

A légkör fizikai állapotához illesztett leképezési függvények számítása a GNSS-mérések troposzférikus hatásainak csökkentésére

Juni Ildikó – Rózsa Szabolcs – Laky Piroska

DOI: 10.30921/GK.74.2022.2.1

Absztrakt: A GNSS-helymeghatározásnál a troposzférikus késleltetés az egyik legjelentősebb hibahatás, ennek mértéke magassági szögtől függően 2,5-45 m. Ezt különböző troposzféramodellekkel vehetjük figyelembe, melyekkel többnyire csak zenitirányban adható meg a troposzféra hatása és egy leképezési függvénnyel számítható át műholdirányúra. A GNSS-mérések szabatos utófeldolgozásához napjainkban a VMF1-et (Bécsi leképezési függvény 1) használjuk, amelynek paramétereit az Európai Középtávú Időjárás-előrejelző Központ (ECMWF) numerikus modelljéből, $2^\circ \times 2,5^\circ$ -os felbontású globális rácsra vezetik le. Cikkünkben azt vizsgáljuk, hogy magyarországi, nagy felbontású időjárási modellek felhasználásával a troposzférikus késleltetés előzetes értékeinek pontossága javítható-e. Bemutatunk egy továbbfejlesztett sugárkövetéses eljárást, amellyel zenit- és műholdirányban is meghatározható a troposzférikus késleltetések hidrosztatikus és nedves összetevője a $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ -os felbontású ALADIN időjárási modelljének meteorológiai paramétereiből. Majd a magyarországi permanens állomáshálózat adataiból a levezetett hidrosztatikus késleltetések a priori értéként való felhasználásával és a leképezési függvények segítségével zenitirányú troposzférikus késleltetéseket becslünk az állomáskoordináták megköthése mellett. A troposzférikus késleltetéseket meghatároztuk a GMF-fel (Globális leképezési függvény) illetve a VMF1-gyel kétféleképpen: ECMWF-, illetve regionális nagy felbontású ALADIN-adattal. Az eredmények azt mutatják, hogy a regionális modellel érhető el a legkisebb közepes eltérés, mintegy 1,5 cm az IGS (Nemzetközi GNSS Szolgálat), az EPN (EUREF Permanens GNSS-hálózat), illetve a rádiószondás mérésekből származó késleltetésektől.

Abstract: Tropospheric delay is one of the most significant error sources of GNSS positioning, ranging from 2.5 to 45 m depending on the elevation angle. Various tropospheric models can be used to calculate this effect, which mostly give only the zenith delay, and require a mapping function to calculate the slant tropospheric delay. For the VMF1 (Vienna Mapping Function 1) parameters are derived from a $2^\circ \times 2.5^\circ$ global ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) grid. In this paper the application of regional numerical weather models are studied for improving the accuracy of tropospheric mapping functions. Tropospheric delays and the parameters of the mapping functions are derived for the VMF1 mapping function from regional ALADIN high-resolution $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ data for a given period in Hungary. To calculate these, zenith and several slant tropospheric delays had to be determined using the enhanced ray-tracing method. Then we used the mapping functions and the Hungarian permanent station network data together with the derived hydrostatic delays as a priori values to estimate zenith tropospheric delays with constraints on the station coordinates. The tropospheric delays are estimated using the Global Mapping Function (GMF) as well as the VMF1 based on the standard ECMWF dataset and the regional, high resolution ALADIN numerical weather model. The results show that the regional model provided the lowest bias, about 1.5 cm compared to the ZTD products of the International GNSS Service, EUREF Permanent GNSS Network and delays stem from radiosonde measurements.

Kulcsszavak: troposzférikus késleltetés, ALADIN numerikus időjárás előrejelző modell, VMF1 leképezési függvény, Bernese
Keywords: tropospheric delay, ALADIN numeric weather forecast modell, VMF1 mapping function, Bernese

1. Bevezetés

A GNSS-helymeghatározást (Global Navigation Satellite System – Globális navigációs műholdrendszerek) különböző, a műholdhoz, a jelterjedéshez és a jelek észleléséhez kapcsolódó hibahatások terhelik. Az atmoszféra okozta egyik jelentős hatás, a mérőjelek ionoszféra okozta sebességmódosító hatása többfrekvenciás észlelésekkel nagyrészt kiküszöbölhető. A troposzféra hatása azonban mindegyik frekvencián azonos, a műhold magassági szögétől függően a mértéke elérheti a 45 métert is. A

troposzféra hatása elkülöníthető a hidrosztatikus egyensúlyban lévő, főként száraz levegő okozta hidrosztatikus és a vízpára okozta nedves késleltetésre. Ezek aránya megközelítőleg 90–10%, a nedves késleltetés becslése a vízpára inhomogenitása miatt bizonytalanabb. A koordinátameghatározás során a kereskedelmi feldolgozó szoftverekben általában a troposzférikus késleltetést empirikus modellekkel vesszük figyelembe. A modellek pontatlanságai elsősorban a meghatározott vektorok magassági komponensében okozhatnak hibát, a relatív

helymeghatározás alkalmazásakor főként a légköri vízpára nagymértékű időbeli és térbeli változása esetén. A szabatos GNSS-feldolgozó szoftverek a vektorok koordinátakomponenseinek becslésével egyidejűleg a zenitirányú troposzférikus késleltetés értékét is számítják az egyes pontokban. Ezzel az eljárással a magassági koordinátakomponensek meghatározásának pontossága javítható. Azonban az utóbbi esetben is a legkisebb négyzetek módszerével végzett kiegyenlítés során a késleltetések előzetes értékeit empirikus modellek segítségével vesszük fel.

Mindkét esetben fontos tehát, hogy a troposzférikus késleltetéseket a lehető legpontosabban tudjuk az a priori modellekkel becsülni.

A troposzféramodellekkel többnyire zenitirányban határozható meg a hidrosztatikus és nedves késleltetés. Ilyenek például a Hopfield (1969), az RTCA-MOPS (Radio Transmission Commission for Aeronautics – Minimum Operational Performance Standards – Repülés Rádióátviteli Bizottság – Minimális Működési Teljesítmény Szabvány) (RTCA 2013), az ESA (European Space Agency – Európai Űrügynökség) Galileo troposzféramodellje (Martellucci 2012) vagy az Askne-Nordius-troposzféramodell (Askne-Nordius 1987). A zenitirányú késleltetéseket egy leképzési függvény segítségével számíthatjuk át a műhold irányára. Néhány gyakran használt ezek közül: Marini (1972), Niell (1996) leképzési függvénye, az Izobarikus leképzési függvény (Isobaric Mapping Function, Niell 2000), a Globális leképzési függvény GMF, azaz Global Mapping Function, (Böhm et al. 2006a), a Bécsi leképzési függvény (VMF, azaz Vienna Mapping Function, Böhm-Schuh 2003, 2004) és utóbbi továbbfejlesztett változatai a VMF1-3 (Böhm et al. 2006b, 2005, Landskron-Böhm 2018).

