



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki kar

Földmérő-és Térinformatikai mérnöki szakirány

**Troposzféra modellek vizsgálata a GNSS
helymeghatározásban**

Készítette: Juni Ildikó

Konzulens: Dr. Rózsa Szabolcs

2014.

Tartalom

Kivonatok.....	3
Magyar nyelvű kivonat.....	3
Angol nyelvű kivonat	4
1. Bevezetés	5
2. A troposzféra.....	5
2.1. A troposzféra elhelyezkedése	5
2.2. A troposzféra hatása	7
3. Troposzféra modellek	10
3.1. Hopfield modell	11
3.2. Black modell.....	11
3.3. Saastamoinen modell.....	12
3.4. A finomított Saastamoinen modell	12
3.5. A GPT2 és GPT2W modellek	12
3.6. A műhold irányú késleltetés megadása.....	13
3.6.1. A Hopfield, a Black és a Niell leképzési függvények	13
3.6.2. A GMF és a VMF leképzési függvények	14
4. Troposzférikus késleltetések számítása a Bernese 5.2 GNSS szoftverrel	15
4.1. A troposzférikus késleltetések számításához felhasznált szoftver és adatok.....	15
4.1.1. Bernese 5.2 GNSS szoftver	15
4.1.2. Felhasznált adatok	16
4.2. A feldolgozás	20
4.2.1. A troposzférikus késleltetések előállítás.....	20
4.2.2. A feldolgozás nehézségei	23
4.2.3. A feldolgozás eredményei	26
5. Troposzférikus késleltetések számítása a sugárkövetés módszerével	30
5.1. Rádiószonda mérések	30
5.2. Felhasznált adatok	33
5.2.2. Rádiószondás mérések adatai	33
5.2.3. International Standard Atmosphere (ISA) adatok	36
5.3. A sugárkövetés módszere	37
5.3.1. A rádiószondás mérések felhasználása.....	38
5.3.2. Az ISA adatok bevonása	38
5.3.3. A meteorológiai paraméterek sűrítése, interpolálás.....	38

5.3.4. A refraktivitás számítása	39
5.3.5. A sugárkövetés számítása.....	40
6. Az eredmények ábrázolása	43
6.1. A Bernese különböző modelljeiből kapott késleltetések elemzése a vizsgált időszakban	43
6.2. A meteorológiai fájlok hatásának vizsgálata a késleltetések pontosságára	54
7. Összegzés.....	58
8. Köszönetnyilvánítás.....	60
9. Ábrajegyzék	61
10. Mellékletjegyzék.....	63
11. Mellékletek	64
12. Irodalomjegyzék	77

Kivonatok

Magyar nyelvű kivonat

A troposzféra és a felette lévő elektromosan semleges légköri zóna a globális helymeghatározó rendszereknél jelentős jelkésleltetést okoz. Ennek a hatásnak a mértéke a légkör aktuális meteorológiai paramétereinek függvénye, nagyságrendje mintegy 2,3 méter zenit irányban.

A troposzférikus késleltetést nagy pontosságú geodéziai alkalmazásoknál számíthatjuk a Bernese 5.2 GNSS szoftverrel. A programban GNSS észleléseknél használható troposzféra modellek köre bővült az 5.0-ás változathoz képest a GMF és VMF modellekkel. A késleltetéseket meghatároztuk ezekkel, illetve a Niell, a Saastamoinen és a Hopfield modellekkel is. Egy Magyarországról induló, Nyugat-Európára kiterjedő, 10 permanens állomást magába foglaló állomáshálózatot hoztunk létre, a 2014. július 20. és 26. közötti hét mérésait bevonva az elemzésekbe. A szoftver alapértelmezésben a meteorológiai paramétereket sztenderd atmoszféra modellből számítja, de a feldolgozásba mérésből származó meteorológiai adatokat is beépítettük a különféle modellek esetén, ezektől az eredmények javulását vártuk. Célunk volt ezeknek a troposzféra modelleknek a pontossági vizsgálata, amihez a rádiószondás méréseket felhasználó sugárkövetés módszerét alkalmaztuk.

A sugárkövetéses módszer lényege, hogy nyomon követjük a sugár útját, ami egy adott magassági szöggel indul, majd a légköri rétegek határán folyamatosan megtörik. A mért meteorológiai paraméterekkel egy pontos modellt kapunk, amit a sok éves meteorológiai adatok átlagával számított modellek elemzéséhez referenciaként használhatunk.

Összevetettük a Bernese beépített modelljeinek eredményét egymással és a sugárkövetés késleltetéseivel is. A referenciamodell értékeit a Niell modell eredményei közelítették meg a legjobban. A meteorológiai fájlokkal számított nedves késleltetések a sugárkövetés eredményeire jobb becslést adtak, a GMF-nél fél cm körüli értékkel, míg a Saastamoinen és a Niell modelleknél megközelítőleg 2 cm-rel pontosabb értékeket kaptunk, mint meteorológiai adatok nélkül.

Angol nyelvű kivonat

The troposphere and above the electrically neutral zone in the atmosphere cause significant signal delay at the global positioning systems. This delay depends on the actual meteorological parameters of the atmosphere, it is about 2.3 meters by zenith direction.

The tropospheric delay by high-precision geodetic applications can be calculated with the GNSS Bernese 5.2 software. The program can be used detection of GNSS with an increased range of troposphere models compared to the 5.0 version. The new models are the VMF and the GMF. The delays were determined with these as well as the Niell, the Saastamoinen and the Hopfield models too. A network with 10 permanent stations was created starting from Hungary expanded to West-Europe. The measurements of the week between 20 and 26 July in 2014 were involved in the analysis. The meteorological parameters are calculated with standard atmosphere model by the software, but the processing also incorporated data from meteorological measurements for the different models; we expected improvement results by using these. Our goal was to test the accuracy of these troposphere models applying the ray tracing method, which used radiosonde measurements.

The substance of the ray tracing method that the path of the beam was traced which starts with a definite elevation angle and refracts constantly by the boundary of the atmospheric layers. With the measured meteorological parameters an accurate model is obtained, which can be used as a reference to analyzed models that are calculated with the average of many years' meteorological data.

We compared the results of the Bernese built-in models to each other and also the delays of the raytracing. The values of the reference model were approached to the Niell model's results the best. The wet delays what are calculated with meteorological files give better estimate at raytracing. We got more accurate results, than we don't use meteorological data. The improvement is about half cm at the GMF while it's approximately 2 cm at the Saastamoinen and the Niell model.

1. Bevezetés

A globális helymeghatározó rendszereket ma már nagyon sokan ismerik, életünknek szinte mindennapos részévé vált. Ezeknél a troposzféra és a felette található elektromosan semleges légköri réteg jelentős jelkésleltetést okoz.

Nagy pontosságú geodéziai alkalmazás esetén a troposzféra okozta késleltetést kiszámíthatjuk a Bernese 5.2 GNSS szoftver segítségével. A program az előző verziójához képest újabb modelleket is tartalmaz GNSS feldolgozáshoz, a GMF-et és VMF-et. A késleltetések értékét ezekkel valamint a Niell, a Saastamoinen és a Hopfield modellekkel is meghatározzuk. A program sztenderd atmoszféra adatokat használ fel, de a meteorológiai fájlok - mint mért adatok - alkalmazása a feldolgozás során várhatóan javítja az eredményeket, így a számításokat ezekkel is elvégezzük. Célunk az említett modellek pontossági vizsgálata, amihez egy megfelelő modell szükséges.

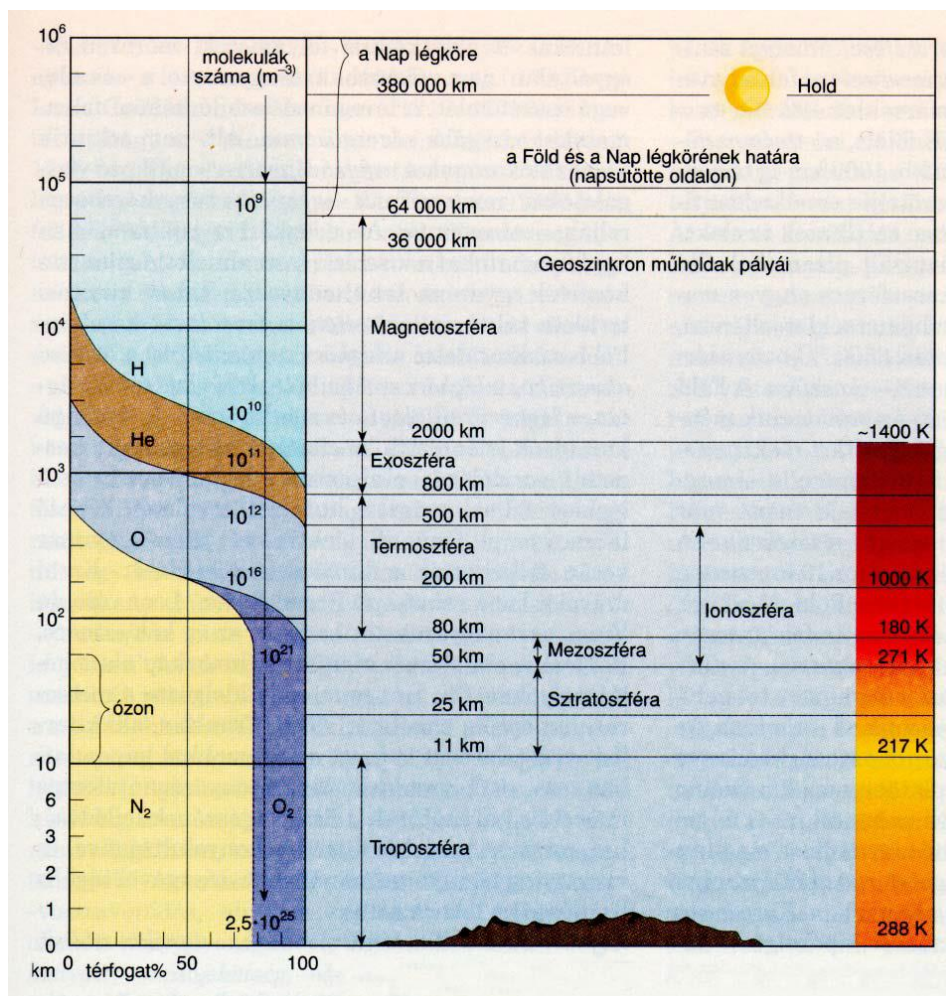
Mért meteorológiai paraméterekkel egy pontos modellt állíthatunk elő, amit referenciaként alkalmazhatunk a sok éves meteorológiai adatok átlagával számított értékek elemzéséhez. A sugárkövetéses módszer - a késleltetés értékét javarészt meghatározó - rádiószondás mérések adatait használja fel. Illetve nagy magasságban - ahol már nincs rádiószondás észlelés - a sztenderd atmoszféra modell paramétereit vesszük figyelembe.

Így a Bernese modellek pontosságvizsgálatának elvégzéséhez a mért értékeken alapuló sugárkövetéses módszert alkalmazzuk referenciaként. Továbbá elemezzük, hogy a különféle modellekkel előállított késleltetések, hogyan viszonyulnak egymáshoz illetve tanulmányozzuk a meteorológiai fájlok hatását az eredményekre.

2. A troposzféra

2.1. A troposzféra elhelyezkedése

A légkört több szempont szerint is rétegekre oszthatjuk *Völgyesi (2011)* alapján. A *hőmérséklet függőleges változása* szerint: 10 km vastag troposzférát, 10-50 km közötti, előbb állandó majd gyengén növekvő hőmérsékletű sztratoszférát, 50-80 km magasan lévő, csökkenő hőmérsékletű mezoszférát, majd az ismét melegedő 80-800 km közötti termoszférát végül pedig 800 km feletti legkülső exoszférát különböztetjük meg (1. ábra). A légkör a *mikrohullámú jelterjedés* szempontjából két rétegre osztható: a troposzférára és az ionoszférára. A legalsó, átlagosan 10 km vastag réteg a troposzféra, itt található a légkör tömegének jelentős része és a benne lévő vízpára teljes mennyisége is. Ionoszférának nevezzük a légkör 30-1000 km közötti szakaszát, ahol a Nap röntgensugárzása, a napsugárzás rövid ibolyántúli része és a kozmikus sugárzás ionizációt hoz létre. Emiatt a légkör ezen részében szabad elektronok találhatók.



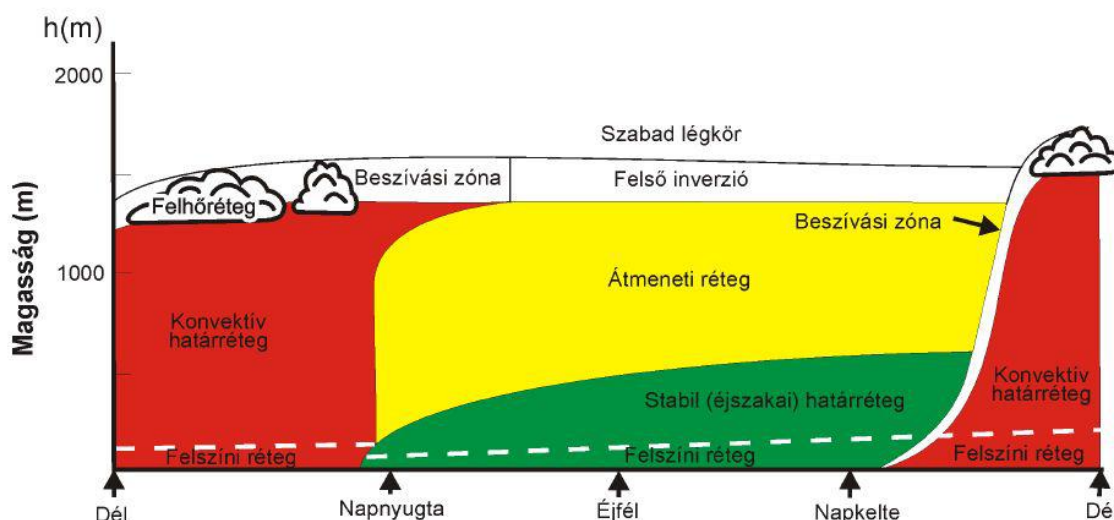
1. ábra: A Föld körüli térség vázlatos szerkezete

Völgyesi (2011)

A troposzférában 100 méterenként felfelé $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal csökken átlagosan a hőmérséklet, valamint ez a réteg az időjárási jelenségek fő színtere. A troposzférát nagymértékben befolyásolja a földfelszín hőtartalma, vízgőztartalma és innen származnak a szennyeződései is, amik a függőleges keverőmozgásoknak köszönhetően a felszínről a magasabb rétegekbe kerülnek. A troposzféra vastagsága Magyarország felett télen 9 km, nyáron 11 km; a sarkok felett 6 km, az Egyenlítőnél már 18-20 km.

A troposzféra szerkezete Breuer (2014) szerint 4 rétegből áll: lamináris réteg, felszíni réteg, határréteg és szabad légkör. A *lamináris réteg* a felszínen lévő néhány mm-es légtömeget jelenti. A *felszíni réteg*ben vertikális anyagáram van, vastagsága változik: éjjel 20-30 méter, míg nappal 50-100 méter. A *határréteg* 100 és 3000 méter között helyezkedik el, horizontális és vertikális légmozgás jellemzi. A felszíni változásokra 1-2 óra alatt reflektál, megfigyelhető a szennyezőanyag terjedés, valamint jelentősek a felszíni hatások, mint például a domborzat. A *szabad légkör* a határréteg és a tropopauza között található. Itt a vertikális légmozgás már elhanyagolható a horizontális mellett.

Haszpra (2014) alapján a *határréteg* 24 óra leforgása alatt folyamatosan változik, így további rétegeket különböztethetünk meg benne (2. ábra):



2. ábra: A határréteg változása

Haszpra (2014)

Nappal konvektív határrétegről beszélhetünk, ami egy kevert réteg, amit a turbulens átkeveredés homogenizál. A besugárzás fokozódásával nő, akár a PBL (határréteg) nagyságáig. Ez nyáron 1500-2000 métert, télen 300-600 métert jelent. Napnyugtakor az átkeveredés megáll, kialakul alul a stabil éjszakai határréteg 200-500 méteres magasságig és létrejön felül a maradék réteg vagy másképpen átmeneti réteg. A stabil éjszakai határréteg mechanikai turbulenciával jön létre, a szél keveri. Ez közvetlenül kapcsolódik a felszínhez; a rétegben megfigyelhető a felszíni nyomanyagok feldúsulása. A maradék réteg már nem kötődik a felszínhez, csekély turbulencia jellemzi. Reggel, a konvekció kezdetén a maradék réteg egyesül a stabil éjszakai határréteggel és a folyamat kezdődik előlről.

2.2. A troposzféra hatása

A troposzféra által okozott hatást *Ádám és társai (2011)* alapján mutatjuk be. A troposzférában a törésmutató mindig nagyobb, mint 1, mert itt van a légkör tömegének nagy része. Ez a réteg nem diszperzív közeg vagyis ugyanabban az időben ugyanolyan hatással bír a kód- és fázismérésekre valamint a különböző frekvenciákon történt észlelésekre is. Így nem kell különbséget tenni a csoport- és fázissebesség között.

A troposzféra által okozott késleltetés számításához be kell vezetni a refraktivitást:

$$N = (n - 1) * 10^6 \quad (1)$$

ahol n a törésmutató, ami függ a légnyomástól, a hőmérséklettől és a parciális párányomástól. A refraktivitás 10^{-6} -szorosa a troposzféra pontbeli értékének tekinthető.

A troposzféra teljes hatása a Thayer-integrállal adható meg:

$$T = 10^{-6} \int N \, ds \quad (2)$$

A 30 GHz-nél kisebb frekvenciájú rádióhullámokra Smith és Wientraub bebizonyította, hogy a troposzféra hatása elkülöníthető a „száraz” levegő és a „vízpára” hatására:

$$T = T_d + T_w = 10^{-6} \int N_d \, ds + 10^{-6} \int N_w \, ds \quad (3)$$

A troposzféra hatásának számításához szükséges még a refraktivitás pontszerű értékének számítása, ez az Essen-Froome képlettel a következők szerint írható fel:

$$N = k_1 * \frac{p_d}{T * Z_d} + k_2 * \frac{e}{T * Z_w} + k_3 * \frac{e}{T^2 * Z_w} \quad (4)$$

ahol p_d a száraz levegő légnyomása hPa-ban, e parciális párányomás, T a hőmérséklet K-ben, Z_d a száraz levegő kompresszibilitási tényezője, míg Z_w a vízgőzé, k_1 , k_2 , k_3 tapasztalati konstansok, értékük sorban: 0,77604 K/Pa, 0,64790 K/Pa és 3776 K²/Pa. Az előbbi paraméterek közül a T hőmérséklet és az e parciális párányomás mérhetőek, a száraz levegő nyomása viszont nem. A parciális párányomás száraz-nedves hőmérőpárt használva az alábbi képlettel számítható:

$$e = e'_{max} - A * p(t - t') \quad (5)$$

ahol t és t' a száraz és a nedves hőmérőn leolvasott hőmérsékletek, e'_{max} a vízgőzzel telített levegő maximális párányomása t' hőmérsékleten és p a légnyomás értéke.

A következőkben az ideális és valós gázok állapotegyenleteit írjuk fel, azért, hogy a száraz levegő légnyomása helyett a mérhető teljes légnyomással számítsuk a refraktivitást.

Az ideális gázok állapotegyenlete:

$$p * V = n * R * T \quad (6)$$

ahol p a gáz nyomása, V a térfogata, n a molekulák száma a gázban, T a hőmérséklet és $R = 8,314 \text{ J/(mol*K)}$ az egyetemes gázállandó.

Valós gázoknál az előző egyenletet a molekulák miatti kohéziós erők és a molekulák mérete miatt módosítani kell. A valódi gázok állapotegyenletének egyik formája a van der Waals egyenlet:

$$\left(p + \frac{n^2 * a}{V^2}\right) (V - n * b) = n * R * T \quad (7)$$

ahol a és b kísérleti úton meghatározott együtthatók, a a molekulák közötti kohéziós erőktől függ, míg b a molekulákban lévő részecskék saját térfogatától. Ha átrendezzük az egyenletet, akkor kifejezhető a paraméterek jelentése:

$$p = \frac{n * R * T}{V - n * b} - a * \frac{n^2}{V^2} \quad (8)$$

A következőkben bevezetjük a kompresszibilitási tényezőt:

$$Z = \frac{p \cdot V_m}{R \cdot T} = \frac{p \cdot V}{n \cdot R \cdot T} = \frac{V}{V - n \cdot b} - \frac{a \cdot n}{R \cdot T \cdot V} = \frac{1}{1 - \frac{n \cdot b}{V}} - \frac{a \cdot n}{R \cdot T \cdot V} \quad (9)$$

ahol V_m a mólterfogat. Ideális gázokra $Z=1$, mert a $P \cdot V$ és $n \cdot R \cdot T$ egyenlők.

Az előbbiek szerint a valódi gázok állapotegyenlete a következő alakú is lehet:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot Z \cdot T \quad (10)$$

A továbbiakban be szeretnénk helyettesíteni az előző egyenletbe az adott gáz sűrűségét:

$$\rho_i = \frac{m}{V} \quad (11)$$

Eközben még felhasználjuk az alábbiakat:

$$n = \frac{m}{M} \quad (12)$$

$$R_i = \frac{R}{M} \quad (13)$$

Ezek után a következő egyenletet kapjuk:

$$p_i = \rho_i \cdot R_i \cdot Z_i \cdot T_i \quad (14)$$

ahol R_i az adott gáz specifikus gázállandója, ami száraz levegőre például $R_d = 286,9$ J/kg/K, míg vízpárára $R_w = 461,5$ J/kg/K.

Majd a (14) egyenlet alapján felírt parciális nyomásokat beírjuk az Essen-Froome egyenletbe (4):

$$p_d = \rho_d \cdot R_d \cdot Z_d \cdot T_d \quad (15)$$

$$p_w = e = \rho_w \cdot R_w \cdot Z_w \cdot T_w \quad (16)$$

$$T_d = T_w = T \quad (17)$$

$$N = k_1 \cdot R_d \cdot \rho_d + k_2 \cdot R_w \cdot \rho_w + k_3 \cdot \frac{R_w \cdot \rho_w}{T} \quad (18)$$

Mivel a száraz levegő parciális nyomása és sűrűsége sem mérhető, ezért ezeket a teljes légnyomás és parciális párányomás különbségeként számoljuk ki:

$$p_d = p - e \quad (19)$$

$$\rho_d = \rho - \rho_w \quad (20)$$

A (20)-as egyenletet a (18)-ba helyettesítve:

$$N = k_1 \cdot R_d \cdot \rho + \left(k_2 - k_1 \cdot \frac{R_d}{R_w} \right) \cdot R_w \cdot \rho_w + k_3 \cdot \frac{R_w \cdot \rho_w}{T} \quad (21)$$

A sűrűségek helyett a hőmérséklet és a parciális párányomás segítségével is felírható a refraktivitás:

$$N = k_1 * R_d * \rho + \left(k_2 - k_1 * \frac{R_d}{R_w}\right) * \frac{e}{Z_w * T} + k_3 * \frac{e}{Z_w * T^2} \quad (22)$$

Megjegyezzük, hogy a (21)-es és (22)-es képletek már nem csak a „száraz” levegő hatását tartalmazzák, hanem a hidrosztatikus egyensúlyban lévő levegő is befolyásolja az egyenleteket. Így az előbb említett képletek első tagját a hidrosztatikus résznek, a többit pedig nedves résznek nevezzük.

Smith és Weintraub által felírtak szerint (3), a zenitirányú késleltetés hidrosztatikus és nedves részre bontható. A (21)-es egyenletet a (3)-ba beírva meghatározhatjuk a troposzféra miatti késleltetés nagyságát:

$$ZTD = ZHD + ZWD = 10^{-6} * k_1 * R_d \int_{z_{ant}}^{t_{fh}} \rho \, ds + 10^{-6} * \left(k_2 - k_1 * \frac{R_d}{R_w}\right) * R_w \int_{z_{ant}}^{t_{fh}} \rho_w \, ds + 10^{-6} * k_3 * R_w \int_{z_{ant}}^{t_{fh}} \frac{\rho_w}{T} \, ds \quad (23)$$

Az első tag adja meg a hidrosztatikus késleltetés értékét, míg a többi tag a vízpára hatását fejezi ki.

A troposzférikus késleltetés egyrészt számítható a fenti képlettel rádiószondás mérésekkel meghatározott légnyomás, hőmérséklet és parciális párányomás adatokból. Gyakran viszont a rádiószondás mérések helyett különböző modellekkel veszik figyelembe a troposzféra által okozott késleltetést. Az összes modellre jellemző, hogy a vevő szintjében mért vagy modellezett paraméterektől függenek, mint a légnyomás, hőmérséklet és relatív páratartalom.

Az előbb említett meteorológiai paramétereket meteorológiai állomások mérései alapján adhatjuk meg. Legtöbbször viszont a mérések helyett sztenderd atmoszféra modellekkel számítjuk ezeket a paramétereket. Többféle sztenderd atmoszféramodell is van (US, ISO, ICAO, stb.), de 32 km-es tengerszint feletti magasságig egyszerűen képletekkel számíthatjuk a légnyomást, a hőmérsékletet, a relatív páratartalmat valamint a hőmérsékletből és a relatív páratartalomból még a vízgőz parciális párányomása is meghatározható.

3. Troposzféra modellek

Az előző fejezetben már említettük, hogy gyakran használnak modelleket a troposzférikus késleltetés megadására. A GNSS mérések feldolgozásánál is ezeket alkalmazzák. A következőkben *Ádám és társai (2011)* szerint megismerkedünk néhány modellel.

3.1. Hopfield modell

Az álláspont feletti h magasság függvényében Hopfield az alábbi képletet írta fel a refraktivitás hidrosztatikus összetevőjére:

$$N_d(h) = N_{d,0} \left(\frac{h_d - h}{h_d} \right)^4 \quad (24)$$

$$\text{ahol } h_d = 40136 + 148,72(T - 273,16) \quad (25)$$

ami a troposzféra vastagságát írja le az álláspont felett, továbbá $N_{d,0}$ az álláspont meteorológiai adataiból számolt refraktivitás és T az álláspont hőmérséklete. Ha a (24)-es képletet h szerint integráljuk, akkor a zenit irányú hidrosztatikus késleltetést kapjuk eredményül:

$$ZHD = 10^{-6} N_{d,0} \int_{h=0}^{h=h_d} \left(\frac{h_d - h}{h_d} \right)^4 dh = 10^{-6} N_{d,0} \frac{1}{h_d^4} \left[-\frac{1}{5} (h_d - h)^5 \right]_{h=0}^{h=h_d} \quad (26)$$

$$ZHD = \frac{10^{-6}}{5} * N_{d,0} * h_d \quad (27)$$

A nedves rész pedig a következő:

$$ZWD = \frac{10^{-6}}{5} * N_{w,0} * h_w \quad (28)$$

ahol $h_w = 11000$ m.

3.2. Black modell

A hidrosztatikus összetevő a Black modellben az alábbi képlettel adható meg:

$$N_d(h) = N_{d,0} \left(\frac{h_d - h}{h_d} \right) \quad (29)$$

$$\text{ahol } h_d = 148,98(T - 4,12) \quad (30)$$

A Black modell és Hopfield modell hidrosztatikus összetevői nagyon hasonló értékűek, különbségük nem haladja meg az 1%-ot. A nedves összetevő a következőképpen számítható:

$$ZWD = k_w \quad (31)$$

ahol $k_w = 0,28$ méter a trópusokon és nyáron a mérsékelt égövben, $0,20$ méteres a mérsékelt égöv területén tavasszal és ősszel, $0,12$ méter télen az óceáni éghajlaton, $0,06$ méteres a kontinentális éghajlaton és $0,05$ méter a sarkvidéken.

