



GNSS mérések troposzférikus késleltetésének meghatározása sugárkövetéssel

TDK dolgozat

Készítette: Juni Ildikó

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki kar

Földmérő-és Térinformatikai mérnök mesterszak

Konzulens: Dr. Rózsa Szabolcs

egyetemi docens

Tartalom

Kivonat.....	3
1. Bevezetés.....	4
2. A troposzféra	4
2.1. A troposzféra elhelyezkedése.....	4
2.2. A troposzféra hatása.....	6
3. Troposzféra modellek.....	10
3.1. Hopfield modell	10
3.2. Black modell	11
3.3. Saastamoinen modell	11
3.4. A finomított Saastamoinen modell	11
3.5. A GPT2 és GPT2W modellek.....	12
3.6. Az ESA Galileo troposzféra modellje.....	12
3.7. A műhold irányú késleltetés megadása	13
4. Rádiószonda mérések.....	14
5. Felhasznált adatok	17
5.1. Rádiószondás mérések adatai.....	17
5.2. International Standard Atmosphere (ISA) adatok.....	21
6. A sugárkövetés módszere.....	23
6.1. A rádiószondás mérések felhasználása	23
6.2. Az ISA adatok bevonása.....	23
6.3. A meteorológiai paraméterek sűrítése, interpolálás	24
6.4. A refraktivitás számítása.....	24
6.5. A sugárkövetés számítása	25
7. A vizsgált troposzféra modellek számítása	30
8. Az eredmények ábrázolása.....	33
8.1. Késleltetések és a sugárelhajlás jellemzőinek egy észlelésre vonatkozó vizsgálata	33
8.2. A vizsgált modellek referenciamodelltől való eltérését leíró statisztikai jellemzők elemzése	41
8.3. A vizsgált időszak észleléseinek teljes késleltetése különböző magassági szögek esetén..	44

9. Összegzés	47
10. Köszönetnyilvánítás	49
11. Ábrajegyzék	50
12. Mellékletjegyzék	52
13. Mellékletek.....	53
14. Irodalomjegyzék.....	67

Kivonat

GNSS mérések troposzférikus késleltetésének meghatározása sugárkövetéssel

Juni Ildikó II.évf. MSc

Konzulens: Dr. Rózsa Szabolcs, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék

A troposzféra és a felette lévő elektromosan semleges légköri zóna a globális helymeghatározó rendszereknél jelentős jelkésleltetést okoz. E késleltetés mértéke a légkör aktuális meteorológiai paramétereinek függvénye, nagyságrendje mintegy 2,3 méter zenit irányban. Ez az érték jelentősen nő a horizonthoz közeledve.

A geodéziai és navigációs célú mérések feldolgozása során a troposzférikus késleltetés meghatározására különböző modelleket használhatunk fel. Általános elv, hogy a zenitirányú késleltetés mértékét a hidrosztatikus egyensúlyban lévő légtömegekre és a vízpára hatására külön-külön határozzuk meg, majd ezeket az értékeket számítjuk át a műhold irányára. Az ilyen leképezési függvények értékei általában valamilyen sztenderd atmoszférán alapulnak.

Amennyiben rendelkezésünkre állnak a légkör meteorológiai paramétereit leíró profilmérések, akkor a sugárkövetés eljárásával közvetlenül is meghatározhatóak a troposzférikus késleltetés értékei.

A dolgozatban egy ilyen eljárást mutatunk be, amely segítségével rádiószondás és mikrohullámú radiométer méréseket felhasználva előállítottuk a késleltetések értékeit. Az így nyert eredményeket a geodéziai helymeghatározásban leggyakrabban használt troposzférikus modellek pontosságvizsgálatához használtuk fel. Az eredmények kimutatták, hogy 10° alatti magassági szögeknél a legelterjedtebb troposzféra modellek nem adnak kellő pontosságot, így célszerű a sugárkövetéses módszeren alapuló leképezési függvények használata (pl. VMF).

1. Bevezetés

Életünknek szinte mindennapos részévé vált a globális helymeghatározó rendszerek használata, egyre több területen alkalmazzuk. Ezeknél a troposzféra és a felette található elektromosan semleges légköri réteg jelentős jelkésleltetést okoz, ami a horizonthoz közeledve ugrásszerűen nő.

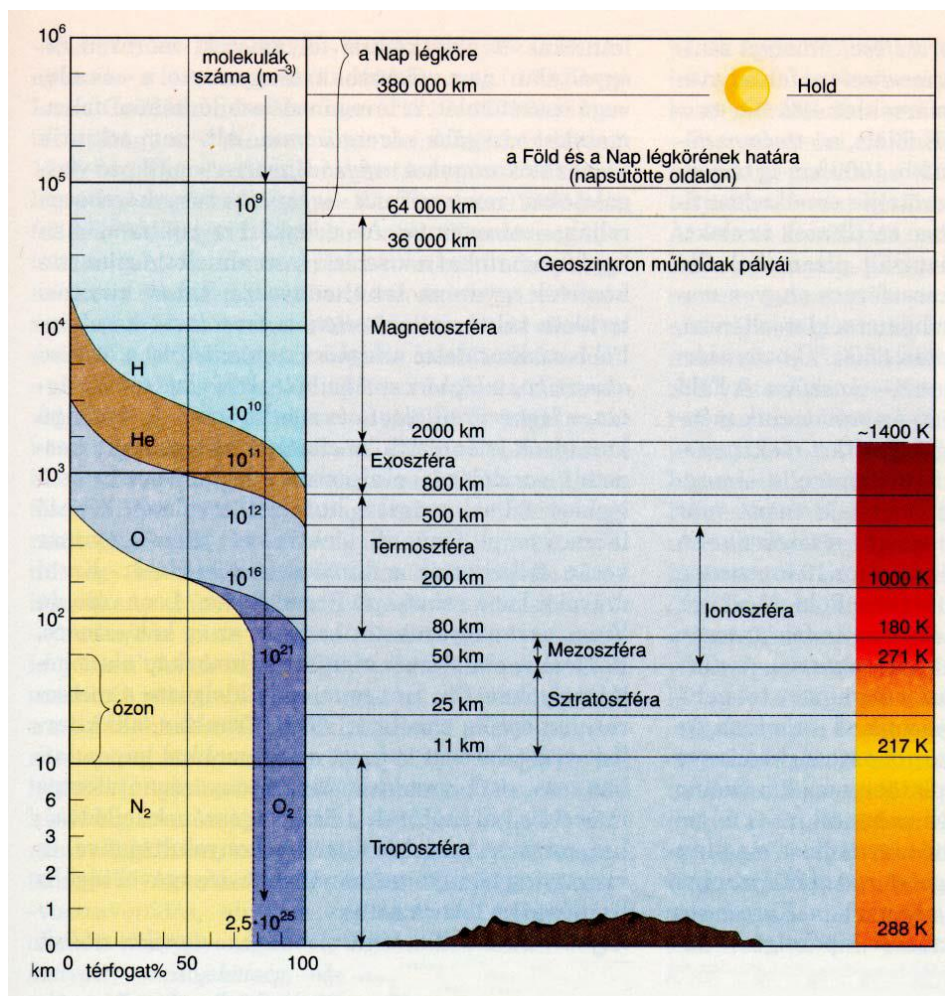
A geodéziai és a meglehetősen elterjedt navigációs méréseknél a troposzféra okozta késleltetést különböző modellek alapján határozzuk meg. Célunk ezeknek – az ESA Galileo modelljének, a GPT2W-nek és a Saastamoinen modellnek - a pontosságvizsgálata. Az előbbiekből számított késleltetéseket összevetjük a sugárkövetéssel számított értékekkel. A sugárkövetéses módszernél - a késleltetés értékét javarészt meghatározó - rádiószondás mérések adatait, valamint nagy magasságban a sztenderd atmoszféra adatait vesszük figyelembe. A mért meteorológiai paraméterekkel egy pontos modellt kapunk, amit referenciaként alkalmazhatunk a sok éves meteorológiai adatok átlagával számított modellek vizsgálatához.

Elemezzük, hogy a különféle módszerekkel előállított késleltetések mekkorák eltérő magassági szögek mellett, valamint elemezzük a szezonális változásait is.

2. A troposzféra

2.1. A troposzféra elhelyezkedése

A légkört több szempont szerint is rétegekre oszthatjuk *Völgyesi (2011)*. 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: troposzféra és ionoszféra. 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 találhatóak.



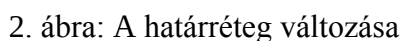
1. ábra: A Föld körüli térség vázlatos szerkezete

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

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



Nappal konvektív határrétegről beszélhetünk, ami egy kevert réteg, amit a turbulens átkeveredés homogenizál. A besugárzás fokozódásával nő, akár a PBL (keveredési réteg magasság) 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.

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 $R=8,314$ 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:

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

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

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

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

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:

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

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):

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

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

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

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

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:

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

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 többi 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 troposferikus 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 trópikusokon 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 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (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. A számításokhoz ezt az új, pontosabb modellt alkalmazzuk, a GPT2W-t.

3.6. Az ESA Galileo troposzféra modellje

A modellt Martellucci (2002) alapján ismertetjük. A szabványos Galileo vevőket nem szerelik fel meteorológiai szenzorokkal és a rendszer sem sugároz troposzférára vonatkozó paramétereket a navigációs üzenetben. Egy troposzféra modellt alkalmaznak, általános bemeneti adatokkal, mint például a szélesség, a hosszúság, a magasság, hogy az adott nap hányadik az évben és az adott óra hányadik azon a napon. Ha rendelkezésre állnak külső meteorológiai szenzorok vagy ha a sugárzott helyi meteorológiai paraméterek - amik lehetnek tényleges értékek vagy előrejelzés is – elérhetők valamilyen kommunikációs csatornán, akkor ezeket az adatokat is beépíthetjük a feldolgozásba. A troposzférikus késleltetés - ahogy már a fentiekben is említettük - hidrosztatikus és nedves késleltetésre bontható. A modell a zenit irányú hidrosztatikus késleltetést az alábbi képlettel számítja:

$$ZHD(lat, h, p_s) = 10^{-6} * \frac{k_1 * R_d}{g_m(lat, h)} * p_s \quad (36)$$

A zenit irányú nedves késleltetés pedig:

$$ZWD(lat, h, e_s, T_{ms}, \lambda) = 10^{-6} * \frac{R_d}{g_m(lat, h)} * \frac{k_2'}{(\lambda + 1)} * \frac{e_s}{T_{ms}} \quad (37)$$

ahol a bemeneti paraméterek: lat a hosszúság fokban, h a tengerszint feletti magasság km-ben, p_s és e_s a levegő teljes nyomása valamint a parciális párányomás a Föld felszínén hPa-ban, T_{ms}

a vízpára közepes hőmérséklete a felszín felett K-ben, és λ a vízgőz gradiense. A konstansok egy része már a fentiekben felírt képletekből ismert, a továbbiak: $k_2' = 370100$ K/hPa, g_m a levegő tömegközéppontjában a gravitációs gyorsulás m/s²-ben:

$$g_m(lat, h) = g_m = 9.784 * (1 - 0.00266 * \cos(2 * lat) - 0.00028 * h) \quad (38)$$

A modell előnye, hogy a felszíni meteorológiai paramétereket– a légnyomást, a hőmérsékletet, a parciális párányomást, a vízgőz illetve a hőmérsékleti gradienst – az éves változásokat modellezve becslik és ezzel végzik a számításokat. Így a GPT2W-höz hasonló pontosság érhető el.

A modellben a vevő magasságának megfelelően interpolált meteorológiai paraméterekkel végezzük a számítást. Valamint a bemenő adatok rácshálójára alapján vízszintesen is interpoláljuk az adatokat a vevő helyére. Végül az eddigi zenit irányú késleltetést VMF (Vienna Mapping Functions) leképzési függvénnyel tetszőleges irányúra számítjuk át.

3.7. A műhold irányú késleltetés megadása

A modellek zenitirányú késleltetését műhold irányúvá kell számítanunk, ezt a modellekhez tartozó leképzési függvénnyel tehetjük meg. A Hopfield modellben a hidrosztatikus és nedves késleltetésre a leképzési függvények a következők:

$$F_d(E) = \frac{1}{\sin \sqrt{E^2 + 6,25}} \quad (39)$$

$$F_w(E) = \frac{1}{\sin \sqrt{E^2 + 2,25}} \quad (40)$$

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

$$F_d(E) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{\cos E}{1 + (1 - l_c) * \frac{h_d}{r_s}} \right]^2}} \quad (41)$$

$$F_w(E) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{\cos E}{1 + (1 - l_c) * \frac{h_w}{r_s}} \right]^2}} \quad (42)$$

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

A Saastamoinen és az ESA Galileo modelljéhez a Niell-féle leképzési függvényt alkalmazzuk. A modellekkel 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:

$$F_d(E) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{\sin E + \frac{1+c}{a}} + \delta F_d(H, E) \quad (43)$$

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

$$a(\varphi, t) = a_{\text{átlag}}(\varphi_i) + a_{\text{amplitúdó}}(\varphi_i) * \cos\left(2 * \pi * \frac{t-t_0}{365,25}\right) \quad (44)$$

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

$$\delta F_d(H, E) = \left[\frac{1}{\sin E} - f * (E, a_{\text{mag}}, b_{\text{mag}}, c_{\text{mag}}) \right] * H \quad (45)$$

ahol f a (43)-as képlettel megadott lánc tört értéke.

A troposzférikus 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. Rádiószonda mérések

Ahogy már a 2.2.-es fejezet végén is említettük, rádiószondás mérések adatai alapján számítható a troposzférikus késleltetés értéke. Ezt a részt *Mészáros (2013)* alapján mutatjuk be. Rádiószondával közvetlenül mérjük a lég hőmérsékletet, 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.

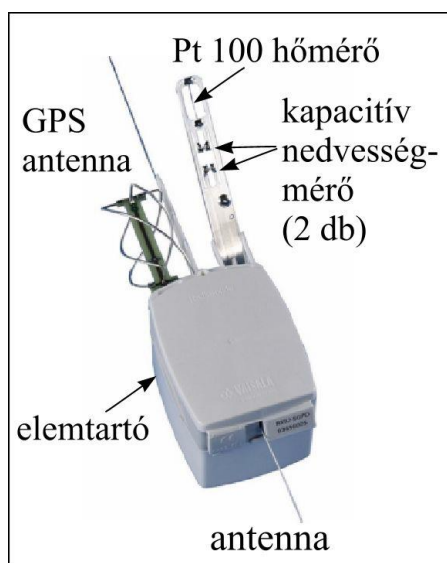
A rádiószonda három fő része a szenzorok, a jelátalakító és a rádióadó. A méréseknél 2 követelménynek kell teljesülnie a műszerekre, hogy széles tartományban mérjenek valamint, hogy zord időjárás esetén is üzemeljenek. A mérési tartományoknak jóval tágabbnak kell lenniük, mint a földfelszíni méréseknél, 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. Az következő szenzorokat használják: termisztor, termokapacitív szenzor, ellenállás hőmérő, termoelem (pl.: réz-konstantán) és bimetál szenzor. A *légnyomás* nyomásmérőszennel való mérés helyett származtatható a légnyomás 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 (régebben 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 légnyomás, a szélsebesség és a szélirány vertikális profiljához jutunk a felszíntől megközelítően 35 km-es magasságig. Valamint információt kapunk a légkör stabilitásáról, a planetáris határréteg magasságáról, a felhőzet és köd vertikális struktúrájáról valamint a felhőzet mennyiségéről is.

