



Globális és regionális ionoszféra modellek vizsgálata Napfolttevékenység idején

TDK dolgozat

Készítette: Juni Ildikó
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki szak
BSc IV. évfolyam

Konzulensek: Dr. Rózsa Szabolcs
egyetemi docens

Tuchband Tamás
egyetemi tanársegéd

Tartalom

Kivonat	3
1. Bevezetés	4
2. Az ionoszféra	4
2.1. Az ionoszféra elhelyezkedése.....	4
2.2. Az ionoszféra hatása.....	5
2.3. Az ionoszféra hatásának figyelembevétele.....	6
2.3.1. Az ionoszféra figyelembevétele számítás útján.....	7
2.4. A teljes elektrontartalom meghatározása GNSS adatokból.....	8
2.5. Az ionoszféra és a földmágneses nyugodt napi variációk	10
3. A Nap.....	11
3.1. A Nap felépítése	11
3.2. A napfoltok és jelentősebb naptevékenységek	12
3.3. A napfolt-ciklus.....	16
3.4. Eltűnőben a napfoltciklus.....	17
4. A szabad elektrontartalom meghatározása GNSS adatokból	19
4.1. Bernese 5.0 GPS szoftver	19
4.2. Felhasznált adatok	19
5. A feldolgozás.....	23
6. A feldolgozás eredménye	29
7. Az eredmények ábrázolása.....	32
8. Összegzés.....	47
Irodalomjegyzék	49

Globális és regionális ionoszféra modellek vizsgálata Napfolttevékenység idején

Kivonat

Globális és regionális ionoszféra modellek vizsgálata Napfolttevékenység idején

Juni Ildikó IV.évf. BSc

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

Tuchband Tamás, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék

A globális helymeghatározó rendszerek egyik legnagyobb mértékű szabályos hibája az ionoszféra jelkésleltető hatása. Az ionoszféra a földi légkör felső része, amely a Nap ionizáló sugárzása miatt jelentős számú szabad elektront tartalmaz. Az ionoszféra mikrohullámú jelekre kifejtett hatása frekvenciafüggő, így ezek a rendszerek minimum két vivőfrekvenciát használnak annak érdekében, hogy a nagy pontosságú helymeghatározásban az ionoszféra hatását figyelembe lehessen venni. A hatás mértéke függ a Nap mágneses aktivitásának nagyságától is. Különös aktualitást ad a vizsgálatoknak az a tény, hogy a Nap mágneses tevékenységének maximumát a 11 éves periódus végén, várhatóan 2013-2014 folyamán éri el.

A globális helymeghatározó rendszerek felhasználóinak legnagyobb része még jelenleg is egyfrekvenciás méréseket végez. Ebben az esetben az ionoszféra jelkésleltető hatását empirikus modellekkel vehetjük figyelembe. Hasonlóan fontos az ionoszféra állapotának modellezése a hazai GNSS infrastruktúra szempontjából, hiszen a hálózati RTK adatok előállítása során a szabályos hibákat nagy pontossággal modelleznünk kell.

A dolgozatban a Nemzetközi GNSS Szolgálat (IGS), illetve az EUREF Permanens Állomás hálózat adatainak felhasználásával globális és regionális ionoszféra modelleket vezettünk le 2012. márciusi időszakra a Bernese szoftver segítségével. A vizsgált időszakot jelentős napfolttevékenység jellemezte.

Megvizsgáltuk, hogy az általunk levezetett modellek hogyan illeszkednek nemzetközi feldolgozóközpontok eredményeihez, illetve a navigációs vevőkben alkalmazott algoritmusokhoz.

1. Bevezetés

Napjainkban egyre többen használják a globális helymeghatározó rendszereket, akár navigációs céllal, akár geodéziai munkák során alappontsűrítéshez, részletes felmérésekhez és kitűzésekhez. Az egyfrekvenciás geodéziai méréseknél figyelembe kell venni a műholdas helymeghatározó rendszerek jelentős szabályos hibáját, az ionoszféra jelkésleltető hatását, amit felerősítenek a napfoltok környezetében kialakuló napkitörések. Ugyanez a hatás a valós idejű kinematikus helymeghatározás esetén az inicializálás során okozhat problémákat, így akár teljes mértékben meg is hiúsíthatja az RTK méréseket, vagy a hibás inicializálás miatt jelentős (akár több deciméteres) hibával terhelt koordináta-meghatározáshoz is vezethet. Ionoszférának nevezzük a légkör 30-1000 km közötti szakaszát, ahol szabad elektronok találhatók a napsugárzás különböző részeinek ionizációja miatt. A napkitörések során nagy mennyiségű töltött részecske éri el a Földünk mágneses terét. Az ionoszférában ezek rohamos elektronsűrűség emelkedést okozhatnak, ami nagyon gyors jelkésleltetés változást eredményez. A célunk ennek a modellezése, egy a teljes Földet magában foglaló globális és egy Európát lefedő regionális ionoszféra modell létrehozásával. Ehhez a Bernese 5.0 GPS szoftvert használjuk fel.

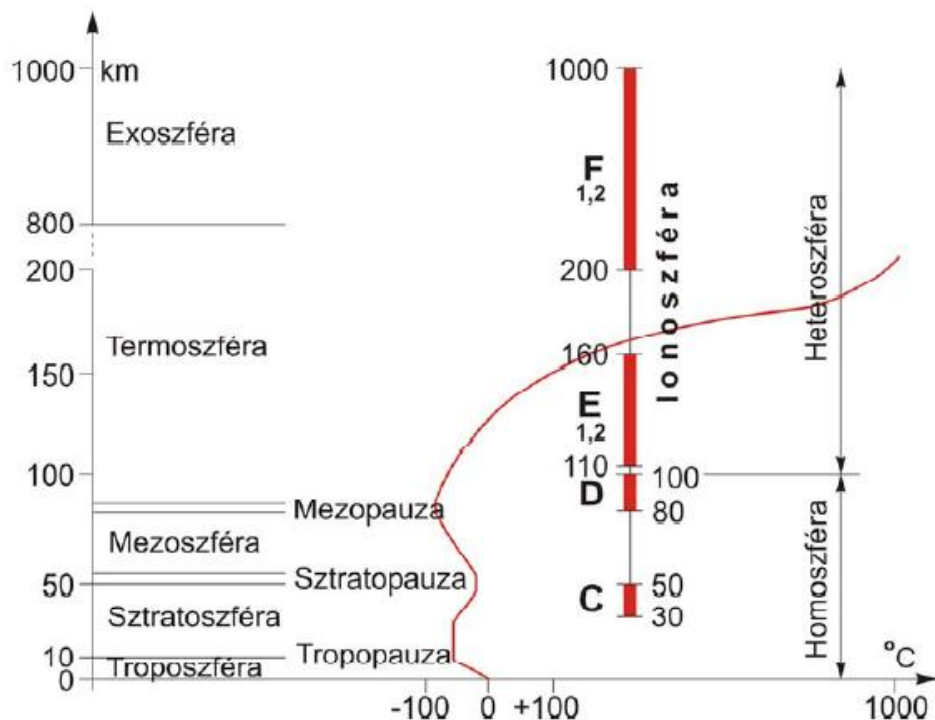
2. Az ionoszféra

2.1. Az ionoszféra 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. 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.