3.3. Saastamoinen modell

Az előző modellekkel csak a zenitirányú késleltetést adhatjuk meg, amit különböző leképzési függvényekkel át kell még számítani a műhold irányára. Azonban a Saastamoinen modell már a teljes műholdirányú késleltetést határozza meg:

$$TD = \frac{0,002277}{\cos z} \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) * e - \tan^2 z \right] \quad (32)$$

ahol z a műhold irányának zenitszöge.

3.4. A finomított Saastamoinen modell

Saastamoinen finomított a modelljén két korrekciós tényező alkalmazásával, így a következőkkel módosult a fenti képlet:

$$TD = \frac{0,002277}{\cos z} \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - B * \tan^2 z \right] + \delta R \quad (33)$$

ahol B a vevő tengerszint feletti magasságától függ és δR a műhold zenitszögével és a vevő tengerszint feletti magasságával van összefüggésben.

A fenti tényezők táblázatok alapján interpolálhatók vagy képletekkel is számíthatók:

$$B = 1,1549 - 0,1551 * h + 0,0074 * h^2 \quad (34)$$

$$\delta R = -0,0164 + 0,0027 * h - 0,00025 * h^2 + \frac{0,3773 - 0,0675 * h + 0,0043 * h^2}{82,7119 - z} \quad (35)$$

ahol h az antenna magassága km-ben megadva.

3.5. A GPT2 és GPT2W modellek

A következőket Rózsa (2014) szerint mutatjuk be. A GPT2 egy globális empirikus modell, amelyben a meteorológiai paramétereket az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központ) adatai alapján számítják a havi közepes profilokból, 1°-os vízszintes felbontással, a 2001-2010-es időszak felhasználásával. A felszíni meteorológiai paraméterek – a nyomás, a hőmérséklet, a vízgőz parciális párányomása, a hőmérsékleti gradiens és újabban már a vízgőz gradiens - modellezése az évi, sőt a féléves változásokat is becsli. Ezzel ellentétben a feljebb ismertetett modellek az éves, féléves ingadozásokat kiátlagolva az év minden napjára ugyanakkora paramétereket használnak. Az ingadozásokat figyelembe véve jelentősen nő a becslés pontossága. A modell hátránya volt, hogy a vízgőz gradiensét nem vonta bele a számításokba, de ma már ezt is figyelembe veszik, így megnőtt a modellel számított nedves késleltetés pontossága.

3.6. A műhold irányú késleltetés megadása

3.6.1. A Hopfield, a Black és a Niell leképzési függvények

A modellek zenitirányú késleltetését műhold irányúvá kell számítanunk, ezt a modellekhez tartozó leképzési függvénnyel tehetjük meg *Ádám és társai (2011)* szerint. A Hopfield modellben a hidrosztatikus és nedves késleltetésre a leképzési függvények a következők:

$$F_d(E) = \frac{1}{\sin \sqrt{E^2 + 6,25}} \quad (36)$$

$$F_w(E) = \frac{1}{\sin \sqrt{E^2 + 2,25}} \quad (37)$$

a fentiekben E a műhold magassági szöge. Black modellben a leképzési függvények a következőképpen alakulnak:

$$F_d(E) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{\cos E}{1 + (1-l_c) \frac{h_d}{r_s}} \right]^2}} \quad (38)$$

$$F_w(E) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{\cos E}{1 + (1-l_c) \frac{h_w}{r_s}} \right]^2}} \quad (39)$$

az előbbieken $l_c=0,85$ ($E>5^\circ$), $h_w=13000$ méter illetve r_s az álláspontba mutató geocentrikus helyvektornak a hossza.

A Saastamoinenhez a Niell-féle leképzési függvényt alkalmazzuk. A modellel számítjuk a hidrosztatikus és nedves késleltetést zenit irányban (azaz $z=0$) majd a műhold irányú késleltetést a Niell-féle leképzési függvénnyel adjuk meg, ami az alábbi:

$$F_d(E) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{\sin E + \frac{1 + \frac{a}{b}}{\sin E + \frac{b}{\sin E + c}}} + \delta F_d(H, E) \quad (40)$$

ahol az együtthatók a földrajzi szélesség és az év január elsejétől eltelt napjainak függvényei:

$$a(\varphi, t) = a_{\text{átlag}}(\varphi_i) + a_{\text{amplitúdó}}(\varphi_i) * \cos \left(2 * \pi * \frac{t-t_0}{365,25} \right) \quad (41)$$

ahol $a_{\text{átlag}}$ és $a_{\text{amplitúdó}}$ értékek függvényeit táblázatban definiálják illetve t_0 az év 28. napja. Továbbá a tengersiz feletti magasságtól függő korrekció a következő:

$$\delta F_d(H, E) = \left[\frac{1}{\sin E} - f * (E, a_{\text{mag}}, b_{\text{mag}}, c_{\text{mag}}) \right] * H \quad (42)$$

ahol f a (40)-es képlettel megadott lánc tört értéke.

3.6.2. A GMF és a VMF leképzési függvények

A továbbiakat *Boehm és társai (2006)* alapján mutatjuk be. A troposzferikus késleltetéseket és a hozzájuk tartozó leképezési függvényeket numerikus időjárási modellek (NWM, Numerical Weather Models) segítségével is meghatározhatjuk. Ezek a modellek a légkör fizikai paramétereit adják meg nagy tér- és időbeli felbontásban, amelyekből a refraktivitás értékek számíthatók. Ilyen NWM adatnak számítanak az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központ) adatai. Az NMF (Niell Mapping Function - Niell Leképzési Függvény) ezzel szemben egy évnyi beépített rádiószonda adaton alapul, amik elsősorban a Föld északi féltekéről származnak. A leképzési függvény tér- és időbeli alakulása a szélességtől és a szezonális változásoktól függ. Az NMF hiányossága, hogy a déli féltekéről hiányzó adatok miatt ott nagyobbak az eltérések. Másrészt rönl nem fejezi ki a földrajzi hosszúságtól való függést, ezért ez hibát okozhat a helymeghatározásban. Az NMF-fel nem biztosítható a leképezési függvények változásainak olyan nagy tér- és időbeli felbontással történő reprezentálása, mint egy olyan modellel, ami NWM-en alapul.

Fontos, hogy globálisan használható, programokba könnyen implementálható pontosabb leképzési függvények álljanak rendelkezésre, hogy minél jobb troposzferikus késleltetéseket kapjunk. A VMF (Vienna Mapping Function - Vienna Leképzési Függvény) jelenleg a legjobb pontosságot és megbízhatóságot elérő leképzési függvény. Ez az együtthatókat 6 óránkénti fájlokban adja meg és az aktuális ECMWF adatokon alapul.

A GMF (Global Mapping Function - Globális Leképzési Függvény) modell a globális ECMWF numerikus időjárási modellen alapul, archiv ECMWF adatokat felhasználva. A nyomás, a hőmérséklet és a páratartalom $15^{\circ}15^{\circ}$ -os globális rácsainak (gridek) havi középértékeit alkalmazza a számításoknál. A GMF együtthatóit a VMF paramétereinek egy gömb alakú harmonikus globális ráccsá történő kiterjesztésével kapjuk. A GMF együtthatóihoz az NMF-hez hasonlóan csak az állomás koordinátáira és az éven belüli nap sorszámára van szükségünk, így modellezzük a földrajzi helyzet és a szezonális változások hatását. A 6 óránkénti aktuális értékeket felhasználó VMF-hez viszonyítva a GMF modellnek rövidtávon kissé rosszabb a pontossága. Ugyanakkor az NMF regionális magassági eltérések és éves hibák jelentősen csökkennek a GMF alkalmazásával. Az eddigi, leképzési függvényeknél használatos (40)-es képleten finomítottak és ez, a kevés állomás 1 évnnyi adatát használó NMF-hez képest már globális NWM adatokat használ fel, hosszabb időszakot figyelembe véve.

A troposzferikus késleltetés zenit irányban átlagosan 2,3 méter, amelyből 90 % a hidrosztatikus és 10 % a nedves késleltetés. Viszont, ahogy közeledünk a horizont felé jelentősen nő a késleltetés értéke, 5° -os magassági szög körül már több mint 20 méteres is lehet.

4. Troposferikus késleltetések számítása a Bernese 5.2 GNSS szoftverrel

A továbbiakban ismertetjük a Bernese 5.2-vel a késleltetések számításának részleteit, a szükséges adatoktól a feldolgozás lépésein át az eredményekig.

4.1. A troposferikus késleltetések számításához felhasznált szoftver és adatok

A következőkben bemutatjuk a troposferikus késleltetések számításánál alkalmazott Bernese 5.2-es GNSS feldolgozó szoftvert és a felhasznált adatokat. A troposzféra okozta hatás kimutatásához egy Magyarországtól Nyugat Európáig terjedő permanens állomáshálózatot hoztunk létre és letöltöttük az állomásoknak a késleltetések meghatározásához szükséges fájljait.

4.1.1. Bernese 5.2 GNSS szoftver

A Bernese jelentősebb alkalmazásait *Dach és társai (2007)*, *Dach és Walser (2013)*, *Tóth (2012)* és *Tuchband (2007)* segítségével ismertetjük. A Bernese a tudományos igényű feldolgozásokat támogató szoftvercsomag. Nagy teljesítményű és pontosságú, igen korszerű utófeldolgozó program. Ragaszkodik a naprakészséghez, nemzetközileg elfogadott sztenderdeken alapul és sok ellenőrzési lehetőséget tartalmaz. Használják a szakemberek a kutatás és az oktatás területén, a nagy pontosságú GNSS felmérésekért felelős szervek, a permanens állomáshálózat fenntartásáért felelős szervek valamint kereskedelmi felhasználók nagy pontosságú, megbízhatóságú és kapacitású összetett alkalmazások esetén. A Bernese 5.2 megfelel külön-külön GPS és GLONASS adatok elemzésére valamint GPS, GLONASS és GALILEO adatok variációinak vizsgálatára is. Képes egy- és kétfrekvenciás információk feldolgozására is. Nagyszámú vevőkészülék adatait tudja kezelni, különböző típusú vevőknek a kombinációját is, a fáziscentrumok külpontosságának figyelembevételével. Alkalmas a troposzféra és ionoszféra folyamatos megfigyelésére és modellezésére, a műholdak pályáinak meghatározására, vevő és műhold órahibák előállítására és állomások koordinátáinak számítására egy adott időszakra vonatkozóan. Képes feloldani a ciklustöbbleteltéréseket hosszabb bázisvonalakon és a legkisebb kényszerű hálózati megoldás létrehozására is. A program használatában menürendszer nyújt segítséget. A feldolgozáshoz szükséges lépéseket külön, egymás után is elvégezhetjük, de automatizálhatjuk is a BPE (Bernese Processing Engine) segítségével. Ekkor az egymástól független folyamatok párhuzamosan is lefuthatnak, jelentősen lerövidítve ezzel a számítások idejét.

A szoftver alapja az 1988 márciusában elkészült 3.0-as változat, amit folyamatosan fejlesztettek, finomítottak. 1988 és 1995 között a GPS nagy pontosságú alkalmazásainak gyors fejlődése miatt 5 féle kiadása van a szoftvernek: a 3.1 1988 decemberében, a 3.2 1990 áprilisában, a 3.3 1991 májusában, a 3.4 1993 májusában és a 3.5 1995 februárjában jelent meg. Az 1996 szeptemberében kiadott 4.0-ás változat tartalmazta először az ADDNEQ scriptet és a BPE automatikus feldolgozás funkciót. Az 1999 novemberétől elérhető 4.2-es változat már a GLONASS adatokat és SLR

méréseket is képes volt feldolgozni, az ADDNEQ továbbfejlesztéseként az ADDNEQ2 script jelent meg, ahol Fortran 90-et használtak. Az 5.0-át 2004 áprilisában adták ki, a 4.2-es verzióhoz képest sok változtatás történt. Néhány ezek közül a felhasználóbarát grafikus felület létrehozása, a fájlok periódus változóval való elnevezésének lehetősége, a BPE script esetén a Perl programozási nyelv használata, beépített html alapú segédlet, pontos pálya-meghatározás LEO műholdakra is valamint a troposzféra modellezésének javulása. A Bernese 5.2 2013 júliusában jelent meg, ami számos újdonságot tartalmaz: akár egy külön ablakban is beállíthatjuk a feldolgozás idejét egy nap vagy egy időintervallum kiválasztásával. Ebben a verzióban vált elérhetővé a GALILEO adatok feldolgozása illetve most már többféle ciklustöbbsértelműség-feloldási technika és troposzféra modell közül választhatunk. GNSS feldolgozásnál a Saastamoinen, a Hopfield, az Essen-Froome modelleket használhattuk eddig, ez bővült a GMF és VMF modellekkel. SLR adatok esetén a Marini-Murray modellen kívül már a Mendes-Pavlist is alkalmazhatjuk.

Nemzetközi szinten is sok helyen alkalmazzák, szerepe van többek között az IGS pálya-meghatározásában, EUREF permanens állomások méréseinek feldolgozásában (pl.: FÖMI-KGO), GPS műholdak és földi vevők antennáinak tanulmányozásában, mozgásvizsgálati programokban, meteorológiai vizsgálatokban.

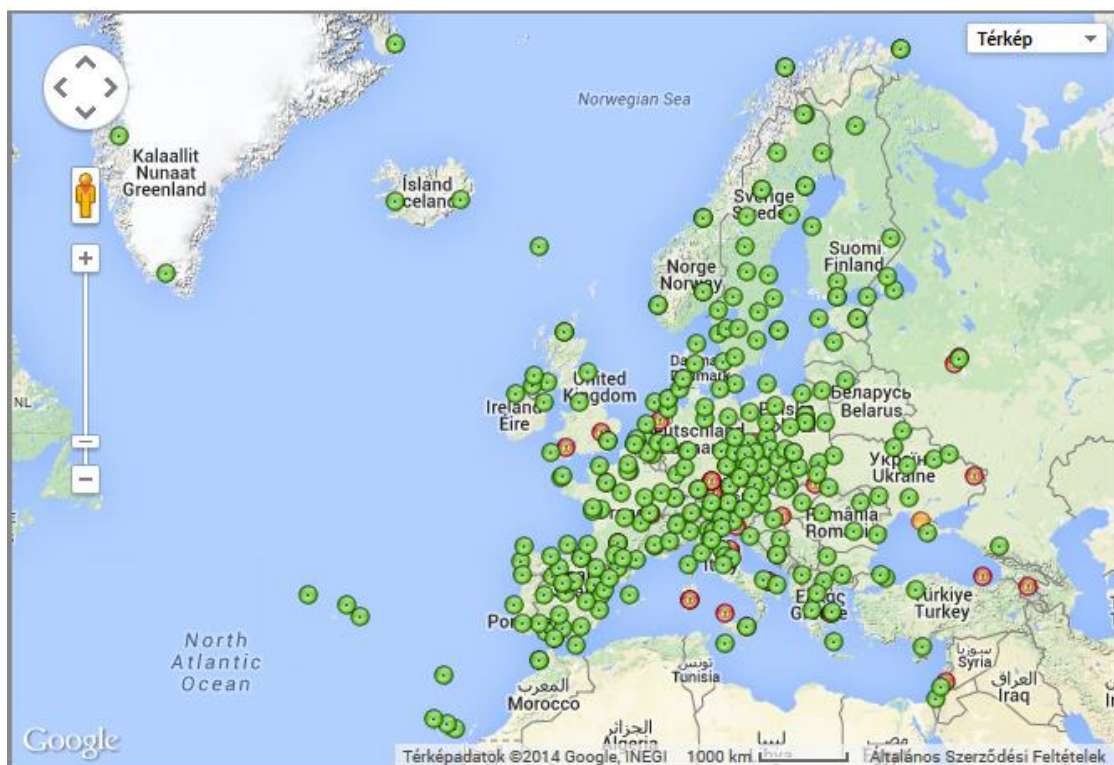
4.1.2. Felhasznált adatok

A feldolgozáshoz a Nemzetközi GNSS Szolgálat (IGS) és EUREF Permanens Állomáshálózat (EPN) adatait használtuk fel. Az összes felhasznált permanens állomás tagja az EPN hálózatnak, néhány viszont az IGS-nek is eleme. 2014. július 20. és 26. közötti hetet vizsgáltuk.

A felhasznált adatokat *Ádám és társai (2011)* szerint mutatjuk be. Egyre nőtt az igény a műholdas helymeghatározó rendszereken alapuló geodéziai hálózatokra, így 1987-1988 alatt egy közös európai háromdimenziós hálózat (EUREF) és vonatkoztatási rendszer (ETRS89) létrehozása mellett döntöttek. Az EUREF-et SLR és VLBI állomások hálózatára alapozva alkották meg, 1989-ben végezték el az első GPS mérési kampányt, majd folyamatosan bővítették a hálózatot. Az EUREF célja volt egy geodéziai és geodinamikai alkalmazásokhoz használható vonatkoztatási rendszer (ETRS89) létrehozása valamint transzformációs paraméterek megadása az EUREF és a különböző országok geodéziai hálózatai között. Magyarország 5 ponton végrehajtott mérésekkel 1991-ben csatlakozott a hálózathoz. Majd 2002-ben újra csatlakozó méréseket végeztek 9 ponton. Több ország nemzeti koordináta rendszerként használja az ETRS89 vonatkoztatási rendszert, viszont célszerű nemzetközi együttműködések esetén az ETRS89-et alkalmazni azoknak az országoknak is, melyeknek más a nemzeti koordináta rendszere. A meghatározott koordinátákat az EUREF három pontossági osztályba sorolja: A-osztály, ahol mérési időponttól függetlenül 1 cm pontosak a koordináták; B-osztály, ahol az adott mérési időtartamra vonatkozóan 1 cm pontosak a koordináták illetve C-osztály, ami 5 cm körüli koordináta-pontosságot jelent.

Az EPN fontos szerepet játszik az EUREF hálózat ETRS89 vonatkoztatási rendszerének fenntartásában és geodinamikai vizsgálatokban. 1995-ben kezdték el fejleszteni a hálózatot, ami azóta is folyamatosan növekszik, évente átlagosan 14

állomással. 2014. december elején 264 permanens állomásból állt, amelyből 263 volt aktív (3. ábra). Az EPN magyarországi tagjai: 1996-tól PENC, majd ezt 2012-től a PEN2 állomás váltotta, 2001-től OROS (Orosháza), 2002-től NYÍR (Nyírbátor), 2004-től BUTE és 2007-től SPRN (Sopron). Az EPN mérések alapján mindhárom koordináta 1 cm-es pontossággal, mérési időponttól függetlenül meghatározható, ez az elérhető legjobb pontosságú A-osztály az EUREF-nél. A méréseket több adatközpont gyűjti, majd 16 feldolgozó központ végzi a kiértékelést, egységes számítási elveknek megfelelően. A FÖMI-KGO is ezek közé tartozik, ami a Bernese programot használja ehhez. Minden állomást legalább három központnak fel kell dolgoznia. Az EPN a globális, egész Földet lefedő Nemzetközi GNSS Szolgálat (IGS) európai sűrítő hálózatának tekinthető.



3. ábra: EPN hálózata

http://www.epncb.oma.be/_networkdata/stationmaps.php (2014)

Az IGS 1993-ban jött létre még Nemzetközi GPS Geodinamikai Szolgálat néven, a Nemzetközi Geodéziai Szövetség kezdeményezésére. Az IGS tagja a Csillagászati és Geofizikai Adatelemző Szolgálatok Szövetségének (FAGS) és együttműködik a Nemzetközi Földforgás és Vonatkoztatási Rendszerek Szolgálatával (IERS). 2014 decemberében több mint 453 állomás alkotta (4. ábra). A mérési adatokat regionális adatközpontok gyűjtik össze és tárolják napi fájlokban, de sok állomás óránként továbbítja a mért értékeket. 2007 óta vannak már valós időben elérhető adatok is az interneten. Az adatokat 10 analízis központ dolgozza fel minden nap, különböző szoftverekkel a hibák kiszűrése miatt. Ezek közül 4 található Európában: 1 Svájcban, 2 Németországban és 1 Csehországban. Az IGS ötféle pályamegoldást kínál: fedélzeti

megoldás valós időben méteres pontossággal, IGS ultra-rapid pályamegoldás valós idejű és közel valós idejű felhasználóknak 5 cm-es és 3 cm-es pontossággal, IGS rapid pályamegoldás naponta, 2,5 cm körüli pontossággal, IGS Final pályamegoldás, azaz a precíz megoldás, ami 2 hetes feldolgozás eredménye, 2,5 cm-es pontosságú és a rapid megoldásnál nagyobb megbízhatóságú órahibával rendelkezik. Az IGS adatait, különböző szolgáltatásait több adatközpontban érhetjük el. Európában a francia Nemzeti Geográfiai Intézet mellett a német Kartográfiai és Geodéziai Szövetségi Hivatalnak (BKG) is van egy adatközpontja. A BKG-ről az IGS adatok és termékek illetve az EPN adatai is letölthetők.



4. ábra: IGS hálózata

<http://www.igs.org/network> (2014)

A troposzférikus késleltetés meghatározásához 10 permanens állomást választottunk ki, köztük olyanokat is, amelyeknek a meteorológiai fájljai is letölthetők, mert ezeket is felhasználva az eredmény javulása várható. További szempont volt, hogy egy nagyobb területet fedjenek le Nyugat-Európára kiterjedve, valamint, hogy több hazai állomás is a feldolgozás része legyen. A számításokba a külföldi MORP, LAGO, ZIMM, DRES, WARN, MATE illetve a hazai SPRN, BUTE, OROS és PEN2 állomásokat vontuk be (5. ábra).



5. ábra: A felhasznált permanens állomások

Google Earth (2014)

A feldolgozáshoz az állomások különböző adataira volt szükségünk, amiket a német Kartográfiai és Geodéziai Szövetségi Hivatal (BKG) által fenntartott adatközpontból nyertünk, a GNSS Data Center-ből, amelyben az IGS adatok és termékek mellett az EPN adatai is elérhetőek. Innen töltöttük le az EPN és az IGS állomások mérési fájljait és a külföldi állomások meteorológiai fájljait. A meteorológiai fájl csak annál az állomásnál van hatással a késleltetésre, amelyik állomáshoz tartozik. Továbbá az IGS termékek közül a hetekre lebontott földforgás paramétereket és a precíz pályaadatokat is innen nyertük. Utóbbiak tartalmazzák a műhold órahibákat, így azokat nem volt szükséges külön letölteni. Minden fájl tömörítve van, így először kitömörítettük ezeket, viszont a mérési fájlknál még további kitömörítés szükséges, ehhez az interneten elérhető crx2rnx programot használtuk. A Bernese-vel való feldolgozáshoz minden fájlt át kellett neveznünk nagybetűsre, illetve szükséges volt egyes kiterjesztések módosítása is.

Letöltöttük az állomások koordinátáit, így nem kell azokat a Bernese-vel több scriptet futtatva kiszámítani, ezzel lerövidítettük a feldolgozást. Az egyik scriptben a Bernese a mérési fájlok alapján is elő tudja állítani a koordinátákat, de a letöltöttek pontosabbak. Az IGS állomások esetén a koordináták az ITRF weboldalon a keresett napra vonatkozóan rendelkezésre álltak. EPN-nél a megadott időponthoz tartozó koordinátákat kellett átszámítani a keresett dátumra az állomások sebességét felhasználva.

Az állomások elérhetők az alábbi oldalakon:

<http://www.igs.org/network>

<http://www.epncb.oma.be/networkdata/stationmaps.php>

A koordinátákat innen tölthetjük le:

http://itrf.ensg.ign.fr/site_info_and_select/solutions_extraction.php

http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coordinates/

4.2. A feldolgozás

4.2.1. A troposzférikus késleltetések előállítása

A következőkben az új Bernese 5.2-es GNSS szoftver több beépített modelljével is kiszámítjuk a troposzférikus késleltetéseket. A modellek hidrosztatikus részét a priori modellként használva becsüljük a nedves késleltetések értékét. Az eredmények javulását várva meteorológiai fájlokat is bevontunk a feldolgozásba.

A számítást a már említett BPE automatikus feldolgozással hajtottuk végre. Ennek a futtatásához elvégeztük a feldolgozás scriptjeinek beállításait illetve elkészítettük a folyamat leíró fájlját (process control file - PCF). A PCF-ben megadjuk, hogy a feldolgozás során milyen scripteket használunk, illetve azt is, hogy ezek hol találhatók a számítógépen. Továbbá beállíthatjuk, hogy az egyes scriptek melyik scriptek eredményeire várnak, így az egymástól függetlenek párhuzamosan futhatnak, lerövidítve ezzel a feldolgozás idejét. A számításnál használt scriptek a következők:

POLUPD

Az IERS pólusinformációt konvertálja Bernese pólus formátumba.

PRETAB

A két hét alatt meghatározott precíz pályaadatokból és a Bernese formátumú pólusinformációból állítja elő a táblázatos műholdpályákat. Segítségével kinyerhetők még a pályaadat fájlból a műhold órahibák, amiket Bernese formátumba is átalakít, így az órahibákat nem is szükséges külön letölteni.

ORBGEN

A műhold pályáját (az ún. sztenderd pályát) numerikus integrálással állítja elő a program a már létrehozott pólusfájlból és táblázatos pályaadatokból. Ez a pálya a műholdak mozgását befolyásoló, modellezhető tényezőket is figyelembe veszi, így centiméteres pontosságú megoldást kapunk.

RXOBV3

A RINEX formátumú mérési fájlokat konvertálja bináris Bernese formátumra a kód- és fázismérések esetén is (CZH, CZO, PZH, PZO fájlok állomásokra). A programmal az állomások koordinátáit is előállíthatjuk a mérési fájlokból, de pontosabbak a 4.1.2. fejezet végén említett honlapokról letöltött koordináták.

RXMBV3

Bernese formátumúvá alakítja át a RINEX formátumú meteorológiai fájlokat.

CODSPP

Felhasználja a pólusfájlt, a sztenderd pályát, a műhold órahiba fájlt, a mérési fájlt és az általunk összegyűjtött koordinátákat tartalmazó koordinátafájlt. A vevőóra szinkronizációját végzi a GPS idővel és a kódérések feldolgozásával előzetes állomáskoordinátákat határoz meg, különbségképzés nélkül.

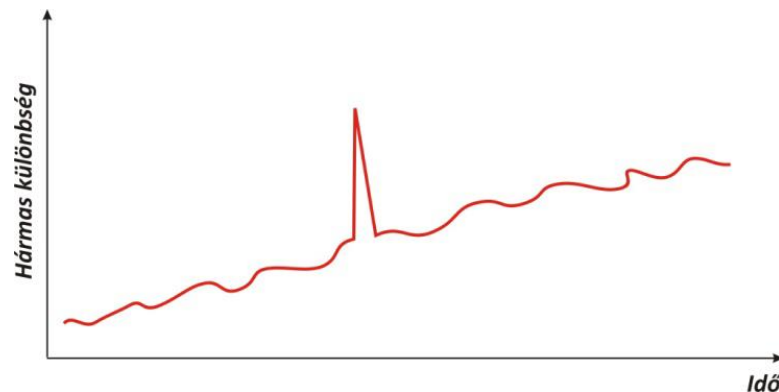
SNGDIF

Az állomások közötti bázisvonalakat állítja elő, egyszeres különbségképzéssel kiejti a műholdóra hibát. Az egyszeres különbség fiktív mérési eredmény, amit úgy kapunk meg, hogy a relatív helymeghatározásnál egy vektor két végpontján a vevőknek azonos időpontban és azonos műholdakra végzett észleléseit kivonjuk egymásból. Így kiesik a műhold órahiba és hardverkésés, de ismeretlenként maradnak a vevők órahibái és hardverkésései valamint a ciklustöbbértelműség is. A program létrehozza az egyszeres különbségfájlokat kód- és fázismérés esetén (CSO, CSH, PSH, PSO fájlok állomáspárokra). Különböző módszerekkel állíthatjuk elő a bázisvonalakat, OBS-MAX esetén a program minden állomást párosít minden állomással, így a maximális számú bázisvonalat hozhatja létre, ez az alapbeállítás, SHORTEST-nél a legrövidebb bázisvonalakat valósítja meg, a STAR egy kiválasztott állomástól az összes többi állomáshoz induló bázisvonalakat állítja elő, a DEFINED két állomás nevével megadott vonalakat, míg a MANUAL csak egy bázisvonalat készít el.