A Vaisala RS92-SGP rádiószondát (3. 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. Légnyomásmérőt 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.



3. 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 (4. ábra).



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

Mészáros (2013)

A felbocsájtást az észlelő személyzet hajtja végre, de vannak már automata felbocsájtó rendszerek is. A ballon az emelkedés alatt – ami megközelítően másfél óráig tart - sodródik a magassági szélllel, 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. Felhasznált adatok

5.1. Rádiószondás mérések adatai

Az alábbi fejezetet NOAA/ESRL (2014) alapján mutatjuk be. A rádiószondás mérések FSL formátumú fájlját használjuk fel a számításokhoz (5. 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

5. 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						

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

NOAA/ESRL (2014) alapján

Az FSL fájlt a következők szerint értelmezhetjük (6. 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: szélesebbesség 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. International Standard Atmosphere (ISA) adatok

Egy kicsit pontosítanunk kell, mert az általuk számított késleltetést troposzférikus 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 „troposzférikus 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 (7. 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 [°C/km]	Hőmérséklet T [°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

7. 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.

6. A sugárkövetés módszere

A sugárkövetés módszerét *Boehm és Schuh (2003)* alapján és a számításnál alkalmazott lépések bemutatásával tekintjük át. Ahogy az 5. 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.

6.1. 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:

$$e_w = 6,112 * e^{\frac{17,62 * T}{243,12 + T}} \quad (46)$$

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

6.2. Az ISA adatok bevonása

A rádiószondák a körülményektől függően különböző magasságig jutnak fel és addig rögzítik a meteorológiai állapothatározókat. A rádiószonda utolsó mérése után az ISA adatait vesszük figyelembe. A 7. 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.

6.3. 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 (8. 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

8. 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:

$$p = p_0 * e^{(h-h_0)/c} \quad (47)$$

$$e_w = e_{w0} * e^{(h-h_0)/c} \quad (48)$$

Ezek előtt még kiszámítjuk a nem besűrített magassági adatokat felhasználva a c konstansokat (47)-ből és (48)-ból 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.

6.4. 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:

$$\rho_d = (p - e) * \frac{M_d}{R} * \frac{1}{T} \quad (49)$$

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:

$$\rho_w = e * \frac{M_w}{R} * \frac{1}{T} \quad (50)$$

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

$$\rho = \rho_d + \rho_w \quad (51)$$

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

$$N_h = k_1 * \frac{R}{M_d} * \rho \quad (52)$$

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

$$N_w = \left(k_2 - k_1 * \frac{M_w}{M_d} \right) * \frac{e}{T} + k_3 * \frac{e}{T^2} \quad (53)$$

A refraktivitás a hidrosztatikus és a nedves refraktivitás összegeként értelmezhető:

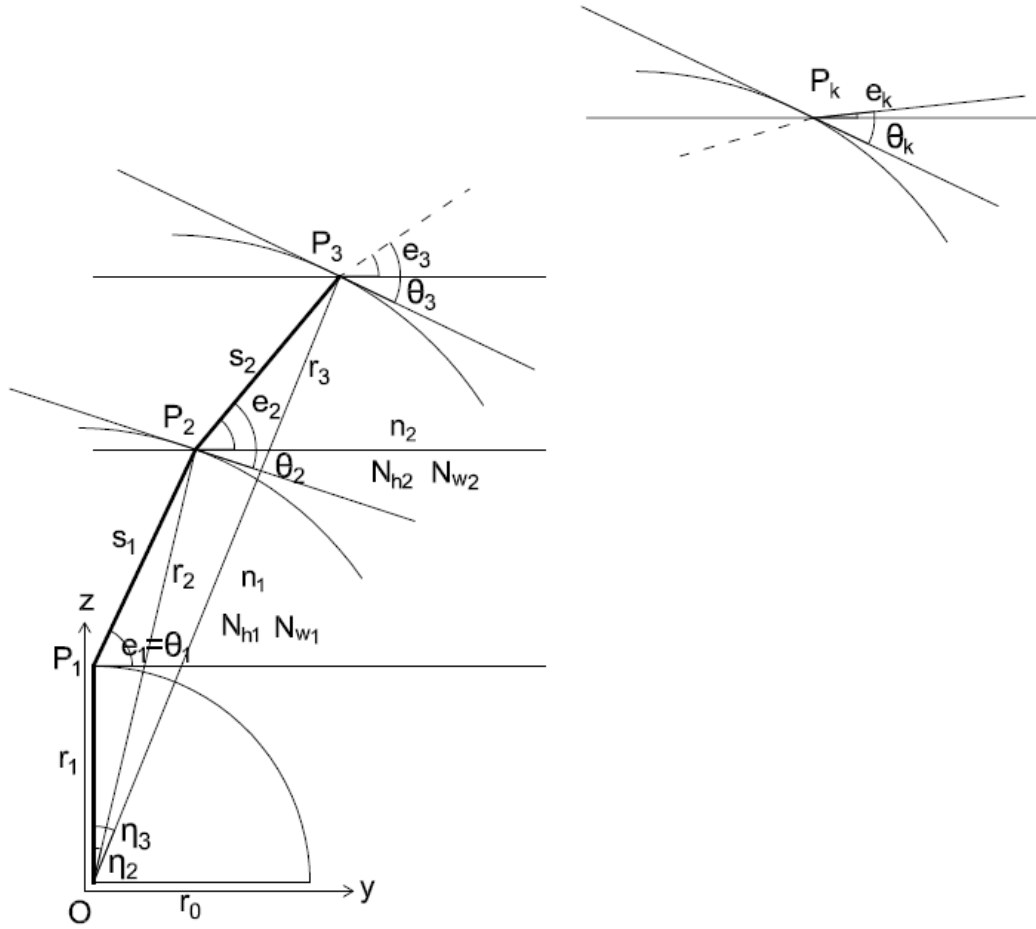
$$N = N_h + N_w \quad (54)$$

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

$$n = \frac{N}{10^6} + 1 \quad (55)$$

6.5. 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 (9. ábra). Az első rétegváltás jellemzői még speciálisak, de a másodiktól kezdve már analogikusan végezhető a számítás.



9. ábra: A sugárkövetés

Boehm és Schuh (2003) alapján

Első lépésként kiszámítjuk a magassági szintek geocentrumtól való távolságát:

$$r_i = r_0 + h_i \quad (56)$$

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:

$$\theta_1 = e_1 \quad (57)$$

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

$$r_2^2 = s_1^2 + r_1^2 - 2 * s_1 * r_1 * \cos(\theta_1 + 90^\circ) \quad (58)$$

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

$$s_1 = -r_1 * \sin\theta_1 + \sqrt{r_2^2 - r_1^2 * \cos^2\theta_1} \quad (59)$$

A P_1 és P_2 geocentrikus koordinátáit az alábbiak:

$$z_1 = r_1 \text{ és } y_1 = 0 \quad (60)$$

$$z_2 = z_1 + s_1 * \sin(e_1) \text{ és } y_2 = y_1 + s_1 * \cos(e_1) \quad (61)$$

A geocentrumnál lévő szögek:

$$\eta_1 = 0 \quad (62)$$

$$\eta_2 = \arctan(y_2/z_2) \quad (63)$$

Amikor a fénysugár az első rétegből a másodikba lép megtörik, felírhatjuk a Snellius-Descartes-törvényt (10. ábra):

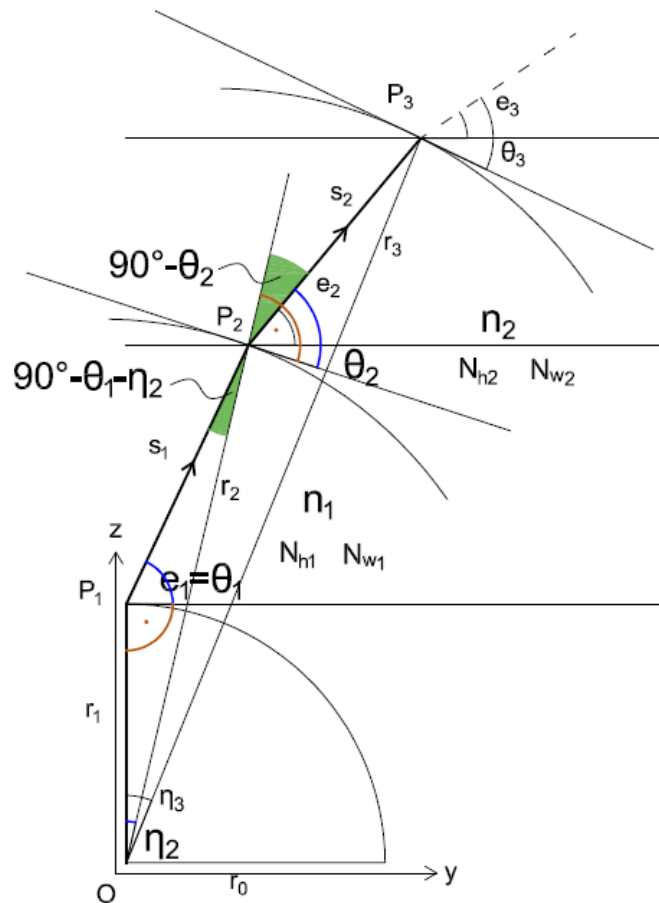
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin(90^\circ - \theta_2)}{\sin(90^\circ - \theta_1 - \eta_2)} \quad (64)$$

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

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{n_1}{n_2} * \cos(\theta_1 + \eta_2)\right) \quad (65)$$

Az e_2 szög pedig a merőleges szárú szögek alapján:

$$e_2 = \theta_2 - \eta_2 \quad (66)$$



10. ábra: A Snellius-Descartes törvény alkalmazása
Boehm és Schuh (2003) alapján

A sugárkövetés innentől analogikusan számítható, a fenti képletek általánosan:

$$s_i = -r_i * \sin\theta_i + \sqrt{r_{i+1}^2 - r_i^2 * \cos^2\theta_i} \quad (67)$$

$$z_{i+1} = z_i + s_i * \sin(e_i) \text{ és } y_{i+1} = y_i + s_i * \cos(e_i) \quad (68)$$

$$\eta_{i+1} = \arctan(y_{i+1}/z_{i+1}) \quad (69)$$

$$\delta_{i+1} = \eta_{i+1} - \eta_i \quad (70)$$

$$\theta_{i+1} = \arccos\left(\frac{n_i}{n_{i+1}} * \cos(\theta_i + \eta_{i+1})\right) \quad (71)$$

$$e_{i+1} = \theta_{i+1} - \eta_{i+1} \quad (72)$$

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:

$$ds_h = \sum_{i=1}^{k-1} s_i * N_{hi} \quad (73)$$

$$ds_w = \sum_{i=1}^{k-1} s_i * N_{wi} \quad (74)$$

A sugár geometriai elhajlása:

$$dgeo = \sum_{i=1}^{k-1} [s_i - \cos(e_i - e_k) * s_i] \quad (75)$$

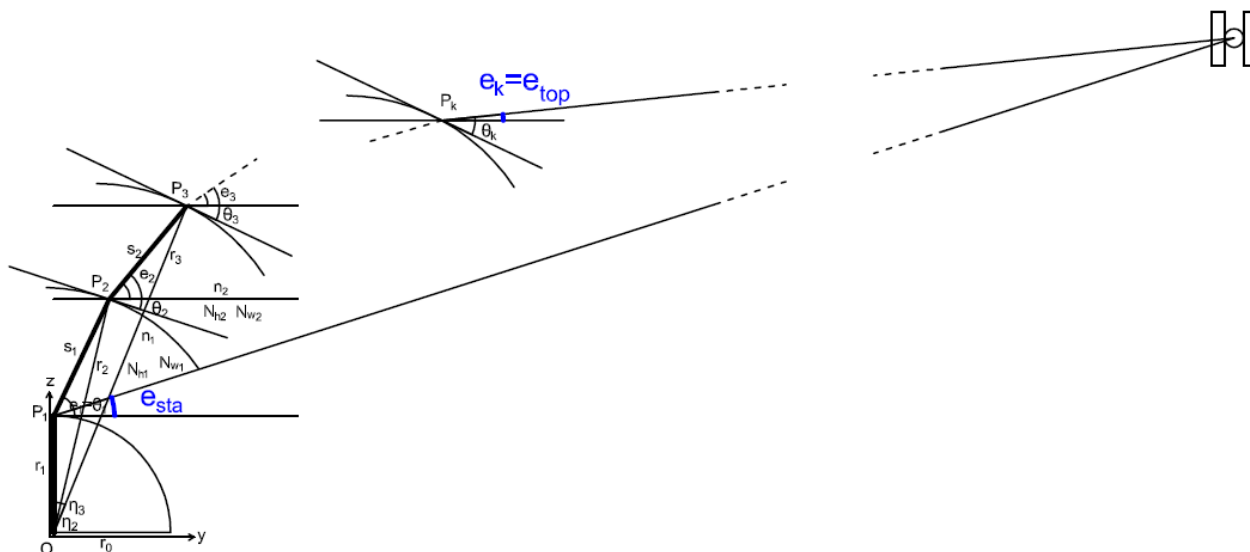
Az alábbiakban összefoglaljuk a sugárkövetéssel meghatározott adatokat (11. ábra):

A sugárkövetéses módszerrel számított adatok	Leírás
dshs	hidrosztatikus késleltetés m-ben
dsws	nedves késleltetés m-ben
dgeos	geometriai sugárelhajlás m-ben
esta	sugárelhajlás nélküli magassági szög radiánban
etop	a sugárelhajlás szöge radiánban

11. ábra: A sugárkövetéses módszerrel számított adatok

Boehm és Schuh (2003) alapján

A 11. ábra utolsó két adatát 12. ábra szerint értelmezzük. Számítjuk a sugárelhajlás hatását 86 km-ig figyelembe véve, a sugárelhajlás szögét (e_{top}). Majd ugyanerre a műholdra kiszámítjuk a felszínről a magassági szöget (e_{sta}), úgy, hogy a sugárelhajlás hatását nem vesszük figyelembe.



12. ábra: A sugárelhajlás vizsgálatához szükséges adatok

Boehm és Schuh (2003) alapján

7. A vizsgált troposféra modellek számítása

A sugárkövetéses módszer a rádiószondás mérések alapján – fent kiegészítve az ISA adatokkal- számítja a troposferikus késleltetés értékeit. Ezzel szemben sok modell úgynevezett vak troposféra modell, amelyek vagy csak a sztenderd atmosféra adatait használják fel vagy empirikus modellek. Az empirikus modellekkel a meteorológiai paraméterek szezonális változásait is figyelembe lehet venni. Ilyenek voltak a feljebb már jellemzett GPT2W és az ESA Galileo modellje; a továbbiakban ezeknek az eredményeivel vetjük össze a sugárkövetésből számított késleltetéseket. Így megvizsgálhatjuk mennyire pontosak a vevőkben alkalmazott troposféra modellek. A vizsgálatokba bevonjuk még a Saastamoinen modellel elért eredményeket is, ez esetben, mint felszíni rádiószondás méréseket használtunk fel, tehát ez most nem vak modell.

