

A geodéziai, geodinamikai és atmoszféra
kutatások a műholdas helymeghatározásban

Doktori értekezés tézisei

Rózsa Szabolcs

2021.

Budapest

I. Bevezetés

A geodézia tudománya a XX. század második felében hatalmas fejlődésen ment keresztül, mivel az űrkorszak beköszönte rámutatott arra, hogy Földünk alakjának, nehézségi erőterének pontos ismerete és egy egységes globális geodéziai vonatkoztatási rendszer létrehozása elengedhetetlenül szükségesek a műholdak pályáinak pontos meghatározásához. A pontos pályameghatározás tette lehetővé a műholdas helymeghatározó rendszerek (GNSS) kialakulását, amelyek egyúttal egy új mérési technológiát adtak a geodéták kezébe. Ma már bárhol a Földön képesek vagyunk cm vagy akár mm pontos koordinátákat is meghatározni.

A GNSS helymeghatározás azonban nem csak a geodézia fejlődéséhez járul hozzá. A nagy távolságokon is pontosan meghatározott koordinátakülönbségek lehetővé tették, hogy olyan jelenkori tektonikai folyamatokat is vizsgálhassunk geodéziai módszerekkel, amelyeket korábban csak geológiai/geofizikai módszerekkel tehetünk meg. A helymeghatározást terhelő szabályos hibák elemzésével pedig további értékes információkat nyerhetünk a légkör állapotáról, a talaj nedvességtartalmáról vagy éppen felszíni vizeink vízszintjéről, hullámvásárlásáról.

Ki kell azonban hangsúlyozni, hogy a geodézia tudománya nem csak új eredményekkel, mérési technikákkal gazdagítja a társtudományokat, hanem épít ezek eredményeire is. Egységes globális vonatkoztatási rendszert nem alkothatnánk a litoszféra-lemezek mozgásainak ismerete nélkül, de a szélsőpontosságú helymeghatározás vagy éppen az életbiztonságra kritikus GNSS alkalmazások sem valósulhatnak meg a jelterjedést befolyásoló légköri hatások pontos modellezése nélkül.

Ennek köszönhetően a műholdas helymeghatározásban rejlő lehetőségek kihasználása a mérnöki- és a természettudományi ágak együttműködését igényli. Kutatásaimat ez az interdiszciplináris megközelítés vezérelte.

II. A kutatás célkitűzései

Tudományos fokozatomat (PhD) 2003-ban szereztem a Föld nehézségi erőterének modellezése, azon belül a geoid finomszerkezetének a meghatározása céljából végzett kutatásaim eredményeiből. Már ez a témakör is kapcsolódott a műholdas helymeghatározás alkalmazásaihoz, hiszen a GNSS-szel meghatározott ellipszoid feletti magasságokat az egyre pontosabb geoidmodellek vagy kvázigeoid modellek segítségével tudjuk átszámítani fizikai jelentéssel bíró ortométeres, illetőleg normálmagassággá. A fokozatszerzést követően a műholdas helymeghatározás szélső pontossági igényű felhasználási területeivel kezdtem el foglalkozni, majd azt kezdtem vizsgálni, hogy a helymeghatározást terhelő szabályos hibák milyen információtartalommal bírnak a társtudományok számára.

Értekezésemben két területen végzett vizsgálataimat mutatom be. Egyrésztől tektonikai lemezen belüli felszínmozgásokat mutattam ki GNSS helymeghatározás és hagyományos geodéziai mérések segítségével a Felső Rajna-árok területén. Vizsgálataim kiterjedtek a kampány jellegű és a koordinátaidősorokon alapuló eljárások összehasonlítására, azok korlátainak vizsgálatára és a kismértékű elmozdulások kimutatása szempontjából igen jelentős szabályos hiba, a GNSS antennák fáziscentrum külpontosságának és ingadozásának a vizsgálatára.

A műhold-vevő távolságokat terhelő szabályos hibák további elemzése során figyelmem a troposzférikus késleltetések meghatározására és ennek meteorológiai információtartalmára

összpontosult. A légköri vízpára okozta késleltetések nagy pontossággal meghatározhatóak permanens GNSS állomások méréseiből. Mivel a késleltetés mértéke szoros összefüggésben áll a légkör integrált vízgőztartalmával, így a műholdas helymeghatározó mérésekkel nagy térbeli és időbeli felbontással adhatunk az integrált vízgőztartalomra vonatkozó becsléseket. Különbéféle empirikus modellek meghatározásával és ezek pontosságvizsgálatának elvégzésével kifejlesztettem egy közel valósidejű GNSS adatfeldolgozási eljárást, amellyel Közép-Európa területén optimális módon határozhatjuk meg a légköri integrált vízgőztartalom értékét GNSS mérésekből.

A troposzférikus késleltetések tanulmányozása során arra a következtetésre jutottam, hogy a meteorológiai paraméterek szezonális változásainak finomabb modellezésével a semleges légkör késleltető hatása pontosabban írható le, ami különösen fontos lehet az életbiztonságra kritikus alkalmazások esetén. Értekezésemben egy új eljárást mutatok be, amellyel globális értelemben is, az éghajlati és szezonális hatások figyelembevételével megadható a troposzférikus hibák legnagyobb értéke egy adott szignifikanciaszint mellett.

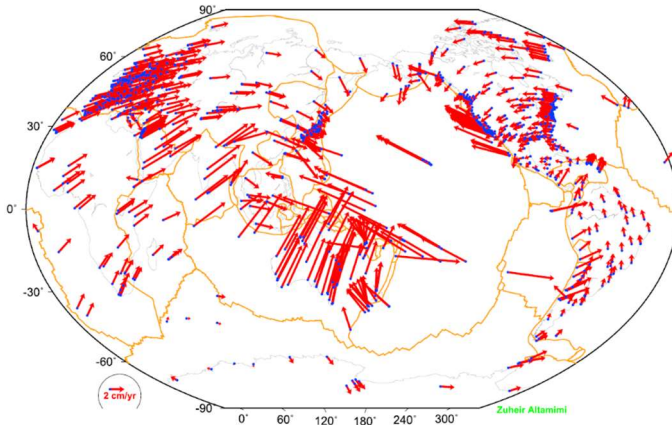
Értekezésemben tudományos eredményeimet három fejezetben tárgyalom, amelyek mindegyike egy-egy tézisnek felel meg. E tézisfüzetben is hasonló tagolást alkalmazok. A következő fejezetekben az egyes témakörökhöz tartozó új tudományos eredményeimet foglalom össze.

III. A műholdas helymeghatározás a jelenkori kéregmozgások meghatározásában

A jelenkori kéregmozgások meghatározására már évtizedek óta használunk geodéziai módszereket, azonban ezek a vizsgálatok –

méréstechnikai okokból – döntően a felszín vertikális értelmű elmozdulásaira irányultak. A műholdas helymeghatározás elterjedése tette lehetővé, hogy a tektonikai lemezek vízszintes értelmű elmozdulási irányának és elfordulásának éves mértékét is meg tudjuk határozni geodéziai úton. A Nemzetközi Geodéziai Szövetség különböző szolgálatait által fenntartott globális kooperáció a műholdakra végzett lézeres távmérés (ILRS), a hosszú bázisvonalú interferometria (IVS), a doppleres műholdas helymeghatározás (IDS) és a műholdas navigációs rendszerek (IGS) területén tette azt lehetővé, hogy ma már Földünkön 975 pontban ismerjük a tektonikai lemezek elmozdulásainak mértékét az ITRF 2014 vonatkoztatási keretrendszerben (Altamimi és mtsai., 2016).

Mint azt a III-1. ábrán is láthatjuk, az elmozdulások mértéke cm-es, dm-es nagyságrendű. A korábbi ITRF megoldások sebességmezőit hozzájárultak ahhoz, hogy új tektonikai lemezeket azonosíthassunk, így a korábban ismert 14 nagyobb tektonikai lemez helyett a 2011-ben



III-1. ábra Az ITRF2014 állomások sebességmezője (Altamimi és mtsai., 2016)

publikált NNR-MORVEL56 modell már 56 tektonikai egységet tartalmaz (Argus és mtsai., 2011).

