsgálata során nem célszerű több spektrális mintát alkalmazni, mint az adott felvétel spektrális sávjainak a száma. Esetünkben 4 sáv van jelen a multispektrális úrfelvételből. Ennek megfelelően 2 spektrális mintát alkalmaztunk típustól és kitettségtől függően a szétkeverés egy futtatásában. Az álló erdő és a lék típusokhoz kerestünk olyan pixeleket, amelyekben a minták nagy valószínűséggel tisztán fordulnak elő. A spektrális minták vételezési földrajzi pozícióját vizuális interpretáció segítségével határoztuk meg egy Sentinel-2 felvételen (2016. 09. 07.). Minden egyes felvételen elvégeztük a kijelölt földrajzi pozíciókban a mintavételt, amely során a pozícióhoz legközelebbi pixel értéket vettük mintának. A rendelkezésre álló megvilágítottság-térkép alapján a korábban létrehozott 3 megvilágítottsági osztályhoz rendeltük a spektrális értékeket, majd az egyes mintatípusok megvilágítási osztálya szerint vettük a minták számtani átlagát. Így minden egyes felvételen, az adott képnek megfelelő radiometriai tulajdonságú mintákat alkalmaztunk. A teljes Börzsöny-hegységre kiterjednek a mintavételi pozíciók. Az úrfelvételek előfeldolgozása során kapott automatikus felszínborítás-maszok alapján csak olyan helyen végeztük el a mintavételezést, ahol felhő- és felhőárnyék-mentes volt a felvétel. A Sentinel-2 felvételeinek tízméteres sávjai a jelenlegi kalibráció mellett még nem rendelkeznek akkora dinamikával, hogy az itt megtalálható, közel azonos korú, de eltérő típusú lombos erdőket elkülönítsük vizuálisan. Az alacsony dinamika lehetővé teszi, hogy egységes spektrális mintát alkalmazzunk a bükkös és tölgyes erdőkre és lécekre, így elegendő a megvilágítottság alapján elkülöníteni őket. A B2 (látható

kék tartomány) sáv alapján további szűrést végeztünk a nem detektált felhők szűrésére, ahol az 1000 pixelérték (DN) feletti rekordokat eltávolítottuk az adathalmazból, ugyanis ez extrém magas értéknek tekinthető erdők esetén a 16 bites felvételen.

A pixelek szétkeverése a lineáris spektrális szétkeverés legkisebb négyzetek módszerével történt (Keshava és Mustard 2002). A teljesen kényszerített megoldás során a pixelben előforduló spektrumok arányának összege maximum 1 lehet és nem lehet negatív. Ezt az algoritmus a nem negatív legkisebb négyzetek módszerével (NNLS) éri el, iteratív módon. Az algoritmus megtalálható több nyílt forráskódú szoftverben, amelyek közül az ESA földmegfigyelési műholdjainak támogatására készült SNAP toolboxban található algoritmust használtuk fel. A Börzsöny-hegységből vett különböző lombos erdőtípusokból és lékekből válogattunk mintákat.

Az átlagosan 25 m-nek vett fmagasság mellett 20 m átmérőjű lékekben a műholdfelvétel rögzítési idejében délelőtt 9:50-kor még a fák koronája által vetített árnyék látható. A sík vagy az északias kitettségű oldalakon fekvő lékekben jellemző ez. A lék minták ebben az esetben gyakorlatilag vetített árnyékok, ahol a vegetációt jellemző közeli infravörös tartomány értéke jelentősen alacsonyabb, mint a körülötte lévő erdőé. Az arány-alapú mutatók, mint a vegetációs indexek ezen különbségeket részben elsimitják (Dymond et al. 2002), így használatuk nem ad jelentős többletinformációt a lékek pozíciójáról és kiterjedéséről. A déli oldalakra eső, nagyobb méretű lékeknél már közvetlen napfény éri a talaj szintjét. Ebben az esetben a felvétel közeli infravörös sávja jóval magasabb értéket mutat, mint a körülötte lévő erdő. A felvétel látható tartományba eső sávjában is eltérés van a különböző kitettségekben található lékek és a körülöttük lévő erdő között.

A mintaterületen 2-3 megvilágítottsági típus is jelen van a napállás függvényében, ezért mind a három spektrális mintával lefuttattuk az elemzést. Az eredményeket a 20-méteres megvilágítottsági térkép osztályai alapján mozaikoltuk egybe. A vizsgált területen jellemzően tölgyes erdő található, ezért tölgyesekből vett mintákat használtunk a szétkeverés során. Az eredményként kapott lék-előfordulás értékeket egy tapasztalati úton meghatározott küszöbértékkel szűrtük, majd csak az ennél nagyobb arányban jelen lévő pixeleket tekintettük mesterséges lékeknek. Az eredmények kiértékelése a képek hisztogramja alapján történt. A 0.5 és 1.0 közé eső lék frakciójú pixeleket vettük figyelembe a kiértékelésnél. A koronaszinten megjelenő árnyalás szűrése érdekében alkalmaztuk a 0.5-ös küszöbértéket, amelyet tapasztalati úton állapítottuk meg. Területfoglalásukat a jelenlétük mértékével súlyoztuk, így az eredmény nem egy egyszerű maszk, hanem egy előfordulás értéket jelző térkép. Ezért az eredmények érvényesítése terület kimutatás segítségével készült el. A szétkevert eredményeket évenként csoportosítottuk, majd átlagot és szórást számítottunk a kimutatott lékek területéből.

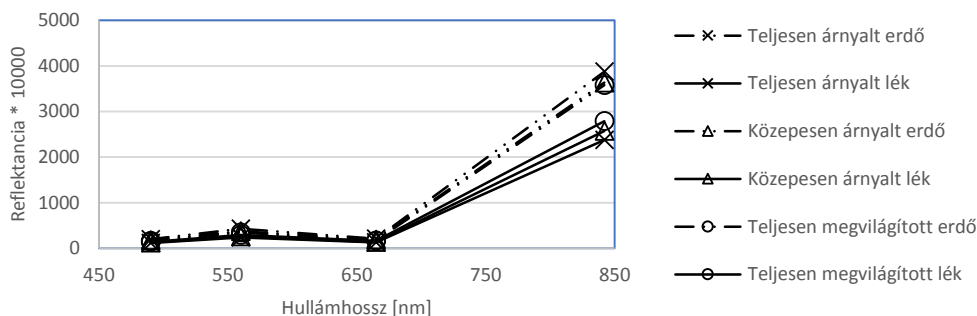
A 2015-ben és 2016-ban készült légifelvételek alapján lék referencia térképet készítettünk a borított felszínmodellre készült ortofotó alapján vizuális interpretációval. Ezeknek a területét össze tudtuk vetni a két évből származó űrfelvétel alapján készült léktérképek területével. A GNSS méréseket a lékek interpretációja során használtuk fel az ortofotók feldolgozásánál.

4 Eredmények

4.1 Eredmények közlése

A spektrális mintavételezéshez összesen 6694 db erdő és 2809 db lék pozíciót gyűjtöttünk a Börzsöny-hegységből. Az idősorozatban lévő két felvételt (2016.03.25., 2016.10.10.) a mintaterületre nem lehetett kiértékelni a felhő és felhőárnyék borítás miatt, azonban a spektrális mintavételezésre ezek is alkalmasak voltak. A kiválasztott felvételeken 58.51% és 100.0% közé esett a mintapozíciók elérhetőségének aránya a részleges felhőborítások miatt. A különböző típusú felvételekből származó minta-átlagok igazolták az előzetes várakozásokat. A minták spektrális profilját megjelenítve látható, hogy jelentős átfedés van a lék és erdő minták között, ha nem bontjuk szét megvilágítottság alapján őket. (5. ábra.). Az atmoszféra tetején mért reflektanciát tartalmazó L1C felvételnél tapasztalható a legalacsonyabb érték az egyes minta spektrumok szórásainak átlagát tekintve. Ez a radiometriai korrekción átesett, L2A típusú felvételeknél nagyobb mértékű. A radiometriai és topográfiai korrekción átesett felvétel esetén volt a legnagyobb a kategórián belüli szórások átlaga.

A két erdőrészt összevonása és a természetes lékekkel szabdaltságot okozó vízmosás maszkolása után 26,3 hektáros területen végeztük el a kiértékelést. A 2015-ös referencia anyag alapján 1,79 hektárnyi léket találtunk a területen. A 2016-os referencia anyag alapján 3,29 hektárt borított lék terület. A kiértékelésben két felvétel szerepelt 2015-ből és hét felvétel 2016-ból. A különböző felvétel típusokon kimutatott területeket a 2. táblázatban foglaltuk össze.



5. ábra. Összetartozó erdő-lék pár minták átlagának spektruma különböző megvilágítottságú területekről, 2016.08.29-én készült L2A típusú felvétel alapján

4.2 Eredmények megvitatása

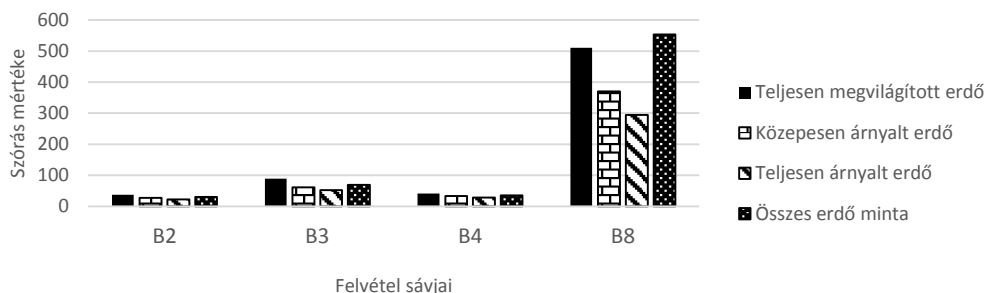
A felvételek radiometriai korrekciója növeli a felvétel dinamikáját, ami megmagyarázza a mintákban megjelenő szórások jelenségét. A minta spektrumok létrehozásához használt mintavételezési pozíciók a Börzsöny-hegység teljes területéről származnak, így különböző tengerszint feletti magasságokban helyezkednek el. Akár 800 m magasságkülönbség is található az azonos típusba tartozó mintapontok között, ahol már jelentős különbség van a két terület fölötti aeroszol és vízpára rétegekben. A topográfiai korrekció túlkorrigálta a pixelek spektrumát, ami a nem megfelelő pontosságú felületmodellből (SRTM 90) és az alkalmazott módszerből (Louis et al. 2016) származhatott.

A kapott eredmények alapján (2. táblázat, 6. ábra.), nagyon nagy hatása van az űrfelvétel előfeldolgozási szintje a kimutatott területekre. L2ADEM típusú felvételekből készült átlagok adták a legjobb értéket. A referenciához viszonyítva azonban itt is több mint 1 hektáros túlbecslést tapasztaltunk a vizsgált években. Az L2A és L1C típusú felvételek esetén már közel 5 hektár eltérés tapasztalható mindkét évben. A szórás értékeket vizsgálva az L2ADEM típusú eredmények mutatják a legmagasabb értéket. Ennek oka abban kereshető, hogy a topográfiai korrekció túlkorrigálja a reflektanciát a kevésbé megvilágított területeken, így a felvétel dinamikája csökken az erdővel borított részekben. Azonban a lékek és az erdő közötti kontraszt megnövekedik, így pontosabb eredményeket kaptunk a lékek területére egyes időpontokban. Ugyanakkor alacsony napállás mellett készült felvételek esetén ez a kontraszt kevesebb, ezért nő a szórása az éven belüli eredményeknél az L2ADEM típusnál. A lék terület változás 2015 és 2016 között már jobb eredményeket mutat az összes előfeldolgozási szint mellett. Ennél a kimutatásnál a koronaszinten keletkezett, szűrés után megmaradó zajok nagyrésze kiesik. Mind a három esetben 1 hektár alatti a hiba a referenciához viszonyítva, az L2ADEM típus esetén csupán 0,15 hektár a különbség.

A felvételek georeferenciája nem minden esetben felelt meg a követelményeknek az előfeldolgozás során készült automatikus minőségellenőrzés metaadatai alapján. Sub-pixeles (<10 m) eltolódás figyelhető meg ezeken a felvételeken, így várható volt az eredmények szórása. A megvilágítás irányának változása is hasonló eltolódást okozott. A vegetáció aktivitás és a napállás magasságának csökkenésével a lék- és erdő-mintaspektrumok egyre közelebb kerülnek egymáshoz össze.

A lineáris spektrális szétkeverés modellje a profilok közötti távolságot lineárisan osztja szét, így a kisebb tartományban nagyobb valószínűséggel osztályoz léknek egy kevert pixelt, mint korábban. Nem tapasztalható szabályos eltérés a két különböző műholdpályáról készült lábnymok (33UYP és 34UCU) alapján kimutatott területekben. A kimutatott terület az alkalmazott módszertan mellett a

vegetációs fázistól és a megvilágítottsági állapotoktól függ nagyobb mértékben. A terepen megfigyelhető volt, hogy a lékek több helyen kapcsolódnak egymáshoz. A kapcsolódó részek felett a környező fák koronái átfednek, így fentről tekintve látható egy vékony határ a légifotókon. Tíz méteres felbontás mellett ezek a keskeny határok némelyik esetben belemosódnak a lék pixeleibe, más esetben erdőként jelennek meg. Ezzel is magyarázható a kimutatott területek szórása. A szenzor különböző betekintési szögei kis mértékben hozzájárulhatnak a szóráshoz.

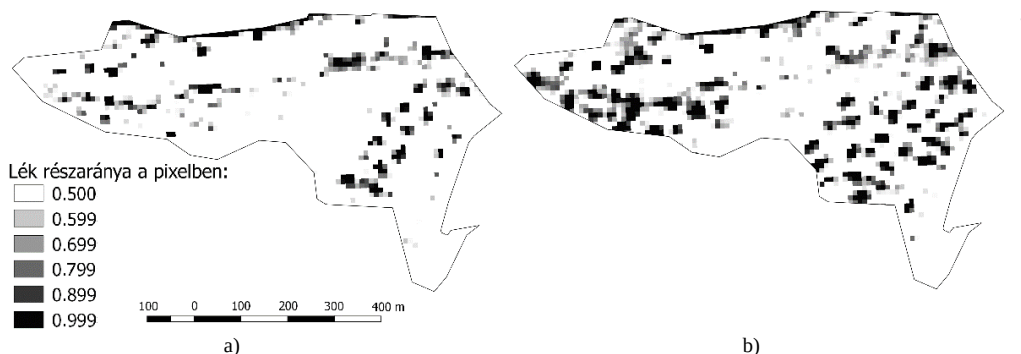


6. Ábra. Erdő minták szórása a különböző megvilágítottsági kategóriákban és kategorizálás nélkül, 2016.08.29-én készült L2A típusú felvétel alapján

2. táblázat. Területi statisztika a kimutatott lékekre

	Év	L2ADEM	L2A	L1C	Referencia
Átlag [ha]	2015	3.39	6.58	7.10	1.79
	2016	5.04	8.32	7.85	3.29
Szórás [ha]	2015	2.08	0.64	1.97	-
	2016	1.18	1.12	0.63	-
Lék/teljes terület aránya	2015	12.92%	25.05%	27.03%	6.80%
	2016	1.,20%	31.67%	29.89%	12.52%
2016-2015 változás	[ha]	1.65	1.74	0.75	1.50
	%	6.28%	6.62%	2.86%	5.71%

Bár 2015-ből csak 2 felvétel áll rendelkezésre, ezek közül a 2015. 10. 03-ról származó felvételen 1.92 hektár léket mutattunk ki. A lékek mennyisége megfelelt a referenciának, habár közvetlen összehasonlítást nem lehet végezni. Az egymásba nyíló lékeknél csak szubjektív módon különíthetők el térben, így darabszámmal nem jól jellemezhetők. Az alkalmazott módszer következtében felülbecsültük a lékkel borított területeket. A túlbecslés mértéke közel szabályos, a nap állásának magasságától függő tényező. A lékek szegélyében a megvilágítás felőli oldalon lévő lombkoronákon hasonló árnyalódás történik, mint ami a domborzaton is megjelenik. Ez az árnyalódás térben és spektrálisan nem különül el a lék alján található vetített árnyéktól, így a pixelen rögzített jelbe keveredik. Ez a jelenség kerek alakú lékek esetén modellezhető, így a túlbecslés mértéke a nap állásának megfelelően redukálható lesz a jövőben.



6. ábra. a) Spektrális szétkeveréssel készült lék térképek 2015-ből és
b) 2016-ból augusztusából L2ADEM típusú felvételek alapján

5 Következtetések

A kutatás során megvizsgáltuk a Sentinel-2A műhold felvételeinek alkalmazhatóságát mesterséges lékek kimutatására. A kidolgozott módszertan alapján a vegetációs időszakon belül készült, különböző időpontú felvételekből hasonló eredményeket tudunk előállítani, amivel az erdőgazdálkodást támogató információkat kaptunk. A képeknél alkalmazott előfeldolgozás nagyon nagy mértékben befolyásolja az eredményeket. A vegetációs időszak közepéről származó, magasabb napállás mellett készült felvételek alapján pontosabb térkép és területkimutatás készíthető a tapasztalatok alapján. Olyan területeken, ahol hasonló erdőtípus és lékméret található, hasonló pontossággal alkalmazható a spektrális szétkeverésre épülő módszer.