Az ESA Galileo modelljének és a GPT2W-nek a számítását már megírt MATLAB scriptekkel végeztük el. *Martellucci és Blarzino (2003) valamint Lagler (2012) alapján.* A modellek számításához a különböző bemeneti paraméterek szükségesek. Az ESA modell bemeneti paramétereit és az azokból származtatott adatokat az alábbiakban foglaltuk össze (13. ábra):

ESA modell bemeneti és származtatott adatai	Leírás
hgt	a vevő tengerszint feletti magassága m-ben
lat	a vevő helyének szélessége fokban
lon	a vevő helyének hosszúsága fokban
elev	magassági szög fokban
doy	az adott nap hányadik az évben január 1-jétől számítva
hod	az adott óra hányadik azon a napon
p _s	teljes légnyomás a felszínen hPa-ban
T _{ms}	a vízpára közepes hőmérséklete a felszín felett K-ben
α_m	közepes hőmérsékleti gradiens K/km-ben
e _s	vízgőz parciális párányomása hPa-ban
λ	vízgőz gradiense
doy	az adott nap hányadik nap az évben január 1-jétől számítva
T _s	levegő hőmérséklete a felszínen K-ben
α	a levegő hőmérsékleti gradiense K/km-ben

13. ábra: Az ESA Galileo troposzféra modelljének bemenő és származtatott paraméterei

Martellucci (2002) és Martellucci és Blarzino (2003)

A scriptek lefuttatása után a továbbiakban az alábbi adatokat használjuk fel (14. ábra):

Az ESA modellből számított adatok	Leírás
esa_hd	hidrosztatikus késleltetés m-ben
esa_wd	nedves késleltetés m-ben

14. ábra: Az ESA Galileo troposzféra modelljéből számított és felhasznált adatok

Martellucci (2002) és Martellucci és Blarzino (2003)

A GPT2W modell bemeneti paramétereit az alábbiakban foglaltuk össze (15. ábra):

GPT2W modell bemeneti adata	Leírás
hell	a vevő ellipszoidi magassága m-ben
dlat	a vevő helyének ellipsziodi szélessége radiánban
dlon	a vevő helyének hosszúsága radiánban
dmjd	módosított Julian dátum
nstat	maximum állomások száma
it	1: statikus az idő 0: változik az idő (éves, féléves periódusok)
p _s	teljes légnyomás a felszínen hPa-ban
e _s	vízgőz parciális párányomása hPa-ban
λ	vízgőz gradiense
T _s	levegő hőmérséklete a felszínen K-ben
α	a levegő hőmérsékleti gradiense K/km-ben

15. ábra: A GPT2W troposzféra modelljének bemenő paraméterei

Lagler (2012)

A modellből számított és a továbbiakban felhasznált adatok (16. ábra):

A GPT2W származtatott paraméterei	Leírás
T _s	levegő hőmérséklete a felszínen K-ben
α	a levegő hőmérsékleti gradiense K/km-ben

16. ábra: A GPT2W troposzféra modelljéből számított és felhasznált adatok

Lagler (2012)

A Saastamoinen modell a meteorológiai állapotathatározók alapján a teljes késleltetés nagyságát adja meg.

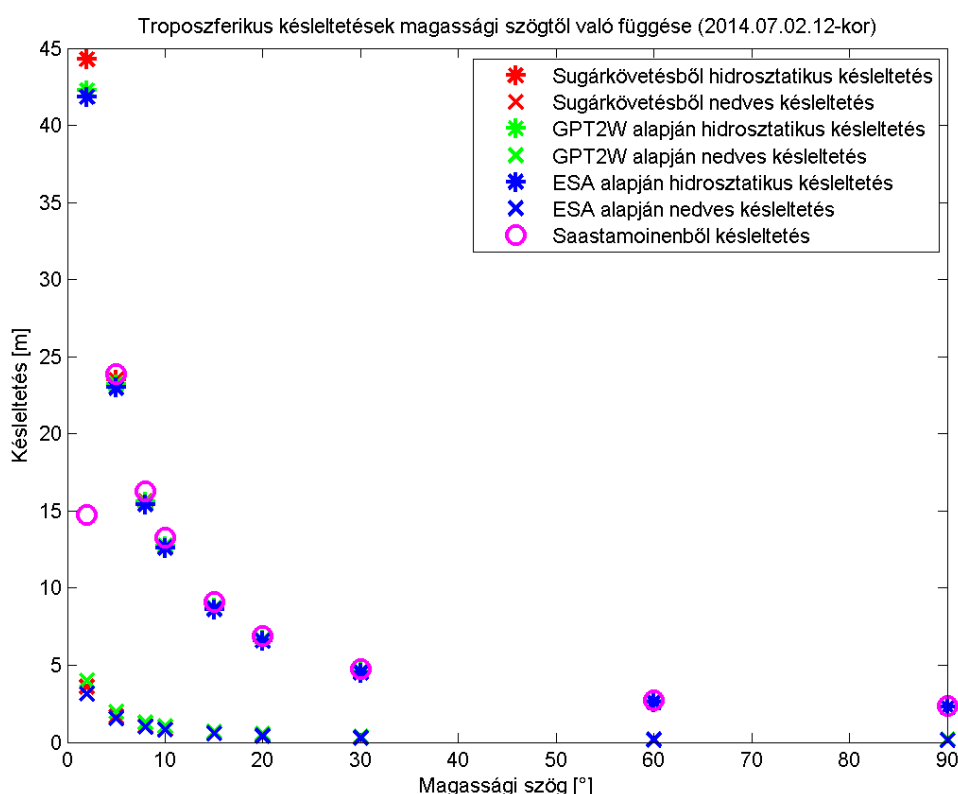
A számításokat 2014. július 1. és 2014. augusztus 31 közötti időszakra végeztük el, napi 2 rádiószonda felbocsájtás fájljait futtatva. Megjegyezzük, hogy 07.03-án csak délben végeztek mérést és 07.18-án pedig a szokásos napi 2 mérés mellett 18-kor is végeztek egyet. Így 124 észlelés adatait használtuk fel, a program a sugárkövetés és a vizsgálandó troposzféra modellek adatainak együttes számítását több mint 6 óra alatt végezte el. Megjegyezzük, hogy a vizsgálandó modellek számítása igényelt sok időt. Több magassági szög - 2°, 5°, 8°, 10°, 15°, 20°, 30°, 60°, és 90° - esetén is kiszámítottuk a különböző jellemzőket.

8. Az eredmények ábrázolása

Mint ahogy a számítást, úgy az eredmények ábrázolását is MATLAB R2014a-val végeztük el. Elemezzük, hogy egy észlelésnek az eredményei hogy alakulnak különböző magassági szögek esetén, majd számítjuk a vizsgált modellek sugárkövetéstől vett eltéréseinek statisztikai jellemzőit. Végül megvizsgáljuk az összes észlelésből kapott teljes késleltetéseket néhány magassági szög függvényében.

8.1. Késleltetések és a sugárelhajlás jellemzőinek egy észlelésre vonatkozó vizsgálata

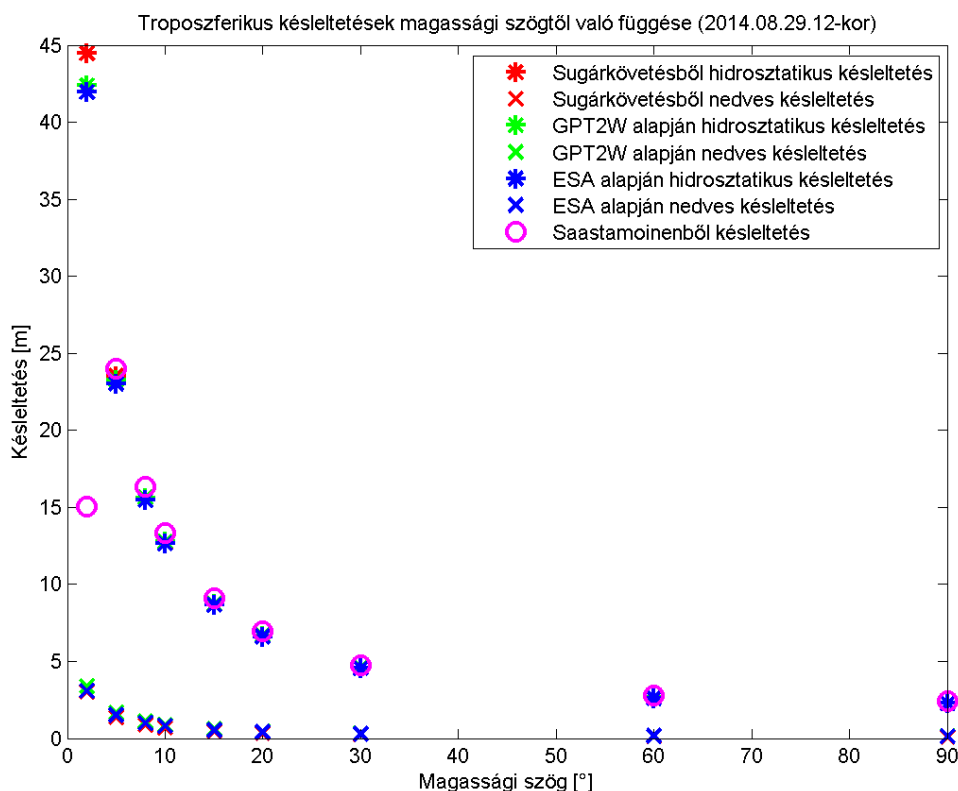
Először megvizsgáltuk, hogy az egyes modellekből számított hidrosztatikus, nedves és teljes késleltetések hogyan függnek a magassági szög nagyságától. Az eredmények a már fentiekben is említettet mutatják, hogy a késleltetés nagysága jelentősen nő a horizonthoz közeledve (17. ábra):



17. ábra: Troposzférikus késleltetések magassági szögtől való függése (2014.07.02. 12-kor)

A 17. ábrán ábrázoltuk az összes késleltetést, amit kiszámítottunk 2014. 07. 02-án 12 óras észlelés esetén. Látható, hogy a hidrosztatikus értékek nagyobbak, mint a nedvesek, körülbelül egy nagyságrend az eltérésük. A magassági szög csökkenésével nőnek a nedves és

a hidrosztatikus késleltetések is a különböző modellek esetén. A Saastamoinen modellnél viszont az látjuk az ábra alapján, hogy az eredmények növekednek 5° -ig, de 2° -nál visszaesik a modellből számított érték. Egy másik észlelésre – 2014.08.29.12 órára - vonatkozó késleltetéseket is megvizsgáltuk (18. ábra), de a Saastamoinen modell eredménye alacsony magassági szög esetén ismét lecsökkent. A többi modell az előbbi tendenciákat mutatta.



18. ábra: Troposzférikus késleltetések magassági szögtől való függése (2014.08.29. 12-kor)

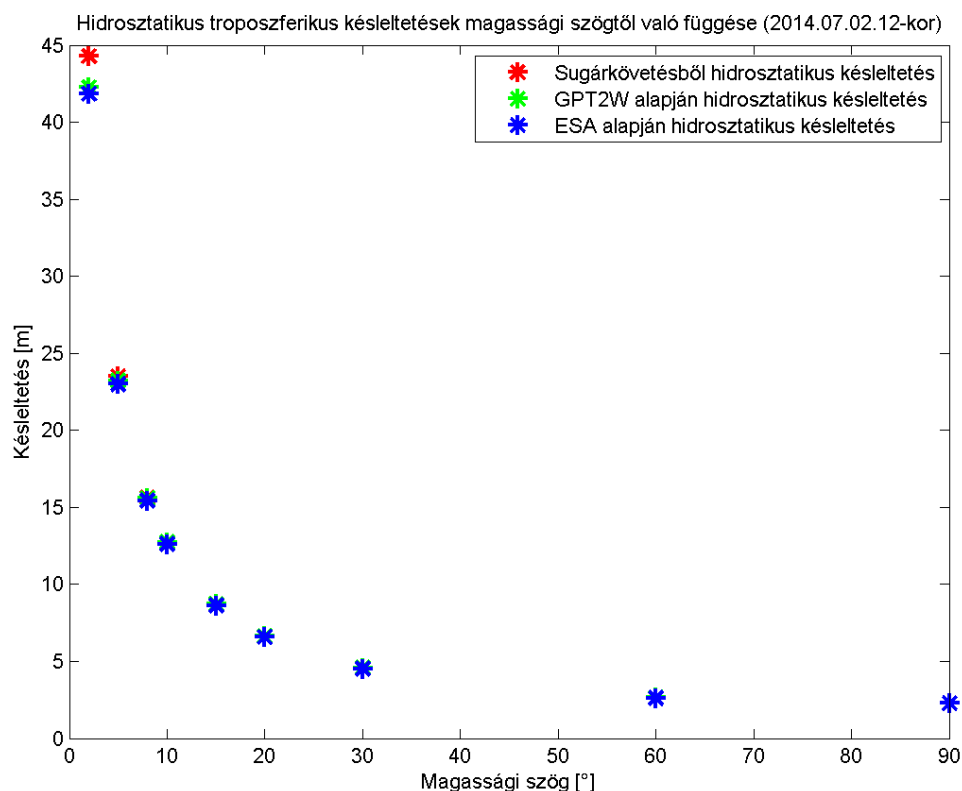
Így megnéztük, hogyan alakulnak pontosabban a késleltetések a Saastamoinen modellnél alacsonyabb magassági szögek esetén (19. ábra):

Magassági szög [°]	Saastamoinen modell késleltetés értéke [m]
5	23,91
3	29,66
2,9	29,53
2,8	29,26
2,5	27,21
2	14,73
1,5	-35,89
1	-291,77

19. ábra: A Saastamoinen modellből kapott késleltetésértékek alacsony magassági szögeknél
2014. 07.02-án 12 órakor

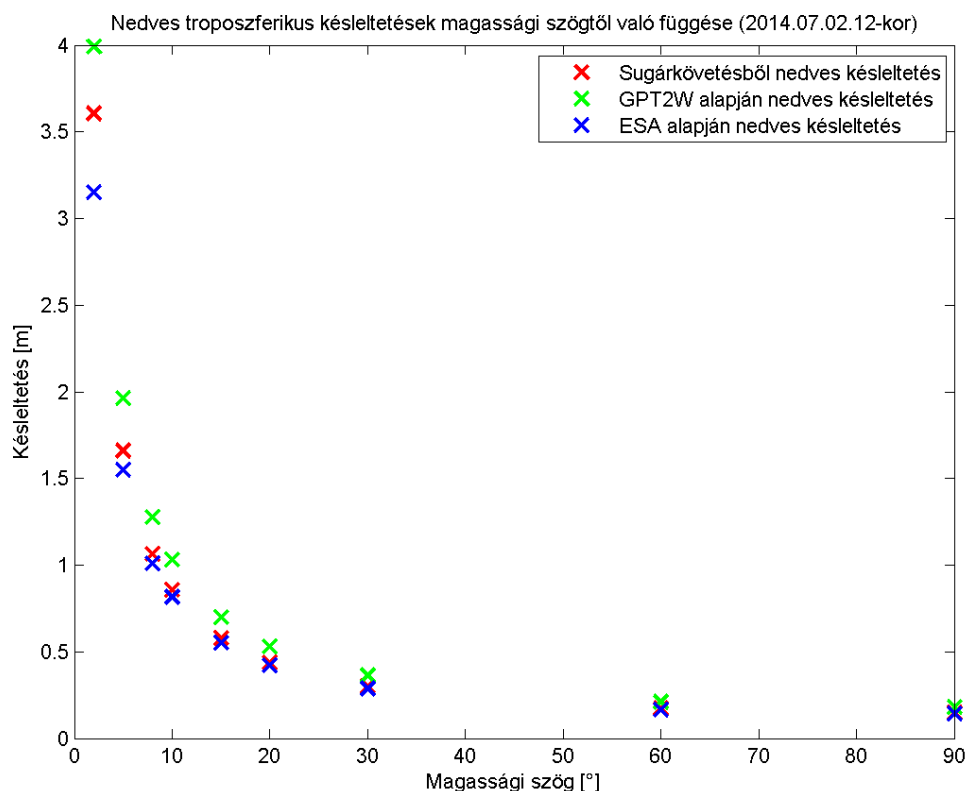
Ezek alapján azt látjuk, hogy 3°-ig emelkednek az értékek, majd utána hirtelen esni kezdenek és egy idő után már negatív számot kapunk. Ennek oka, hogy a (32)-es képletben a $\tan^2 z$ tag nagyobb lesz, mint a $p + \left(\frac{1255}{T} + 0,05\right) * e$, így a zárójeles mennyiségből negatív értéket kapunk. Ezek szerint 3° alatt nem érdemes használnunk ezt a modellt.