Geodinamikával foglalkozó kutatásaim a nagy tektonikai lemezeken belüli deformációk és tektonikai folyamatok műholdas helymeghatározással és más geodéziai módszerekkel történő vizsgálatára fókuszáltak a Felső Rajna-árok területén. A tektonikai lemezeken belüli deformációk és felszínmozgások sajátossága, hogy mértékük jelentősen kisebb a nagy tektonikai lemezek elmozdulásainál, emiatt a szabályos hibákat is pontosabban kell modellezni annak érdekében, hogy azok hatása ne fedje el a kimutatandó elmozdulásokat.

Értekezésemben a Felső Rajna-árok területének jelenkori felszínmozgásait és az abból levezethető deformációmezőt határoztam meg 1999-2003 között végrehajtott kampány jellegű GPS mérések, felsőrendű színtezések és permanens GNSS állomások idősorainak elemzésével. Vizsgálataim alapján az alábbi új tudományos eredményeket adom meg.

1. tézis:

Megalkottam a Felső Rajna-árok GNSS mérések szélső pontosságú feldolgozására alapozott kinematikus modelljét, amelyet Freiburg térségében felsőrendű színtezésekből levezetett elmozdulásmezővel pontosítottam.

A tézishoz kapcsolódó publikációk: Rózsa és mtsai. (2005a); Rózsa, és mtsai. (2005b), Amalvici és mtsai. (2006), Cloetingh és mtsai. (2006)

Kampány jellegű műholdas helymeghatározó mérésekből megállapítottam, hogy a Felső Rajna-árokban és környezetében a relatív vízszintes értelmű elmozdulások nagyságrendje nem haladja meg az

1 mm/év értéket, majd ezt közel 20 éves GNSS koordináta idősorok alapján tovább pontosítottam (III-2. ábra). Eredményeim alapján a Fekete-erdő és a Vogézek relatív értelemben mindössze 0,2 mm/év nagyságú balos eltolódást mutat. A Rajna-Bresse Átmeneti Zónában a GNSS adatok alapján kimutatható jobbos eltolódás jellegű elmozdulások nagysága 0,7 mm/év. A GNSS koordináta idősorokból levezetett deformációmező jó összhangot mutat az Afrikai-lemez ütközése által dominált nyugat-Európai feszültségmezővel és egyben azt is megmutatja, hogy a Felső Rajna-árok területén jelenleg kontrakció figyelhető meg.

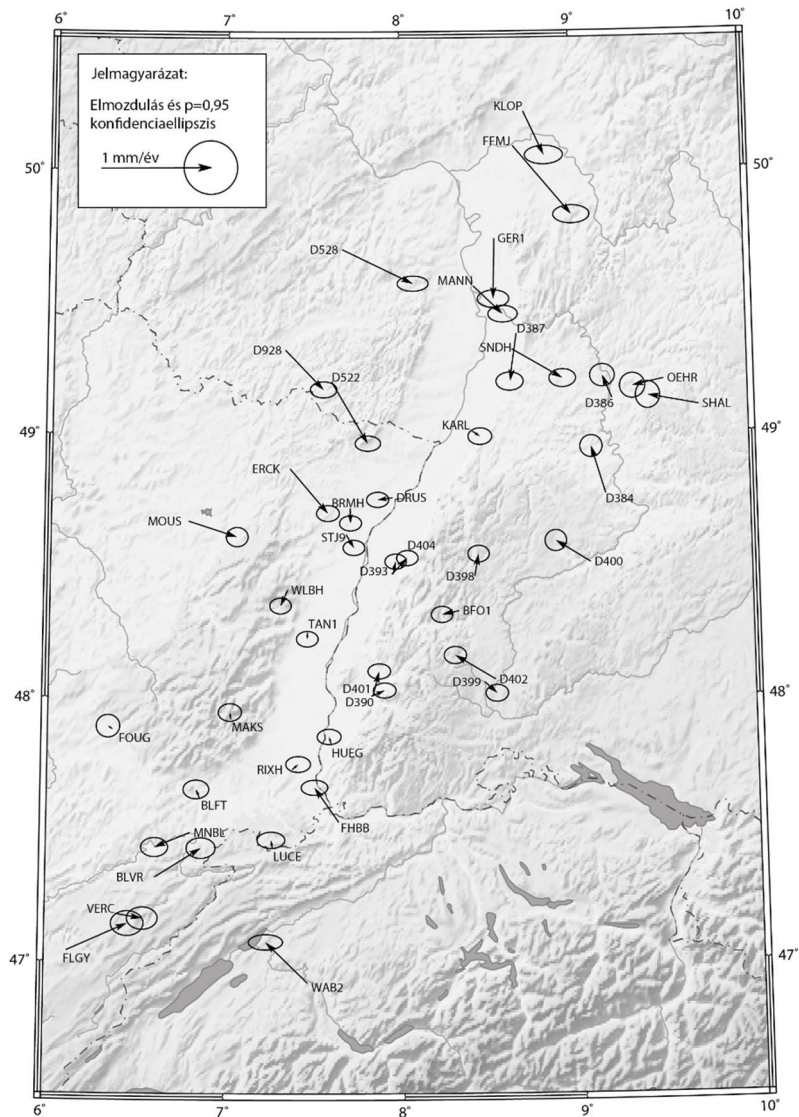
A GNSS mérésekből azonban szignifikáns magassági értelmű elmozdulásokat még a helyenként 20 évet is meghaladó hosszúságú koordináta idősorok alapján sem sikerült megállapítani. Ezért Freiburg térségében – ahol a 2000-es évek elején a Lehen-Schönberg vetőn fokozott szeizmikus aktivitást tapasztaltak (Behrmann és mtsai., 2003), felsőrendű szintezési vonalak méréseit felhasználva vizsgáltam meg a vertikális elmozdulások kimutathatóságának lehetőségeit. Vizsgálataim eredményeit a következő tézisben foglalom össze.

1.1 altézis:

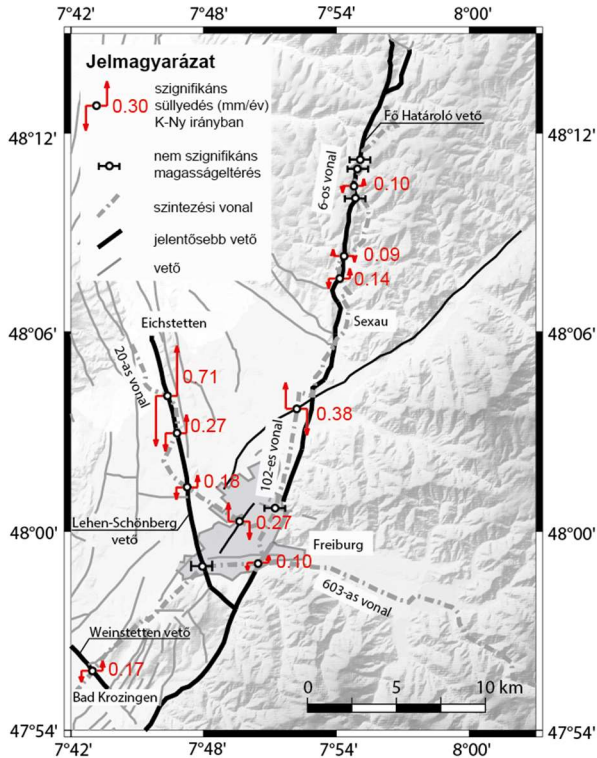
Eljárást fejlesztettem ki az ismételt mért szintezési vonalakban meghatározott magasságkülönbségek és a mérési időszak alatt kialakuló felszínmozgások kapcsolatának meghatározására és a felszínmozgások mértékének becslésére.