Az ionoszférát az ionizáció fokának megfelelően különböző rétegekre oszthatjuk fel. Első réteg a 30-50 km magassági szintek között elhelyezkedő *C-réteg*, amelyben ionfelhők vannak, ez kevésbé összefüggő. Következő a *D-réteg*, amely 80-100 km között található, csak nappal létezik, naplementekor feloszlik, napkitörések idején viszont jelentősen felerősödik. A

110-116 km magasan lévő *E-réteg*, másképpen Heaviside-réteg éjjel és nappal is jelen van, de napközben megerősödő ionizáció miatt kettős E1 és E2 réteggé alakul. A legfelső *F-réteg* a legfontosabb állandó rétege az ionoszférának, 200-1000 km-es tartományban helyezkedik el. Az *E-réteg*hez hasonlóan ez is állandó és nappal megerősödő réteg, ahol kettős F1 és F2 réteget különíthetünk el. Az anyag mozgását a mágneses erőter hatásai a gravitációnál és nyomásnál erősebben befolyásolják. Napközben az F1 süllyed, az F2 pedig 225 km-nél nagyobb magasságba emelkedik. Ezek a magasságok gyakran ingadozóak (1.ábra).



1. ábra: A légkör rétegei

Völgyesi (2011)

2.2. Az ionoszféra hatása

Az ionoszféra rétegei az elektromos hullámokat részben elnyelik, részben pedig – főleg a közepes és hosszú rádióhullámokat visszaverik. Az elektromágneses jel feltételezett terjedési sebessége a vákuumban $c=299\,792\,458$ m/s, amit a légkör módosít. *Ádám és társai* (2011) szerint a légkör sebességmódosító hatását a törésmutatóval jellemezhetjük:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Ahol c a fénysebesség vákuumban, v pedig az adott közegben lévő sebesség. Az ionoszférában a törésmutató függ a helytől, az időponttól és a jel frekvenciájától/hullámhosszától. A törésmutató és ezáltal a jel terjedési sebességének a jel

frekvenciájától való függése miatt az ionoszféra a rádióhullámok terjedése szempontjából diszperzív közeg. A törésmutató értéke függ még a Nap ionizáló sugárzásának intenzitásától is, azaz a napszakoktól, évszakoktól, földrajzi szélességtől és a *nappolttevékenységtől* is. Diszperzív közegben meg kell különböztetnünk a fázissebességet és a csoportsebességet. A fázissebesség egy elektromágneses jel terjedési sebessége, míg a csoportsebesség több egymástól kis mértékben eltérő frekvenciájú jelnek a terjedési sebessége. Ez a két sebesség eltér egymástól, így az ionoszféra hatása nem egyezik meg a fázis- és kódmerésekre, a fázis siet, míg a kód késik. Ebből az következik, hogy az ionoszféra miatt a fázismérésből származó távolság rövidebb lesz, a kódtávolság hosszabb lesz a valódi értékénél.

Az ionoszféra távolságokra kifejtett hatása számolható:

$$\Delta^{Ionosz} = \int n ds - \int ds_0 \quad (2)$$

A fázis és kódtávolságokra kifejtett hatása:

$$\Delta_f^{Ionosz} = \int \left(1 + \frac{c_2}{f^2}\right) * ds - \int ds_0 \quad (3)$$

$$\Delta_{cs}^{Ionosz} = \int \left(1 - \frac{c_2}{f^2}\right) * ds - \int ds_0 \quad (4)$$

Az integrálásokat geometriai távolság szerint elvégezve:

$$\Delta_f^{Ionosz} = \int \frac{c_2}{f^2} * ds_0 \rightarrow \Delta_f^{Ionosz} = -\frac{40,3}{f^2} \int N_e * ds_0 \quad (5)$$

$$\Delta_{cs}^{Ionosz} = -\int \frac{c_2}{f^2} * ds_0 \rightarrow \Delta_{cs}^{Ionosz} = \frac{40,3}{f^2} \int N_e * ds_0 \quad (6)$$

Bevezethető a teljes elektrontartalom (Total Electron Content - TEC) és az alapján

$$TEC = \int N_e * ds_0 \quad (7)$$

$$\Delta_f^{Ionosz} = -\frac{40,3}{f^2} \int TEC \quad (8)$$

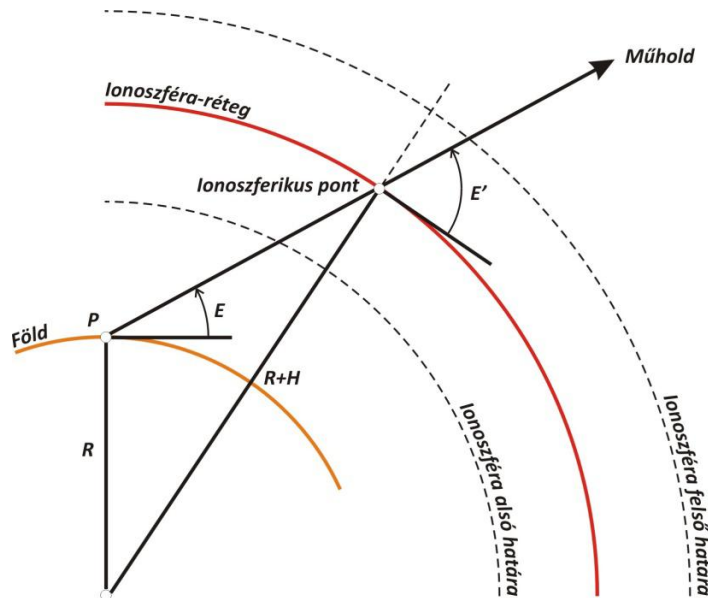
$$\Delta_{cs}^{Ionosz} = \frac{40,3}{f^2} \int TEC \quad (9)$$

A TEC értékek mértékegysége a TEC egység (TEC Unit - TECU). 1 TECU 10^{16} szabad elektron/négyzetméter. A napi maximumát a szabad elektronok általában helyi idő szerint 14 h körül éri el. A TEC értékek gradiense a közepes szélességeken sokkal kisebb, mint az Egyenlítőhöz közeli területeken vagy a pólusokon.

2.3. Az ionoszféra hatásának figyelembevétele

Az ionoszféra hatását globális helymeghatározó rendszereknél többféleképpen is figyelembe vehetjük *Ádám és társai (2004)* szerint. A legegyszerűbb modell az *egyszerű*

ionoszféra-réteg modell, ahol az elektronokat a Föld felszíne felett 350 km-re lévő gömbhéjra integrálva képzeljük. Az elektronsűrűség ebben az esetben a TVEC (Total Vertical Electron Content). Ez csak a zenitirányú műholdakra biztosítja a helyes ionoszféra késleltetés értékét. A műhold irányra vonatkozó ionoszférikus késleltetést ebből egy leképzési függvény segítségével lehet számítani (2.ábra).



2. ábra: Vertikális leképzés

Ádám és társai (2011)

A mérések feldolgozása során az ionoszféra hatását többféleképpen vehetjük figyelembe:

- *Mérés útján*: ha a TEC értékek óránként meghatározásra kerülnek, akkor az ionoszféra hatása számszerűsíthető.
- *Becsléssel*: az ionoszféra elektrontartalmát ismeretlenként vehetjük fel a számítás során, ekkor viszont sok fölös mérés és nagy kiterjedésű hálózatok szükségesek.
- *Számítás útján*: a késleltető hatás számolható a globális, regionális vagy lokális ionoszféra modellekkel leírt elektrontartalom alapján. Ilyen modellek lehetnek a Klobuchar és a NeQuick modellek, vagy egyéb gömbfüggvénysorokkal megadott modellek.
- *Kiküszöböléssel*: A késleltető hatás frekvenciafüggőségét felhasználva két frekvencián végzett észlelések lineáris kombinációjával kiejthető az ionoszféra hatása.