A továbbiakban a hidrosztatikus és nedves késleltetéseket külön vizsgáltuk. A 20. ábrán a hidrosztatikus értékeket jelenítettük meg. Azt figyelhetjük meg, hogy a GPT2W és az ESA modell nagyobb magassági szögeknél a sugárkövetéssel körülbelül egyező eredményt ad, viszont 10° alatt már eltérnek az értékek. A modellek különbségeiről viszont nem olvashatunk le elég pontos eredményt.



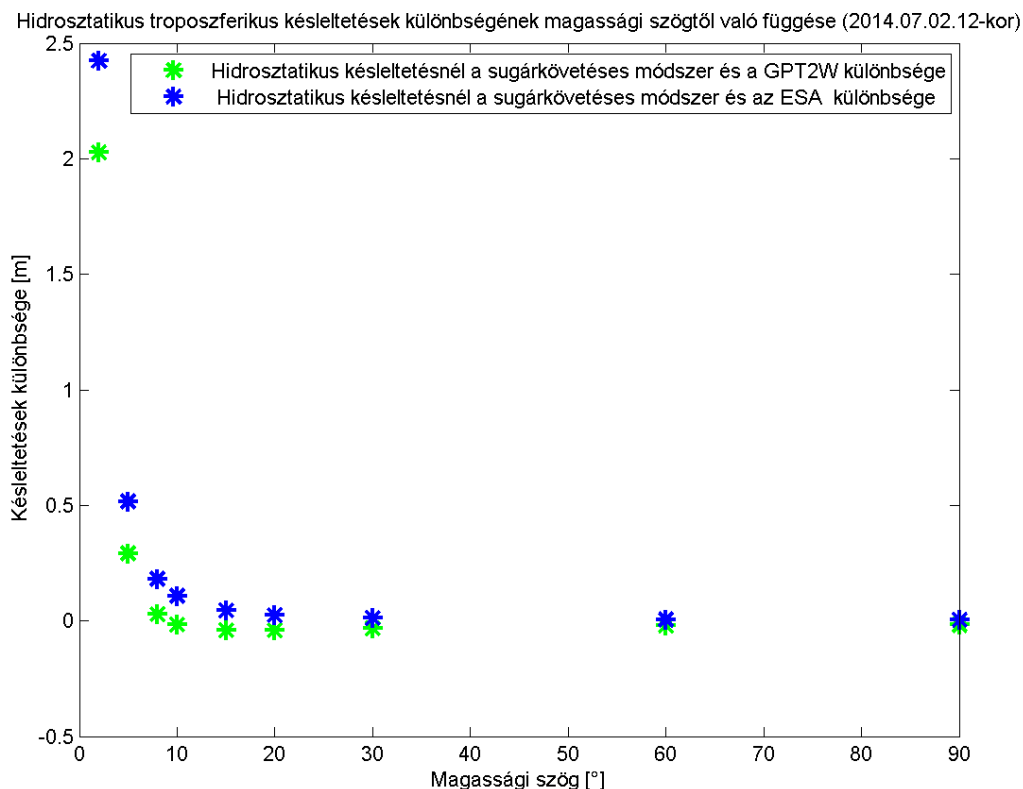
20. ábra: Hidrosztatikus troposzférikus késleltetések magassági szögtől való függése (2014.07.02. 12-kor)

A 21. ábrán a nedves késleltetéseket láthatjuk. A 20-as és 21-es ábrát összevetve jól mutatkozik a nagyságrendbeli a különbség. A nedves értékek viszont a hidrosztatikus eredményekkel ellentétben nagyobb magassági szög esetén is jobban különböznek egymástól. Ennek oka lehet, hogy a nedves rész becslése bizonytalanabb. Azt is feltűnhet, hogy a GPT2W és az ESA modell értékei ellentétes irányban térnek el a sugárkövetés eredményétől. Pontosabb következtetések levonásához tovább vizsgáltuk a hidrosztatikus és nedves késleltetéseket is.



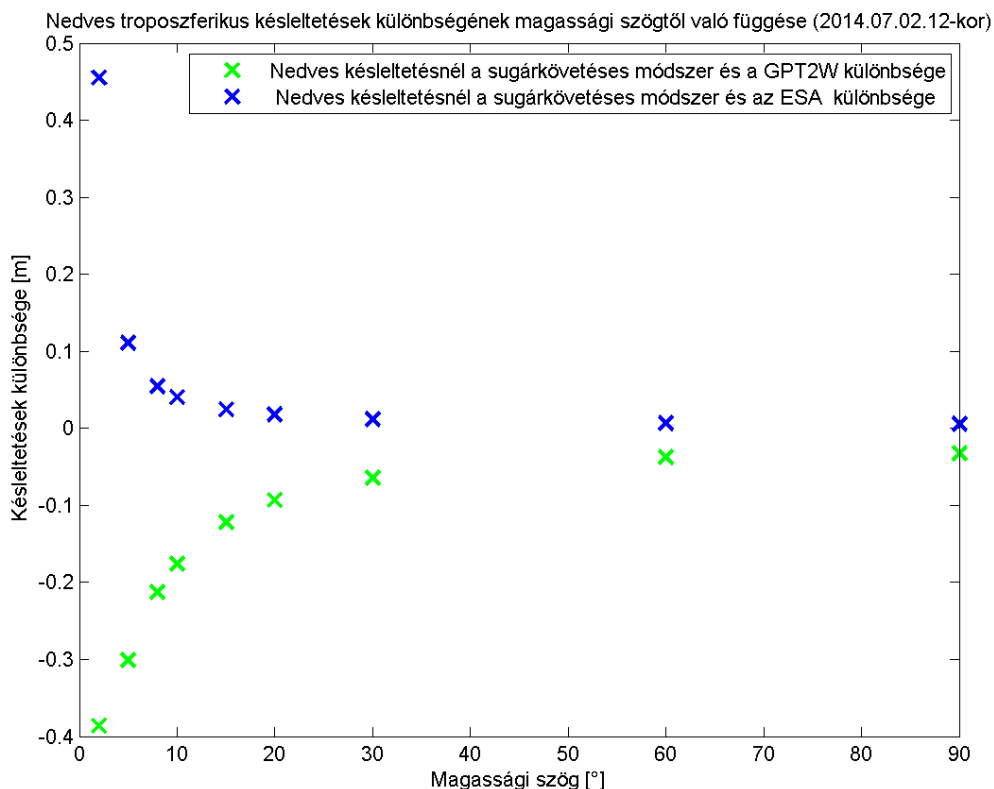
21. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések magassági szögtől való függése (2014.07.02.12-kor)

Előállítottuk a hidrosztatikus és a nedves késleltetések esetén is a referenciamodellnek tekinthető sugárkövetéses modelltől vett eltéréseket a GPT2W és az ESA modell esetén is. A hidrosztatikus különbségekről (22. ábra) már leolvashatjuk, hogy az ESA modell mindig jobban alulbecsüli a sugárkövetéses értékeket, mint a GPT2W. Nagyobb magassági szögeknél elég pontos a GPT2W és az ESA is, 0 körüli az eltérésük a sugárkövetés eredményeitől, de 8°-nál a GPT2W már 0,3 m-rel, míg az ESA már több 0,5 m-rel a különbözik a sugárkövetéstől. 2°-nál ez a GPT2W-nél 2 m fölé, az ESA esetében pedig majdnem 2,5 m-re nő. Százalékosan ez körülbelül a GPT2W-nél 95%-os, az ESA-nál 94 %-os azonosságot jelent a sugárkövetés eredményével 2° esetén.



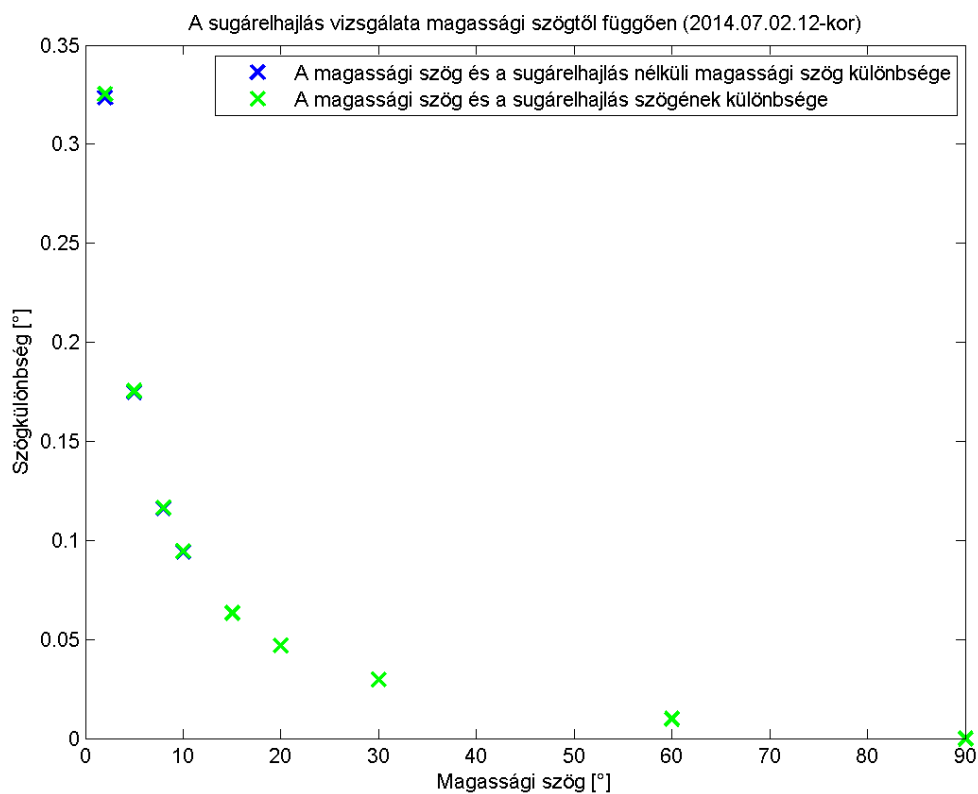
22. ábra: Hidrostatikus troposzférikus késleltetések különbségének magassági szögtől való függése (2014.07.02.12-kor)

A sugárkövetés és a GPT2W valamint sugárkövetés és az ESA nedves különbségértékei (23. ábra) jól mutatják, hogy az ESA modell mindig túlbecsüli, míg a GPT2W sorozatosan alulbecsüli a sugárkövetés eredményeit. Az ESA modell viszont a 2° -os magassági szög kivételével kevésbé becsül alul, mint amennyire a GPT2W túl. A GPT2W hozzávetőleg 0,38 m-rel, az ESA megközelítően 0,46 m-rel becsli tévesen a 2° -nál a 3,6 m-es sugárkövetés eredményét. A GPT2W 111%-át becsli, az ESA 87 %-át a referenciamodell eredményének. Viszont 5° -nál már 0,3 m-rel tér el a GPT2W a referenciamodell 1,7 m-es értékétől, az ESA viszont csak 0,12 m-rel. Ami 17%-os túlbecslés a GPT2W-nél és csak 7 % körüli alulbecslés az ESA-nál. Azt viszont fontos megjegyeznünk, hogy itt csak egy észlelést vizsgálunk, ezek alapján nem vonhatunk le messzemenő következtetéseket.



23. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések különbségének magassági szögtől való függése (2014.07.02.12-kor)

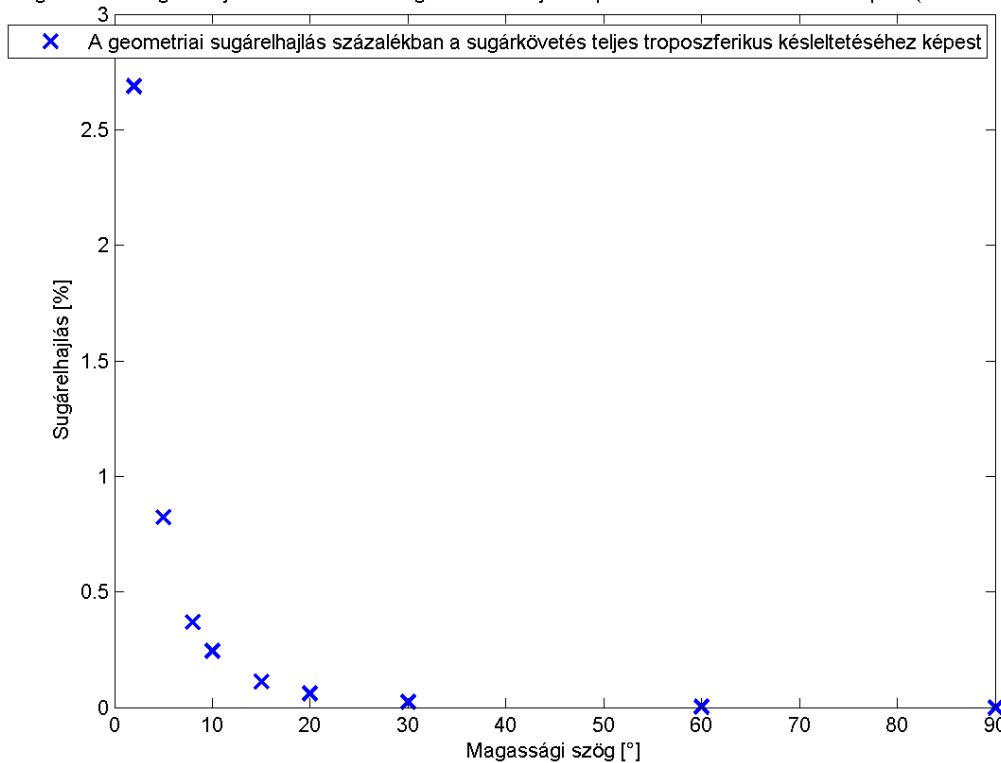
A késleltetéseken kívül egyéb mennyiségek változásait is vizsgáltuk. A továbbiakban előállítottuk a magassági szög és a sugárhajlás valamint a magassági szög és a műholdra mutató sugárelhajlás nélküli szög különbségét (24. ábra). Ezek, mivel a műhold 20200 km távolságra van, a sugárelhajlást pedig csak 86 km-ig vesszük figyelembe hasonló nagyságúak lettek. Láthatjuk, hogy a magassági szög csökkenésével nő a számított szögekülönbség, tehát a magassági szög csökkenésével csökken a sugárelhajlás és a sugárelhajlás nélküli szög is kis mértékben. A sugárelhajlást kihasználva kis mértékben a horizont alá is mérhetünk.