Területkimutatást lékekre terepi módszerekkel csak nagy élőmunka-befektetéssel lehetne létrehozni, míg a kidolgozott módszertan segítségével nagy területekre is kiterjeszthető kevés élő munkával. Az alkalmazott felvételek még nem fedik le a teljes vegetációs időszakot, de az eredmények alapján működik a még hiányzó, felhőmentes nyár elején rögzített felvételekkel is. A lékek kialakítását megelőző időponthól származó DSM-en végzett vetített árnyék modellezés tovább növelheti a módszer hatékonyságát a természetes lécek, záródás-hiányok kiszűrésével. Ezt a későbbiekben archívum elemzéssel lehet kiváltani, amihez jelenleg még nem áll rendelkezésre elegendő Sentinel-2 felvétel. A kimutatott területek szórása alapján geodéziai pontosságú terület abszolút meghatározásra nem alkalmas a módszer. A terület változását évről-évre azonban megfelelő pontossággal ki lehetett mutatni. Így hasznos információt nyújt 10 m-es felbontása mellett lokális (erdőrészlet) és regionális (erdőgazdálkodási egység) léptékben is a gazdálkodónak és a felügyeleti szervezeteknek az erdőfelújítási kötelezettség területének mértékéről. Az ökonomiai hasznosítása mellett a faállományok ökológiai változásait is nyomon lehet követni a dinamikus változó koronazáródásról készült térképek alapján. A lécek kimutatása nagyon nagy felbontású távérzékelte anyagokon pontosabb eredményt ad, azonban ezeknek az elérhetősége korlátozott, míg a bemutatott módszer alapadatai részben ingyenesen is beszerezhetők.

Köszönetnyilvánítás. Köszönetet mondunk az Ipoly Erdő Zrt-nek a rendelkezésre bocsájtott légi felvételek és faállomány adatokért valamint a TU Wien Geodéziai és Geoinformatikai Intézetének a módszertan fejlesztésében nyújtott segítségért.

Hivatkozások

- Chavez JPS** (1988): An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*, 24(3), 459-479.
- Dymond CC, Mladenoff DJ, Radeloff VC** (2002): Phenological differences in Tasseled Cap indices improve deciduous forest classification. *Remote Sensing of Environment*, 80(3), 460-472.
- Gatti A, Bertolini A** (2015): Sentinel-2 Products Specification Document. Thales Alenia Space, 496.
- Horler DNH, Dockray M., Barber J** (1983): The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 4(2), 273-288.
- Jain AK** (2010): Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognit. Lett.*, 2010, 31, 651-666.
- Jarvis A, Reuter HI, Nelson A, Guevara E** (2008): Hole-filled SRTM for the globe Version 4. CGIAR-CSI.
Forrás: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Keshava N, Mustard JF** (2002): Spectral unmixing. *IEEE signal processing magazine*, 19(1), 44-57.
- Kollár T** (2013): Lékek fényviszonyainak vizsgálata hemiszférikus fényképek segítségével. *Erdészettudományi Közlemények*, 3(1), 71-78.
- Lemaire C** (2008): Aspects of the DSM production with high resolution images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B4), 1143-1146.
- Louis J, Debaecker V, Pflug B, Main-Knorn M, Bieniarz J, Mueller-Wilm U, Gascon F** (2016): Sentinel-2 Sen2Cor: L2A Processor for Users. *Proceedings Living Planet Symposium 2016*, SP-740, 1-8.
- Mucsi L, Henits L** (2011): Belvételöntési térképek készítése közepes felbontású űrfelvételek szubpixel alapú osztályozásával. *Földrajzi Közlemények*, 135 (4), 365-378.
- Negron-Juarez RI, Chambers JQ, Marra DM, Ribeiro GH, Rifai SW, Higuchi N, Roberts D** (2011): Detection of subpixel treefall gaps with Landsat imagery in Central Amazon forests. *Remote Sensing of Environment*, 3322-3328.
- Riaño D, Chuvieco E, Salas J, Aguado I** (2003): Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 41(5), 1056-1061.
- Richter R, Kellenberger T, Kaufmann H** (2009): Comparison of topographic correction methods. *Remote Sensing*, 184-196.
- Tan B, Masek JG, Wolfe R, Gao F, Huang C, Vermote EF, Ederer G** (2013): Improved forest change detection with terrain illumination corrected Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 469-483.
- Tanács E, Barton I, Belényesi M, Burai P, Czimmer K, Király G** (2017): Távérzékelte adattípusok felhasználásának lehetőségei az erdőállapot-értékelésben. *Erdőállapot-értékelés középhegységi erdeinkben*, 9. Budapest, Duna-Ipoly Nemzeti Park Igazgatóság, 38-107.
- Wijaya A** (2006): Comparison of soft classification techniques for forest cover mapping. *Journal of Spatial Science*, 51(2), 7-18.

RECENS TEKTONIKUS FOLYAMATOK MEGFIGYELÉSE MŰHOLDRADAR INTERFEROMETRIÁVAL – A BELSŐ- KÁRPÁT KANYAR VIZSGÁLATA ARCHÍV FELVÉTELEK ALAPJÁN

Szűcs Eszter, Bozsó István*, Bányai László*, Wesztergom Viktor**



Observation of recent tectonic processes by means of satellite radar interferometry – investigation of the inner Carpathian Bend using archive SAR images –The Carpathian Bend is the one of the most tectonically interesting part of the European lithosphere, where intraplate subduction triggers sub-crustal earthquakes releasing significant amount of seismic energy in a well-defined seismic zone. Detection of small-magnitude tectonic processes with high reliability is challenging in which the recent space geodetic techniques may bring a breakthrough. Small displacements can be measured with high reliability using the principle of interference. Satellite radar interferometry is an active remote sensing technique which operates with microwaves, the interferometric processing of SAR (synthesized aperture radar) scenes enables to determine deformations in the satellite line-of-sight direction.

This study shortly summarises the results of investigations based on archive Envisat ASAR (advanced SAR) scenes acquired within an ESA CAT-1 project. Altogether 32 descending pass scenes were used which covers the time frame of approximately 8 years. Due to the relatively homogeneous land cover and small number of man-made structures the processing was carried out utilizing SBAS approach resulted in short temporal and small perpendicular baselines, starting from an initial network of 75 interferograms. Reliability of derived deformation field is determined by the phase noise of pixels selected during the processing and thus by the successful phase unwrapping. Therefore this study describes the time series processing of interferograms produced from SAR scenes in great detail, facilitating the understanding of the whole process and the critical evaluation of the results. Although relatively small number of scenes were utilized in the final processing (13+1 scenes, 19 interferograms, 3.5 years time frame), coherent pixel patches were identified. The derived velocities which lies within the interval of ± 5 mm/year much more reflect the neglecting of different effects during the processing than the deformations from real tectonic origin. The lessons learned from this study revealed that artificial reflectors are required for detecting deformations with high accuracy in area with similar land cover. Such initiatives have started based on the acquisition of Sentinel-1 satellite. Determining the surface deformations of the area can help to understand the coupling mechanism between shallow and deep structures in the Vrancea seismic zone, so thus understanding the lithosphere dynamics.

Keywords: InSAR, inner Carpathian Bend zone, surface deformations, Envisat

Az európai litoszféra lemez tektonikai szempontból egyik legaktívabb területe a Kárpát-kanyar, ahol a lemezen belüli szubdukció egy jól meghatározott zónában olyan közepes mélységű (sub-crustal) földrengéseket okoz, amelyek jelentős szeizmikus energia felszabadulásával járnak. A nagyon kis elmozdulással járó tektonikus folyamatok megbízható megfigyelése kihívás a tudomány számára, amelyben a legmodernebb ürgeodéziai technikák hozhatnak áttörést. Kis elmozdulások nagy megbízhatósággal az interferencia elvén mérhetők. A műholdradar interferometria egy aktív, mikrohullámú tartományú távérzékelési eljárás, a SAR (szintetizált apertúrájú radar) felvételek interferometrikus feldolgozása a felszíni deformációk műhold irányú meghatározását teszik lehetővé.

Ebben a tanulmányban röviden összefoglaljuk ESA CAT-1 pályázat keretében beszerzett, archív Envisat ASAR felvételek alapján végzett vizsgálatok eredményét. A felhasznált 32 db. leszálló műholdirányú felvétel megközelítőleg 8 év időtartamot fed le. A vizsgált terület jellegéből – viszonylag homogén felszínborítottság és kevés építmény – adódóan a feldolgozást a rövid térbeli- és időbeli

*MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet, 9400 Sopron, Csatka u. 6-8.

E-mail: Szucs.Eszter@csfk.mta.hu

bázisvonalakat eredményező ún. SBAS módszerrel végeztük, 75 db. interferogramból álló hálózathoz kiindulva. A meghatározott deformációs tér megbízhatóságát a feldolgozás során kiválasztott pixelek fázisja és ezen keresztül a fáziskicsomagolás sikeressége határozza meg. Ezért a tanulmány részletesen ismerteti a SAR felvételekből előállított interferogramok idősor elemzésének lépéseit, ezzel elősegítve a folyamat megértését és az eredmények kritikai értékelését. A végső megoldásban viszonylag kisszámú felvétel került felhasználásra (13+1 felvétel, 19 interferogram, 3,5 év időtartam), azonban a kiválasztott pixelek koherens foltokat alkotnak. A meghatározott, a döntően $a \pm 5$ mm/év tartományban eső sebességek, pedig inkább a feldolgozás során adódó elhanyagolásokat tükrözik, mint tényleges tektonikai eredetű deformációt. A vizsgálat során szerzett tapasztalatok rávilágítottak arra, hogy hasonló adottságú területek deformációinak pontos megfigyelésére mesterséges szórópontok alkalmazása szükséges. A Sentinel-1 műholdra alapozva ilyen kezdeményezések elindultak. A terület felszíni deformációinak meghatározása segíthet megérteni a Vranca szeizmikus zóna alatt elhelyezkedő sekély és mély szerkezeti egységek folyamatait, így a litoszféra jelenkori dinamikáját.

Kulcsszavak: InSAR, Belső-Kárpát kanyar, felszíni deformációk, Envisat

1 Felszínmozgások detektálása űrgeodéziai módszerekkel

A különböző tektonikus és vulkanikus folyamatok megértéséhez alapvető fontosságú a jelenségek során bekövetkezett elmozdulások pontos ismerete. A hagyományos geodéziai mérési módszerek mellett egyre inkább áthelyeződik a hangsúly az űrgeodéziai eljárásokra (Elliott et al. 2016), amelyek globális vonatkoztatási rendszerben nagy pontossággal szolgáltatják a felszínváltozással kapcsolatos információkat.

A GNSS technológia megjelenésével együtt, közel azonos időben került pályára az első SAR (Szintetikus Apertúrájú Radar) érzékelővel is ellátott műhold, azonban míg a GNSS már mindennapjainkban is jelen van, a tudományos közösség még csak most kezdi felfedezni azt a potenciált, amit a SAR felvételek jelentenek. A GNSS mérésekhez viszonyított nagy mennyiségű földfelszíni adat, a komplex feldolgozási eljárások és a jelentős tárhelyigény mellett a felvételek korlátozott elérhetősége gátolta a módszer elterjedését és széleskörű alkalmazását. Az Európai Űrügynökség 2014-ben indult COPERNICUS földmegfigyelő programjának Sentinel-1 rendszere, a teljes földfelszín szisztematikus és koordinált leképezését végzi, szabad hozzáférést biztosítva az adatokhoz valamennyi felhasználó számára. Ez minden valószínűséggel a műholdradar interferometria robbanásszerű elterjedését fogja hozni.

A GNSS mérésekhez hasonlóan a SAR műholdak is az elektromágneses spektrum mikrohullámú tartományát használják fel a felszín leképezésére, mely tartományban az atmoszféra közel átlátszó (Rees 2013). A megközelítőleg 700-800 km magasan keringő SAR műholdak a deformáció néhány mm pontosságú meghatározását is lehetővé teszik kedvező körülmények között (Hanssen 2001, Ferretti 2014). A különböző leképezési eljárások nyers felvételeinek SAR feldolgozásával (fókuszálás) előálló ún. SLC (Single Look Complex) felvételek, amelyek egyszeres nézetűek, azaz az átlagolás műveletének (multilooking) alkalmazása nélkül tartalmazzák a felszíni visszaverő cella amplitúdó értékét valamint a két-utas terjedés és az integrált cella fázisérték (felbontási cella objektumainak eredő fázis értéke) összegzett fázisát.

A leképezés gyakorlati megvalósítása, az elektromágneses sugárzás nem vákuumban való terjedése, a felszín reflexiós tulajdonságainak megváltozása mind befolyásolja a fázis értékek megváltozását. Így a közel azonos pozícióból, bizonyos idő elteltével készített SAR felvételek interferometrikus feldolgozásával (műholdradar interferometria, InSAR) előálló interferogram celláinak fázis értékei (Hanssen 2001, Hooper 2006)

$$\Delta\phi = \varphi_{flat} + \varphi_{topo} + \varphi_{defo} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise} + \varphi_{scatt} - 2\pi a \quad (1)$$

több tényező együttes hatásából tevődik össze.

Mivel az a ciklustöbbsértelműség nem ismert, ezért a fáziskülönbség a $[-\pi, \pi)$ tartományban, a beérkezés fázisára vonatkozik

$$\Delta\varphi = \varphi_{flat} + \varphi_{topo} + \varphi_{defo} + \varphi_{atm} + \varphi_{scatt} + \varphi_{noise}. \quad (2)$$

Technikai korlátok miatt a műhold nem tud pontosan ugyanabba a pozícióba visszatérni a leképezések során, ez a φ_{flat} referencia (flat Earth) és a φ_{topo} topografikus fázis tényezőt eredményezi. A referencia fázis valamely referencia felület, pl. forgási ellipszoid, hatását tükrözi; a topografikus fázis pedig a referencia felületre vonatkoztatott topográfiai magasságokét. A műholdak közötti bázisvonal átlagosan néhány száz méter nagyságú. A φ_{flat} és a φ_{topo} hatása precíz pályaadatok és nagy felbontású domborzatmodellek esetén adekvát módon számítható. A felvételek időpontja között bekövetkező deformáció okozta fázis

$$\varphi_{defo} = \frac{-4\pi}{\lambda} d_{LOS}, \quad (3)$$

ahol d_{LOS} műhold irányú (LOS – line of sight) elmozdulás függvénye, λ a hullámhossz (a leggyakrabban alkalmazott C-sáv esetén $\lambda = 5.6$ cm, mint a tanulmányban vizsgált Envisat műhold).

A φ_{atm} atmoszferikus fázis a felvételek időpontja között az atmoszféra állapotában bekövetkező változások sebesség módosító hatását kifejező fázistényező. A szintén mikrohullámon történő GNSS mérésekhez hasonlóan a SAR felvételeken is jelentkezik az atmoszféra elektromágneses sugárzás terjedését befolyásoló hatása. C-sávú (5.4 GHz) műholdradar interferometria esetén a troposzféra hatása domináns, amely a hőmérséklettől, a légnyomástól és a troposzférában jelen levő vízgőz parciális páramomásától függ (Rees 2013). Az ionoszféra diszperzív közeg, sebességmódosító hatása az elektromágneses sugárzás frekvenciájának négyzetével fordítottan arányos. A C-sávú felvételek esetén leggyakrabban elhanyagolják az ionoszféra sebességmódosító hatását, L-sávon (1-2 GHz) – hasonlóan a közel azonos frekvenciájú GNSS észlelésekhez – azonban ez már számottevő lehet. A SAR műholdak esetén az ionoszférában bekövetkező változások hatását úgy igyekeznek csökkenteni, hogy azok ú.n. dusk-dawn rendszerben végzik a leképezést, azaz azokban az időpontokban, amikor az ionoszféra napi aktivitása minimális.

A felbontási cella leképezések közötti φ_{scatt} reflexiók tulajdonságainak megváltozása hibaként jelentkezik a két felvétel fáziskülönbségének értelmezésében, dekorrelációt okozva. A temporális dekorreláció forrása a fizikai felszín, a cella reflexiók tulajdonságainak a megváltozása a felvételek készítése időpontjai között. A geometriai dekorreláció a leképezés geometriájának megváltozásához kapcsolódik. A bázisvonal növekedésével a beesési szög (incidence angle) megváltozása egy kritikus bázisvonal érték esetén olyan mértékű, amely pont akkora spektrális eltolódást okoz a visszavert jel haladási irányra merőleges (range) spektrumában, mint a jel sáv szélessége, ezzel a korreláció teljes elvesztését (Hanssen 2001, p. 39.) okozva. A Doppler-centroid dekorreláció az azimut (haladási) irányú megfelelője a geometriai dekorrelációnak.

A φ_{noise} egyéb zajforrások az érzékelő jellemzőitől függ, egyfajta műszerzajnak tekinthető. Ez magába foglalja a termális zaj hatását, amely a 0K-tól eltérő hőmérsékleten való leképezés következtében jelentkezik.

Feltételezve, hogy a felszíni felbontási cella reflexiók tulajdonsága változatlan két leképezés időpontja között valamint ismertek a referencia felület felett az ahhoz tartozó topográfiai magasságok, illetve a precíz műhold pályaadatok, a (2) összefüggés szerinti interferometrikus fázis értéke a következőképpen alakul

$$\Delta\varphi = \varphi_{defo} + \Delta\varphi_{topo} + \varphi_{atm} + \Delta\varphi_{orbit} + \varphi_{noise}, \quad (4)$$

ahol $\Delta\varphi_{topo}$ a topográfiai modell, $\Delta\varphi_{orbit}$ a műhold-pálya hibából származó fázis tag.

2 InSAR idősor elemzése

A SAR felvételek feldolgozásának lépéseivel, interferogram előállításának kérdéseivel több tanulmány is foglalkozik (Hanssen 2001, Ferretti 2014), magyar nyelven Bánya et al. (2014) összefoglaló cikkére utalunk. A SAR felvételek készítéseinek időpontjai között bekövetkező deformációk egyetlen interferogram alapján is meghatározhatók (DInSAR, differenciális InSAR), ha az interferometrikus

fázist a deformáció dominálja és természetesen feltételezve, hogy a dekorreláció elhanyagolható mértékű. Gyér növényzetű környezetben nagy erejű földrengések, vulkánkitörések okozta felszíni deformációk térképezhetők ilyen módon. Azonban a kis amplitúdójú, hosszú időállandójú tektonikai folyamatok esetén az interferometrikus fázis értéket a deformáció fázis mellett a többi tényező is befolyásolja. Ezen hatások kvantifikálására, kiküszöbölésére különböző idősor elemző eljárásokat dolgoztak ki (Ferretti et al. 2001, Berardino et al. 2002). Valamennyi eljárás központi kérdése azoknak a felbontási celláknak a megválasztása, amelyek fázis értéke tükrözi a deformációt és hosszú időn keresztül azonosíthatóak valamennyi felvételen, lehetővé téve ezáltal az interferogramok idősor alapú feldolgozását (Multi Temporal InSAR, MTInSAR).