2.3.1. Az ionoszféra figyelembevétele számítás útján

A műholdas helymeghatározó rendszerek jelenlegi felhasználóinak túlnyomó többsége még most is egyfrekvenciás méréseket végez, így empirikus modellek alkalmazása szükséges a jelkésleltető hatásnak a figyelembevételére. Már 1987-ben *Klobuchar* kifejlesztett egy

egyszerű ionoszféra modellt, ahol kellő pontossággal figyelembe vehető a késleltetés az egyfrekvenciás észlelésekre. Cél volt a matematikai egyszerűség, hogy az algoritmus kis számítási kapacitású vevőkben is alkalmazható legyen. A modell éjszaka konstans TEC értéket feltételez, nappal viszont a vertikális irányú késleltetés megadását koszinusz függvény segítségével végzi. A *NeQuick* modell az ARPL (Aeronomy and Radio Propagation Lab, Trieszt) és a Grazi Műszaki Egyetem által közösen fejlesztett időfüggő, háromdimenziós, globális ionoszféra modell. Ennél nem kell leképezési függvényt alkalmazni, bárhol, bármilyen műhold-vevő irányra számítható a késleltetés. A modellt elfogadták, mint a TEC modellezés eszközét, a Galileo is ezt használta az egyfrekvenciás helymeghatározáshoz. Az ionoszféra különböző rétegeinek havi mediántérképei képezik a kiindulást, azért, hogy a mérés időpontját jellemző napfolttevékenységet is figyelembe lehessen venni. Ehhez háromféle adatot adhatunk meg: a napfoltok számát, a 10,7 cm hullámhosszú, Nap által kibocsátott rádiósugárzás fluxusát vagy az ionizációs paramétert.

2.4. A teljes elektron tartalom meghatározása GNSS adatokból

A GNSS adatokból történő teljes elektron tartalom meghatározását *Dach és társai (2007)* valamint *Ádám és társai (2011)* alapján mutatom be. A navigációs célú helymeghatározásban alkalmazott Klobuchar modell segítségével ugyan az egész bolygóra meghatározhatjuk az ionoszféra okozta késleltetéseket, ugyanakkor ezzel az egyszerű modellel csak a teljes ionoszférikus késleltetés mintegy 50%-a vehető figyelembe (*Ádám és társai, 2011*). Annak érdekében, hogy az ionoszféra hatását ennél pontosabban figyelembe vehessük, a szabad elektron tartalom jobb modellezése szükségeltetik. A következőkben bemutatjuk a vertikálisan integrált szabad elektronsűrűségek meghatározásának módját GNSS észlelések felhasználásával. Ehhez az L_4 geometria mentes lineáris kombinációt használtuk fel.

$$L_4 = L_1 - L_2, \quad (10)$$

ami az $L_1 = 154 * f_0 = 1575,42 \text{ MHz}$ és $L_2 = 120 * f_0 = 1227,60 \text{ MHz}$ vivőfrekvenciákon észlelt fázistávolságok különbségével egyenlő.

A fázistávolságokat az alábbi közvetítőegyenlettel írhatjuk fel L_1 és L_2 frekvenciára is:

$$\Phi_{k,L_n}^j(t_i) = \rho_k^j(t_i - \tau_k^j, t_i) - c * \delta t_k(t_i) + c * \delta t^j(t_i - \tau_j^k) + \lambda_{L_n} * N_{k,L_n}^j + F_k^j(t_i) + T_k^j(t_i) - I_{k,L_n}^j(t_i) + v_{\Phi_{k,L_n}^j}(t_i), \quad (11)$$

ahol: $\Phi_{k,L_n}^j(t_i)$ k ponton lévő vevő j műholdra végzett fázistávolság mérése az adott frekvencián (t_i) időpontban; $\rho_k^j(t_i - \tau_k^j, t_i)$ a valódi távolság a műhold jel kibocsátási

koordinátái és a földi pont jelészlelési koordinátái között; τ_j^k a jel terjedési ideje a k ponton lévő vevő és a j műhold között. Továbbá a δt_k és δt^j a vevő és a műhold órahibája. λ_{L_n} az adott frekvencián a hullámhossz; N_{k,L_n}^j az adott frekvencián értelmezett ciklustöbbsértelműség k pont és a j műhold között. F_k^j a fáziscentrum külpontossága a j műhold irányában, T_k^j a troposzféra, míg I_{k,L_n}^j az ionoszféra hatása az adott frekvencián. Végül v_{Φ_{k,L_n}^j} a fázistávolságok véletlen hibája.

A fázistávolság közvetítő egyenletének linearizált alakja felírható L_1 -re és L_2 -re is:

$$\begin{aligned} \Phi_{k,L_n}^j(t_i) = & -\frac{X^j(t_0) - X_k(t_i)}{\rho_k^j(t_0, t_i)} * \delta_x - \frac{Y^j(t_0) - Y_k(t_i)}{\rho_k^j(t_0, t_i)} * \delta_y - \frac{Z^j(t_0) - Z_k(t_i)}{\rho_k^j(t_0, t_i)} * \delta_z + c \\ & * \Delta t^j(t_i - \tau_k^j)_0 + c * \Delta t_k(t_i)_0 + \rho_k^j(t_i - \tau_k^j, t_i) - c * \delta t_k(t_i) + c \\ & * \delta t^j(t_i - \tau_j^k) + \lambda_{L_n} * N_{k,L_n}^j + F_k^j(t_i) + T_k^j(t_i) - I_{k,L_n}^j(t_i) + v_{\Phi_{k,L_n}^j}(t_i) \end{aligned} \quad (12)$$

Ha mindkét frekvenciára felírjuk ezeket és képezzük a különbségüket, akkor megfigyelhetjük, hogy L_4 független a vevő óra hibától, a műhold óra hibától, a geometriától (pályától, állomás koordinátáitól), a troposzféra hatásától, mert ezek mind kiesnek a különbségképzésnél. Ismeretlenként marad meg a ciklustöbbsértelműségek hatásának különbsége és az ionoszféra hatása valamint a két vivőfrekvencián tapasztalható fáziscentrum külpontosság eltérése is, de utóbbi a megfelelő antennamodellek alkalmazásával meghatározható.