24. ábra: A sugárelhajlás vizsgálata magassági szögtől függően (2014.07.02.12-kor)

A geometriai sugárelhajlást sokszor figyelmen kívül hagyják, de kis magassági szögeknél már érdemes foglalkozni vele (25. ábra). A teljes sugárkövetéssel számolt troposzférikus késleltetésnek majdnem 3%-át is eléri 2°-nál, ami 48 m-es értékkel számolva majdnem 1,5 m.

A geometriai sugárelhajlás százalékban a sugárkövetés teljes troposzférikus késleltetéséhez képest (2014.07.02.12-kor)

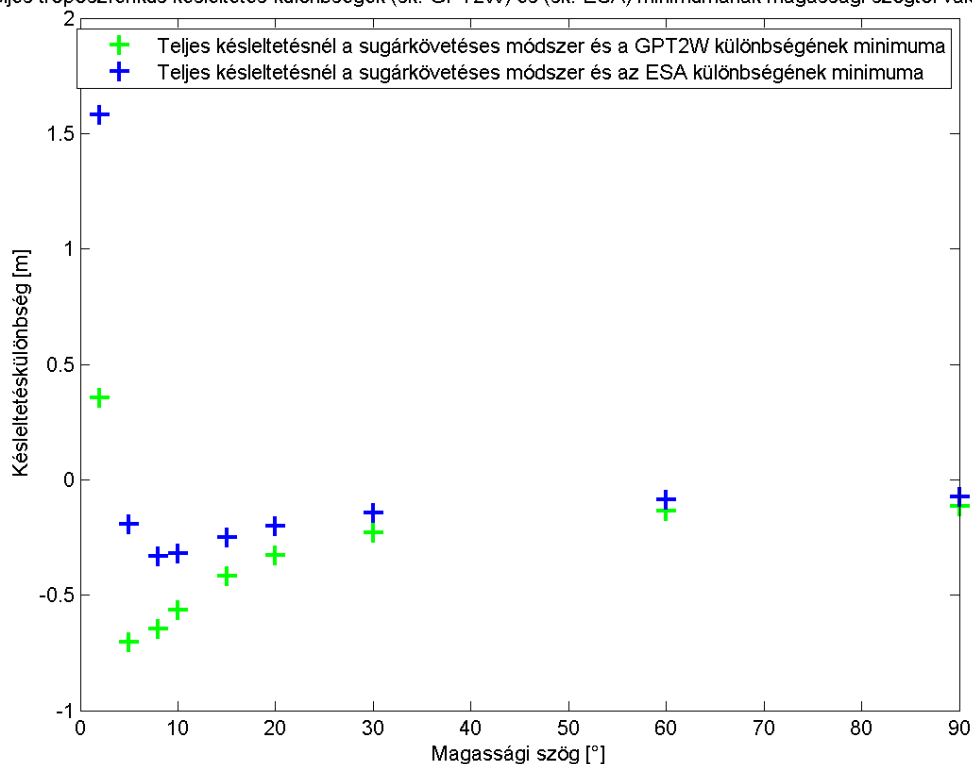


25. ábra: A geometriai sugárelhajlás százalékban a sugárkövetés teljes troposzférikus késleltetéséhez képest (2014.07.02.12-kor)

8.2. A vizsgált modellek referenciamodelltől való eltérését leíró statisztikai jellemzők elemzése

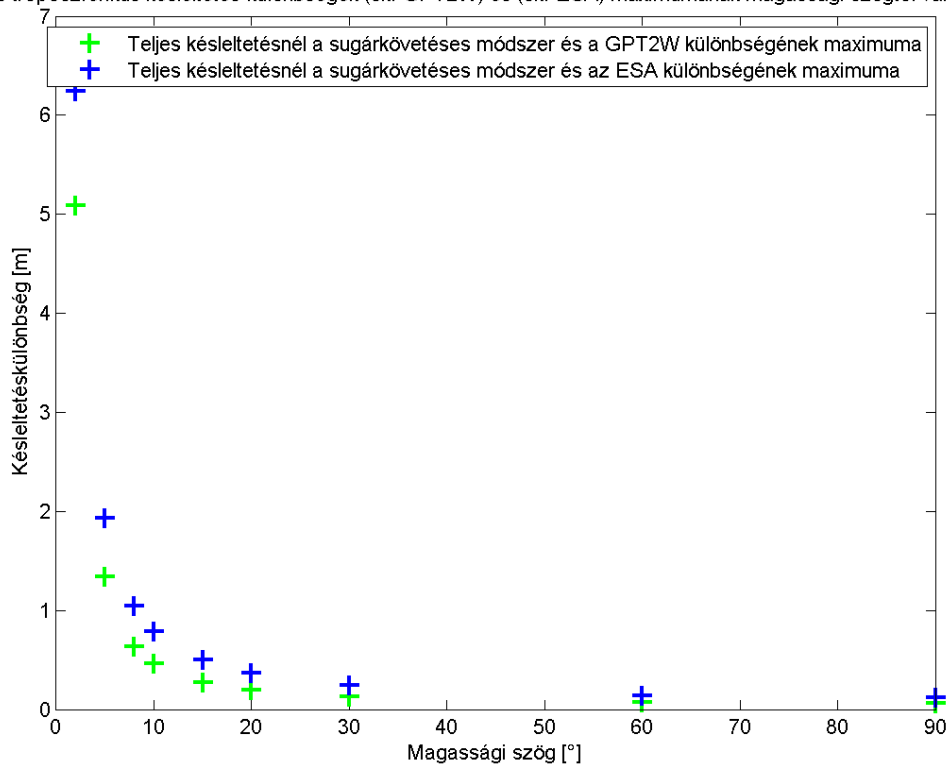
Mivel egy-egy nap vizsgálata alapján nem vonhatunk le megalapozott következtetéseket kiszámítottuk és ábráztuk a GPT2W és az ESA teljes troposzférikus késleltetéseinek a referencia modell teljes késleltetésétől való eltérését kifejező statisztikai jellemzőket. Ezeket a különböző magassági szögekre külön kiszámítottuk, hogy a nagyságrendek miatti különbségek ne rontsák el az eredményeket. A minimumok (26. ábra) negatív értékei azt jelentik, hogy a 2°-os magassági szög kivételével mindig előfordul, hogy túlbecsülik a modellt, a GPT2W jobban, mint az ESA. A minimumok -0,75 és 1,6 m között mozognak. A modellek különbségének maximuma (27. ábra) pozitív, azaz a sugárkövetéses modell sosem kerül teljes egészében a GPT2W vagy az ESA eredményei alá. A maximumok már jelentősebbek, 0,1 és 7 m közé esnek. Azt is megfigyelhetjük, hogy magassági szög növekedésével a GPT2W és az ESA sugárkövetéstől vett különbségeinek szélsőértékei egyre jobban eltérnek egymástól.

Teljes troposzférikus késleltetés-különbségek (sk.-GPT2W) és (sk.-ESA) minimumának magassági szögtől való függése



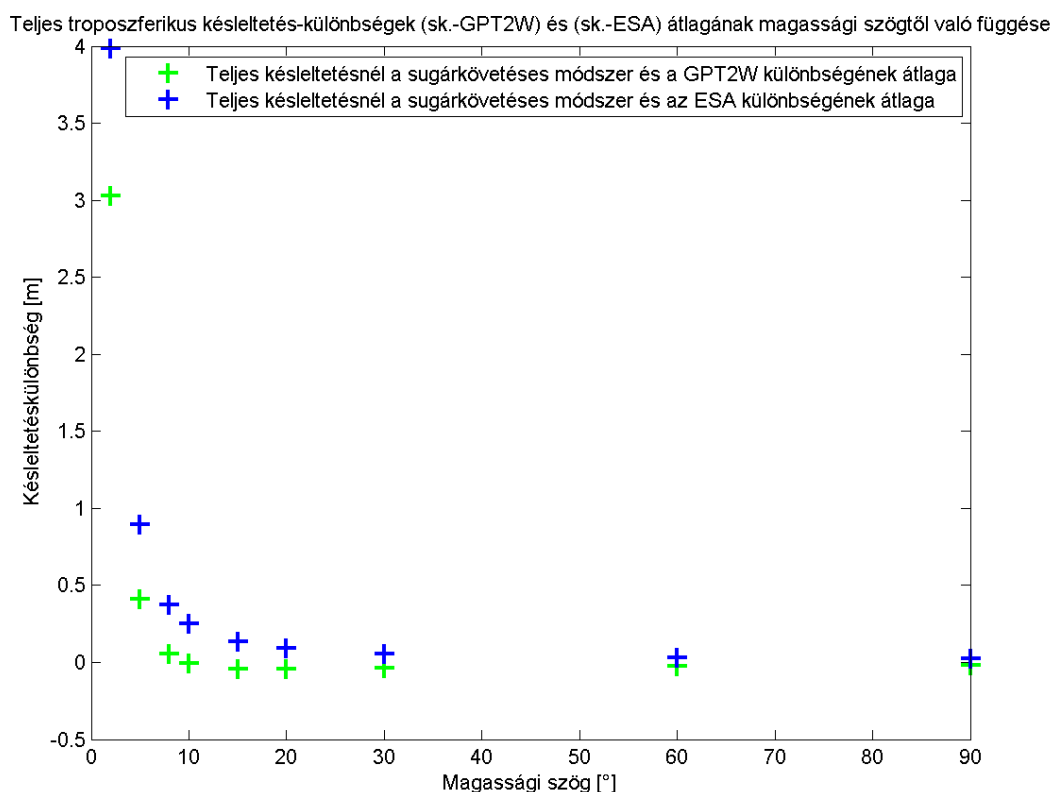
26. ábra: Teljes troposzférikus késleltetés-különbségek (sk.-GPT2W) és (sk.-ESA) minimumának magassági szögtől való függése

Teljes troposzférikus késleltetés-különbségek (sk.-GPT2W) és (sk.-ESA) maximumának magassági szögtől való függése



27. ábra: Teljes troposzférikus késleltetés-különbségek (sk.-GPT2W) és (sk.-ESA) maximumának magassági szögtől való függése

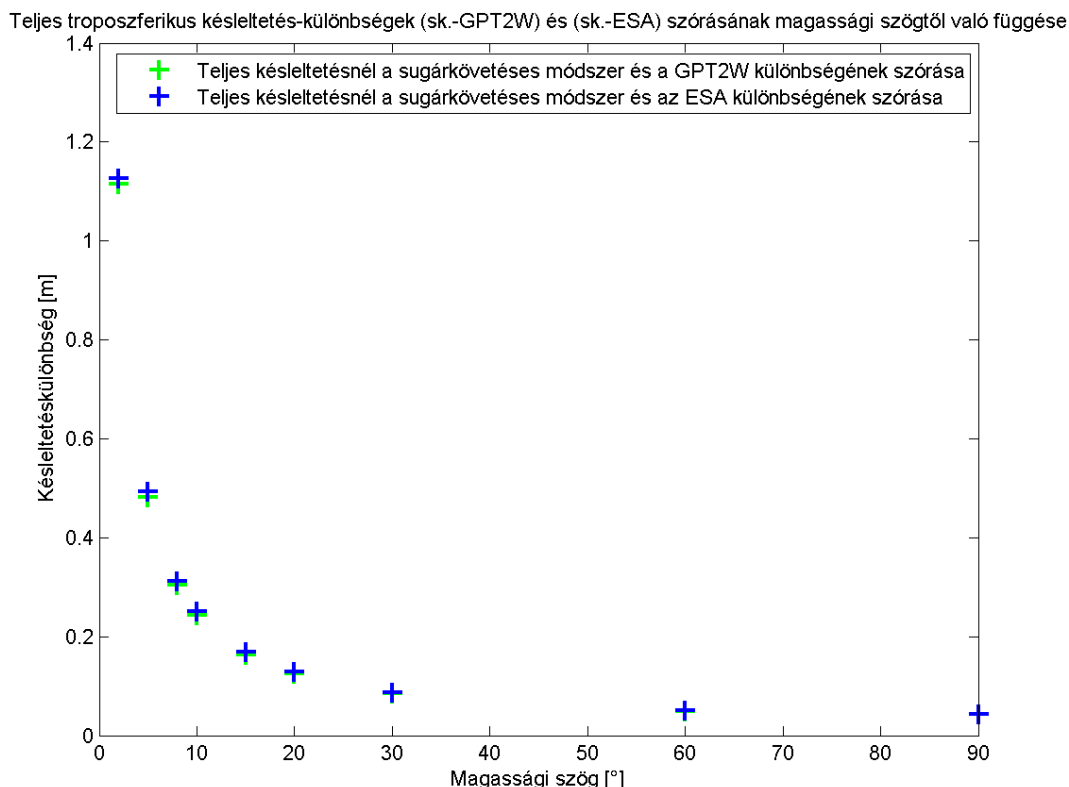
A egyes modellek referenciamodelltől vett különbségének átlagértékei (28. ábra) -0,1 és 0,4 m közöttiek 8° és 90° között, ami azt jelenti, hogy nagyobb magassági szögeknél jól közelítik a sugárkövetés eredményeit a vizsgált modellek. Azt is megfigyelhetjük, hogy a GPT2W-vel számolt különbségek átlagértékei 8° -ig 0 körül ingadoznak és 8° -felett is jóval kevésbé térnek el a sugárkövetéses módszerrel számítottaktól. Az átlagértékek azt mutatják, hogy a GPT2W minden magassági szögnél jobban közelíti a sugárkövetésből számított késleltetéseket, mint az ESA.



28. ábra: Teljes troposzférikus késleltetés-különbségek (sk.-GPT2W) és (sk.-ESA) átlagának magassági szögtől való függése

A két modell referenciamodelltől vett eltéréseinek szórása (29. ábra) nagyon hasonló értékű és az eredmények végig ugyanolyan módon változnak. Nagyon kicsit a GPT2W modell szórásai a kisebbek.

Azt is meg kell jegyeznünk, hogy az összes statisztikai jellemző 10° -os magassági szögtől jelentősebb értékeket kezd felvenni, az alacsonyabb magassági szögek esetén már rosszabbul közelítenek.