A célunk az volt, hogy megvizsgáljuk a regionális, nagy felbontású időjárás modellek felhasználásának lehetőségét a troposzférikus késleltetések pontosítására. Ennek érdekében meghatároztuk a zenitirányú késleltetéseket és a VMF1 leképezési függvény paramétereit Magyarország területére, egy megfelelően kiválasztott csapadékos időszakban. A leképezési függvény paramétereinek számítása a zenit- és a ferde irányú troposzférikus késleltetéseken alapul. Ehhez a regionális, nagy felbontású ALADIN numerikus időjárásmodell-adatokat és a sugárkövetés továbbfejlesztett módszerét használtuk. A globális és a regionális időjárás modellek hatásának vizsgálatára mind az általunk levezetett, mind pedig az eredeti VMF1 leképzési függvény paramétereivel becsültük a zenitirányú troposzférikus késleltetéseket a magyarországi permanens

állomáshálózat adatainak a felhasználásával a Bernese 5.2-es GNSS-szoftver segítségével. Ezt követően a különféle eljárásokkal becsült troposzférikus késleltetések értékeit összevetettük a Nemzetközi GNSS Szolgálat (IGS – International GNSS Service) PENC állomása és EPN (EUREF Permanent GNSS Network – EUREF Permanens GNSS-állomáshálózat) (Bruyninx et al.) négy állomása által becsült troposzférikus késleltetési értékekkel. Továbbá egy állomást, ahol elérhető volt rádiószondás mérés a közelben, az abból számított késleltetésekkel is ellenőriztük.

2. A troposzférikus késleltetés számítása

A leképzési függvény paramétereinek számításához a numerikus időjárás modellből először le kell vezetnünk a zenit- és a ferde irányú troposzférikus késleltetések értékét. Erre a feladatra a sugárkövetés továbbfejlesztett módszerét alkalmaztuk.

2.1 Felhasznált adatok

A troposzférikus késleltetés számítását az ALADIN (ALADIN International Team 1997) nagy felbontású, regionális numerikus időjárás-előrejelző modell adataival végeztük el. Az Országos Meteorológiai Szolgálat ezt a modellt Közép-Európára, a 37°–56°-os szélességű és 2°–31°-os hosszúságú területre használja a légkör fizikai paramétereinek elemzésére (Horányi et al. 1996). A meteorológiai analízisadatok napi négy fájlban, hat órás bontásban érhetők el (00, 06, 12, 18) harminckét nyomásszinten (1000–10 hPa). A számításokhoz a geopotenciál, a hőmérséklet és a specifikus páratartalom-értékeket használtuk fel, 0,5°×0,5°-os vízszintes felbontással Magyarország területén (45,5°–49° szélesség és 16°–23° hosszúság). A vizsgálatokhoz a 2017. szeptember 10–16. közötti időszakot választottuk, mert ekkor heves zivatarokkal jellemezhető időjárás volt hazánkban. A 10 hPa nyomásszint feletti semleges légkör késleltető hatásának figyelembevételéhez (Rózsa et al. 2012) az International Standard Atmosphere (ISA) (ISO 1975) adatait alkalmaztuk, egészen 86 km-es magasságig.

2.2 A továbbfejlesztett sugárkövetés módszere

A továbbfejlesztett sugárkövetés módszerét részletesebben Juni-Rózsa 2019-ben mutatták be. Az eljárás alapja, hogy a tetszőleges magassági szöggel induló sugár az azonos optikai jellemzőjűnek tekinthető légréteg határainál megtörik, és Snellius–Descartes-törvénynek megfelelően új irányba folytatja útját. A földi pontból adott magassági szög alatt elindítva egy sugarat, légrétegről légrétegre haladva meghatározhatjuk a jel irányát, így tulajdonképpen megkapjuk a műhold és a vevő között a jelterjedés burkológörbéjét. A hagyományos sugárkövetés módszere – a VMF1-modell 2°×2,5°-os felbontása miatt – a sugár kiindulópontjától eltávolodva is a kezdeti rácspont függőlegesében megadott meteorológiai adatokat használja a számításokhoz (Böhm-Schuh 2003). Nagy felbontású regionális numerikus modellek esetén azonban ezzel az egyszerűsítéssel már nem élhetünk. Ezért a sugárkövetés-eljárást továbbfejlesztettük, és a légköri paraméterek vertikális változása mellett azok laterális változását is figyelembe vesszük. Megjegyezzük, hogy 10°-os magassági szög mellett a műholdvevő vektor az állásponttól ~57 km-re (0,75°-ra) hagyja el a troposzférát, ami nagyobb, mint a regionális modellek 0,1°-os felbontása. Az egyes vertikális rétegek és a műholdvevő vektor metszéspontjában érvényes meteorológiai paraméter-értékeket a numerikus modell rácspontjainak adataiból bilineáris interpolációval határoztuk meg.

A meteorológiai adatokat a számítás kezdetén vertikális értelemben interpoláltuk. A geopotenciálból számított ellipszoid feletti magasságokat Rocken et al. (2001) által meghatározott módon sűrítettük. A hőmérsékletet lineárisan, míg a légnyomást és a specifikus páratartalom-ból számított parciális párányomást exponenciálisan interpoláltuk. A vevő és műhold között a sugár útját folyamatosan nyomon követtük, így a geometriai sugárelhajlás mértéke is számíthatóvá vált. Hobiger et al. (2008) szerint a sugárelhajlást már

a számítás kezdetén figyelembe kell venni és iteratív úton számolni a sugárkövetést:

$$\delta \frac{C_b \exp\left(\frac{-b}{6000}\right)}{\tan e} \quad (1)$$

ahol δ az apriori sugárelhajlás [°], C_b egy tapasztalati konstans (értéke 0,02), h az ellipszoid feletti magasság [m], e a magassági szög vákuumban [rad]. A vákuumban értelmezett magassági szöget megnöveljük a kezdeti sugárelhajlás értékével a sugárkövetés számítása előtt. A sugárkövetés számítása után meghatározzuk a magassági szög vákuumbeli értékének és a sugárkövetés során számított magassági szögnek a különbségét. Ha ez 10^{-7} -nél nagyobb, akkor egy további iterációban újra elvégezzük a sugárkövetést, miután a sugárkövetés során számított magassági szöget az előbbieken számolt különbséggel megjavítottuk. Így az a priori sugárelhajlással a legkevesebb iterációval érjük el a 10^{-7} -nél kisebb eltérést.

Minden légrétegben meghatározzuk a sugár hosszát és a refraktivitást, így a zenitirányú és a műholdirányú hidrosztatikus, illetve nedves troposzférikus késleltetés külön-külön is meghatározható a következő integrál numerikus megoldásával:

$$D_{b,w} = 10^{-6} \int N_{b,w} ds \quad (2)$$

ahol $N_{b,w}$ a hidrosztatikus és nedves refraktivitás [-].

A troposzférikus késleltetés értékét a zenitirány mellett további 9 magassági szög (70°, 50°, 30°, 20°, 15°, 10°, 7°, 5°, 3,3°) számítottuk ki a VMF1 leképzési függvény paramétereinek a számításához. A számításokat és a meghatározott paramétereket a következő fejezetben fogjuk ismertetni.

