

Troposferikus maradék ellentmondások becslése az életbiztonságra veszélyes GNSS-alkalmazások esetén

Rózsa Szabolcs – Ambrus Bence – Juni Ildikó – Ober Pieter Bastiaan – Mile Máté

DOI: <https://doi.org/10.30921/GK.70.2018.5.1>

1. Bevezetés

A Globális Navigációs Műhold-rendszerek (GNSS) magas integritásigényű alkalmazásai esetében a rendszer fő paramétere annak belső megbízhatósága. Ezt a jellemzőt a védelmi szintek bevezetésével számszerűsítik, ami tulajdonképpen a pozíciómeghatározás hibáinak felülbecslése valamilyen nagyon kicsiny valószínűségi szinten. A felhasználó a védelmi szint előjelzéséhez egy, a helymeghatározás hibájára vonatkozó modellt használ, amely azonban a műhold-vevő távolságmérése következtében fellépő hibák modelljeinek függvénye. Annak érdekében, hogy a védelmi szint kellően konzervatív becslést adhasson, az összes fellépő hibára vonatkozó modellnek önmagában is konzervatív becslőnek kell lennie. Cikkünkben a lehetséges hibaforrások egyikének – a troposféra által okozott maradék hibáknak – a konzervatív modellezésével foglalkozunk.

A GNSS esetében a geocentrikus rendszerben végrehajtott helymeghatározást a műhold és a vevő közötti távolság meghatározására vezetjük vissza, amelyet a mérőjelek terjedési idejének mérésével hajtunk végre. Az elektromágneses jelek a troposzférán való áthaladásuk során jelentős késleltetéseket szenvednek, melyek hatását rendszerint empirikus modellekkel csökkentik.

Magas integritásigényű felhasználások esetében, mint amilyen például a repülőgépes navigáció, az említett modellek validációjára van szükség annak érdekében, hogy a felhasználók biztonsággal döntheszenek a fedélzeti GNSS-vevők által szolgáltatott koordinátamegoldás megbízhatóságáról.

A jelenleg de facto szabványként alkalmazott ajánlás (RTCA 2006) a troposferikus maradék hibák esetében túlságosan konzervatívnak mondható, ami ugyan előnyös lehet a biztonság szemszögéből, azonban a rendszer elérhetőségét és a helymeghatározási

szolgáltatás folytonosságát negatívan befolyásolja.

Az RTCA MOPS (Radio Technical Commission for Aeronautics Minimum Operational Performance Standards) dokumentumban ismertetett troposzféramodell egy globálisan konstans értékben (0,12 m) maximálja a zenit irányú maradék hiba szórását. Habár a szabályozás nem részletezi e konstans megállapításának módját, Collins és Langley (1998) eredményei is alátámasztják a 0,12 méteres értéket.

Van Leeuwen et al. (2004) is tanulmányozták a fent említett modellt Hollandia területén, ami alapján arra a megállapításra jutottak, hogy az túlságosan konzervatív. Ez alapján tehát úgy tűnik, hogy valós igény mutatkozhat egy új, kevésbé konzervatív, azonban a biztonságot nem kompromittáló modell kifejlesztésére.

Mivel a közeljövőben várhatóan a többfrekvenciás GNSS-vevők köré csoportosulni az alkalmazások jelentős része, az ionoszférikus hatások egyre kevésbé lesznek meghatározó hibaforrások. A troposféra által okozott késleltetések azonban nem küszöbölhetők ki a különböző vivőfrekvenciák alkalmazásával, ezért továbbra is szükség lesz minél pontosabb, nagy megbízhatóságú empirikus modellekre.

Az alábbi cikkben egy új, fejlett eljárást mutatunk be a troposferikus maradék ellentmondások becslésére, melynek alapja az általános extrémérték-elmélet. Annak érdekében, hogy a modell mind a biztonság, mind az elérhetőség szempontjából optimális legyen, figyelembe veszi a maradék ellentmondások szezonális és éghajlati függését is.

2. A troposferikus maradék hibák szerepe a GNSS-rendszerek integritásában

A GNSS rendszerek esetében a rendszer integritása a korábban említett

védelmi szintek segítségével számszerűsíthető. A védelmi szintek a helymeghatározás hibájának felülbecsléseként képzelhetők el, melyek meghaladása csak rendkívül kicsiny valószínűségi szinten megengedett (ez a szint jellemzően 10^{-7} – 10^{-9} között van). Amikor a kiszámított védelmi szint meghaladja az adott alkalmazáshoz szükséges elfogadható mértéket, a felhasználó már nem bízhat a meghatározott pozícióban és alternatív helymeghatározási módokhoz kell fordulnia. A felhasználó a védelmi szintet különböző modellekkel számíthatja, melyek a helymeghatározáshoz használt távméréseket terhelő hibák felülbecslésével jönnek létre.

Az RTCA (2006) ajánlása maradék hibaértékeket határoz meg a pálya és az órahibákra, a vevőantennát terhelő zajra, valamint az ionoszférikus és troposzférikus késleltetésekre. Ezen ellentmondások mindegyike zérus középértékű normális eloszlás szórásával írható le. A műhold irányú hiba szórása:

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,flt}^2 + \sigma_{i,UIRE}^2 + \sigma_{i,air}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 \quad (1)$$

ahol:

- σ_i az i -edik műholdhoz tartozó pszeudótávolság mérés szórása [m],
- $\sigma_{i,flt}^2$ az időben gyorsan valamint hosszabb távon változó korrekciók maradék hibájának a varianciája [m^2],
- $\sigma_{i,UIRE}^2$ a ferde irányú ionoszférikus késleltetés maradék hibájának varianciája [m^2],
- $\sigma_{i,air}^2$ a repülőgépen lévő vevő hibához tartozó variancia [m^2],
- $\sigma_{i,tropo}^2$ a troposzférikus késleltetés maradék hibájának varianciája [m^2].

A maradék troposzférikus ellentmondás az alábbiak szerint számítható az i -edik műhold irányában:

$$\sigma_{i,tropo}^2 = \sigma_{TVE} \cdot m(\theta_i) \quad , \quad (2)$$

$$m(\theta_i) = \frac{1.001}{\sqrt{0.002001 + \sin^2 \theta_i}} \quad , \quad (3)$$

ahol a σ_{TVE} a zenitirányban meghatározott troposzférikus maradék hiba (értéke 0,12 méter) θ_i pedig a műhold

magassági szöge. Megfigyelhető, hogy a zenit irányú hiba egy globálisan konstans érték, mely elhanyagolja a troposzférikus késleltetések meghatározási pontosságának a földrajzi szélességtől és az évszakoktól való függését. Ezáltal azonban a világ számos területén túlságosan konzervatív becslést szolgáltat.

A felsorolt tényezők együttes figyelembevételével megállapítható a teljes maradék hiba varianciája, ami alapján kiszámítható a horizontális valamint a vertikális védelmi szint (horizontal/vertical protection level – HPL/VPL):

$$HPL = K_H \cdot d_{major}, \quad (4)$$

$$VPL = K_V \cdot d_U, \quad (5)$$

ahol K_H és K_V a különböző repülőgéplandolási eljárásoktól függő konstansok, d_{major} [m] pedig a hibaellipszis főnyitengelyéhez tartozó bizonytalanságot jellemzi:

$$d_{major} = \sqrt{\left(\frac{d_{east}^2 + d_{north}^2}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{d_{east}^2 - d_{north}^2}{2}\right)^2 + d_{EN}^2}} \quad (6)$$

A képletben szereplő tagok jelentése a következő:

- d_{east}^2 a keleti koordinátatengely mentén értelmezett hibaeloszlást felülbecslő modell varianciája [m²],
- d_{north}^2 az északi koordinátatengely mentén értelmezett hibaeloszlást felülbecslő modell varianciája [m²],
- d_{EN}^2 a modelleloszlás kovarianciája a keleti és északi koordinátatengelyek mentén [m],
- d_U^2 a függőleges tengely mentén értelmezett hibaeloszlást felülbecslő modell varianciája [m²].