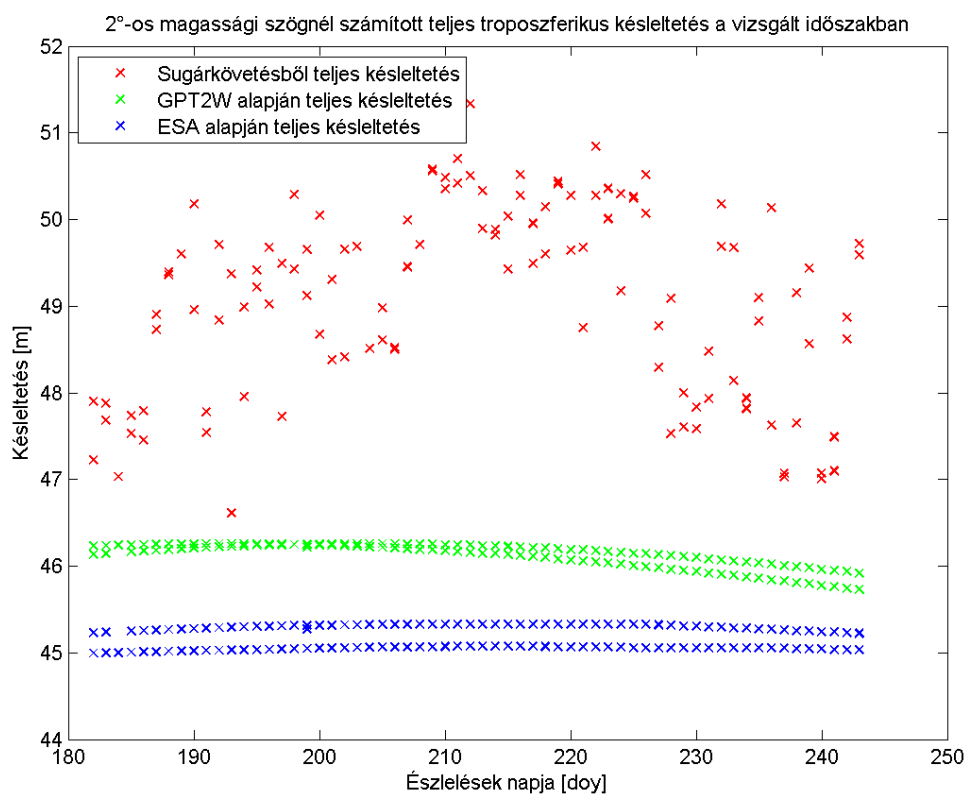


29. ábra: Teljes troposzférikus késleltetés-különbségek (sk.-GPT2W) és (sk.-ESA) szórásának magassági szögtől való függése

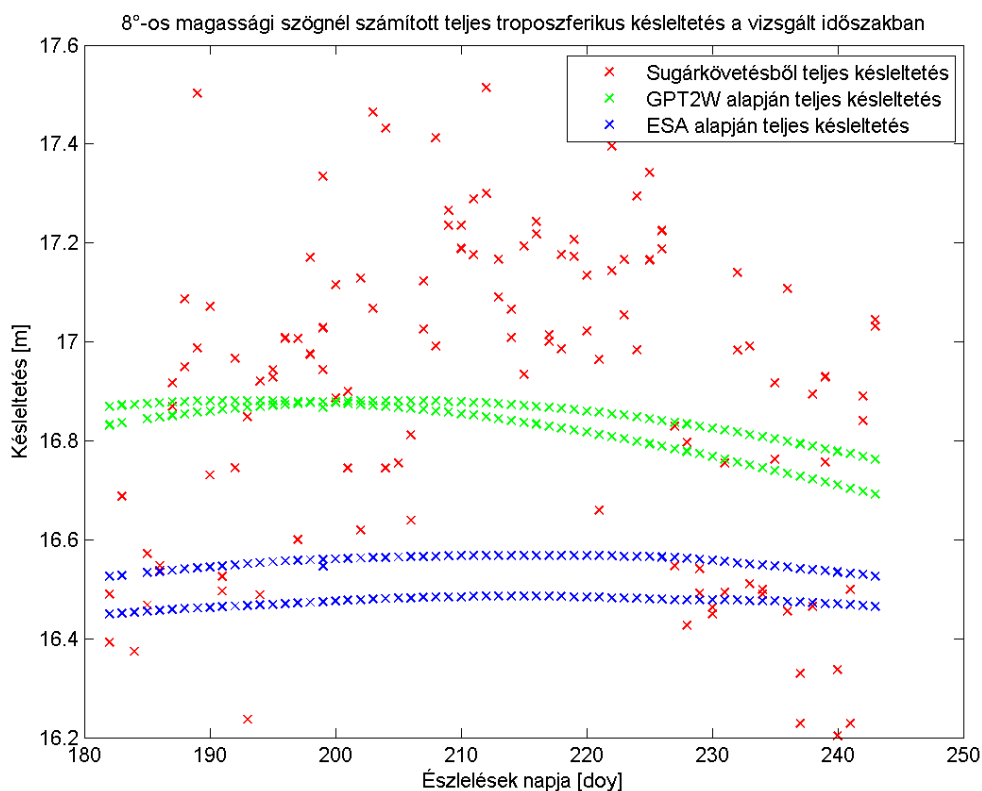
8.3. A vizsgált időszak észleléseinek teljes késleltetései különböző magassági szögek esetén

A következőkben ábrázoltuk a vizsgált időszakban végzett észlelésekből nyert sugárkövetéssel számított teljes troposzférikus késleltetéseket illetve a GPT2W valamint az ESA eredményeit néhány magassági szögre vonatkozóan (30-33. ábrák). Az elemzéseket 2° , 8° , 20° és 90° esetén végeztük el. Az észlelések napját doy-ban adtuk meg, ami meghatározza, hogy az adott nap hányadik az évben január 1-től számítva. Itt is láthatjuk az ábrákon a késleltetések nagyságának változását a magassági szöggel valamint azt is megfigyelhetjük, hogy a magassági szög növekedésével egyre közelebb kerülnek egymáshoz a különböző modellekből számított eredmények. 2° -nál a modellek alulbecslik a sugárkövetés eredményét, de ahogy nő a magassági szög egyre jobb becslést ad a GPT2W és az ESA. Azt is láthatjuk, hogy kisebb magassági szögek mellett a GPT2W jobban közelíti a sugárkövetés értékeit, mint az ESA. A referenciamodellnél megfigyelhetünk egy emelkedő majd csökkenő tendenciát. A GPT2W és az ESA késleltetései kettő, a széleinél kicsit görbülő egyenest rajzolnak ki, a napi 2 észlelés alapján. A GPT2W eredményei keresztezik egymást, az ESA 2 közel párhuzamos

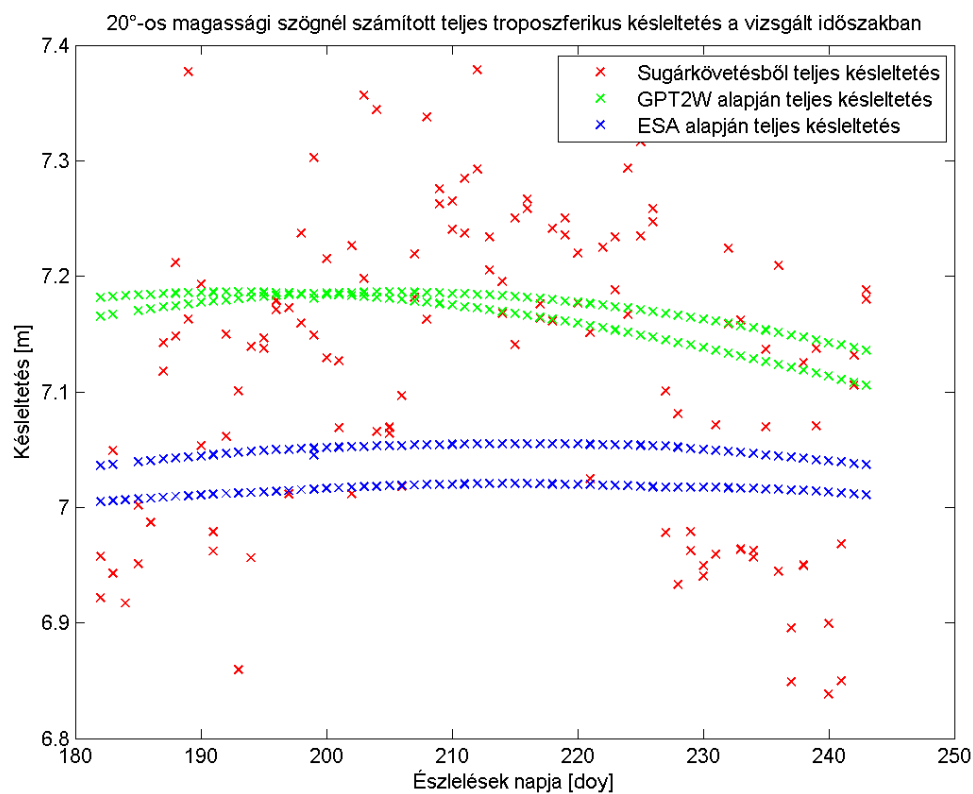
adatsort mutat. Most egy két hónapos adatsort vizsgáltunk, de nagyobb időintervallumon valószínűleg kimutatható lett volna a GPT2W és az ESA szezonális változása.



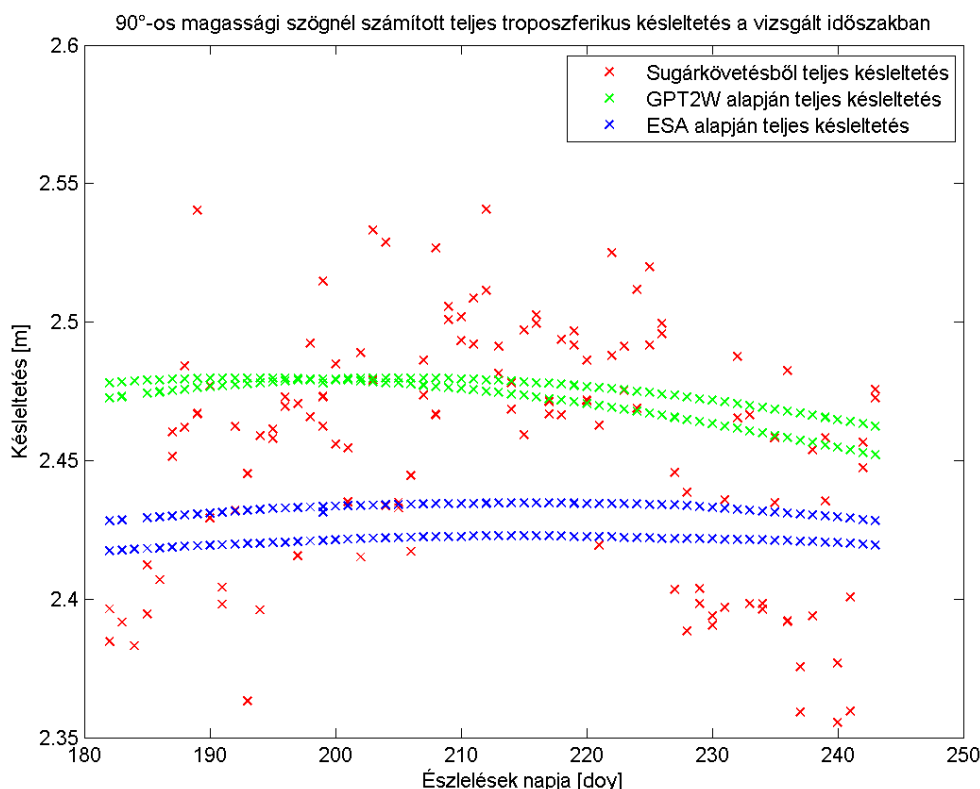
30. ábra: 2°-os magassági szögnél számított teljes troposzférikus késleltetés a vizsgált időszakban



31. ábra: 8°-os magassági szögnél számított teljes troposzférikus késleltetés a vizsgált időszakban



32. ábra: 20°-os magassági szögnél számított teljes troposzférikus késleltetés a vizsgált időszakban



33. ábra: 90°-os magassági szögnél számított teljes troposzférikus késleltetés a vizsgált időszakban

9. Összegzés

Ismertettük a téma megértéséhez elengedhetetlen fogalmakat, jelenségeket és a számításokhoz szükséges képleteket. Majd MATLAB 2014Ra-val elvégeztük a sugárkövetés számításait. Ehhez rádiószondás fájlokat és magasan ISA adatokat is felhasználtunk. 2014.07.01. és 2014.08.31. közötti időszak rádiószondás észleléseit vontuk be a vizsgálatokba, különböző magassági szögekre számítva a jellemzőket: 2°, 5°, 8°, 10°, 15°, 20°, 30°, 60°, és 90°.

Egy észlelésre vonatkozó vizsgálatokkal kimutattuk, hogy az eredmények függnek a magassági szögtől. Megfigyeltük a hidrosztatikus és a nedves késleltetések nagyságrendbeli eltérését, valamint a vizsgált modellek különbözőségét is. A hidrosztatikus késleltetések adják a nagyobb részét a késleltetésnek, ami pontosabban megadható a vizsgált modellekkel, mint az átlagosan tízed akkora nedves értékek. 10°-os magassági szögtől az alacsonyabb szögek felé jelentősen megnőnek a késleltetések, a vizsgált modellek egyre pontatlanabb eredményt adnak a referenciamodellhez képest. A hidrosztatikus késleltetésnél a GPT2W 95 % pontosan, míg az ESA 94 %-os eredménnyel becsülte az értékeket. A nedves késleltetések vizsgálatánál a GPT2W 2°-nál elég jól közelít, de 5°-nál már 17%-kal túlbecsli a referenciamodell, míg az

ESA 5°-nál csak 7%-kal becsli alul a sugárkövetés eredményeit. A Saastamoinen modellről kiderült, hogy 3° alatt téves eredményt ad. Vizsgáltuk a sugárelhajlás jellemzőit is, a sugárelhajlás szögének és a sugárelhajlás nélküli szögnek a magassági szögtől való eltérését, amik hasonló eredményt adtak. Valamint kimutattuk, hogy alacsony magassági szögeknél a geometria sugárelhajlás is jelentős lehet, a teljes késleltetés majdnem 3%-át is elérheti. Nagyon fontos, hogy egy fájl alapján nem vonhattunk le megalapozott következtetéseket, így további vizsgálatokat végeztünk.

Kiszámítottuk *a vizsgált modellek referenciamodelltől vett eltéréseinek statisztikai jellemzőit*: a minimumot, a maximumot, az átlagot és a szórást. Ezt a különböző magassági szögekre külön-külön végeztük el, hogy a nagyságrendek különbözősége ne rontsa el az eredményeket. Az átlagértékek alapján megállapíthatjuk, hogy a GPT2W pontosabban becsüli a késleltetések értékeit, mint az ESA modell. Ettől függetlenül mind a 4 statisztikai jellemző 10°-tól az alacsonyabb szögek felé egyre nagyobb értékeket vesz fel, mindkét vizsgált modell egyre rosszabbul adja meg a késleltetéseket az alacsonyabb magassági szögeknél.

Végül *elemeztük a vizsgált időszak összes észleléséből számított teljes késleltetés nagyságát 4 magassági szögre*: 2°-ra, 8°-ra, 20°-ra és 90°-ra. Itt is láthatjuk, hogy a magassági szög csökkenésével egyre rosszabbak a vizsgált modellek becslései. Azt is megfigyelhetjük, hogy kisebb magassági szögek mellett a GPT2W jobban közelíti a referenciamodell értékeit, mint az ESA. A sugárkövetéses modell növekvő majd csökkenő tendenciát mutat, ezzel szemben a GPT2W és az ESA adatai 2-2 enyhén hajlott vonalat, szinte egyenest írnak le a napi két észlelés alapján. A vizsgált időszak rövidege miatt most nem jelentkeztek a szezonális változások, de hosszabb időszaknál biztosan kimutathatók lennének.

Összefoglalva a GPT2W és az ESA is jól közelíti a sugárkövetés eredményeit nagyobb magassági szögeknél, de alacsonyabbaknál már érdekesebb a sugárkövetéssel számolni a pontosabb eredmény érdekében. Valamint a GPT2W és az ESA modellt összehasonlítva a GPT2W-val jobb értékeket kapunk.

10. 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.