Meg kell jegyezni, hogy a meteorológiai paraméterek a valóságban és a nagy felbontású regionális modellekben is anizotrópok, ezért a késleltetéseket a különböző magassági szögek mellett különböző azimutirányokban is érdemes meghatározni. Nafisi et al. (2012) kimutatták, hogy a numerikus időjárás-előrejelző modellek közötti különbségek akár deciméteres nagyságrendű troposzférikus ferde késleltetési különbségeket is okozhatnak 5°-os magassági szög esetén.

Ugyanakkor a szerzők arra is rámutattak, hogy több azimutirány esetén a szükséges számítási idő jelentősen növekedhet a pontosság számottevő javulása nélkül.

Utóbbi állítás igazolására egy egyszerű vizsgálatot is elvégeztünk. A késleltetés mértékét az 5°-os magassági szög mellett nyolc azimutirányban is meghatároztuk, az azimutok rendre 0,5°, 45,5°, 90,5°, 135,5°, 180,5°, 225,5°, 270,5°, 315,5° fokos értékűek voltak. A számításokat szeptember 13-i éjféltől kezdődő 6 órás időintervallumra hajtottuk végre, a 48–44°-os szélesség és 15–24°-os hosszúság által határolt terület 1°×1°-os rácsponthajrára. Azt tapasztaltuk, hogy a késleltetésértékek szórása a rácsponthajrára 2,2–4,1 cm között mozog, miközben a késleltetés abszolút értéke ennél három nagyságrenddel nagyobb. Így arra a következtetésre jutottunk, hogy elegendő egy irányban elvégeznünk a számításokat. A további számítások során minden sugárkövetést egységesen 215°-os azimutirányban indítottunk.

2.3 A VMF1 leképzési függvény a paramétereinek meghatározása

VMF (Böhm-Schuh 2003, 2004) továbbfejlesztése a VMF1 leképzési függvény (Böhm et al. 2006b), ami pontosította a függvény $a_{h,w}$, $b_{h,w}$, $c_{h,w}$ paramétereit. A VMF1 leképzési függvény értékeit e paraméterek ismeretében az alábbi összefüggéssel kaphatjuk meg:

$$m_{f,b,w}(e) = \frac{1 + \frac{a_{b,w}}{1 + \frac{b_{b,w}}{1 + c_{b,w}}}}{\sin e + \frac{a_{b,w}}{\sin e + \frac{b_{b,w}}{\sin e + c_{b,w}}}} \quad (3)$$

ahol e a magassági szög [rad]. A sugárkövetéssel kiszámított zenit- és ferde irányú troposzférikus késleltetésértékek és a geometriai sugárelhajlás-értékekkel kiszámíthatjuk az egyenlet bal oldalát:

$$m_{f,b,w}(e) = \frac{SD_{b,w} + shgeo}{ZD_{b,w}} \quad (4)$$

ahol $SD_{h,w}$ ferde irányú hidrosztatikus és nedves troposzférikus késleltetés [m], míg $ZD_{h,w}$ a zenitirányú [m], $shgeo$ pedig a hidrosztatikus geometriai sugárelhajlás értéke [m].

Böhm-Schuh (2003) a VMF leképzési függvény (4) egyenlet szerinti meghatározására két eljárást ad meg: a gyors és a szabatos módszert. A legfőbb különbség a két módszer között, hogy a gyors eljárás esetén egyetlen egy magassági szög (3,3°) kell kiszámítani a leképzési függvény értékét, addig a szabatos módszer esetén kilenc (70°, 50°, 30°, 20°, 15°, 10°, 7°, 5°, 3,3°) műholdirányú késleltetés szükséges. A gyors módszernél ez után $a_{h,w}$ egyszerűen számítható az előre definiált $b_{h,w}$ és $c_{h,w}$ értékek felvétele mellett, míg a szabatos módszer esetén az $a_{h,w}$, $b_{h,w}$ és $c_{h,w}$ paraméterek kiegyenlítésével határozhatók meg. Bár a VMF1 (Böhm et al. 2006b) a gyors módszert használja, a pontosabb eredmény elérése érdekében vegyítettük a két módszert, a fentiekben meghatározott troposzférikus késleltetésekkel és a geometriai sugárelhajlással a szabatos módszer szerint kilenc leképzési függvény-értéket határoztunk meg, majd a paraméterek kiegyenlítésénél a $b_{h,w}$ és $c_{h,w}$ paramétereket megkötöttük, ezek értékeiről a következő fejezetben írunk. Célunk tehát nem más, mint hogy a VMF1 leképzési függvény $b_{h,w}$ és $c_{h,w}$ értékeit felhasználva új, regionális értelemben a légköri tömegek hatását jobban jellemző $a_{h,w}$ paramétereket határozzunk meg.

2.4 A VMF1 leképzési függvény

$b_{h,w}$, $c_{h,w}$ paraméterei

A b_h paraméter értékét Böhm et al. (2006b) az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - Európai Középtávú Időjárás-előrejelző Központ) ERA-40 (ERA - Re-Analysis - Újraelemzett) 2001 évi hat óránkénti adataiból vették le, 156 globális rácspontot és 23 nyomásszintet felhasználva. A szabatos módszert használva kiegyenlítés után a b_h értéke 0,0029, míg c_h az alábbi összefüggéssel határozható meg: (5)

$$c_b = c_0 + \left[\cos\left(\frac{doy - 28}{365} \cdot 2\pi + \Psi\right) + 1 \right] \cdot \frac{c_{11}}{2} + c_{10} \cdot (1 - \cos \phi)$$

ahol c_0 , c_{10} , c_{11} és Ψ értéke féltékenként eltér, táblázatszerűen adott (Böhm et al. 2006b), doy az évben január 1. óta eltelt napok száma és ϕ a földrajzi szélesség.

A nedves paraméterek értéke VMF leképzési függvényével azonos, NMF (Niell 1996) leképzési függvény 45°-os földrajzi szélességhez tartozó paraméterei $b_w = 0,00146$ és $c_w = 0,04391$. Ezek után ismert zenitirányú és ferde késleltetések segítségével a_h és a_w értékei meghatározhatók.

2.5 A VMF1 leképzési függvény $a_{h,w}$ paramétereinek meghatározása

A zenitirányú és a kilenc műholdirányú késleltetés segítségével az a_h és a_w paramétereket optimalizációs eljárással számítottuk ki. Az a_h és a_w paramétereket és a zenitirányú késleltetéseket egy $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ -os rácsnálra vezettük le 2017. szeptember 10–16. közötti időszakra Magyarország területére (45,5–49°-os szélesség és 16–23°-os hosszúság között). A Bécsi Műszaki Egyetem rendszeresen közzéteszi az a_h és a_w paraméterek és zenitirányú késleltetések ECMWF-adatokból számított értékeit egy $2^\circ \times 2,5^\circ$ -os globális rácsnálóban, hat órás időbeli felbontással. Az eljárásunk ellenőrzése érdekében összevetettük az ECMWF- és az ALADIN-adatokból levezetett a_h és a_w paramétereket a rácsnálók közös pontjaiban, azaz a $46^\circ, 48^\circ$ -os szélességi körök és a $17,5^\circ, 20^\circ, 22,5^\circ$ -os hosszúságú meridiánok metszéspontjaiban. Ehhez a hat rácsponthoz hat órás felbontásban rendelkezésre álló paraméterek különbségét képeztük, és ezek statisztikai jellemzőit számítottuk ki (2. táblázat). A levezetett paraméterek nagyságrendileg megegyeznek az eredeti a_h és a_w értékekkel, a kisebb eltérések oka a különböző meteorológiai adat lehet.