A tézishez kapcsolódó publikáció: Rózsa és mtsai. (2005b)

Freiburg térségében négy, hálózatot nem alkotó szintezési vonal ismételt méréseit elemezve megállapítottam, hogy a Weinstetten-vető



III-2. ábra A GNSS koordináta-idősorok alapján becsült Eurázsiai lemezen belüli sebességmező a Felső Rajna-árokban és környezetében.



III-3. ábra Tektonikai okokra visszavezethető vertikális elmozdulások Freiburg térségében

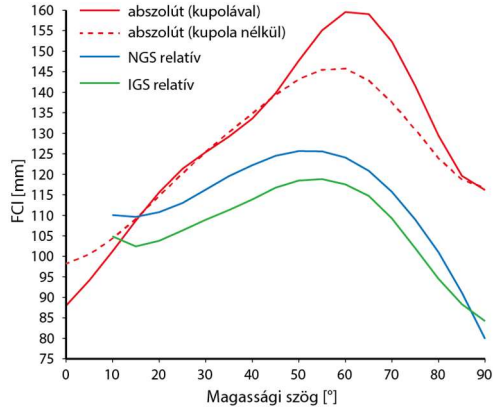
Bad Krozingennél 0,17 mm/éves, míg a Fő határoló vető Freiburg térségében átlagosan 0,05 mm/éves vertikális elmozdulást mutat (III-3. ábra). Ezzel szemben a Lehen-Schönberg vető mentén a vertikális elmozdulások mértéke a Fő határoló vetőtől észak felé haladva jelentősen nő, Eichstetten térségében elérték a 0,71 mm/éves értéket. A megnövekedett elmozdulás ráta jól egyezik a térség szeizmikus aktivitásával.

1.2. altézis:

Eljárást dolgoztam ki a kampány jellegű mérésekkel meghatározott geodinamikai hálózatokban a GNSS antennák fáziscentrum központosságának és ingadozásának szabatos figyelembe vételére.

A tézishez kapcsolódó publikációk: *Rózsa (2005); Rózsa és mtsai. (2005a); Rózsa és mtsai. (2005b)*

A tektonikai lemezeken belül kialakított, kampány jellegű GNSS mérésekkel meghatározott geodinamikai hálózatok egyik legjelentősebb szabályos hibája az antennák fáziscentrumának központosságából és annak ingadozásából ered. A hiba mértéke vízszintes értelemben jellemzően mm-es, míg vertikális értelemben akár cm-es nagyságrendű is lehet. Az EUCOR-URGENT GPS hálózatban végzett vizsgálataim alapján rámutattam, hogy a jelenleg is gyakran alkalmazott típuskalibrációk – legyenek azok relatív vagy abszolút módon meghatározva – jelentős maradék hibákkal terhelhetik a levezetett koordinátákat. Ennek elkerülésére kialakítottam egy olyan eljárást, amellyel az egyedi abszolút kalibrációval meghatározott fáziscentrum modellek konzisztens módon alkalmazhatók az NGS (National Geodetic Service) relatív fáziscentrum modelljeivel együtt. Ily módon a hosszú távú geodinamikai mérések során a mérőműszerek avulása miatti hardvercserék okozta koordinátaugrások hatása minimalizálható. Kampány jellegű mérések esetén ez a megoldás biztosítja hosszú távon a konzisztens helymeghatározási eredményeket, hiszen kampány jellegű mérések esetén nem alkalmazható a fáziscentrum modellek hibahatásainak a koordináta idősorokból történő meghatározása.



III-4. ábra. Abszolút és relatív fáziscentrum modellek ingadozása a TRM22020.00 antennán L3 lineáris kombinációra

	Észak	Kelet	Vertikális
KARL	1,6 (2,0)	0,5 (2,0)	37,9 (38,0)
KLOP	-4,5 (-4,0)	-1,0 (-2,0)	34,8 (34,4)

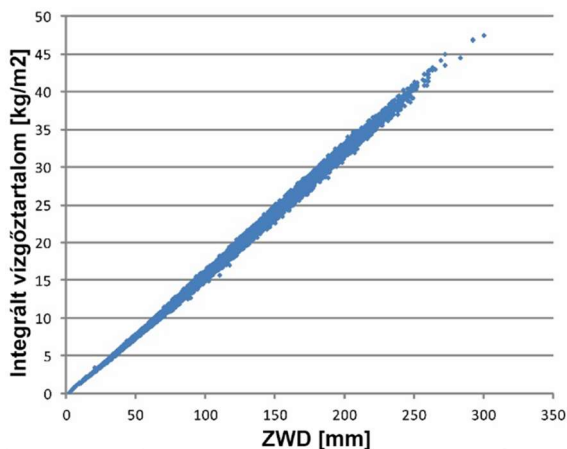
III-1. táblázat Egyedi abszolút kalibráció használata nélkül észleltetű látszólagos koordinátaváltozás KARL és KLOP állomásokon (mm). A zárójelben szereplő értékek az EPN idősorokban tapasztalt tényleges értékek.

Vizsgálataim kimutatták, hogy a permanens állomások időjárásvédő kupolái több cm-rel is megváltoztathatják a pontok észlelt magasságait (III-4. ábra és III-1. táblázat). Megállapítottam, hogy a típuskalibrációk alkalmazása vízszintes értelemben is több mm-es hibával terhelheti a GNSS technikával meghatározott koordinátákat.

Az egyedi kalibrálással meghatározott fáziscentrum modellek alkalmazására épülő eljárás lehetővé teszi azok konzisztens alkalmazását a korábban alkalmazott típuskalibrációkkal.

IV. A légköri vízgőztartalom meghatározása GNSS adatokból

A mikrohullámú távmérés elvén működő műholdas helymeghatározó rendszerek egyik jelentős szabályos hibája az elektromosan semleges légkör okozta késleltető hatás, amely zenit irányban átlagosan mintegy 2,5 m-es nagyságrendű jelkésleltetést okoz. Ennek mintegy 10%-a a légköri vízpára hatása. Permanens állomásokon végzett GNSS mérésekből a troposzférikus késleltetés mértéke néhány mm-es középhibával meghatározható, majd a teljes késleltetésből a hidrosztatikus egyensúlyban lévő légköri gázok hatását levonva



IV-1. ábra A troposzféra integrált vízgőztartalma és a nedves troposzférikus késleltetés összefüggése rádiószondás adatok alapján Budapesten (1994-2011)

kifejezhetjük az úgynevezett nedves késleltetés értékét. Utóbbi szoros kapcsolatban áll a légkör integrált vízgőztartalmával (IV-1. ábra).

A 2000-es évek elején az egykori Földmérési és Távérzékelési Intézet (ma Lechner Lajos Tudásközpont) Kozmikus Geodéziai Observatóriumának munkatársai hazánkban is kialakították az aktív permanens GNSS hálózatot, amelynek a BME Általános- és Felsőgeodézia tanszék által létrehozott és üzemeltetett BUTE EUREF permanens állomás is tagja (Ádám és mtsai., 2002).

Ez a hálózat tette lehetővé, hogy hazánkban a GNSS méréseken alapuló légköri vízgőztartalom meghatározását vizsgálni kezdjem és az éghajlatához illesztett empirikus modellek levezetésével olyan eljárást dolgozzak ki, amellyel meteorológiai célra optimalizált troposzférikus késleltetés és légköri integrált vízgőztartalom értékeket vezethessek le. Vizsgálataim alapján a következő téziseket fogalmazom meg.

2. tézis:

Eljárást fejlesztettem ki a légköri vízgőz GNSS távérzékeléssel történő meghatározására Közép-Európa éghajlatához illesztett empirikus modellek megadásával.

A tézishoz kapcsolódó publikációk: Rózsa, (2012, 2014b); Rózsa és mtsai., (2014); Rózsa és Kenyeres, (2014); Mile, Bölöni, Kucukkaraca és Rózsa, 2014; Mile, Benáček és Rózsa, 2019)

Kifejlesztettem a Közép-európai éghajlati viszonyokhoz illesztett eljárást, amellyel térségünkben a GNSS adatokból optimális módon becsülhetjük a légkörben található vízpára mennyiségét. Kialakítottam az eljárás alapján, közel valós idejű GNSS feldolgozó rendszert, amellyel óránként meghatározható minden egyes permanens állomáson a légköri oszlopban található vízpára mennyisége. (Rózsa és mtsai., 2014; Rózsa és Kenyeres, 2014).