Az összes modellvariancia számítása a helymeghatározási hiba megfelelő irányban vett parciális deriváltjaival történik.

A HPL és a VPL értékek felhasználásával a rendszer ellenőrizheti, hogy az aktuálisan elérhető pontosság megfelel-e a navigációs követelményeknek.

3. A modellfejlesztés módszertana

A navigációs kiegészítő rendszerekre vonatkozó általános integritásbeli követelményeket az ICAO (2006) foglalja össze. Ez alapján a GNSS-helymeghatározó rendszer a megközelítési eljárások esetében 2×10^{-7} -es

szignifikancia szinten vizsgálandó. Amennyiben egy időben egyetlen megközelítést feltételezünk és egy megközelítés hosszát 150 másodpercre becsüljük, akkor a rendszer integritásvesztésének visszatérési ideje hozzávetőlegesen 25 év.

Mivel nem állnak rendelkezésre a hibákra vonatkozó adatok a rendszer teljesítményének vizsgálatához, így egy valószínűségi alapokon nyugvó megközelítésre van szükség. Első megfontolásra a maradék hibák becslése történhetne a műhold-vevő irányban a légköri paraméterek ismeretében sugárkövetéssel meghatározott „tényleges” késleltetési értékek és az RTCA-troposzféra modell által szolgáltatott késleltetési értékek különbségképzésével, majd az így kapott eredményekre egy normális eloszlás illesztésével. Ezután a maradék ellentmondások bármilyen szignifikanciaszinten becsülhetők lennének. A probléma abban rejlik, hogy a troposzférikus késleltetés maradék hibái, az eloszlás szárnyai általában nem követik a normális eloszlás lefutását. Az 1. ábrán egy tipikus, a normális eloszláshoz tartozó valószínűségi ábra látható a hidrosztatikus troposzférikus késleltetések maradék hibáira vonatkozóan. Az ábrából látszik, hogy az

eloszlás szárnyain a hibák nem követik a normális eloszlást.

Annak érdekében, hogy az eloszlás szárnyainak jellegét is figyelembe vegyük, a maradék hibák vizsgálatához az extrémérték-elemzést hívtuk segítségül. Ez a matematikai eljárás széles körben használt például árvízi vízszintek becslésénél, de újabban a GNSS és a hozzá tartozó kiegészítő rendszerek vizsgálatára is alkalmazzák (Ober 2014).

A Fischer-Tippett-Gnedenko tétel kimondja, hogy független és azonos eloszlású valószínűségi változók maximuma megfelelő normalizálás után az alábbi három lehetséges eloszlás felé konvergál, nevezetesen a Gumbel-, a Fréchet- vagy a Weibull-eloszlás felé.

A három eloszlás jellemzői a következők:

$$H(x) = \begin{cases} 0 & \text{ha } x \leq 0 \\ \exp\{-x^{-\alpha}\} & \text{ha } x > 0 \end{cases} \quad (7)$$

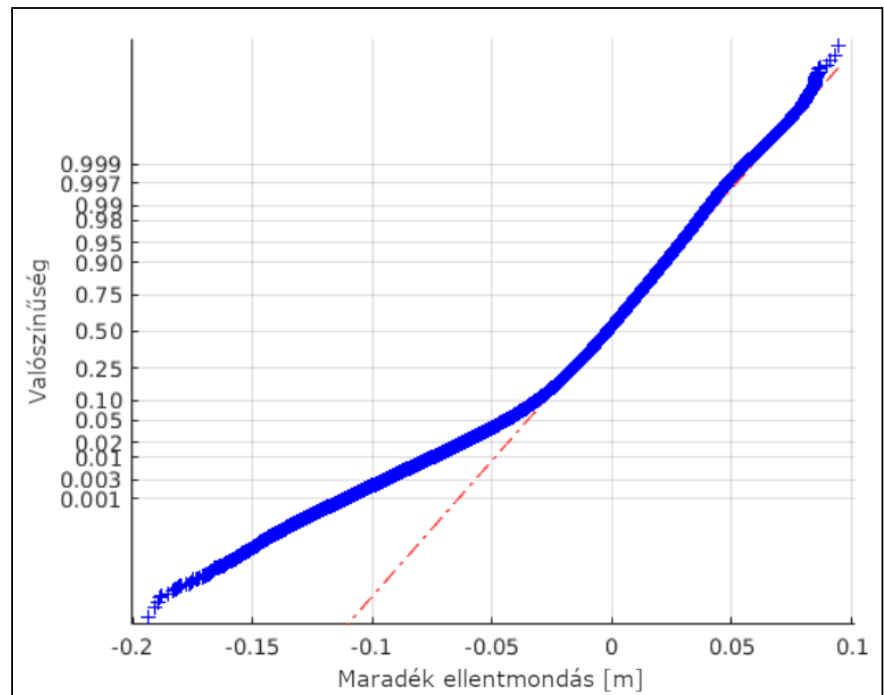
a Fréchet-eloszlás esetében,

$$H(x) = \begin{cases} \exp\{-(-x)^{-\alpha}\} & \text{ha } x < 0 \\ 1 & \text{ha } x \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

a Weibull eloszlás esetében és

$$H(x) = \exp\{-\exp\{-x\}\} \quad x \in \mathbb{R} \quad (9)$$

a Gumbel-eloszlás esetében.



1. ábra. A hidrosztatikus troposzférikus késleltetések maradék hibáinak valószínűségi ábrája az északi szélesség 40° és 50° közötti sávra vonatkozóan 2000 és 2016 között. A maradék hibák az RTCA-troposzféramodell által becsült és az ECMWF ERA-Interim numerikus időjárásmodellből sugárkövetéssel levezetett referenciaadatok különbségei.

A Jenkinson (1995) által bevezetett általánosított extrémérték-elmélet (Generalized Extreme Value theory – GEV) egyesíti a fenti három eloszlást egy általános extrémérték-eloszlással. Az eloszlás képlete a következő:

$$H(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left[1 - \frac{k(x-\xi)}{\alpha}\right]^{\frac{1}{k}}\right\} & \text{ha } k \neq 0 \\ \exp\left\{-\exp\left\{\frac{-x-\xi}{\alpha}\right\}\right\} & \text{ha } k = 0 \end{cases} \quad (10)$$

ahol az x változót a $\xi + \alpha/k$ határolja felülről, ha $k > 0$, illetve alulról, ha $k < 0$. ξ és α az ún. helyzeti és skálaparaméterek, k pedig az ún. alaktényező. Az alaktényező befolyásolja, hogy végső soron melyik eloszlással van dolgunk:

- $k > 0$ esetében a Fréchet-eloszlással,
- $k = 0$ esetében a Gumbel-eloszlással,
- $k < 0$ esetében pedig a Weibull-eloszlással.

4. A maradék troposzférikus késleltetésekre vonatkozó modell levezetése

Annak érdekében, hogy egy troposzféramodell megfelelőségét vizsgálhassuk, a maradék hibák kiszámítására van szükség. Az RTCA-modell által szolgáltatott késleltetésbecsléseket össze kell hasonlítani a troposzférikus késleltetések „valódi” értékével. Mivel ezen „valódi” értékek nem ismertek, a zenit irányú troposzférikus késleltetésekre vonatkozó referenciaként numerikus időjárás modellek adataira épülő és sugárkövetéssel meghatározott adathalmazt használtunk. Az extrémérték-analízist a két adatsor különbségeként kapott maradék hibákra alkalmaztuk.

