

Válasz Geresdi István professzor úr

„A geodéziai, geodinamikai és atmoszféra kutatások a műholdas helymeghatározásban” c. MTA doktori értekezésem kapcsán kifejtett opponensi véleményére

Professzor úr részletes észrevételeire adandó válaszaim előtt szeretném megköszönni pozitív és támogató bírálatát!

Az opponensi véleményben kifejtett megjegyzésekre és kérdésekre az alábbiakban adom meg részletes válaszaimat. Elsőként – az opponensi vélemény struktúráját követve – a három fontosabb, az alkalmazott módszerre vonatkozó kérdésre adok választ, majd az egyes fejezetekre vonatkozó részletesebb észrevételek, kérdések következnek.

1. kérdés

„Vannak-e adatok arról, hogy a vízcseppek és a jégkristályok mennyire befolyásolják a terjedést? Zivataros területeken a vertikálisan integrált folyékony víztartalom meghaladhatja az integrált vízgőztartalmat.

Solheim és mtsai. (1999) részletesen megvizsgálták, hogy a légkörben található, különböző halmazállapotban jelen lévő víz miként hat a mikrohullámú rádiójelek, mint például a GNSS jelek terjedésére. A vízgőz refraktivitásra kifejtett hatását a jól ismert Thayer-összefüggéssel adhatjuk meg:

$$N_{\text{vígöz}} = k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}, \quad (1)$$

ahol  $k_2, k_3$  empirikus konstansok,  $T$  a hőmérséklet,  $e$  pedig a vízgőz parciális nyomása.- Ezzel szemben a folyékony és szilárd halmazállapotú víz hatását (hidrometeorok, pl. esőcseppek, köd, hó, jég, hódara) a Clausius-Mossotti egyenletből kifejezett refraktivitás segítségével írhatjuk le:

$$N_{\text{hidrometeo}} = 1.5 \times 10^6 \frac{M}{\rho} \left[ \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right], \quad (2)$$

ahol  $M$  a vízrészecskék tömege az egység térfogatú levegőben,  $\rho$  a vízrészecskék testsűrűsége (mindkettő ugyanabban a mértékegységben kifejezve),  $\varepsilon$  a részecskék dielektromos állandója. A szerzők levezették, hogy 1 km vastag, 1 g/m<sup>3</sup> vízsűrűséggel jellemezhető felhő (ez megfelel 1 mm csapadéknak) távolságmérésre kifejtett összesített hatása 1,45 mm nagyságú.

Ezzel szemben a „száraz” levegő késleltető hatása 2,3m, míg a vízgőz hatása átlagosan mintegy 30 cm nagyságúra tehető. Ebből látható, hogy a folyékony halmazállapotú víz hatása – még szélsőséges körülmények között is legalább egy nagyságrenddel kisebb, mint a vízgőz hatása.

Adatfeldolgozási szempontból ki kell emelnünk, hogy a mérésekből a légköri víz összesített késleltető hatását tudjuk becsülni. A becsült értékek középhibája – egy órányi észlelés együttes feldolgozását feltételezve  $\pm 5-6$  mm-re tehető, így a folyékony halmazállapotú víz hatása az esetek többségében a becslés zajszintje alatt van.

Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy abban az esetben, ha a vízgőz jelterjedésre kifejtett hatását más forrásból meg tudjuk határozni és azt a GNSS feldolgozás során a priori információként figyelembe vesszük, akkor lehetőség adódhat a folyékony vagy szilárd halmazállapotú víztartalom becslésére is. Ezt tovább segítheti az új műholdkonstellációk megjelenése, hiszen a műholdak számának növelésével a nedves troposzférikus késleltetés becslések középhibája tovább csökkenthető, ezáltal a folyékony és szilárd halmazállapotú víz hatása detektálhatóvá válhat.