Miután a módosított sugárkövetési eljárást leellenőriztük, a továbbiakban arra kerestük a választ, hogy a nagy felbontású időjárási modellek alkalmazásával milyen eredményeket érhetünk el a GNSS-adatok feldolgozása során. Ennek érdekében a Bernese 5.2 szabatos GNSS-feldolgozó szoftverrel a GNSSnet.hu adatait felhasználva becsültük az állomásokon a zenitirányú troposzférikus késleltetések értékét. Az eredmények összehasonlítása során az eredeti, globális lefedettségű VMF1-modellre és az abból származtatott eredményekre VMF1-ECMWF-ként, míg az általunk

1. táblázat. Az a_h és a_w paraméterek eredeti ECMWF- és ALADIN-adatokból levezetett értékei különbségének statisztikai jellemzői

	minimum	maximum	átlag	szórás
$a_{h, \text{ECMWF}} - a_{h, \text{ALADIN}}$	$-1,69 \cdot 10^{-5}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$	$6,10 \cdot 10^{-6}$	$6,40 \cdot 10^{-6}$
$a_{w, \text{ECMWF}} - a_{w, \text{ALADIN}}$	$-6,95 \cdot 10^{-4}$	$7,91 \cdot 10^{-4}$	$-3,94 \cdot 10^{-5}$	$2,06 \cdot 10^{-4}$

levezetett modellparaméterekre és eredményekre VMF1-ALADIN-ként fogunk hivatkozni.

3. A troposzférikus késleltetés becslése GNSS-adatokból

A regionális időjárási modellekből származtatott leképezési függvények és az eredeti VMF1-leképezési függvény felhasználásával a GNSSnet.hu hálózat állomásainak felhasználásával becsültük a zenitirányú troposzférikus késleltetés mértékét. A következőkben e vizsgálataink eredményeit mutatjuk be.

3.1 Felhasznált adatok

A zenitirányú troposzférikus késleltetések becslését a 2017. szeptember 10–16. időszakban a GNSSnet.hu állomások felhasználásával végeztük el, a feldolgozásba bevontuk PENC IGS állomást. (1. ábra) A kiválasztott állomások közül BUTE, OROS, SPRN és CAKO az EPN tagjai is.

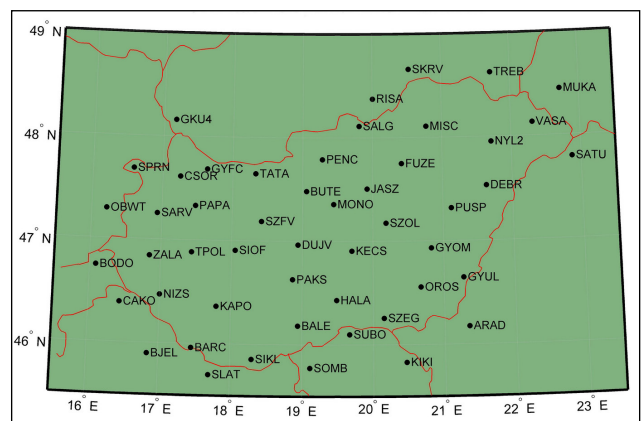
A GNSSnet.hu állomások mérési fájleit a Lechner Tudásközpont Koszmikus Geodéziai Observatóriuma bocsátotta rendelkezésünkre. A troposzférikus késleltetés becsléséhez szükség van az állomások pontos ITRF14-koordinátaira. IGS-állomásokra ezek rendelkezésre állnak, a keresett napra vonatkozóan, de az EPN-nél csak egy bizonyos időpontra tölthető le a koordináta a sebességinformációval együtt. A hazai állomások pontleírásaiban azonban az ETRF2000 vonatkoztatási keretrendszerben, 2007.4 epochában meghatározott koordinátái állnak rendelkezésre. Így a vizsgált időszak előtti hétre (2017. 09. 03–09.) első lépésként az ITRF14

vonatkoztatási rendszerben értelmezett aktuális koordináták meghatározását végeztük el a Bernese szoftverrel. A dátummeghatározáshoz négy állomás (PENC, BUTE, SPRN és OROS) ITRF14-koordináta- és sebességadatait használtuk fel. Az állomáskoordináták kiegyenlítését a napi mérésekre szabad hálózatként végeztük el, majd a kapott napi normálegyenletek felhasználásával heti koordinátamegoldást számítottunk a négy állomás koordinátáját kényszerként figyelembe véve. Ily módon előállítottuk a hálózati pontok ITRF14 vonatkoztatási keretrendszerbeli koordinátáit a 2017. 09. 06. 12:00:00 epochára. A troposzférikus késleltetések becslése során ezeket a koordinátákat változatlanok tekintettük.

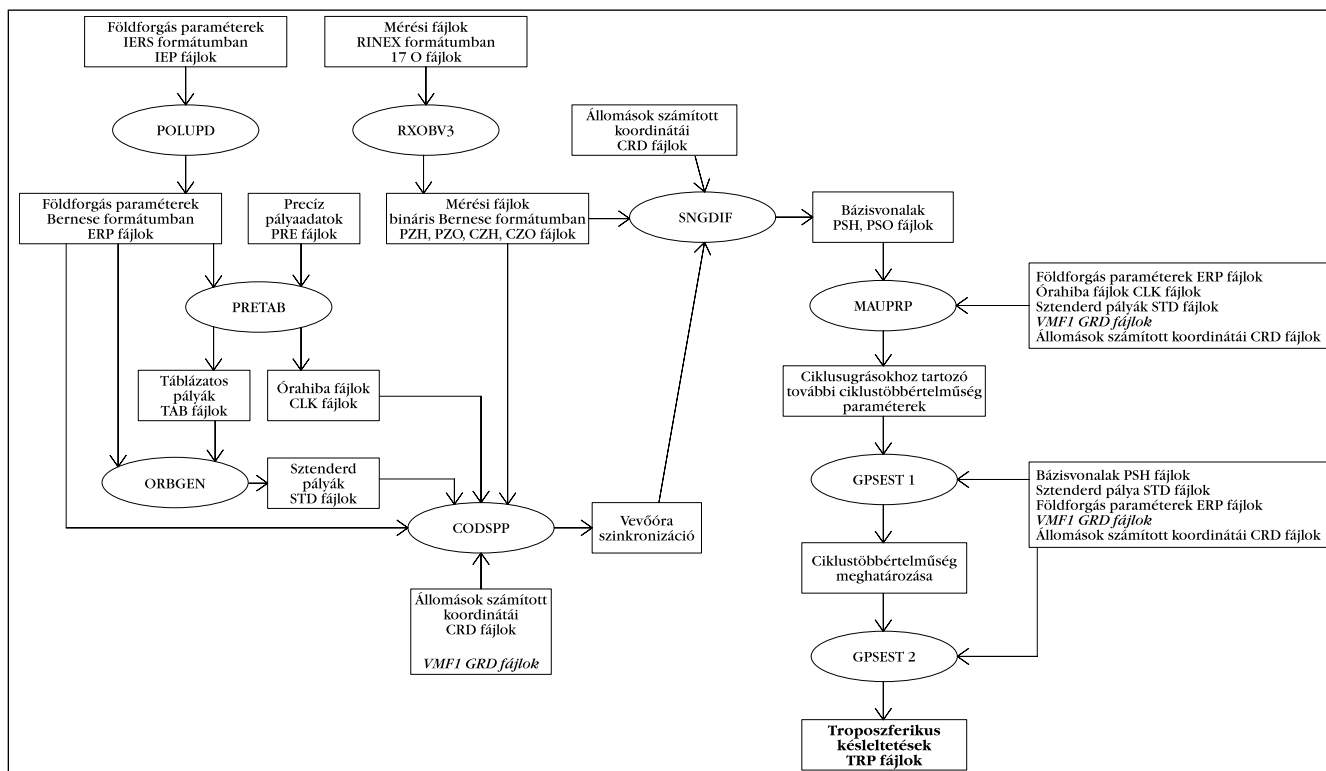
3.2 A troposzférikus késleltetések becslésének lépései