5. Meteorológiai adatok

A maradék hibák modellezése számos különböző meteorológiai adathalmaz felhasználásával történhet. Collins és Langley (1998) az UNB3 troposzféramodell maradék hibáinak meghatározására például az Észak-Amerikában felbocsátott rádiószondák adatait használták és kimutatták, hogy a maximális maradék hiba zenit irányban 60 cm körül mozog. Ugyanakkor, mivel a rádiószondás adatok nem fedik le a teljes Föld felszínét, megfelelő sűrűséggel,

ezért esetünkben más adatsor felhasználása volt szükséges.

A bemenő meteorológiai adatok kiválasztásánál az alábbi szempontokat vettük figyelembe:

- megfelelően hosszú időt magába foglaló adatsorra van szükség, ugyanis az extrémérték-elmélet az eloszlás szélein extrapolációt alkalmaz;
- a meteorológiai adatoknak stacionáriusnak kell lenniük, valamint konzisztens feldolgozási eljárással kell őket levezetni a vizsgált időszakra vonatkozóan;
- az adathalmaznak megfelelően kell jellemeznie a meteorológiai paraméterek szezonális és éghajlati változását.

A feltételek teljesítése érdekében a Középtávú Időjárás Előrejelzések Európai Központja (European Center for Medium Range Weather Forecasts – ECMWF) által szolgáltatott ERA-Interim (Dee et al. 2011) $1^\circ \times 1^\circ$ felbontású adatsoraira támaszkodtunk. Habár az adatok 1979-ig visszamenően rendelkezésre állnak, vizsgálatunk a 2000 és 2016 közötti 17 éves periódusra terjedt ki. Az adatsor napi négy értéket tartalmazott, 00, 06, 12 és 18 UTC időpontokra vonatkozóan. A kiválasztott intervallum egyrészt lehetőséget adott, hogy minimalizáljuk a klímaváltozás által okozott hatásokat, másrészt a 25 éves visszatekintési időt tekintve, az extrapoláció szempontjából is kielégítőnek mondható.

A műhold irányú troposzférikus késleltetés becslése a numerikus időjárásmodell adatsorának felhasználásával, a sugárkövetés módszerével történt. Mivel az ECMWF-modell legfelsőbb szintje felett található semleges atmoszféra még jelentősen befolyásolja a jelterjedést (Rózsa 2014), ezért az adatsort kiterjesztettük 86 kilométer magasságig a Nemzetközi Szabványos Atmoszféra (International Standard Atmosphere – ISA) adataival. A magasságokat és a hozzájuk tartozó meteorológiai paramétereket Rocken et al. (2001) által ismertett módszerrel felülmintavételeztük.

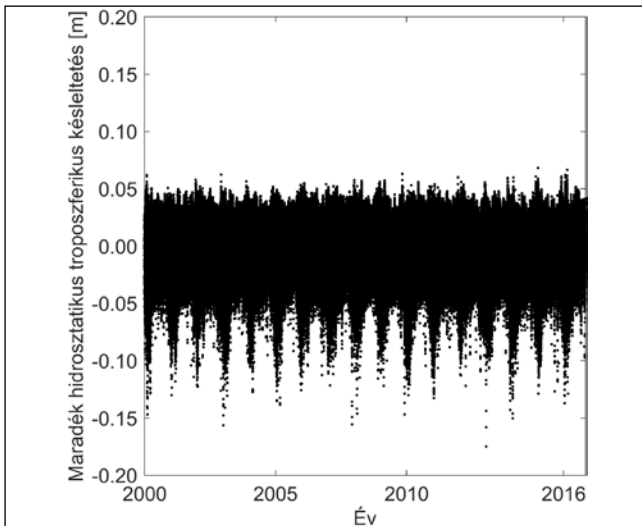
6. A maradék hibák modellezése

A maradék hibák modellezéséhez először előállítottuk a troposzférikus

késleltetések referenciaértékét az ECMWF meteorológiai adatokra épülő sugárkövetéssel (Boehm–Schuh 2003). A sugárkövetést minden rácsponthoz zenit irányban, valamint 3° -os, 5° -os, 10° -os és 45° -os magassági szögekre hajtottuk végre mind a hidrosztatikus, mind a nedves késleltetés esetében. Ezek közül további felhasználásra jelen munkánkban csak a zenit irányú eredmények kerültek.

Ezután a maradék hibákat megkaphattuk, ha az empirikus modellek által becsült késleltetés értékeit levontuk a referenciaadatokból. Az éghajlati és szezonális hatások a maradék hibák idősorában is felfedezhetők. A 2. ábra a hidrosztatikus késleltetés maradék hibáit mutatja a 31° és 40° északi szélességek között elhelyezkedő sávban. Az ábráról leolvasható, hogy a maradék hibák terjedelmének jelentős szezonális fluktuációja van. Annak érdekében, hogy az extrémérték-elemzés elvégezhető legyen, először az adatsor normalizálására van szükség. Ehhez valamilyen, az egyes napokhoz tartozó maradék hibák szórásának szezonális változását jól leíró függvény alkalmazható. Az így megkapott normalizált ellentmondásokra már végrehajtható az extrémérték-elemzés. Végül, a maximális maradék troposzférikus késleltetés a korábban használt függvény segítségével az év bármely napjára kiszámítható. A 2. ábrából ugyanakkor az is látszik, hogy a maradék hibák a zérushoz képest jelentős eltolódással (ún. bias-szel) rendelkeznek, melynek szintén van egy szezonális váltakozása. Elméleti szempontból szükség lenne a bias érték figyelembe vételére, azonban a modellalkotás során a normalizáláskor mi zérus átlagot feltételeztünk. Ezen egyszerűsítés oka, hogy amennyiben a bias előzetesen levonásra kerül, később, a védelmi szint számításakor ugyanúgy szükség van a visszaállítására. Mivel az RTCA MOPS javaslata alapján a védelmi szinteket zérus középérték feltételezésével és egyszerű hibaterjedéssel történő levezetéssel számolják, az összhang megtartása érdekében mi is ezt a feltételezést választottuk a normalizációs lépés során.

A maradék hibák normalizálása érdekében először egy periodikus függvényt illesztettünk az ellentmondások szórásának napi értékeire,



2. ábra. A hidrosztatikus maradék ellentmondások időszora a 40° és 30° északi szélességek közötti sávban.

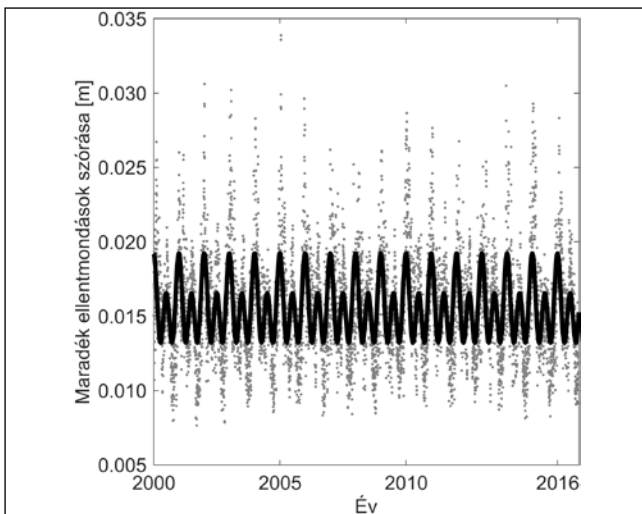
melyben figyelembe vettük a szezonális változás éves, valamint féléves összetevőit (lásd 3. ábra).