11. Ábrajegyzék

1. ábra: A Föld körüli térség vázlatos szerkezete.....	5
2. ábra: A határréteg változása	6
3. ábra: Vaisala RS92-SGP rádiószonda	16
4. ábra: A ballonhoz erősítik a rádiószondát és a szögletvisszaverőt.....	17
5. ábra: Egy FSL kiterjesztésű rádiószonda méréseket tartalmazó fájl.....	19
6. ábra: Egy FSL kiterjesztésű rádiószonda méréseket magában foglaló fájl tartalmának értelmezése	19
7. ábra: Az ISA rétegei és azok jellemzői	22
8. ábra: A magasság sűrítése	24
9. ábra: A sugárkövetés	26
10. ábra: A Snellius-Descartes törvény alkalmazása	28
11. ábra: A sugárkövetéses módszerrel számított adatok	29
12. ábra: A sugárelhajlás vizsgálatához szükséges adatok.....	30
13. ábra: Az ESA Galileo troposzféra modelljének bemenő és származtatott paraméterei	31
14. ábra: Az ESA Galileo troposzféra modelljéből számított és felhasznált adatok.....	31
15. ábra: A GPT2W troposzféra modelljének bemenő paraméterei	32
16. ábra: A GPT2W troposzféra modelljéből számított és felhasznált adatok.....	32
17. ábra: Troposzférikus késleltetések magassági szögtől való függése (2014.07.02. 12-kor)	33
18. ábra: Troposzférikus késleltetések magassági szögtől való függése (2014.08.29. 12-kor)	34
19. ábra: A Saastamoinen modellből kapott késleltetésértékek alacsony magassági szögeknél 2014. 07.02-án 12 órakor	35
20. ábra: Hidrosztatikus troposzférikus késleltetések magassági szögtől való függése (2014.07.02. 12-kor).....	36
21. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések magassági szögtől való függése (2014.07.02.12-kor)	37
22. ábra: Hidrosztatikus troposzférikus késleltetések különbségének magassági szögtől való függése (2014.07.02.12-kor)	38
23. ábra: Nedves troposzférikus késleltetések különbségének magassági szögtől való függése (2014.07.02.12-kor).....	39
24. ábra: A sugárelhajlás vizsgálata magassági szögtől függően (2014.07.02.12-kor)	40

25. ábra: A geometriai sugárelhajlás százalékban a sugárkövetés teljes troposzférikus késleltetéséhez képest (2014.07.02.12-kor)	41
26. ábra: Teljes troposzférikus késleltetés-különbségek (sk.-GPT2W) és (sk.-ESA) minimumának magassági szögtől való függése	42
27. ábra: Teljes troposzférikus késleltetés-különbségek (sk.-GPT2W) és (sk.-ESA) maximumának magassági szögtől való függése	42
28. ábra: Teljes troposzférikus késleltetés-különbségek (sk.-GPT2W) és (sk.-ESA) átlagának magassági szögtől való függése	43
29. ábra: Teljes troposzférikus késleltetés-különbségek (sk.-GPT2W) és (sk.-ESA) szórásának magassági szögtől való függése	44
30. ábra: 2°-os magassági szögnél számított teljes troposzférikus késleltetés a vizsgált időszakban	45
31. ábra: 8°-os magassági szögnél számított teljes troposzférikus késleltetés a vizsgált időszakban	46
32. ábra: 20°-os magassági szögnél számított teljes troposzférikus késleltetés a vizsgált időszakban	46
33. ábra: 90°-os magassági szögnél számított teljes troposzférikus késleltetés a vizsgált időszakban	47

12. Mellékletjegyzék

1. melléklet: Fájlbeolvasás (raobs_import.m)	53
2. melléklet: Az ISA adatok bevonása a számításba (isa_data.m)	54
3. melléklet: A sugárkövetés számításához szükséges interpolációk (interpolation.m)	55
4. melléklet: A sugárkövetés számítása (calcraytracing.m)	56
5. melléklet: Késleltetések számítása a különböző modellekből (delays.m)	58
6. melléklet: Automatizálás, eredmények ábrázolása (slant_raobs.m)	59

13. Mellékletek

1. melléklet: Fájlbeolvasás (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
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(N
        UMDATA,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

```

2. melléklet: Az ISA adatok bevonása a számításba (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));
        UPPERDATAACUT=UPPERDATA([i:UPPERDATAROW],:);
        STATUS=1;
    end
end

DATAS=[METDATA;UPPERDATAACUT];

end

```

3. 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

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

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

```

```

DATASSIZE=size(DATAS);
DATASROW=DATASSIZE(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

```

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

%% 3. RAYTRACING

```
function [dsht dswh dgeos esta etop]=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=degtorad(lat); %Station's latitude in radian
la=degtorad(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+HEIGHTICUT;
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)));
    e(k+1)=THETArad(k+1)-ETArad(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;
    dgeo(k)=(s(k)-cos(e(k))-e(RTRDATAROW))*s(k);
end

```

```

dshs=sum(dsh);
dsws=sum(dsw);
dgeos=sum(dgeo);

```

% Computing the initial elevation angle of the GPS Satellite

```

sf=-r(RTRDATAROW).*sin(THETArad(RTRDATAROW))+sqrt((R+20200000).*(R+20200000)-
r(RTRDATAROW).*r(RTRDATAROW)*cos(THETArad(RTRDATAROW))*cos(THETArad(RTR
DATAROW)));
zsat=z(RTRDATAROW)+sf*sin(e(RTRDATAROW));
ysat=y(RTRDATAROW)+sf*cos(e(RTRDATAROW));
esta=atan((zsat-z(1))/(ysat-y(1)));
etop=e(RTRDATAROW);

end

```

5. melléklet: Késleltetések számítása a különböző modellekből (delays.m)

```

function [TROPDELAY DATE]=delays(filename)

[METDATA STATION DATE]=raobs_import(filename);
lat=STATION(1);
lon=STATION(2);
DATAS=isa_data(METDATA);
[HEIGHTICUT RTRDATA]=interpolation(DATAS);
e1deg=[2,5,8,10,15,20,30,60,90];
NUMDATA=0;
for i=1:9
    [dshs dsws dgeos,esta,etop]=calcraytracing(RTRDATA, HEIGHTICUT, e1deg(i), lon, lat);

```

```

NUMDATA=NUMDATA+1;
TROPDELAY(NUMDATA,1)=i;
TROPDELAY(NUMDATA,2)=e1deg(i);
TROPDELAY(NUMDATA,3)=dshs;
TROPDELAY(NUMDATA,4)=dsws;
TROPDELAY(NUMDATA,5)=dgeos;
TROPDELAY(NUMDATA,6)=esta;
TROPDELAY(NUMDATA,7)=etop;
dmjd= julday([DATE(3),DATE(2),DATE(1),DATE(4)], 'MJD');
dlat=deg2rad(STATION(1));
dlon=deg2rad(STATION(2));

% Computing the slant delays from GPT2W
[p,T,dT,Tm,e,ah,aw,lambda,undu] = gpt2_1w (dmjd,dlat,dlon,STATION(3),1,0);
hell=STATION(3)-undu;
[p,T,dT,Tm,e,ah,aw,lambda,undu] = gpt2_1w (dmjd,dlat,dlon,hell,1,0);
[zhd] = saasthyd(p,dlat,hell);
[zwd] = asknewet(e,Tm,lambda);
[mfh,mfw] = vmf1_ht(ah,aw,dmjd,dlat,hell,deg2rad((90-e1deg(i))));
SHD_GPT2W=zhd*mfh;
SWD_GPT2W=zwd*mfw;
TROPDELAY(NUMDATA,8)=SHD_GPT2W;
TROPDELAY(NUMDATA,9)=SWD_GPT2W;

% Computing the slant delays from ESA
doy=dmjd-(julday([1,1,DATE(1),DATE(4)], 'MJD'))+1;
[esa_td, esa_hd,
esa_wd]=td_esa(STATION(1),STATION(2),doy,DATE(4),STATION(3),e1deg(i));
TROPDELAY(NUMDATA,10)=esa_hd;
TROPDELAY(NUMDATA,11)=esa_wd;

% Computing the slant delays from Saastamoinen
TROPDELAY(NUMDATA,12)=0.002277/cos(deg2rad(90-
(e1deg(i))))*(RTRDATA(1,2)+((1255./(RTRDATA(1,1)))+0.05)*(RTRDATA(1,3))-tan(deg2rad(90-
(e1deg(i))))*tan(deg2rad(90-(e1deg(i)))))

end

end

```

6. melléklet: Automatizálás, eredmények ábrázolása (slant_raobs.m)

```

RAOBSFILES=dlmread('C:\matlab\summer_hun_fsl_uj\filelist_tdk.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]=delays(filename);
    STAT_2(i,:)= [i TROPDELAY(1,:)];
    STAT_5(i,:)= [i TROPDELAY(2,:)];
    STAT_8(i,:)= [i TROPDELAY(3,:)];
    STAT_10(i,:)= [i TROPDELAY(4,:)];
    STAT_15(i,:)= [i TROPDELAY(5,:)];

```

```

STAT_20(i,:)= [i TROPDELAY(6,:)];
STAT_30(i,:)= [i TROPDELAY(7,:)];
STAT_60(i,:)= [i TROPDELAY(8,:)];
STAT_90(i,:)= [i TROPDELAY(9,:)];

end
%%

%% 4. PLOT
%%4.1. Examining a daily observation

MEAS=[4]
MEASSIZE=size(MEAS);
MEASROW=MEASSIZE(1,1);

for i=1:MEASROW

filename=sprintf('%s%s%d%s','C:\matlab\summer_hun_fsl','12843_',RAOBSFILES(MEAS(i)),'fsl');
TROPDELAY=delays(filename);

ID(:,i)=[TROPDELAY(:,1)];
ELEVANG(:,i)=[TROPDELAY(:,2)];
RDELH(:,i)=[TROPDELAY(:,3)];
RDELW(:,i)=[TROPDELAY(:,4)];
RDGEOS(:,i)=[TROPDELAY(:,5)];
RESTA(:,i)=[TROPDELAY(:,6)];
RETOP(:,i)=[TROPDELAY(:,7)];
GPTDELH(:,i)=[TROPDELAY(:,8)];
GPTDELW(:,i)=[TROPDELAY(:,9)];
ESADELH(:,i)=[TROPDELAY(:,10)];
ESADELW(:,i)=[TROPDELAY(:,11)];
SAASDEL(:,i)=[TROPDELAY(:,12)];

del=plot(ELEVANG(:,i),RDELH(:,i),'r*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,i),RDELW(:,i),'rx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,i),GPTDELH(:,i),'g*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,i),GPTDELW(:,i),'gx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,i),ESADELH(:,i),'b*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,i),ESADELW(:,i),'bx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,i),SAASDEL(:,i),'mo', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

legend('Sugárkövetésből hidrosztatikus késleltetés', 'Sugárkövetésből nedves késleltetés','GPT2W
alapján hidrosztatikus késleltetés','GPT2W alapján nedves késleltetés','ESA alapján hidrosztatikus
késleltetés','ESA alapján nedves késleltetés', 'Saastamoinenből késleltetés');
title('Troposzférikus késleltetések magassági szögtől való függése (2014.07.02.12-kor)');
xlabel('Magassági szög [°]');
ylabel('Késleltetés [m]');

saveas(del,sprintf('del2014070212%d.png',i));
%%

delh=plot(ELEVANG(:,i),RDELH(:,i),'r*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,i),GPTDELH(:,i),'g*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,i),ESADELH(:,i),'b*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);

```

```

hold off

legend('Sugárkövetésből hidrosztatikus késleltetés','GPT2W alapján hidrosztatikus késleltetés','ESA
alapján hidrosztatikus késleltetés');
title('Hidrosztatikus troposzferikus késleltetések magassági szögtől való függése (2014.07.02.12-
kor)');
xlabel('Magassági szög [°]');
ylabel('Késleltetés [m]');

saveas(delh,sprintf('delh2014070212%d.png',i));
%%

delhdiff=plot(ELEVANG(:,i),(RDELH(:,i)-GPTDELH(:,i)),'g*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,i),(RDELH(:,i)-ESADELH(:,i)),'b*', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

legend('Hidrosztatikus késleltetésnél a sugárkövetéses módszer és a GPT2W különbsége ','
Hidrosztatikus késleltetésnél a sugárkövetéses módszer és az ESA különbsége');
title('Hidrosztatikus troposzferikus késleltetések különbségének magassági szögtől való függése
(2014.07.02.12-kor)');
xlabel('Magassági szög [°]');
ylabel('Késleltetések különbsége [m]');

saveas(delhdiff,sprintf('delhdiff2014070212%d.png',i));
%%

delw=plot(ELEVANG(:,i),RDELW(:,i),'rx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,i),GPTDELW(:,i),'gx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,i),ESADELW(:,i),'bx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

legend('Sugárkövetésből nedves késleltetés','GPT2W alapján nedves késleltetés','ESA alapján
nedves késleltetés');
title('Nedves troposzferikus késleltetések magassági szögtől való függése (2014.07.02.12-kor)');
xlabel('Magassági szög [°]');
ylabel('Késleltetés [m]');

saveas(delw,sprintf('delw2014070212%d.png',i));
%%

delwdiff=plot(ELEVANG(:,i),RDELW(:,i)-GPTDELW(:,i),'gx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,i),RDELW(:,i)-ESADELW(:,i),'bx', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

legend('Nedves késleltetésnél a sugárkövetéses módszer és a GPT2W különbsége ',' Nedves
késleltetésnél a sugárkövetéses módszer és az ESA különbsége');
title('Nedves troposzferikus késleltetések különbségének magassági szögtől való függése
(2014.07.02.12-kor)');
xlabel('Magassági szög [°]');
ylabel('Késleltetések különbsége [m]');

saveas(delwdiff,sprintf('delwdiff2014070212%d.png',i));
%%

```

```

def=plot(ELEVANG(:,i),(ELEVANG(:,i)-radtodeg(RESTA(:,i))), 'bx', 'LineWidth',2,
'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,i),(ELEVANG(:,i)-radtodeg(RETOP(:,i))), 'gx', 'LineWidth',2,
'MarkerSize',10);
hold off

legend('A magassági szög és a sugárelhajlás nélküli magassági szög különbsége','A magassági szög
és a sugárelhajlás szögének különbsége');
title('A sugárelhajlás vizsgálata magassági szögtől függően (2014.07.02.12-kor)');
xlabel('Magassági szög [°]');
ylabel('Szögekülönbség [°]');

saveas(def,sprintf('def2014070212%d.png',i));
%%

geodef=plot(ELEVANG(:,i),(RDGEOS(:,i)./(RDELH(:,i)+RDELW(:,i))*100), 'bx', 'LineWidth',2,
'MarkerSize',10);

legend('A geometriai sugárelhajlás százalékban a sugárkövetés teljes troposzferikus késleltetéséhez
képest');
title('A geometriai sugárelhajlás százalékban a sugárkövetés teljes troposzferikus késleltetéséhez
képest (2014.07.02.12-kor)');
xlabel('Magassági szög [°]');
ylabel('Sugárelhajlás [%]');

saveas(geodef,sprintf('geodef2014070212%d.png',i));
end

```

%4.2. Examining the statistics