A troposzférikus késleltetés számításának lépéseit a 2. ábrán mutatom be, ahol a felhasznált scriptek bemenő és kimenő adatai is láthatók. A késleltetéseket két óránként becsültük a GMF és VMF1 leképezési függvények felhasználásával.

Az empirikus GMF leképezési függvény archív, a meteorológiai paramétereknek csak a havi középértékét tartalmazó ECMWF-rácsnálókat használ az a_h , a_w paraméterek meghatározására. Így lehetséges, hogy rövid távon kevésbé pontos eredményeket kapunk a VMF1-hez képest,



1. ábra. A felhasznált permanens állomások



2. ábra. A troposzférikus késleltetés számításának lépesei

de a modell jól mutatja a szezonális változásokat hosszabb adatsoroknál (Böhm et al. 2006a). A modell előnye, hogy csak kettő bemeneti paraméterre van szüksége: az állomás koordinátáira és arra, hogy az adott nap hányadik az évben. Emellett a korábbiakban már bemutatott két különböző VMF1-paraméterrácsot használtuk fel a VMF1-modell esetén: az általunk előállított 0,5°×0,5°-os ALADIN-adatokból levezetett VMF-ALADIN- és a (Bécsi Műszaki Egyetem által levezett 2°×2,5°-os) VMF1-ECMWF-rácsnál. Annak érdekében, hogy az általunk levezetett, nagy felbontású regionális paramétersort is felhasználhassuk a Bernese szoftverben, annak forráskódját módosítanunk kellett.

A különféle leképezési függvényeket felhasználva a hozzájuk tartozó a priori zenitirányú hidrosztatikus késleltetések ismeretében, az állomáskoordinátákat megköthve becsültük a zenitirányú nedves késleltetés mértékét. Ezt követően az a priori hidrosztatikus késleltetés és a becsült nedves késleltetés összegeként kaptuk meg a teljes zenitirányú késleltetést, végül ezt a Nemzetközi GNSS Szolgálat és az EPN által közzétett megoldásokkal, illetve rádiószondás mérésekből levezetett késleltetésekkel vetettük össze.

4. Eredmények

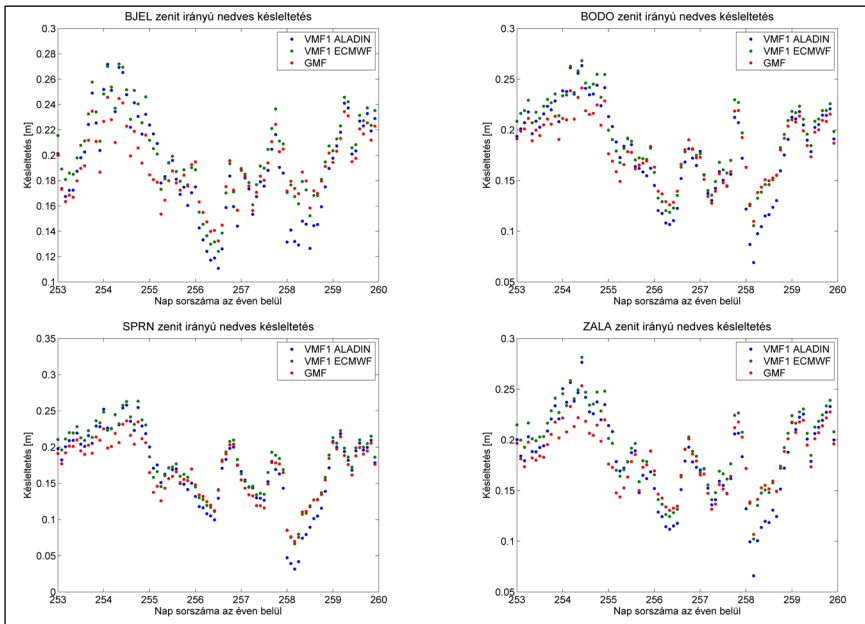
Az elemzések során összehasonlítottuk az egyes permanens állomásoknál a GMF és VMF1 leképezési függvényekkel kapott eredményeket a hidrosztatikus, a nedves és a teljes késleltetések esetében is, a vizsgált időszakban. A vizsgálathoz referenciaként az IGS PENC állomásra, illetve az EPN BUTE, CAKO, OROS, SPRN állomásokra levezetett teljes zenitirányú troposzférikus késleltetés termékét használtuk fel. Továbbá BUTE állomás eredményeit összevetettük a pestszentlőrinci rádiószondás mérésekből számított teljes zenitirányú késleltetésértékekkel. Az IGS-nél az adatsor ötperces időbeli felbontással áll rendelkezésünkre 0:00-tól 23:55-ig, míg EPN-állomásoknál óránként 0:30 és 23:30 között. Rádiószondás méréseket általában napi kétszer végeznek a vizsgálatba bevont állomáson, 00 és 12 órakor.