A napi szórásértékekre vonatkozó periodikus függvény:

$$\sigma(DOY) = A_0 + A_1 \cos\left(\frac{DOY - DOY_0}{365.25} 2\pi\right) + A_2 \cos\left(\frac{DOY - DOY_0}{365.25} 4\pi\right) \quad (11)$$

ahol az ismeretlen paraméterek a következők:

- A_0 a maradék hibák napi szórásértékeinek átlaga a teljes időszorra vonatkozóan,
- DOY_0 a napi maradék hibák éves extrémértékéhez tartozó nap (a fázis),
- A_1 a szezonális változás éves összetevőjének amplitúdója,



3. ábra. A napi maradék hibák szórásának szezonális változása a 31° és 40° északi szélességek között elhelyezkedő sávban, valamint az éves és féléves periodicitást figyelembe vevő illesztett modell.

- A_2 a szezonális változás féléves összetevőjének amplitúdója.

A napi maradék ellentmondásokhoz tartozó szórás értékek és az illesztett modell függvény a 3. ábrán látható.

Ezután a maradék hibák normalizálása történt meg az alábbi módon:

$$\delta_n = \frac{\delta}{\sigma(DOY)} \quad (12)$$

A következő lépésben a normalizált

maradék ellentmondások extrémérték-elemzését hajtottuk végre. Ennek során összesen 17 éves extrémérték (maximum és minimum) került meghatározásra. A korábban ismertett GEV eloszlást ráillesztettük az extrémértékekre, majd ebből extrapolálással meghatároztuk a 25 éves visszatérési időhöz tartozó pozitív és negatív extrémértékeket. A két érték közül a nagyobb abszolút értékűt választottuk, mint a normalizált maradék ellentmondások maximális várható értékét ($\Delta_{n,max}$).

Mivel az RTCA MOPS ajánlása szerint a védelmi szinteket normális eloszlású valószínűségi változók szórásából

$$\sigma_{max}(DOY) = \frac{\Delta_0}{K} + \left(A_0 + A_1 \cos\left(\frac{DOY - DOY_0}{365.25} 2\pi\right) + A_2 \cos\left(\frac{DOY - DOY_0}{365.25} 4\pi\right) \right) \sigma_{n,max} \quad (15)$$

kiindulva számítják, ezért arra volt szükség, hogy a becsült maximális hibát egy szórás jellegű mennyiséggé alakítsuk át:

$$\sigma_{n,max} = \frac{\Delta_{n,max}}{K} \quad (13)$$

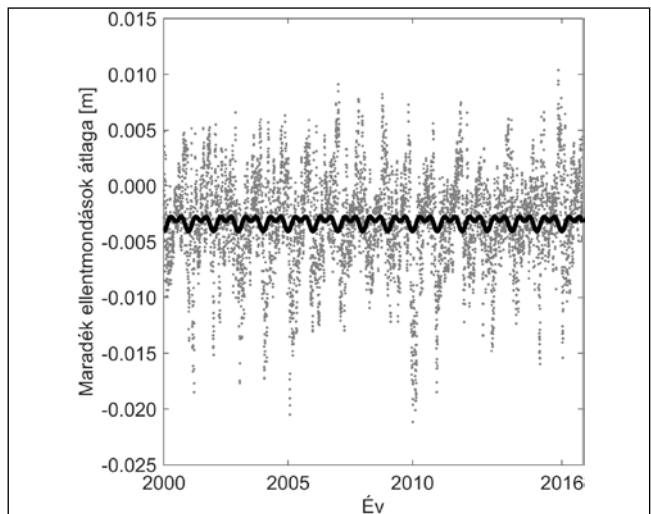
ahol $K = 5.33$, figyelembe véve a standard normális eloszlást a $1 \cdot 10^{-7}$ valószínűségi szinten.

Figyelembe kell vennünk azonban, hogy a normalizálás zérus középpérték feltételezésével történt. Amennyiben nem ez az eset áll fent, úgy a modell elvesztheti felülbecslő jellegét. Ezt elkerülendő, a meghatározott maximális szórás értéket megnöveltük egy konstans értékkel, ami az eredeti maradék hibák legnagyobb napi középpértékével egyezik meg. Így tehát a maximális szórás a következőképpen alakul:

$$\sigma_{max}(DOY) = \frac{\Delta_0}{K} + \sigma(DOY) \quad (14)$$

ahol Δ_0 egy eltolási paraméter. A maximális bias értékek becslése szintén extrémérték-elemzéssel történt, ezáltal a napi maradék ellentmondások középpértékeire illetve az extrémérték-eloszlást (lásd 4. ábra). A modell összhangjának fenntartása érdekében a napi bias értékeket szintén 25 éves visszatérési idő figyelembevételével határoztuk meg.

Végül, a maximális maradék troposzférikus késleltetés értéke az év bármely napjára (DOY) az alábbi képlettel számítható:



4. ábra. A napi maradék hibák átlagának szezonális változása, valamint a rájuk illesztett, éves és féléves periódusokat figyelembe vevő modellfüggvény.

7. A levezetett maradék troposzférikus késleltetési modellek

Habár a maradék hibák modellezése rácsponthonként is elvégezhető, célszerű a lehető legegyszerűbb modell létrehozására törekedni, ugyanis végső soron ezeket a modelleket a GNSS-vevők firmware-jében kell tárolnunk. A RTCA MOPS ajánlásának egyik előnye pontosan az egyszerűségében rejlik, ugyanis mindössze egyetlen konstans érték eltárolására van szükség ahhoz, hogy a zenit irányú maximális maradék troposzférikus késleltetést meghatározhassuk a Föld bármely pontján.

Annak érdekében, hogy a számítás egyszerűségének megőrzése mellett egy kevésbé konzervatív, de a biztonságot nem kompromittáló modellt szolgáltatassunk a maradék hibák becsléséhez, összesen három különböző modellszintet alakítottunk ki (Advanced Residual Tropospheric Error model – ARTE):

- ARTE Szezonális Sávos Modell (ARTE Band Seasonal Model – ARTE-BSM): ezen a szinten a modell az összes olyan paramétert szolgáltatja, mellyel figyelembe vehető a szezonális változás az adott 10°-os szélességi sávon belül, így tehát nem csak az éghajlati, hanem a maradék hibák szezonális változása is modellezett.
- ARTE Konstans Sávos Modell (ARTE Band Constant Model – ARTE-BCM): ez a modellszint egyetlen értéket határoz meg a maximális maradék hiba mértékére, minden 10°-os szélességi sávban. A szezonális változást tehát elhanyagolja a modell, viszont az éghajlati változást figyelembe veszi.
- ARTE Globális Konstans Modell (ARTE Global Constant Model – ARTE-GCM): ez a modell egyetlen globális konstans értéket határoz meg a Föld teljes területére. Habár a legegyszerűbb, a maradék hibáknak mind a szezonális, mind az éghajlati függését elhanyagolja.

8. ARTE Szezonális Sávos Modell

Az ARTE-BSM modell a (15)-ben szereplő összes paramétert (Δ_0 , A_0 , A_1 , A_2 , DOY_0 , $\sigma_{n,max}$) szolgáltatja az egyes 10°-os

szélességi sávokra. A különböző sávokra vonatkozó hidrosztatikus és nedves késleltetésekhez tartozó együtthatókat az 1., illetve a 2. táblázat tartalmazza.