MAUPRP

A script az egyszeres különbségeket, a pólusfájlt, az órahiba fájlt, a sztenderd pályát, a meteorológiai fájlokat és a CODSPP-vel számított koordinátafájlt használja fel. Durvahiba szűrést végez, a fázismérések előfeldolgozását hajtja végre, előzetes koordinátákat hoz létre hármaskülönbségképzéssel, így a ciklusugrások keresését és esetleges javítását végzi. Amennyiben a ciklusugrások javítása nem végezhető el, úgy a kimaradt ciklusokat követően új ciklustöbbértelműség paramétert illeszt az egyszeres különbségek fájljába.

A hármaskülönbségképzéssel vizsgálhatjuk meg, hogy terheli-e ciklusugrás a méréseinket (*Ádám és társai (2011)*). Ez két egymást követő időpontban végzett kettős különbség eltéréseként határozható meg. Ezáltal a hármaskülönbségek nem tartalmazzák a ciklustöbbértelműségeket sem. Az idő szerint ábrázolt hármaskülönbségek ciklusugrásmentes időszakban lassan változnak. Ciklusugrás esetén az egymást követő kettős különbségekben lévő ciklustöbbértelműségek nem egyeznek meg az egyik vagy a másik műholdra, ezért itt kiugró értékű lesz a hármaskülönbség (6. ábra). Majd a ciklusugrás után, az azelőtti értékhez hasonló értéket vesz fel, így megállapítható melyik mérési epocha tartalmaz ciklusugrást.



6. ábra: Hármaskülönbségek ciklusugrás esetén

Ádám és társai (2011)

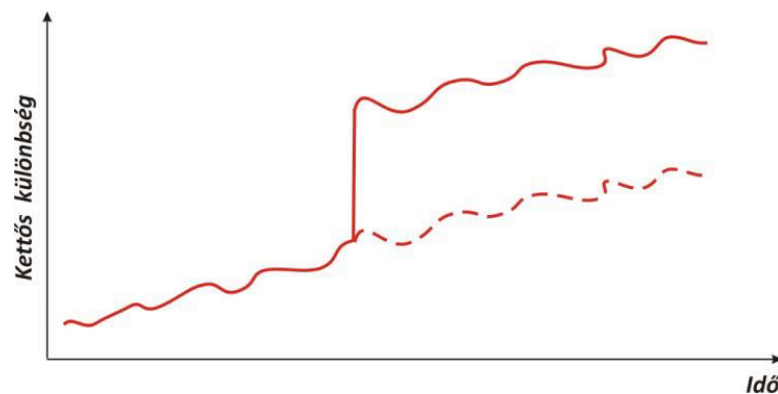
GPSEST

A paraméterek becslésével és a mérések kiegyenlítésével foglalkozik. Becsülhetjük az állomás koordinátáit, a vevők órahibáit, a műhold pályáját, a ciklustöbbsértelműségeket, a földforgás paramétereit, a geocentrum koordinátáit, a troposzféra és az ionoszféra okozta késleltetéseket stb.. Ez a sokrétűség a Bernese nagy előnye az általános GPS feldolgozó szoftverekhez képest, ahol általában csak a koordináták határozhatók meg. Ezt a scriptet különböző bemenő adatokkal kétszer futtattuk.

Szükségünk van a ciklustöbbsértelműségek ismeretére, ezért első lépésben az L_1 és L_2 fázistávolságokon elvégezzük a ciklustöbbsértelműségek feloldását. Ehhez a kvázi-ionoszféra mentes (QIF) ciklustöbbsértelműség feloldási technikát alkalmaztuk. Ezt követően a második lépésben az ismert ciklustöbbsértelműségek felhasználásával becsültük a troposzférikus késleltetés értékét.

GPSEST1

A cél a ciklustöbbsértelműség feloldása volt, amihez a kettős különbségeket használtuk (7. ábra). Ezeket úgy állítjuk elő, hogy vesszük két, ugyanabban az időpontban, de eltérő műholdakra meghatározott egyszeres különbség eltérését (*Ádám és társai (2011)*). A különbségképzés során kiesnek a vevő órahibák és a hardverkésések valamint ekkor már a ciklustöbbsértelműségek egész számok lesznek, nem foglalják magukba a vevők hardverkéséseit sem. Több epochában elvégezve a mérést a ciklustöbbsértelműségek számíthatók.



7. ábra: Kettős különbségek ciklusugrás esetén

Ádám és társai (2011)

A GPSEST bemenő adatként felhasználja az egyszeres különbségeket, a sztenderd pályát, a MAUPRP által számított állomás-koordinátákat, a földforgás paramétereit és a meteorológiai fájlokat. A ciklustöbbsértelműségek feloldását bázisvonalanként hajtja végre. A QIF ciklustöbbsértelműség feloldási technikát alkalmaztuk, ami az L_1 -es és L_2 -es frekvenciákon végzi el a feloldást. Egy állomás koordinátáit megkötöttük, WARN-ét; olyat választottunk, ahol régebben történt antenna- és vevőcsere. A troposzféra hatásának a priori értékeként mindig az adott modell hidrosztatikus késleltetését használtuk fel, és a nedves értékeket 2 óránként becsültük a pontosabb ciklustöbbsértelműség eléréséhez.

GPSEST2

Majd újra futtatva ezt a scriptet néhány módosítással meghatározhatjuk a troposzféra okozta késleltetést. Ez szintén az egyszeres különbségeket, a sztenderd pályát, az állomások koordinátáit, a földforgás paramétereit és még az előző futtatásból meghatározott ciklustöbbsételemzéseket használja fel. A futtatást elvégeztük a meteorológiai fájlok alkalmazásával és anélkül is, mert ezek, mint mért adatok várhatóan pozitívan hatnak a feldolgozás eredményére. A számítás itt már az L_3 frekvencián történik, 2 órás felbontásban, az állomások koordinátáinak megkötésével. A troposzférikus késleltetések becslésére különböző modellek állnak rendelkezésre; a Niell a Saastamoinen, a Hopfield modellek mellett a GMF és a VMF modellekkel is elvégeztük a számítást. A késleltetések értékét mindegyikre megadtuk: a priori adatként alkalmaztuk az adott modell hidrosztatikus részének eredményeit és ez alapján becsültük ugyanennek a modellnek a nedves késleltetéseit a Hopfield kivételével. Ott csak a teljes késleltetést tudtuk megadni, amit priori érték nélkül számítottunk. Megjegyezzük, hogy a Saastamoinen esetén a $\cos(z)$ leképzést használtuk. Egy hetes időintervallumot vizsgáltunk, ennek számítása körülbelül 1,5 óráig tartott modellenként.

4.2.2. A feldolgozás nehézségei

A feldolgozás során többször is problémába ütköztünk. A meteorológiai adatok bevonásával a troposzférikus késleltetések becslésének eredményfájljában az a priori hidrosztatikus késleltetések oszlopban végig 0 szerepelt viszont a becsült nedves értékeket tartalmazta a fájl. A teljes késleltetéseknel - a hidrosztatikus és nedves eredmények összegénél - így csak a nedves értékek jelentek meg. A program forráskódjában találtuk meg ennek az magyarázatát: algoritmizálási okból az eredmény fájl kiírásánál a szoftver a hidrosztatikus késleltetések értékéhez 0-t ír, ha meteorológiai fájlt is tartalmaz a feldolgozás. Ennek oka az, hogy az a priori értékeket már levonja fázistávolságokból, úgy számítja a nedves késleltetéseket és az eredmény kiírásánál nem számolja azokat ki újra a futási idő csökkentése céljából.

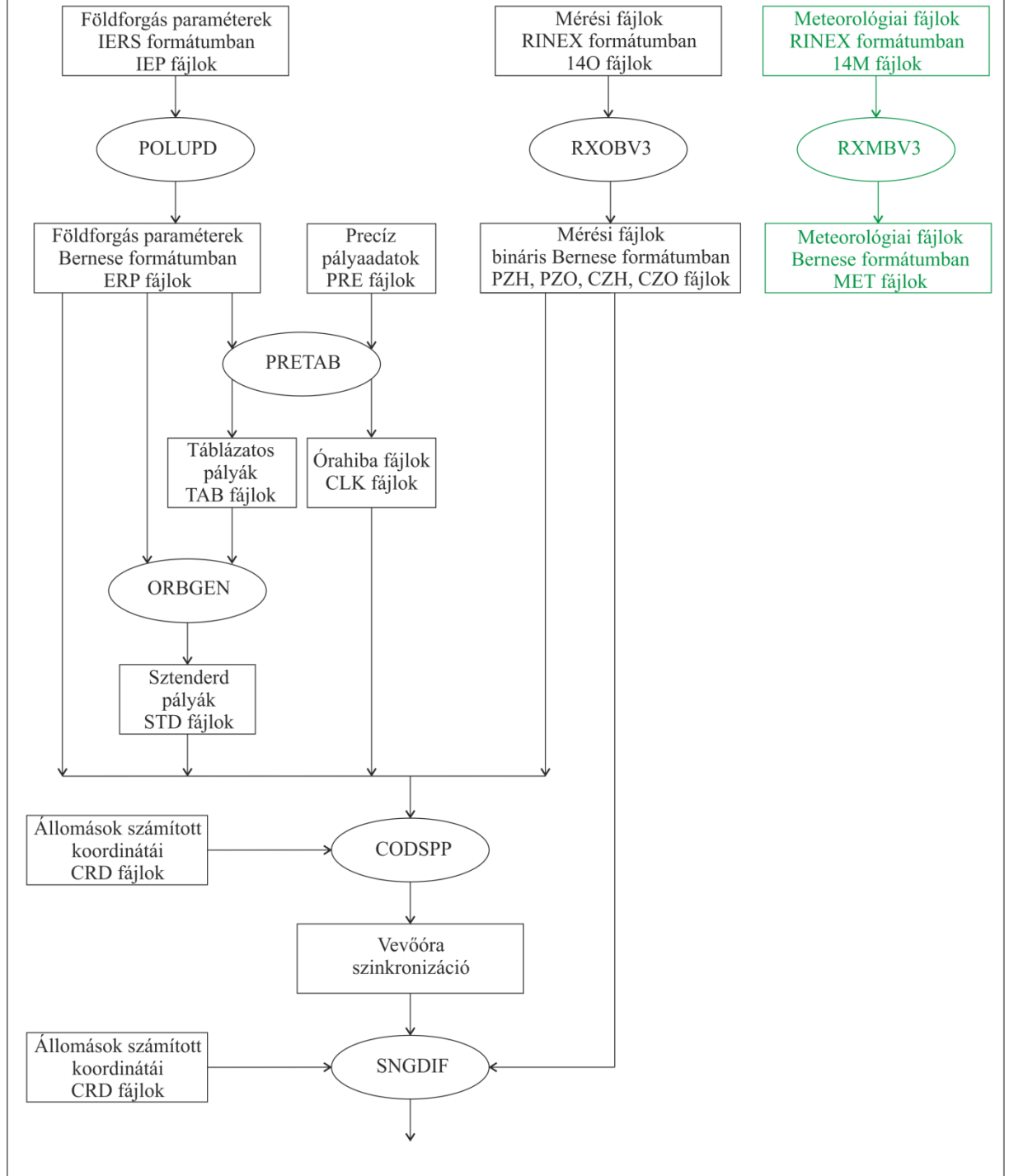
A troposzférikus késleltetések számítását - ahogy már a 4.1.2.-es fejezetben is említettük a - az ITRF és EPN honlapokról letöltött koordinátákkal végeztük el. Ekkor viszont a 0,001-es a priori középhiba ellenére az a posteriori 0,01 feletti volt. Ebben az esetben egy koordináta volt megkötve a számítás során, viszont ha az összeset megkötöttük, akkor már az a priori érték körüli a posteriori középhibát kaptunk. Így arra jutottunk, hogy a honlapról letöltött koordináták miatt adódott ez a probléma. Emiatt mégis el kellett végeznünk a fentiekben már megemlített koordináta-számítást.

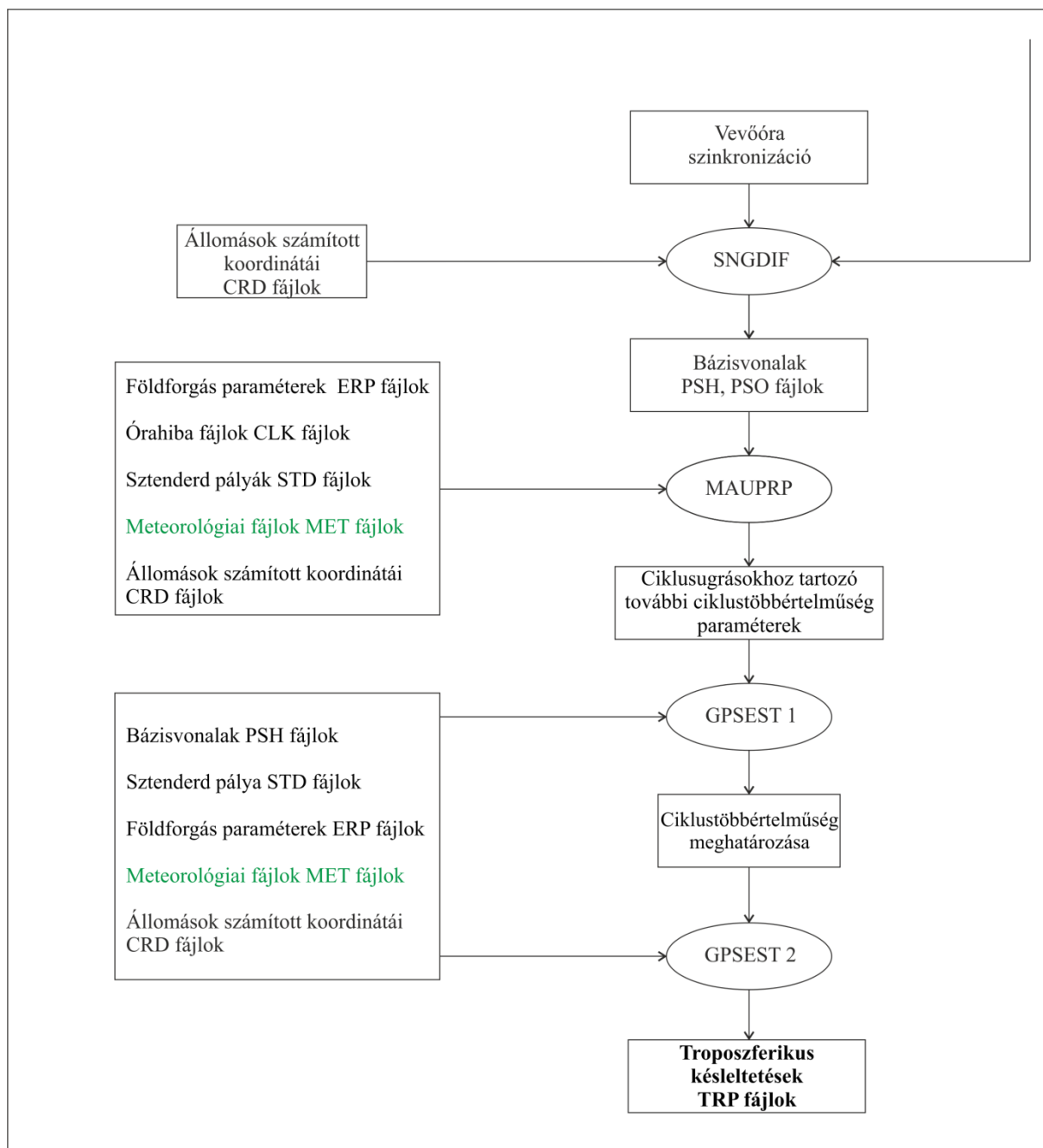
A koordináta-számítás során a késleltetések számításánál is használt scripteket alkalmaztuk, néhány módosítással. A futtatott scriptek tehát: POLUPD, PRETAB, ORBGEN, RXOBV3, RXMBV3, CODSPP, SNGDIF, MAUPRP, GPSEST1 és GPSEST2. A futtatást a késleltetések feldolgozása előtti hétre végeztük el, 2014. 07. 13. és 19. közötti időszakra. A beállítások változtatásai: a CODSPP-nél nem a letöltött koordinátákat használjuk bemenő adatként, hanem egy megjavított koordináta-számításból kapott fájl eredményeit. A javítás alatt azt értjük, hogy kiválasztottunk egy megbízható permanens állomást, annak letöltött koordinátáit összevetjük a koordináta-számításból kapott eredményekkel és ezek különbségeivel javítjuk meg a

számított koordinátákat. A GPSEST2-nél a troposzféra okozta késleltetés mellett, a koordinátákat és a normál egyenleteket is számítjuk, szabad hálózatként.

Az ADDNEQ2 script esetén a koordinátaszámításból kapott 7 normálegyenletet és egyik napnak a koordinátáját használtuk fel. A normálegyenlet-rendszerek kombinálásával együttesen egyenlítettük ki a heti méréseket, így kaptunk heti koordináta-megoldásokat és az együttes kiegyenlítés normál egyenlet rendszerét. Majd ezzel a koordinátafájllal újra elvégeztük a troposzférikus késleltetések számítását, a CODSPP, SNGDIF, MAUPRP, GPSEST és GPSEST2 scripteknél is ez volt a bemenő koordinátafájl. Ezt alkalmazva a feldolgozás végén az a posteriori középhiba a 0,001-es a priori értékéhez hasonlóan alakult. A troposzférikus késleltetések számításának menetét a 8. *ábra* mutatja. Az ábrán is jelöltük, hogy a számítást meteorológiai fájlok csak esetlegesen a feldolgozás során.

Troposzférikus késleltetés becslése a Bernese 5.2 GNSS szoftverrel





8. ábra: Troposzférikus késleltetés becslése a Bernese 5.2 GNSS szoftverrel

4.2.3. A feldolgozás eredményei

A Bernese-ben történő feldolgozás során a GMF, a VMF, a Niell, a Saastamoinen és a Hopfield modellekkel határoztuk meg a késleltetések értékeit. Az első négy modell esetén a hidrosztatikus késleltetéseket a prioriként felhasználva becsültük a nedves értékeket, de a Hopfield esetén csak a teljes késleltetés számítható. Ahogy az előzőekben is említettük, az eredmények javulását várva meteorológiai fájlokat is bevontunk a feldolgozásba, ekkor viszont csak a nedves értékek szerepelnek az eredményfájlban. A meteorológiai adatokat a teljes késleltetést adó Hopfield futtatásánál tehát nem érdemes alkalmaznunk, emiatt csak a többi modell – a VMF, a GMF, a Saastamoinen és a Niell, - számítását végeztük el meteorológiai fájlokkal is. Az

így kapott eredményeket a modell nevéhez fűzött „M”-mel jelöltük, tehát GMFM, VMFM, NiellM, és SaastamoinenM modellekről is beszélhetünk. A Bernese-ből kinyert .TRP fájl felépítése az alábbiak szerint alakul (9. ábra):

Troposzférikus kesleltetes becslele

10-DEC-14 17:53

A PRIORI MODEL: -16 MAPPING FUNCTION: 6 GRADIENT MODEL: 4 MIN. ELEVATION: 5 TABULAR INTERVAL: 7200 / 86400

STATION NAME	FLG	YYYY MM DD HH MM SS	YYYY MM DD HH MM SS	MOD_U	CORR_U	SIGMA_U	TOTAL_U	CORR_N	SIGMA_N	CORR_E	SIGMA_E
BUTE	F	2014 07 20 00 00 00		2.2750	0.18090	0.00055	2.45585	0.00021	0.00004	0.00114	0.00005
BUTE	F	2014 07 20 02 00 00		2.2750	0.18245	0.00046	2.45741	0.00019	0.00003	0.00090	0.00005
BUTE	F	2014 07 20 04 00 00		2.2750	0.17606	0.00046	2.45102	0.00017	0.00003	0.00066	0.00004
BUTE	F	2014 07 20 06 00 00		2.2750	0.16765	0.00038	2.44260	0.00015	0.00003	0.00043	0.00003
BUTE	F	2014 07 20 08 00 00		2.2750	0.16936	0.00038	2.44431	0.00013	0.00002	0.00019	0.00003
BUTE	F	2014 07 20 10 00 00		2.2750	0.15438	0.00044	2.42933	0.00011	0.00002	-0.00004	0.00003
BUTE	F	2014 07 20 12 00 00		2.2750	0.14388	0.00043	2.41883	0.00009	0.00002	-0.00028	0.00003
BUTE	F	2014 07 20 14 00 00		2.2750	0.14307	0.00046	2.41802	0.00008	0.00002	-0.00052	0.00003
BUTE	F	2014 07 20 16 00 00		2.2750	0.14855	0.00041	2.42350	0.00006	0.00002	-0.00075	0.00003
BUTE	F	2014 07 20 18 00 00		2.2750	0.15008	0.00038	2.42504	0.00004	0.00003	-0.00099	0.00004
BUTE	F	2014 07 20 20 00 00		2.2750	0.13850	0.00045	2.41345	0.00002	0.00003	-0.00123	0.00004
BUTE	F	2014 07 20 22 00 00		2.2750	0.16109	0.00048	2.43604	0.00000	0.00003	-0.00146	0.00005
BUTE	F	2014 07 21 00 00 00		2.2750	0.17817	0.00064	2.45312	-0.00002	0.00004	-0.00170	0.00005
DRES	F	2014 07 20 02 00 00		2.2704	0.13864	0.00066	2.40905	0.00018	0.00005	-0.00062	0.00005
DRES	F	2014 07 20 04 00 00		2.2704	0.13271	0.00048	2.40312	0.00007	0.00004	-0.00062	0.00004
DRES	F	2014 07 20 06 00 00		2.2704	0.13295	0.00042	2.40336	-0.00003	0.00004	-0.00061	0.00003
DRES	F	2014 07 20 08 00 00		2.2704	0.13570	0.00045	2.40611	-0.00013	0.00003	-0.00060	0.00003
DRES	F	2014 07 20 10 00 00		2.2704	0.12592	0.00045	2.39633	-0.00023	0.00003	-0.00059	0.00003
DRES	F	2014 07 20 12 00 00		2.2704	0.12767	0.00046	2.39808	-0.00034	0.00003	-0.00058	0.00002
DRES	F	2014 07 20 14 00 00		2.2704	0.13615	0.00053	2.40656	-0.00044	0.00003	-0.00057	0.00002
DRES	F	2014 07 20 16 00 00		2.2704	0.15255	0.00043	2.42296	-0.00054	0.00003	-0.00056	0.00003
DRES	F	2014 07 20 18 00 00		2.2704	0.17650	0.00040	2.44691	-0.00065	0.00003	-0.00056	0.00003
DRES	F	2014 07 20 20 00 00		2.2704	0.18006	0.00046	2.45047	-0.00075	0.00004	-0.00055	0.00004
DRES	F	2014 07 20 22 00 00		2.2704	0.17903	0.00049	2.44944	-0.00085	0.00005	-0.00054	0.00004
DRES	F	2014 07 21 00 00 00		2.2704	0.18112	0.00066	2.45153	-0.00096	0.00005	-0.00053	0.00005
LAGO	F	2014 07 20 00 00 00		2.3117	0.11872	0.00077	2.43044	-0.00049	0.00008	-0.00035	0.00008
LAGO	F	2014 07 20 02 00 00		2.3117	0.13491	0.00066	2.44663	-0.00040	0.00007	-0.00025	0.00007
LAGO	F	2014 07 20 04 00 00		2.3117	0.12324	0.00062	2.43495	-0.00031	0.00006	-0.00015	0.00006
LAGO	F	2014 07 20 06 00 00		2.3117	0.12426	0.00051	2.43597	-0.00022	0.00005	-0.00005	0.00005
LAGO	F	2014 07 20 08 00 00		2.3117	0.11932	0.00052	2.43104	-0.00013	0.00005	0.00004	0.00004
LAGO	F	2014 07 20 10 00 00		2.3117	0.10854	0.00064	2.42026	-0.00004	0.00004	0.00014	0.00004
LAGO	F	2014 07 20 12 00 00		2.3117	0.13163	0.00049	2.44335	0.00005	0.00004	0.00024	0.00004
LAGO	F	2014 07 20 14 00 00		2.3117	0.13916	0.00057	2.45087	0.00014	0.00004	0.00034	0.00004
LAGO	F	2014 07 20 16 00 00		2.3117	0.12749	0.00052	2.43920	0.00023	0.00004	0.00044	0.00004
LAGO	F	2014 07 20 18 00 00		2.3117	0.12095	0.00057	2.43266	0.00032	0.00005	0.00054	0.00005
LAGO	F	2014 07 20 20 00 00		2.3117	0.11537	0.00051	2.42708	0.00041	0.00006	0.00064	0.00006
LAGO	F	2014 07 20 22 00 00		2.3117	0.10757	0.00068	2.41928	0.00050	0.00007	0.00073	0.00007
LAGO	F	2014 07 21 00 00 00		2.3117	0.11003	0.00081	2.42173	0.00059	0.00008	0.00083	0.00007
MATE	F	2014 07 20 00 00 00		2.1767	0.12840	0.00068	2.30513	-0.00002	0.00008	0.00079	0.00006

9. ábra: A Bernese-ből kapott .TRP fájl (nem tartalmazott meteorológiai fájl) a feldolgozás)

Az első oszlopban a permanens állomás neve szerepel, ezt követően a koordinátára vonatkozó információt tartalmazza a fájl, jelen esetben az „F” a fix, megkötött koordinátára utal, majd a dátum következik, év hónap nap óra perc másodperc alakban. A következő oszlopban az a priori érték szerepel, ami a Hopfield kivételével a hidrosztatikus rész, utána a becsült nedves késleltetést, aztán a becslés középhibáját majd a teljes késleltetés értékét tartalmazza a fájl, ami a hidrosztatikus és a nedves összege. További korrelációk és középhibák is találhatók benne. Ha meteorológiai fájlt is feldolgozunk, akkor az a priori oszlopban, a hidrosztatikus eredménynél 0-k vannak és így a teljes késleltetésnél csak a nedves értékek szerepelnek a fájlban.

Fontos megemlíteni, hogy csak a zenit irányú késleltetések elemzésével foglalkozunk, mert a Bernese 5.2 GNSS szoftverből ilyen adatokat nyerünk. Azonban egy későbbi vizsgálat során érdemes a Bernese-ből nyert adatok műhold irányúra való átszámítását is elvégezni.