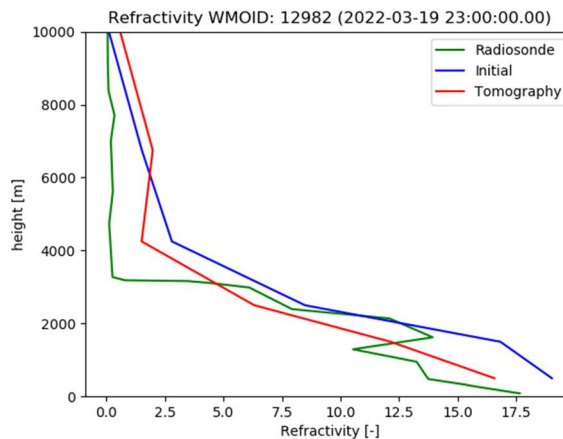
Meg kell azt is említeni, hogy a folyékony és szilárd halmazállapotú vízrészecskék okozta szóródás a mért műhold-vevő távolságokban frekvenciafüggő hatást okoz. A vizsgálatok alapján 40 mm/óra intenzitású csapadék az  $L_1$  és  $L_2$  frekvencián 4, illetve 3 mm/km-es hatást fejt ki, ami az ionoszféra mentes lineáris kombináción 5 mm/km fölé emelkedik, ez akár már detektálható lehet az adatokban.

## 2. kérdés

„Lát-e lehetőséget arra, hogy az integrált vízgőztartalom mellett a vízgőz tartalom vertikális profiljának fontosabb jellemzői (pl. magasság szerinti csökkenés) is meghatározhatók legyenek?”

Abban az esetben, ha a nedves troposzférikus késleltetést nem egyetlen állomáson, hanem egy kellően sűrű állomáshálózat minden állomásán rendszeresen becsüljük, akkor tomografikus úton visszaállítható a légköri vízgőz térbeli eloszlása. A GNSS feldolgozás során – bár az értekezésben elsősorban a zenitirányú nedves késleltetések meghatározásával foglalkoztam – a feldolgozószoftverek az É-D és K-Ny irányú troposzférikus gradienseket is meghatározzák. Ezek hivatottak az állomások körüli vízgőzeloszlás laterális változásait figyelembe venni. A becsült zenitirányú késleltetések, a troposzférikus gradiensek és a leképezési függvények együttes kiértékelésével kiszámíthatók a műholdirányú nedves késleltetések. Miután ezek minden állomásra rendelkezésünkre állnak, a légköri vízgőz térbeli eloszlása is visszaállítható egy erre alkalmas térbeli felbontású voxelmodell felvételével. Matematikai szempontból a térbeli rács blokkjainak nedves refraktivitás értékei és a jel blokkokban megtett út hosszának szorzatösszege megegyezik a műholdirányú nedves késleltetés mértékével. Ily módon különféle algebrai rekonstrukciós technikákkal vagy más becslési eljárásokkal (pl. legkisebb négyzetek módszere, Kálmán-szűrés, stb.) becsülhetjük az egyes blokkok nedves refraktivitásának értékét, amit a Thayer-egyenlet (1) segítségével a blokkok közepes hőmérsékletének ismeretében parciális vízgőznyomással vagy éppen vízgőzsűrűség értékékké tudunk konvertálni.

Tanszéki kutatásaink során hallgatóimmal először 2014-ben vizsgáltuk ezt a lehetőséget a legkisebb négyzetek módszerének alkalmazásával (Horváth és mtsai., 2014). 2021-2022-ben pedig a GeoSES Interreg projekt keretében egy közel valószerű GNSS adatfeldolgozó központot hoztunk létre, amely óránként előállítja a nedves refraktivitás háromdimenziós modelljét hazánkban. Az eredmények a <http://gpsmet.agt.bme.hu> oldalon online is elérhetők, beleértve a vertikális refraktivitás profilokat is. Egy jelenleg bírálati fázisban lévő folyóiratcikkben összehasonlítottuk az ily módon levezetett refraktivitás profilokat rádiószondás adatokból számított refraktivitás profilokkal egy egyhónapos időszakra. Egy ilyen meghatározás eredményét mutatom be az 1. ábrán.