Két típusú idősor elemzési eljárás fejlődött ki, amelyek a felbontási cellák reflexiós tulajdonságain alapulnak. A felbontási cella integrált fázis értékét tekintve a visszaverődés két esete 1.) egyetlen egy objektum dominálja a fázisértéket 2.) több, kisebb objektum alakítja ki a visszavert koherens fázist. A reflektáló felületek jellemzőiről magyar nyelven Bányai et al. (2014) ad áttekintést. A két típusú reflexiós tulajdonságra kidolgozott eljárások a PS (persistent scatterer – állandó szórópontú, Ferretti et al. 2001, Hooper et al. 2004) és SBAS (vagy SB, small baseline subsets – rövid bázisvonalú, Berardino et al. 2002) módszerek. A PS módszer egy kiválasztott felvételhez képest képzi az interferogramokat és különböző megfontolások alapján választja ki azokat a felbontási cellákat, amelyek valamennyi interferogram páron azonosíthatók. Az SB módszer esetén a SAR felvételekből egy olyan interferogram hálózat kerül kialakításra, amelyben a lehető legkisebbek a térbeli és időbeli bázisvonalak, így kevésbé jelentkezik dekorreláció hatása. A fázis szűrésével tovább csökkenthető a fáziszaj hatása és az így kialakított interferogram hálózatban azonosíthatók azok az SDFP (slowly-decorrelating filtered phase – időben lassan dekorreláló szűrt fázis értékű) pixelek, amelyek felhasználásával elvégezhető az idősor elemzés. A nagy felbontású SAR felvételeken alapuló PS módszer inkább ipari célú deformáció vizsgálatok elvégzésére alkalmas, míg az SB módszer nem beépített környezetben a tektonikai folyamatokkal összefüggő mozgások vizsgálatára (Ferretti 2014, p. 86).

A legtöbb eljárás kritériumként a felbontási cellák amplitúdó értékét használja fel az MTInSAR során. Ez a módszer beépített környezet esetén alkalmazható sikeresen, ahogy arra Hooper et al. (2004) tanulmányában rámutatott. Hooper (2006) módszerében a felbontási cellák fázis stabilitását és a térbeli korreláció elvét alkalmazta azon pixelek megtalálására, amelyek az idősor elemzés alapjául szolgálnak. Jelen tanulmányban ezt a módszert alkalmaztuk, a StaMPS – Stanford Method for Persistent Scatterers (Hooper et al. 2012) programcsomagon keresztül, így a következő fejezetben röviden ismertetjük a módszer alapelvét.

3 A StaMPS eljárás alapelve

A (4)-ben definiált interferometrikus fázisból a deformációs fázis leválasztása összetett feladat, mivel minden más forrásból származó hatás – annak amplitúdójától függetlenül – a tartományra van leképezve. A StaMPS eljárás (Hooper et al. 2012) a felbontási cella fáziszaj stabilitását és az egyes fázis-tényezők térbeli korrelációjára vonatkozó információt használja fel a deformációs fázis, és így a leképezés során bekövetkezett deformáció meghatározására. A módszer további előnye, hogy nem igényel semmilyen előzetes deformációs modellt a végbemenő folyamatokról, szemben több amplitúdó alapú pixel kiválasztó eljárással.

A (4)- szerinti funkcionális modellben az egyes fázis tényezők szétválasztása azon alapul, hogy milyen determinisztikus vagy sztochasztikus tulajdonságokkal jellemezhetőek. Ezeket foglalja össze röviden az 1. táblázat (Agram 2010). A deformáció térben és időben korrelált folyamatnak tekinthető, ezzel szemben az atmoszferikus hatás (más néven APS – atmospheric phase screen) csak térbeli korrelációt mutat, az atmoszféra állapotában már rövid időtartamon belül jelentős változás következik be. A műholdpálya haladási irányú hibájának pályairányú tagja a felvételek koregisztrációja során kiküszöbölhető, a pályára merőleges hibák okozta fázis tag egy interferogramon belül hosszú hullámhosszú hibát (phase ramp) okoz, ami ráakódik a többi fázis tag hatására. A pályahibák okozta fázis értéke interferogramonként változó. A digitális domborzat modellekben levő magassági hibák okozta $\Delta\varphi_{topo}$ fázis interferogramonként és felbontási cellánként változó fázis tagot okoz, azonban a DEM

(digitális magasság modell) hiba fázisa részben arányos a merőleges bázisvonal értékével. A φ_{noise} fáziszaj értéke sem térben, sem időben nem korrelált.

1. táblázat. Az interferometrikus fázis összetevőinek spektrális jellemzői

fázistag	térbeli jellemző	időbeli jellemző
deformáció	alacsony frekvenciás	alacsony frekvenciás
DEM hiba	magas frekvenciás	korrelál a bázisvonalal
atmoszférikus	alacsony frekvenciás	magas frekvenciás
pályahiba	alacsony frekvenciás	magas frekvenciás
zaj	magas frekvenciás	magas frekvenciás

A fázis tagok spektrális tulajdonságát figyelembe véve látható, hogy egy interferogram esetén mind a deformációs, az atmoszférikus és a műholdpálya hiba hosszú hullámhosszú jelet okoz, így ezek térben korrelált $\Delta\varphi^c$ összetevőjét eltávolítva a (4) interferometrikus fázisból

$$\Delta\varphi - \Delta\varphi^c = \Delta\varphi_{topo}^{nc} + \varphi_{noise}^{nc} \quad (5)$$

ahol nc a térben nem korrelált összetevőket mutatja. A DEM hibából származó fázistag a merőleges bázisvonalal arányos, így a felbontási cella fázis zaja meghatározható. A fázis zaj alapján definiálható az x -edik felbontási cella időbeli koherenciája (temporal coherence)

$$\gamma_x = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \exp \left\{ j \left(\Delta\varphi_{x,i} - \Delta\varphi_{x,i}^c - \Delta\varphi_{topo,x,i}^{nc} \right) \right\} \right|, \quad (6)$$

$i = 1...N$ interferogram alapján, ahol j a képzetes egység. Az időbeli koherencia értéke zérus és egy között változik, amely a teljesen véletlen fázisú pixel és az ideális, zajmentes PS esetének felel meg. A StaMPS módszerben a térben korrelált fázis meghatározása egy aluláteresztő Butterworth és egy adaptív szűrő alkalmazásával történik, utóbbi paramétereit az interferometrikus fázis gradiense határozza meg. Ezzel az eljárás nem csak állandó gradiensű hanem epizodikus mozgások (vulkánkitörések, földrengések koszeizmikus deformációi) vizsgálatára is alkalmas.

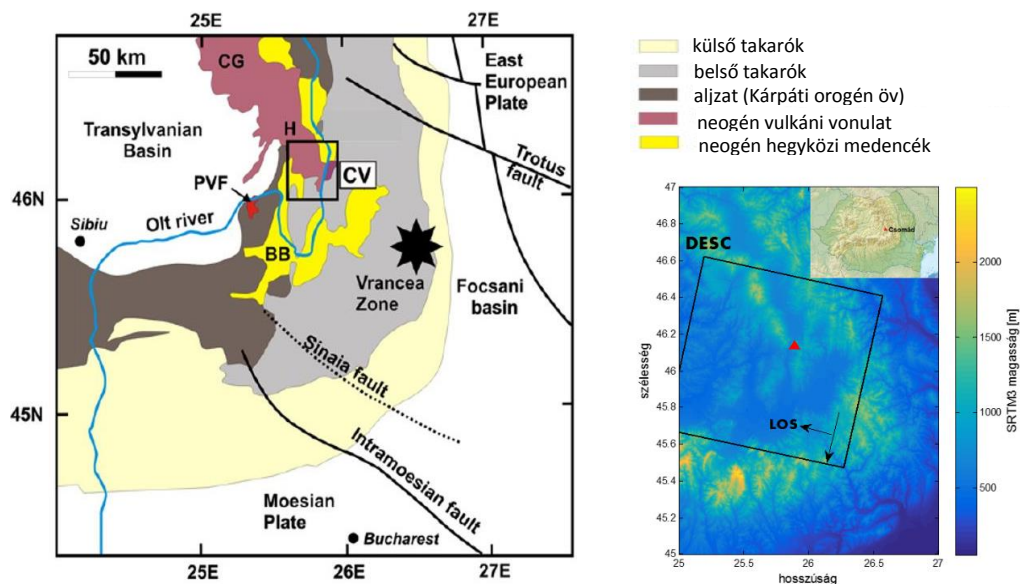
4 A Belső-Kárpát-kanyar

Tektonikai szempontból az európai lemez egyik legaktívabb területe a kárpáti szubdukció (Ismail-Zadeh et al. 2012), ahol az alábukó litoszféra lemez következtében feszültségek halmozódnak fel a mélyben, ezek időről-időre földrengések formájában oltódnak ki. Habár a földrengések hipocentruma viszonylag nagy mélységben található mégis jelentős pusztítást tudnak végezni. A legnagyobb műszeres regisztrálású rengések (1938, 1940, 1977) $M_L=7.3-7.4$ magnitúdójúak voltak (https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_earthquakes_in_Vrancea_County, 2017. november 27.) és az EMS skála szerinti IX-es intenzitás értékűek, több ezer halálos áldozatot követelve. A Kárpátok belső oldalán (1. ábra) helyezkedik el a Kalamári-Görgény-Hargita vulkáni lánc, amelynek legfiatalabb tagja, a Csomád vulkán megközelítőleg 50 km-re található a Vrancea (Vrancea) szeizmikus zónától. Magnetotellurikus szondázás (Harangi et al. 2015), szeizmikus tomográfia (Popa et al. 2012) és petrofizikai vizsgálatok egymástól függetlenül egy jól vezető testet azonosítottak a vulkán alatt, részben olvadt állapotú magmára (magma kására) utalva. A vulkáni lánc kialakulása összefüggésben lehet

a szubdukciós zónában folyó aktív tektonikai folyamatokkal, de máig nem tisztázott a köztük levő kapcsolat.

Az itt zajló tektonikai folyamatok modellezése igazi kihívás, mivel az elmozdulások, deformációk nagy mélységekben történnek, a nagy földrengéseket leszámítva csekély felszíni indikációval. A deformációk azonban fontos peremfeltételt jelentenek a lejátszódó tektonikai folyamatok különböző kvantitatív, numerikus modellezésen alapuló vizsgálatokhoz.

Több, nemzetközi összefogásban végzett kísérlet történt ismételt GNSS mérések alapján az elmozdulások meghatározására. Hoeven et al. (2005) 25 ponton, 13 mérési kampányban 7 év alatt (1997-2004) végzett észlelésekből a Mőziai (Moesian) lemez dél-délkelet irányú, 2.5 mm/év sebességű horizontális mozgásokat mutattak ki az Eurázsiai lemezhez képest, a vertikális sebességtér jól követi a tektonikus egységeket, az üledékes medencék területén mérsékelt (max. 8-10 mm/év) süllyedéssel és az orogén területeken néhány mm/év sebességű emelkedéssel. Schmitt és társai (2007) 1995 és 2006 között 14 mérési kampány alapján határozták meg a Vrancea szeizmikus zóna tágabb területének sebességtérképét. A horizontális sebességtér döntően ellentétes irányra adódott Hoeven és társai (2005) eredményeivel összehasonlítva, a vertikális sebességek a tektonikai szerkezeteket követik, a legnagyobb süllyedések (6 mm/év) a Foksányi- és Brassói-medencében jelentkeznek.



1. ábra. Bal oldal: Dél-nyugat Románia egyszerűsített tektonikai térképe (Harangi et al. 2015). Jelölések: CV – Csomád vulkán, CG – Kalamári-Görgény vulkáni terület, H – Hargita vulkáni terület, BB – Brassói-medence, PVF – Persányi bazaltos vulkáni terület. Az angol nyelvű feliratok megfelelői: East European Platform – Kelet-európai Platform, Focsani Basin – Foksányi-medence, Intramoesian fault – Intramőziai törés, Moesian Plate – Mőziai lemez, Sinaia fault – Sinaia törés, Transylvanian Basin – Erdélyi-medence, Trotus fault – Trotus törés, Vrancea Zone – Vrancea zóna.

Jobb oldal: A Csomád területét lefedő Envisat SAR felvétel (track: 236) területe, amely megközelítőleg 100 km × 100 km, a háromszög a Csomád vulkán elhelyezkedését mutatja.

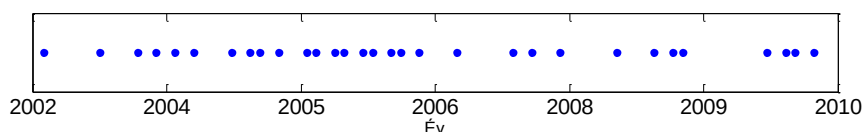
5 Envisat felvételek alapján végzett vizsgálatok

A műholdradar interferometria egy relatív technika, amellyel az egy felvételt lefedő területen belüli relatív deformációk határozhatók meg. Regionális léptékű geodinamikai jelenségek, mint pl. a skandináv térségben az eljegesedés utáni lassú emelkedés tanulmányozásához a hagyományos geodéziai módszerek nyújthatnak megoldást. A Kárpát-kanyarban zajló felszíni deformációs folyamatok irányát a geológiai szerkezetek határozzák meg, azonban a deformációk amplitúdója a korábban alkalmazott hagyományos geodéziai eszközökkel nem határozható meg nagy biztonsággal. A műholdradar

interferometria területén az elmúlt 10 évben olyan feldolgozási eljárások születtek meg, mint az időbeli koherencia vizsgálatán alapuló StaMPS megközelítés is, melyek lehetővé teszik az alacsonyabb koherenciájú interferogramok sikeres felhasználását a felszíni deformációk térképezésében. Ebben a tanulmányban kísérletet teszünk a Belső-Kárpát-kanyar szűkebb területére vonatkozó, kiemelten a Csomád vulkán környezetében zajló felszíni deformációk detektálására, amely talán egy lépéssel közelebb vezet annak eldöntéséhez, hogy a vulkán magmatározójában van-e esetleg további, felszíni deformációval járó magmaáramlás. A geológiai információk alapján a vulkáni és posztvulkáni tevékenységgel érintett területen a várható deformációk a < 1 cm / év tartományba esnek. A műholdradar interferometria módszerében a legnagyobb hibaforrást az atmoszférikus fázis okozza, mely statisztikai szempontból csökkenthető hosszabb időtartamot lefedő SAR felvételek felhasználásával. Emardson et al. (2003) vizsgálatai alapján a néhány 10 km hullámhosszú, < 1 cm/év sebességű felszíni deformációk 1.5-2 év időtartamot lefedő felvételek alapján vizsgálhatók, feltéve, hogy a koherencia megfelelő az egyes felvételek között. Ez alapján a 2014-ben (illetve 2016-ban) pályára bocsátott Sentinel-1A (és 1B) időszora még nem elegendő az esetleges felszíni deformációk térképezéséhez, ezért vizsgálatainkat archív felvételek alapján végeztük.

5.1 InSAR adatok

A Belső-Kárpát kanyar (inner Carpathian bend) térségét archív, leszálló pályairányú Envisat felvételek alapján vizsgáltuk. A felvételek 2002 novemberétől 2010 szeptemberéig tartó időtartamot fedik le, ezzel lehetőséget biztosítva az eredmények korábbi GNSS kampányokkal való összehasonlítására is, habár megjegyezzük, hogy a két technika információ tartalma eltérő. Az Envisat az Európai Űrügynökség C-sávú ($\lambda = 5.6$ cm) műholdja, amely nominálisan 35 naponként készített felvételeket egy adott területről. Az Űrügynökség által a részünkre rendelkezésre bocsátott 236-os relatív pályaszámú (leszálló műhold irányú, 1. ábra) 32 db. felvétel sajnos nem fedi le egyenletesen az általunk vizsgált közel 8 év időtartamot (2. ábra). Néhány esetben több hónapig hiányoznak a felvételek, ami valószínűleg a műholdpálya korrekció illetve a műholdon elhelyezett ASAR (Advanced SAR) észlelő hibájából adódnak.