Ha ismerjük az ionoszféra hatását az egyik frekvenciára (pl.: L_1), akkor a másikra (pl. L_2) már meg tudjuk határozni, mert az ionoszféra hatása a frekvencia négyzetével fordítottan arányos:

$$\gamma = \frac{f_1^2}{f_2^2} \quad (13)$$

Így az ismeretlenként maradó ionoszférakülönbség a két frekvenciára:

$$I_{k,L_n}^j * (1 - \gamma) \quad (14)$$

A ciklustöbbsértelműségek eltérésének hatása pedig:

$$N_{k,L_1}^j * \lambda_{L_1} - N_{k,L_2}^j * \lambda_{L_2} \quad (15)$$

Az ionoszféra okozta késleltetés felírható a (8) , (13) és (14) egyenletek alapján:

$$\begin{aligned}\Delta f_1^{Ionosz} &= -\frac{40,3}{f_1^2} * (1 - \gamma) = -\frac{40,3}{f_1^2} * \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}\right) = -40,3 * \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{f_1^2}{f_1^2 * f_2^2}\right) \\ &= -40,3 * \left(\frac{f_2^2}{f_1^2 * f_2^2} - \frac{f_1^2}{f_1^2 * f_2^2}\right) = -40,3 * \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}\right)\end{aligned}\quad (16)$$

Ezek szerint az L_4 lineáris kombináció:

$$L_4 = -a * \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}\right) * F_1(z) * E(\beta, s) + B_4 \quad (17)$$

Ahol $a = 4,03 * 10^{17} \text{ ms}^{-2} \text{ TECU}^{-1}$ egy konstans érték, $F_1(z)$ a ferdeségi szorzótényező, $B_4 = N_{k,L_1}^j * \lambda_{L_1} - N_{k,L_2}^j * \lambda_{L_2}$ pedig a ciklustöbbértelműségek hatását fejezi ki. $E(\beta, s)$ a vertikálisan integrált TEC modell (TECU), ami függ β -tól a geomágneses vagy földrajzi szélességtől és s -tól a Nap óraszögétől, amik ismert mennyiségek. Így L_4 -et méter egységben kapjuk meg.

A vertikálisan integrált TEC értékek függvényét ($E(\beta, s)$) a feldolgozószoftver gömbfüggvénytörő alakban határozza meg:

$$E(\beta, s) \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin\beta) * (a_{nm} * \cos ms + b_{nm} * \sin ms) \quad (18)$$

Ez a gömbfüggvénytörő közelítés használható a regionális és globális modellezés esetén is. A képletben $P_{nm}(\sin\beta)$ az n -ed fokú és m -ed rendű normalizált Legendre-függvény, a_{nm} és b_{nm} pedig a gömbfüggvénytörő együtthatók, amiket a szoftver a megadott fok és rend alapján a legkisebb négyzetek módszerével becsül a megadott feldolgozási időtartamra. Minél nagyobb időbeli felbontást szeretnénk elérni, annál több gömbfüggvénytörő együtthatót kell meghatároznunk egy-egy napon, így egyre több L_4 lineáris kombináció szükséges a feladat megoldhatóságához. A feldolgozás végeredményeképpen tehát előállítható a kiszámított gömbfüggvény együtthatók értéke, melyet a Bernese szoftver egy .ION kiterjesztésű fájlban tárol el. Emellett a szoftver a modell vertikálisan integrált szabad elektrontartalom értékeit egy szabályos globális lefedettségű rácsban is meghatározza, az eredményeket pedig az ionoszféra modellek szabványos adatcsere formátumában, az IONEX formátumban (Schaer és Gurtner (1998)) tárolja.

2.5. Az ionoszféra és a földmágneses nyugodt napi variációk

A földmágneses erőter nyugodt napi variációi a magaslégkörben folyó elektromos áramokra vezethetőek vissza (Völgyesi, 2011). A felsőbb légkör a Nap ionizációja miatt elektromos vezető. Ez a vezető réteg a légkör árapályszerű és hőmérsékleti mozgása miatt a Föld állandó mágneses teréhez képest elmozdul és a földmágneses erőter függőleges

összetevője benne elektromos áramot indukál. Ezek az áramok okozzák a napi rövid periódusú változásokat. Ennek színtere a legnagyobb vezetőképessége miatt az E-réteg. Az ionoszféra rétegeit amint napsugarak érik, a vezetőrétegek magassága csökken és az ionizáció – és ezáltal a vezetőképesség is – növekszik. Az ionoszférában indukált területi változások leírhatóak két örvényáram mágneses hatásával. Ezek az örvényáramok a Nap látszólagos mozgásával együtt vándorolnak.

3. A Nap

3.1. A Nap felépítése

A Nap felépítését az *Eötvös Lóránd Tudományegyetem Csillagászati Tanszék, ELTE interaktív csillagászati portál* (ELTE CsT, 2012) és *Völgyesi (2011)* szerint elemeztem. Naprendszerünk központi égiteste, éltető csillagunk a Nap. Viszonylagos közelsége miatt az egyetlen csillag, amelynek felületén lévő részleteket, változásokat megfigyelhetjük, vizsgálhatjuk. Fontosabb tulajdonságai: sugara $695990 \text{ km} = 109$ Föld-sugár, tömege $1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg} = 333000$ Föld tömeg, felszíni hőmérséklete 5770 K , míg a központi 15600000 K , kora $4,57 \cdot 10^9$ év. Felépítését tekintve elkülöníthetjük a napbelsőt és a nap külső tartományát. A napbelső négy régióból épül fel, ezeket a Napban lejátszódó folyamatoknak megfelelően különíthetjük el. Az energiatermelés a *magban* zajlik, ami a sugár negyedéig tart. Az energia a *sugárzási zónán* keresztül sugárzás - főképp gamma-, és röntgensugárzás - útján majd a *konvektív zónán* át konvekciós mozgásokkal jut el a felszínre. A Nap mágneses terének kialakításáért felelős a sugárzási és konvektív zóna közötti vékony átmeneti réteg, a *tachoklina*. A napbelső az átmérő 70%-ig tart.

Ezután található a külső tartomány, amely kifelé haladva négy részre osztható: fotoszféra, kromoszféra, kromoszféra-korona átmeneti réteg és korona. A *fotoszférából* - a Nap légkörének alsó részéből- származik a Nap sugárzásának döntő része; a "fényszférájának" is nevezik. Sűrűsége igen kicsi: 10^{-5} és 10^{-7} kg/m^3 között változik. A vékony - a Nap mérete mellett elhanyagolható, 350 km vastag- réteg hőmérséklete nem állandó, felfele haladva csökken 4500 K és 7500 K között mozog. Ezért van az, hogy nem egyenletesen fényes a fotoszféra, a napkorong széle sötétebb. A fotoszférában sok érdekes jelenséget fedezhetünk fel. Az itt megfigyelhető jelenségek: sötét napfoltok, fényes fáklyák, granulák, szupergranulák. A *kromoszféra* a fotoszféra felett elhelyezkedő 10000 km vastag gáztér, amin a teljes napfogyatkozás kivételével átlátunk. Egyetlen, inhomogén szerkezetű; alulról a 6000 K -es fotoszféra, felülről a 20000 K hőmérsékletű átmeneti réteg határolja. A réteg