Az ARTE-BSM modell paraméterei az egyes sávokra a hidrosztatikus maradék késleltetés esetében

1. táblázat.

Sáv	Δ_0 [mm]	A_0 [mm]	A_1 [mm]	A_2 [mm]	A_3 [mm]	A_4 [mm]	DOY_0 [nap]	$\sigma_{n,max}$
Északi félteke								
90 - 81	87,8	14,1	2,8	0,4	-0,2	0,2	2	2,0
80 - 71	51,0	21,6	6,0	1,6	-0,1	0,4	0	1,3
70 - 61	43,2	22,9	8,4	1,5	0,1	0,0	0	1,3
60 - 51	29,7	24,3	10,0	1,8	0,5	0,1	1	1,5
50 - 41	26,6	20,9	7,0	2,5	2,0	0,7	0	1,7
40 - 31	20,7	15,6	1,3	1,8	2,3	1,1	0	2,1
30 - 21	15,2	11,6	-3,6	0,4	1,5	1,0	3	2,7
20 - 11	16,0	7,1	-2,1	0,1	0,6	0,4	8	3,9
10 - 0	17,5	4,6	-0,2	-0,1	0,4	0,2	1	3,3
Déli félteke								
1 - 10	17,3	5,0	-0,2	-0,5	0,4	0,2	3	2,6
11 - 20	15,3	6,7	0,8	-0,3	0,5	0,4	2	3,6
21 - 30	10,6	10,2	0,3	-0,9	0,7	0,5	2	2,3
31 - 40	21,1	16,4	-2,8	-1,6	0,5	0,1	0	2,0
41 - 50	41,8	25,1	-3,4	-1,5	0,0	0,0	0	1,4
51 - 60	73,9	31,3	-3,4	-1,3	-0,9	0,4	2	1,3
61 - 70	101,1	26,6	-5,2	-2,1	-1,0	0,5	0	1,8
71 - 80	97,1	23,0	-8,6	-5,4	-0,3	-0,4	1	2,8
81 - 90	92,4	13,2	-5,4	-3,3	-0,3	0,0	1	4,0

Az ARTE-BSM modell paraméterei az egyes sávokra a nedves maradék késleltetés esetében

2. táblázat.

Sáv	Δ_0 [mm]	A_0 [mm]	A_1 [mm]	A_2 [mm]	A_3 [mm]	A_4 [mm]	DOY_0 [nap]	$\sigma_{n,max}$
Északi félteke								
90 - 81	70,4	8,5	-3,8	-2,7	0,8	1,5	6	2,9
80 - 71	54,6	15,5	-5,6	-3,5	1,1	1,5	1	1,9
70 - 61	55,7	22,3	-6,7	-3,9	1,8	1,5	2	1,6
60 - 51	59,8	29,0	-6,0	-4,5	1,8	1,4	3	1,2
50 - 41	60,2	37,3	-6,1	-5,8	0,8	1,2	1	1,1
40 - 31	72,5	47,7	-10,7	-6,7	2,1	1,1	2	1,0
30 - 21	89,9	59,7	-13,6	-5,1	2,8	0,0	0	0,8
20 - 11	117,6	57,0	-1,2	-1,4	1,3	-5,4	0	1,0
10 - 0	58,6	46,8	6,7	1,6	1,1	2,9	1	0,9
Déli félteke								
1 - 10	74,6	55,3	2,4	-6,5	3,4	-2,0	2	0,7
11 - 20	120,1	61,0	9,0	2,2	2,0	-1,3	1	0,9
21 - 30	100,8	53,6	9,5	3,9	1,3	1,0	0	0,8
31 - 40	111,3	42,6	7,0	5,1	0,1	1,1	2	0,9
41 - 50	97,1	34,1	4,6	4,5	-0,2	0,7	0	1,1
51 - 60	94,6	25,1	2,3	3,0	-0,5	0,5	1	1,1
61 - 70	86,4	17,2	1,0	1,5	-0,4	0,2	2	1,3
71 - 80	60,8	13,9	6,6	4,4	-0,8	-0,2	1	2,5
81 - 90	48,2	9,2	5,9	3,8	-0,7	-0,5	3	5,1

Ennek a modellnek a legnagyobb előnye, hogy mind a szezonális, mind az éghajlati változásokat figyelembe veszi a maximális maradék késleltetés becslésekor (lásd 5. ábra). A modellel továbbá egymástól függetlenül megbecsülhető a maximális maradék késleltetési hiba zenit irányú hidrosztatikus és a nedves összetevője is, ezáltal akár eltérő lekép-zési függvényt is felhasználhatunk az egyes komponensekre.

9. ARTE Konstans sávós modell

Habár az ARTE-BSM modell figyelembe veszi a szezonális és az éghajlati változást, bizonyos esetekben a számítási komplexitás problémát okozhat. Ennek elkerülésére egy egyszerűbb modell is megalkotásra került.

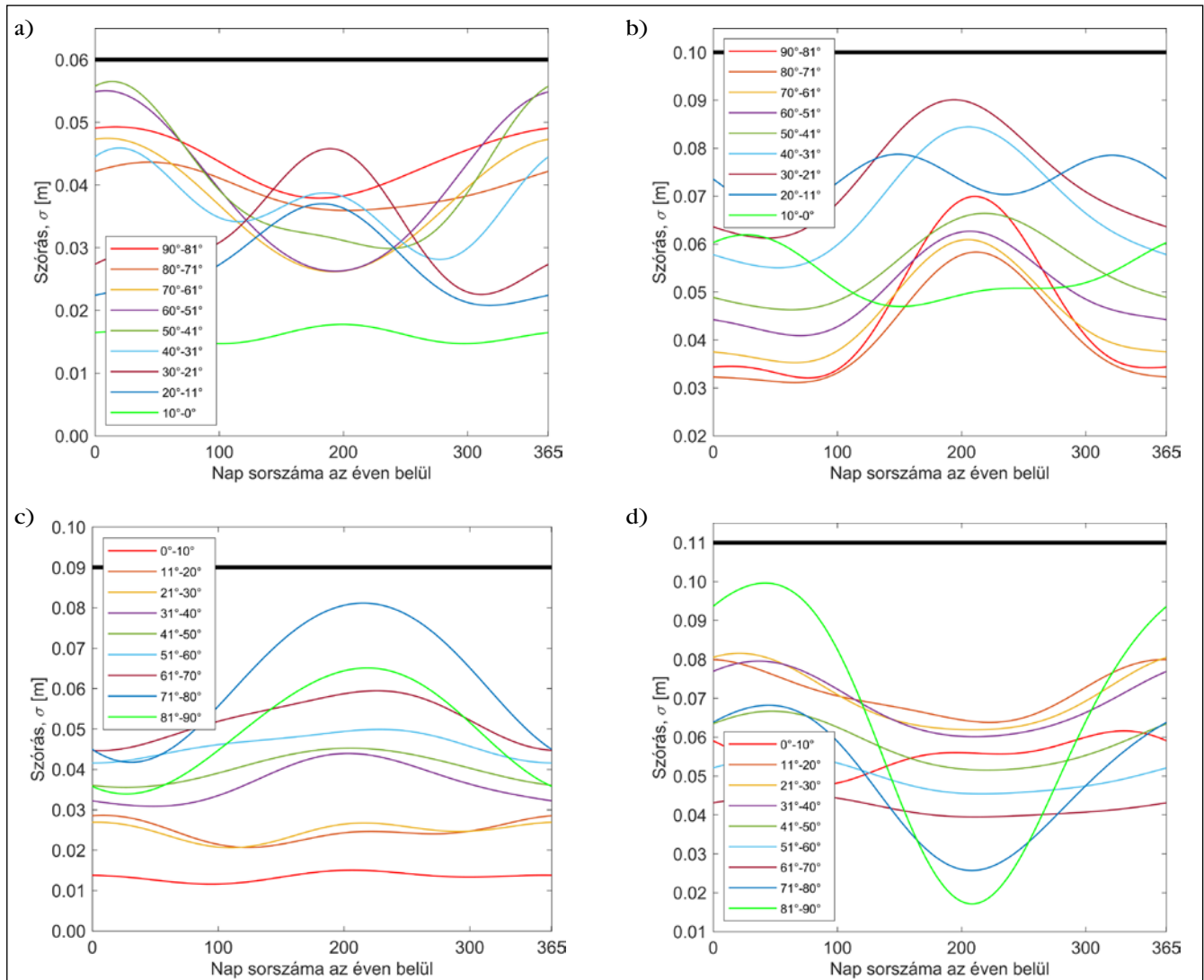
Az ARTE-BCM a szezonális sávós modellből került levezetésre, az egyes sávokra vonatkozó, (15) szerint kiszámított maradék késleltetések éves maximumának meghatározásával. Az i -edik sávra vonatkozóan:

$$\sigma_{\max,i} = \max(\sigma_{\max}(\text{DOY}, i)) \quad (16)$$

Az ARTE-BCM paraméterei

Sáv	Északi félteke		Déli félteke	
	Hidrosztatikus σ_{\max} [m]	Nedves σ_{\max} [m]	Hidrosztatikus σ_{\max} [m]	Nedves σ_{\max} [m]
90 - 81	0,05	0,06	0,08	0,07
80 - 71	0,05	0,06	0,11	0,07
70 - 61	0,05	0,06	0,08	0,04
60 - 51	0,06	0,06	0,06	0,05
50 - 41	0,06	0,06	0,05	0,06
40 - 31	0,05	0,08	0,04	0,07
30 - 21	0,05	0,08	0,04	0,08
20 - 11	0,04	0,08	0,04	0,09
10 - 0	0,02	0,06	0,02	0,07

3. táblázat.



5. ábra. A maximális maradékkésleltetés-értékek szezonális változása az északi féltekén a hidrosztatikus (a) és a nedves (b), valamint a déli féltekén a hidrosztatikus (c) és nedves (d) komponensekre vonatkozóan.

10. Az ARTE globális konstans modell

Az ARTE-GCM az ARTE-BCM felhasználásával került levezetésre. Mind a hidrosztatikus, mind a nedves maradék késleltetés esetében a korábban bemutatott sávos modell legnagyobb értékeit vettük figyelembe. A 3. táblázat alapján a hidrosztatikus késleltetés esetében ez 0,11 méter, a nedves késleltetés esetében pedig 0,07 méter. Az ezen az értékekből számolt, a teljes troposzférikus késleltetésre vonatkozó szigmaérték jó összhangban van az RTCA ajánlásában megfogalmazott konstans globális értékkel.

11. Műhold irányú maradék troposzférikus késleltetés

Az RTCA ajánlása alapján a maradék hibák kiszámítását a műhold irányában kell elvégezni. Ezért az ARTE-modellek által szolgáltatott zenit irányú késleltetések műhold irányú transzformációjára van szükség. A lépés a megfelelő leképzési függvények alkalmazásával könnyedén elvégezhető, majd a teljes műhold irányú maradék késleltetés az alábbiak szerint számítható:

$$\sigma_{max,STD} = \sqrt{\sigma_{max,ZHD}^2 \cdot m_h^2 + \sigma_{max,ZWD}^2 \cdot m_w^2} \quad (17)$$

ahol m_h és m_w a hidrosztatikus, illetve a nedves összetevőkhöz tartozó leképzési függvényegyütthatók az egyes műholdakra vonatkozóan. Továbbfejlesztve az RTCA-modellt, amely csak egyetlen

leképzési függvény használatára ad lehetőséget, az ARTE-modellek becslésénél az egyes összetevőkre akár eltérő leképzési függvények is alkalmazhatók.

12. A modellek validációja IGS-referenciaadatok felhasználásával

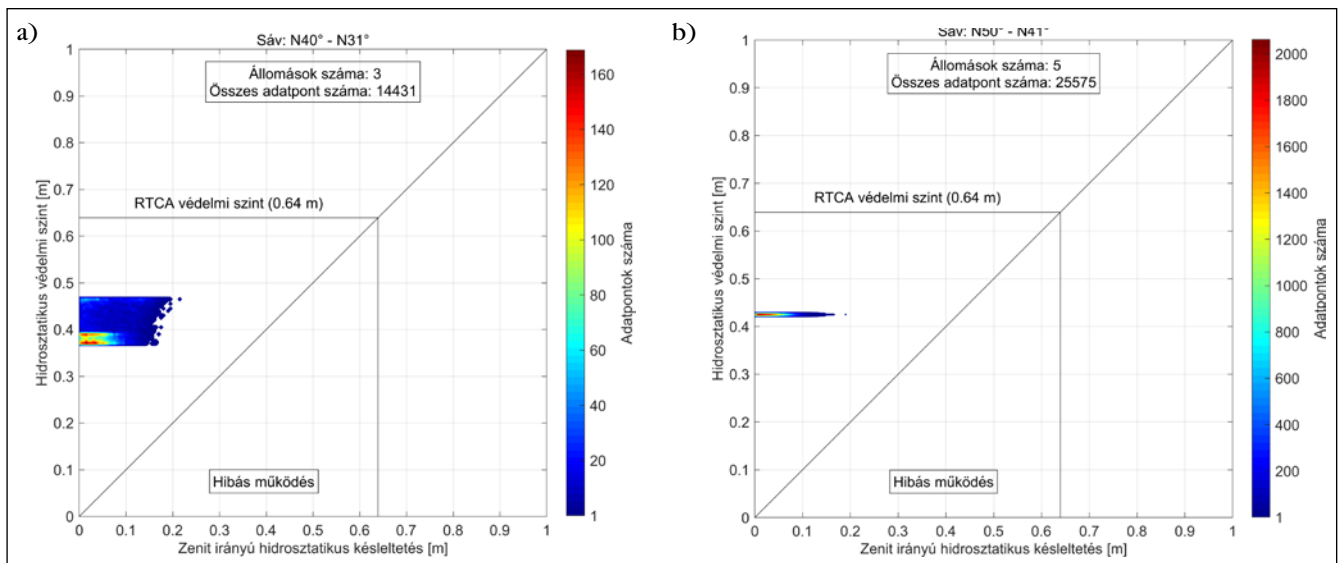
Annak érdekében, hogy a modellek felülbecslő tulajdonságát ellenőrizni tudjuk, a Nemzetközi GNSS Szolgálat (International GNSS Service – IGS) által szolgáltatott troposzférikus késleltetési értékekre épülő validációt végeztünk. Azért esett az IGS-adatok felhasználására a választásunk, mivel a GNSS mérésekből levezetett troposzférikus késleltetések függetlenek a bemenő adatként felhasznált numerikus légköri modellektől. Az egyes IGS-állomásokon mért késleltetési értékek szabadon hozzáférhetők az IGS globális adatközpontján keresztül. Mivel egyes állomásokon jelentős hézagok találhatóak az adatsorokban, így a validáció elvégzése előtt a rendelkezésre álló 300 állomásból 49 olyan állomást választottunk ki, amelyeknél a legzavartalanabb az adatok folytonossága, valamint megfelelően elosztva találhatóak a Föld felszínén. 2000. január 1. és 2017. október 31. közötti időszakban napi egy (12:00 UTC) késleltetésértéket használtunk fel a validációra. Mivel a 81°–90° szélességi sávban sem az északi, sem a déli féltéken nem található állomás, így ezen sávokra vonatkozó modellek validációját nem tudtuk elvégezni.