Célunk az előállított troposzféra modellek pontossági vizsgálata. A GMF, a Niell, a Saastamoinen és a Hopfield modelleket vak modelleknek nevezzük. Ezek csak a sztenderd atmoszféra adatait használják fel, empirikus modellek; azaz ezekkel a meteorológiai paraméterek szezonális változásait lehet figyelembe venni. A GMF modell a GPT modellen alapul, de a GMF archív ECMWF grideket használ fel, ezért nem mutat napi változást. A VMF már pontosabb, a vizsgált napra vonatkozó 4 db, 6 óránkénti grid fájlban található késleltetésekből számol. A modellek pontosságvizsgálatára a sugárkövetéses módszert használjuk fel, mert ez mért, rádiószondával meghatározott adatok alapján adja meg a késleltetéseket, így referenciamodellnek tekinthetjük.

A Bernese-ből kapott fájlokat MATLAB R2014a-ban alakítottuk át, hogy a sugárkövetés eredményeivel összehasonlíthatók legyenek. A troposzférius késleltetés becslését 2 óránként végeztük el, de csak 0 és 12 órakor állnak rendelkezésre a sugárkövetés számításához szükséges rádiószondás fájlok (részletes leírás erről majd a következő fejezetben), így csak a 0 és 12 órás eredményeket vontuk be az vizsgálatokba. A modellek futtatása során mind a 10 permanens állomásra megkaptuk a késleltetéseket, az elemzésekhez 2-t kiválasztottunk: a hazai BUTE-t és portugáliai LAGO-t. A döntésnél szerepet játszott, hogy a közelükben legyen rádiószonda felbocsájtás a vizsgált időszakra, mert ezek elengedhetetlenek a sugárkövetés számításához. BUTE esetén a közeli pestszentlőrinci adatokat, míg LAGO-nál lisszaboni rádiószonda méréseket használtuk fel. Pestszentlőrincen a vizsgált időszakban napi két rádiószonda észlelést tartalmazó fájl áll rendelkezésünkre, de Lisszabonnál a heti 15 fájl (utolsó nap utáni 0 órás felbocsájtást is figyelembe véve) helyett csak 11 mérés van. Valamint fontos, hogy a .TRP fájlokban sokszor duplán szerepel az éjféli időpont, mert 22-24 és 24-02 szerint is előállítják a hozzá tartozó értékeket. Ezek közül az éjféli utáni adatokból való becslést alkalmaztuk az referenciamodellel való összehasonlításnál.

5. Troposferikus késleltetések számítása a sugárkövetés módszerével

A következőkben a referenciamodell előállítására kerül bemutatásra, a felhasznált adatoktól kezdve a számításhoz szükséges lépésekig.

5.1. Rádiószonda mérések

Ahogy már a 2.2.-es fejezet végén is említettük, rádiószondás mérések adatai alapján számítható a troposferikus késleltetés értéke. Ezt a részt *Mészáros (2013)* alapján mutatjuk be. Rádiószondával közvetlenül mérjük a léghőmérsékletet, a légnyomást, a légnedvességet és a szelet a troposzférában és a sztratoszféra alacsonyabb részein is. A rádiószonda egy ballonból és ezzel a ballonnal a légkörbe emelt műszerekből áll, amely a mért - egy vagy több - meteorológiai állapothatározó értékét egy rádióadóval juttatja az észlelő állomásra. A régebbi rádióadó nélküli szondákat ballonszondának nevezték.

A rádiószondákat felbocsájtó meteorológiai állomásokat rádiószonda állomásnak nevezzük. Magyarországon két ilyen állomás van: Budapest Pestszentlőrinc és Szeged. Naponta egy rádiószondát bocsájtanak fel Szegedről 00 UTC-kor, míg Pestszentlőrincről napi két észlelést végeznek 00 és 12 UTC-kor. Volt egy időszak, amikor Pestszentlőrincről is csak egy szondát engedtek fel, de most már ismét két mérést végeznek. Az észlelés időpontja alatt azt értik, amikor a rádiószonda a tropopauza magasságában van, ez 11-12 km-ert jelent közepes szélességeken. Így a szondát helyi időben 00:30 körül indítják téli időszámítás szerint, 01:30 körül nyári időszámítás esetén.

Világszerte csaknem 700 ilyen rádiószonda állomás létezik. A légköri állapothatározók értékei horizontálisan egyre kisebb mértékben változnak a légkörben felfelé haladva. Így a rádiószonda állomások ritkábban helyezkednek el, mint a földfelszíni meteorológiai állomások. A mérések általában 35 km-es magasságig tartanak, de sok helyen csak 25 km-ig, mert a nagy magasságban, így alacsonyabb nyomáson lévő mérések jelentősen növelik a költségeket. Másfelől a hőmérsékletmérés hibája is gyorsan nő alacsony nyomás esetén, több rádiószondánál ez is oka az alacsonyabb maximális mérési magasságnak.

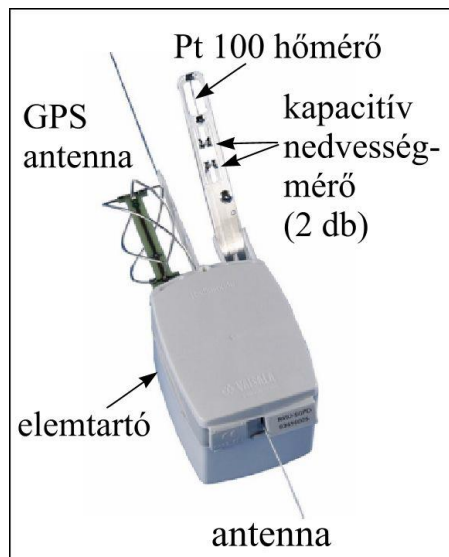
A rádiószonda három fő része a szenzorok, a jelátalakító és a rádióadó. A méréseknél 2 követelménynek kell teljesülnie a műszerekre, hogy széles tartományban mérjenek valamint, hogy zord időjárás esetén is üzemeljenek. A mérési tartományoknak jóval tágabbnak kell lenniük, mint a földfelszíni méréseknél, hiszen ilyen magasra való emelkedés esetén a légköri állapothatározók is nagymértékben módosulnak. A mérési tartományra az alábbiak a követelmények: légnyomás: 1050-5 hPa, hőmérséklet: 50°C- -90°C és nedvesség: 100-1%. A másik követelmény, hogy szélsőséges időjárási viszonyok között is jól működjenek, mint a heves csapadékhullás, jegesedés vagy zivatar közelében. A rádiószonda mérésekre adatkövetelmények is vannak, ez a

különböző állapothatározók mérése során az elérendő pontosságot írja elő a magasságtól függően.

Rádiószondával való mérésnél több meteorológiai állapothatározó mérése megy végbe. A mérések ciklikusak, 1-2 másodperc hosszúságúak, ezzel normál emelkedés esetén 5-10 méterenként információt nyerünk a légkörről. A *hőmérséklet* mérésénél követelmény a gyors reflektálás, védelem a napsugárzás illetve az infravörös hősugárzás ellen, az ellenálló képesség, a reprodukálhatóság és a stabilitás. A következő szenzorokat használják: termisztor, termokapacitív szenzor, ellenállás hőmérő, termoelem (pl.: réz-konstantán) és bimetál szenzor. A *légnymomás* nyomásszenzorral való mérés helyett származtatható a légnymomás és magasság kapcsolatát kihasználva a magasság alapján is. Ezzel csökkenthetők a költségek, de mivel a nyomásméréssel pontosabb adatokat kapunk általában mégis beépítik a nyomásmérőt is. Magaslégköri méréseknél alkalmazott nyomásmérő szenzor lehet az aneroid kapszula, a kapacitív aneroid kapszula, a szilikon szenzor és a hipszométer (régábban használták). A *légnedvesség* mérésének alapja, hogy milyen gyorsan cserélődnek a vízmolekulák a légkör és a műszer között. Általában relatív nedvesség vagy más nedvességi mérőszám, pl.: harmatpontot meghatározása történik. -10 °C-ig hasonló pontossággal mérnek a relatív nedvesség-mérők, csak hogy alacsonyabb hőmérsékleten igen nehéz a mérés. A nedvességmérőket védeni kell a közvetlen csapadéktól, de a védőburkolatról való párolgás is hibát okozhat. A sztratoszféra alacsonyabb hőmérsékletű és nyomású részein már nem lehet elég pontos mérést végrehajtani. A következő szenzortípusokkal történhet a mérés: abszorpciós higrométer, szén-hygristor, aranyütő hártya (régábban használták) és lítium-klorid szenzor. A *szélsebesség* és *szélirány* a ballon emelkedéséből és sodródásából adható meg, nem alkalmaznak külön műszert emiatt.

A rádiószonda mérésekkel a hőmérséklet, a légnedvesség, a légnymomás, a szélsebesség és a szélirány vertikális profiljához jutunk a felszíntől megközelítően 35 km-es magasságig. Valamint információt kapunk a légkör stabilitásáról, a planetáris határreteg magasságáról, a felhőzet és köd vertikális struktúrájáról valamint a felhőzet mennyiségéről is.

A Vaisala RS92-SGP rádiószondát (10. ábra) használják a hazai meteorológiai állomások. Ez a hőmérsékletet egy kicsi Pt 100-as platina ellenállás hőmérővel rögzíti, aminek a hőmérséklettől függően módosul az elektromos ellenállása. Két vékonyréteg film között méri a relatív nedvességet, aminek elektronikus kapacitása egyenesen arányos a relatív páratartalommal. Két nedvességmérőt használnak, így ha a fenti szinteken ráfagy az egyikre a légköri víz, akkor a szonda elektromosan fűti azt, míg a másik mér. Légnymásmérőt is működtetnek. A mért adatokat egy kis adóval továbbítják az állomásra, frekvencia modulációval 400-406 MHz között. Egy GPS antennával történik a pozicionálás, hiszen elengedhetetlen a szélirány és szélsebesség megadásához a pontos helymeghatározás.



10. ábra: Vaisala RS92-SGP rádiószonda

Mészáros (2013)

A mérés előkészítése során kalibrálják a műszereket, majd hidrogénnel vagy héliummal felfújják a ballont; Magyarországon a hidrogén a szokásos töltőanyag. Ez egy csővezetéken át egy földalatti tárolóból jut a ballonba. Egy mérleggel szabályozzák, hogy mennyi gázt töltenek bele, az adott tömeget elérve lezár a gázcsap. Majd a ballonra tesznek egy szögletvisszaverőt, ami csillapítja az esést és ez alá helyezik el a rádiószondát (11. ábra).



11. ábra: A ballonhoz erősítik a rádiószondát és egy szögletvisszaverőt (Országos Meteorológiai Szolgálat, Pestszentlőrinci Főobszervatórium)

Mészáros (2013)

A felbocsajtást az észlelő személyzet hajtja végre, de vannak már automata felbocsajtó rendszerek is. A ballon az emelkedés alatt – ami megközelítően másfél óráig tart - sodródik a magassági széllal, így horizontális irányban 100-200 km-re is kerülhet az indítási helyétől. Mialatt felemelkedik a ballon a külső légnyomás csökken, a ballon pedig egyre növekszik, amíg már nem bírja az anyaga és kipukkad. Ez a 30-35 km-es magasság körül történik meg, majd lezuhan a szonda.

5.2. Felhasznált adatok

5.2.2. Rádiószondás mérések adatai

Az alábbi fejezetet NOAA/ESRL (2014) alapján mutatjuk be. A rádiószondás mérések FSL formátumú fájlját használjuk fel a számításokhoz (12. ábra). Ebben az első négy sor a mérés azonosítására szolgál és annak főbb információit tartalmazza. Ha hiányzik az adat, nem mért vagy nem alkalmazható, akkor ott 99999 szerepel a fájlban.

	254	0	21	SEP	2014	
1	99999	12982	46.25N	20.10E	84	2322
2	100	1000	1950	48	99999	3
3		LHUD			99999	kt
9	10040	84	158	153	180	4
4	10000	118	168	168	245	6
5	9850	247	198	170	99999	99999
4	9250	788	162	145	225	2
5	8940	1076	144	126	99999	99999
5	8770	1236	152	72	99999	99999
4	8500	1505	140	60	320	12
4	7000	3110	20	-9	305	15
5	6740	3413	-3	-17	99999	99999
5	5960	4381	-69	-77	99999	99999
5	5770	4633	-77	-106	99999	99999
5	5300	5288	-109	-133	99999	99999
4	5000	5740	-141	-153	285	31
5	4800	6047	-167	-174	99999	99999
5	4600	6365	-181	-224	99999	99999
5	4330	6813	-215	-235	99999	99999
5	4130	7159	-235	-285	99999	99999
4	4000	7400	-255	-297	300	33
5	3700	7959	-297	-417	99999	99999
5	3260	8845	-371	-571	99999	99999
4	3000	9420	-417	-567	300	42
5	2810	9859	-455	-615	99999	99999
4	2500	10630	-505	-655	290	44
5	2220	11394	-551	-681	99999	99999
4	2000	12060	-563	-733	295	52
7	1950	12220	-571	-741	290	52
5	1730	12979	-559	-809	99999	99999
4	1500	13880	-579	-829	285	39
5	1340	14584	-607	-867	99999	99999

5	1250	15020	-565	-845	99999	99999
4	1000	16430	-595	-875	295	27
5	718	18486	-617	-897	99999	99999
4	700	18650	-615	-905	285	15
4	500	20740	-601	-901	325	25
5	383	22399	-599	-909	99999	99999
4	300	23940	-559	-879	285	19
5	290	24156	-545	-875	99999	99999
5	232	25578	-553	-873	99999	99999
4	200	26540	-535	-865	265	17
5	132	29227	-499	-839	99999	99999
5	107	30612	-445	-805	99999	99999
4	100	31080	-457	-807	260	33
5	85	32155	-475	-825	99999	99999
5	75	32990	-417	-777	99999	99999

12. ábra: Egy FSL kiterjesztésű rádiószonda méréseket tartalmazó fájl

NOAA/ESRL (2014)

---OSZLOPOK SZÁMA---

1	2	3	4	5	6	7
SORIDT						
fejléc sorai						
254	ÓRA	NAP	HÓNAP	ÉV	(üres)	(üres)
1	WBAN#	WMO#	SZÉLES IR	HOSSZ IR	MAG	INDIDŐ
2	HIDRO	MAXSZ	TROPL	SZINT	TINDEX	FORR
3	(üres)	ÁLLID	(üres)	(üres)	SZOND	SZÉLGY
adatsorok						
9	NYOMÁS	MAGAS	HŐM	HARMP	SZÉL IR	SZÉLSEB
4						
5						
6						
7						
8						

13. ábra: Egy FSL kiterjesztésű rádiószonda méréseket magában foglaló fájl tartalmának értelmezése

NOAA/ESRL (2014) alapján

Az FSL fájlt a következők szerint értelmezhetjük (13. ábra):

SORIDT: a sor azonosítójának típusa

254= új szondás mérést jelent

1= az állomás azonosító sora

2= a szonda ellenőrző sora

3= az állomás azonosítóját és egyéb mutatókat tartalmazó sor

4= kötelező mérési szint

- 5= jelentős mértékű változás miatti mérési szint
- 6= szél miatti mérési szint (PPBB) (GTS vagy összevont adat)
- 7= tropopauza miatti mérési szint (GTS vagy összevont adat)
- 8= maximális szél miatti mérési szint (GTS vagy összevont adat)
- 9= felszíni mérési szint

ÓRA: a jelentés ideje UTC-ben

SZÉLES: szélesség fokban, és századfokban megadva

HOSSZ: hosszúság fokban, és századfokban megadva

IR: a szélesség („N” vagy „S”) vagy a hosszúság („E” vagy „W”) iránya; csak akkor jelenik meg ez, ha az online archívum nemzetközi észleléseket tartalmaz

MAG: tengerszint feletti magasság, méterben

INDIDŐ: a ballon szabadon engedésének ideje

HIDRO: annak a szintnek a nyomása, ahol a szonda áthalad a hidrosztatikus ellenőrzésen

MAXSZ: annak a szintnek a nyomása, ahol a legnagyobb a szél; ha nincs 8-as sorazonosító a fájlban, akkor becsüljük az értékét

TROPL: annak a szintnek a nyomása, ami a tropopauzát tartalmazza; ha nincs 7-es sorazonosító, akkor becsüljük az értékét

SZINT: a kötelező szondázás szintjeinek a száma (azoknak a soroknak a száma, amik 4-es sorazonosítót tartalmaznak)

TINDEX: a becsült troposzféra mutatója; a 7-es azt jelenti, hogy elég adat áll rendelkezésre a tropopauza becsléséhez, a 11-es azt fejezi ki, hogy az adatok megszűntek és bizonytalan a réteg becslése

FORR: 0 = National Climatic Data Center (NCDC) adatai

1 = Atmospheric Environment Service (AES) adatai, Kanada

2 = National Severe Storms Forecast Center (NSSFC) adatai

3 = GTS vagy FSL GTS adat csak

4 = az NCDC és GTS adatok összevonása (a 2-es és 3-as forrásoknak a 0 és 1-es forrásokba való bevonása)

SZOND: a rádiószonda kód fajtája a TTBB-től. Csak jelentett GTS adatokkal.

10 = VIZ "A" típusú rádiószonda

11 = VIZ "B" típusú rádiószonda

12 = Space data corp.(SDC) rádiószonda

SZÉLGY: szélesség mértékegysége (választott mértékegység)

ms = tizedméter/másodperc

kt = csomó

NYOMÁS: millibarban (eredeti forma)

tized millibarban (új forma)

MAGAS: a magasság méterben megadva

HŐM: a hőmérséklet tized Celsius-fokban

HARMP: a harmatpont hőmérséklete tized Celsius-fokban

SZÉL IR: a szélirány fokban megadva

SZÉLSEB: a szélsébség tizedméter/másodpercben vagy csomóban (a felhasználó által választott mértékegységgel adott)

A fenti adatok közül a számításokhoz a magasságot, a légnyomást, a hőmérsékletet és harmatpontot használjuk fel. Valamint még alkalmazzuk a harmatpont hőmérsékletéből számított parciális párányomás értékeket is:

5.2.3. International Standard Atmosphere (ISA) adatok

Egy kicsit pontosítanunk kell, mert az általuk számított késleltetést troposzferikus késleltetésnek nevezzük, de a troposzféra felett található elektromosan semleges légköri zóna adatait is bevonjuk a számításokba. Ennek oka, hogy ez is hatással van a jelterjedésre. A kiszámított késleltetés jelentős részét a troposzféra adja, ezért használjuk a „troposzferikus késleltetés” kifejezést. A rádiószonda körülbelül 35 km-es magasságig jut, de lehet, hogy már előbb a Földre zuhan. A rádiószondás adatok megszűnésétől az ISA adatokat vesszük figyelembe (14. ábra). A számításokhoz a geometriai magasságot, a hőmérsékletet, a légköri nyomást és a harmatpont hőmérsékletéből számított parciális párányomás értékeket alkalmazzuk.

Réteg	Szint neve	Geopotenciális magasság a közepes tengerszint felett h [km]	Geometriai magasság a közepes tengerszint felett z [km]	Gradiens [$^{\circ}\text{C}/\text{km}$]	Hőmérséklet T [$^{\circ}\text{C}$]	Légköri nyomás p [Pa]
0	Troposzféra	0.0	0.0	-6.5	+15.0	101325
1	Tropopauza	11.000	11.019	+0.0	-56.5	22632
2	Sztratoszféra	20.000	20.063	+1.0	-56.5	5474.9
3	Sztratoszféra	32.000	32.162	+2.8	-44.5	868.02
4	Sztratopauza	47.000	47.350	+0.0	-2.5	110.91
5	Mezoszféra	51.000	51.413	-2.8	-2.5	66.939
6	Mezoszféra	71.000	71.802	-2.0	-58.5	3.9564
7	Mezopauza	84.852	86.000	—	-86.28	0.3734

14. ábra: Az ISA rétegei és azok jellemzői

Wikipédia (2014)

Az ISA-t a *Wikipédia (2014)* alapján ismertetjük. Az ISA egy légköri modell, ami leírja, hogyan változik a Föld légkörének nyomása, hőmérséklete, sűrűsége és viszkozitása a magasságtól függően. A Nemzetközi Szabványügyi Szervezet (ISO) teszi közzé az ISA-t, mint egy nemzetközi szabványt, az ISO 2533: 1975 néven. Egyéb szabványügyi szervezetek, mint például a Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet (ICAO) és az Egyesült Államok kormánya is ennek a légköri modellnek a kiterjesztett vagy a leszűkített változatát teszi közzé a saját szabványokért felelős hatóságán keresztül. Az ISA modell a légkört lineáris hőmérséklet eloszlás alapján osztja rétegekbe. A többi érték az alapvető fizikai állandókból és azok kapcsolataiból számíthatók. Az ISA modell a közepes szélesség átlagos körülményein alapul, amit az ISO TC 20 / SC 6 szakmai bizottsága állapít meg. Ezt a huszadik század közepétől időről időre átdolgozzák.

5.3. A sugárkövetés módszere

A sugárkövetés módszerét *Boehm és Schuh (2003)* alapján és a számításnál alkalmazott lépések bemutatásával tekintjük át. Ahogy az 5.2.-es fejezetben már említettük a rádiószondás mérések mellett ISA adatokat is felhasználjuk. A módszerhez

az előbb említett adatsűrűség nem elegendő, így sűrített magasság alapján különböző módon interpoláljuk a meteorológiai paramétereket. Emellett a troposzférikus késleltetéshez a refraktivitás értékét is meg kell határozni, majd ezután történik a sugár útjának egy törtvonallal való közelítése. A számításokat a MATLAB R2014a segítségével végezzük el, 2014. július 20. és 26. közötti időszakra hogy a Bernese-vel előállított eredményeket összevethessük a sugárkövetéses módszerrel kapott késleltetésekkel.

5.3.1. A rádiószondás mérések felhasználása

A rádiószondás mérések FSL formátumú fájlja betűket és számokat is tartalmaz, ezért kezdetben cellaként kell kezelni, majd mátrixszá alakítjuk. A fejléc soraiból néhány adatot szűrünk ki, pl.: az állomás koordinátáit. A mátrix sorai a 9-es sorazonosítótól, azaz a felszíni szint sorazonosítójától kezdődnek. Az oszlopok közül a magasságot, a nyomást, a hőmérsékletet és a harmatpontot gyűjtjük a mátrixba valamint egy további oszlop a harmatpont hőmérséklete alapján számított parciális párányomás értéke is, ami az alábbi képlettel adható meg:

$$e_w = 6,112 * e^{\frac{17,62 * T}{243,12 + T}} \quad (43)$$

Azokat a sorokat használjuk a számításoknál, ahol az előbb említett meteorológiai állapotváltozók mindegyik értéke meg lett mérve, azaz a sor nem tartalmaz 99999-et.

5.3.2. Az ISA adatok bevonása

A rádiószondák a körülményektől függően különböző magasságig jutnak fel és addig rögzítik a meteorológiai állapotváltozókat. A rádiószonda utolsó mérése után az ISA adatait vesszük figyelembe. A 14. ábra alapján a számításokhoz a geometriai magasságot, a hőmérsékletet, és a légköri nyomást alkalmazzuk. A harmatpont értéke ilyen magasan megegyezik a hőmérséklettel. A parciális párányomás nagyságát innentől 0-nak tekintjük. Ezeket az adatokat is egy mátrixba gyűjtjük. Ezt és a rádiószonda mérés mátrixát a mértékegységek egyesítésére figyelve úgy vonjuk össze, hogy az utolsó rádiószondás mérés magassága feletti adatoktól kapcsoljuk az ISA mátrixot a rádiószonda adatokhoz.

5.3.3. A meteorológiai paraméterek sűrítése, interpolálás

Az adatok alapján bizonyos magasságokban ismerjük a hőmérséklet, a légnyomás, a harmatpont és a vízgőz parciális párányomásának értékeit. A sugárkövetés módszere viszont ezeknél gyakoribb adatot igényel, ezért egy sűrített magassági felbontás alapján az előbb említett meteorológiai állapotváltozókat interpoláljuk. A magasságot alacsonyabban jobban sűrítjük, mint nagyobb magasságban (15. ábra):

Magasság	Növekmény
0-2 km	10 m
2-6 km	20 m
6-16 km	50 m
16-36 km	100 m
36-136 km	500 m

15. ábra: A magasság sűrítése

Boehm és Schuh (2003)

A hőmérsékletet lineáris interpolációval számítjuk, míg a légnyomást és a vízgőz parciális párányomását exponenciálisan az alábbi képletekkel:

$$p = p_0 * e^{(h-h_0)/c} \quad (44)$$

$$e_w = e_{w0} * e^{(h-h_0)/c} \quad (45)$$

Ezek előtt még kiszámítjuk a nem besűrített magassági adatokat felhasználva a c konstansokat (44)-ből és (45)-ből kifejezve az egyes magassági szakaszokra, majd ezeket a már besűrített magasságokkal történő interpolációnál alkalmazzuk. Így rendelkezésünkre állnak a magassági adatok méterben, a hőmérséklet- közben Kelvinre átszámítva- valamint a légnyomás és a parciális párányomás hektopaszkaiban.

5.3.4. A refraktivitás számítása

A refraktivitás kiszámításához a 2.2.-es fejezetben található képleteket alkalmazzuk. A száraz levegő sűrűsége a (13)-as, (15)-ös és a (19)-es képleteket felhasználva a következőképpen írható fel, figyelembe véve, hogy a száraz levegő kompresszibilitási tényezője 1:

$$\rho_d = (p - e) * \frac{M_d}{R} * \frac{1}{T} \quad (46)$$

ahol $M_d = 0,0289644$ kg/mol. A nedves levegő sűrűsége a (13)-as és a (16)-os képletek alapján adható meg - tekintettel arra, hogy a kompresszibilitási tényezője a nedves levegőnek 1 - az alábbiak szerint:

$$\rho_w = e * \frac{M_w}{R} * \frac{1}{T} \quad (47)$$

ahol $M_w = 0,0180152$ kg/mol. A sűrűség a száraz és nedves sűrűség összegeként írható fel:

$$\rho = \rho_d + \rho_w \quad (48)$$

A hidrosztatikus refraktivitás a (13)-as képlet és a (22)-es képlet első tagja szerint:

$$N_h = k_1 * \frac{R}{M_d} * \rho \quad (49)$$

A nedves refraktivitás a (13)-as, a (22)-es képlet második és harmadik tagja valamint a nedves levegő 1 értékű kompresszibilitási tényezője alapján:

$$N_w = \left(k_2 - k_1 * \frac{M_w}{M_d}\right) * \frac{e}{T} + k_3 * \frac{e}{T^2} \quad (50)$$

A refraktivitás a hidrosztatikus és a nedves refraktivitás összegeként értelmezhető:

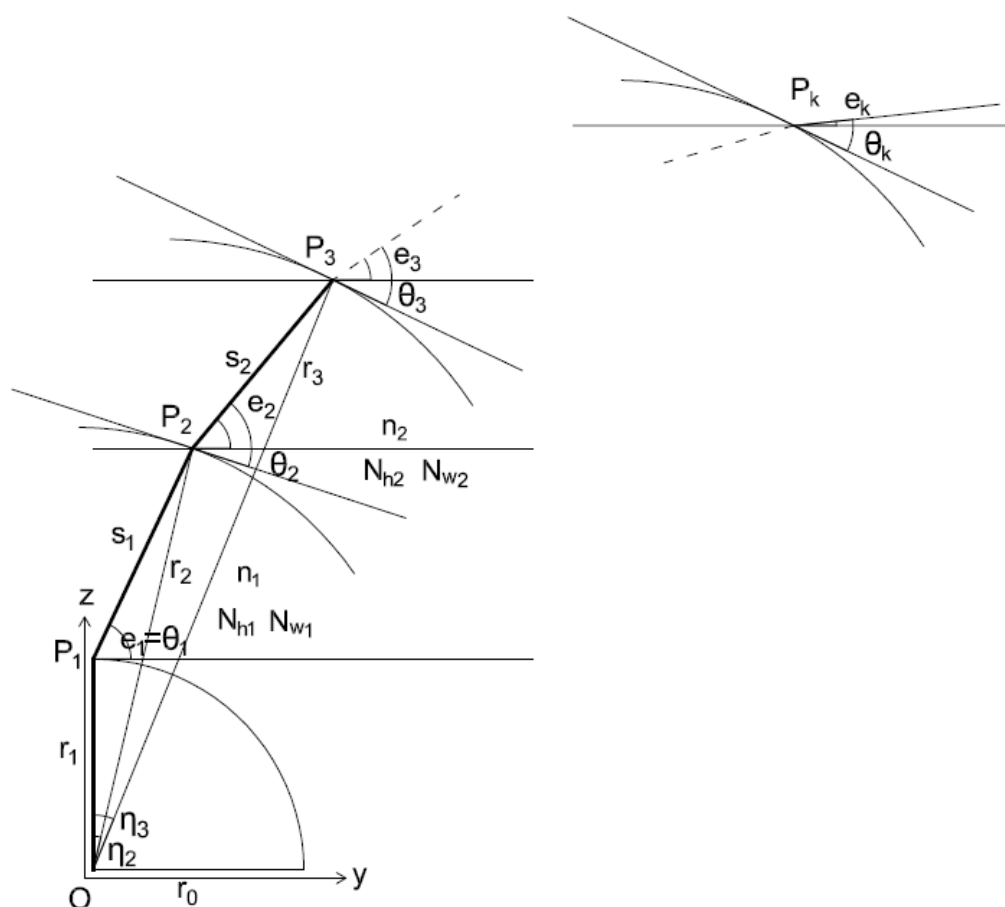
$$N = N_h + N_w \quad (51)$$

ezután az (1)-es képlettel kifejezhető a törésmutató:

$$n = \frac{N}{10^6} + 1 \quad (52)$$

5.3.5. A sugárkövetés számítása

Az eddigiek alapján rendelkezésünkre áll egy sűrű magassági felbontás és a magasságok között a meteorológiai paraméterekből számított refraktivitás értékek, amiből kifejezhetők az egyes magassági rétegek törésmutatói. Így nyomon tudjuk követni a fénysugár útját, ami különböző magassági szöggel indulhat, aztán amikor a második rétegbe lép megtörik, majd az újabb rétegváltásnál ismét irányt vált és így tovább (16. ábra). Az első rétegváltás jellemzői még speciálisak, de a másodiktól kezdve már analogikusan végezhető a számítás.