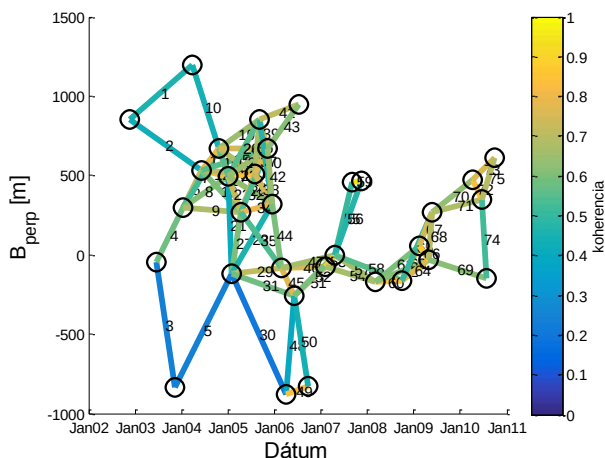


2. ábra. A deformációk meghatározásában felhasznált Envisat ASAR felvételek felvételi időpontjai

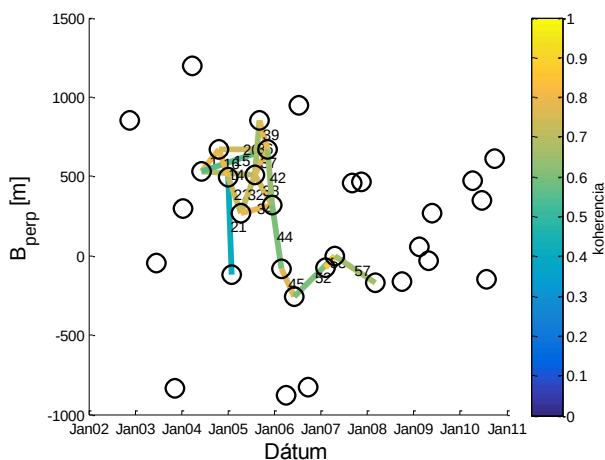
5.2 Interferogram generálás, SB hálózat

A vizsgált terület jellegéből, a nem túl nagyarányú beépítettségéből következően a SAR felvételek felbontási cellái inkább az ún. elosztott szórópontok (distributed scatterers) típusába tartoznak, azaz egy-egy felbontási cellán belül nincsenek olyan elemi objektumok, amelyek a felbontási cella integrált fázisértékét dominálják, hanem az elemi szórópontok együttesen alakítják ki a cella visszaverési fázis értékét. Ennek megfelelően az interferogramok ún. rövid bázisvonalú (SB) hálózaton alapuló feldolgozását választottuk. Ez egy olyan interferogram hálózat kialakítását jelenti, amelyben a SAR felvételek párok úgy kerülnek kiválasztásra, hogy maximalizálják az ún. stack koherenciát, rövid térbeli és időbeli bázisvonalakat eredményezve. Annak biztosítására, hogy az interferogramok pixel alatti pontossággal legyenek egymáshoz koregisztrálva és egyetlen Doppler centroidra legyenek fókuszálva az interferogramok először egy közös mester felvételhez (2007. 04. 19.) képet kerültek kialakításra, majd az SB hálózat ezekből az interferogramokból képezhető. A rendelkezésre álló valamennyi Envisat felvételt felhasználásával kialakított térbeli és időbeli bázisvonalak szempontjából optimális SB hálózatot mutatja a 3.a. ábra (a 3.b ábra a sebességtér meghatározásában ténylegesen felhasznált interferogramokat mutatja, ld. 5.4-es fejezet). A fekete kör a felvételek időpontját mutatja a vonalak az interferogramokat, a vonal színe az interferogram teljes (stack) koherenciájával (ρ) arányos. Ez az adott interferogram időbeli és térbeli bázisvonal értékeitől (felvételi geometria) illetve a felhasznált

SAR rendszerre jellemző kritikus értékeitől függ és értéke a $[0,1]$ tartományon változik. Ökölszabály szerint a $\rho > 0.5$ értékű interferogramokat lehetnek alkalmasak a felszíni deformáció térképezésére. Azonban a magas stack koherencia érték nem garancia a felvételek közötti koherencia megmaradására, pl. a hóval való borítottság jelentősen csökkenti a felbontási cellánként definiált koherenciát.



3.a. ábra. Az eredeti, valamennyi Envisat SAR felvétel felhasználásával kialakított SB hálózat, B_{perp} a merőleges bázisvonal

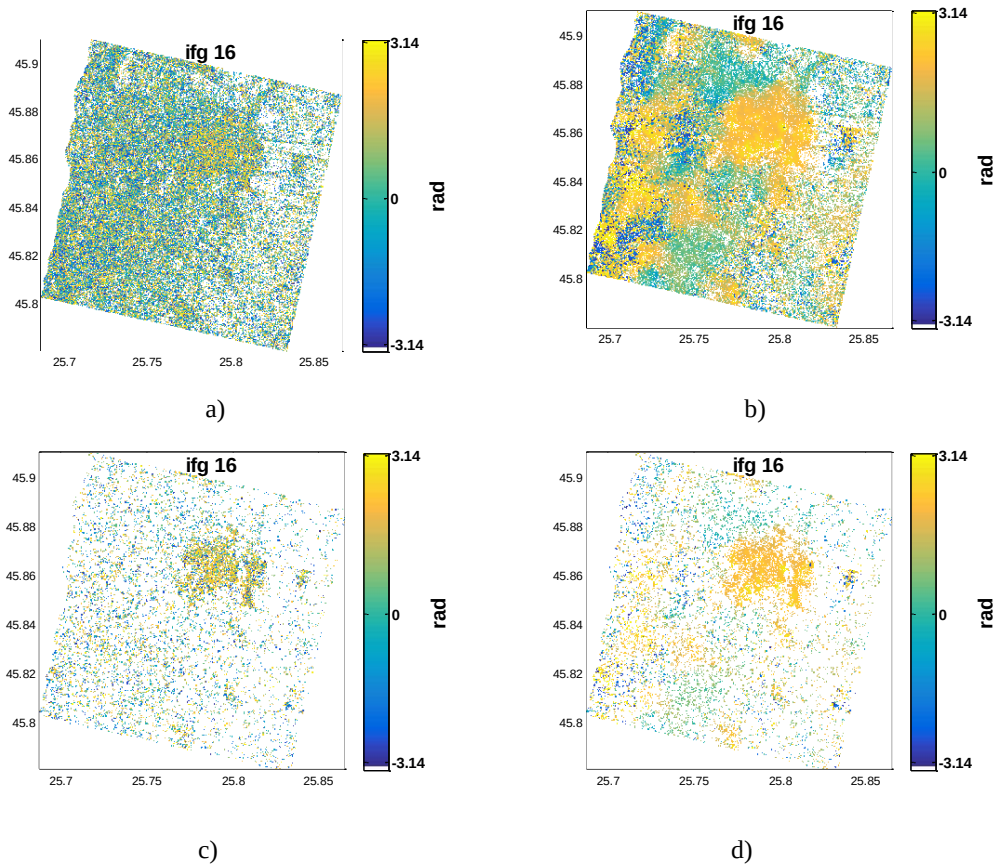


3.b. ábra. A felszíni deformációk meghatározására használt redukált SB hálózat, B_{perp} a merőleges bázisvonal

5.3 Időbeli koherencia (temporal coherence) vizsgálata, SDFP pixelek kiválasztása

Az egyes pixelek időbeli koherenciája a (6) összefüggés alapján, több lépésben iterációval kerül meghatározásra. A térben korrelált fázis tagokon keresztül a fázis zaj meghatározása, és így a megfelelő pixelek kiválasztása, a módszer sikerességének kulcsa. A 4. ábrán példaként bemutatjuk, hogy hogyan alakult a kiválasztott pixelek száma, a térben korrelált fázis meghatározása a számítások során. A memória problémák elkerülése, a számítások párhuzamosítása érdekében a terület részekre bontásra kerül, azok bizonyos lépésekig egymástól függetlenül kerülnek feldolgozásra, esetünkben egy-egy részterület megközelítőleg 150 km^2 . A StaMPS eljárás mind a potenciális PS és az SDFP pixeleket az amplitúdó értékük alapján (PS: D_A amplitúdó szórási index – egy felvételesorozaton egy pixel amplitúdó szórásának és az átlag amplitúdó értéknek a hányadosa; SDFP: D_{AA} amplitúdó különbség szórás

index – egy felvételsorozat esetén az interferogramokra vonatkozó amplitúdó eltérés szórása és az átlagos amplitúdó hányadosa) válogatja ki (Hooper 2008). Ezek a pixel amplitúdótól függő indexek és a σ_ϕ pixel fázis szórás kis értékek esetén közel lineáris kapcsolatban van (Ferretti et al. 2011), így jó előjelzői az alacsony fáziszajú pixeleknek. A 4. ábrán bemutatott esetben megközelítőleg 81 ezer potenciális SDFP pixel alkotta a kiinduló pixel halmazt. A $\Delta\phi_{x,i}^c$ térben korrelált fázis tag aluláteresztő valamint a fázis domináns hullámhosszait felerősítő szűrők kombinálásával kerül eltávolításra. Ezt a lépést a DEM modell térben nem korrelált összetevője okozta hiba becslése



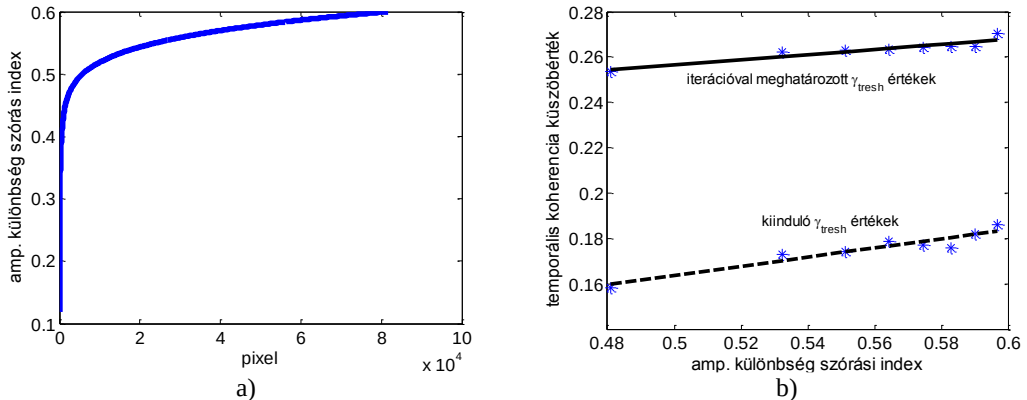
4. ábra. Becsomagolt fázis értékek a vizsgált terület déli részén Sepsiszentgyörgy környezetében a 2004. 10. 21. – 2004. 12. 30. interferogramon ($B_{\text{perp}} = -176$ m); a) összes SDFP pixel jelölt, b) az a. ábra térben korrelált fázis értéke, c) a fáziszaj vizsgálata alapján meghatározott SDFP pixelek, d) a c. ábra térben korrelált fázisa

követi, felhasználva, hogy az a merőleges bázisvonal értékével arányos. Mivel a fázis a $[0, 2\pi)$ intervallumra van leképezve így a $\Delta\phi_{\text{topo},x,i}^{nc}$ térben nem korrelált DEM hiba nemlineáris inverzióval becsülhető. A fáziszajt jellemző γ_x időbeli koherencia ezután (6) szerint számítható, fokozatos közelítéssel. Az iteráció során a térben korrelált fázis összetevő meghatározásánál a súlyozás alapjául a korábban meghatározott γ_x érték szolgál a kívánt konvergencia küszöb eléréséig.

A StaMPS eljárás a következő lépésben meghatározza azt a $\gamma_{x,\text{tresh}}$ küszöbszámot amely megadja az SDFP pixeleket valamilyen előre definiált véletlen fázisú pixel elfogadási arány (random phase acceptance rate) függvényében. A $\gamma_{x,\text{tresh}}$ meghatározásához a felvételi geometriának megfelelően véletlen fázisú pixelekre is kiszámításra kerül az időbeli koherencia. A valamennyi rendelkezésre álló (stabil fázisú SDFP és véletlen fázisú pixelek halmaza) valamint a véletlen fázisú generált pixelek γ_x értékei alapján előállíthatók a megfelelő hisztogramok és ezekből a valószínűségi sűrűségfüggvények.

A hisztogramok átskálázása azzal a feltételezéssel történik, hogy kis koherencia érték a véletlen fázisú pixeleknek felelnek meg.

Tapasztalati megfigyelés, hogy az amplitúdó indexek és a temporális koherencia között lineáris kapcsolat áll fent, így D_{AA} függvényében különböző temporális koherencia küszöbértékek határozhatók meg megfelelően nagyszámú minta alapján, D_{AA} szerint csoportokra osztva a pixeleket. A két mennyiség közötti lineáris kapcsolat felhasználásával, a $\gamma_{tresh} = \kappa D_{AA}$ függvény meghatározásával minden SDFP pixel amplitúdójához meghatározható az a $\gamma_{x,tresh}$ küszöbszám, amely biztosítja az előzetesen választott random pixel elfogadási arány mellett, hogy a pixel alacsony fáziszajú. Az 5.a ábra a vizsgált pixelek amplitúdó különbség szórás értékeit mutatja növekvő sorrendbe rendezve, ez alapján 10 ezer SDFP pixelenként kerül kiszámításra a γ_{tresh} küszöbérték. Az 5.b ábra szaggatott vonallal a kiindulási, folytonos vonallal az újrászűrésrel meghatározott γ_{tresh} függvényeket mutatja. A random pixel elfogadási arányt viszonylag magas értéknek, 20 pixel km^2 -ként választva a koherencia küszöbérték alacsonyra (átlagosan 0.26-ra) adódott. A küszöbérték meghatározása után megközelítőleg 9 ezer pixel bizonyult alacsony fáziszajú SDFP pixelnek. A viszonylag magas számú random fázisú pixel beválogatása az SDFP pixelek közé azért történt, hogy növeljük a pixelek számát, ezzel biztosítva az egyenletes térbeli lefedettséget a további számítások során. A következő fejezetben látni fogjuk, hogy a kiválasztott pixelek fázisértékei nem közvetlenül kerülnek felhasználásra a fáziskicsomagolás lépésében, hanem csak több szűrés és átlagolási műveleten keresztül, ezzel csökkentve a véletlen fázisú pixelek hatását az eredményekre.



5. ábra. a) A vizsgált pixelek amplitúdó különbség szórási indexe. b) A fáziszaj meghatározásában alkalmazott temporális koherencia küszöbértékek az amplitúdó különbség szórási index függvényében

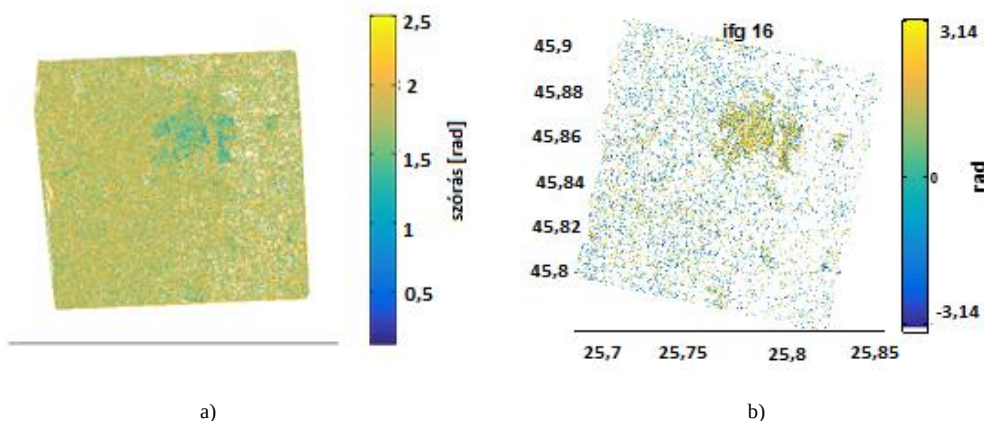
5.4 Fáziskibontás (phase unwrapping)

A felszíni deformációk meghatározásának két kulcslépése 1) a megfelelő pixelek kiválasztása, melyek fázis időszora a deformációt tükrözi és 2) a sikeres fáziskicsomagolás (vagy a hazai szakirodalomban elterjedt fáziskibontás). A fáziskibontás alapvető követelménye, hogy a szomszédos pixelek fáziskülönbsége ne haladja meg a fél ciklust. Ez megfelelő mintavételezéssel érhető el, amely azonban nem csak a deformációra vonatkozó kritérium, hanem valamennyi, a térben korrelált fázis tagban szereplő összetevőre is. Ezért kis amplitúdójú deformációk esetén – ahol az atmoszférikus fázis térbeli változása dominálja két SAR felvételek fáziskülönbségét – is megfelelő számú pixel szükséges az elmozdulások meghatározására.

A StaMPS eljárásban a fáziskibontás kvázi 3D-ben (Hooper 2006, 2009), először idő szerint majd térben (interferogramonként) történik.

Az időbeli fáziskibontás a pixelek alapján meghatározott Delaunay-hálózat élei mentén történik, a fáziskibontás lépése előtt az élek menti fáziskülönbségek meghatározásra kerülnek, majd valamennyi interferogram alapján ezek szórása számítható. Azok a pixelek, amelyekbe egy meghatározott küszöbértéknél nagyobb szórású élek futnak bele eltávolításra kerülnek.

Az Envisat felvételek feldolgozása során a szórás $\sigma_{SDFP} = 1.2$ rad értéknek választottuk. Ezzel az SDFP pixelek száma közel felére, 5 ezerre csökkent (6. ábra). A választott szórás küszöbérték jelentősen meghaladja a fázismérések megközelítőleg 40° -os (0.7 rad ~ 3 mm) pontosságát (Hanssen 2001).



6. ábra. a) A fáziskibontás előtti Delaunay-hálózat, az élek színe az SDFP pixelek fáziskülönbségének szórását mutatja (lokális koordináta-rendszerben) b) A $\sigma_{SDFP} < 1.2$ rad szórású pixelek

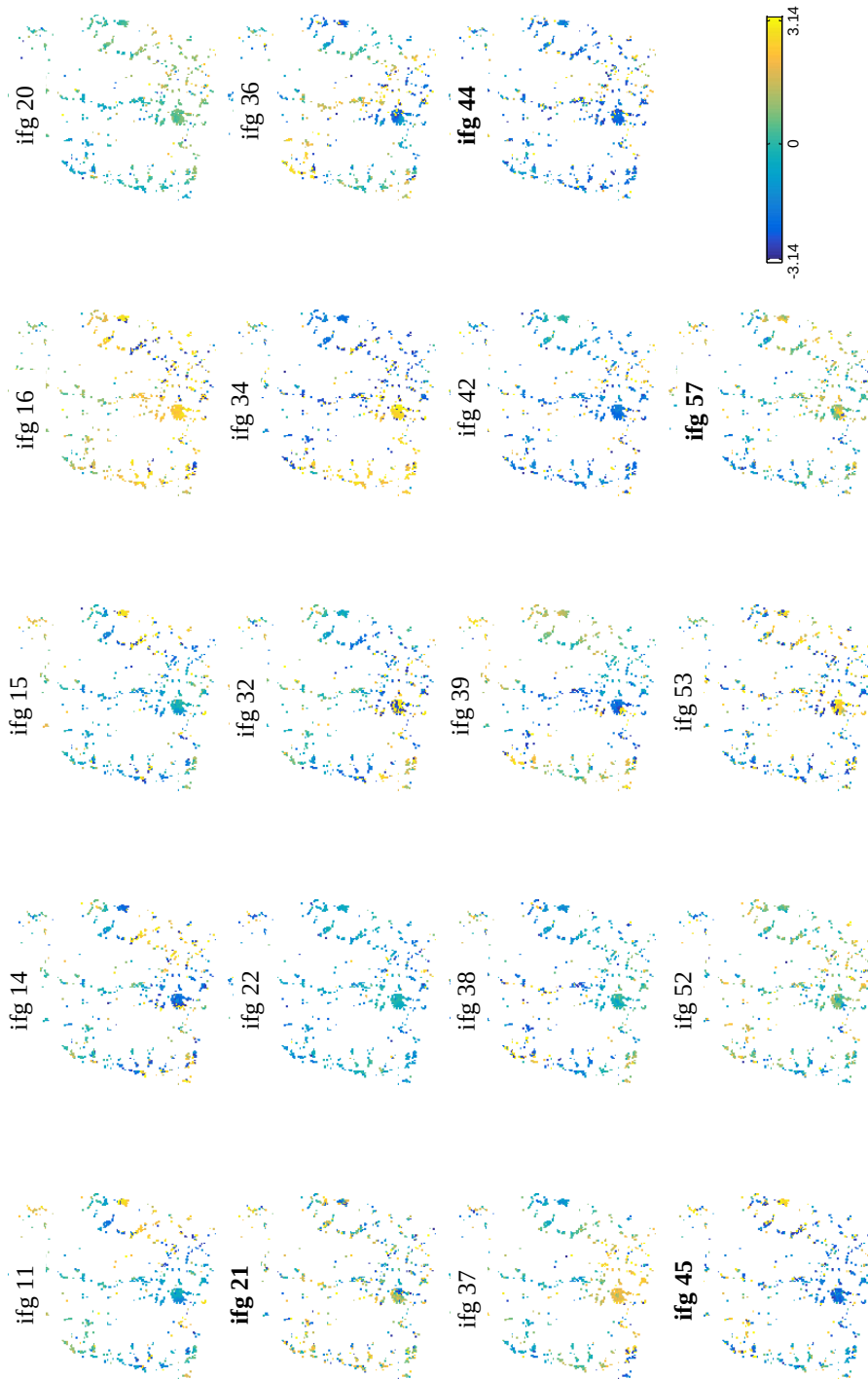
A magas szórásérték választását részben az indokolja, hogy a fáziskicsomagolás előtt lehetőség van a pixelek rácsra történő interpolációjára, ezzel is tovább növelhető a jel-zaj arány.