A teljes, nem modellezett, ún. maradék troposzférikus késleltetésértékeket az RTCA MOPS által becsült értékek IGS-referenciaértékekből történő kivonásával határoztuk meg. Ezeket a maradék hibákat aztán összehasonlítottuk az ARTE-modellek által szolgáltatott értékek alapján kiszámított védelmi szintekkel.

A validáció eredményének szemléltetésére az ún. Stanford-ábrákat használtunk. Az ábrák az IGS-adatok segítségével kiszámolt maradék hibák és az ARTE-BSM (6. a) ábra) valamint az ARTE-BCM (6. b) ábra) által meghatározott védelmi szintek közötti kapcsolatot szemléltetik két szélességi sávra. Mint az az ábrából is látható, a ARTE-BCM esetében a Stanford-ábra egyetlen sávot mutat mindössze, amelyre tulajdonképpen a megfelelő ARTE-BSM-modellből számított védelmi szintek lettek rávetítve.

13. Validáció extrém időjárási körülmények esetén

A horvátországi Zadar környékén rendkívül nagy mennyiségű csapadék hullott 2017. szeptember 10–11 között. Az időjárási megfigyelések alapján napi négy, egyenként hatórás időszakot lefedő csapadéktérképet készítettünk el az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) által rendelkezésre bocsátott nagy felbontású, 0,1° × 0,1°-os ALADIN-időjárásmodell segítségével.



6. ábra. Az ARTE-BSM (a) és az ARTE-BCM (b) modellek validációja két eltérő szélességi sávban. Az ábrán az RTCA MOPS-modell által megadott védelmi szint is feltüntetésre került.

A szeptember 11-én, 6–12 óra közötti csapadéktérkép szerint ebben az időszakban Zadarban 59 mm csapadék hullott.

A validáláshoz szükséges referenciaadatokat a korábban bemutatott sugárkövetés módszeréhez hasonló, de továbbfejlesztett algoritmussal számítottuk. A nagy felbontású modell alkalmazása miatt, ebben az esetben már figyelembe kellett vennünk a számításokban azt az esetet is, amikor a sugár elhagyja a kezdeti, állomás feletti vertikális profilt, és egy szomszédos vertikális profilba kerül át.

Az eredmények (7. ábra) megfelelnek annak az elvárásnak, hogy az RTCA MOPS troposzféra késleltetési modell egy ilyen szélsőségesen csapadékos időszakban alulbecsüli a nedves troposzférikus késleltetést. Meg kell jegyeznünk, hogy az ARTE-BSM- és RTCA MOPS-integrációsmodellek is megfelelően konzervatív becslést adnak a nem modellezett troposzférikus késleltetés hibáira mind a hidrosztatikus, mind a nedves késleltetés esetére. Viszont az ARTE-BSM-modell hatékonyabbnak bizonyul a hibabecslésnél, kisebb védelmiszintérték mellett továbbra is megbízható becslést ad a maradék hibákra.

14. Eredmények és konklúzió

Tanulmányunkban egy új, a troposzférikus maradék ellentmondások

modellezésére szolgáló eljárást mutatunk be. A modellek levezetéséhez numerikus időjárásmodellekből származó, 17 évnyi időszakot átölelő adatsort és a sugárkövetés módszerét használtuk fel. A meghatározott modellek három különböző komplexitási szinten kerültek kialakításra attól függően, hogy figyelembe vesszük-e a maradék hibák szezonális, illetve éghajlati függését. Amennyiben egyik hatást sem vesszük figyelembe, a létrehozott modell jó összhangot mutat a jelenleg de facto szabványként felfogható RTCA MOPS maradék troposzférikus késleltetés modelljével. Ugyanakkor azt is bemutattuk, hogy az új modellek jelentősen hatékonyabbnak bizonyulnak, amennyiben a szezonális és az éghajlati változásokat figyelembe vesszük, és ezáltal javítják a GNSS-alapú helymeghatározás elérhetőségét és folytonosságát.

Annak érdekében, hogy a bemutatott modelleket ellenőrizni tudjuk, két validációs eljárást hajtottunk végre. Az IGS által szolgáltatott troposzférikus késleltetések mint referenciaadatok felhasználásával egy hosszabb időszakra vizsgáltuk, hogy a modellek megfelelő mértékben felülbecsülik-e a fellépő troposzférikus maradék késleltetéseket.

A modellek extrém időjárási körülmények közötti működését egy esettanulmány segítségével vizsgáltuk meg, nagy felbontású numerikus időjárásmodellből származó adatok

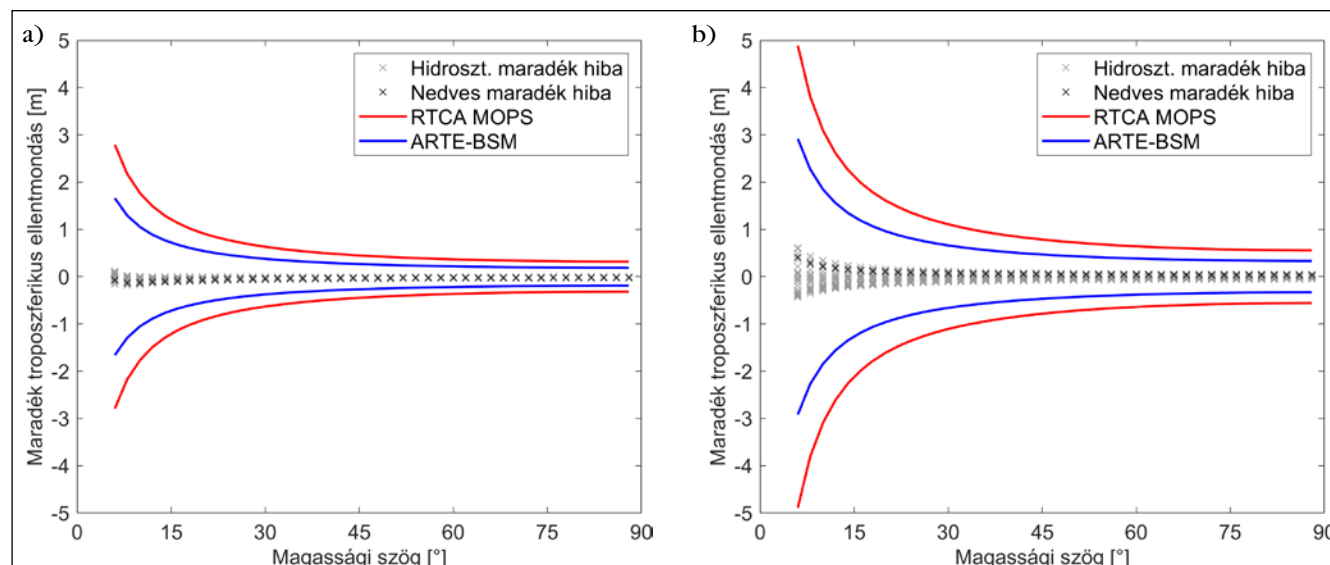
felhasználásával. Az extrém időjárási körülmények ebben az esetben egy rövid, de igen intenzív csapadékos időszakot takartak.