16. ábra: A sugárkövetés

Boehm és Schuh (2003) alapján

Első lépésként kiszámítjuk a magassági szintek geocentrumtól való távolságát:

$$r_i = r_0 + h_i \quad (53)$$

ahol $i=1, \dots, k$, ahol k a rétegek száma és r_0 a Föld sugara méterben. Ha ismerjük a kezdeti magassági szöget e_1 -et, akkor már ismerjük a P_1 pontot is:

$$\theta_1 = e_1 \quad (54)$$

A P_1 és a P_2 pontok közötti távolság az FP_1P_2 háromszögre felírt koszinusz-tétellel számítható ki:

$$r_2^2 = s_1^2 + r_1^2 - 2 * s_1 * r_1 * \cos(\theta_1 + 90^\circ) \quad (55)$$

A másodfokú egyenlet megoldóképletét kell alkalmaznunk, amiben az első tag negatív, így csak a pozitív gyök alatti diszkriminánssal érhetünk el értelmezhető megoldást:

$$s_1 = -r_1 * \sin\theta_1 + \sqrt{r_2^2 - r_1^2 * \cos^2\theta_1} \quad (56)$$

A P_1 és P_2 geocentrikus koordinátáit az alábbiak:

$$z_1 = r_1 \text{ és } y_1 = 0 \quad (57)$$

$$z_2 = z_1 + s_1 * \sin(e_1) \text{ és } y_2 = y_1 + s_1 * \cos(e_1) \quad (58)$$

A geocentrumnál lévő szögek:

$$\eta_1 = 0 \quad (59)$$

$$\eta_2 = \arctan(y_2/z_2) \quad (60)$$

Amikor a fénysugár az első rétegből a másodikba lép megtörik, felírhatjuk a Snellius-Descartes-törvényt (17. ábra):

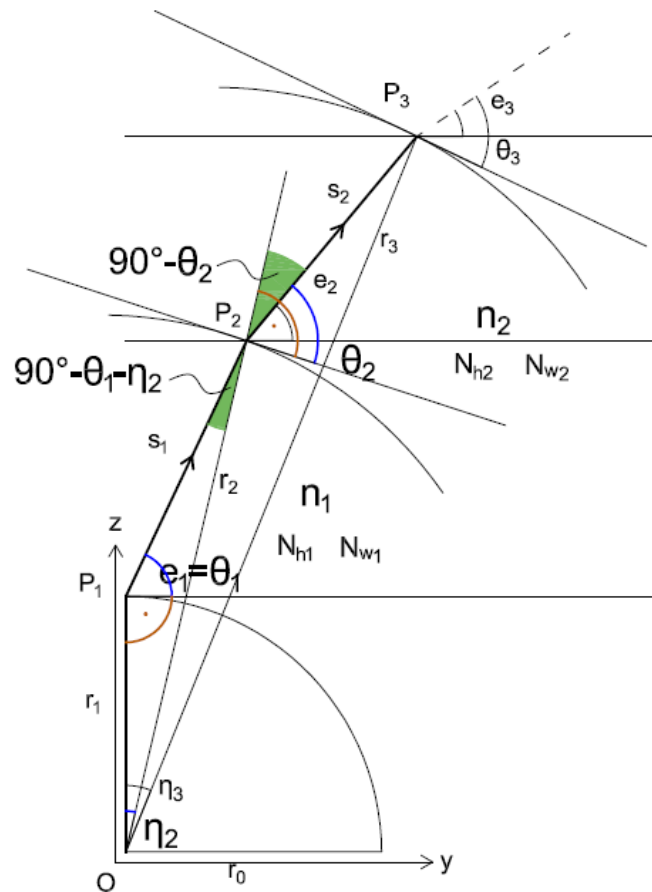
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin(90^\circ - \theta_2)}{\sin(90^\circ - \theta_1 - \eta_2)} \quad (61)$$

A P_2 -nél lévő θ_2 szög a Snellius-Descartes-törvényből fejezhető ki:

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{n_1}{n_2} * \cos(\theta_1 + \eta_2)\right) \quad (62)$$

Az e_2 szög pedig a merőleges szárú szögek alapján:

$$e_2 = \theta_2 - \eta_2 \quad (63)$$



17. ábra: A Snellius-Descartes törvény alkalmazása

Boehm és Schuh (2003) alapján

A sugárkövetés inntől analogikusan számítható, a fenti képletek általánosan:

$$s_i = -r_i * \sin\theta_i + \sqrt{r_{i+1}^2 - r_i^2 * \cos^2\theta_i} \quad (64)$$

$$z_{i+1} = z_i + s_i * \sin(e_i) \text{ és } y_{i+1} = y_i + s_i * \cos(e_i) \quad (65)$$

$$\eta_{i+1} = \arctan(y_{i+1}/z_{i+1}) \quad (66)$$

$$\delta_{i+1} = \eta_{i+1} - \eta_i \quad (67)$$

$$\theta_{i+1} = \arccos\left(\frac{n_i}{n_{i+1}} * \cos(\theta_i + \eta_{i+1})\right) \quad (68)$$

ahol a ciklusok 2-től $(k-1)$ -ig futnak.

Innentől kezdve rendelkezésünkre áll a tört sugár hossza (s_i) és a refraktivitás értéke minden rétegben. Így számítható a hidrosztatikus és a nedves késleltetés:

$$ds_h = \sum_{i=1}^{k-1} s_i * N_{hi} \quad (69)$$

$$d_{S_W} = \sum_{i=1}^{k-1} s_i * N_{wi} \quad (70)$$

6. Az eredmények ábrázolása

Az eredményeket MATLAB R2014a-val szemléltetjük. Elemezzük a vizsgált időszakban a különböző modellekből kapott késleltetéseket – a teljes, a hidrosztatikus illetve a nedves értékeket is - és összevetjük ezeket a sugárkövetés eredményeivel. Tanulmányozzuk, hogy azoknál az állomásoknál, ahol meteorológiai fájlokat alkalmaztunk, azok milyen hatással voltak a becslésekre. Valamint számítjuk a vizsgált modellek sugárkövetéstől vett eltéréseinek statisztikai jellemzőit, a minimumot, maximumot, átlagot és a szórást. A 4.2.3-ban már leírtak szerint a Bernese-ben 10 permanens állomásra állítottuk elő a késleltetéseket, de ezek közül 2 eredményeit fogjuk felhasználni, a BUTE és a LAGO állomásokét. LAGO értékei a meteorológiai fájlal történő feldolgozás elemzésénél kerülnek majd előtérbe. Az észlelések napját doy-ban adjuk meg, ami meghatározza, hogy az adott nap hányadik az évben január 1-től számítva. Fontos megjegyezni, hogy a vizsgálatoknál egy adott nap 0 órai késleltetést annál a bizonyos napnál jelenítettük meg, a 12 órai értékeket pedig az adott és a következő nap között ábrázoltuk.

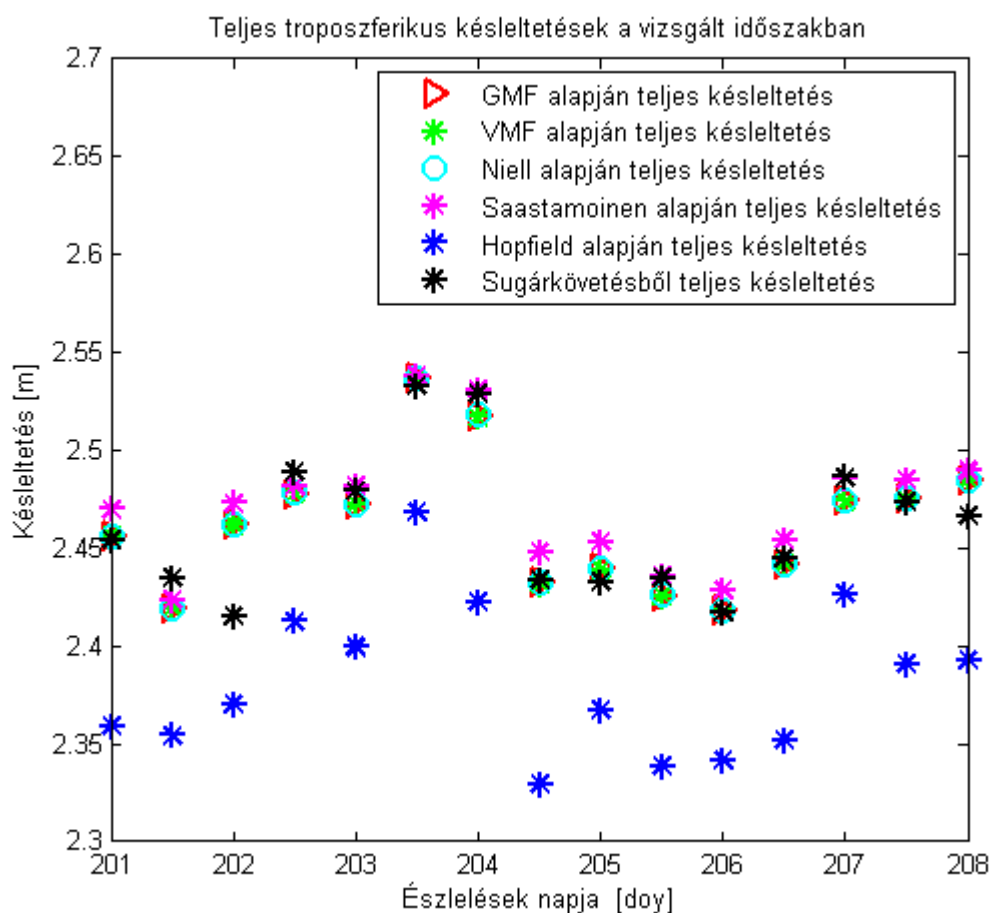
6.1. A Bernese különböző modelljeiből kapott késleltetések elemzése a vizsgált időszakban

Először megvizsgáltuk, hogy az egyes modellekből számított teljes késleltetések hogyan viszonyulnak egymáshoz és a sugárkövetés eredményéhez. Itt mind az 5 modell – a GMF, a VMF, a Niell, a Saastamoinen és a Hopfield – értékét össze tudtuk vetni (18. ábra). A továbbiakban a hidrosztatikus és a nedves értékeket külön-külön elemezzük, ekkor a teljes késleltetést adó Hopfieldet már kihagyjuk az elemzésből. A kapott eredmények alapján azt látjuk, hogy a teljes késleltetéseknél a GMF, a VMF és a Niell majdnem ugyanolyan eredményeket ad illetve, azt is, hogy ezek közelítik meg legjobban a sugárkövetés értékét. A Saastamoinen az előbb említettekhez hasonló késleltetést biztosít és ez is majdnem olyan jól közelíti a referenciamodellt. A Hopfield modell elüt a többitől, akár több mint 10 cm-rel is eltérő értéket mutat és a sugárkövetéstől is jelentősen különbözik. Ennek oka lehet, hogy a priori modell nélküli számításból keletkezik, ahogy már a 4.2.1-es fejezetben is említettük.

A továbbiakban kiszámítottuk a vizsgált modellek teljes troposzferikus késleltetéseinek a referencia modell teljes késleltetésétől való eltérését kifejező statisztikai jellemzőket az adott időszakra (19. ábra). Megadtuk a különféle modellek sugárkövetéstől számított különbségének minimum, maximum, átlag és szórás értékét.

A negatív minimumok azt jelentik, hogy az adott modelleknél a vizsgált időszak alatt előfordult, hogy túlbecsülték a referenciamodellt, a pozitív értékeknél értelemszerűen nem történt túlbecslés, csak alulbecslés. A pozitív maximumok szerint a sugárkövetéses modellnél sosem esik meg, hogy minden eredményét túlbecsüljék a vizsgált modellek. Negatív maximumnál a vizsgált modell minden értéke nagyobb a sugárkövetés késleltetéseinél.

A modellek pontosságát és megbízhatóságát kifejező jellemzők az átlag és a szórás. A BUTE állomáshoz tartozó átlagértékek a GMF, a VMF és a Niell modellekénél közelítenek leginkább 0-hoz, 1 mm-re térnek csak el a sugárkövetéstől. Tehát ezek adják a legpontosabb teljes késleltetést, aztán a Saastamoinen majd a Hopfield. A szórások hasonlóan alakulnak, a legjobbak a GMF és Niell modellekénél.

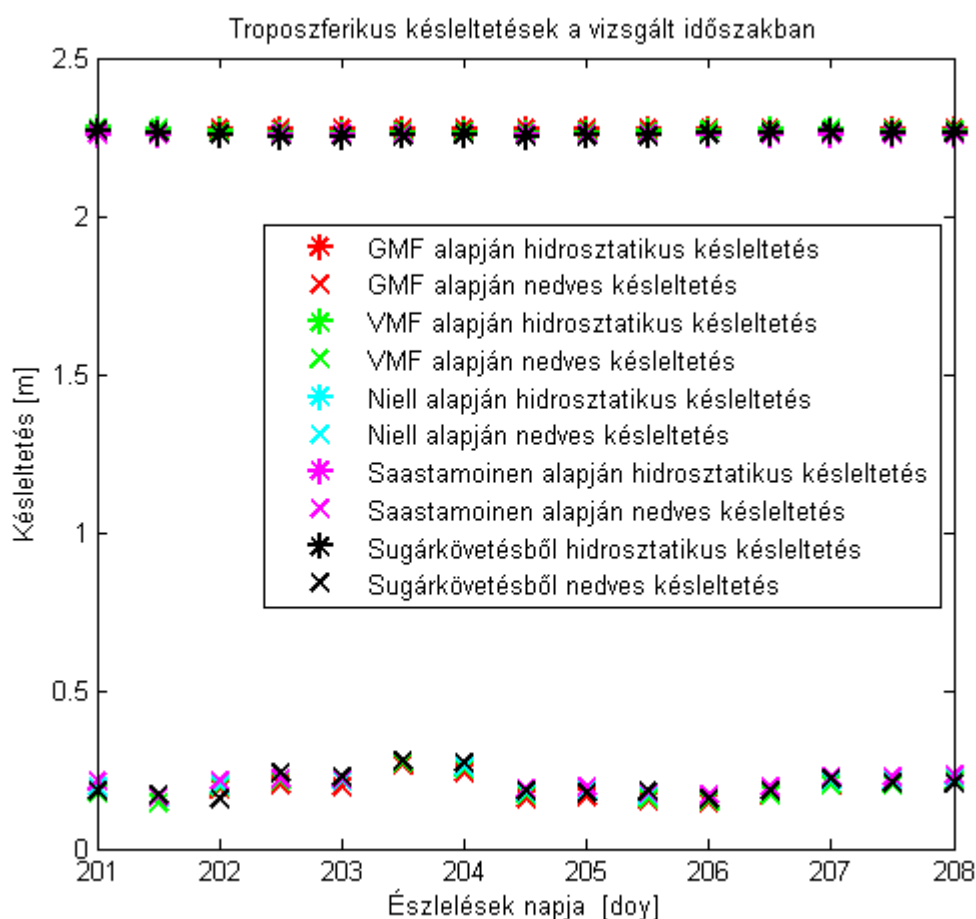


18. ábra: Teljes troposzférikus késleltetések a vizsgált időszakban BUTE

Teljes troposzférikus késleltetések referenciamodelltől vett eltéréseinek statisztikai jellemzői				
PESTSZENTLŐRINC, BUTE				
	min [m]	max [m]	átlag [m]	szórás [m]
sk.-GMF	-0,047	0,016	-0,001	0,015
sk-VMF	-0,047	0,016	-0,001	0,016
sk-Niell	-0,047	0,016	-0,001	0,015
sk-Saastamoinen	-0,058	0,011	-0,010	0,016
sk-Hopfield	0,045	0,106	0,080	0,017

19. ábra: Teljes troposzférikus késleltetések referenciamodelltől vett eltéréseinek statisztikai jellemzői, BUTE

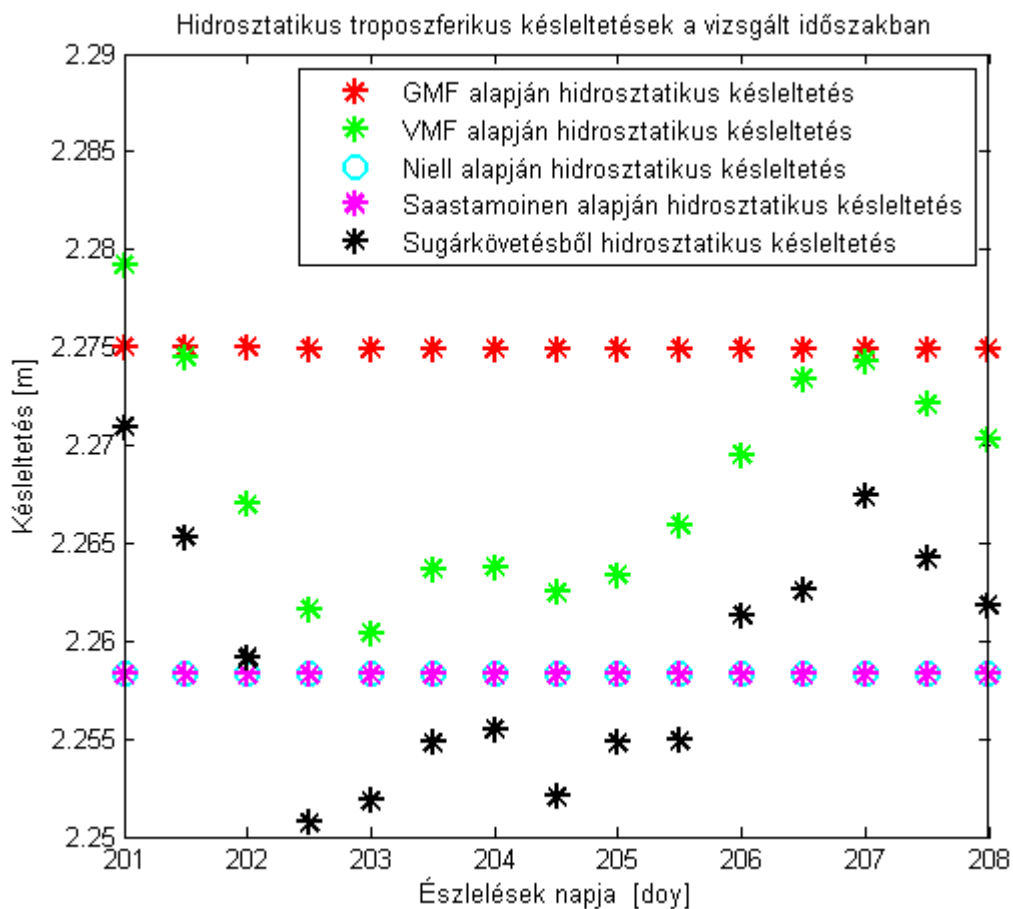
Ahogy a fentiekben megjegyeztük, innentől a hidrosztatikus és nedves késleltetések elemzését külön fogjuk elvégezni. Ez azért is szükséges, mert ezek között egy nagyságrendbeli eltérés van (20. ábra). Erről csak körülbelüli értékeket olvashatunk le, a hidrosztatikus késleltetések 2,3 m, míg a nedvesek 0,2 m körül alakulnak. Valamint láthatjuk, hogy az a priori hidrosztatikus késleltetések szinte ugyanazok különböző modelleknél, viszont a becsült nedves értékek már eltérőbbek.



20. ábra: Troposzférikus késleltetések a vizsgált időszakban BUTE

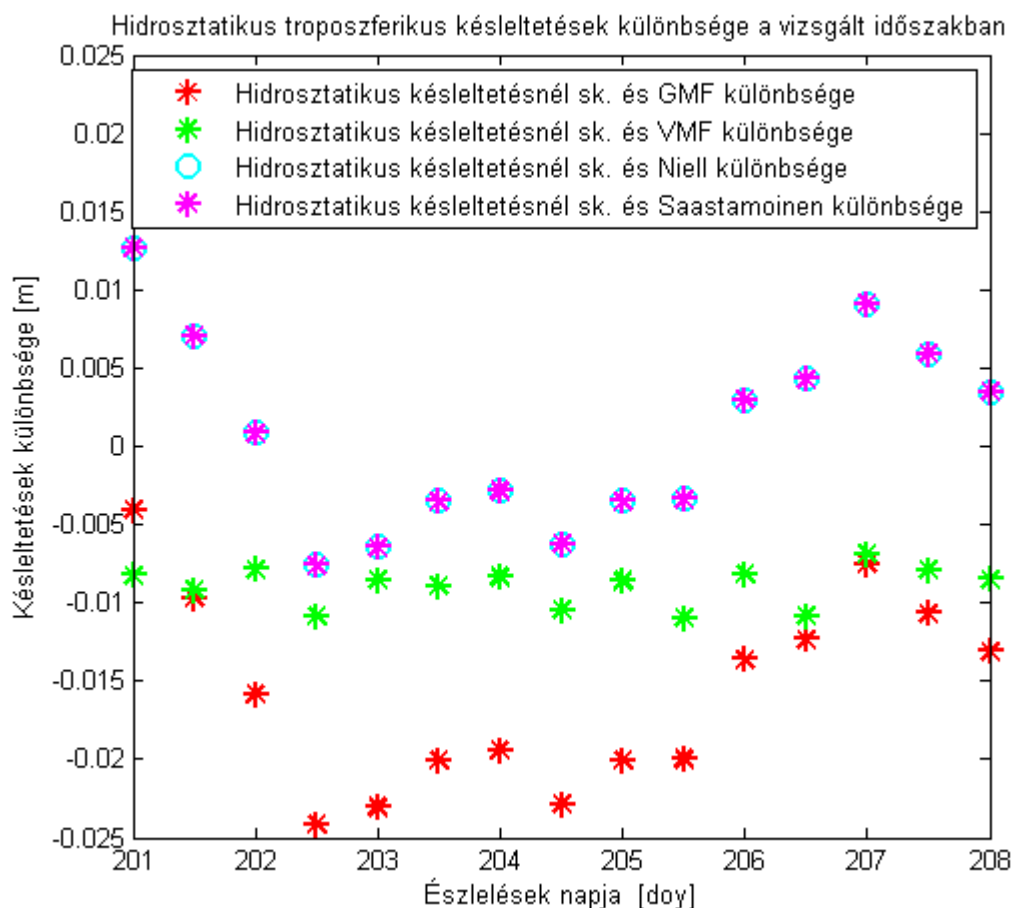
A hidrosztatikus késleltetéseknel megfigyelhetjük (21. ábra), hogy a GMF, a Niell és a Saastamoinen modellek a vizsgált hét minden napjára ugyanakkora késleltetést adnak. Ennek oka, hogy a Niell és a Saastamoinen modellek sztenderd adatokat használnak fel, a GMF pedig archiv ECMWF grideket. Ezenkívül az is feltűnhet, hogy a Niell és a Saastamoinen hidrosztatikus értékei megegyeznek. Ez azért van, mert a Niell modell a Saastamoinen modell zenit irányú késleltetése alapján a Niell leképzési függvénnyel számítja a műhold irányú késleltetést és emiatt a két modell zenit irányban azonos összefüggéseket használ. A VMF-nél már láthatunk napi változást, ami nagyon hasonlóan alakul a sugárkövetésnél is; majdnem olyan, mintha 8 mm-rel eltolták volna pozitív irányba a referenciamodell. A VMF és a GMF mindig túl, a Niell és a Saastamoinen túl és alul is becsüli a sugárkövetést. A GMF modell adja a legrosszabb

eredményt; a Niell és a Saastamoinen elég jó közelítést mutat. Pontosabb következtetések levonásához további vizsgálatokat végeztünk.



21. ábra: Hidrosztatikus troposzférikus késleltetések a vizsgált időszakban BUTE

Előállítottuk a hidrosztatikus késleltetések sugárkövetései eredményektől vett eltéréseit (22. ábra). Látható, hogy a VMF tényleg jól követi a referenciamodell változásait, hiszen elég hasonlóak a modellekből származó különbségértékek. Pontosabban leolvashatjuk a VMF sugárkövetéstől vett különbsége, ami 0,7 és 1,2 cm között változik. A VMF modell adja a legmegbízhatóbb hidrosztatikus késleltetéseket. A Niell és a Saastamoinen modellek néhány tized cm-re pontosan is közelítik a modellt, de van ahol 1,3 cm-rel is lehetnek kisebbek, mint a sugárkövetésből kapott eredmények. A GMF modell legjobb becslése 0,4 cm pontos, de akár 2,5 cm-rel is túlbecsül.