A GNSS adatokból meghatározott troposzférikus késleltetés értékeit összehasonlítottam más nemzetközi feldolgozóközpontok eredményeivel és megállapítottam, hogy az általunk meghatározott értékek hasonló pontossággal illeszkednek a rádiószondás mérésekből számított troposzférikus késleltetésekhez, mint a többi vizsgált állomás értékei. Az eredmények statisztikai értékeléséhez levezettem a rádiószondás mérésekből származtatott troposzférikus késleltetések és az integrált vízgőztartalom pontossági mérőszámait.

2.1. altézis:

Eljárást alkottam a rádiószondás mérésekből levezetett zenitirányú hidrosztatikus és nedves késleltetés középhibájának meghatározására a szomszédos légrétegek közötti korrelációk figyelembevételével.

A tézishez kapcsolódó publikáció: (Rózsa, 2014b)

A GNSS alapú integrált vízgőztartalom-meghatározás pontosításához szükségessé vált a rádiószonda profilokból levezetett troposzférikus késleltetések középhibájának meghatározása. Megadtam, hogy a szomszédos légrétegek közötti korreláció figyelembevétele mellett a középhibák a (3-1) összefüggéssel számíthatók:

$$\Sigma_{ZHD} = \begin{bmatrix} \sigma_{ZHD_1}^2 & c_{12} & & & & & & \\ c_{12} & \sigma_{ZHD_2}^2 & c_{23} & & & & & \\ & c_{23} & \sigma_{ZHD_3}^2 & & & & & \\ & & & \cdot & & & & \\ & & & & \cdot & & & \\ & & & & & \cdot & & \\ & & & & & & \sigma_{ZHD_{n-1}}^2 & c_{n-1,n} \\ & & & & & & c_{n-1,n} & \sigma_{ZHD_n}^2 \end{bmatrix}, \quad (3-1)$$

ahol a $\sigma_{ZHD_i}^2$ és a $c_{i,i+1}$ varianciákat és kovarianciákat a következő összefüggésekkel határozhatjuk meg:

$$\sigma_{ZHD_i}^2 = \left[\left(\frac{h_i - h_{i-1}}{2} \right)^2 (\sigma_{NH_{i-1}}^2 + \sigma_{NH_i}^2) + 2 \left(\frac{NH_{i-1} + NH_i}{2} \right)^2 \sigma_h^2 \right] 10^{-12}, \text{ és} \quad (3-2)$$

$$c_{i,i+1} = \left[\left(\frac{\partial ZH}{\partial NH_i} \right)_i \left(\frac{\partial ZH}{\partial NH_i} \right)_{i+1} \sigma_{NH_i}^2 + \left(\frac{\partial ZHD_i}{\partial h_i} \right) \left(\frac{\partial ZHD_{i+1}}{\partial h_i} \right) \sigma_{h_i}^2 \right] 10^{-12}, \quad (3-3)$$

A (3-2) és (3-3) egyenletekben σ_h a magasságmérések középhibája. A nedves összetevőre hasonló összefüggéseket alkottam

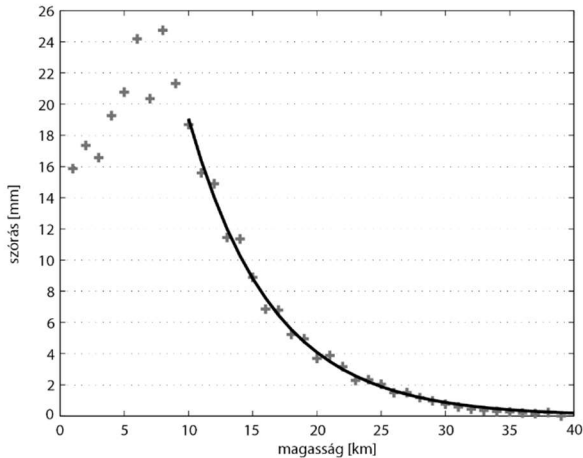
Rádiószondás mérésekből kimutattam, hogy a levezetett nedves késleltetések középhibája átlagosan mintegy háromszorosa a hidrosztatikus késleltetésekének és erős szezonális változásokat mutat. Értéke Budapesten a téli időszakban $\pm 0,5-1,0$ mm, míg nyáron 1,5-4,0 mm között változik.

A rádiószondák felhatolási magassága jelentősen befolyásolhatja a profilokból meghatározott zenitirányú hidrosztatikus késleltetés pontosságát (IV-2 ábra). Az eredmények szigorú statisztikai alapú értékelése érdekében a Közép-európai térségre meghatároztam egy empirikus összefüggést e csonkítási hatás leírására.

2.2. altézis:

Közép-európai rádiószondás mérések alapján empirikus modellt alkottam a rádiószondás profilokból levezetett hidrosztatikus késleltetések csonkítási hibájára vonatkozóan.

A tézishez kapcsolódó publikáció: (Rózsa, 2014b)



IV-2. ábra Rádiószonda profilokból és sztenderd atmoszféra modellekből számított hidrosztatikus késleltetések eltéréseinek szórása a magasság függvényében Budapesten.

Az összefüggés alapján a levezetett hidrosztatikus késleltetések középhibája 10 km-es magasság felett a következő összefüggéssel határozható meg:

$$\sigma_{ZHDcs} = 0.08921e^{-1.543 \cdot 10^{-4} H}, \quad (3-4)$$

ahol H a rádiószonda felhatolási magassága, σ_{ZHD} a csonkítási hibából eredő középhiba mértéke, e pedig az Euler-féle szám.

Az eredmények azt mutatják, hogy a ± 1 mm csonkítási középhibát Budapest felett 29 km-es magasságban érjük el, ami megközelítőleg 20hPa nyomásszintnek felel meg (IV-2. ábra).

2.3. altézis:

A Közép-európai térség éghajlatához illesztett eljárást fejlesztettem ki a teljes zenitirányú troposzférikus késleltetésből végzett integrált vízgőztartalom meghatározásra.

A tézishoz kapcsolódó publikáció: (Rózsa, 2014b)

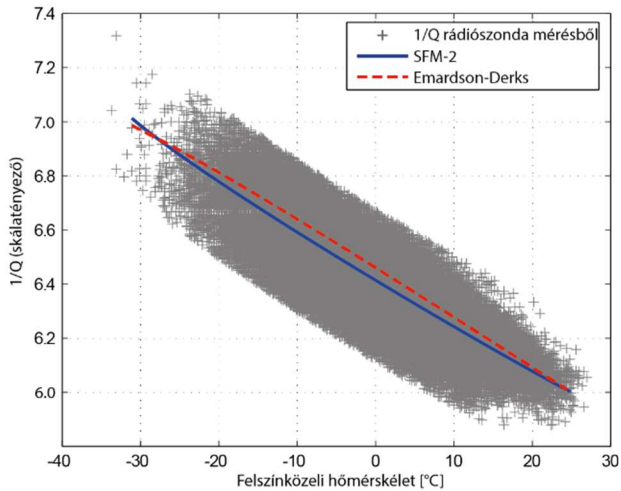
A légköri vízgőztartalom optimális becslése érdekében megvizsgáltam a különféle hidrosztatikus késleltetés modelleket valamint a nedves késleltetés és az integrált vízgőztartalom közötti arányossági tényező meghatározására szolgáló eljárásokat. Közép-európai rádiószondás profilok felhasználásával új, a térség éghajlatához illesztett hidrosztatikus késleltetés és skálatényező modelleket vezettem le (IV-3. ábra).