1. ábra. Nedves refraktivitás profil Szegeden 2022.03.19-én UTC 23 órakor (zöld: rádiószonda mérésekből; piros: GNSS tomográfiával; kék: előzetes értékek a megelőző rádiószonda mérésből)

## 3. kérdés

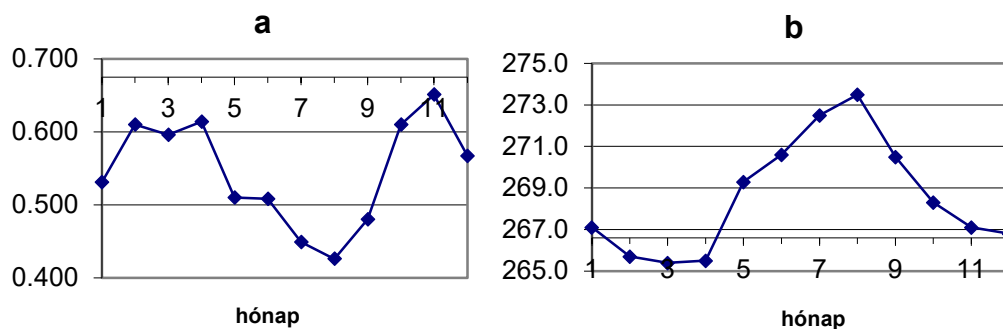
„Mind emellett úgy gondolom, hogy célszerű lenne ezeket (4-11, 4-12) az egyenleteket (lásd még 4-35 egyenletet, valamint 88. oldal első bekezdésében szereplő konstansokat évszakos bontásban megadni. Ugyanis a vertikális profil erősen függ az évszaktól, télen a vízgőz tartalom magassággal való csökkenése jóval kisebb mértékű, mint nyáron.”

Köszönöm ezt a javaslatot! Az értekezésből valóban kimaradt az a vizsgálat, amelyet Rózsa és mtsai. (2009)-ben végeztek e témakörben. E tanulmányban az értekezés (4-11) egyenlete együtthatóinak az év hónapjaira lebontott változását vizsgáltuk meg. A regressziós egyenes  $a$  (meredekség) és  $b$  (eltolás) paramétereit az 1. táblázat tartalmazza, míg ugyanezt grafikusán a 2. ábra mutatja be a paraméterek

szezonális változásait. Valóban nagyon jól látható a paraméterek évszakos változása az eredményekből. Ugyanakkor meg kell említeni, hogy a regressziós egyenesek maradék hibáinak szórása csak kis mértékben változik az egész évre egységes paraméterkészlethez képest.

Hónap	a	b	R <sup>2</sup>	σ	N
1	0,531	267,1	0,37	3,16	849
2	0,610	265,7	0,49	3,39	787
3	0,596	265,4	0,50	3,03	862
4	0,614	265,5	0,58	2,88	837
5	0,510	269,3	0,48	2,86	847
6	0,508	270,6	0,45	2,99	828
7	0,449	272,5	0,41	2,75	864
8	0,426	273,5	0,41	2,75	857
9	0,480	270,5	0,41	2,84	831
10	0,610	268,3	0,54	3,07	865
11	0,651	267,1	0,55	2,92	829
12	0,567	266,8	0,40	3,09	859
Év	0,675	266,6	0,80	3,21	10115

1. táblázat. A felszíni hőmérséklet (°C) és a vízgőz átlagos hőmérséklete (K) közötti regressziós egyenesek paramétereit, illetve azok statisztikai jellemzőit (Rózsa és mtsai. (2009) nyomán).



2. ábra. A felszíni hőmérséklet és a vízgőz átlagos hőmérséklete regressziós paramétereinek éves változása (Rózsa és mtsai. (2009) nyomán).

#### 4. kérdés

„Azzal, hogy a leképezési függvény csak a műhold koordinátáitól függ, implicite feltételezik, hogy a légkör horizontálisan homogén. Ha a műhold magassági szöge kicsi, ez a feltételezés elég nagy hibát eredményezhet. Úgy gondolom, hogy numerikus időjárás-előrejelző modellek segítségével becsülhető lenne ez a hiba, valamint a szonda mérésekkel való összehasonlítás hibája is.”