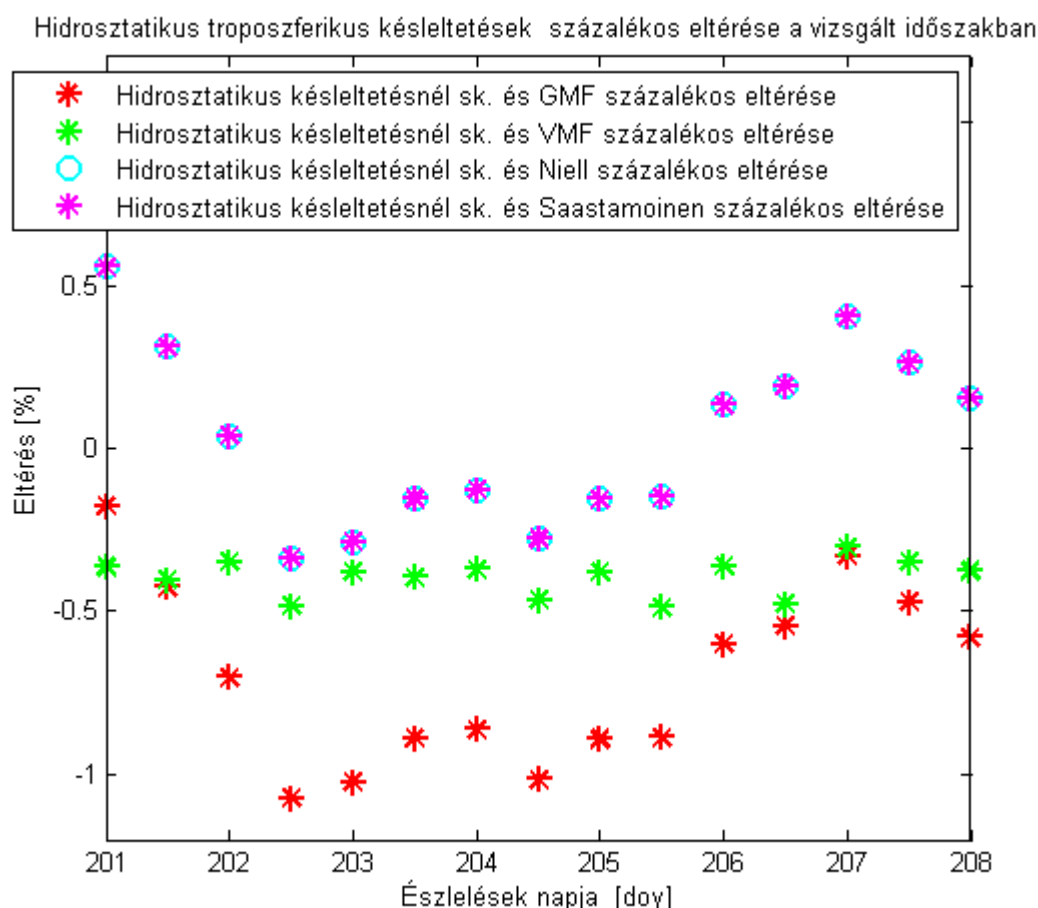
22. ábra: Hidrosztatikus troposzferikus késleltetések különbsége a vizsgált időszakban
BUTE

Ezek további elemzésére létrehoztuk a hidrosztatikus késleltetések referenciamodelltől vett eltéréseinek statisztikai jellemzőit (23. ábra). Az átlagok és a szórások alakulása megerősíti a fentieket. A középértékeknél azt látjuk, hogy a Saastamoinen és a Niell közelít a legjobban 0,1 cm az eltérésük a referenciamodelltől, ezeket a VMF és a GMF követik a sorban. A szórások a VMF-nél a legkisebbek 0,1 cm nagyságúak, a többi modellnél ugyanakkorák, 0,6 cm értékűek.

Hidrosztatikus troposzferikus késleltetések referenciamodelltől vett eltéréseinek statisztikai jellemzői				
PESTSZENTLŐRINC, BUTE				
	min [m]	max [m]	átlag [m]	szórás [m]
sk-GMF	-0,024	-0,004	-0,016	0,006
sk-VMF	-0,011	-0,007	-0,009	0,001
sk-Niell	-0,008	0,013	0,001	0,006
sk-Saastamoinen	-0,008	0,013	0,001	0,006

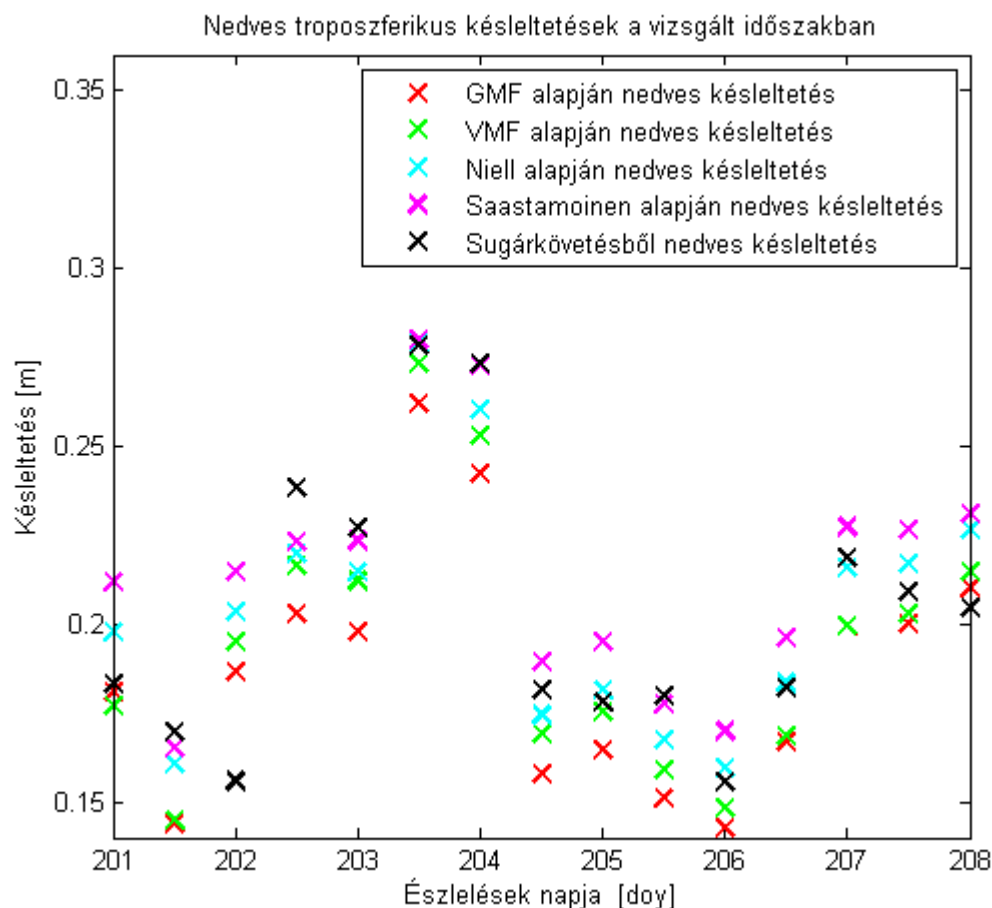
23. ábra: Hidrosztatikus troposzferikus késleltetések referenciamodelltől vett
eltéréseinek statisztikai jellemzői, BUTE

Az előbbi értékek százalékosan megadva sokkal kifejezőbbek (24. ábra). Láthatjuk, hogy sugárkövetéstől vett eltérések a VMF-nél fél % alattiak, a Niell és a Saastamoinen modelleknél is majdnem, de a GMF is éppen csak túllépi az 1%-os különbséget. Így azt mondhatjuk, hogy a hidrosztatikus késleltetésekre jó közelítéseket kaptunk, ennek oka, hogy ezek a priori értékek.



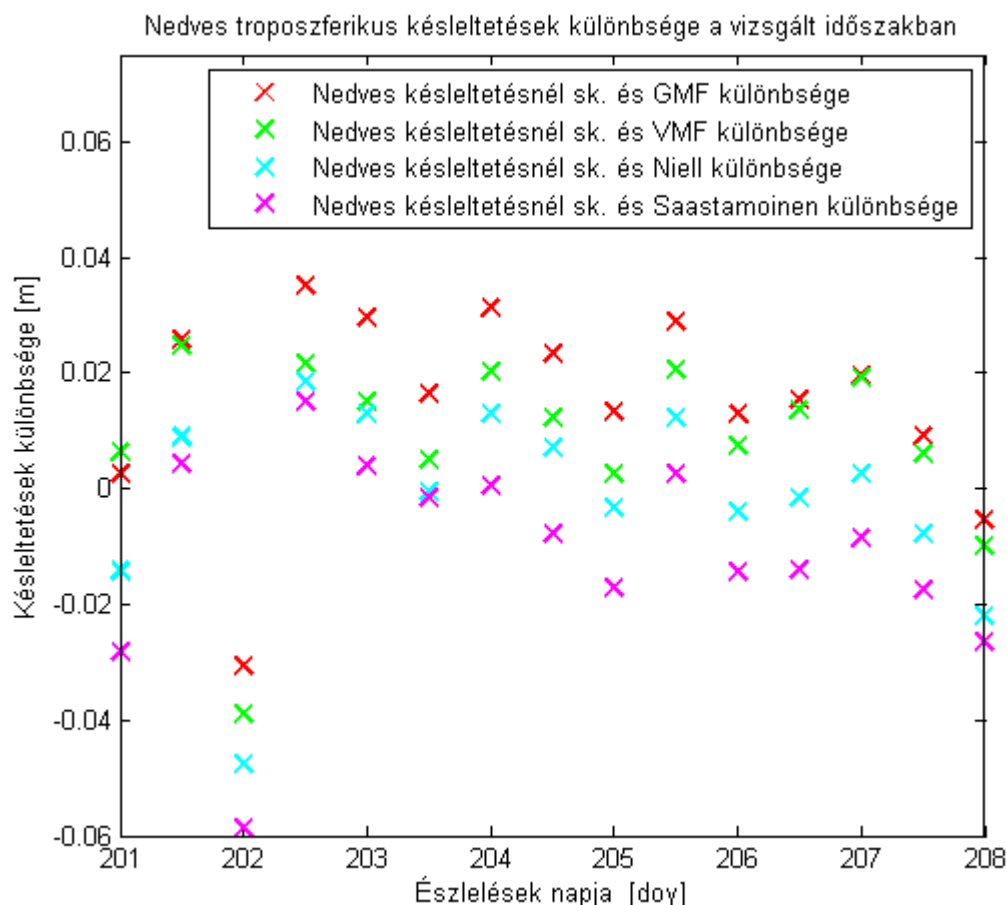
24. ábra: Hidrosztatikus troposzférikus késleltetések százalékos eltérése a vizsgált időszakban BUTE

A következőkben áttérünk a nedves késleltetések vizsgálatára (25. ábra), amiket a hidrosztatikus értékek a prioriént történő felhasználásával becsültünk. Ezek már eltérő eredményt mutatnak a különböző napokon és nem egyeznek meg az egyes modellek esetén. A vizsgált modellekből kapott eredményeket egymással összevetve, azt tapasztaljuk, hogy szinte kivétel nélkül a GMF adja a legkisebb értékű késleltetést, majd a VMF, aztán a Niell következik sorban és a Saastamoinen alapján kapjuk a legnagyobb becslést. A vizsgált értékeket a referenciamodellel összehasonlítva, azt látjuk, hogy előfordul olyan eset, hogy az összes modell alulbecsüli a sugárkövetést, de olyan is megesik, hogy mind túlbecsüli azt. Az ábra alapján nem tudjuk egyértelműen eldönteni, hogy melyik modell közelíti legjobban a sugárkövetés eredményét, így itt is további elemzéseket végeztünk.



25. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések a vizsgált időszakban BUTE

Kiszámítottuk a nedves késleltetések sugárkövetéstől vett eltéréseit (26. ábra). Így azt mondhatjuk, hogy a Niell modell hasonlít legjobban a sugárkövetésből kapott értékekhez. Aztán következik a sorban a VMF, majd a Saastamoinen és végül a GMF-nél adódnak a legnagyobb sugárkövetéstől vett különbségek. Itt a nedves késleltetésekhez képest, amik 14 és 28 cm közöttiek, jelentősebbek a sugárkövetéstől vett eltérések, általában 2 cm körüliek, de szélső esetben a 6 cm-t is elérik.



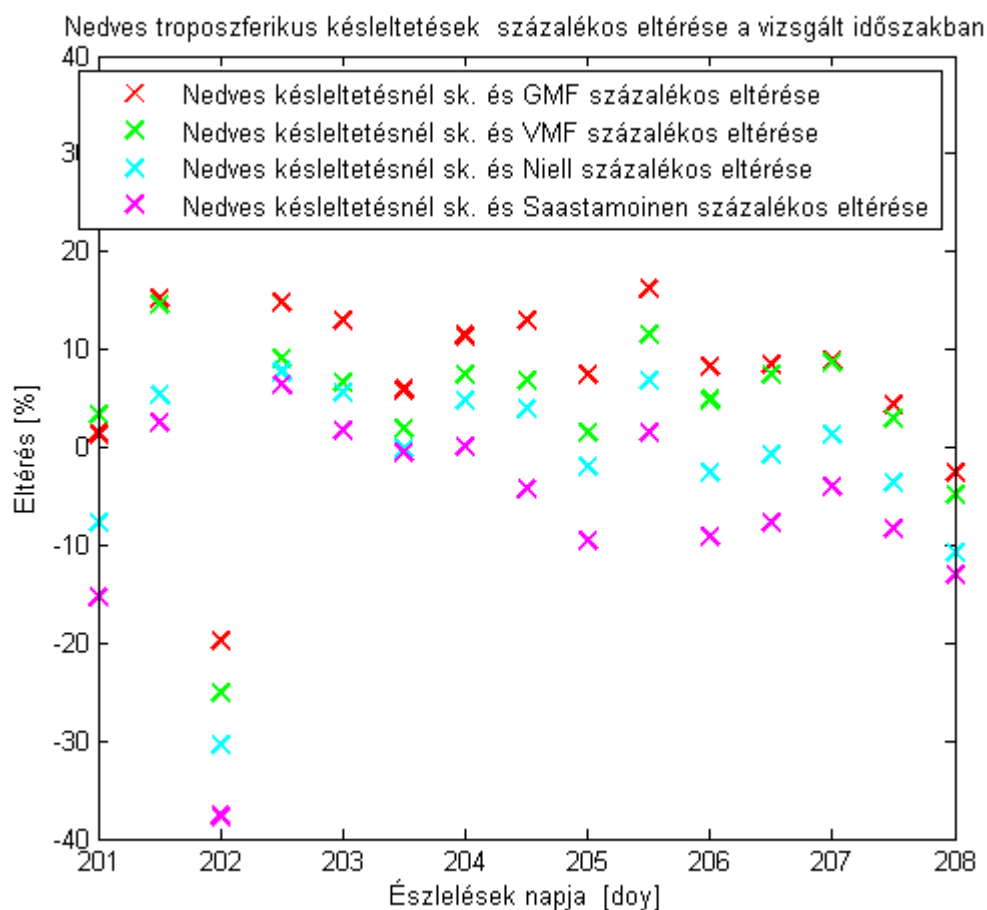
26. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések különbsége a vizsgált időszakban BUTE

A nedves késleltetések esetén is előállítottuk a referenciamodellel való eltérések statisztikai jellemzőit (27. ábra). Az átlagok értékei alátámasztják a fentiekben felállított pontossági sorrendet. A szórások hasonlóan alakulnak a különböző modellek esetén valamint azt is láthatjuk, hogy értékeik jóval nagyobbak, mint a hidrosztatikus késleltetésekénél voltak.

Nedves troposzférikus késleltetések referenciamodellel vett eltéréseinek statisztikai jellemzői				
PESTSZENTLŐRINC, BUTE				
	min [m]	max [m]	átlag [m]	szórás [m]
sk.-GMF	-0,031	0,035	0,015	0,017
sk-VMF	-0,039	0,025	0,008	0,016
sk-Niell	-0,047	0,018	-0,002	0,017
sk-Saastamoinen	-0,059	0,015	-0,011	0,018

27. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések referenciamodellel vett eltéréseinek statisztikai jellemzői, BUTE

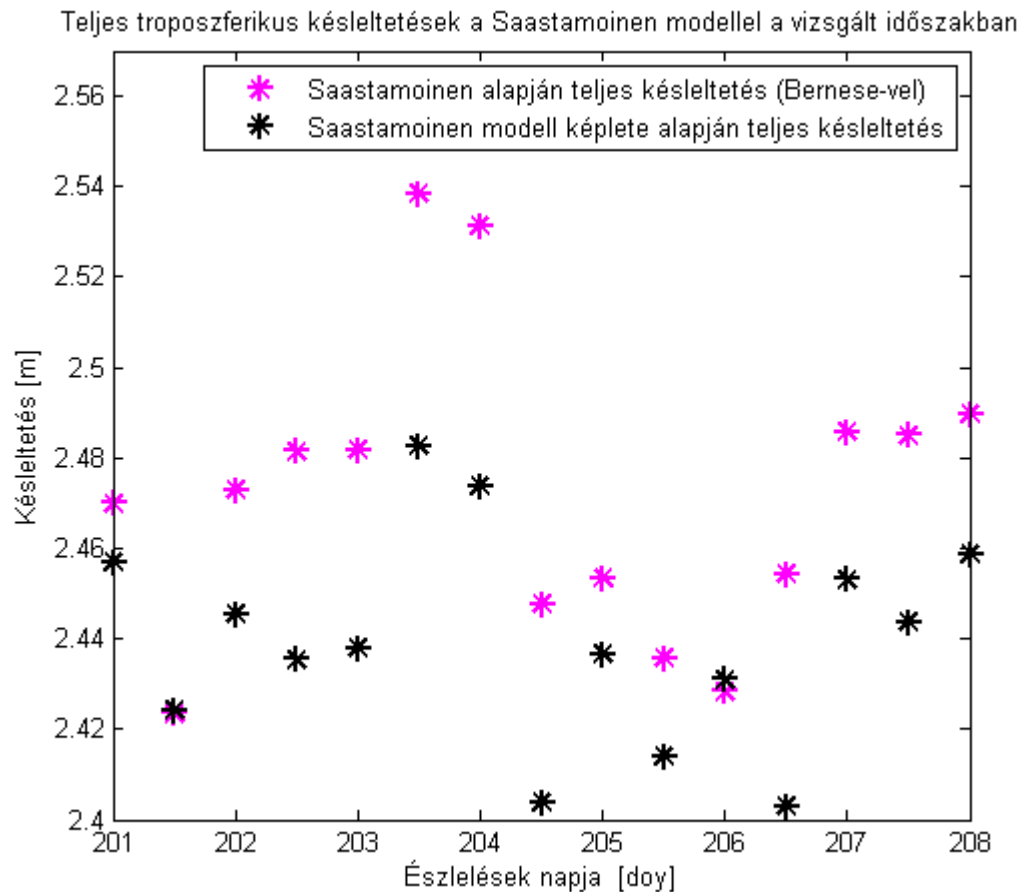
Az előbbi nedves késleltetéseknek a sugárkövetés eredményétől vett különbségeit százalékosan is megjelenítjük (28. ábra). A legtöbb érték 15% alatti, de valahol 40%-os az eltérés. Ezek már jóval jelentősebbek, mint a hidrosztatikus eredményeknél.



28. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések százalékos eltérése a vizsgált időszakban
BUTE

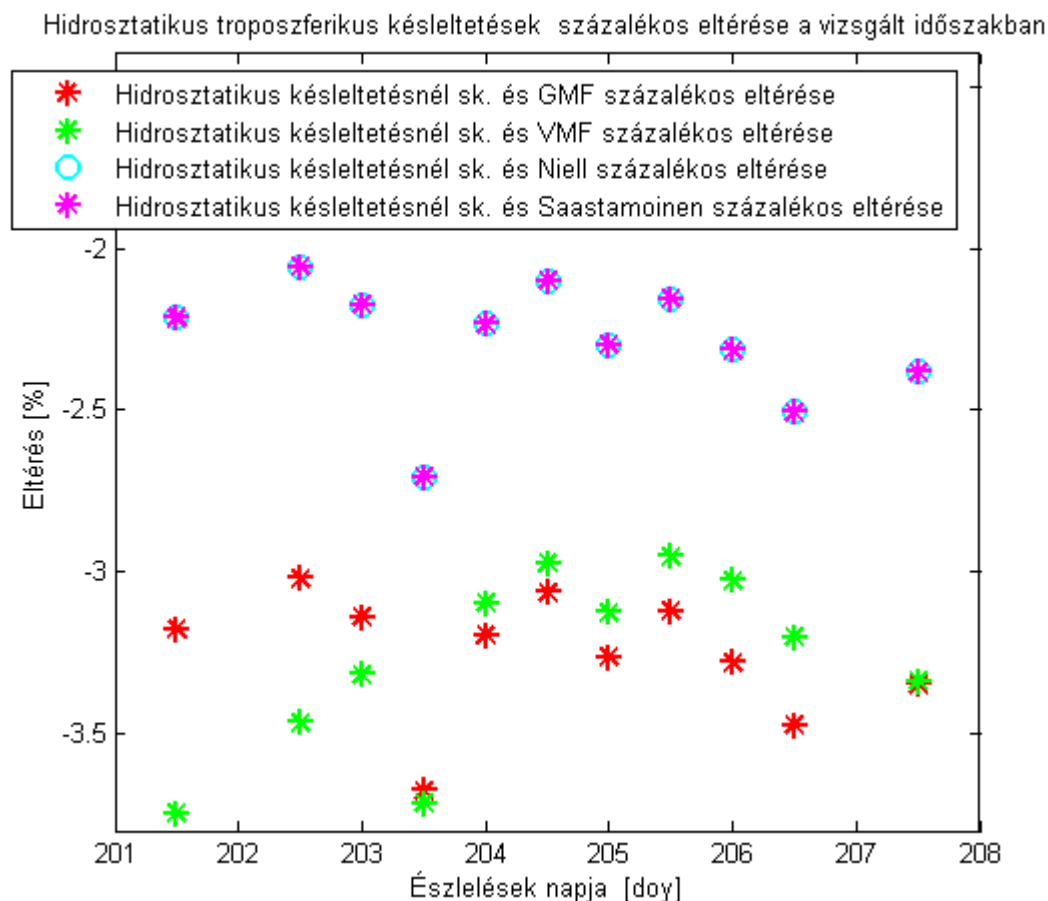
Megjegyezzük, hogy a GMF modell a hidrosztatikus és nedves elemzéseknél nem közelítette jól a sugárkövetést. A teljes késleltetés statisztikai jellemzői alapján viszont a Niell modell mellett az egyik legjobb. Ennek oka lehet, hogy a hidrosztatikus késleltetéseket túlbecsülte, a nedves értékeket pedig alul, így a teljes késleltetésre jó eredményt mutat.

A Bernese Saastamoinen modelljével számított teljes késleltetéseket összehasonlítottuk a Saastamoinen modell képletével (32) megadható értékekkel (29. ábra). Megjegyezzük, hogy utóbbit nem a megszokott sztenderd adatokkal számítottuk, hanem a rádiószonda által mért földfelszíni eredményekkel, így ez a modell tekinthető a pontosabbnak. Eltéréseik átlagosan 4 cm körüliek, a Bernese-vel számított modell majdnem minden esetben túlbecsüli a késleltetéseket.



29. ábra: Teljes troposzférikus késleltetések a Saastamoinen modellel a vizsgált időszakban BUTE

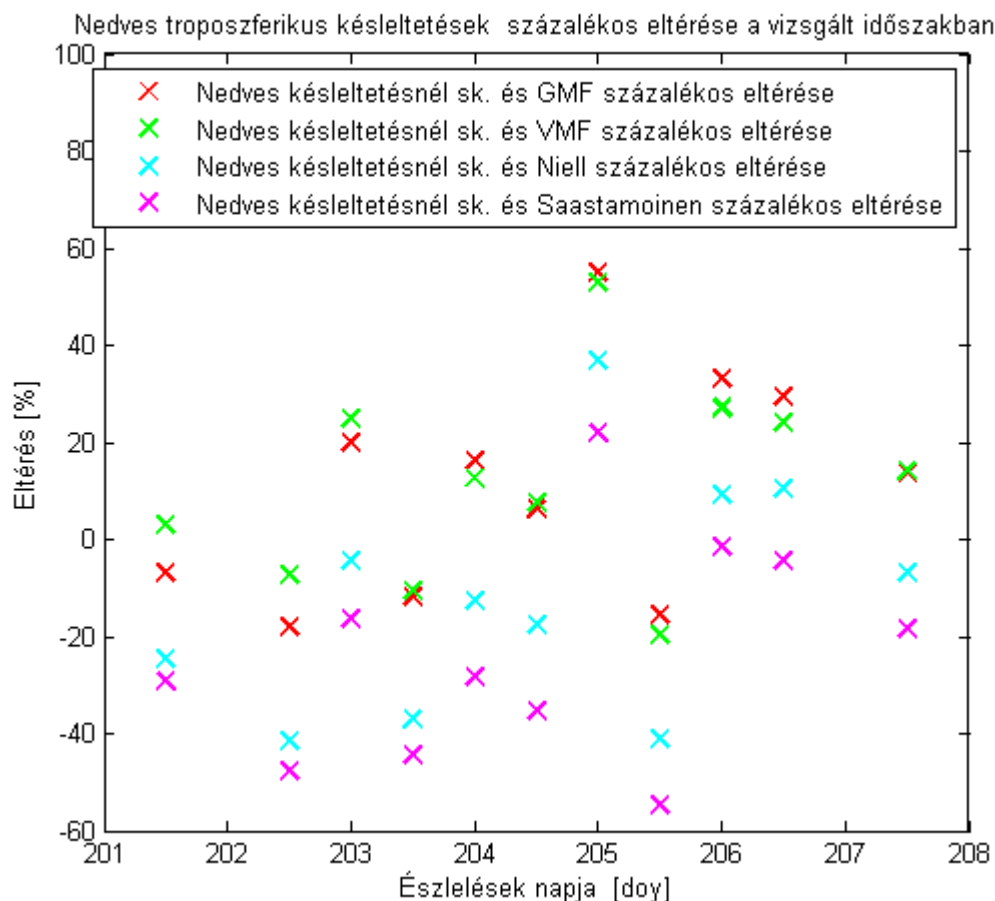
A portugáliai LAGO állomás jellemzőit is kiszámítottuk, ezek közül most a késleltetések százalékos eltérését mutatjuk be hidrosztatikus és nedves értékek esetén is. Először a hidrosztatikus értékeket elemezve (30. ábra), az adott ábrát a 24. ábrával összevetve azt látjuk, hogy a portugáliai állomásnál nagyobbak az eltérések, 3,5%-t is túlléphetik. Itt a VMF nem követi jól a sugárkövetés eredményeit. A referenciamodelt most legjobban a Niell és a Saastamoinen modellek közelítik meg, 2,2% körül. Valamint az is leolvasható, hogy minden modell túlbecsüli a sugárkövetést.



30. ábra: Hidrosztatikus troposzférikus késleltetések százalékos eltérése a vizsgált időszakban LAGO

A nedves késleltetések referenciamodelltől vett százalékos eltérései is nagyobbak (31. ábra), mint a BUTE állomás eredményei, az előbbi hidrosztatikus különbségekhez hasonlóan. A nedves eltérések többnyire 40% alattiak, de a 60%-ot is eléri. Itt elég nehéz megállapítani melyik modellnél adja a legjobb közelítést. Most a VMF és a GMF modell is elég jól közelít, viszont a Saastamoinen pedig rosszabbul.

A LAGO állomás eredményei eltérnek a BUTE-ból kapott értékektől, ennek oka lehet, hogy valamelyik állomásnál szokatlan időjárási körülmények voltak, ami eltorzíthatja a referenciamodell.