Az interpoláció egyfajta legközelebbi szomszéd típusú eljárás, amely a temporális koherenciával fordított arányú súlyozást alkalmaz, így ennek eredménye továbbra is szórt pontokban rendelkezésre álló adat. A rács felbontásának méretét úgy kell megválasztani, hogy ne forduljon elő a jel (fázis) alulmintavételezése. A feldolgozás 400 méteres rácsköz értékekkel történt ezzel is elősegítve a fáziszaj csökkentését.

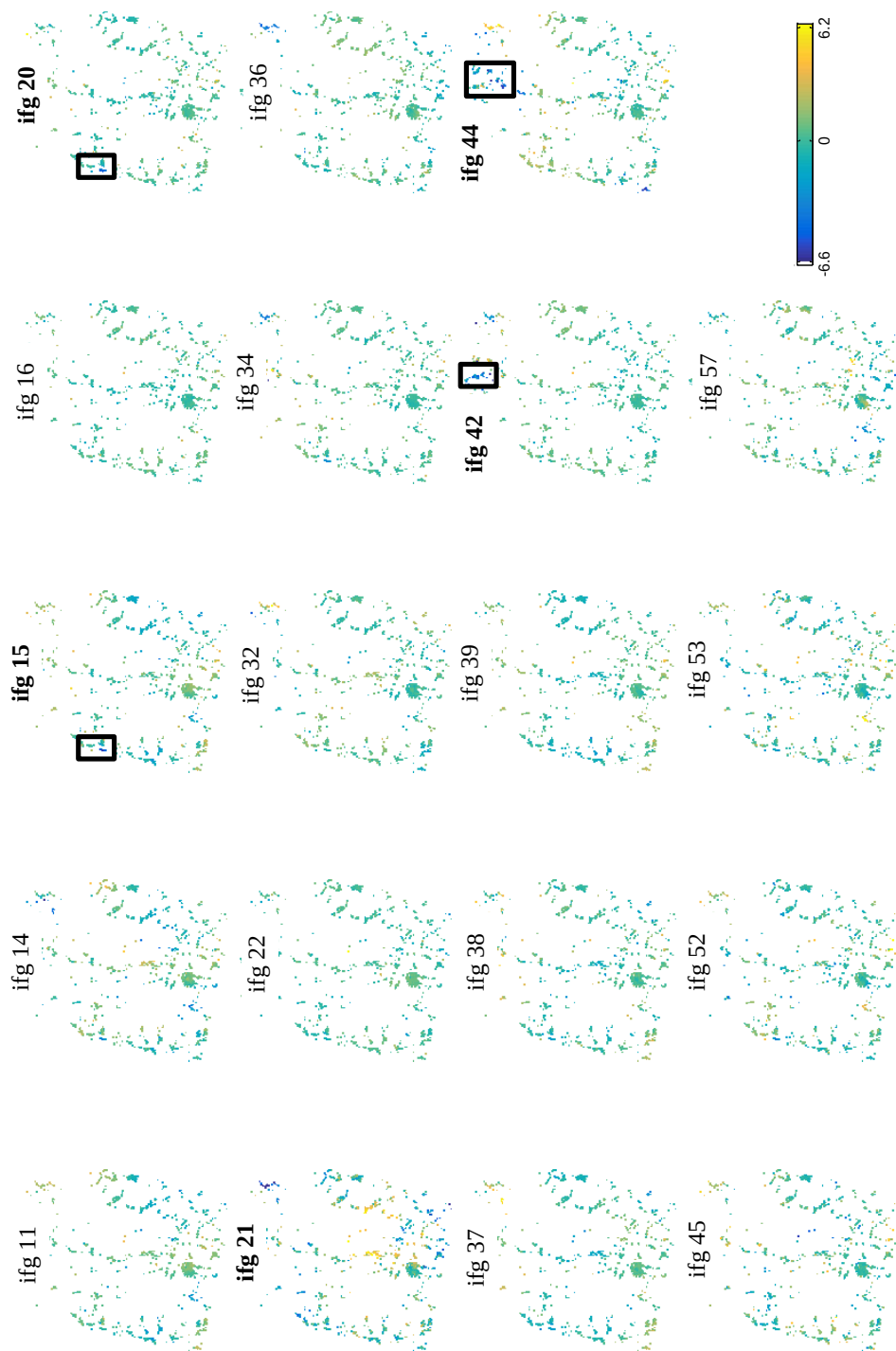
A StaMPS módszer a fáziskicsomagolást nem egy sor 2D-s fáziskicsomagolási problémaként kezeli, hanem felhasználja, hogy az interferogramok a vizsgált deformáció idősorához kapcsolódnak és egy kvázi 3D-s fáziskicsomagolási eljárást használ. A fáziskicsomagolás két lépésben történik, először idő szerint majd térben.

Fáziskicsomagolás előtt a fáziszaj további csökkentése a frekvenciatartományban Goldstein szűréssel (Goldstein és Werner 1998) történik. Mivel két felvétel között (idő szerinti fáziskibontás) döntően az atmoszférikus fázis megváltozása miatt nagyobb fáziskülönbségek fordulhatnak elő, mint a fél ciklus, ezért a pixelek alapján kialakított Delaunay-hálózat mentén a fáziskülönbségek és nem maguk a fázis értékek kerülnek kibontásra. Mivel az atmoszférikus fázis térben korrelál, ezért a viszonylag közeli Delaunay-hálózati pontok között ennek hatása elhanyagolható lesz, így téve lehetővé a fáziskicsomagolást. Valamennyi interferogram felhasználásával az idő szerint kicsomagolt majd simított fázis különbség értékek valószínűségi sűrűségfüggvénye meghatározható, amely kényszerként (költség függvényként) szolgál a térbeli fáziskicsomagoláshoz. A 2D-s fáziskicsomagolás rácsra interpolált fázisértékeken a SNAPHU (Statistical-cost, network-flow algorithm for phase unwrapping, Chen 2001) algoritmussal történik, amely egy kifejezetten a fáziskicsomagolásra készített minimális költségű folyam-algoritmus.

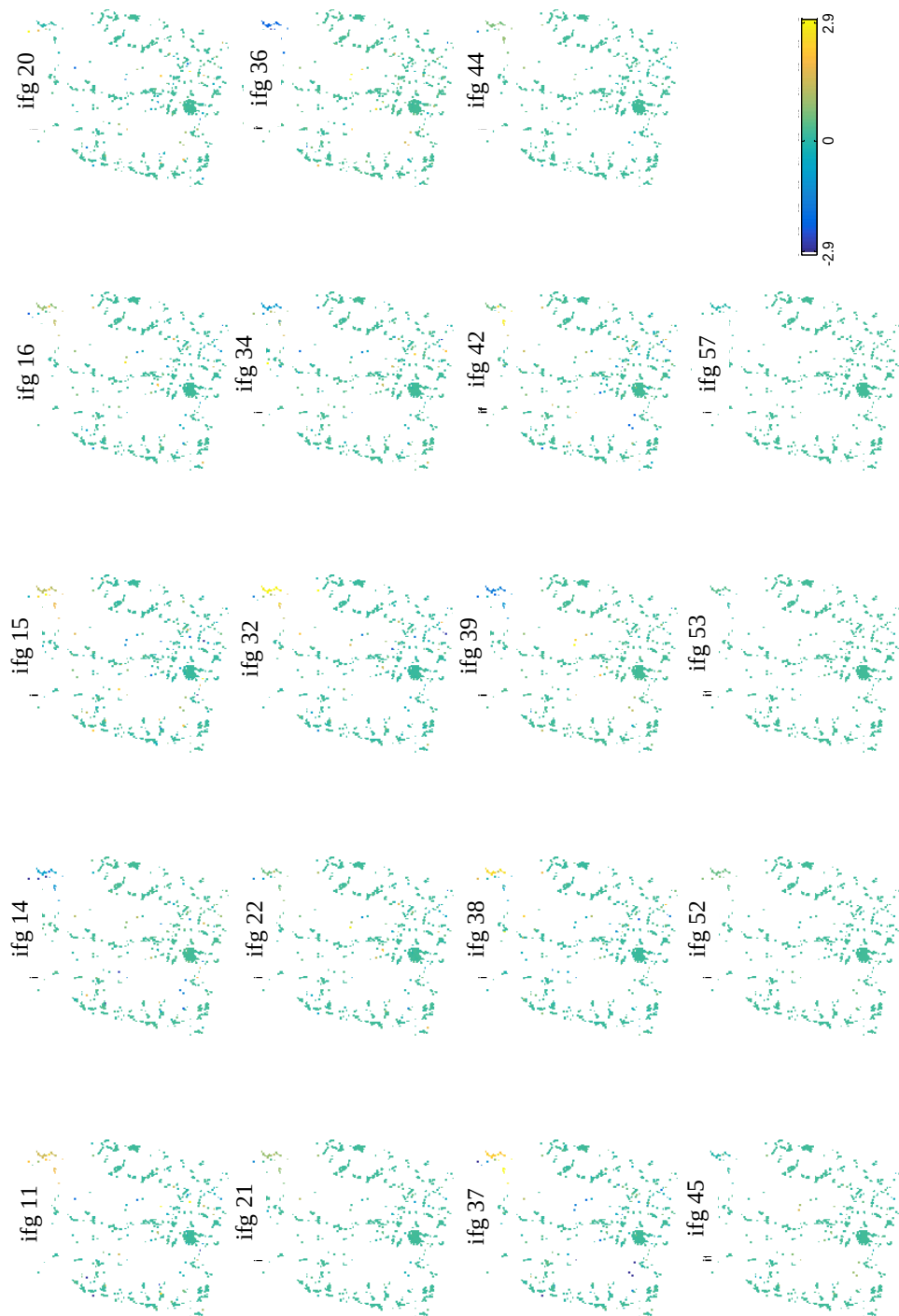
A fáziskibontás után az interferogramokból kialakított hálózat, mint 1D-s hálózat választott hálózati dátumra (mester felvétel időpontja) vonatkozóan kiegyenlíthető (5.5 fejezet), és meghatározhatók a mester felvételre vonatkozó fázisértékek valamint ezek maradékai (reziduálok). A reziduálok valamint a kicsomagolt és kicsomagolt fázisok vizsgálata alapján fáziskicsomagolási hibák azonosíthatók be. Ennek eredményeként a kezdeti, 3. a. ábrán bemutatott interferogram hálózatot a 3.b. ábrán látható szűkítettük, 75 db-ról 19 db-ra csökkentve az interferogramok számát. A hálózat 13 + 1 db. felvételtől épül fel, ezzel továbbra is biztosítva valamennyi redundanciát a kibontott fázisértékek ellenőrzéséhez.



7. ábra. Becsomagolt fázisértékek a 3.b ábra SB hálózatának interferogramjain (rad). Az alacsony koherenciájú interferogramokat félkörvén betű mutatja



8. ábra. Kicsomagolt fázisértékek a 3.b ábra SB hálózatainak interferogramjain (rad). A téglalapok a szövegben hivatkozott fáziskicsomagolási hibákat mutatják, a félkörvör betűtípus a részben hibásan kicsomagolt interferogramokat mutatja

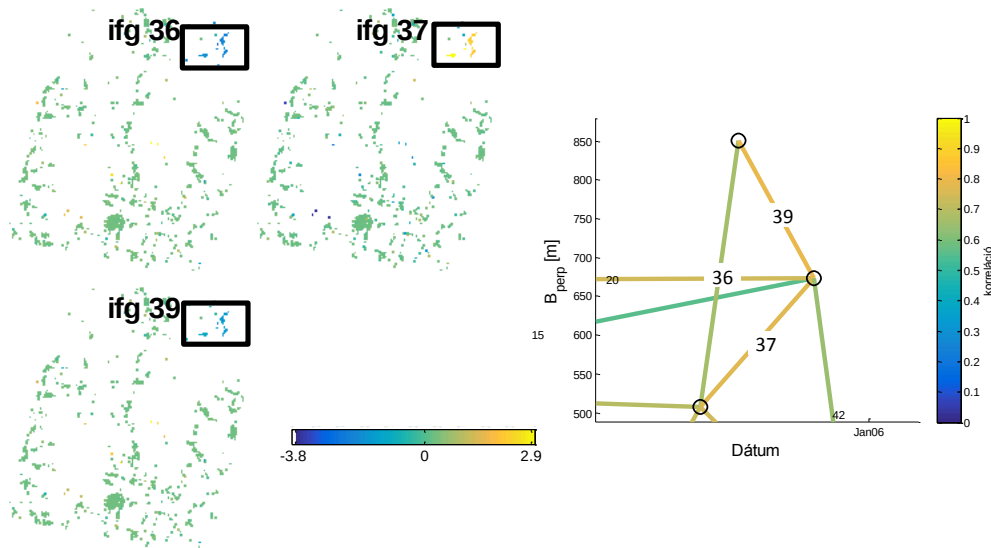


9. ábra. Maradék fázisértékek a 3.b ábra SB hálózatának interferogramjain (rad)

A 7. ábra a 19 db. becsomagolt fázisú interferogramot mutatja. A SDFP pixelek nem egyenletesen fedik le a vizsgált területet, az erős vegetációjú területeken nem sikerült stabil fázisú SDFP pixeleket azonosítani, azonban a meglévő pixelek többé-kevésbé koherens foltokat alkotnak. Viszonylag a színskálának megfelelő átmenetben követik egymást a szomszédos pixelek fázisértékei a 11., 12., 15., 16., 20., 22., 34., 37., 38. és 39. interferogramok esetében. Ezzel szemben kevésbé koherensek a 21., 44., 45. és 57. interferogramok a ritka pontlefedettségű területeken.

A kicsomagolt interferogramok (8. ábra) esetén izolált pontcsoportokban jelentkeznek fáziskicsomagolási hibák, amelyek vizuálisan úgy azonosíthatók be, hogy a pixelek fázisa jelentősen eltér környezetük fázisértékétől (színskálának nem megfelelő fázisú pixelek megjelenése). A legjelentősebb ilyen pontcsoportok a 20., 42. és 44. számú interferogramokon láthatók, míg egy-egy pixel esetén is előfordulhat fáziskicsomagolási hiba mint pl. a 15. és 21. számú interferogramok esetén.

A fáziskicsomagolási hibákat további beazonosítását segítik a reziduálok vizsgálata (9. ábra), azonban fontos hangsúlyozni, hogy erre csak akkor van lehetőség, ha egy-egy felvétel több interferogram kialakításában is részt vesz (hasonlóan az 1D-s geodéziai hálózatokhoz, visszazárás esetén van lehetőség a mérések ellenőrzésére). A 10. ábra a 36., 37. és 39. interferogramok alapján illusztrálja, hogy a reziduálok vizsgálata hogy segítheti további fáziskicsomagolási hibák detektálását. A 37-es interferogramon megjelenő pozitív előjelű reziduálokat a 36. és 39. interferogramok negatív reziduáljai ellensúlyozzák. A fáziskicsomagolási hibák akár manuálisan is javíthatók a kicsomagolt fázisértékekhez $+n2\pi$ értékek hozzáadásával. Ebben az esetben fontos figyelembe venni, hogy az egyes interferogramok tagjai-e további elemi hálózatoknak, mivel az alkalmazott manuális javításoknak azokkal konzekvensnek kell lennie. Pl. a 36. és 39. interferogramok más elemi hálózat kialakításában nem vesznek részt, azonban a 37. interferogram további elemi hálózatoknak is tagja. A kicsomagolt fázisértékek manuális javítása nagy körültekintést igényel, így feldolgozásunk során manuális javítást nem végeztünk. A műhold irányú elmozdulásokból meghatározott sebességek nagy szórásai pontosan mutatni fogják, hogy mely pixelek esetében terhelt hibával a sebességérték a fáziskicsomagolási hibák következtében.



10. ábra. Bal oldal: Reziduál fázisértékek a zárt hálózatot alkotó 36., 37. és 39. számú interferogramok esetében (rad).
Jobb oldal: az SB interferogram hálózat vonatkozó részlete

A 2. táblázat a felszíni deformációk meghatározására felhasznált interferogramok néhány jellemzőjét foglalja össze. Az interferogramok lehetőség szerint kis térbeli és időbeli bázisvonalak alapján kerültek kiválasztásra (5.2 fejezet), ezzel segítve a koherencia megmaradását.