A levezetett modellek segítségével 1%-kal sikerült csökkenteni az integrált GNSS alapú vízgőztartalom becslés szabályos hibáját (offsetjét). Egyúttal kimutattam, hogy az integrált vízgőztartalom (IWV) és a zenitirányú nedves késleltetés (ZWD) közötti arányossági tényező meghatározására széles körben alkalmazott kétlépcsős eljárás az egylépcsős eljárással szemben szabályos hibával terheli a vízgőztartalom becsléseket (Rózsa, 2014b).

2.4. altézis:

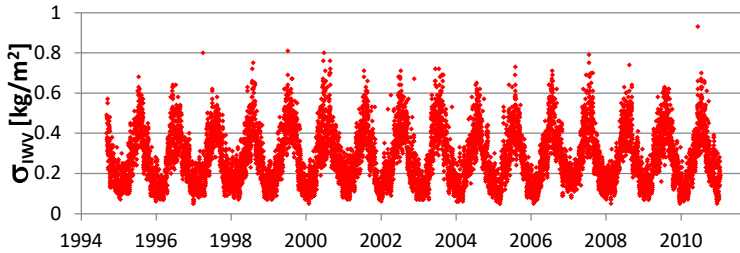
Levezettem a rádiószondás adatokból meghatározott integrált vízgőztartalom értékek középhibájának számításához szükséges összefüggéseket.

A tézishez kapcsolódó publikáció: (Rózsa, 2014b)



IV-3. ábra Az Emardson és Derks (2000) és az SFM-2 modell illeszkedése rádiószondás adatokhoz

A GNSS mérésekből meghatározott integrált vízgőztartalom értékek pontosságvizsgálatához és ellenőrzéséhez általában rádiószondás profilokból meghatározott referenciaértékeket használnak fel az irodalomban. Ugyanakkor ezen referenciaértékek középhibájáról kevés információ áll rendelkezésünkre. A WMO (World Meteorological Organization) nemzetközi összehasonlító kampányok eredményei alapján $\pm 0,65$ - $1,00 \text{ kg/m}^2$ közé tehetjük ezek pontosságát 35 kg/m^2 -es *IWV* érték felett (Nash és mtsai., 2011).



IV-4. ábra A rádiószondás észlelésekből levezetett integrált vízgőztartalom értékek középhibáinak alakulása Budapesten (1994-2011)

A levezetett összefüggésekkel megállapítottam, hogy budapesti rádiószondás adatokból meghatározott IWV értékek a priori középhibája $\pm 0,1$ - $\pm 0,8$ kg/m² között változik éves szinten (IV-4. ábra). Az eredmény jó összhangot mutat a WMO összehasonlító kampányok során kapott eredményekkel.

2.5. altézis:

Kialakítottam a troposzférikus késleltetések közel valósidejű becslésére szolgáló eljárást, erre építve megvalósítottam a troposzférikus késleltetéseket és integrált vízgőztartalom értékeket óránkénti időbeli felbontással meghatározó GNSS feldolgozórendszert.

A tézishoz kapcsolódó publikáció: (Rózsa, 2014b)

A GNSS adatokból levezetett integrált vízgőztartalom értékek középhibája akkor a legalacsonyabb, ha az állomások koordinátáit nem kell a műhold-vevő távolságokból becsülnünk, hanem azokat a korábbi napok észleléseiből származtatjuk. Megvizsgáltam, hogy mi az az optimális időtáv és koordináta-meghatározási stratégia, amely

alkalmazásával a levezetett *IWV* érték a legkisebb szabályos hibával terhelt. Eredményeim azt mutatták, hogy legalább 7-8 napos időszak mérései alapján kell az állomáskoordinátákat becsülni ennek érdekében.

Kialakítottam a közel valós idejű (egy órás látenciájú) GNSS adatfeldolgozó rendszert, amellyel óránként meghatározható minden permanens állomásra a teljes troposzférikus késleltetés értéke. Utóbbiból a 2.3. altézisben megfogalmazott eredményekre támaszkodva hazánkban meghatározható az integrált vízgőztartalom értéke is a Közép-európai éghajlati viszonyokhoz illesztett empirikus modellekkel. Az eredményeket SGOB analízis központként az EUMETNET GNSS Vízgőz Programjának (E-GVAP) keretében átadtuk meteorológiai felhasználók számára.

Különböző nemzetközi feldolgozóállomások eredményeit egymással és rádiószondás mérésekkel összevetve megállapítottam, hogy méréseink a közösen feldolgozott állomásokon $\pm 5-6$ mm-es szórással egyeznek meg a többi feldolgozó központ eredményeivel, illetve a rádiószondás mérésekből levezetett troposzférikus késleltetésekkel, ami megegyezik a vizsgált nemzetközi feldolgozóközpontok eredményeivel.

V. A navigációs helymeghatározásban alkalmazott troposzféra modellek továbbfejlesztése

A légkör és azon belül is a vízpára okozta jelkésleltető hatások tanulmányozásából született ismereteket és eredményeket a műholdas helymeghatározásban alkalmazott troposzféra modellek pontosítására is felhasználhatjuk. Az életbiztonságra nézve kritikus helymeghatározási alkalmazások köre nem csak nagy pontosságú, hanem nagy megbízhatóságú koordinátákat igényel, ami egyben azt is

jelenti, hogy a légköri jelkésleltető hatásokat is nagy pontosságú és nagy megbízhatóságú modellekkel kell leírnunk.

A légköri jelkésleltető hatások közül az ionoszféra okozta hatásokat a két, vagy ennél több frekvencián rendelkezésünkre álló ködmérésekből kialakított ionoszféra mentes lineáris kombinációval kiejthetjük. A troposzféra okozta késleltetések azonban nem függenek a vivő jel frekvenciájától, ezért azokat a műhold-vevő irány mentén a refraktivitás ismeretében vagy empirikus modellek alkalmazásával határozhatjuk meg. Előbbi megoldás inkább elméleti lehetőség, a GNSS felhasználók túlnyomó többsége a troposzféra okozta késleltetéseket empirikus modellekből határozza meg, amelyek általában a földfelszíni légnyomás, parciális párányomás és hőmérséklet függvényében adják meg a késleltetés mértékét. Mivel meteorológiai mérések a helymeghatározás pillanatában nem állnak a vevők rendelkezésére, ezért ezeket az értékeket vagy a sztenderd atmoszférából vagy az említett paramétereket leíró, szintén empirikus úton meghatározott modellekből származtatják.

3. tézis:

Eljárást dolgoztam ki a GNSS észleléseket terhelő troposzférikus késleltetés lokális modellezésére valamint a modellek maradék hibáinak becslésére az életbiztonságra kritikus helymeghatározáshoz.

A tézishoz kapcsolódó publikációk: Rózsa, (2014a, 2018a); Rózsa és mtsai. (2017, 2020)

Egy globális rádiószonda adatbázist felhasználva megvizsgáltam, hogy a különféle troposzféra késleltetés modellek milyen pontosan képesek visszaadni a tényleges troposzférikus késleltetés mértékét.

Emellett rádiószondás adatok felhasználásával minden egyes állomásra meghatároztam a troposzférikus késleltetés értékek számításához szükséges meteorológiai paraméterek lokális empirikus modelljeit, amely az említett három paraméter mellett a hőmérséklet és a parciális párányomás vertikális gradiensét is tartalmazta.

3.1 altézis:

Kimutattam, hogy a rádiószondás profilok alapján meghatározva a földfelszíni hőmérséklet, a légnyomás, a parciális párányomás, a hőmérsékleti vertikális gradiens valamint a parciális párányomás csökkenését leíró együttható éves középértékét és féléves és éves periódusú szezonális változásainak amplitúdóit és fázisát, a légi navigációban használatos troposzférikus késleltetés modellek tovább pontosíthatók. A pontosított modellekre is igaz, hogy a hidrosztatikus és a nedves késleltetések maradék hibáinak szórása egymással ellentétes módon függ a földrajzi szélességtől.

A tézishez kapcsolódó publikációk: (Rózsa, 2014a)

Egy globális értelemben a lehetőségekhez mérten homogén eloszlású rádiószonda állomáshálózat adatait felhasználva levezettem az egyes állomásokra a tézisben említett földfelszíni meteorológiai paraméterek empirikus modelljeit, amelyekben figyelembe vettem a paraméterek éves és féléves periódusú szezonális változásait is.