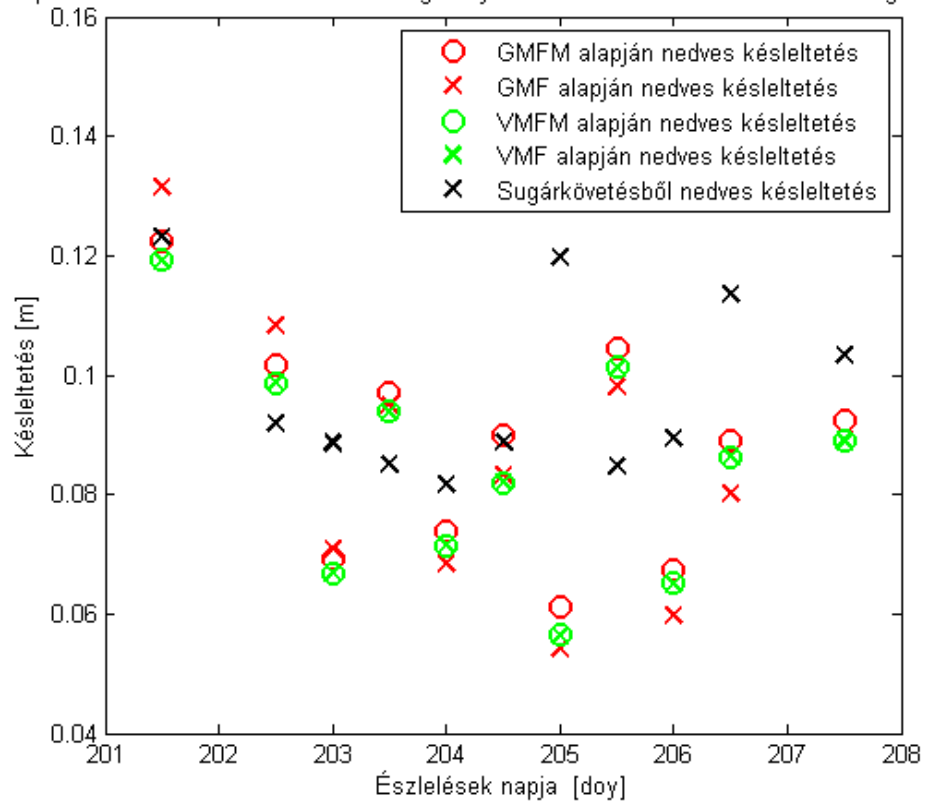
31. ábra: Nedves troposzferikus késleltetések százalékos eltérése a vizsgált időszakban
LAGO

6.2. A meteorológiai fájlok hatásának vizsgálata a késleltetések pontosságára

A következőkben tanulmányozzuk, hogy azoknál az állomásoknál, ahol meteorológiai fájlokat alkalmaztunk, mennyivel változtak az eredmények. Az elemzéseket LAGO állomásra végezzük el. A fentiekben már említettük, hogy ha a meteorológiai fájlokat bevonjuk a számításokba, akkor csak nedves késleltetések becslése lehetséges. Így most a különféle modellekből meteorológiai fájjal és anélkül számított nedves eredményeket vetjük össze a sugárkövetés nedves értékeivel.

Először csak a GMF, GMFM, VMF és VMFM modelleket jelenítettük a sugárkövetéssel együtt (32. ábra), hogy átlátható ábrát kapjunk. Ezen azt látjuk, hogy VMF modell értékei nem változtak meg. Ennek az lehet az oka, hogy a VMF modellnél kellően pontosak voltak az előrejelzett légnyomás értékek. A GMF értékeit a meteorológiai fájlok többségében javították, ahol nem, ott tized cm körül rontották, de a javítások fél cm körüliek voltak.

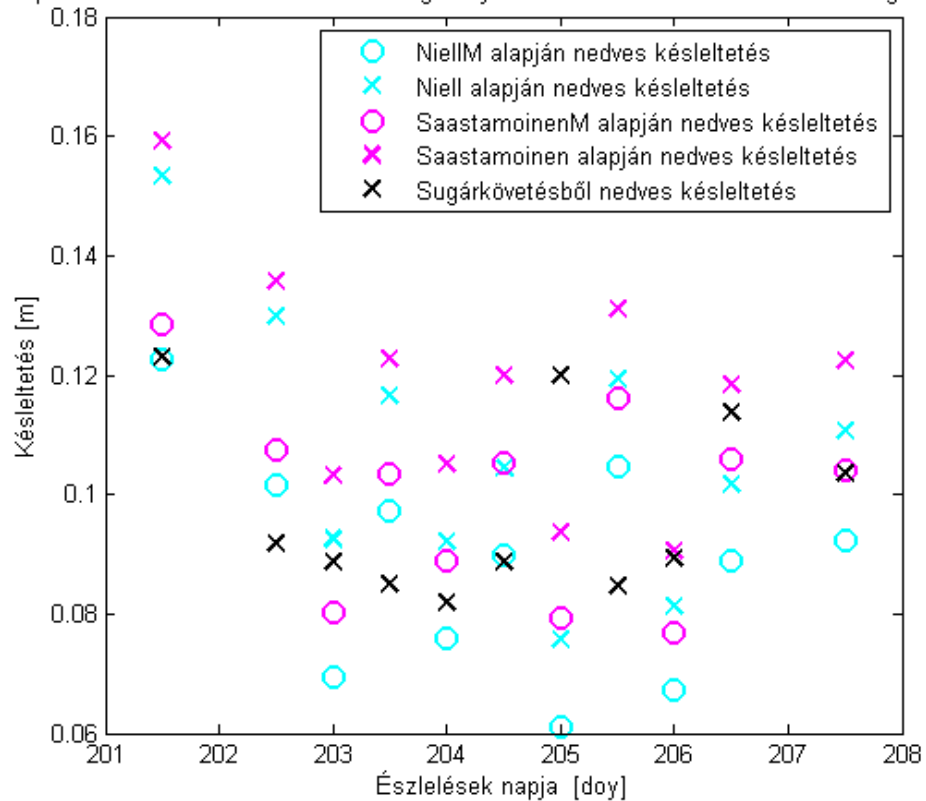
Nedves troposzférikus késleltetések meteorológiai fájlok felhasználásával és anélkül a vizsgált időszakban 1.



32. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések meteorológiai fájlok felhasználásával és anélkül a vizsgált időszakban 1. LAGO

Aztán a Niell, NiellM, Saastamoinen és SaastamoinenM modelleket ábrázoltuk a sugárkövetés értékeivel együtt (33. ábra). A Saastamoinent és a Niellt is többnyire javította a meteorológiai fájl bevonása a feldolgozásba. Ezenél jelentősebben változtak a késleltetések, 2 cm körüli értékkel.

Nedves troposzférikus késleltetések meteorológiai fájlok felhasználásával és anélkül a vizsgált időszakban 2.



33. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések meteorológiai fájlok felhasználásával és anélkül a vizsgált időszakban 2. LAGO

Továbbá előállítottuk a nedves késleltetések sugárkövetés értékeitől vett eltéréseinek statisztikai jellemzőit. Először azokra a nedves késleltetésekre, amelyek a meteorológiai adatok nélkül lettek előállítva, aztán a meteorológiai fájlokkal létrehozott késleltetésekre is (34. ábra és 35. ábra). Ezeket összevetve (36. ábra) pontosabb eredményeket kapunk, amely szerint a GMF modellek átlagosan 0,3 cm-rel javultak, a VMF modell nem változott. Valamint a Saastamoinen és a Niell modellek átlagosan 1,9 cm-rel adnak jobb becslést a késleltetésekre a meteorológiai fájlokat is használva. A szórások is javulnak kis mértékben, ha a feldolgozásba meteorológiai adatokat is bevonunk.

Nedves troposzférikus késleltetések referenciamodelltől vett eltéréseinek statisztikai jellemzői				
LISSZABON, LAGO				
	min [m]	max [m]	átlag [m]	szórás [m]
sk.-GMF	-0,017	0,066	0,012	0,025
sk-VMF	-0,017	0,063	0,013	0,022
sk-Niell	-0,038	0,044	-0,010	0,025
sk-Saastamoinen	-0,046	0,026	-0,021	0,022

34. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések referenciamodelltől vett eltéréseinek statisztikai jellemzői, LAGO

Meteorológiai fájlal számított nedves troposzférikus késleltetések referenciamodelltől vett eltéréseinek statisztikai jellemzői				
LISSZABON, LAGO				
	min [m]	max [m]	átlag [m]	szórás [m]
sk.-GMF	-0,020	0,059	0,009	0,022
sk-VMF	-0,017	0,063	0,013	0,022
sk-Niell	-0,020	0,059	0,009	0,022
sk-Saastamoinen	-0,031	0,041	-0,002	0,020

35. ábra: Meteorológiai fájlal számított nedves troposzférikus késleltetések referenciamodelltől vett eltéréseinek statisztikai jellemzői, LAGO

A statisztikai jellemzők eltérése (nedves troposzférikus késleltetésekkel számított - meteorológiai fájlal számolt nedves troposzférikus késleltetésekkel előállított)				
LISSZABON, LAGO				
	min [m]	max [m]	átlag [m]	szórás [m]
sk.-GMF	0,003	0,007	0,003	0,003
sk-VMF	0,000	0,000	0,000	0,000
sk-Niell	-0,018	-0,015	-0,019	0,003
sk-Saastamoinen	-0,015	-0,015	-0,019	0,002

36. ábra: A statisztikai jellemzők eltérése (nedves troposzférikus késleltetésekkel számított-meteorológiai fájlal számolt nedves troposzférikus késleltetésekkel előállított), LAGO

7. Összegzés

Ismertettük a téma megértéséhez elengedhetetlen fogalmakat, jelenségeket és a számításokhoz szükséges képleteket. Majd a Bernese 5.2 GNSS szoftverrel 2014. július 20. és 26. közötti időszakra különféle troposzféra modellekkel – GMF, VMF, Niell, Saastamoinen és Hopfield – késleltetéseket számítottunk. A feldolgozásba meteorológiai fájlokat is bevontunk és tanulmányoztuk ezek hatását az eredményekre. Célunk volt a modellek pontossági vizsgálata, amihez a sugárkövetés módszerét használtuk. Ennek számítását MATLAB 2014Ra-val végeztük el. Ehhez rádiószondás fájlokat és magasan ISA adatokat is használtunk, a vizsgált időszak rádiószondás észleléseit vontuk be a vizsgálatokba. Az eredmények összehasonlítását is MATLAB 2014Ra-val valósítottuk meg, amihez a Bernese eredményfájlokon a számításokhoz és ábrázoláshoz szükséges átalakításokat el kellett végeznünk.

Elemeztük *a vizsgált időszakban a különféle modellekből kapott késleltetéseket*, összevetettük egymással és a referenciamodellel is. Először a teljes késleltetéseket tanulmányoztuk, mind az 5 modell esetén, ahol a GMF, a VMF és a Niell közelítették legjobban a referenciamodellt. A hidrosztatikus és nedves értékek egy nagyságrenddel eltérnek egymástól, ezeket így külön elemeztük. A hidrosztatikus késleltetéseknél a VMF a felhasznált grid fájlok miatt mutatott napi változást, a GMF, a Niell és a Saastamoinen minden napra ugyanakkora eredményt adott valamint a Saastamoinen és a Niell értékei megegyeztek. A hidrosztatikus modelleknél a VMF valamint a Niell és a Saastamoinen is jó becslést adott, de a GMF is maximum 1% körüli eltérést mutatott a referenciamodelltől. A nedves késleltetéseket becsültük az a priori-ként használt hidrosztatikus értékekkel. Ezek közül a Niell-nél és a Saastamoinen-nél voltak a legjobb eredmények. A nedves késleltetések eltérése a sugárkövetéstől szélső esetben elérte a 40%-ot is, általában 20% alatt maradt. Összevettük még a Bernese-vel kapott Saastamoinen teljes késleltetését a Saastamoinen modell képletével számítható értékkel. Utóbbit mért adatokkal számítottuk, tehát az tekinthető a pontosabbnak, a Bernese majdnem minden alkalommal túlbecsülte ezt. Ezeket a jellemzőket a portugáliai LAGO állomásra is számítottuk és ábrázoltuk, viszont jelentős eltéréseket mutattak, aminek oka lehet valamilyen szokatlan időjárási körülmény, ami eltorzíthatja a referenciamodellt.

Aztán vizsgáltuk *a meteorológiai fájlok hatását a késleltetések pontosságára*. 6 külföldi állomás esetén meteorológiai fájlokat is bevontuk a feldolgozásba, de ekkor csak nedves késleltetéseket tudtunk számítani a Bernese-vel. Ezek nagyjából javítottak az eredményeken. A GMF-nél fél cm alatti értékkel, míg a Niell és Saastamoinen esetén 2 cm-rel is javult az eredmény.

A fenti vizsgálatoknál előállítottuk a vizsgált modellek referenciamodelltől vett eltéréseit leíró statisztikai jellemzőket - a minimumot, a maximumot, az átlagot és a

szórást - a teljes, a hidrosztatikus és a nedves késleltetések esetén valamint a meteorológiai adatokkal végzett elemzéseknél is. Ezek alátámasztották és pontosították az ábrákról leolvasott eredményeket.

Összefoglalva a GMF, a Niell és Saastamoinen modellek adják a legjobb teljes késleltetést, a hidrosztatikus és a nedves eredmények közül pedig a Niell és a Saastamoinen értékei emelhetők ki.

8. Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki konzulensemnek, Dr Rózsa Szabolcsnak, aki hasznos tanácsokkal látott el és segített a dolgozat megírásában. Valamint köszönet mindazoknak, akik bízattak és támogattak.

9. Ábrajegyzék

1. ábra: A Föld körüli térség vázlatos szerkezete	6
2. ábra: A határréteg változása	7
3. ábra: EPN hálózata	17
4. ábra: IGS hálózata	18
5. ábra: A felhasznált permanens állomások	19
6. ábra: Hármaskülönbségek ciklusugrás esetén	21
7. ábra: Kettőskülönbségek ciklusugrás esetén	22
8. ábra: Troposzférikus késleltetés becslése a Bernese 5.2 GNSS szoftverrel	25-26
9. ábra: A Bernese-ből kapott .TRP fájl (nem tartalmazott meteorológiai fájl a feldolgozás)	28
10. ábra: Vaisala RS92-SGP rádiószonda	32
11. ábra: A ballonhoz erősítik a rádiószondát és egy szögletviszaverőt	32
12. ábra: Egy FSL kiterjesztésű rádiószonda méréseket tartalmazó fájl	33-34
13. ábra: Egy FSL kiterjesztésű rádiószonda méréseket magában foglaló fájl tartalmának értelmezése	34
14. ábra: Az ISA rétegei és azok jellemzői	37
15. ábra: A magasság sűrítése	39
16. ábra: A sugárkövetés	40
17. ábra: A Snellius-Descartes törvény alkalmazása	42
18. ábra: Teljes troposzférikus késleltetések a vizsgált időszakban BUTE	44
19. ábra: Teljes troposzférikus késleltetések referenciamodellről vett eltéréseinek statisztikai jellemzői, BUTE	44
20. ábra: Troposzférikus késleltetések a vizsgált időszakban BUTE	45
21. ábra: Hidrosztatikus troposzférikus késleltetések a vizsgált időszakban BUTE	46
22. ábra: Hidrosztatikus troposzférikus késleltetések különbsége a vizsgált időszakban BUTE	47
23. ábra: Hidrosztatikus troposzférikus késleltetések referenciamodellről vett eltéréseinek statisztikai jellemzői, BUTE	47
24. ábra: Hidrosztatikus troposzférikus késleltetések százalékos eltérése a vizsgált időszakban BUTE	48
25. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések a vizsgált időszakban BUTE	49

26. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések különbsége a vizsgált időszakban BUTE	50
27. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések referenciamodelltől vett eltéréseinek statisztikai jellemzői, BUTE	50
28. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések százalékos eltérése a vizsgált időszakban BUTE	51
29. ábra: Teljes troposzférikus késleltetések a Saastamoinen modellel a vizsgált időszakban BUTE	52
30. ábra: Hidrosztatikus troposzférikus késleltetések százalékos eltérése a vizsgált időszakban LAGO	53
31. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések százalékos eltérése a vizsgált időszakban LAGO	54
32. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések meteorológiai fájlok felhasználásával és anélkül a vizsgált időszakban 1. LAGO	55
33. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések meteorológiai fájlok felhasználásával és anélkül a vizsgált időszakban 2. LAGO	56
34. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések referenciamodelltől vett eltéréseinek statisztikai jellemzői, LAGO	57
35. ábra: Meteorológiai fájlal számított nedves troposzférikus késleltetések referenciamodelltől vett eltéréseinek statisztikai jellemzői, LAGO	57
36. ábra: A statisztikai jellemzők eltérése (nedves troposzférikus késleltetésekkel számított-meteorológiai fájlal számolt nedves troposzférikus késleltetésekkel előállított), LAGO	57

10. Mellékletjegyzék

1. melléklet: A Bernese-ből kapott troposzférafájlok beolvasása és az adatok szűrése (import_bern.m).....	64
2. melléklet: Rádiószonda fájlok beolvasása a sugárkövetés számításához (raobs_import.m)	66
3. melléklet: Az ISA adatok bevonása a sugárkövetés számításába (isa_data.m).....	67
4. melléklet: A sugárkövetés számításához szükséges interpolációk (interpolation.m)	68
5. melléklet: A sugárkövetés számítása (calcraytracing.m).....	69
6. melléklet: Késleltetések a sugárkövetés módszerével és a Saastamoinen modellből (delays.m)	70
7. melléklet: Sugárkövetés számításának automatizálása illetve a sugárkövetésből és a Bernese-ből származó eredmények összehasonlítása, ábrázolása (raobs_raytracing.m).....	71

11. Mellékletek

1. melléklet: A Bernese-ből kapott troposzférafájlok beolvasása és az adatok szűrése (import_bern.m)

```
% 1. TROP IMPORT
fileID=fopen('C:\matlab\summer_hun_fsl_uj\filelist_dipl_trophop.txt')
TROPFILES=textscan(fileID,'%s');
NUMSTAT=size(TROPFILES{1});

% 1.1. File scanning
for m=1:NUMSTAT(1,1)
    A=TROPFILES{1}{m};
    filename=sprintf('%s%s%s','C:\GPSDATA\CAMPAIGN52\TROP0\ATM\',A, '.TRP');

    TROP_FILE=fopen(filename);
    TEXT = textscan(TROP_FILE, '%s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s', 'HeaderLines', 6);
    TEXT1SIZE=(size(TEXT{1}));
    NUMROW=TEXT1SIZE(1);
    TEXTSIZE=size(TEXT);
    NUMCOL=TEXTSIZE(2);

    station=zeros(NUMROW,1)
    for j=1:NUMROW
        if TEXT{1}{j}=='BUTE'
            station(j,1)=1
        end
        if TEXT{1}{j}=='DRES'
            station(j,1)=2
        end
        if TEXT{1}{j}=='LAGO'
            station(j,1)=3
        end
        if TEXT{1}{j}=='MATE'
            station(j,1)=4
        end
        if TEXT{1}{j}=='MORP'
            station(j,1)=5
        end
        if TEXT{1}{j}=='OROS'
            station(j,1)=6
        end
        if TEXT{1}{j}=='PEN2'
            station(j,1)=7
        end
        if TEXT{1}{j}=='SPRN'
            station(j,1)=8
        end
        if TEXT{1}{j}=='WARN'
            station(j,1)=9
        end
        if TEXT{1}{j}=='ZIMM'
            station(j,1)=10
        end
    end

    DATA=zeros(NUMROW,NUMCOL);
    for i=1:NUMROW
        for j=1:NUMCOL
            [x,status]=str2num(TEXT{j}{i});
```

```

        if (status) DATA(i,j)=x;
    end
end
end
end

%1.2. Collecting the detection's date (YYYY MM DD HH MM SS)
for k=1:NUMROW
    DATE(k,:)=[DATA(k,3) DATA(k,4) DATA(k,5) DATA(k,6) DATA(k,7) DATA(k,8)];

    dmjd(k,:)=julday([DATE(k,3),DATE(k,2),DATE(k,1),DATE(k,4)], 'MJD');
    doy(k)=dmjd(k,:)-(julday([1,1,DATE(k,1),DATE(k,4)], 'MJD')+1);
    if DATE(k,4)==12
        doy(:,k)=doy(:,k)+0.5
    end
end

DATA=[station, doy', DATA];

% 1.3. Select datas
NUMDATA=0
for l=1:NUMROW
    if DATA(l,8)==0 || DATA(l,8)==12
        NUMDATA=NUMDATA+1;
        TROPDELAY(NUMDATA,1)=DATA(l,1);
        TROPDELAY(NUMDATA,2)=DATA(l,2);
        TROPDELAY(NUMDATA,3)=DATA(l,8);
        TROPDELAY(NUMDATA,4)=DATA(l,11);
        TROPDELAY(NUMDATA,5)=DATA(l,12);
        TROPDELAY(NUMDATA,6)=DATA(l,14);
    end
end

if m>1
    TROPDELAYS=[TROPDELAYS;TROPDELAY];
else
    TROPDELAYS=[TROPDELAY]
end

TROPDELAYSSIZE=size(TROPDELAYS);
TROPDELAYSROW=TROPDELAYSSIZE(1);

NUMDAT=0
for n=1:TROPDELAYSROW
    if TROPDELAYS(n,1)==1
        NUMDAT=NUMDAT+1;
        BUTE(NUMDAT,1)=TROPDELAYS(n,2);
        BUTE(NUMDAT,2)=TROPDELAYS(n,3);
        BUTE(NUMDAT,3)=TROPDELAYS(n,4);
        BUTE(NUMDAT,4)=TROPDELAYS(n,5);
        BUTE(NUMDAT,5)=TROPDELAYS(n,6);
    end
end

NUMDAT=0
for n=1:TROPDELAYSROW
    if TROPDELAYS(n,1)==3
        NUMDAT=NUMDAT+1;
        LAGO(NUMDAT,1)=TROPDELAYS(n,2);
        LAGO(NUMDAT,2)=TROPDELAYS(n,3);
        LAGO(NUMDAT,3)=TROPDELAYS(n,4);
        LAGO(NUMDAT,4)=TROPDELAYS(n,5);
        LAGO(NUMDAT,5)=TROPDELAYS(n,6);
    end
end
end
end
end

```

```

BUTESIZE=size(BUTE);
BUTEROW=BUTESIZE(1);

for n=2:BUTEROW
    if BUTE((n-1),2)==0 && BUTE(n,2)==0 && BUTE((n-1),1)==BUTE(n,1)
        BUTE((n-1), :) = [];
        BUTEROW=BUTEROW-1;
    end
end

```

```

LAGOSIZE=size(LAGO);
LAGOROW=LAGOSIZE(1);

for n=2:LAGOROW
    if LAGO((n-1),2)==0 && LAGO(n,2)==0 && LAGO((n-1),1)==LAGO(n,1)
        LAGO((n-1), :) = [];
        LAGOROW=LAGOROW-1;
    end
end

```

2. melléklet: Rádiószonda fájlok beolvasása a sugárkövetés számításához (raobs_import.m)

```

%% 1. RAOBS IMPORT
function [METDATA STATION DATE]=raobs_import(filename)

% 1. File scanning
RAOBS_FILE=fopen(filename);
TEXT = textscan(RAOBS_FILE, '%s %s %s %s %s %s %s');
TEXT1SIZE=(size(TEXT{1}));
NUMROW=TEXT1SIZE(1);
TEXTSIZE=size(TEXT);
NUMCOL=TEXTSIZE(2);

DATA=zeros(NUMROW,NUMCOL);
for i=1:NUMROW
    for j=1:NUMCOL
        [x,status]=str2num(TEXT{j}{i});
        if (status) DATA(i,j)=x;
    end
end

for i=1:NUMROW
    if (DATA(i,1)==9) ROWSTART=i;
    elseif (DATA(i,1)==7) TROPOPAUSE=i;
end

NUMDATA=0;
for i=ROWSTART:NUMROW
    if ((DATA(i,2) ~= 99999) && (DATA(i,3) ~= 99999) && (DATA(i,4) ~= 99999) && (DATA(i,5) ~= 99999))
        NUMDATA=NUMDATA+1;
        METDATA(NUMDATA,1)=DATA(i,2)/10;
        METDATA(NUMDATA,2)=DATA(i,3);
        METDATA(NUMDATA,3)=DATA(i,4)/10;
        METDATA(NUMDATA,4)=DATA(i,5)/10;

        METDATA(NUMDATA,5)=6.112*exp(17.62*METDATA(NUMDATA,4)/(243.12+METDATA(NUMDATA,4)));
    end
end

```

```

METDATASIZE=size(METDATA);
METDatarow=METDATASIZE(1);

for i=2:(METDatarow-1)
    if METDATA(i-1,2)==METDATA(i,2)
        METDATA=METDATA([1:(i-1),(i+1):METDatarow],:);
    end
end

%Collecting the station's latitude, longitude and altitude
nl=strfind(TEXT{4}{2},'N');
if isempty(nl)
    latstr=strrep(TEXT{4}{2},'S','');
    lat=-1*str2num(latstr);
else
    latstr=strrep(TEXT{4}{2},'N','');
    lat=str2num(latstr);
end

nl=strfind(TEXT{5}{2},'E');
if isempty(nl)
    lonstr=strrep(TEXT{5}{2},'W','');
    lon=-1*str2num(lonstr);
else
    lonstr=strrep(TEXT{5}{2},'E','');
    lon=str2num(lonstr);
end

STATION=[lat lon DATA(2,6)];

%Collecting the detection's date (YYYY MM DD HH)
if (strcmp(TEXT{4}{1},'JAN')) month=01; end
if (strcmp(TEXT{4}{1},'FEB')) month=02; end
if (strcmp(TEXT{4}{1},'MAR')) month=03; end
if (strcmp(TEXT{4}{1},'APR')) month=04; end
if (strcmp(TEXT{4}{1},'MAY')) month=05; end
if (strcmp(TEXT{4}{1},'JUN')) month=06; end
if (strcmp(TEXT{4}{1},'JUL')) month=07; end
if (strcmp(TEXT{4}{1},'AUG')) month=08; end
if (strcmp(TEXT{4}{1},'SEP')) month=09; end
if (strcmp(TEXT{4}{1},'OCT')) month=10; end
if (strcmp(TEXT{4}{1},'NOV')) month=11; end
if (strcmp(TEXT{4}{1},'DEC')) month=12; end

DATE=[DATA(1,5) month DATA(1,3) DATA(1,2)];

end

```

3. melléklet: Az ISA adatok bevonása a sugárkövetés számításába (isa_data.m)

```

%% 2. ISA DATA
function DATAS=isa_data(METDATA)

PRESS=[1013.25; 226.32; 54.749; 8.6802; 1.1091; 0.66939; 0.039564; 0.003734];
HEIGHT=[0.0; 11019; 20063; 32162; 47350; 51413; 71802; 86000];
TEMP=[15; -56.5; -56.5; -44.5; -2.5; -2.5; -58.5; -86.28];
DEWPT=TEMP;
WVPRESS=zeros(8,1);

UPPERDATA=[PRESS, HEIGHT, TEMP, DEWPT, WVPRESS];

UPPERDATASIZE=size(UPPERDATA);
UPPERDatarow=UPPERDATASIZE(1);

```

```

METDATASIZE=size(METDATA);
METDATAROW=METDATASIZE(1);

STATUS=0;
for i=1:UPPERDATAROW
    if ((METDATA(METDATAROW, 2)<UPPERDATA(i, 2)) && (STATUS==0));
        UPPERDATA CUT=UPPERDATA([i:UPPERDATAROW,:]);
        STATUS=1;
    end
end

DATAS=[METDATA;UPPERDATA CUT];

end