4.1 A leképezési függvények hatásának vizsgálata

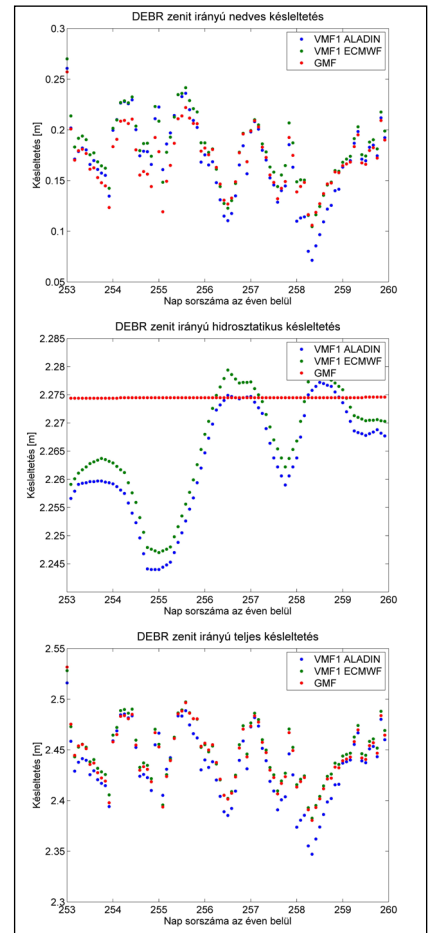
A vizsgált egyhetes időszakra levezettük a nedves késleltetések értékét, majd ebből a hidrosztatikus késleltetések ismeretében kiszámítottuk a teljes zenitirányú késleltetés mértékét. A 3.

ábrán néhány nyugat-magyarországi állomás zenitirányú nedves késleltetési adatsorát láthatjuk mindhárom vizsgált leképezési függvény alkalmazásával. A vizsgált időszak alatt (szeptember 10–11.) Horvátországban extrém mennyiségű csapadék hullott, 24 órán belül helyenként a lehullott csapadék mértéke elérte a 300 mm-t. Ennek a csapadékos zónának a pereme érintette a nyugat-magyarországi területeket is. Ezeket a zivatarokat nem könnyű pontosan kimutatni térben és időben, de a VMF1 ráccsal számított nedves késleltetésekénél látható, hogy azok 11-én (254. nap) több állomáson is eléri a magasabb, 0,27 m körüli értéket, majd a következő 48 órában megközelítőleg felére csökken a nedves késleltetés mértéke.

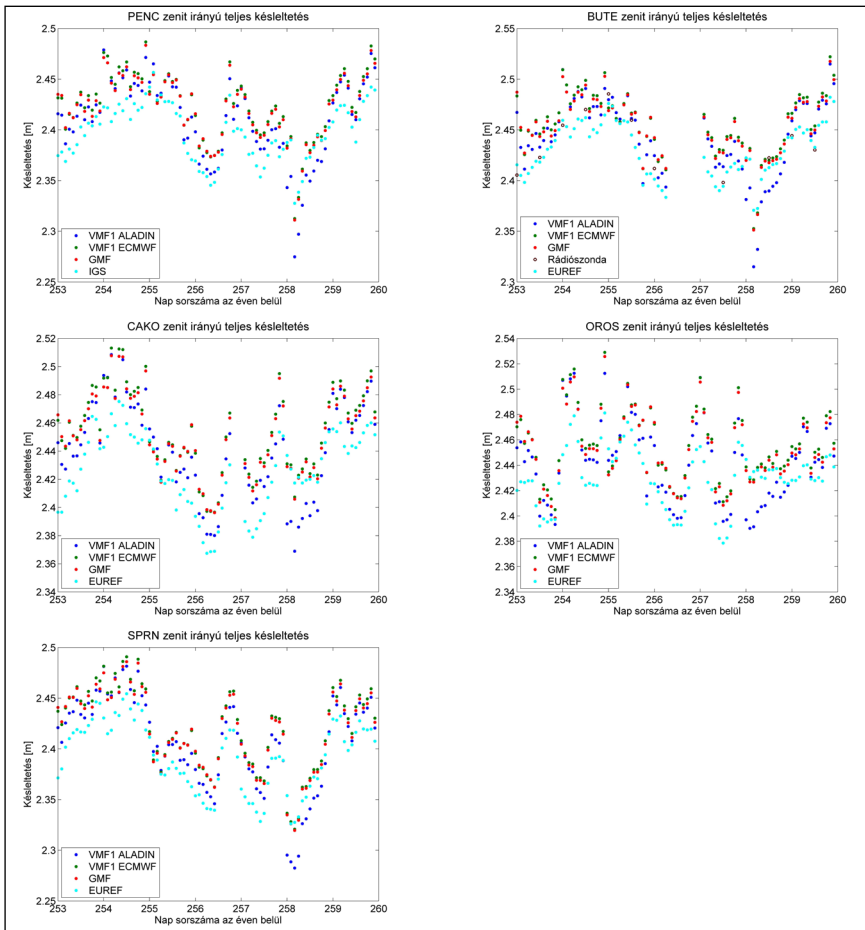
Összehasonlításképp az 4. ábrán ábrázoltuk a keleti országrészben Debrecen (DEBR) állomás hidrosztatikus, nedves és teljes késleltetés értékeinek idősorát ugyanebben az időszakban. A nedves késleltetés maximuma 0,23 m körül alakul, és a késleltetés csökkenése is kisebb. Az ábrán az is látható, hogy a GMF leképezési függvény alkalmazása esetén az a priori hidrosztatikus értékeket sztenderd atmoszféra modellből számítottuk, míg a VMF1 modellek



3. ábra. A nedves késleltetés értékei néhány nyugati állomásonál



4. ábra. A nedves, hidrosztatikus és teljes késleltetés értékei DEBR állomásonál



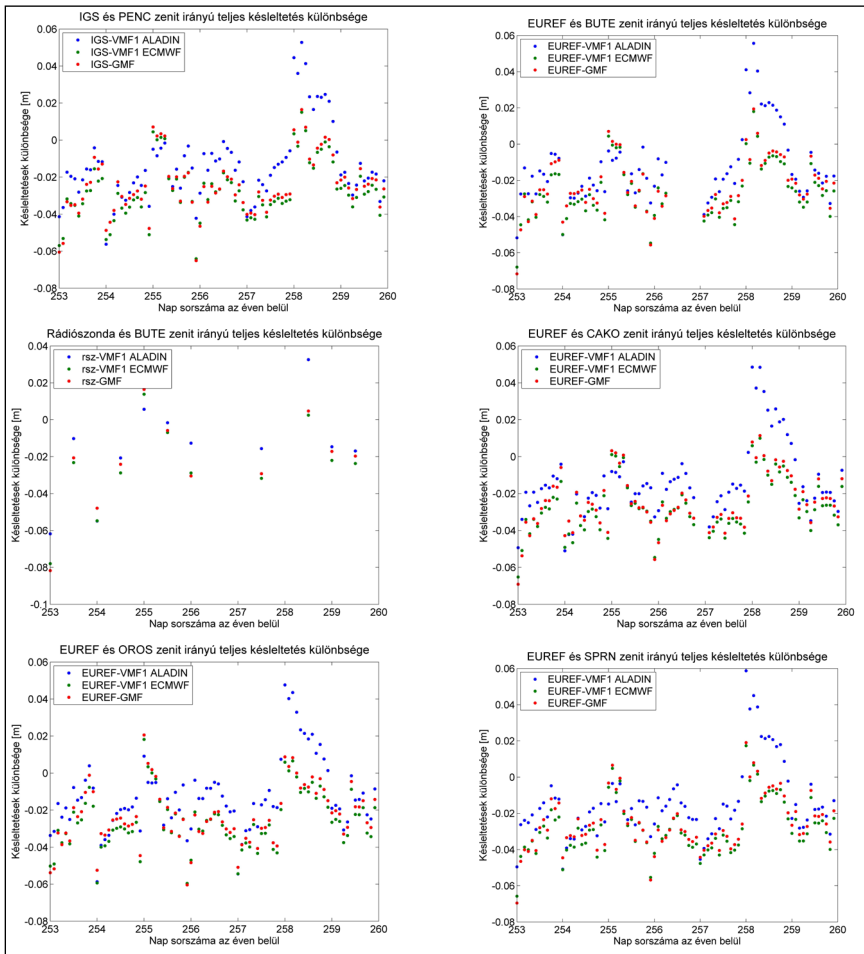
5. ábra. A referencia- és a levezetett modellek teljes késleltetés értékei PENC, BUTE, CAKO, OROS, SPRN állomásoknál