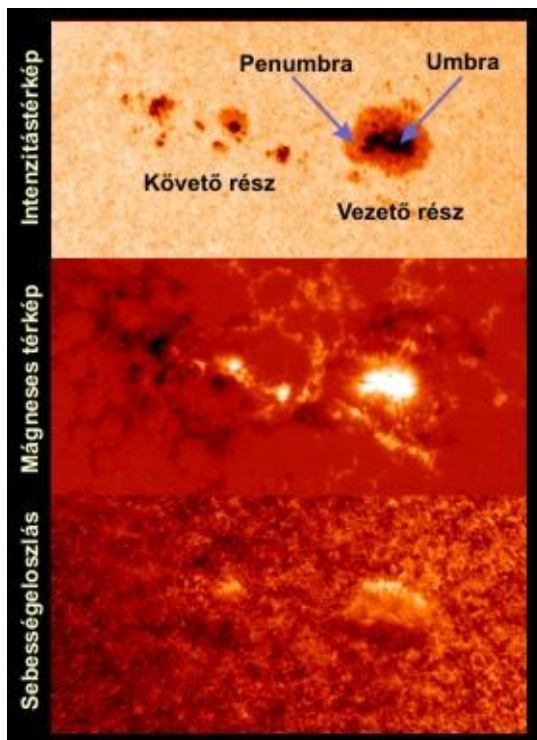
jelenségei: kromoszférikus fáklyák, kromoszférikus hálózat, napkitörések (fler), sötét filamentumok, protuberanciák és szpikulák. A *kromoszféra-korona átmeneti réteg* rendhagyó, mert a forró, millió fokos korona és a kromoszféra 20000 K-es hőmérséklete közötti átváltás néhány 100 km-en történik meg. A *napkorona* a naplégkör legkülső része, amely folyamatosan megy át napszélbe és bolygóközi térbe. Régebben csak a teljes napfogyatkozások alkalmával volt megfigyelhető, de ma már koronagráffal és a Föld légkörén kívüli űreszközökkel is lehetőség van a megismerésére. Sűrűsége nagyon kicsi, hőmérséklete viszont rendkívül magas: millió fokos, emiatt az atomok erősen izolált állapotban vannak és sok a szabad elektron. A fénye több összetevőből áll: K-, E- és F-koronáról beszélhetünk. Újdonság, hogy a légkörön kívüli észleléseknél a röntgenmegfigyelésekkel K-, E- és F-korona mellett X-korona is a felosztás része lett. A K-korona visszavert fényben világít, az E-t szinképpen lévő fényes vonalakról az F-t pedig a sötét elnyelési vonalakról nevezték el. Az F-korona nem tartozik a Nap légköréhez, bolygóközi térnek a lebegő porszemekről visszaverődő fénye.

3.2. A napfoltok és jelentősebb naptevékenységek

Már időszámításunk kezdete előtt felfedezték, hogy a Napon időnként sötét foltok láthatók. Majd a későbbi megfigyeléseknél újabb és újabb jelenségeket vettek észre a Napon, amelyek néhány hónaptól néhány percig terjedő széles időskálán mozognak. A változások összességét nevezzük naptevékenységnek. Ezeket az *ELTE CsT (2012)* *FÖMI (2012)* és *Völgyesi (2011)* alapján ismertetem. A Nap teljesen nyugodtnak csak ritkán, a naptevékenységi minimumok idején látható, ezeknek a napoknak a száma csak néhány hétre tehető. A földi élethez nélkülözhetetlen, hogy a Nap sugárzása nagyjából állandó legyen, a kis változások is beláthatatlan következményekkel járnak.

A *napfoltok* a fotoszféra naptevékenységei közé tartoznak. Az első feljegyzések a Nap sötét foltjairól i. e. IV. századból származnak, Arisztotelész tanítványától, Theophrastostól. Főleg keleti, rendszeres megfigyelések leírásai maradtak meg Kína, Korea és Japán területéről, Európából sajnos csak kevés. Az ókori amerikai csillagászatot kevésbé ismerjük, feljegyzések hiánya és a hódítások pusztítása miatt. A hosszú távú változások miatt fontosak ezek az adatok. Európában a napfoltmegfigyelések az 1610-es évek elején a távcső csillagászati alkalmazásával párhuzamosan történtek. Galilei távcsövének megépítése után Sidereus Nuncius című munkájában tette közzé az észlelt jelenségeket. A napfoltok megfigyelésének elsőségében Scheiner jezsuita páterrel került összetűzésbe. Galilei bizonyította, hogy a foltok valóban a Napon vannak, és azzal együtt forognak, nem pedig a

Napot takaró bolygók. Aztán Hale, a saját építésű műszereivel a napfoltoknak több fizikai jellemzőjét határozta meg. Felfedezte, hogy erős mágneses tér van a napfoltokban, amelyek a Föld mágneses terénél ezerszer nagyobbak. Mai álláspont szerint a napfoltok a fotoszférában úszó mágneses tér-koncentrációk, ahol a mágneses nyomás összeadódik a hidrodinamikai nyomással, ami 1500 K-es helyi lehűlést okoz. A napfoltok ezért tűnnek sötétnek a melegebb fotoszférában. Átmérőjük elérheti akár 200000 km-t is, élettartamuk néhány óra vagy akár több hónap is lehet. Általában csoportokban fordulnak elő, a Nap egyenlítőjével majdnem párhuzamosan és ebben az irányban megnyúltan. A foltcsoport legtöbbször bipoláris foltcsoport, mert két fő részre oszlanak, amelyet a csoport végén egy-egy nagy folt testesít meg a Nap forgási irányának megfelelően vezetőnek és követőnek elnevezve. Maguk a foltok is két részből tevődnek össze: a belső sötét homogén rész az umbra, ekörül van a világosabb, szálak szerkezetű penumbra (3.ábra). A naptevékenységet az aktív részeken a Nap felszíne alól feltörő nagy mágneses erővonalkötegek (fluxuscsövek) okozzák. A fotoszféra egy másik jelensége a fáklya, aminek a keletkezésében is a mágneses tér játszik szerepet, de itt sokkal gyengébb. Ezek a foltcsoport környezetében található fényesebb képződmények. A fáklyákban a napfoltokhoz képest a fotoszféra hőmérséklete kevésbé csökken a magassággal, ezért is láthatóak jól fehér fényben a napkorong pereme felé haladva.

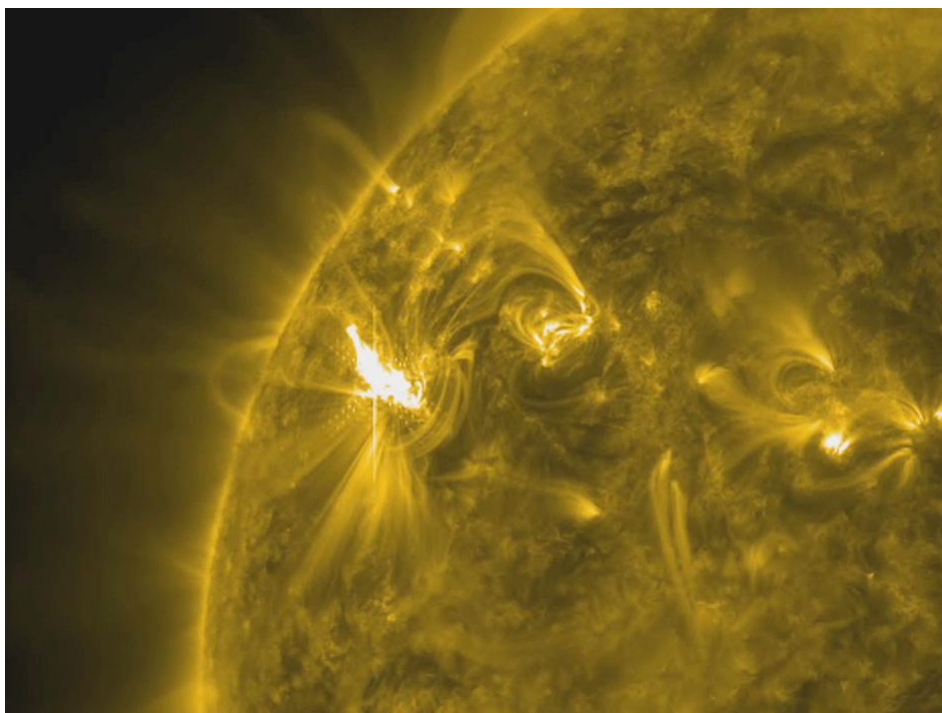


3. ábra: A napfoltok felépítése

ELTE CsT (2012)