Egyetértek a bíráló észrevételével, hogy a GNSS feldolgozás során alkalmazott leképezési függvények valóban horizontálisan homogén légkört feltételeznek a vevő körül. Mivel az alacsony magassági szög alatt látható műholdak jelei akár 100 km-t is megtesznek a troposzférában, így tulajdonképpen valamelyest kisimítjuk a légköri vízgőztartalom laterális változásait. Ezt a hatást csökkenti, hogy a mérések feldolgozása során magassági szögtől függő súlyozást is alkalmazunk, amellyel a horizonthoz közeli műhold-vevő távolságok nagyobb mérési bizonytalanságait kívánjuk figyelembe venni. Emellett nem csak a zenitirányú nedves késleltetés mértékét, hanem az ún. troposzférikus gradienseket is becsüljük az adatokból. Ezek hivatottak – még ha egyszerű módon is – figyelembe venni a vízszintesen inhomogén légköri vízgőz eloszlás hatását.

A numerikus időjárás-előrejelző modellek napjainkban már nagyon fontos részét képezik a szabatos GNSS adatfeldolgozásnak. A Bécsi Műszaki Egyetem Geodéziai Intézetének munkatársai az ECMWF előrejelzésekből és analízisekből különféle zenitirányú troposzférikus késleltetés és leképezési függvény paramétereit határozzák meg a közel valósidejű feldolgozások (ECMWF előrejelzésekből) és a szabatos utófeldolgozások (ECMWF analízisekből) számára. Ugyanakkor ezek a troposzférikus modellek nem tartalmazzák az adatokat a gradiensek értékeire. Ez egy további fejlesztési lehetőség, aminek a hatását mindenképpen érdemes lenne megvizsgálni a jövőben.

### **Egyéb részletes észrevételek/kérdések:**

*70. oldal, második bekezdés:* Köszönöm szépen a kiegészítő magyarázatot, teljes mértékben egyetértek annak tartalmával.

*72. oldal, 4-5 egyenlet:* Valóban ez egy elírás, a (4-5) egyenletben szereplő  $Z_v$  helyesen  $Z_w$  és a vízgőz kompresszibilitási tényezőjét jelenti.

*73. oldal, 4-7 egyenlet:* Ahogyan az első kérdésre adott válaszómban részletesen kifejtettem, a folyékony és szilárd halmazállapotú víz is befolyásolja a jelterjedést. Ezek mértéke azonban megközelítőleg egy nagyságrenddel kisebb, mint a vízgőz hatása. Mivel a folyékony és szilárd halmazállapotú víz hatása általában a zajszint alatt van, ezért –pontatlanul – a GNSS meteorológiai alkalmazásával foglalkozó cikkek gyakran az integrált vízgőztartalmat és a kihullható csapadékmennyiség fogalmát szinonimaként használják.

*73. oldal, 4-9 egyenlet:* Egyetértek az észrevétellel, valóban a helyes elnevezés a „hőmérséklet reciprokának súlyozott középértéke”. Az angol szakirodalomban is sajnos a „mean temperature of water vapour” elnevezés a honos és a dolgozatban ezt fordítottam magyarra. Ugyanakkor matematikailag és a magyar nyelv szabályai szerint is a bírálatban megfogalmazott definíció a szabatos.

*74. oldal, A (4-11) és (4-12) egyenletekben megadott összefüggések ( $T_m$  és  $Q$ ) hibájával kapcsolatban egyrészt az értekezés 88. oldalán, a 4-4. táblázatban találunk adatokat. Ezek az értékek a  $Q$  tényező reciprokára vonatkoznak, és négy esetet mutatnak be ( $T_m$  alapú becslés az eredeti Bevis összefüggéssel valamint ugyanez Közép-Európára illetve, polinomos becslés az Emarson-Derks modell alapján valamint ugyanez Közép-Európára illetve). Mivel az  $1/Q$  skálátényező megközelítőleg 6,5-es értéket vesz fel, így a táblázatban szereplő értékek alapján az hibák tartománya megközelítőleg 0,6, azaz 10%-a a közepes értéknek.*

*81. oldal, utolsó bekezdés.* Egyetértek a bíráló megállapításaival a 30 km-es szint felett található vízgőzkoncentrációról. Az értekezésben azonban a hidrosztatikus késleltetés mértékére utaltam, nem a vízgőz okozta nedves késleltetés mértékére. Azaz a 30 km feletti „száraz” levegő hatása éri el az 1 cm-t.