A levezetett modellek mindkét esetben hatékonyabbnak bizonyultak a maradék hibák becslésében, mint a jelenleg alkalmazott RTCA MOPS-modell. A modellek ugyanakkor továbbra is megfelelő mértékben felülbecsülik a maradék ellentmondásokat, így tehát nincs szükség kompromisszumokra még a magas integritásigényű alkalmazások esetében sem.

Figyelembe veendő továbbá, hogy a modellek levezetéséhez használt eljárás alkalmazható bármilyen más troposzférikus késleltetésmodell, mint például az ESA GALTROPO (Krueger et al. 2004) vagy a GPT2W (Boehm et al. 2014) esetére is. Utóbbi eredetileg a felszíni meteorológiai paraméterek becslésére kifejlesztett modell, mely bemeneti adatokkal szolgálhat olyan troposzférikus késleltetéseket számító modellekhez, mint például az Askne és Nordius (1987) által kifejlesztett eljárás.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton is köszönik az Európai Űrügynökség (European Space Agency – ESA) támogatását, amelyhez a 40000114534/15/NL/Nde számú szerződésen keresztül jutottak hozzá.



7. ábra. Maradékhiba-értékek a hidrosztatikus a) és nedves b) RTCA MOPS-troposzféramodellel számított késleltetések alapján a két vizsgált integrációsmodell maximális maradék hibáival együtt

Irodalomjegyzék

- Askne, J. – Nordius, H. 1987. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Science*. Vol. 22. No. 3. pp. 379–386.
- Boehm, J. – Schuh, H. 2003. Vienna Mapping Functions. *16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*: pp. 131–143.
- Boehm, J. – Möller, G. – Schindelegger, M. – Pain, G. – Weber, R. 2014. Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w). *GPS Solutions*. Vol. 19. No. 3. pp. 433–441.
- Collins, J. P. – Langley, R. B. 1998. The residual tropospheric propagation delay: How bad can it get? *11th International Technical Meeting of the Institute of Navigation*. Nashville, Tennessee.
- Dee, D. P. – Uppala, S. M. – Simmons, A. J. – Poli, P. – Kobayashi, S. – Andrae, U. – Balmaseda, M. A. – Balsamo, G. – Bauer, P. – Bechtold, P. – Beljaars, A. C. M. – van der Berg, L. – Bidlot, J. – Bormann, N. – Delsol, C. – Dragani, R. – Fuentes, M. – Geer, A. J. – Haimberger, L. – Healy, S. B. – Hersbach, H. – Hólm, E. V. – Isaksen, I. – Källberg, P. – Köhler, M. – Matricardi, M. – McNally, A. P. – Monge-Sanz, B. M. – Morcrette, J. J. – Park, B. K. – Peubey, C. – de Rosnay, P. – Tavolato, C. – Thépaut, J. N. – Vitart, F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*: Vol. 137. No. 656:553–597.
- Douša, J. – Eliaš, M. – Václavovic, P. – Eben, K. – Krč, P. 2018. A two-stage tropospheric correction model combining data from GNSS and numerical weather model. *GPS Solutions*, Vol. 22. No. 3. pp. 77. DOI: [10.1007/s10291-018-0742-x](https://doi.org/10.1007/s10291-018-0742-x)
- ICAO – International Civil Aviation Organization. 2006. Aeronautical Telecommunication. Vol. 1., Radio Navigation Aids. In *Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation*. p. 578.
- ISO – International Organization for Standardization. 1975. Standard Atmosphere. *ISO 2533:1975*, Int. Stand. Organ., vol. 2533.
- Jenkinson, A. F. 1955. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) of meteorological elements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*: Vol. 81. pp. 158–171.
- Krueger, E. – Schueler, T. – Hein, W. G. – Martellucci, A. – Blarzino, G. 2004. Galileo Tropospheric Correction Approaches Developed within GSTB-V1. *Proceedings of the ENC-GNSS 2004*. Rotterdam, the Netherlands, May 16–19.
- McGraw, G. A. 2012. Tropospheric error modeling for high integrity airborne GNSS navigation. *Record – IEEE PLANS, Position Location and Navigation Symposium*, pp. 158–166. DOI: [10.1109/PLANS.2012.6236877](https://doi.org/10.1109/PLANS.2012.6236877)
- Rocken, C. – Sokolovskiy, S. – Johnson, J. M. – Hunt, D. 2001. Improved mapping of tropospheric delays. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. Vol. 18. pp. 1205–1213. DOI: [10.1175/1520-0426\(2001\)018<1205:IMO TD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<1205:IMO TD>2.0.CO;2)
- Rózsa, Sz. 2014. Modelling Tropospheric Delays Using the Global Surface Meteorological Parameter Model GPT2. 4, pp. 301–308. DOI: [10.3311/PPci.7267](https://doi.org/10.3311/PPci.7267)

RTCA – Radio Technical Commission for Aeronautics. 2006. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Satellite-Based Augmentation System Airborne Equipment. RTCA DO-229.

Ober, P. B. 2003. Integrity Prediction and Monitoring of Navigation Systems. European Journal of Navigation 1.

Ober, P. B. – Imparato, D. – Verhagen, S. – Tiberius, C. – Veerman, H. – Van Kleef, A. – Wokke, F. – Bos, A. – Mieremet, A. 2014. Empirical integrity verification of GNSS and SBAS based on the extreme value theory. *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*. Vol. 61. pp. 23–38. DOI: [10.1002/navi.55](https://doi.org/10.1002/navi.55)

van Leeuwen, S. S. – van der Marel, H. – Toussaint, M. – Martelluci, A. 2004. Validation of SBAS MOPS troposphere model over the EGNOS service area. *European Navigation Conference (GNSS-2004)*. Rotterdam, The Netherlands.

Summary

In safety-of-life navigation applications of GNSS the major concern of the user is not the accuracy, but rather the integrity of the positioning service. To assess integrity, the protection level that bounds the positioning error even at very small probability levels must be determined. Recent studies show that – due to the emerging multi-frequency civilian signals – the tropospheric delay will become the most significant error source, especially at low elevation angles. The RTCA MOPS (Minimum Operational Performance Standard) for GNSS systems in aeronautics specifies a global constant for the maximum tropospheric residual error in the zenith direction. Recent studies suggest that this value is too conservative in many regions of the globe leading to lower availability and continuity of the positioning service. To overcome this limitation, a new residual tropospheric error model has to be formulated, that considers both the geographical and the seasonal variations of the tropospheric delay model performances. Our study focuses on the development of an advanced residual tropospheric delay error model (ARTE) using the methodology of extreme value analysis for the RTCA MOPS troposphere model. The developed ARTE model was validated with IGS zenith total delay (ZTD) estimates and numerical weather models obtained in a case study of extreme weather in Central-Europe. The results show that the proposed model maintained the conservatism of

the original model, nevertheless yields a significantly lower residual error estimate in many regions of the globe.

Kulcsszavak: életbiztonságra veszélyes GNSS-alkalmazások, maradék troposzférikus késleltetés, troposzférikus ellentmondás-modell

Keywords: safety-of-life navigation applications of GNSS, tropospheric residual delay, Advanced Residual Tropospheric Error model – ARTE



Dr. Rózsa Szabolcs
egyetemi docens

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



Ambrus Bence
doktorandusz

BME Általános- és Felsőgeodézia
Tanszék
ambrus.bence@epito.bme.hu



Juni Ildikó
doktorandusz

BME Általános- és Felsőgeodézia
Tanszék



Ober Pieter Bastiaan
ügyvezető,

műholdas navigációs rendszer-
szakértő
IntegriCOM NL



Mile Máté
meteorológus,
modellfejlesztő

Országos Meteorológiai Szolgálat