A napfoltokat már időszámítás előtt ismerték, addig az első *napkitörés* megfigyelésére egészen a XIX. század közepéig várni kellett. Ezt az angol Carrington és Hodgson nevéhez fűződik. A jelenséget Carrington egy napfoltot rajzolva vette észre, két nagyon fényes foltot látott egy-két percig, majd elhalványultak, fél nappal később sarki fényt is észlelt. Optikai tartományban csak a napkitörés hidegebb, 10000 °C-os összetevőjét látjuk, míg röntgenmegfigyeléssel kiderült, hogy a Nap középpontjában lévőnél magasabb hőmérsékletek is lehetnek egy foltban, akár 70 millió °C is. A magas hőmérséklet mellett természetesen nagyon magas nyomás is szükséges a létrejöttükhöz. Csak aktív területek felett jönnek létre, kapcsolatban állnak a mágneses terekkel. Élettartamuk általában 7-40 perc. Az elektromágneses sugárzás a Nap és a Föld közötti távolságot percek alatt megteszi, de hatásai, a földi mágneses zavarok csak több óra vagy egy-két nap múlva érezhetők. Összefüggenek a napfoltokkal, gyakrabban fordul elő napkitörés a mágnesesen bonyolult foltcsoportnál és a nagyon közel lévő ellentétes polaritású umbrák esetén is. A napfoltok mágneses terének semleges pontjai felett láthatóak, gyakoriságuk is a napfoltokéval párhuzamos. Látványos jelenségek, egy-két óra alatt nagy, akár 10^{20} J energia is felszabadulhat (4.ábra). A jelenlegi elmélet szerint a napkoronában instabilitás alakul ki az ellentétes mágneses terek találkozásánál, ezek megsemmisítik egymást, a felszabadult energia pedig mozgási energiává alakul. Egy részük kifele létrehozza a részecskesugárzást, másik része az erővonalak mentén a kromoszférába csapódik.

A napkitörések során a napfoltok környezetéből jelentős mennyiségű töltött részecske távozik. Ezek a napszéllel érik el a föld mágneses terét és megzavarják egyensúlyát, akár geomágneses viharokat is okozhatnak. A napkitörések befolyással vannak a műholdas helymeghatározásra is. A műholdak távolságméréshez alkalmazott rádiójelei az ionoszférában haladva kölcsönhatásba lépnek az ott lévő szabad elektronokkal, ami jelkésleltetést eredményez. Ennek nagysága függ az ionoszférában lévő elektronok, ionok mennyiségétől. Az inicializálás is lassabb ilyenkor, csökken az RTK-s helymeghatározás megbízhatósága és egyes műholdakra teljes elvesztést is okozhat a napfolttevékenység hatása. Méréseinkre nézve veszélyes, hogy a napkitörések nagyon gyors elektronsűrűség-változást okozhatnak az ionoszférában, ami jelentős késleltetés változást. Ennek a modellezése a célunk.



4. ábra: Napkitörés 2012. március 5-én, a Nap aktív 1429-es területén
NASA (2012)

Megemlíthető még a napkitörések kísérőjelensége a *CME* (*korona-anyagkidobódás*). Az erővonalátrendeződések következménye lehet, hogy a mágneses fluxuskötegek elszakadnak felszíni részeiktől. Az elválásuk után a mágneses nyomással és erővonalak görbültségével már semmi sem tart egyensúlyt, és szabaddá válva nagyra duzzadnak, akár a napátmérő sokszorosára, majd hatalmas sebességgel eltávoznak. Az anyag akár egy milliárd tonna is lehet (ami megfelel a napszél általi negyedórás kibocsájtásnak), 20-1200 km/s-os sebességgel.

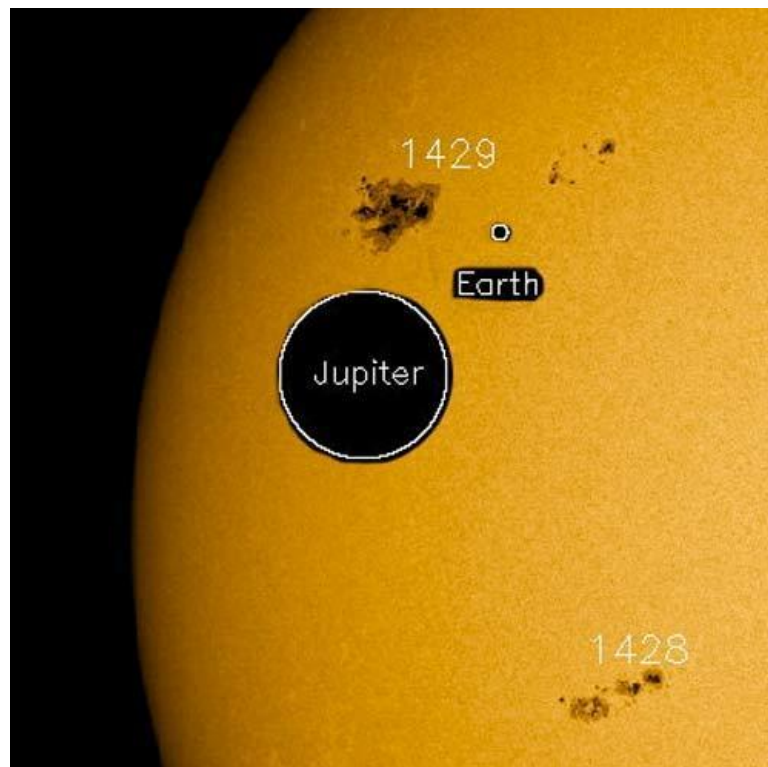
A koronában található jelenségek egyike a *koronahurok*, ami aktív területek közelében alakul ki. A zárt mágneses tér hatására alakul ki, a fotoszférához közeli aktív rétegekből a koronába nyúló ívek. Élettartamuk néhány nap vagy hét, de a napkitörés közelében lévők ennél is rövidebb életűek.

A *sarki fény* jelensége a sarki fény oválokban jelenik meg leggyakrabban, ahol a legerősebb áramok folynak a magnetoszférából az ionoszférába. A magnetoszféra a napszél által kialakult földi mágneses teret jelenti, ide a töltött részecskék csak két ponton a magnetopauza szakadásainál vagyis magnetoszféra külső határánál lévő semleges pontoknál juthatnak be. A magnetoszféra a Nap felőli oldalon zárt, míg a másik oldalon nyitott erővonalakból áll. Sarki fény oválnak nevezzük az ionoszférának azt a két karimaszerű zónáját, ami a nyitott és zárt erővonalak elválásánál és annak közelében található. Ez gazdag

geofizikai eseményekben, ezek a területek érzik meg legjobban az interplanetáris térben, vagyis a Napon lejátszódó eseményeket.