esetén azokat sokkal realiztikusabb módon, a numerikus időjárás modellekből származtattuk. Az ábrán az is jól kivehető, hogy a VMF1-ALADIN- és a VMF1-ECMWF-modellekből kapott

eredmények jó összhangot mutatnak, de a VMF1-ALADIN-moddal a vizsgált időszakban végig a VMF1-ECMWF-moddalnál kisebb nedves késleltetés értékeket ad.

A kisebb különbségek adódhatnak a különböző numerikus időjárás modellek adattartalma miatt, vagy a modellek eltérő számítási algoritmusai miatt. Ugyanakkor bár a két késleltetés-időszak nagy hasonlóságot mutat, a szabályos jellegű eltéréseket érdemes tovább vizsgálni. Ennek érdekében PENC, BUTE, CAKO, OROS, SPRN állomásokra letöltöttük a troposzférikus késleltetés-paramétereket az IGS és az EPN adattárházából. Illetve BUTE állomás esetén referenciaként használtuk a rádiószonda mérésekből levezethető késleltetéseket is.

A permanens állomásokon a vizsgált időszakban kétóránként tudtuk összevetni az általunk levezetett zenitirányú teljes késleltetésértékeket az IGS és EPN eredményeivel (5. ábra). Az EPN-állomásoknál ehhez interpolálni kellett a 0:30-tól óránként elérhető adatok között minden második órára. Meg kell jegyezni, hogy BUTE és CAKO mérési adatai hiányosak voltak mind a referencia, mind a vizsgált modellek esetén a 256. napon. A



6. ábra. A referenciá- és a levezetett modellek teljes késleltetéseinek különbsége PENC, BUTE, CAKO, OROS, SPRN állomásoknál

23:30-as időpontot sem tartalmazta a referenciafájl, így a 257. nap éjjeli időpont is hiányzik az összehasonlításból. Az ábrán látható, hogy szinte kivétel nélkül néhány cm-es mértékben mindig túlbecsülték a vizsgált modellek a

referenciakésleltetéseket. Ugyanakkor az is megfigyelhető, hogy a vizsgált modellek közül a VMF1-ALADIN regionális modellel kapott eredmények közelítik meg legjobban az IGS és EPN eredményeit. Az IGS és EPN

2. táblázat. A teljes késleltetések referenciamodelltől vett eltéréseinek statisztikai jellemzői PENC, BUTE, CAKO, OROS, SPRN állomásoknál

Permanens állomás		min [cm]	max [cm]	átlag [cm]	szórás [cm]
PENC	IGS - VMF1-ECMWF	-6,4	1,5	-2,7	1,5
	IGS - VMF1-ALADIN	-5,6	5,3	-1,4	2,1
	IGS - GMF	-6,5	1,7	-2,5	1,5
BUTE	EUREF - VMF1-ECMWF	-6,8	1,8	-2,6	1,5
	EUREF - VMF1-ALADIN	-5,2	5,6	-1,3	2,0
	EUREF - GMF	-7,2	1,9	-2,3	1,5
	rsz - VMF1-ECMWF	-7,8	1,4	-2,6	2,5
	rsz - VMF1-ALADIN	-6,2	3,3	-1,6	2,6
	rsz - GMF	-8,2	1,6	-2,3	2,6
CAKO	EUREF - VMF1-ECMWF	-6,5	1,0	-2,7	1,4
	EUREF - VMF1-ALADIN	-5,1	4,9	-1,4	2,0
	EUREF - GMF	-6,9	1,1	-2,5	1,5
OROS	EUREF - VMF1-ECMWF	-6,0	1,8	-2,6	1,5
	EUREF - VMF1-ALADIN	-5,9	4,8	-1,2	1,9
	EUREF - GMF	-6,0	2,1	-2,3	1,5
SPRN	EUREF - VMF1-ECMWF	-6,6	1,7	-2,8	1,5
	EUREF - VMF1-ALADIN	-5,1	5,9	-1,4	2,0
	EUREF - GMF	-7,0	1,9	-2,6	1,5

megoldásaihoz képest meghatározott eltérések idősorát a 6. ábrán láthatjuk, azok statisztikai jellemzőit pedig a 2. táblázatban mutatjuk be.

A referenciamodelttől számított különbségek legnagyobb értékei a 7 cm körüli értéket is elérik, de átlagosan 2-3 cm körül mozognak (6. ábra). A statisztikai jellemzők számítása után látható, hogy azok a VMF1-ECMWF- és a GMF-modellekkel kapott maradék ellentmondások esetén, nagyon hasonlóak (2. táblázat). A közepes eltérés esetében azonban a VMF1-ALADIN-modell közel 1,5 cm-rel kisebb eltérést mutat. A kisebb közepes eltérés egyik oka, hogy a VMF1-ALADIN-modell a vizsgált időszakban kisebb különbséget mutatott a 253-257. napokon és a 259-260. napokon is. Másrészt a 258. napon az VMF1-ALADIN-modellel – a korábbi napokkal és a többi vizsgált modellel ellentétben – kisebb ZTD-értékeket becsültünk, mint az EUREF/IGS-feldolgozásból kapott értékek.

A levezetett késleltetések még további vizsgálatához jól használhatók referenciaként a rádiószondás mérések. Rádiószonda felbocsajtása BUTE állomáshoz közel, Pestszentlőrincen történik, közel azonos magasságról, így a magasságkülönbség elhanyagolható a számításoknál. A rádiószondás mérésekből levezetett késleltetések megerősítik, hogy jobb eredmény érhető el a VMF1-ALADIN-modellel. A vizsgálatok szerint az előző referenciavizsgálathoz képest néhány mm-rel kisebb, 1 cm körüli javulás érhető el a közepes eltérés esetén a többi modellhez képest.