A parciális párányomás exponenciális csökkenésének mértékét leíró együttható szezonális változásainak meghatározásával és az Askne-Nordius troposzférikus késleltetés modellben történő figyelembevételével (LOC modell) a becsült troposzférikus késleltetés szabályos hibája és szórása is jelentősen csökkenthető a légi navigációban használatos RTCA troposzféra modellhez és a GPT2

fölfelszíni meteorológiai paraméterekkel meghatározott troposzférikus késleltetésekhez képest. A hidrosztatikus és a nedves troposzférikus késleltetés földrajzi szélességtől való függése jól látható az V-1. és V-2. ábrán.

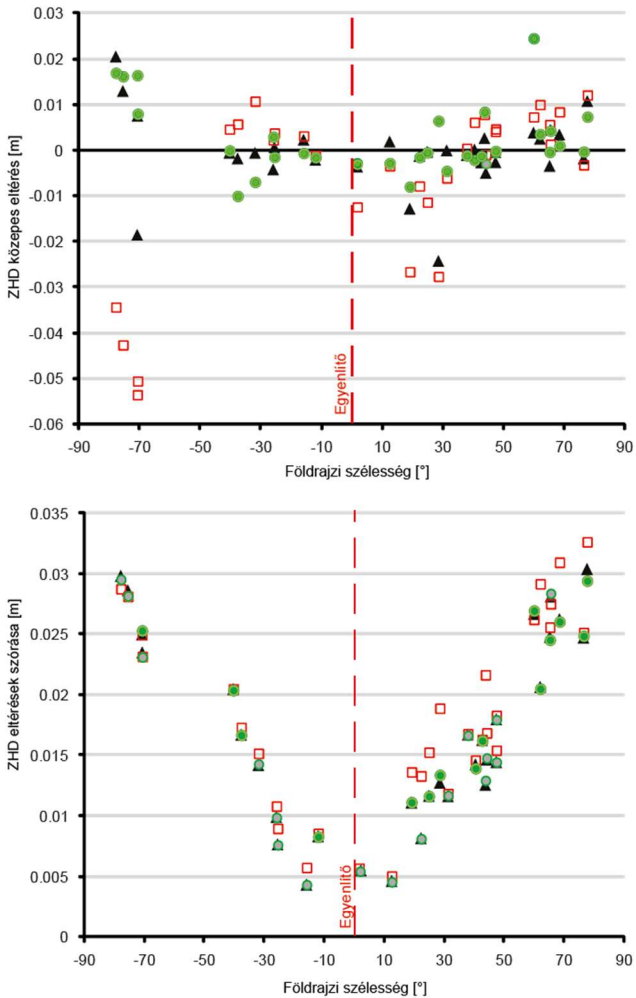
Az életbiztonságra kritikus helymeghatározási alkalmazások esetén azonban az egyes szabályos hibák pontossága mellett azok megbízhatóságának a megadása is elengedhetetlen. Ehhez egy olyan konfidenciaintervallumot kell megadnunk a hibák értékére, amelynél nagyobb maradék hibák csak igen kicsiny α valószínűséggel következhetnek be. A légi közlekedésben használt megközelítési eljárások esetében ezeket a konfidenciaintervallumokat jellemzően $\pm 4\text{-}5\sigma$ tartományra kell felvenni.

3.2. altézis:

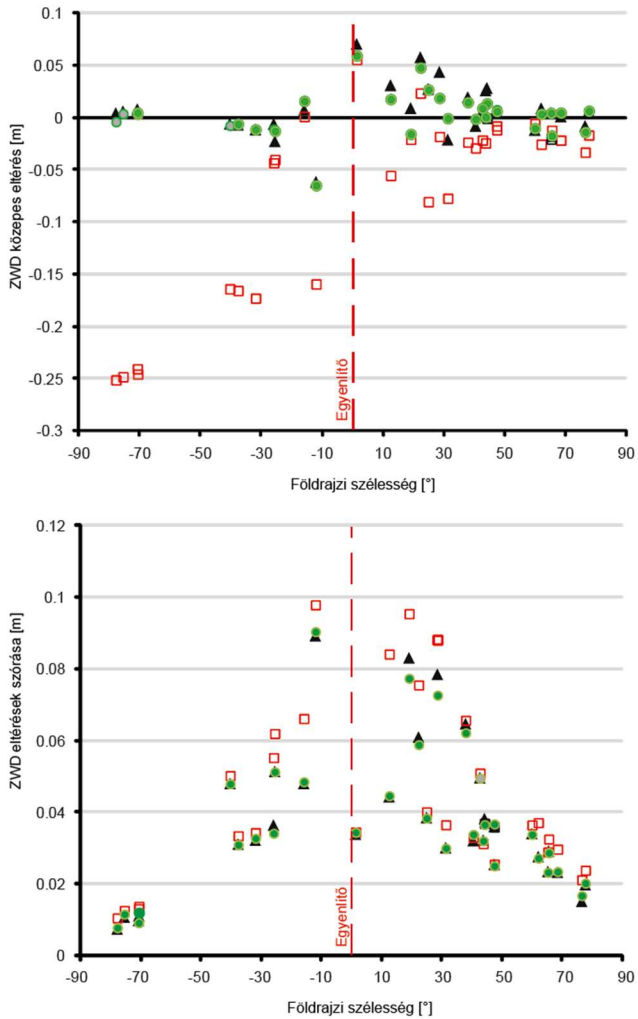
Eljárást dolgoztam ki a troposzférikus késleltetéseket leíró modellek szélsőséges körülmények között előforduló maradék hibáinak becslésére a modellek megbízhatóságának meghatározására.

A tézishez kapcsolódó publikációk: Rózsa (2018a); Rózsa és mtsai. (2017, 2020)

A GNSS helymeghatározás integritásvizsgálata során a troposzférikus késleltetés modellek legnagyobb hibáját normális eloszlású valószínűségi változóval írják le az RTCA által megadott szabványban, amelynek szórására $\pm 0,12$ m-es értéket adnak meg az egész Földre, majd az eredményhez tartozó konfidenciaintervallum (védelmi szint) szélességének meghatározásához a fenti értéket $K=5,33$ -mal szorozzák be, ami megfelel az $\alpha=10^{-7}$ szignifikanciaszintnek.



V-1. ábra A ZHD becslések közepes eltérései és szórásai a földrajzi szélesség függvényében (piros négyzet: RTCA modell; fekete háromszög: GPT2 modell, zöld kör: LOC modell)



V-2. ábra A ZWD becslések közepes eltérései és szórásai a földrajzi szélesség függvényében (piros négyzet: RTCA modell; fekete háromszög: GPT2 modell, zöld kör: LOC modell)

Rádiószondás adatok alapján kimutattam, hogy az RTCA által definiált troposzférikus késleltetésekre adott legnagyobb hiba becslések jelentős mértékben meghaladják a tényleges hibák mértékét. Annak érdekében, hogy a legnagyobb hiba meghatározására realisztikusabb modellt alkothassunk, olyan eljárást fejlesztettem ki, amellyel numerikus időjárás modellek felhasználásával az egész Földre levezethető a troposzféra késleltetések maradék hibáinak legnagyobb értéke az éghajlati hatások és szezonális változások figyelembevétele mellett. Az eljárással a troposzférikus késleltetésekre vonatkozó maradék ellentmondások mértékét olyan normális eloszlású valószínűségi változóval becsüljük, amely az alábbi összefüggéssel írható le:

$$\begin{aligned} \sigma_{max}(DOY) = & \frac{A_0}{K} \\ & + \left(A_0 + A_1 \cos\left(\frac{DOY - DOY_0}{365.25} 2\pi\right) \right. \\ & \left. + A_2 \cos\left(\frac{DOY - DOY_0}{365.25} 4\pi\right) \right) \sigma_{n,max} , \end{aligned} \quad (4-2)$$

ahol $\sigma_{n,max}$ a normalizált maradék ellentmondásokból számított 25 éves gyakoriságú hiba által meghatározott sztenderd normális eloszlású valószínűségi változó szórása, A_0 , A_1 és A_2 az éves középértéket és a szezonális változást leíró együtthatók értéke, míg A_0 a maradék hibák szabályos jellegű eltéréseinek a hatását veszi figyelembe. DOY_0 a szezonális változások szélsőértékeinek fázisát kifejező nap sorszám.