2. táblázat. A deformációk meghatározásában felhasznált SB interferogramok (3.b. ábra) néhány jellemzői

interferogram száma	dátum (kezdő felvétel)	dátum (kezdő felvétel)	időbeli bázisvonal [nap]	merőleges bázisvonal [m]	szórás [°]
11	03-Jun-2004	21-Oct-2004	-140	143	31.750
14	03-Jun-2004	28-Jul-2005	-420	-22	30.785
15	03-Jun-2004	10-Nov-2005	-525	145	34.265
16	21-Oct-2004	30-Dec-2004	-70	-176	31.988
20	21-Oct-2004	10-Nov-2005	-385	2	28.586
21	30-Dec-2004	03-Feb-2005	-35	-617	76.837
22	30-Dec-2004	14-Apr-2005	-105	-225	31.952
32	14-Apr-2005	28-Jul-2005	-105	238	33.015
34	14-Apr-2005	15-Dec-2005	-245	51	34.735
36	28-Jul-2005	01-Sep-2005	-35	344	32.792
37	28-Jul-2005	10-Nov-2005	-105	166	28.021
38	28-Jul-2005	15-Dec-2005	-140	-186	35.371
39	01-Sep-2005	10-Nov-2005	-70	-177	25.687
42	10-Nov-2005	15-Dec-2005	-35	-353	47.297
44	15-Dec-2005	23-Feb-2006	-70	-400	52.023
45	23-Feb-2006	08-Jun-2006	-105	-182	48.741
52	08-Jun-2006	19-Apr-2007	-315	261	40.283
53	08-Feb-2007	19-Apr-2007	-70	74	44.077
57	19-Apr-2007	28-Feb-2008	-315	-173	39.840

A táblázat utolsó oszlopa az interferogramok egyfajta statisztikai jellemzőjét, a fáziszaj szórásértékét mutatja. Ez a mennyiség egy-egy interferogramon belül a (6) szerint térben valamint a merőleges bázisvonalal nem korrelált fáziszajt jelent. Ökölszabály szerint a 80° feletti átlagos szórásérték ($1.4 \text{ rad} \rightarrow 6.2 \text{ mm}$) diszkontinuitásokhoz vezethet a fáziskicsomagolás során. A 2. táblázat szerint egyedül a 21. számú interferogram esetén közelíti meg az átlagos fáziszaj szórása a 80° -ot, de a rövid időbeli bázisvonal miatt ezt a felvétel is felhasználásra került a fáziskicsomagolás és a deformációk meghatározása során.

5.5 Deformációk meghatározása, mozgássebességek

A fáziskibontás után az interferogramokból kialakított SB hálózatnak megfelelően a kicsomagolt fázis értékek műhold irányú elmozdulássá invertálhatók. Az N db. felvételtől képzett M db. interferogram alapján a mester felvételre vonatkozóan meghatározhatók a deformációk (Berardino et al. 2002):

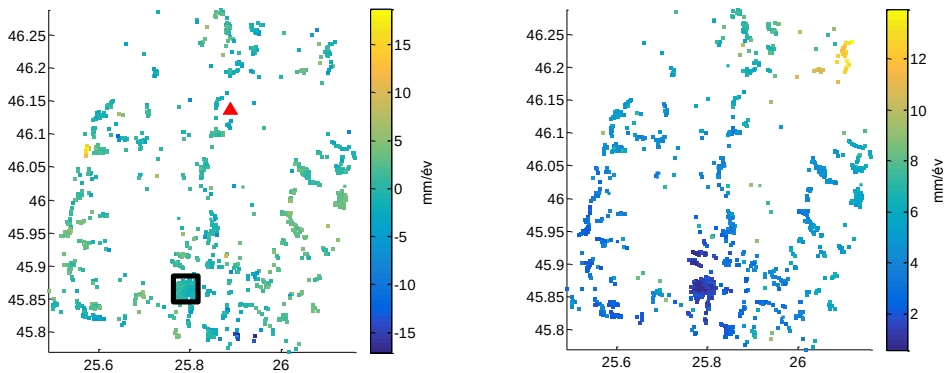
$$A_{(M,N)}\Phi_{(N,1)} = \delta\Phi_{(1,M)} \quad (7)$$

ahol $\Phi = [\phi(t_1) \dots \phi(t_N)]^T$ a deformáció ismeretlen fázisértéke a $t_n, n = 1, \dots, N$ időpontban; $\delta\Phi = [\delta\phi_1 \dots \delta\phi_M], i = 1, \dots, M$ a kicsomagolt interferogramok alapján meghatározott fáziskülönbségek és az A alakmátrix az SB hálózat alapján felírható szomszédsági mátrix. Például $\delta\phi_i(a, r) = \phi_j(a, r) - \phi_k(a, r)$ az i -edik SB interferogramon az (a, r) pixel fáziskülönbsége a j . és k . felvételtől számítva. A kiegyenlített fázisértékek a leképező eszköz hullámhossza alapján (3) alapján műhold irányú deformációkká transzformálhatók.

A SB műholdradar interferometria módszere az 1D-s geodéziai (szintezési) hálózatok kiegyenlítéséhez hasonló, kétszeresen relatív módszer (Marinkovic et al. 2008). Míg a szintezés a térben meghatározott magasság különbségek időbeli változását vizsgálja a deformációk leírása szempontjából (tér majd idő szerinti differencia), addig a radarinterferometria egy pixel fázisértékének időbeli változását hasonlítja ugyanazon felvétel másik pixelének idősorához (idő szerinti majd térbeli különbségképzés). Az SB hálózatban a választott referencia (mester) felvétel és a többi felvétel fáziskülön-

ségből előállíthatók a felvételek időpontjai között bekövetkezett műhold irányú elmozdulások, amelyekből valamilyen modell – a legegyszerűbb a lineáris modell – szerint meghatározhatók az elmozdulási sebességek (11. ábra).

A fáziskicsomagolási hibáknak megfelelően a kiugróan nagy sebességértékek izolált pontokban, pontcsoportokban jelentkeznek, a meghatározott sebességek több, mint 90 %-a $[-5, 5]$ mm tartományba esik. Mivel az InSAR kétszeresen relatív módszer (az időbeli megköötést a mester felvétel megválasztása adja), a pixel sebességek egy feldolgozási területen belül egymáshoz képest értelmezendők. Az eredmények interpretációját segítő a sebességeket Kézdivásárhely (11. ábra fekete téglalap) sebességértékeihez viszonyítottuk zérusnak választva az utóbbit. Választásunk azért esett Kézdivásárhelyre, mert itt található a legkoherensebb pontcsoport a vizsgált területen. A terület alsó részén a sebességek egységes képet mutatnak, néhány mm/év értékkel. Ezek a közel zérus sebesség értékek megközelítőleg egybeesnek a sebességek szórásértékeivel. A Csomád vulkánon és környezeteiben nem sikerült kellő számú olyan alacsony fáziszajú pixelt találni, ami alapján vizsgálható lenne a vulkán esetleges deformációja a magmakamra térfogatváltozása következtében.



11. ábra. Bal oldal: Műhold irányú sebességek lineáris sebességmodell alapján. A háromszög a Csomád vulkán, a téglalap Kézdivásárhely elhelyezkedését jelöli. Jobb oldal: műhold irányú sebességek szórásai. Pontok száma: 1010 db.

6 Összefoglalás és kitekintés

Ebben a tanulmányban kísérletet tettünk arra, hogy a műholdradar interferometria módszerét alkalmazzuk a felszíni deformációk térképezésére egy tektonikailag aktív, de kis deformációkkal jellemezhető területen. A vizsgált terület, a Belső Kárpát-kanyar, jelenkori felszín deformációi kevésbé ismertek, a korábban végzett GNSS mérési kampányok nem eredményeztek konzisztens sebességtereket. Ezért a radar interferometria, mint a GNSS észlelésektől független mérési technika hozzájárulhat a felszín deformációk irányának és amplitúdójának tisztázásához. A radar interferometria további előnye, hogy a műhold és felvételi geometria következtében leginkább a vertikális irányú deformációkra érzékeny, amelyet GNSS mérésekkel kisebb pontossággal lehet detektálni.

Tanulmányunk előzetes eredmények tekinthető, mely további vizsgálatokkal és SAR adatokkal kiegészítve vethető össze korábbi geodéziai mérések eredményeivel, szem előtt tartva a meghatározott sebességeknek a módszer jellegéből adódó kritikai értékelését. A le- és felszálló műholdirányú sebességek együttes meghatározása teszi lehetővé a deformációk kvázi 3D-s (vertikális és KNY-i irányú, a technika az ÉD-i irányú összetevőre kevésbé érzékeny) meghatározását (Bányai et al. 2017). A rendelkezésre álló felszálló irányú felvételek feldolgozása még inkább kihívás, mivel ugyanazon időtartamra vonatkozóan kisebb számban (24 db.) állnak rendelkezésre. Kis amplitúdójú deformációknál, a meghatározott sebességértékek nagyobb megbízhatósága érdekében az atmoszféra hatásának valamely külső meteorológiai modell alapú kvantitatív becslése kívánatos. Ezen a területen ígéretes kezdeményezések indultak el (Bekaert et al. 2015), azonban a jelenleg elérhető modellek térbeli és

időbeli felbontása nem felel meg a SAR felvételekhez szükséges korrekciók meghatározásának követelményeinek.

Vizsgálataink rámutattak arra, hogy természetes szórópontokra alapozva az ilyen mértékben fedett területeken még a legújabb elméleteken alapuló eljárások sem biztos, hogy eredményesen használhatók kis amplitúdójú deformációk detektálásában. Az MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézetben ESA pályázat keretében kifejlesztés alatt álló mesterséges szórópontok megoldást jelenthetnek erre a problémára. A Sentinel-1 műhold paraméterei figyelembe vételével méretezett reflektorok a stabil kialakítású geodinamikai pontjelekkel együttesen a deformációk nagy megbízhatóságú meghatározását fogják lehetővé tenni a jövőben. A terepbejárás, a potenciális geodinamikai ponthelyek kiválasztása megtörtént, a terület tulajdonosaival való egyeztetések után a mesterséges pontjelek telepítésre kerülnek. A mesterséges szórópontok használata mellett az ESA új radarinterferometriai missziója is segíteni fogja a hosszú időállandójú tektonikai folyamatok megfigyelését. A 2014-ben indult és 2016-ban teljessé vált Sentinel-1 misszió előzetes eredményei azt mutatják (Zhenhong et al. 2016), hogy a felvételek nagy időbeli felbontása, a műholdpálya kontrollja (néhány 10 m-es hosszúságú bázisvonalak) mind segítik a felvételek közötti koherencia megmaradását így megfelelő hosszúságú adatsor esetén a felszíni deformációk idősor elemzésen alapuló meghatározását.

Köszönetnyilvánítás. A tanulmányban felhasznált Envisat felvételeket az Európai Űrügynökség (ESA) CAT-1 30142. sz. pályázat keretében biztosította.

Hivatkozások

- Agram PS** (2010): Persistent scatterer interferometry in natural terrain. Ph.D. thesis, Stanford University.
- Bányai L, Szűcs E, Wesztergom V** (2017): Geometric features of LOS data derived by SAR PSI technologies and the three-dimensional data fusion. *Acta Geod. et. Geoph.*, 52(3), 421-436.
- Bányai L, Szűcs E, Kalmár J, Eperné PI, Bán D** (2014): Az InSAR technológia alapjai és a reflektáló felületek jellemzői. *Geomatikai Közlemények*, 17, 59-68.
- Bekaert DPS, Walters RJ, Wright TJ, Hooper AJ, Parker DJ** (2015): Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques, *Remote Sensing of Environment*, 170, 40-47.
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R, Sansosti E** (2002): A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40 (11), 2375-2383.
- Chen CW** (2001): Statistical-cost network-flow approaches to two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry, Ph.D. thesis, Stanford University.
- Elliott JR, Walters RJ, Wright TJ** (2016): The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes. *NATURE COMMUNICATIONS*, 7:13844, DOI: 10.1038/ncomms13844.
- Emardson TR, Simons M, Webb FH** (2003): Neutral atmospheric delay in interferometric synthetic aperture radar applications: Statistical description and mitigation. *Journal Of Geophysical Research-Solid Earth*, 108 (B5).
- Goldstein RM, Werner CL** (1998): Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25(21), 4035-4038.
- Ferretti A, Prati C, Rocca F** (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 8-20.
- Ferretti A, Fumagalli A, Novati F, Prati C, Rocca F, Rucci A** (2011): A new algorithm for processing interferometric data-stacks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9), 3460-3470.
- Ferretti A** (2014): Satellite InSAR data. EAGE Publications bv.
- Hanssen R** (2001) *Radar Interferometry: Data interpretation and error analysis*. Springer Science & Business Media, 2001.
- Harangi S, Novák A, Kiss B, Seghedi I, Lukács R, Szarka L, Wesztergom V, Metwaly M, Gribovski K** (2015): Combined magnetotelluric and petrologic constrains for the nature of the magma storage system beneath the Late Pleistocene Ciomadul volcano (SE Carpathians). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 290, 82-96.
- Hooper A, Zebker H, Segall P, Kampes B** (2004): A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31 (23), 5, doi:10.1029/2004GL021737.
- Hooper A** (2006): Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcano deformation, Ph.D. thesis, Stanford University.
- Hooper A, Segall P, Zebker H** (2007): Persistent scatterer InSAR for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos. *Journal of Geophysical Research*, 112 (B07407), 19.
- Hooper A** (2008): A multi-temporal InSAR approach combining both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L16302.
- Hooper A** (2009): A Statistical-Cost Approach to Unwrapping the Phase of InSAR Time Series. *Fringe 2009, Proceedings of the workshop Held 30 November - 4 December 2009, in Frascati, Italy*. Edited by H. Lacoste. ESA-SP Vol. 677. ISBN: 978-92-9221-241-4, 2010, id.59.
- Hooper A, Bekaert D, Spaans K, Arikan M** (2012): Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514-517, 1-13.

- Ismail-Zadeh A, Matenco L, Radulian M, Cloetingh S, Panza G** (2012): Geodynamics and intermediate-depth seismicity in Vrancea (the south-eastern Carpathians): Current state-of-the art. *Tectonophysics*, 530–531, 50–79.
- Marinkovic P, Ketelaar G, Van Leijen F, Hanssen R** (2008): InSAR quality control: Analysis of five years of corner reflector time series. In *Proc. of FRINGE 2007 Workshop*, Frascati, Italy, 26 – 30 November 2007, ESA SP-649.
- Popa M, Radulian M, Szakács A, Seghedi I, Zaharia B** (2012): New Seismic and Tomography Data in the Southern Part of the Harghita Mountains (Romania, Southeastern Carpathians): Connection with Recent Volcanic Activity. *Pure and Applied Geophysics*, 169(9), 1557-1573.
- Rees WG** (2013): *Physical principles of remote sensing*. Cambridge University Press.
- Schmitt G; Nuckelt A, Knöpfner A, Marcu C** (2007): Three dimensional plate kinematics in Romania. *International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation* Oct. 4–6, 2007, Bucharest, Romania.
- van der Hoeven AGA, Mocanu V, Spakman W, Nutto M, Nuckelt A, Matenco L, Munteanu L, Marcu C, Ambrosius BAC** (2005): Observation of present-day tectonic motions in the Southeastern Carpathians: Results of the ISES/CRC-461 GPS measurements *Earth and Planetary Science Letters*, 239, 177–184.
- Zhenhong L, Wrigh T, Hooper A, Crippa P, Gonzalez P, Walters R, Elliott J, Ebmeie S, Hatton E, Parsons B** (2016): Towards Insar Everywhere, all the Time, with SENTINEL-1. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B4, 763-766.

GEODÉZIAI DÁTUMTRANSZFORMÁCIÓ KETTŐS KVATERNIÓVAL

Papp Erik*



Geodetic datum transformation by dual quaternion – The 3D similarity transformation is frequently used to convert coordinates between global (e.g. WGS84) and local reference systems using a set of control points known in both systems. In this paper, the application of dual quaternions is presented for geodetic datum transformation in case of Bursa-Wolf seven parameter similarity transformation model. The transformation consist of three translation parameters, three rotation elements and one scale factor. A closed-form solution of datum transformation is proposed. In this solution, Clifford dual-number quaternions are used to represent the 3D rotation. Once the transformation parameters between the two datums are established by identical point pairs, the rotation matrix, the scale parameter and the translation vector are simultaneously derived. The proposed algorithm seems better then the iterative algorithms. Most importantly, in contrast to unit quaternion based algorithms, the presented algorithm solves seven unknown parameters simultaneously without the initial estimates of unknowns. The main advantage of this algorithm is that it can be applied in case of arbitrary size rotations. Consequently the mathematical modelling of similarity transformation based on dual quaternions is an elegant method which is adaptable to present a compact formula for Bursa-Wolf model. The last part is devoted to practical applications of the dual quaternions with case studies of transformations of GPS and LiDAR measurements.

Keywords: similarity transformation, rigid body transformation, Clifford dual quaternions, datum transformation



A térbeli hasonlósági transzformáció gyakran alkalmazott eljárás globális és helyi geodéziai dátumok közötti átszámításra, a mindkét rendszerben ismert közös pontok koordinátáinak felhasználásával. Ebben a dolgozatban bemutatjuk a kettős kvaternió alkalmazását a geodéziai dátumtranszformáció számításakor a Bursa-Wolf hétparaméteres hasonlósági transzformációs modell esetében. A transzformáció három eltolás, három elforgatás paraméter és egy méretarány meghatározásából áll. Dátumtranszformációhoz zárt képletek alkalmazását javasoljuk. Clifford-féle kettős kvaterniót alkalmazunk a térbeli forgatás meghatározásához. Miután a két geodéziai dátum közötti kapcsolatot a közös pontpárokkal megteremtjük, a forgatási mátrix, a méretarány és az eltolás vektora szimultán meghatározható. A bemutatott algoritmus, jobb megoldást eredményez, mint az iterációs algoritmusok. A legfontosabb előnye a javasolt módszernek, összehasonlítva, az egységkvaternió alapú algoritmusokkal, hogy ezen algoritmussal hét ismeretlen paramétert szimultán határozhatunk meg az ismeretlenek előzetes értékeinek becslése nélkül, továbbá tetszőleges nagyságú szögelfordulások esetében is alkalmazható a transzformációs paraméterek számításához. Következésképpen belátható, hogy a kettős kvaternió felhasználásán alapuló matematikai modell egy elegáns matematikai módszer a forgatási és eltolási paraméterek meghatározásához, a Bursa-Wolf modell tömör leírásához. Az utolsó részben a kettős kvaternió gyakorlati alkalmazásával két számpéldát, GPS és LiDAR mérési eredmények transzformációját mutatjuk be.