5. Összegzés, konklúzió

Nagy felbontású, $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ -os ALADIN numerikus időjárásmodell- adatokat felhasználva új a_h, a_w VMF1-paramétereket számítottunk egy egyhetes időszakra, Magyarország területén. A számításokhoz a sugárkövetés továbbfejlesztett változatát használtuk fel. A Bernese 5.2 GNSS-szoftver módosításával elértük, hogy a ECMWF-modellből meghatározott VMF1 leképezési függvény mellett annak regionális változata is felhasználható legyen a GNSS-mérések feldolgozása során. A továbbfejlesztett sugárkövetési

eljárással előállított regionális, nagy térbeli felbontású leképezési függvény paramétereinek alkalmazási lehetőségeit megvizsgáltuk a meteorológiai célú GNSS-adatfeldolgozás szempontjából. Eredményeink azt mutatták, hogy a regionális modellel kaptuk az IGS és EPN troposzférikus késleltetéstérmekekhez legközelebbi eredményeket, az átlagos eltérésben mintegy 1,5 cm-es javulást értünk el zenitirányban. További ellenőrzést végeztünk rádiószondás mérésekkel BUTE állomáson, ami 1 cm körüli javulást mutatott. Vizsgálataink arra is rámutattak, hogy nagyobb távolságokon a troposzférikus késleltetések mértéke jelentősen eltérhet az egyes állomásokon, emiatt különösen fontos, hogy a nagyobb hálózatok feldolgozása során a troposzférikus késleltetéseket a koordinátákkal együtt becsüljük.

Vizsgálataink demonstrálták, hogy az időjárás-előrejelzéshez is felhasznált időjárási modellek értékes, nagy térbeli felbontással is rendelkezésre álló információkat szolgáltatnak a GNSS-mérések troposzférikus késleltetéseinek pontosabb meghatározásához és pontosabb modellezéséhez. A VMF1 leképezési függvény paramétereit előállíthatjuk nagy felbontású időjárás-előrejelző modellel bármely időszakra, és használhatjuk GNSS utófeldolgozó szoftverben, miután a precíz pályaadatok is elérhetők. Így a troposzférikus késleltetés mellett, többek között pontosítható a koordinátameghatározás. Továbbá az eljárásnak további szerepe lehet az önálló bázisos, valós idejű, relatív helymeghatározás (RTK), illetve a nagy pontosságú, abszolút helymeghatározás (PPP – precise point positioning) technikájának továbbfejlesztésében is.

Irodalom

- ALADIN International Team. 1997. The ALADIN project: Mesoscale modelling seen as a basic tool for weather forecasting and atmospheric research. *WMO Bulletin*, 46, pp. 317-324.
- Askne, J. – Nordius, H. 1987. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Science*, 22(3), pp. 379-386., DOI: 10.1029/RS022i003p00379

- Boehm, J. – Schuh, H. 2003. Vienna Mapping Functions. *16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*. pp. 131-143.
- Boehm, J. – Schuh, H. 2004. Vienna mapping functions in VLBI analyses. *Geophysical Research Letters*, 31(1), pp. 2-5., DOI: 10.1029/2003GL018984
- Boehm, J. – Ess, M., Schuh, H. 2005. Asymmetric Mapping Functions for CONT02 from ECMWF. In: Vennebusch M, Nothnagel A (eds) *Proceedings of the 17th working meeting on European VLBI for geodesy and astrometry*, April 22-23., pp. 64-68.
- Boehm, J. – Niell, A. – Tregoning, P. – Schuh, H. 2006a. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, 33(7), pp. 3-6., DOI: 10.1029/2005GL025546
- Boehm, J. – Werl, B. – Schuh, H. 2006b. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *J. Geophys. Res.*, 111(2), pp. 1-9., DOI: 10.1029/2005JB003629.
- Bruyninx, C. – Legrand, J. – Fabian, A. – Pottiaux E., 2019. GNSS metadata and data validation in the EUREF Permanent Network, *GPS Solut* 23: 106. DOI: 10.1007/s10291-019-0880-9.
- Dach, R. – Walser, P. 2013. Bernese GNSS Software Version 5.2 Astronomical Institute, University of Bern
- Herring, T. A. 1992. Modeling Atmospheric Delays in the Analysis of Space Geodetic Data. *Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy*, (36), pp. 157-164.
- Hobiger, T. – Ichikawa, R. – Koyama, Y. – Kondo, T. 2008. Fast and accurate ray-tracing algorithms for real-time space geodetic applications using numerical weather models *Journal of Geophysical Research*, VOL. 113, D20302, DOI: 10.1029/2008JD010503
- Hopfield, H. S. 1969. Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data, *Journal of Geophysical Research* 74(18). pp. 4487-4499.
- Horányi, A. – Ihász, I. – Radnóti, G. 1996: ARPEGE/ALADIN: A numerical weather prediction model for Central-Europe with the participation of the Hungarian Meteorological Service, *Időjárás*, 100. pp. 277-301.
- Juni, I. – Rózsa, Sz. 2019. Validation of a New Model for the Estimation of Residual Tropospheric Delay Error Under Extreme Weather Conditions. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(1), pp. 121-129.
- Landskron, D. – Böhm, J. 2018. VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, 92(4), pp. 349-360., DOI: 10.1007/s00190-017-1066-2
- Nafisi, V. – Urquhart, L. – Santos, M. C. – Nievinski, F. G. – Bohm, J. – Wijaya, D. D. – Schuh, H. – Ardalan, A. A. – Hobiger, T. – Ichikawa, R. – Zus, F. – Wickert, J. – Gegout, P. 2012. Comparison of Ray-Tracing Packages for Troposphere Delays. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*. 50. pp. 469-481. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2160952.
- Niell, A. E. 1996. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B2), pp. 3227-3246., DOI: 10.1029/95JB03048
- Niell, A. E. 2000. Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS. *Earth, Planets and Space*, 52(10), pp. 699-702., DOI: 10.1186/BF03352267
- Marini, W. 1972. Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile. *Radio Science*, 7(2), pp. 223-231.
- Martellucci, A. 2012. Galileo reference troposphere model for the user receiver. *ESA-APPNG-ReF/00621-AM v2*, Vol. 7.
- ISO – International Organization for Standardization. 1975. Standard Atmosphere. ISO 2533:1975, *Int. Stand. Organ.*, Vol. 2533.
- Rocken, C. – Sokolovskiy, S. – Johnson, J. M. – Hunt, D. 2001. Improved mapping of tropospheric delays. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(7), pp. 1205-1213., DOI:10.1175/1520-0426(2001)018<1205:IMOTD>2.0.CO;2
- Rózsa, Sz. – Weidinger, T. – Gyöngyösi, A. Z. – Kenyeres, A. 2012. The role of GNSS infrastructure in the monitoring of atmospheric water vapor. *Időjárás / Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* 116, pp. 1-20.
- RTCA (Firm). 2013. SC-159. Minimum Operational Performance Standards For GPS Local Area Augmentation System Airborne Equipment. RTCA, Incorporated.



Juni Ildikó
doktorandusz

BME Általános- és Felsőgeodézia
Tanszék
juni.ildiko@gmail.com



Dr. Rózsa Szabolcs
egyetemi docens

BME Általános- és Felsőgeodézia
Tanszék
rozsa.szabolcs@emk.bme.hu



Dr. Laky Piroska
egyetemi docens

BME Általános- és Felsőgeodézia
Tanszék
laky.piroska@emk.bme.hu