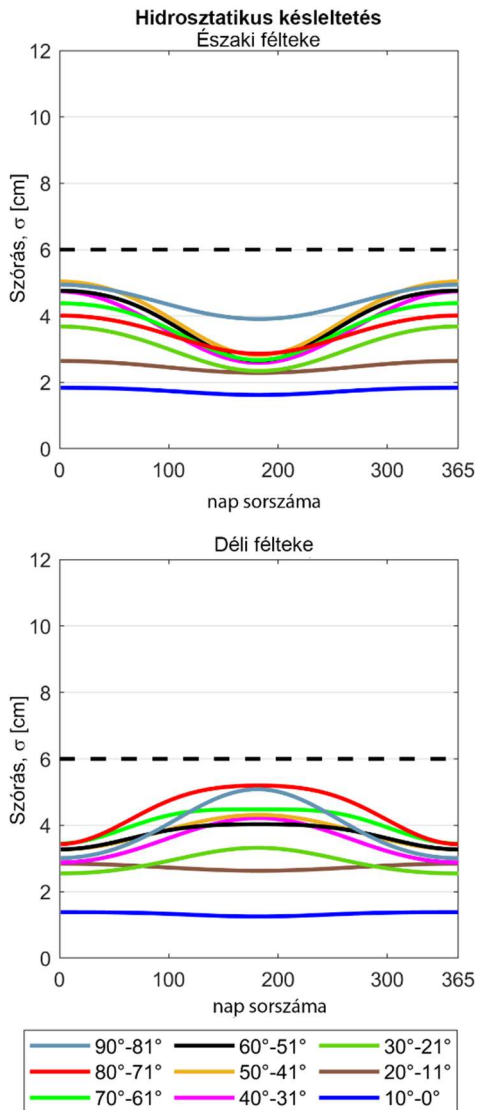
A modell paramétereinek meghatározására az általánosított extrém érték elméletet alkalmaztam. Munkatársaimmal numerikus időjárás modellek adatait felhasználva olyan – a kidolgozott eljárás alapján – maradék hiba modelleket alkottunk (V-3. és V-4. ábra),

amelyek jelentősen csökkentik a becsült maradék hiba mértékét a troposzféra modellek pontosságának éghajlat és szezonális hatásoktól való függésének figyelembevételével, ugyanakkor még mindig kellően konzervatív becslést annak nagyságára (azaz a becsült hiba meghaladja a tényleges hiba mértékét, 4-5. ábra).

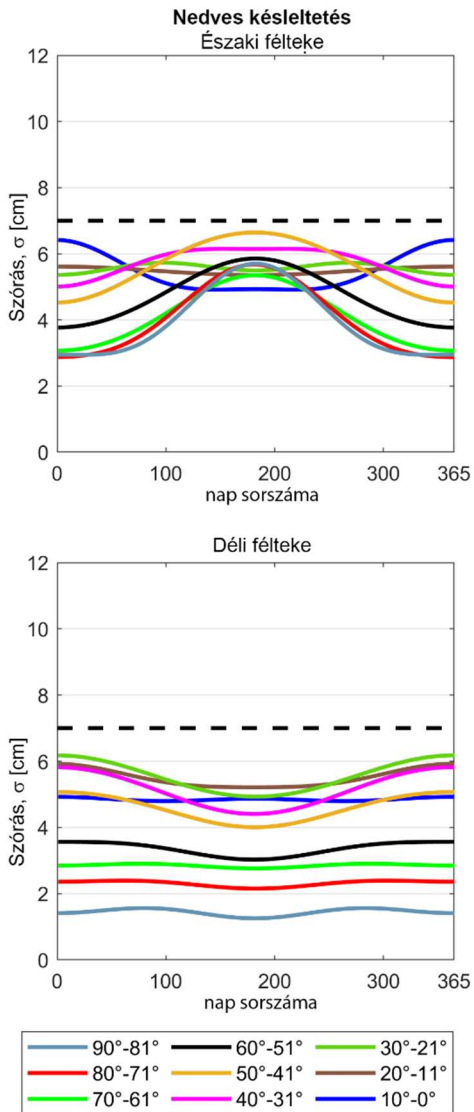
VI. Az új tudományos eredmények alkalmazási lehetőségei

Az új tudományos eredményeim alkalmazási lehetőségeit a három fő tézisnek megfelelő sorrendben ismertetem.

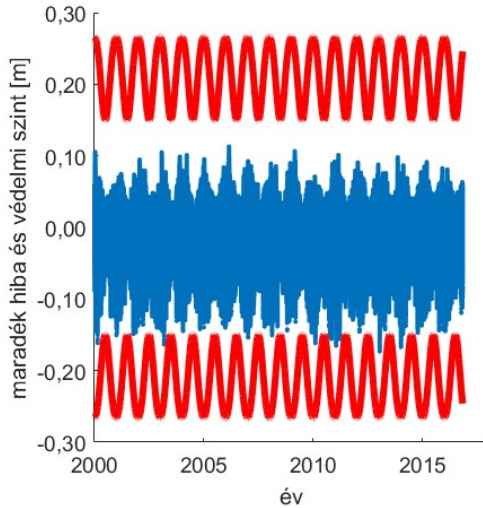
A Felső Rajna-árok jelenkori felszínmozgásainak meghatározására irányuló vizsgálataim egyrészt módszertani jellegűek, hiszen olyan eljárást dolgoztam ki az antennacserék kampány méréssel meghatározott geodinamikai hálózatokban okozta látszólagos elmozdulások mértékének jelentős csökkentésére, amely minden, hosszú távon végzett műholdas helymeghatározáson alapuló mozgásvizsgálati hálózati mérés során alkalmazható. A kritikus létesítmények (pl. nukleáris létesítmények) geodinamikai kockázatainak vizsgálatához kapcsolódó geodéziai hálózatokban jellemzően több évtizeden átívelően kell konzisztens (stabil) koordinátákat és elmozdulásokat meghatároznunk. Ez idő alatt jelentős technológiai fejlődés következhet be a műholdas helymeghatározásban, illetve az alkalmazott hardver elemek elavulhatnak vagy meghibásodhatnak. Emiatt a korábban alkalmazott eljárás, miszerint minden mozgásvizsgálati ponton minden mérési epochában ugyanazokat a hardverelemeket használjuk, nem fenntartható. A kialakított fáziscentrum modellezési eljárással viszont az újonnan egyedi, abszolút vagy relatív kalibráció alá vetett antennák fáziscentrum modelljeit



VI-3. ábra A χ ESA GALTROPO troposzféra modell hidroztatikus összetevőjére vonatkozó maradék hiba szórások éves változása a földrajzi szélesség függvényében



VI-4. ábra Az ESA GALTROPO troposzférai modell nedves összetevőjére vonatkozó maradék hiba szórások éves változása a földrajzi szélesség függvényében



VI-5. ábra Az ESA GALTRPO troposzférikus késleltetés modell zenitirányú hidrosztatikus késleltetéseihez tartozó maradék hibák (kék) és a kialakított eljárással becsült legnagyobb hibák értéke (piros)

összhangba tudjuk hozni a korábban alkalmazott relatív fáziscentrum modellekkel, így módon hardvercserék esetén is konzisztens koordináta-megoldásokat és elmozdulás értékeket határozhatunk meg.