Kulcsszavak: hasonlósági transzformáció, merev test transzformáció, Clifford-féle kettős kvaternió, dátumtranszformáció

1 Bevezetés

Térbeli (3D) koordináta transzformációval az egyik koordináta rendszerben kiválasztott pont koordinátáit határozzuk meg a másik koordináta rendszerben, azaz a forrás rendszerből a célrendszerbe

transzformáljuk. Ezt a matematikai eljárást főleg a geodéziában alkalmazzuk, de megtaláljuk a fotogrammetriában a térinformatikában továbbá a robottechnikában animációban és az orvostudományban egyaránt (Vaniček és Steeves 1996, Awange és Grafarend 2005). A térbeli adatokhoz helymeghatározó adatok kapcsolódnak, amelyeket koordinátákkal adunk meg. A koordináta rendszer alapja egy geodéziai dátum, amely meghatározza a Föld méretét és alakját, a koordináta rendszer kezdőpontját és tájékozását. A Föld térképezéséhez használjuk az előzőekben definiált koordináta rendszert. A geodéziai dátumok sokasága létezik, hiszen minden ország különböző, saját dátumot alkalmaz. Példaként említhetjük Magyarországot, ahol geodéziai dátumtranszformációt használunk az Egységes Országos Vetület (EOV) és Gauss – Krüger (GK) rendszerben adott alaphálózati pontok koordinátáinak WGS84 rendszerbe történő transzformálásához (kitűzéshez), továbbá fordított irányú átszámításhoz (beméréshez).

A hasonlósági transzformáció esetén a méretarány minden irányban azonos értékű. A hétparaméteres hasonlósági transzformációt elterjedten alkalmazzák dátumtranszformációhoz, egyszerűsége, hatékonysága, egyedisége és szabatosága miatt. A transzformáció három eltolás, egy méretarány és három forgatási paraméter meghatározásából áll. Következésképpen a koordináták az egyik koordináta rendszerből egy másik koordináta rendszerbe transzformálhatók a koordinátarendszer kezdőpontjának eltolásával, elforgatások alkalmazásával és a méretarány megváltoztatásával. A gyakorlatban a hét transzformációs paraméter nem minden esetben ismert. Azonban, ha a közös pontok koordinátái mindkét koordináta rendszerben adottak, a transzformációs paraméterek a fentiek szerint meghatározhatók. Három közös pont elegendő a transzformációs paraméterek meghatározásához. Néhány népszerű hétparaméteres hasonlósági transzformációs modell használatos a gyakorlatban, mint a Bursa-Wolf, vagy ismertebb nevén a Helmert-féle transzformáció, amellyel jelen tanulmányban foglalkozunk vagy a Molodensky-Badekas, (Molodensky et al. 1962). A hasonlósági transzformációs modellt gyakran egyszerűsítik, linearizálják a paraméterek könnyebb kiszámítása céljából. A létező hétparaméteres modellek megoldása a hagyományos algoritmusok felhasználásával a forgásszögek meghatározásán alapul. A múlt század kilencvenes éveitől a forgásszögeket kvaterniókkal helyettesítik, az új modell kettős kvaternión alapul.

Sir William Rowan Hamilton (1805-1865) 1843-ban vezette be a kvaterniókat egy 3D vektor ábrázolására. A kvaternió alkalmas a forgatás egységsugarú gömbön történő leírására. William Kingdom Clifford (1845-1879) tovább fejlesztette a kvaterniót, a tizenkilencedik században vezette be a kettős kvaterniót és alkalmazta a merev test transzformációjához (Clifford 1873, 1882). Nagyon közeli kapcsolat van a kettős kvaternió és a klasszikus térbeli kinematikában használatos ún. Chasles elmélet között (Chasles 1830, Murray et al. 1994). A Chasles elmélet szerint bármely merev test transzformációja leírható csavarmozgásként, azaz egy tengely körüli forgatással és tengely irányú eltolással. Tehát a kettős kvaternió megfelelő az elforgatás és az eltolás leírására. Következésképpen a létező megoldások két csoportba sorolhatók, nevezetesen iterációs módszerek és zárt képletek alkalmazása. Iterációs módszer általában forgatási mátrixot használ merev test transzformációjához, a kezdő értékek közelítő ismerete szükséges a linearizáláshoz, amely gyakran hibát eredményez a számítások során. Ezzel szemben a zárt képletek alkalmazása esetén szükségtelen a kezdeti értékek közelítő ismerete, ezért ez a módszer napjainkban az érdeklődés középpontjába került. Legfontosabb előnye a zárt képletek alkalmazásán alapuló módszernek, hogy a lehető legjobb transzformációt biztosítja egy lépésben.

Ebben a dolgozatban bemutatjuk a dátum transzformáció megoldását kettős kvaternióval.

2 Dátumtranszformáció kvaternióval

A Hamilton-féle kvaternió megfelelő módszer a forgatás egységsugarú gömbön történő leírására Hamilton (1844, 1853). Miután Horn sikeresen alkalmazta a kvaterniót a térbeli tájékozáshoz - 144 évvel annak felfedezése után - Horn (1987), a forgatási mátrix tömör leírása továbbá az eljárás hatékonysága a módszer a figyelem középpontjába állította. Jelenleg a kvaterniókat sikeresen alkalmazzák a szilárd test mozgásának elemzéséhez (Joseph és Javiola 2003, Kim és Golnaraghi 2004) és geodéziai dátumtranszformációhoz (Yang 1999, Shen et al. 2006, Zeng és Yi. 2011). Ám, ha a térben

egységkvaterniót használunk a forgatás leírásához, hét transzformációs paramétert kell kiszámítanunk, először a forgatásokat, majd a méretarányt és végül az eltolásokat. Walker bevezette a kettős kvaterniókat a hasonlósági transzformáció megoldásához. Egyetlen képlet alkalmazásával a kettős kvaternió valós és kettős részének felhasználásával kifejezhető a forgatás és az eltolás, lehetővé téve a hat paraméter egyidejű számítását, azaz a három forgás szögét és a három eltolási paramétert (Walker et al. 1991, Prosková 2011, 2012). Hasonló megoldást mutatott be Daniilidis (1999). Azonban sem Walker et al. (1991), sem Daniilidis (1999), sem Vaníček et al. (2002) nem vette figyelembe a méretarányt a transzformáció során.

3 Kettős kvaternió

A kettős kvaternió tulajdonképpen a kvaternió matematika és a duális számelmélet (dual number theory) összeláncolása (concatenation). Amíg egy kvaternió négy skalár értékből áll, addig a kettős kvaternió nyolcból. Kettős kvaternió nyolc valós számból álló összetett adatszerkezetként vagy két közönséges kvaternió szorzataként értelmezhető. Wang et al. (2014) tanulmányában alkalmazott jelölésrendszer, továbbá az (1)-(6) egyenletek felhasználásával a kettős kvaternió az alábbi formában adható meg

$$\hat{q} = \hat{r} + \varepsilon \hat{s} \quad (1)$$

ahol az $\hat{r}$ és $\hat{s}$ mindkettő valódi kvaternió, ezeket valós és duális résznek nevezzük, ε a kettős művelet jele (dual operator). A kettős kvaternió a valódi kvaterniókhoz hasonlóan értelmezhető

$$\hat{q} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\hat{\theta}}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\hat{\theta}}{2}\right) \hat{n} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

ahol $\hat{n}$ kettős vektor egy térbeli 3D egyenest jelöl amely körül a koordináta rendszer elforgatásra, illetve amely irányába eltolásra kerül, $\hat{\theta}$ az elforgatás és eltolás kettős szögét jelöli. Az $\hat{n}$ kettős vektor az elforgatás és eltolás $\hat{\theta}$ kettős szöge az alábbiak szerint adható meg:

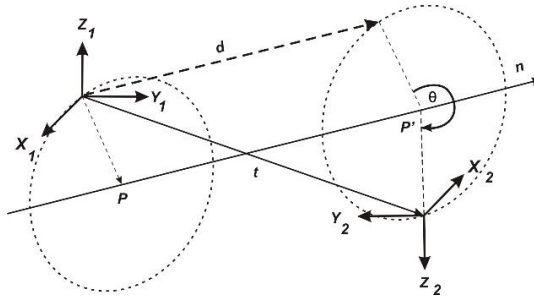
$$\hat{n} = \mathbf{n} + \varepsilon \mathbf{p} \times \mathbf{n}, \quad (3)$$

$$\hat{\theta} = \theta + \varepsilon d, \quad (4)$$

ahol $\mathbf{n}$ egy olyan egységvektor, amely meghatározza a forgatás tengelyét és az eltolás irányát. Az egyenes θ szöggel kerül elforgatásra a P ponton átmenő $\mathbf{n}$ vektor irányában és d távolságra kerül eltolásra az $\mathbf{n}$ vektor által meghatározott irányban. Összehasonlítva az egység kvaterniót a kettős kvaternióval, ugyanaz a transzformáció hajtható végre, először eltolva az eredeti koordináta rendszert d távolságra az $\mathbf{n}$ vektor irányában, majd elforgatva azt θ szöggel.

A (3) és (4) egyenletet behelyettesítve a (2) egyenletbe az alábbi egyenleteket kapjuk (1. ábra):

$$\hat{r} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \mathbf{n} \end{bmatrix}, \quad (5)$$



1.ábra. Elforgatás és eltolás kettős kvaternióval Wang et al. (2014) 65. oldal ábra alapján

$$\dot{s} = \begin{bmatrix} -\frac{d}{2} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \frac{d}{2} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \mathbf{n} + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \mathbf{p} \times \mathbf{n} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Az egység kvaternióhoz hasonlóan definiálható az egység kettős kvaternió. Következésképpen bármely kettős kvaternió megszorozva egység kettős kvaternióval, annak értéke változatlan marad. Egység kettős kvaternió meghatározásakor az első skalár értéke 1, a többi hét skalár értéke 0.

$$\mathbf{q} = [1 \ 0 \ 0 \ 0][0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (7)$$

Forgatás és eltolás értékekből egység kettős kvaternió az (1) egyenlet alapján a következők szerint definiálható:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{q}} &= \dot{\mathbf{r}} + \varepsilon \dot{\mathbf{s}} \\ \dot{\mathbf{s}} &= \frac{1}{2} \mathbf{t}^T \dot{\mathbf{r}} \end{aligned} \quad (8)$$

Az $\dot{\mathbf{r}}$ a forgatást leíró egység kvaternió és $\mathbf{t}$ az eltolást leíró kvaternió, melynek elemei

$$\dot{\mathbf{r}} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) & n_x \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) & n_y \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) & n_z \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{bmatrix} \quad \text{és} \quad \dot{\mathbf{s}} = [0 \ t_x \ t_y \ t_z], \quad (9)$$

ahol $\mathbf{n} = (n_x \ n_y \ n_z)$ a forgatás tengelye, θ a forgatás szöge és t_x, t_y, t_z jelöli az eltolás koordinátatengely irányú értékeit. A forgatás és eltolás kettős kvaternióval a (7), (8) és (9) egyenletek alapján:

$$\hat{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) & n_x \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) & n_y \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) & n_z \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \frac{t_x}{2} & \frac{t_y}{2} & \frac{t_z}{2} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

A kettős kvaternió az eddig elmondottak alapján nyolc elemből áll, azonban egy 3D objektum transzformálásához hat független változó szükséges, következésképpen a kettős kvaternió nyolc eleméből kettő nem független. Amint az a (11) és (12) egyenletekből látható, a kettős kvaternió elemeinek az alábbi két kényszerfeltételt kell kielégíteniük:

$$\dot{\mathbf{r}}^T \dot{\mathbf{r}} = 1, \quad (11)$$

$$\dot{\mathbf{r}}^T \dot{\mathbf{s}} = 0. \quad (12)$$

Megjegyezzük, hogy a kettős kvaterniók az eltolásvektor felével „dolgoznak”, hasonlóan a klasszikus kvaterniókhoz, amelyek a forgásszög felével „dolgoznak”.

4 Dátumtranszformáció kettős kvaternióval

Kettős kvaternió alkalmazásával a Bursa-Wolf hasonlósági transzformációs modell a következők szerint írható fel

$$F(\mu, \mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^N \|\mu \mathbf{R} \mathbf{b}_i + \mathbf{t} - \mathbf{a}_i\|, \quad (13)$$

ahol a közös pontokat leíró helymeghatározó kvaterniók

$$\dot{\mathbf{a}}_i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{a}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{b}}_i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{b}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

a két különböző rendszerben adott közös pontok 3D koordinátáit tartalmazzák, az $N(N \geq 3)$ egész szám a közös pontok száma, $\mathbf{t} = (t_X \ t_Y \ t_Z)^T$ jelöli a három eltolás paramétert, μ a méretarány tényező és az $\mathbf{R}$ a forgatási mátrix. Az (5) és (9) egyenlet alapján a kettős kvaternió valós része a teljes forgatás eljárását megadja, amelyhez tartozó forgatási mátrix az alábbiak szerint írható fel

$$\mathbf{R} = (\mathbf{r}_0^2 - \mathbf{r}^T \mathbf{r}) \mathbf{I} + 2(\mathbf{r} \mathbf{r}^T + r_0 \mathbf{K}(\mathbf{r})), \quad (15)$$

ahol az $\dot{\mathbf{r}}^T = [r_0 \ \mathbf{r}] = [r_0 \ r_1 \ r_2 \ r_3]$ a forgatást leíró kvaternió, $\mathbf{I}$ egy 3×3 egységmátrix és a $\mathbf{K}(\mathbf{r})$ 3×3 ferdén szimmetrikus mátrix a következő alakú

$$\mathbf{K}(\mathbf{r}) = \begin{bmatrix} 0 & -r_3 & r_2 \\ r_3 & 0 & -r_1 \\ -r_2 & r_1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

A (15) egyenletben szereplő $\mathbf{R}$ forgatási mátrix felírható a kettős kvaternió elemeivel

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \mathbf{R} \end{bmatrix} = \mathbf{W}(\dot{\mathbf{r}})^T \mathbf{Q}(\dot{\mathbf{r}}), \quad (17)$$

ahol

$$\mathbf{W}(\dot{\mathbf{r}}) = \begin{bmatrix} r_0 & -\mathbf{r}^T \\ \mathbf{r} & r_0 \mathbf{I} - \mathbf{K}(\mathbf{r}) \end{bmatrix} \quad \text{és} \quad \mathbf{Q}(\dot{\mathbf{r}}) = \begin{bmatrix} r_0 & -\mathbf{r}^T \\ \mathbf{r} & r_0 \mathbf{I} + \mathbf{K}(\mathbf{r}) \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Az eltolás $\mathbf{t}$ vektora úgyszintén kifejezhető kettős kvaternióval

$$\dot{\mathbf{t}} = \mathbf{W}(\dot{\mathbf{r}})^T \dot{\mathbf{s}}, \quad (19)$$

ahol

$$\dot{\mathbf{t}}^T = \frac{1}{2} [0 \ \mathbf{t}^T]. \quad (20)$$

Az eddigiek alapján a dátumtranszformáció kettős kvaternióval történő megoldása a következő formában adható meg

$$\dot{\mathbf{a}}_i = \mathbf{W}(\dot{\mathbf{r}})^T \dot{\mathbf{s}} + \mu \mathbf{W}(\dot{\mathbf{r}})^T \mathbf{Q}(\dot{\mathbf{r}}) \dot{\mathbf{b}}_i. \quad (21)$$

A (13) egyenlet újra felírható az $\dot{r}$ és $\dot{s}$ kvaterniók kvadratikus függvényként. A részletes levezetés megtalálható Wang et al. (2014) munkájában.

$$\mathbf{F} = \mu \dot{r}^T \mathbf{C}_1 \dot{r} + N \dot{s}^T \dot{s} + \mu \dot{s}^T \mathbf{C}_2 \dot{r} + \dot{s}^T \mathbf{C}_3 \dot{r} + \mu^2 \mathbf{C}_4 + \mathbf{C}_5, \quad (22)$$

ahol a $\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \mathbf{C}_3$ mátrixok továbbá a $\mathbf{C}_4, \mathbf{C}_5$ konstans értékei a következő egyenletekből számíthatók:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_1 &= -2 \sum_{i=1}^N \mathbf{Q}(\dot{a}_i)^T \mathbf{W}(\dot{b}_i), \\ \mathbf{C}_2 &= 2 \sum_{i=1}^N \mathbf{W}(\dot{b}_i), \\ \mathbf{C}_3 &= -2 \sum_{i=1}^N \mathbf{Q}(\dot{a}_i), \\ \mathbf{C}_4 &= \sum_{i=1}^N (\mathbf{a}_i^T \mathbf{a}_i), \\ \mathbf{C}_5 &= \sum_{i=1}^N (\mathbf{b}_i^T \mathbf{b}_i). \end{aligned} \quad (23)$$

A kényszereket tartalmazó (11) és (12) egyenletek felhasználásával a legjobb kettős kvaternió, amely megadja a forgatást a következő hiba függvény minimalizálásával számítható

$$\mathbf{F} = \mu \dot{r}^T \mathbf{C}_1 \dot{r} + N \dot{s}^T \dot{s} + \mu \dot{s}^T \mathbf{C}_2 \dot{r} + \dot{s}^T \mathbf{C}_3 \dot{r} + \mu^2 \mathbf{C}_4 + \mathbf{C}_5 + \lambda_1 (\dot{r}^T \dot{r} - 1) + \lambda_2 (\dot{s}^T \dot{s} - 1), \quad (24)$$

amely függvényben a λ_1 és λ_2 jelöli a Lagrange-féle multiplikátorokat. A részletes levezetés elhagyásával a következő egyenleteket kapjuk (Wang et al. 2014):