```

hold off
MINVECRG=[min((STAT_2(:,4)+STAT_2(:,5))-
(STAT_2(:,9)+STAT_2(:,10))),min((STAT_5(:,4)+STAT_5(:,5))-
(STAT_5(:,9)+STAT_5(:,10))),min((STAT_8(:,4)+STAT_8(:,5))-
(STAT_8(:,9)+STAT_8(:,10))),min((STAT_10(:,4)+STAT_10(:,5))-
(STAT_10(:,9)+STAT_10(:,10))),min((STAT_15(:,4)+STAT_15(:,5))-
(STAT_15(:,9)+STAT_15(:,10))),min((STAT_20(:,4)+STAT_20(:,5))-
(STAT_20(:,9)+STAT_20(:,10))),min((STAT_30(:,4)+STAT_30(:,5))-
(STAT_30(:,9)+STAT_30(:,10))),min((STAT_60(:,4)+STAT_60(:,5))-
(STAT_60(:,9)+STAT_60(:,10))),min((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-
(STAT_90(:,9)+STAT_90(:,10))));
MINVECRE=[min((STAT_2(:,4)+STAT_2(:,5))-
(STAT_2(:,11)+STAT_2(:,12))),min((STAT_5(:,4)+STAT_5(:,5))-
(STAT_5(:,11)+STAT_5(:,12))),min((STAT_8(:,4)+STAT_8(:,5))-
(STAT_8(:,11)+STAT_8(:,12))),min((STAT_10(:,4)+STAT_10(:,5))-
(STAT_10(:,11)+STAT_10(:,12))),min((STAT_15(:,4)+STAT_15(:,5))-
(STAT_15(:,11)+STAT_15(:,12))),min((STAT_20(:,4)+STAT_20(:,5))-
(STAT_20(:,11)+STAT_20(:,12))),min((STAT_30(:,4)+STAT_30(:,5))-
(STAT_30(:,11)+STAT_30(:,12))),min((STAT_60(:,4)+STAT_60(:,5))-
(STAT_60(:,11)+STAT_60(:,12))),min((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-
(STAT_90(:,11)+STAT_90(:,12))));
mins=plot(ELEVANG(:,1),MINVECRG, 'g+', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,1),MINVECRE, 'b+', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

```

```

legend('Teljes késleltetésnél a sugárkövetéses módszer és a GPT2W különbségének minimuma','Teljes
késleltetésnél a sugárkövetéses módszer és az ESA különbségének minimuma');
title('Teljes troposzferikus késleltetés-különbségek (sk.-GPT2W) és (sk.-ESA) minimumának
magassági szögtől való függése');
xlabel('Magassági szög [°]');
ylabel('Késleltetékülönbség [m]');

```

```

saveas(mins, 'C:\matlab\images\mins.png','png')
%%
MAXVECRG=[max((STAT_2(:,4)+STAT_2(:,5))-
(STAT_2(:,9)+STAT_2(:,10))),max((STAT_5(:,4)+STAT_5(:,5))-
(STAT_5(:,9)+STAT_5(:,10))),max((STAT_8(:,4)+STAT_8(:,5))-
(STAT_8(:,9)+STAT_8(:,10))),max((STAT_10(:,4)+STAT_10(:,5))-
(STAT_10(:,9)+STAT_10(:,10))),max((STAT_15(:,4)+STAT_15(:,5))-
(STAT_15(:,9)+STAT_15(:,10))),max((STAT_20(:,4)+STAT_20(:,5))-
(STAT_20(:,9)+STAT_20(:,10))),max((STAT_30(:,4)+STAT_30(:,5))-
(STAT_30(:,9)+STAT_30(:,10))),max((STAT_60(:,4)+STAT_60(:,5))-
(STAT_60(:,9)+STAT_60(:,10))),max((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-
(STAT_90(:,9)+STAT_90(:,10))))];
MAXVECRE=[max((STAT_2(:,4)+STAT_2(:,5))-
(STAT_2(:,11)+STAT_2(:,12))),max((STAT_5(:,4)+STAT_5(:,5))-
(STAT_5(:,11)+STAT_5(:,12))),max((STAT_8(:,4)+STAT_8(:,5))-
(STAT_8(:,11)+STAT_8(:,12))),max((STAT_10(:,4)+STAT_10(:,5))-
(STAT_10(:,11)+STAT_10(:,12))),max((STAT_15(:,4)+STAT_15(:,5))-
(STAT_15(:,11)+STAT_15(:,12))),max((STAT_20(:,4)+STAT_20(:,5))-
(STAT_20(:,11)+STAT_20(:,12))),max((STAT_30(:,4)+STAT_30(:,5))-
(STAT_30(:,11)+STAT_30(:,12))),max((STAT_60(:,4)+STAT_60(:,5))-
(STAT_60(:,11)+STAT_60(:,12))),max((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-
(STAT_90(:,11)+STAT_90(:,12))))];
maxs=plot(ELEVANG(:,1),MAXVECRG,'g+', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,1),MAXVECRE,'b+', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off

```

```

legend('Teljes késleltetésnél a sugárkövetéses módszer és a GPT2W különbségének
maximума','Teljes késleltetésnél a sugárkövetéses módszer és az ESA különbségének maximuma');
title('Teljes troposzferikus késleltetés-különbségek (sk.-GPT2W) és (sk.-ESA) maximumának
magassági szögtől való függése');
xlabel('Magassági szög [°]');
ylabel('Késleltetékülönbség [m]');

```

```

saveas(maxs, 'C:\matlab\images\maxs.png','png')
%%
MEANVECRG=[mean((STAT_2(:,4)+STAT_2(:,5))-
(STAT_2(:,9)+STAT_2(:,10))),mean((STAT_5(:,4)+STAT_5(:,5))-
(STAT_5(:,9)+STAT_5(:,10))),mean((STAT_8(:,4)+STAT_8(:,5))-
(STAT_8(:,9)+STAT_8(:,10))),mean((STAT_10(:,4)+STAT_10(:,5))-
(STAT_10(:,9)+STAT_10(:,10))),mean((STAT_15(:,4)+STAT_15(:,5))-
(STAT_15(:,9)+STAT_15(:,10))),mean((STAT_20(:,4)+STAT_20(:,5))-
(STAT_20(:,9)+STAT_20(:,10))),mean((STAT_30(:,4)+STAT_30(:,5))-
(STAT_30(:,9)+STAT_30(:,10))),mean((STAT_60(:,4)+STAT_60(:,5))-
(STAT_60(:,9)+STAT_60(:,10))),mean((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-
(STAT_90(:,9)+STAT_90(:,10))))];
MEANVECRE=[mean((STAT_2(:,4)+STAT_2(:,5))-
(STAT_2(:,11)+STAT_2(:,12))),mean((STAT_5(:,4)+STAT_5(:,5))-
(STAT_5(:,11)+STAT_5(:,12))),mean((STAT_8(:,4)+STAT_8(:,5))-

```

```
(STAT_8(:,11)+STAT_8(:,12))),mean((STAT_10(:,4)+STAT_10(:,5))-
(STAT_10(:,11)+STAT_10(:,12))),mean((STAT_15(:,4)+STAT_15(:,5))-
(STAT_15(:,11)+STAT_15(:,12))),mean((STAT_20(:,4)+STAT_20(:,5))-
(STAT_20(:,11)+STAT_20(:,12))),mean((STAT_30(:,4)+STAT_30(:,5))-
(STAT_30(:,11)+STAT_30(:,12))),mean((STAT_60(:,4)+STAT_60(:,5))-
(STAT_60(:,11)+STAT_60(:,12))),mean((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-
(STAT_90(:,11)+STAT_90(:,12)))]);
means=plot(ELEVANG(:,1),MEANVECREG,'g+', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,1),MEANVECRE,'b+', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off
```

```
legend('Teljes késleltetésnél a sugárkövetéses módszer és a GPT2W különbségének átlaga','Teljes
késleltetésnél a sugárkövetéses módszer és az ESA különbségének átlaga');
title('Teljes troposzferikus késleltetés-különbségek (sk.-GPT2W) és (sk.-ESA) átlagának magassági
szögtől való függése');
xlabel('Magassági szög [°]');
ylabel('Késleltetéskülönbség [m]');
```

```
saveas(means, 'C:\matlab\images\means.png','png')
%%
STDVECREG=[std((STAT_2(:,4)+STAT_2(:,5))-
(STAT_2(:,9)+STAT_2(:,10))),std((STAT_5(:,4)+STAT_5(:,5))-
(STAT_5(:,9)+STAT_5(:,10))),std((STAT_8(:,4)+STAT_8(:,5))-
(STAT_8(:,9)+STAT_8(:,10))),std((STAT_10(:,4)+STAT_10(:,5))-
(STAT_10(:,9)+STAT_10(:,10))),std((STAT_15(:,4)+STAT_15(:,5))-
(STAT_15(:,9)+STAT_15(:,10))),std((STAT_20(:,4)+STAT_20(:,5))-
(STAT_20(:,9)+STAT_20(:,10))),std((STAT_30(:,4)+STAT_30(:,5))-
(STAT_30(:,9)+STAT_30(:,10))),std((STAT_60(:,4)+STAT_60(:,5))-
(STAT_60(:,9)+STAT_60(:,10))),std((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-
(STAT_90(:,9)+STAT_90(:,10)))]);
STDVECRE=[std((STAT_2(:,4)+STAT_2(:,5))-
(STAT_2(:,11)+STAT_2(:,12))),std((STAT_5(:,4)+STAT_5(:,5))-
(STAT_5(:,11)+STAT_5(:,12))),std((STAT_8(:,4)+STAT_8(:,5))-
(STAT_8(:,11)+STAT_8(:,12))),std((STAT_10(:,4)+STAT_10(:,5))-
(STAT_10(:,11)+STAT_10(:,12))),std((STAT_15(:,4)+STAT_15(:,5))-
(STAT_15(:,11)+STAT_15(:,12))),std((STAT_20(:,4)+STAT_20(:,5))-
(STAT_20(:,11)+STAT_20(:,12))),std((STAT_30(:,4)+STAT_30(:,5))-
(STAT_30(:,11)+STAT_30(:,12))),std((STAT_60(:,4)+STAT_60(:,5))-
(STAT_60(:,11)+STAT_60(:,12))),std((STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5))-
(STAT_90(:,11)+STAT_90(:,12)))]);
stds=plot(ELEVANG(:,1),STDVECREG,'g+', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold on, plot(ELEVANG(:,1),STDVECRE,'b+', 'LineWidth',2, 'MarkerSize',10);
hold off
```

```
legend('Teljes késleltetésnél a sugárkövetéses módszer és a GPT2W különbségének szórása','Teljes
késleltetésnél a sugárkövetéses módszer és az ESA különbségének szórása');
title('Teljes troposzferikus késleltetés-különbségek (sk.-GPT2W) és (sk.-ESA) szórásának magassági
szögtől való függése');
xlabel('Magassági szög [°]');
ylabel('Késleltetéskülönbség [m]');
```

```
saveas(stds, 'C:\matlab\images\stds.png','png')
%%
```

%4.3.Examination of all observation

```
doy=[182 182 183 183 184 185 185 186 186 187 187 188 188 189 189 190 190 191 191 192 192 193  
193 194 194 195 195 196 196 197 197 198 198 199 199 199 200 200 201 201 202 202 203 203 204  
204 205 205 206 206 207 207 208 208 209 209 210 210 211 211 212 212 213 213 214 214 215 215  
216 216 217 217 218 218 219 219 220 220 221 221 222 222 223 223 224 224 225 225 226 226 227  
227 228 228 229 229 230 230 231 231 232 232 233 233 234 234 235 235 236 236 237 237 238 238  
239 239 240 240 241 241 242 242 243 243]
```

```
del2=plot(doy(:,1),(STAT_2(:,4)+STAT_2(:,5)), 'rx', 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',6);  
hold on, plot(doy(:,1),(STAT_2(:,9)+STAT_2(:,10)), 'gx', 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',6);  
hold on, plot(doy(:,1),(STAT_2(:,11)+STAT_2(:,12)), 'bx', 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',6);  
hold off
```

```
legend('Sugárkövetésből teljes késleltetés','GPT2W alapján teljes késleltetés','ESA alapján teljes  
késleltetés','Location','NorthWest');  
title('2°-os magassági szögnél számított teljes troposzférikus késleltetés a vizsgált időszakban');  
xlabel('Észlelések napja [doy]');  
ylabel('Késleltetés [m]');
```

```
saveas(del2, 'C:\matlab\images\del2.png','png')  
%%
```

```
del8=plot(doy(:,1),(STAT_8(:,4)+STAT_8(:,5)), 'rx', 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',6);  
hold on, plot(doy(:,1),(STAT_8(:,9)+STAT_8(:,10)), 'gx', 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',6);  
hold on, plot(doy(:,1),(STAT_8(:,11)+STAT_8(:,12)), 'bx', 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',6);  
hold off
```

```
legend('Sugárkövetésből teljes késleltetés','GPT2W alapján teljes késleltetés','ESA alapján teljes  
késleltetés');  
title('8°-os magassági szögnél számított teljes troposzférikus késleltetés a vizsgált időszakban');  
xlabel('Észlelések napja [doy]');  
ylabel('Késleltetés [m]');
```

```
saveas(del8, 'C:\matlab\images\del8.png','png')  
%%
```

```
del20=plot(doy(:,1),(STAT_20(:,4)+STAT_20(:,5)), 'rx', 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',6);  
hold on, plot(doy(:,1),(STAT_20(:,9)+STAT_20(:,10)), 'gx', 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',6);  
hold on, plot(doy(:,1),(STAT_20(:,11)+STAT_20(:,12)), 'bx', 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',6);  
hold off
```

```
legend('Sugárkövetésből teljes késleltetés','GPT2W alapján teljes késleltetés','ESA alapján teljes  
késleltetés');  
title('20°-os magassági szögnél számított teljes troposzférikus késleltetés a vizsgált időszakban');  
xlabel('Észlelések napja [doy]');  
ylabel('Késleltetés [m]');
```

```
saveas(del20, 'C:\matlab\images\del20.png','png')  
%%
```

```
del90=plot(doy(:,1),(STAT_90(:,4)+STAT_90(:,5)), 'rx', 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',6);  
hold on, plot(doy(:,1),(STAT_90(:,9)+STAT_90(:,10)), 'gx', 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',6);  
hold on, plot(doy(:,1),(STAT_90(:,11)+STAT_90(:,12)), 'bx', 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',6);  
hold off
```

```
legend('Sugárkövetésből teljes késleltetés','GPT2W alapján teljes késleltetés','ESA alapján teljes  
késleltetés');  
title('90°-os magassági szögnél számított teljes troposzférikus késleltetés a vizsgált időszakban');  
xlabel('Észlelések napja [doy]');  
ylabel('Késleltetés [m]');  
  
saveas(del90, 'C:\matlab\images\del90.png','png')
```

14. Irodalomjegyzék

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

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

Völgyesi L. (2011) Geofizika, BME Általános és Felsőgeodézia 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-vertikal-is-szerkezete-I.pdf&ei=xotGVLjdCoKuaabfgLgH&usq=AFQjCNFCfynLpOEekdCZm9qfq-87UgLaCA&sig2=yI08UmzNGgNdObn_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

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

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

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

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

A. Martellucci (2002) Galileo Reference Troposphere Model for the User Receiver [*]

K. Lagler (2012) GPT2W modell <http://ggosatm.hq.tuwien.ac.at/DELAY/SOURCE/>

A. Martellucci, G. Blarzino (2003) Galileo modell, ESA/ESTEC [*]

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