A Felső Rajna-árok levezetett felszínmozgás értékei független ellenőrzésként vagy akár peremfeltételként szolgálhatnak a szerkezetföldtani modellek kialakításában és hozzájárulnak a térség kinematikájának és szeizmikus veszélyeztetettségének mélyebb megértéséhez. A bemutatott eljárások – különösen a felsőrendű szintezések elemzésére szolgáló eljárások – bárhol alkalmazhatók, ahol legalább egy ismételt szintezés rendelkezésünkre áll.

A légköri vízgőztartalom GNSS mérésekből végzett becslési eljárásaival kapcsolatos új tudományos eredményeket az időjárási modellek pontosítására használhatjuk fel. Az OMSZ munkatársai több

vizsgálatot is végeztek az elmúlt években a GNSS mérésekből meghatározott troposzférikus késleltetések értékének asszimilálására numerikus időjárási modellekben. Ezek a vizsgálatok azt mutatták, hogy a GNSS mérésekből meghatározott ZTD értékek – különösen rövid időtávon – pozitív hatást gyakorolnak a felszínközeli hőmérséklet, légnyomás, harmatpont és a csapadékösszegek előrejelzésére (Mile, Bölöni, Kucukkaraca és Rózsa, 2014; Mile, Benáček és Rózsa, 2019).

A nedves troposzférikus késleltetések és az integrált vízgőztartalom közötti arányossági tényező meghatározására kifejlesztett algoritmusokat Juni és Rózsa (2018) felhasználta egy globálisan használható átszámítási eljárás kifejlesztéséhez, amellyel a GNSS mérésekből levezetett zenitirányú nedves késleltetésekből bárhol a Földön, a helyi éghajlati viszonyokhoz illeszkedő módon végezhető el az integrált vízgőztartalom meghatározása.

Végezetül a troposzféra modellek megbízhatóságának becslésére szolgáló eljárások más szabályos hibákat leíró modellek megbízhatóságának meghatározására is felhasználhatóak. Ily módon hozzájárulhatnak a GNSS helymeghatározás integritásának finomabb értékeléséhez, ezáltal növelve annak rendelkezésre állását többek között a légi navigációban.

A meghatározott troposzféra maradék hiba becslésére szolgáló modelleket GNSS vevők szoftvereibe építve – a több frekvenciás polgári kódok várható elterjedését követően – nagyobb megbízhatósággal határozhatjuk meg a vevő koordinátáit, ami hozzájárulhat a műholdas helymeghatározás alkalmazási területeinek bővítéséhez.

A tézisekhez kapcsolódó publikációk jegyzéke

- Amalvict, M., Hinderer, J., Rózsa, Sz. (2006). Crustal vertical motion along a profile crossing the Rhine graben from the Vosges to the Black Forest Mountains: Results from absolute gravity, GPS and levelling observations. *Journal of Geodynamics*, 41(1–3). <https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.08.036>
- Cloetingh, S., Cornu, T., Ziegler, P. A., Beekman, F., Ustaszewski, K., Schmid, S. M., Dèzes, P., Hinsch, R., Decker, K., Lopes Gardozo, G., Granet, M., Bertrand, G., Behrmann, J., van Balen, R., Michon, L., Pagnier, H., Rozsa, Sz., Heck, B., Tesauro, M., ... van Eck, T. (2006). Neotectonics and intraplate continental topography of the northern Alpine Foreland. *Earth-Science Reviews*, 74(3–4). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.06.001>
- Rózsa, Sz. (2005). Abszolút antennakalibrálási adatok felhasználása geodinamikai hálózatokban. *Geomatikai Közlemények*, 8(1), 115–122.
- Rózsa, S., Mayer, M., Westerhaus, M., Seitz, K., & Heck, B. (2005a). Towards the determination of displacements in the Upper Rhine Graben area using GPS measurements and precise antenna modelling. *Quaternary Science Reviews*, 24(3-4 SPEC. ISS.). <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.07.007>
- Rózsa, Sz., Heck, B., Mayer, M., Seitz, K., Westerhaus, M., & Zippelt, K. (2005b). Determination of displacements in the upper Rhine graben Area from GPS and leveling data. *International Journal of Earth Sciences*, 94(4). <https://doi.org/10.1007/s00531-005-0478-z>

- Rózsa, Sz. (2012). Estimation of integrated water vapour from GPS observations using local models in Hungary. *International Association of Geodesy Symposia*, 136. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20338-1_103
- Rózsa, Sz. (2014a). Modelling tropospheric delays using the global surface meteorological parameter model GPT2. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 58(4). <https://doi.org/10.3311/PPci.7267>
- Rózsa, Sz. (2014b). Uncertainty Considerations for the Comparison of Water Vapour Derived from Radiosondes and GNSS. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37222-3_9
- Rózsa, S., & Kenyeres, A. (2014). Az aktív GNSS hálózat meteorológiai alkalmazása. *Geodézia és Kartográfia*, 66(3–4), 7–11.
- Rózsa, S., Kenyeres, A., Weidinger, T., & Gyöngyösi, A. Z. (2014). Near Real Time Estimation of Integrated Water Vapour from GNSS Observations in Hungary. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37222-3_5
- Rózsa, Sz., Ambrus, B., Juni, I. (2017). Integrity analysis of the RTCA tropospheric delay model. In G. Orosz (Szerk.), *AIS 2017 - 12th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas* (o. 94–99). Óbudai Egyetem. http://real.mtak.hu/70677/1/AIS_2017_paper_23.pdf
- Rózsa, Sz. (2018). A new approach for assessing tropospheric delay model performance for safety-of-life GNSS applications. In A. Heck, K. Seitz, T. Grombein, M. Mayer, J. Stövhase, H. Sumaya, M. Wampach, M. Westerhaus, L. Dalheimer, & P. Senger (Szerk.), *(Schw)Ehre, wem (Schw)Ehre gebührt : Festschrift zur Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Bernhard Heck*.

Hrsg.: A. Heck (o. 229–236). KIT Scientific Publishing.
<https://doi.org/10.5445/IR/1000080241>

Rózsa, Sz, Ambrus, B., Juni, I., Ober, P., Mile, M. (2020). An advanced residual error model for tropospheric delay estimation. *GPS Solutions*, 24(4), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10291-020-01017-7>

A tézisfüzetben hivatkozott egyéb irodalom

- Ádám, J., Szűcs, L., Tokos, T., Rózsa, S. (2002). Establishment of the permanent GPS station at the Department of Geodesy and Surveying of the Budapest University of Technology and Economics. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 46(2), 179–184. <https://pp.bme.hu/ci/article/view/630>
- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8). <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>
- Argus, D. F., Gordon, R. G., & Demets, C. (2011). Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(11). <https://doi.org/10.1029/2011GC003751>
- Behrmann, J. H., Hermann, O., Horstmann, M., Tanner, D. C., & Bertrand, G. (2003). Anatomy and kinematics of oblique continental rifting revealed: A three-dimensional case study of the southeast Upper Rhine graben (Germany). *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 87(7). <https://doi.org/10.1306/02180300153>
- Emardson, T. R., & Derks, H. J. P. (2000). On the relation between the wet delay and the integrated precipitable water vapour in the European atmosphere. *Meteorological Applications*, 7(1). <https://doi.org/10.1017/S1350482700001377>
- Juni, I., Rózsa, Sz. (2018). Developing a global model for the conversion of zenith wet tropospheric delays to integrated water

vapour. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 53(2).
<https://doi.org/10.1007/s40328-018-0215-2>

- Mile, M., Benáček, P., & Rózsa, S. (2019). The use of GNSS zenith total delays in operational AROME/Hungary 3D-Var over a central European domain. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(3), 11. <https://doi.org/10.5194/amt-12-1569-2019>
- Mile, M., Bölöni, G., Kucukkaraca, E., & Rózsa, S. (2014). Assimilation of GPS ZTD in mesoscale AROME model at Hungary. COST ES-1206 Workshop, Szóbeli előadás.
- Nash, J., Oakley, T., Vomel, H., & Li, W. (2011). WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems Yangjiang, China, 12 - 31 July 2010. In Organization (Szám 107). http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IO-107_Yangjiang.pdf