Az $\dot{s}$ kettős kvaternió az $\dot{r}$ függvényében az alábbiak szerint számítható:

$$\dot{s} = -\frac{1}{2N} (\mu \mathbf{C}_2 \dot{r} + \mathbf{C}_3 \dot{r}). \quad (25)$$

A μ méretarány szintén meghatározható az $\dot{r}$ és $\dot{s}$ függvényeként

$$\mu = -\frac{\dot{r}^T \mathbf{C}_1 \dot{r} - \left(\frac{1}{2N} \dot{r}^T \mathbf{C}_2^T \mathbf{C}_2 \dot{r} + \frac{1}{2N} \dot{r}^T \mathbf{C}_3^T \mathbf{C}_2 \dot{r} \right)}{2\mathbf{C}_4}. \quad (26)$$

Az $\mathbf{r}$ kvaternió az alábbi $\mathbf{A}$ mátrix maximális sajátértékéhez tartozó sajátvektoraként számítható

$$\mathbf{A} = \frac{1}{N} \mathbf{C}_2^T \mathbf{C}_3 - (\mathbf{C}_1 + \mathbf{C}_1^T). \quad (27)$$

A kettős kvaternió alkalmazásán alapuló dátum transzformációs algoritmus megoldása végezetül az alábbiak szerint foglалható össze:

- 1) Input adatok a mindkét rendszerben adott N darab közös pont $\mathbf{a}_i$ és $\mathbf{b}_i$ koordinátái, $i = 1, \dots, N$.
- 2) A súlypontra vonatkozó $\Delta \mathbf{a}_i, \Delta \mathbf{b}_i$ koordináták számítása (28) egyenlet.

$$\Delta \mathbf{a}_i = \mathbf{a}_i - \mathbf{a}_0, \quad \Delta \mathbf{b}_i = \mathbf{b}_i - \mathbf{b}_0, \quad (28)$$

$$\text{ahol } \mathbf{a}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{a}_i, \quad \mathbf{b}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{b}_i.$$

- 3) Az $\mathbf{A}$ mátrix számítása a $\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2$ és $\mathbf{C}_3$ mátrixok valamint a C_4 és C_5 konstansok felhasználásával (23) egyenlet. Ezek után számítjuk az $\mathbf{A}$ mátrix maximális sajátértékét, és a hozzá tartozó sajátvektort. Eredményként az $\dot{r}$ forgatást leíró egység kvaterniót kapjuk.
- 4) Ezután a μ méretarány (26) egyenlet és az $\dot{s}$ eltolást leíró kvaternió számítása következik, (25) egyenlet.
- 5) Végül az $\mathbf{R}$ forgatási mátrixot, (15) vagy (17) egyenlet, a forgásszögeket (29) egyenlet, és a $\mathbf{t}$ eltolás paramétert számítjuk (19) egyenlet.

A forgásszögek, az $\mathbf{R}$ forgatási mátrix elemeiből számíthatók

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad \alpha_X = \arctan\left(\frac{r_{23}}{r_{33}}\right), \quad \beta_Y = \arcsin(-r_{13}), \quad \gamma_Z = \arctan\left(\frac{r_{12}}{r_{11}}\right), \quad (29)$$

ahol α, β és γ az X, Y és Z tengelyek körüli forgásszögeket jelölik.

Mivel súlyponti koordináta rendszerben végezzük a számításokat az $\mathbf{a}_0, \mathbf{b}_0$ súlypont koordináták felhasználásával a $\mathbf{t}$ eltolás paraméter értékét a (30) egyenlet alapján is kiszámíthatjuk.

$$\mathbf{a}_0 = \mathbf{t} + \mu \mathbf{R} \Delta \mathbf{b}_0, \quad (30)$$

$$\mathbf{t} = \mathbf{a}_0 - \mu \mathbf{R} \Delta \mathbf{b}_0. \quad (31)$$

Behelyettesítve a (19) egyenletbe a (31) egyenletet, rendezés után az $\dot{s}$ kvaternió a (25) egyenlet helyett egyszerűbben is számítható

$$\dot{t} = \mathbf{W}(\dot{r})^T \dot{s} \rightarrow \dot{s} = \dot{t} \left[\mathbf{W}(\dot{r})^T \right]^{-1T}. \quad (32)$$

5 TH2 program

A Térbeli Helmert transzformáció kettős kvaternióval történő megoldására (TH2) az alábbiakban ismertetett *J nyelvű* programot készítettem, amely Windows 32 és 64 bites platformon egyaránt futtatható. A program fájlból történő betöltése után először transzformációs paramétereket határozunk meg. A program a számításokat és az eredmények listázását 20 számjegy pontossággal végzi.

5.1 Ismert transzformációs paraméterek

Ismert transzformációs paraméterek esetén a program a t_X, t_Y, t_Z eltolás értékeket, az $\dot{r}$ kvaternió r_0, r_1, r_2, r_3 elemeinek értékeit és a μ méretarányt kéri.

5.2 Ismeretlen transzformációs paraméterek

Ismeretlen transzformációs paraméterek esetén, a mindkét rendszerben adott, forrás- és célkoordinátákat tartalmazó **FKJ** és **CKJ** közös pontok koordinátáit tartalmazó fájlok betöltése után, a program kiszámítja a transzformációs paramétereket. Az $\dot{r}$ kvaternió r_0, r_1, r_2, r_3 elemeinek a μ méretarány értékének, az α, β, γ elforgatások és a t_X, t_Y, t_Z eltolás értékek meghatározását végzi a program. Ezek után a maradék ellentmondások számítása következik. A program a közös pontok alapján meghatározott transzformációs paraméterek felhasználásával, a forrás rendszerbeli közös pontokat a cél rendszerbe transzformálja. A célrendszerben adott és a transzformált koordináták különbségeként számítja az e_x, e_y, e_z maradék ellentmondások három összetevőjét, továbbá ezek felhasználásával, térbeli

Pitagorasz-tétellel az e maradék ellentmondás vektort, amely a transzformált pont és az eredeti pont-hely térbeli távolsága. A két rendszer illeszkedésének jellemzésére a program kiszámítja az m_0 súlyegység középhibáját az

$$m_0 = \sqrt{\frac{\sum(e_x^2 + e_y^2 + e_z^2)}{3N - 7}} \quad (33)$$

összefüggés alapján, ahol N a mindkét rendszerben adott közös pontok számát jelöli.

5.3 Térbeli Helmert transzformáció

Az átszámítandó pontokat tartalmazó **KJ** koordináta jegyzék fájl beolvasása után a program a forrás rendszerben adott pontok $[x \ y \ z]$ koordinátáit az $[X \ Y \ Z]$ célrendszerbe transzformálja.

Abból a célból, hogy bemutassuk a (15), (17), (19), (23), (25) és (26) összefüggések érvényességét megismételtük Grafarend és Awange (2003) továbbá Wang et al. (2014) számításait. Az eredmények teljes egyezést mutatnak úgy a transzformációs paraméterek, mind a transzformált koordináták és maradék ellentmondások tekintetében (1. és 2. melléklet).

6 Összefoglalás

Egy merev test 3D térbeli transzformációja, különösen a térbeli tájékozás fontos és kritikus feladat a geodéziában, fotogrammetriában, navigációban, a lézerszkennerek és LiDAR mérések feldolgozásában, robotkar manipulálásában, az animációban, többek között. Jelenleg a térbeli forgatások meghatározásának legnépszerűbb módszere a forgatási mátrix, Euler szögek, Rodrigues formula és kvaterniók alkalmazása. A forgatási mátrix újranormalizálása nehézkes, az Euler szögek alkalmazása szingularitásokhoz vezet és a Rodrigues képlet alkalmazása sem valószínűsíthető meg egy egyszerű számítási algoritmussal. Kvaterniók alkalmazása látszik megfelelőnek a 3D forgatás leírásához kevés számú paraméterrel. Egységkvaterniót alkalmazva a térbeli forgatás leírására, hét transzformációs paramétert kell meghatároznunk, nevezetesen először a három forgásszöget, ezután a méretarány paramétert, és végül a három eltolás vektort.

A dolgozatban ismertetett módszer kettős kvaterniót alkalmaz a térbeli forgatási mátrix és az eltolásvektor meghatározásához. Ismerteti a kettős kvaternió alapú geodéziái dátumtranszformáció megoldását linearizálással a Bursa-Wolf dátum-transzformációs modellben. Zárt képlet felhasználásával, a kettős kvaternió valós és duális részének meghatározásával számítottuk az elforgatást az eltolást és a méretarányt, azaz hét ismeretlen transzformációs paraméter értékét szimultán határoztuk meg. Bemutattuk a feladat megoldásához felhasznált módszert, és egyenleteket. Az eljárás hatékonyságát és alkalmazhatóságát 7 közös pont esetében helyi és WGS84 koordináta rendszerek közötti, továbbá 18 közös pont esetén szomszédos LiDAR álláspontok közötti transzformáción teszteltük. A számítások azt mutatják, hogy a kettős kvaternió gyors és megbízható eredményt ad. Ennek az algoritmusnak a legnagyobb előnye, hogy tetszőleges nagyságú szögelfordulások esetében is alkalmazható a transzformációs paraméterek számításához. A bemutatott megoldás eredményeként az i kvaternió r_0, r_1, r_2, r_3 elemeit egy valódi szimmetrikus mátrix sajátvektorához tartozó maximális sajátértékének meghatározásával számítjuk.

Befejezésként megállapíthatjuk, hogy a kettős kvaternió felhasználásán alapuló algoritmus alkalmas a hasonlósági transzformáció paramétereinek számításához. A bemutatott megoldás egy új választható módszer a hasonlósági transzformáció rövid leírására.

Hivatkozások

- Awange JL, Grafarend EW** (2005): Solving Algebraic Computational Problems in Geodesy and Geoinformatics, The answer to modern Challenges. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Chasles M** (1830): Note sur les propriétés du système de deux corps semblables entr'eux et placés d'une manière quelconque dans l'espace; et sur le déplacement fini ou infiniment petit d'un corps solide libre. Bull. Sci. Math. Astron. Phys. Chim., 14(XIV), 321-326.
- Clifford WK** (1873): Preliminary sketch of biquaternions. Proc. London Math. Soc., 4, 381-395.
- Clifford WK** (1882): Mathematical Papers. Macmillan, London.
- Daniilidis K** (1999): Hand-eye calibration using dual quaternions. Int. J. Robotics Res., 18(3), 286-298.
- Grafarend EW, Awange LJ** (2003): Nonlinear analysis of the three-dimensional datum transformation [conformal group C7(3)]. J. Geod., 77, 66-76.
- Hamilton WR** (1844): On quaternions, or on a new system of imaginaries algebra. Phil. Mag., 25(3), 489-495.
- Hamilton WR** (1853): Lectures on quaternions: containing a systematic statement of a New mathematical method. Hodges and Smith, Dublin.
- Horn BKP** (1987): Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. J. Opt. Soc. Am. A, 4(4), 629-642.
- Joseph J, Javiola J** (2003): A comparison of unscented and extended Kalman filtering for estimating quaternions motion. IEEE Press, 3, 2435-2440.
- Kim A, Golnaraghi MF** (2004): A quaternion-based orientation estimation algorithm using an internal measurement unit. IEEE Position Location Navigation Symp., 268-272.
- Molodenskij MS, Jeremejev BF, Yurkina MI** (1962): Methods for study of the external gravitational field and figure of the earth. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem (translated from Russian original, Moscow, 1960).
- Murray RM, Sastry SS, Zexiang L** (1994): A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. CRC Press, USA, ISBN 0-849-37981-4.
- Prosková J** (2011): Application of dual quaternions algorithms for geodetic datum transformation. J. Appl. Math., 4(2), 225-236.
- Prosková J** (2012): Discovery of dual quaternions for geodesy. J. Geometry Graphics, 16(2), 195-209.
- Shen YZ, Chen Y, Zheng DH** (2006): A quaternion-based geodetic datum transformation algorithm. J. Geod., 80, 233-239.
- Vaniček P, Steeves RR** (1996): Transformation of coordinates between two horizontal geodetic datums. J. Geod., 70, 740-745.
- Vaniček P, Novák P, Craymer MR, Pagiatakis S** (2002): On the correct determination of transformation parameters of a horizontal geodetic datum. Geomatica, 56(4), 329-340.
- Walker MV, Shao L, Volz RA** (1991): Estimating 3-D location parameters using dual number quaternions. CVGIP: Image Understanding, 54(3), 358-367.
- Wang YB, Wang YJ, Wu K, Yang HC, Zhang H** (2014): A dual quaternion-based, closed-form pairwise registration algorithm for point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 94, 63-69.
- Yang Y** (1999): Robust estimation of geodetic datum transformation. J. Geod., 73, 268-274.
- Zeng H, Yi Q** (2011): Quaternion-Based Iterative Solution of Three-Dimensional Coordinate Transformation Problem. J. Computers, 6(7), 1361-1368.

1. Melléklet. Grafarend 7 pontos példa

```

=====
                                Térbeli HELMERT transzformáció
                                kettős kvaternióval
                                Közös pontok
PSZ          Forrás rendszer [x y z] -> TRANSZFORMÁCIÓ -> Cél rendszer [X Y Z]
=====

                                KOORDINÁTA JEGYZÉK
Solitude    4157222.543  664789.307  4774952.099  4157870.237  664818.678  4775416.524
Bouch Zeil   4149043.336  688836.443  4778632.188  4149691.049  688865.785  4779096.588
Hohenneuffen 4172803.511  690340.078  4758129.701  4173451.354  690369.375  4758594.075
Kuehlenberg  4177148.376  642997.635  4760764.800  4177796.064  643026.700  4761228.899
Ex Mergelaec 4137012.190  671808.029  4791128.215  4137659.549  671837.337  4791592.531
Ex Hof Asperg 4146292.729  666952.887  4783859.856  4146940.228  666982.151  4784324.099
Ex Kaisersbach 4138759.902  702670.738  4785552.196  4139407.506  702700.227  4786016.645
                                n = 7 közös pont
=====

                                Transzformációs paraméterek
                                Eltolás      Elforgatás      Méretarány
641.88042527390644  0  0  0.998497670868  1.0000055825198519
68.65534545190167  0  0  0.893695764500
416.39818478003144  0  0  0.993087729859
=====

                                MARADÉK ELLENTMONDÁSOK [mm]
PSZ          ex          ey          ez          e
Solitude    94          135          140          216
Bouch Zeil   59          50          14          78
Hohenneuffen 40          88          8          97
Kuehlenberg 20          22          87          92
Ex Mergelaec 92          14          5          93
Ex Hof Asperg 12          7          55          56
Ex Kaisersbach 29          4          2          30
=====

                                Súlyegység középhibája: m0 = 0.077233660859330686
=====

q = r + Es kettős kvaternió
r          s
r0 = 0.9999999999182676000 s0 = 0.00020124595950307916
r1 = 0.00000242043187210221 s1 = 320.93984423488138000000
r2 = 0.00000216637384015948 s2 = 34.32639618885393400000
r3 = 0.00000240731783343567 s3 = 208.19987075258805000000
=====

```

2. Melléklet. LiDAR 18 pontos példa

Térbeli HELMERT transzformáció						
kettős kvaternióval						
Közös pontok						
PSZ	Forrás rendszer [x y z] -> TRANSZFORMÁCIÓ ->			Cél rendszer [X Y Z]		
=====						
KOORDINÁTA JEGYZÉK						
1	49.007	54.453	0.978	91.406	53.344	8.320
2	47.365	54.435	6.242	91.297	53.222	0.916
3	36.514	13.733	3.642	60.158	24.280	8.948
4	34.881	13.859	3.608	60.135	24.278	1.521
5	53.378	25.872	4.187	56.298	19.186	5.700
6	7.324	32.695	1.389	13.269	2.677	1.444
7	9.587	19.650	2.449	4.666	17.245	1.605
8	36.532	0.319	21.980	49.939	14.297	27.119
9	39.932	1.307	19.965	52.769	11.523	25.906
10	67.051	8.834	15.017	72.929	8.630	27.146
11	54.124	40.688	13.216	46.500	30.291	23.078
12	51.943	30.962	3.965	52.581	22.934	5.676
13	57.712	23.376	8.397	58.972	17.511	18.862
14	59.650	32.625	12.037	55.429	26.155	23.077
15	59.512	32.705	12.071	55.313	26.131	23.039
16	41.466	18.246	21.085	63.467	27.962	26.981
17	39.133	10.234	20.247	57.673	22.069	25.782
18	29.781	0.026	8.062	49.687	14.083	3.666
n = 18 közös pont						
=====						
Transzformációs paraméterek						
Eltolás		Elforgatás		Méterarány		
22.96560847319915	7	10	3.072626208203	1.0003854423961862		
29.39624821133687	10	20	46.316865945584			
2.26519536504265	30	10	38.975171224272			
=====						
MARADÉK ELLENTMONDÁSOK [mm]						
PSZ	ex	ey	ez	e		
1	14	7	1	16		
2	14	14	1	20		
3	11	9	10	17		
4	10	5	1	11		
5	32	21	5	39		
6	3	32	9	33		
7	17	33	12	39		
8	1	1	5	6		
9	65	39	6	76		
10	12	35	47	60		
11	9	17	42	46		
12	30	18	17	39		
13	19	60	14	64		
14	19	62	57	86		
15	66	39	14	78		
16	14	1	0	14		
17	10	57	21	61		
18	50	19	13	55		
=====						
Súlyegység középhibája: m0 = 0.030147998487098711						
=====						
q = r + Es kettős kvaternió						
r				s		
r0 =	0.96117777583452280000	s0 =	1.64956472764118560000			
r1 =	0.03668139078696396700	s1 =	14.87689913731836300000			
r2 =	0.10309160306701531000	s2 =	11.17730288943721600000			
r3 =	0.25330590239630596000	s3 =	0.44399465910073477000			
=====						