*92. oldal, utolsó előtti bekezdés.* Egyetértek az észrevétellel.

*4.7 ábra (és a többi hasonló ábra).* Egyetértek a megállapítással, valóban meg kellett volna adnom a korrelációs együtthatót. Budapesti rádiószonda adatokra e válasz 1. táblázata tartalmazza ezeket az értékeket. Az itt szereplő éves értékek jól jellemzik a 4.7 ábrához tartozó korrelációs együtthatót is.

*101. oldal.* Valóban az (5-2) és az (5-5) egyenletek azonosak, ez sajnos elkerülte a figyelmemet. Az egyik törlendő lett volna.

*102. oldal.* Egyetértek az észrevétellel, természetesen ismert tény, hogy a felhasznált meteorológiai paraméterek nem csak a földrajzi szélességtől, és a napról, hanem a földrajzi hosszúságtól is függenek. Az RTCA modellben azonban azt tartották szem előtt, hogy a troposzférikus késleltetéseket és az integritás adatokat is a vevőnek kell kiszámítania, így az ehhez szükséges adatmennyiséget igyekezett az RTCA minimalizálni. Ennek érdekében nem globális rácsokra adták meg a paramétereket, hanem csak a földrajzi szélességtől való függést vették figyelembe.

Meg kell jegyezni, hogy a GPT2 modell és az ESA hasonló modellje már globális rácsra adja meg ezeket a paramétereket, így a földrajzi hosszúságtól való függést is figyelembe tudjuk venni a fejlettebb modellekkel.

102. oldal 5-11 egyenlet: Köszönöm az észrevétel, valóban az egyenletből egy „n” betű eltűnt. Helyesen a 'si' 'sin' kell legyen.

105. oldal, második bekezdés: „Hiba! Hivatkozási forrás nem található!” hibaüzenet helyett a 4.2.1 alfejezetre mutató keresztivatkozást kellett volna tartalmazza a szöveg.

105. oldal, utolsó előtti bekezdés: Az 5-2. ábrán Budapestre bemutatott felszínközeli hőmérsékletértékek összehasonlításából az RTCA modellre két jellegzetességet állapíthatunk meg. Egyrészt a közepes hőmérséklet az RTCA modell esetén alacsonyabb. Egyetértek az opponensi véleményben megfogalmazott lehetőséggel, miszerint ennek oka elsősorban az, hogy az RTCA modell a földrajzi hosszúságtól való függést elhanyagolja. Ugyanakkor a szezonális változások fázisszöge is eltér a többi modelltől és a meteorológiai adatoktól is. Ez szintén a modell definíciójából ered, mivel az éves minimumhoz tartozó nap sorszámát az RTCA modellben nem becsülték, hanem egységesen az északi féltekére január 28-ára vették fel ezzel is csökkentve a vevő memóriájában tárolandó adatok mennyiségét.

Bízva abban, hogy a fentiekkel kellően megalapozott válaszokat sikerült adnom az opponensi véleményben feltett kérdésekre, még szeretném ismét megköszönni a bíráló értékes kérdéseit, amelyek több esetben is újabb gondolatokat, kutatási ötleteket adtak a jövőre nézve!

Budapest, 2022. szeptember 16.



Rózsa Szabolcs  
habilitált egyetemi docens

### Felhasznált irodalom

- Horváth, T., Viengdavanh, R., & Rózsa, S. (2014). Négydimenziós vízgőzmodellek előállítás GNSS tomográfiával. *Geomatikai Közlemények*, 17(1), 69–78.
- Rózsa, S., Dombai, F., Németh, P., & Ablonczy, D. (2009). Integrált vízgőztartalom becslése GPS adatok alapján. *Geomatikai Közlemények*, 12(1), 187–196.
- Solheim, F. S., Vivekanandan, J., Ware, R. H., & Rocken, C. (1999). Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors, and other particulates. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 104(D8). <https://doi.org/10.1029/1999JD900095>