3.3. A napfolt-ciklus

A napfoltciklus részleteit *ELTE CsT (2012)* alapján mutatom be. Galilei után Scheiner, majd 1640-es években Hevelius végzett rendszeres foltészleléseket. Ezután majdnem 200 évig nem történt rendszeres megfigyelés. Majd a napfoltciklus és a naptevékenységek Földre gyakorolt hatásának felismerése lendületet adott, 1850-től folyamatosan észlelnék, ezt a feladatot látja el a napszolgálat, ami követi a Nap változásait. A napfoltciklus felismerése Schwabe nevéhez fűződik, aki 43 éven keresztül végzett napészlelést bolygókeresés miatt. Felfedezte, hogy nagyjából 10 évenként több napfolt van, de megállapítása csak Humboldt *Kosmos* című művében való közzététel után vált ismertté. 1848-ban R. Wolf bevezette a napfolt-relatívszámot a napfoltszám leírására, egészen 1700-ig visszamenőleg összegyűjtötte az adatokat, majd ezek segítségével egy pontosabb 11,1 éves időtartamot állapított meg. A maximumok magassága és a ciklus tartalma meglehetősen változó, érzékelhető még a gyors - 3-4 év körüli - emelkedés, majd a lassú csökkenés. 1650-1700 között pedig Maunder-minimum volt, ami rendellenesen alacsony naptevékenységet jelent. Mindezek által érezhető, hogy ez nem egy átlagos periodikus jelenség, hanem egy igencsak változó ciklus. Az újabb napfoltmaximum 2013 körül várható, ez adja téma aktualitását (*5.ábra*).



5. ábra: A március elején aktív 1429-es napfolt a Földhöz és a Jupiterhez viszonyítva
NASA (2012)

A *napfolt-relatívszám* képlete: $W = k \times (10 \times g + f)$, ahol g a foltcsoportok száma, f a napkorongon látható összes folt száma, k pedig egy hosszabb összehasonlítás után megállapított korrekciós tényező egy adott távcsőre és a megfigyelést végző személyre. Wolf után J. Eddy az 1700-as évek előtti napfoltmegfigyeléseket is összeszedve egészen Galileiig, az 1610-es évekig meg tudta határozni a napfolt-relatív számot. A relatívszámából létezik a leghosszabb megbízható adatsor, terjedelmes időszakok vizsgálatára is alkalmas, ezért sokan használják. Hátránya, hogy nem fizikai mennyiség, nem áll fenn egyenes arányosság közte és a Nap aktivitása között, de több obszervatórium adatai vagy hosszabb idő feldolgozásával kisimítható az ingadozása.

A napfolt relatívszám hátrányai miatt más mérőszámokat is alkalmaztak. Ilyen az évente közzétett heliografikus koordinátái valamint a látszó és valódi összterülete a napfoltcsoportoknak. Ezeket a Royal Greenwich Photo Heliographic Results tette közzé a kötetükben, a Nap rendszeres fényképezése alapján, amit 1874-1976-es időszakban hajtott végre. Magyar vonatkozás, hogy már korábban is besegített a kiadvány készítésében, majd azt 1977-től teljesen átvette a Nemzetközi Csillagászati Unió megbízásából a Magyar Tudományos Akadémia Csillagászati Kutatóintézetének Napfizikai Obszervatóriuma Debrecenben. A napfoltcsoport szélesség szerinti eloszlásának ábrázolásával kapjuk a *pillangódiagramot*, amelyből szabályszerűségeket, törvényeket vonhatunk le.

A napfoltokról készült *hosszútávú mágneses megfigyelésekkel* is hasonló szabályszerűségekhez, törvényekhez jutunk. Ezek a *Spörer-törvény*, *Hale-féle polaritásszabály* és a *Joy-törvény*. A Spörer-törvény leírja, hogy a foltok a kezdetben 25°-30°-os, a maximum idején 5°-35°-os és a végén 5°-10°-os szélességek mentén helyezkednek el. A Hale-szabály egy három szabályból álló szabálycsoport, a naptevékenység legfontosabb empirikus eredménye, eszerint a foltokat a mágneses terük polaritása jellemzi. Első, hogy a foltcsoportok vezető és követő része ellentétes polaritású, a második, hogy az egyik földgömbön mindig egy adott polaritás a vezető, a másikon pedig a másik az adott ciklusban, harmadik, hogy ezek a polaritásviszonyok a következő 11 éves ciklusban felcserélődnek. Ez a Hale-ciklus, ami egy 22 éves mágneses ciklus. A Joy-ciklus szerint a vezető és követő foltot összekötő egyenes valamekkora szöget zár be a Nap egyenlítőjével, nem párhuzamos azzal. Ez napfoltmaximumkor 11°, míg minimum esetén 3° körül alakul.

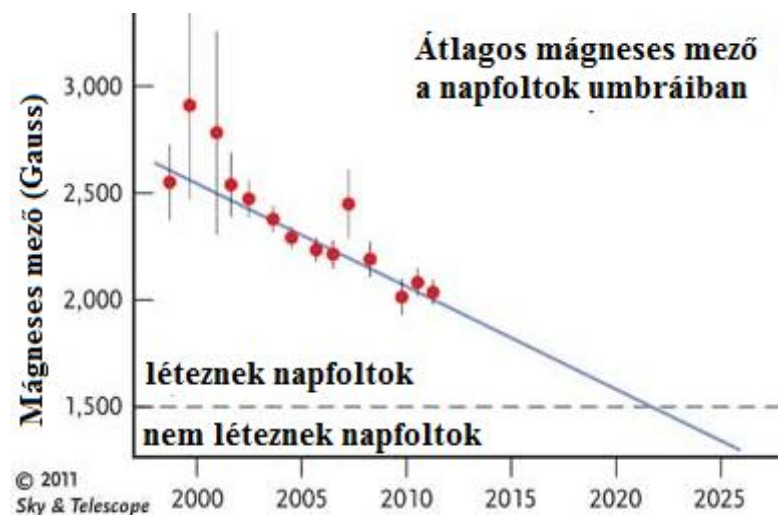
3.4. Eltűnőben a napfoltciklus

2011 júniusában az Amerikai Nemzeti Napfizikai Obszervatórium kutatói ismertettek a napfoltciklus erőteljes megváltozására utaló jeleket egy új-mexikói napfizikai konferencián

(Frey, 2011). Állításuk szerint a most zajló 24. ciklusban, amely körülbelül 3 évvel ezelőtt kezdődött, már csak fele annyi napfolt lesz, mint az előzőben. A következő ciklus, pedig lehet, hogy meg sem indul már. A naptevékenység maximum eltűnése könnyebbé tehetné a műholdak üzemeltetőinek és a műholdak felhasználóinak is, mert ezek károsíthatják a mesterséges holdak elektronikus berendezéseit vagy a földi elektromos hálózatot, ami modern társadalmunkban gondot okozhat. Más szakértők véleménye szerint viszont csak a napfoltciklus késéséről van szó.

Az, hogy a napfoltok lényegében teljesen eltűnnek a csillag felszínéről, nem lenne példátlan, a már említett Maunder-minimum 1650-1700 körüli időszaka is hasonló volt. Bár a szén 14-es tömegszámú izotópjának vizsgálata szerint a naptevékenység ciklikussága akkor is fennmaradt, csak alacsonyabb aktivitási szinten. Ugyanis a szén 14-es tömegszámú izotópja a kozmikus sugárzásnak köszönhetően keletkezik és kötődik meg a fákban. A Nap mágneses terének változásai befolyásolják a kozmikus sugárzás mennyiségét, így az évgűrűk vizsgálatával rekonstruálható a naptevékenység.

A napfoltciklus leállásának egyik jele a napfoltokban a mágneses tér erősségének folyamatos csökkenése (6. ábra). Az ábra az adatokat 1999-től tünteti fel, ami ha 2022-ig folytatódik, akkor a napfoltok eltűnnek. Más kutatók szerint egy évtizedes idősor adatai alapján nem vonható le ilyen messzemenő következtetés.