```

4. melléklet: A sugárkövetés számításához szükséges interpolációk (interpolation.m)

```

%% 3. RAYTRACING
% 3.1. Interpolation - Increase of the vertical resolution
%3.1.1. Temperature interpolation

function [HEIGHTICUT RTRDATA]=interpolation(DATAS)

HEIGHTI=[0:10:1990, 2000:20:5980, 6000:50:15950, 16000:100:35900, 36000:500:136000];

HEIGHTISIZE=size(HEIGHTI);
HEIGHTIROW=HEIGHTISIZE(1);

STATUS=0;
for i=1:HEIGHTIROW
    for j=1:HEIGHTIROW
        if (DATAS(1,2)<=HEIGHTI(i,1) && (DATAS(end,2)<=HEIGHTI(j,1)) && (STATUS==0));
            HEIGHTICUT=HEIGHTI([i,j,:]);
            STATUS=1
            if DATAS(1,2)~=HEIGHTI(i,1)
                HEIGHTICUT=[DATAS(1,2);HEIGHTICUT]
                if DATAS(end,2)~=HEIGHTI(j,1)
                    HEIGHTICUT=[HEIGHTICUT;DATAS(end,2)];
                end
            end
        end
    end
end
end

TEMPI=interp1(DATAS(:,2),DATAS(:, 3), HEIGHTICUT);

HEIGHTICUTSIZE=size(HEIGHTICUT);
HEIGHTICUTROW=HEIGHTICUTSIZE(1);

DATASIZE=size(DATAS);
DATASROW=DATASIZE(1);

%3.1.2. Pressure interpolation
for i=1:HEIGHTICUTROW
    LOW=0;
    for j=1:DATASROW-1
        if DATAS(j,2)<=HEIGHTICUT(i,1)
            LOW=j;
        end
    end
    HIGH=LOW+1;
    cPRESSI(LOW)=(DATAS(HIGH,2)-DATAS(LOW,2))/(log(DATAS(HIGH,1))-log(DATAS(LOW,1)));
    PRESSI(i)=DATAS(LOW,1)*exp((HEIGHTICUT(i,1)-DATAS(LOW,2))/cPRESSI(1,LOW));
end

```

```

%3.1.3. Water vapour pressure interpolation
for i=1:HEIGHTICUTROW
    LOW=0;
    for j=1:DATASROW-1
        if DATAS(j,2)<=HEIGHTICUT(i,1)
            LOW=j;
        end
    end
    HIGH=LOW+1;
    if ((DATAS(HIGH,5)~=0) && (DATAS(LOW,5)~=0))
        cWVPRESSI(LOW)=(DATAS(HIGH,2)-DATAS(LOW,2))/(log(DATAS(HIGH,5))-log(DATAS(LOW,5)));
        WVPRESSI(i)=DATAS(LOW,5)*exp((HEIGHTICUT(i,1)-DATAS(LOW,2))/cWVPRESSI(1,LOW));
    else
        WVPRESSI(i)=0;
    end
end
end

TEMPIK=TEMPI+273.16;

RTRDATA=[TEMPIK,PRESSI',WVPRESSI'];

end

```

5. melléklet: A sugárkövetés számítása (calcraytracing.m)

```
%% 3. RAYTRACING
```

```
function [dshs dsws]=calcraytracing(RTRDATA, HEIGHTICUT, e1deg, lon, lat)
```

```

% 3.2. Refractivity
R=8.314; %Specific gas constant in J/mol/K
Md=0.0289644; % Molar mass of dry air in kg/mol
Mw=0.0180152; % Molar mass of water vapour in kg/mol
k1=0.77604; % Thayer constant in K/Pa
k2=0.64790; % Thayer constant in K/Pa
k3=3776; % Thayer constant in K^2/Pa
Rd=286.9; % Specific gas constant of dry air in J/kg/K
Rw=461.5; % Specific gas constant of water vapour in J/kg/K

RTRDATASIZE=size(RTRDATA);
RTRDatarow=RTRDATASIZE(1);

for i=1:RTRDatarow
    RHOD(i)=(RTRDATA(i,2)-RTRDATA(i,3))*100/Rd/RTRDATA(i,1);
    RHOw(i)=RTRDATA(i,3)*100/Rw/RTRDATA(i,1);
end

RHO=RHOD+RHOw;
Nh=k1*Rd*RHO;

for i=1:RTRDatarow
    Nw(i)=k3*100*RTRDATA(i,3)/RTRDATA(i,1)^2+(k2*100-k1*100*Mw/Md)*RTRDATA(i,3)/RTRDATA(i,1);
    N(i)=Nh(i)+Nw(i);
    n(i)=N(i)/10^6+1;
end

%%3.3. Calculation of the raytracing
a=6378137; % Ellipsoidal semi-major axis in meter
f=1/298.257223563; % Ellipsoidal flattening in -
b=a-a*f; % Ellipsoidal semi-minor axis in meter
e=sqrt((a^2-b^2)/a^2); %First numerical eccentricity in -
fi=deg2rad(lat); %Station's latitude in radian
la=deg2rad(lon); %Station's longitude in radian

```

```

N=a/sqrt(1-e*e*sin(fi)*sin(fi));
M=a*(1-e*e)/(sqrt(1-e*e*sin(fi)*sin(fi)))^3;
R=sqrt(M*N); % Mean radius of the earth at the station in meter

```

```

r=R+HEIGHTCUT;
e1rad=degtorad(e1deg);
THETArad1=e1rad;
s1=-r(1)*sin(THETArad1)+sqrt(r(2)^2-r(1)^2*(cos(THETArad1))^2);
z1=r(1);
y1=0;
z2=z1+s1*sin(e1rad);
y2=y1+s1*cos(e1rad);
ETA1rad=0;
ETA2rad=atan(y2/z2);
nmean1=(n(1)+n(2))/2;
nmean2=(n(2)+n(3))/2;
THETA2rad=acos(nmean1/nmean2*cos(THETArad1+ETA2rad));
e2rad=THETA2rad-ETA2rad;

```

```

e=[e1rad;e2rad;zeros(RTRDatarow-2,1)];
s=[s1;zeros(RTRDatarow-2,1)];
THETArad=[THETArad1;THETA2rad;zeros(RTRDatarow-2,1)];
z=[z1;z2;zeros(RTRDatarow-2,1)];
y=[y1;y2;zeros(RTRDatarow-2,1)];
ETArad=[ETA1rad;ETA2rad;zeros(RTRDatarow-2,1)];
nmean=[nmean1;nmean2;zeros(RTRDatarow-2,1)];

```

```

for k=2:RTRDatarow-1
    s(k)=-r(k)*sin(THETArad(k))+sqrt(r(k+1).^2-r(k).^2*cos(THETArad(k)).^2);
    z(k+1)=z(k)+s(k)*sin(e(k));
    y(k+1)=y(k)+s(k)*cos(e(k));
    ETArad(k+1)=atan(y(k+1)/z(k+1));
    DELTArad(k+1)=ETArad(k+1)-ETArad(k);
    if ((k)<RTRDatarow-1)
        nmean(k+1)=(n(k+1)+n(k+2))/2;
    else
        nmean(k+1)=1;
    end
    con=nmean(k)/nmean(k+1)*cos(THETArad(k)+DELTArad(k+1));
    if con>1 con=1;
    end
    THETArad(k+1)=acos(nmean(k)/nmean(k+1)*cos(THETArad(k)+DELTArad(k+1)));
end

```

```

for k=1:RTRDatarow-1
    NhMEAN(k)=(Nh(k)+Nh(k+1))/2;
    NwMEAN(k)=(Nw(k)+Nw(k+1))/2;
    dsh(k)=s(k)*NhMEAN(k)*10^-6;
    dsw(k)=s(k)*NwMEAN(k)*10^-6;
end
dshs=sum(dsh);
dsws=sum(dsw);

```

```
end
```

6. melléklet: Késleltetések a sugárkövetés módszerével és a Saastamoinen modellből (delays.m)

```
%% DELAYS
```

```
function [TROPDELAY DATE doy]=delays(filename)
```

```

[METDATA STATION DATE]=raobs_import(filename);
lat=STATION(1);
lon=STATION(2);

```

```

DATAS=isa_data(METDATA);
[HEIGHTICUT RTRDATA]=interpolation(DATAS);
e1deg=90;
NUMDATA=0;
[dshs dsws]=calcraytracing(RTRDATA, HEIGHTICUT, e1deg, lon, lat);

dmjd=julday([DATE(3),DATE(2),DATE(1),DATE(4)],'MJD');
doy=dmjd-(julday([1,1,DATE(1),DATE(4)],'MJD'))+1;
if DATE(4)==12
    doy=doy+0.5
end
NUMDATA=NUMDATA+1;
TROPDELAY(:,1)=doy;
TROPDELAY(NUMDATA,2)=e1deg;
TROPDELAY(NUMDATA,3)=dshs;
TROPDELAY(NUMDATA,4)=dsws;

% Computing the delays from Saastamoinen
TROPDELAY(NUMDATA,5)=0.002277/cos(degtorad(90-
(e1deg)))*(RTRDATA(1,2)+((1255./(RTRDATA(1,1)))+0.05)*(RTRDATA(1,3))-tan(degtorad(90-
(e1deg)))*tan(degtorad(90-(e1deg))))

end

```

7. melléklet: Sugárkövetés számításának automatizálása illetve a sugárkövetésből és a Bernese-ből származó eredmények összehasonlítása, ábrázolása (raobs_raytracing.m)

```

RAOBSFILES=dlmread('C:\matlab\summer_hun_fsl_uj\filelist_dipl.txt');
NUMSTAT=size(RAOBSFILES);

for i=1:NUMSTAT(1,1)
    filename=sprintf('%s%s%d%s','C:\matlab\summer_hun_fsl_uj','12843_',RAOBSFILES(i),'.fsl')

    [TROPDELAY DATE doy]=delays(filename);
    STAT_90(i,:)=[i TROPDELAY(1,:)];

end

```

%% 5. PLOT

%5.1. Examining total, hydrostatic and wet delays

```

berndeltot=plot(BUTEVMF(:,1),(BUTEGMF(:,3)+BUTEGMF(:,4)),'r>', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),(BUTEVMF(:,3)+BUTEVMF(:,4)),'g*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),(BUTENIELL(:,3)+BUTENIELL(:,4)),'co', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),(BUTESAAS(:,3)+BUTESAAS(:,4)),'m*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTEHOP(:,5),'b*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(STAT_90(:,2),(STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5)),'k*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

legend('GMF alapján teljes késleltetés','VMF alapján teljes késleltetés','Niell alapján teljes
késleltetés','Saastamoinen alapján teljes késleltetés','Hopfield alapján teljes késleltetés','Sugárkövetésből
teljes késleltetés');
title('Teljes troposzférikus késleltetések a vizsgált időszakban');
xlabel('Észlelés napja [doy]');
ylabel('Késleltetés [m]');

savefig('berndeltot.fig')
%%

```

```

berndel=plot(BUTEVMF(:,1),BUTEGMF(:,3),'r*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTEGMF(:,4),'rx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTEVMF(:,3),'g*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);

```

```

hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTEVMF(:,4),'gx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTENIELL(:,3),'c*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTENIELL(:,4),'cx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTESAAS(:,3),'m*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTESAAS(:,4),'mx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(STAT_90(:,2),STAT_90(:,4),'k*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(STAT_90(:,2),STAT_90(:,5),'kx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

legend('GMF alapján hidrosztatikus késleltetés','GMF alapján nedves késleltetés','VMF alapján hidrosztatikus késleltetés','VMF alapján nedves késleltetés','Niell alapján hidrosztatikus késleltetés','Niell alapján nedves késleltetés','Saastamoinen alapján hidrosztatikus késleltetés','Saastamoinen alapján nedves késleltetés','Sugárkövetésből hidrosztatikus késleltetés','Sugárkövetésből nedves késleltetés');
title('Troposzferikus késleltetések a vizsgált időszakban');
xlabel('Észlelések napja [doy]');
ylabel('Késleltetés [m]');

savefig('berndel.fig')
%%

berndelH=plot(BUTEVMF(:,1),BUTEGMF(:,3),'r*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTEVMF(:,3),'g*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTENIELL(:,3),'co', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTESAAS(:,3),'m*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(STAT_90(:,2),STAT_90(:,4),'k*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

legend('GMF alapján hidrosztatikus késleltetés','VMF alapján hidrosztatikus késleltetés','Niell alapján hidrosztatikus késleltetés','Saastamoinen alapján hidrosztatikus késleltetés','Sugárkövetésből hidrosztatikus késleltetés');
title('Hidrosztatikus troposzferikus késleltetések a vizsgált időszakban');
xlabel('Észlelések napja [doy]');
ylabel('Késleltetés [m]');

savefig('berndelH.fig')
%%

berndelHdiff=plot(BUTEVMF(:,1),(STAT_90(:,4)-BUTEGMF(:,3)),'r*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),(STAT_90(:,4)-BUTEVMF(:,3)),'g*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),(STAT_90(:,4)-BUTENIELL(:,3)),'co', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),(STAT_90(:,4)-BUTESAAS(:,3)),'m*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

legend('Hidrosztatikus késleltetésnél sk. és GMF különbsége','Hidrosztatikus késleltetésnél sk. és VMF különbsége','Hidrosztatikus késleltetésnél sk. és Niell különbsége','Hidrosztatikus késleltetésnél sk. és Saastamoinen különbsége');
title('Hidrosztatikus troposzferikus késleltetések különbsége a vizsgált időszakban');
xlabel('Észlelések napja [doy]');
ylabel('Késleltetések különbsége [m]');

savefig('berndelHdiff.fig')
%%

berndelHper=plot(BUTEVMF(:,1),(STAT_90(:,4)-BUTEGMF(:,3))./STAT_90(:,4)*100,'r*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),(STAT_90(:,4)-BUTEVMF(:,3))./STAT_90(:,4)*100,'g*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),(STAT_90(:,4)-BUTENIELL(:,3))./STAT_90(:,4)*100,'co', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),(STAT_90(:,4)-BUTESAAS(:,3))./STAT_90(:,4)*100,'m*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

```

```

legend('Hidrosztatikus késleltetésnél sk. és GMF százalékos eltérése','Hidrosztatikus késleltetésnél sk. és VMF százalékos eltérése','Hidrosztatikus késleltetésnél sk. és Niell százalékos eltérése','Hidrosztatikus késleltetésnél sk. és Saastamoinen százalékos eltérése')
title('Hidrosztatikus troposzferikus késleltetések százalékos eltérése a vizsgált időszakban');
xlabel('Észlelések napja [doy]');
ylabel('Eltérés [%]');

```

```

savefig('berndelHper.fig')

```

```

%%

```

```

berndelW=plot(BUTEVMF(:,1),BUTEGMF(:,4),'rx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTEVMF(:,4),'gx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTENIELL(:,4),'cx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTESAAS(:,4),'mx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(STAT_90(:,2),STAT_90(:,5),'kx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

```

```

legend('GMF alapján nedves késleltetés','VMF alapján nedves késleltetés','Niell alapján nedves késleltetés','Saastamoinen alapján nedves késleltetés','Sugárkövetésből nedves késleltetés');
title('Nedves troposzferikus késleltetések a vizsgált időszakban');
xlabel('Észlelések napja [doy]');
ylabel('Késleltetés [m]');

```

```

savefig('berndelW.fig')

```

```

%%

```

```

berndelWdiff=plot(BUTEVMF(:,1),(STAT_90(:,5)-BUTEGMF(:,4)), 'rx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),(STAT_90(:,5)-BUTEVMF(:,4)), 'gx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),(STAT_90(:,5)-BUTENIELL(:,4)), 'cx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),(STAT_90(:,5)-BUTESAAS(:,4)), 'mx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

```

```

legend('Nedves késleltetésnél sk. és GMF különbsége','Nedves késleltetésnél sk. és VMF különbsége','Nedves késleltetésnél sk. és Niell különbsége','Nedves késleltetésnél sk. és Saastamoinen különbsége')
title('Nedves troposzferikus késleltetések különbsége a vizsgált időszakban');
xlabel('Észlelések napja [doy]');
ylabel('Késleltetések különbsége [m]');

```

```

savefig('berndelWdiff.fig')

```

```

%%

```

```

berndelWper=plot(BUTEVMF(:,1),(STAT_90(:,5)-BUTEGMF(:,4))./STAT_90(:,5)*100,'rx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),(STAT_90(:,5)-BUTEVMF(:,4))./STAT_90(:,5)*100,'gx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),(STAT_90(:,5)-BUTENIELL(:,4))./STAT_90(:,5)*100,'cx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),(STAT_90(:,5)-BUTESAAS(:,4))./STAT_90(:,5)*100,'mx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

```

```

legend('Nedves késleltetésnél sk. és GMF százalékos eltérése','Nedves késleltetésnél sk. és VMF százalékos eltérése','Nedves késleltetésnél sk. és Niell százalékos eltérése','Nedves késleltetésnél sk. és Saastamoinen százalékos eltérése')
title('Nedves troposzferikus késleltetések százalékos eltérése a vizsgált időszakban');
xlabel('Észlelések napja [doy]');
ylabel('Eltérés [%]');

```

```

savefig('berndelWper.fig')

%%

berndelSAAS=plot(BUTEVMF(:,1),BUTESAAS(:,5),'m*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(STAT_90(:,2),STAT_90(:,6),'k*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

legend('Saastamoinen alapján teljes késleltetés (Bernese-vel)', 'Saastamoinen modell képlete alapján teljes késleltetés');
title('Teljes troposzferikus késleltetések a Saastamoinen modellel a vizsgált időszakban');
xlabel('Észlelések napja [doy]');
ylabel('Késleltetés [m]');

savefig('berndelSAAS.fig')

%%
%5.2. Compare delays with and without meteo files

berndelWdelWM1=plot(BUTEVMF(:,1),BUTEGMFM(:,4),'ro', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTEGMFM(:,4),'rx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTEVMFM(:,4),'go', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTEVMFM(:,4),'gx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(STAT_90(:,2),STAT_90(:,5),'kx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

legend('GMFM alapján nedves késleltetés', 'GMF alapján nedves késleltetés', 'VMFM alapján nedves késleltetés', 'VMF alapján nedves késleltetés', 'Sugárkövetésből nedves késleltetés');
title('Nedves troposzferikus késleltetések meteorológiai fájlok felhasználásával és anélkül a vizsgált időszakban 1. ');
xlabel('Észlelések napja [doy]');
ylabel('Késleltetés [m]');

savefig('berndelWdelWM1.fig')

%%

berndelWdelWM2=plot(BUTEVMF(:,1),BUTENIELLM(:,4),'co', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTENIELL(:,4),'cx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTESAASM(:,4),'mo', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(BUTEVMF(:,1),BUTESAAS(:,4),'mx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(STAT_90(:,2),STAT_90(:,5),'kx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

legend('NiellM alapján nedves késleltetés', 'Niell alapján nedves késleltetés', 'SaastamoinenM alapján nedves késleltetés', 'Saastamoinen alapján nedves késleltetés', 'Sugárkövetésből nedves késleltetés');
title('Nedves troposzferikus késleltetések meteorológiai fájlok felhasználásával és anélkül a vizsgált időszakban 2. ');
xlabel('Észlelések napja [doy]');
ylabel('Késleltetés [m]');

savefig('berndelWdelWM2.fig')

%%
%5.3. Examining the statistical characteristics
%Total delay (BUTE)
MINVECGMFR=min((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTEGMFM(:,5)));
MINVECMFR=min((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTEVMF(:,5)));
MINVECNIELLR=min((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTENIELL(:,5)));
MINVECSAASR=min((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTESAAS(:,5)));
MINVECHOPR=min((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTEHOP(:,5)));

```

```

mins=[MINVECGMFR;MINVECMFR;MINVECNIELLR;MINVECSAASR; MINVECHOPR];

%%
MAXVECGMFR=max((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTEGMF(:,5)));
MAXVECMFR=max((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTEVMF(:,5)));
MAXVECNIELLR=max((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTENIELL(:,5)));
MAXVECSAASR=max((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTESAAS(:,5)));
MAXVECHOPR=max((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTEHOP(:,5)));
maxs=[MAXVECGMFR;MAXVECMFR;MAXVECNIELLR;MAXVECSAASR; MAXVECHOPR];

%%
MEANVECGMFR=mean((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTEGMF(:,5)));
MEANVECMFR=mean((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTEVMF(:,5)));
MEANVECNIELLR=mean((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTENIELL(:,5)));
MEANVECSAASR=mean((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTESAAS(:,5)));
MEANVECHOPR=mean((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTEHOP(:,5)));
means=[MEANVECGMFR;MEANVECMFR;MEANVECNIELLR;MEANVECSAASR; MEANVECHOPR];

%%
STDVECGMFR=std((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTEGMF(:,5)));
STDVECMFR=std((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTEVMF(:,5)));
STDVECNIELLR=std((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTENIELL(:,5)));
STDVECSAASR=std((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTESAAS(:,5)));
STDVECHOPR=std((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-(BUTEHOP(:,5)));
stds=[STDVECGMFR;STDVECMFR;STDVECNIELLR;STDVECSAASR; STDVECHOPR];

BUTESTATt=[mins maxs means stds];

%Hydrostatic delay (BUTE)
MINVECGMFR=min((STAT_90(:,4))-(BUTEGMF(:,3)));
MINVECMFR=min((STAT_90(:,4))-(BUTEVMF(:,3)));
MINVECNIELLR=min((STAT_90(:,4))-(BUTENIELL(:,3)));
MINVECSAASR=min((STAT_90(:,4))-(BUTESAAS(:,3)));
mins=[MINVECGMFR;MINVECMFR;MINVECNIELLR;MINVECSAASR];

%%
MAXVECGMFR=max((STAT_90(:,4))-(BUTEGMF(:,3)));
MAXVECMFR=max((STAT_90(:,4))-(BUTEVMF(:,3)));
MAXVECNIELLR=max((STAT_90(:,4))-(BUTENIELL(:,3)));
MAXVECSAASR=max((STAT_90(:,4))-(BUTESAAS(:,3)));
maxs=[MAXVECGMFR;MAXVECMFR;MAXVECNIELLR;MAXVECSAASR];

%%
MEANVECGMFR=mean((STAT_90(:,4))-(BUTEGMF(:,3)));
MEANVECMFR=mean((STAT_90(:,4))-(BUTEVMF(:,3)));
MEANVECNIELLR=mean((STAT_90(:,4))-(BUTENIELL(:,3)));
MEANVECSAASR=mean((STAT_90(:,4))-(BUTESAAS(:,3)));
means=[MEANVECGMFR;MEANVECMFR;MEANVECNIELLR;MEANVECSAASR];

%%
STDVECGMFR=std((STAT_90(:,4))-(BUTEGMF(:,3)));
STDVECMFR=std((STAT_90(:,4))-(BUTEVMF(:,3)));
STDVECNIELLR=std((STAT_90(:,4))-(BUTENIELL(:,3)));
STDVECSAASR=std((STAT_90(:,4))-(BUTESAAS(:,3)));
stds=[STDVECGMFR;STDVECMFR;STDVECNIELLR;STDVECSAASR];

BUTESTATh=[mins maxs means stds];

%Wet delay (BUTE)
MINVECGMFR=min((STAT_90(:,5))-(BUTEGMF(:,4)));
MINVECMFR=min((STAT_90(:,5))-(BUTEVMF(:,4)));
MINVECNIELLR=min((STAT_90(:,5))-(BUTENIELL(:,4)));
MINVECSAASR=min((STAT_90(:,5))-(BUTESAAS(:,4)));
mins=[MINVECGMFR;MINVECMFR;MINVECNIELLR;MINVECSAASR];

```

```

%%
MAXVECGMFR=max((STAT_90(:,5))-(BUTEGMF(:,4)));
MAXVECVMF=max((STAT_90(:,5))-(BUTEVMF(:,4)));
MAXVECNIELLR=max((STAT_90(:,5))-(BUTENIELL(:,4)));
MAXVECSAASR=max((STAT_90(:,5))-(BUTESAAS(:,4)));
maxs=[MAXVECGMFR;MAXVECVMF;MAXVECNIELLR;MAXVECSAASR];

%%
MEANVECGMFR=mean((STAT_90(:,5))-(BUTEGMF(:,4)));
MEANVECVMF=mean((STAT_90(:,5))-(BUTEVMF(:,4)));
MEANVECNIELLR=mean((STAT_90(:,5))-(BUTENIELL(:,4)));
MEANVECSAASR=mean((STAT_90(:,5))-(BUTESAAS(:,4)));
means=[MEANVECGMFR;MEANVECVMF;MEANVECNIELLR;MEANVECSAASR];

%%
STDVECGMFR=std((STAT_90(:,5))-(BUTEGMF(:,4)));
STDVECVMF=std((STAT_90(:,5))-(BUTEVMF(:,4)));
STDVECNIELLR=std((STAT_90(:,5))-(BUTENIELL(:,4)));
STDVECSAASR=std((STAT_90(:,5))-(BUTESAAS(:,4)));
stds=[STDVECGMFR;STDVECVMF;STDVECNIELLR;STDVECSAASR];

BUTESTATw=[mins maxs means stds];

%% at LAGO the similar way

```

12. Irodalomjegyzék

Ádám J., Rózsa Sz. és Takács B. (2011) GNSS elmélete és alkalmazása, BME Általános és Felsőgeodéziai Tanszék <http://www.agt.bme.hu/>

Breuer H. (2014) A légkör összetétele és vertikális szerkezete, ELTE Meteorológiai Tanszék

http://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fnimbus.elte.hu%2Ftemeto%2Fstaff%2Fbartholy%2F1%2FMeteor-1%2F1-Legkor-vertikalis-szerkezete-I.pdf&ei=xotGVLjdCoKuaabfgLgH&usg=AFQjCNFCfvnLpOEekdCZm9qfq-87UgLaCA&sig2=yI08UmzNGqNdObn_RPQHtg&bvm=bv.77880786,d.bGQ

Haszpra L. (2014) Levegőkémia: A légkör szerkezete, ELTE Meteorológiai Tanszék http://nimbus.elte.hu/oktatas/oktatasi_anyagok/levegokemia/levegokemia.html

J. Boehm, H. Schuh (2003) Vienna Mapping Functions [*]

J. Boehm, A. Niell, P. Tregoning, és H. Schuh (2006) Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005GL025546/full>

Mészáros R. (2013) Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/meteorologia/index.html>

NOAA/ESRL Radiosonde Database - FSL Output Format Description (2014) http://www.esrl.noaa.gov/raobs/intl/fsl_format-new.cgi

R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez és M. Meindl (2007) Bernese GPS Software Version 5.0, Astronomical Institute, University of Bern <http://www.bernese.unibe.ch/docs50/DOCU50.pdf>

R. Dach, P. Walser (2013) Bernese GNSS Software Version 5.2 Astronomical Institute, University of Bern <http://www.bernese.unibe.ch/docs/TUTORIAL.pdf>

Sz. Rózsa (2014) Modelling Tropospheric Delays Using the Global Surface Meteorological Parameter Model GPT2 <http://www.pp.bme.hu/ci/article/view/7267>

Tóth Gy. (2012) Kiegyenlítő számítások, MSc gyakorlati jegyzet, BME Általános és Felsőgeodéziai Tanszék <http://www.geod.bme.hu/gtoth/>

Tuchband T. (2007) A GPS PPP helymeghatározási technika pontossági vizsgálata, BME Általános és Felsőgeodéziai Tanszék <http://www.agt.bme.hu/>

Völgyesi L. (2011) Geofizika, BME Általános és Felsőgeodézia Tanszék
<http://www.agt.bme.hu/>

Wikipédia (2014) International Standard Atmosphere
http://en.wikipedia.org/wiki/International_Standard_Atmosphere

Az []-gal jelölt forrásokat a konzulensemtől kaptam, internetes hivatkozást nem találtam róluk.*