6. ábra: Egyes kutatók szerint a napfolttevékenység 2025-re eltűnik

Sky and Telescope (2011)

Felvetődik a kérdés, hogy egy újabb, Maunder-minimumhoz hasonló időszak jön-e? A Maunder-minimum alatt évente globálisan 0,2 °C átlaghőmérséklet csökkenés volt, míg Európában ennek ötszörösét is tapasztalták, ezt nevezték a kisjégkorszak idejének. Így talán a Nap nyugalma segíthet a globális felmelegedés ellensúlyozásában, lassításában. Ezek nem

bizonyított tények, de nagy érdeklődéssel várják a kutatók is a Nappal kapcsolatos történéseket.

4. A szabad elektrontartalom meghatározása GNSS adatokból

A következőkben az általunk végzett vizsgálatokat mutatjuk be, amelyek során GNSS adatokból a Bernese tudományos célú feldolgozószoftver segítségével meghatározzuk a szabad elektrontartalom időbeli és térbeli változásait intenzív napfolttevékenység idején.

4.1. Bernese 5.0 GPS szoftver

A Bernese jelentősebb alkalmazásait *Dach és társai (2007)*, *Tóth (2012)* és *Tuchband (2007)* segítségével ismertetjük. A Bernese a tudományos igényű feldolgozásokat támogató szoftvercsomag. Használják a kutatás, oktatás területén valamint nagy pontosságú, megbízhatóságú, kapacitású összetett alkalmazások esetén. Nagypontosságú GNSS mérések kiértékelését végezhetjük vele, megfelel külön-külön GPS és GLONASS adatok és ezek együttes vizsgálatára is. Alkalmas egy- és kétfrekvenciás információk és permanens állomások automatikus feldolgozására is. Nagyszámú vevőkészülék adatait tudja kezelni, különböző típusú vevők kombinációját is a fáziscentrumok külpontosságának figyelembevételével; a hálózatokban hosszú bázisvonalakat alakíthatunk ki, melyek hossza elérheti a 2000 km-t is. Alkalmas a troposzféra és ionoszféra folyamatos megfigyelésére és modellezésére. A műholdak pályáinak meghatározására, vevő és műhold órahibák előállítására és állomások koordinátáinak számítására egy adott időszakra vonatkozóan.

A szoftver alapja az 1988 márciusában elkészült 3.0-as változat, amit folyamatosan fejlesztettek, finomítottak; az 5.0-as változatát 2004 áprilisában hozták létre. A program használatában menürendszer nyújt segítséget. A feldolgozáshoz szükséges lépéseket külön, egymás után is elvégezhetjük, de automatizálhatjuk is a BPE (Bernese Processing Engine) segítségével. Ekkor az egymástól független folyamatok párhuzamosan is lefuthatnak, jelentősen lerövidítve ezzel a számítások idejét.

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

4.2. Felhasznált adatok

A feldolgozáshoz a Nemzetközi GNSS Szolgálat (IGS) és EUREF Permanens Állomás (EPN) hálózat adatait használtuk fel, március 4-18. időszakot vizsgálva. Ebben az időszakban

jelentős napfolttevékenység volt megfigyelhető, aminek a mérésekre gyakorolt hatását szeretnénk kimutatni a vizsgálatainkkal.

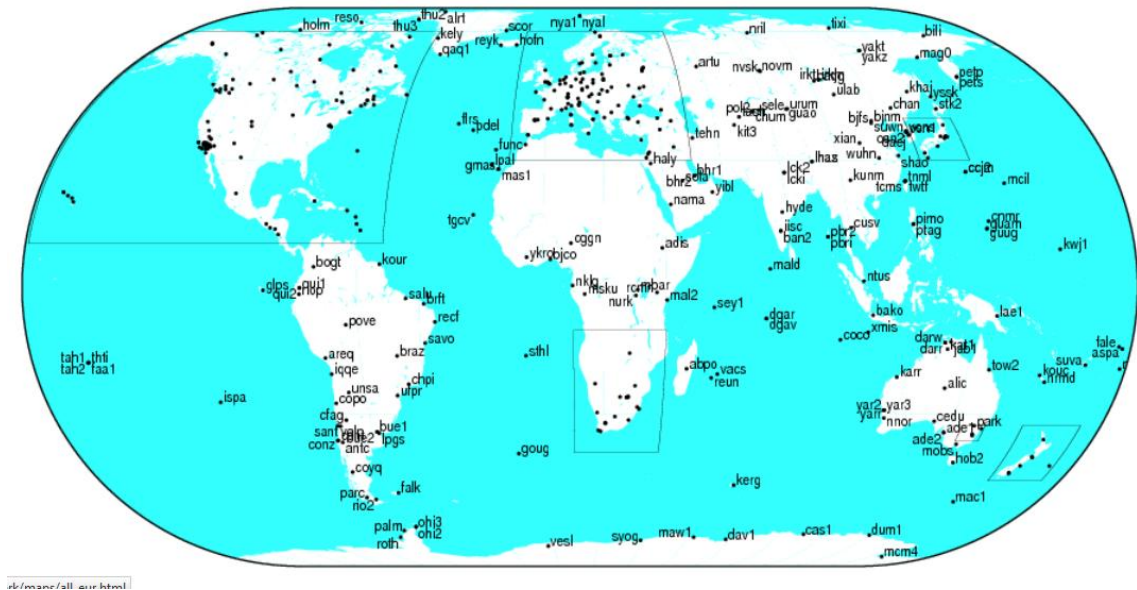


7.ábra: EPN hálózata

http://www.epncb.oma.be/_networkdata/stationmaps.php (2012)

Az EPN szerepet játszik az EUREF hálózat ETRS89 vonatkoztatási rendszerének fenntartásában és geodinamikai vizsgálatokban. 1995-ben kezdték el fejleszteni a hálózatot, ami azóta is folyamatosan bővül évente körülbelül 15 állomással. 2012. októberében 244 permanens állomás működött (7.ábra). Az EPN mérések alapján mindhárom koordináta pontossága 1 cm-es pontossággal, mérési időponttól függetlenül meghatározható, ez az elérhető legjobb pontosságú A-osztály az EUREF-nél. A méréseket több adatközpont gyűjti, majd 16 feldolgozó központ végzi a kiértékelést, egységes számítási elveknek megfelelően. Minden állomást legalább három központnak fel kell dolgoznia. Az EPN a globális, egész Földet lefedő Nemzetközi GNSS Szolgálat (IGS) európai sűrítő hálózatának tekinthető. Az IGS 1993-ban jött létre még Nemzetközi GPS Geodinamikai Szolgálat néven, a Nemzetközi Geodéziai Szövetség kezdeményezésére. Az IGS tagja a Csillagászati és Geofizikai Adatelemző Szolgálatok Szövetségének (FAGS) és együttműködik a Nemzetközi Földforgás és Vonatkoztatási Rendszerek Szolgálatával (IERS). Több mint 439 állomás alkotja, melyből 367 aktív (8. ábra). A mérési adatokat vagy regionális adatközpontok gyűjtik össze vagy óránként továbbítják. 2007 óta vannak már valós időben elérhető adatok is az interneten. Az adatokat 10 analízis központ dolgozza fel minden nap, ebből 4 Európában található;

különböző szoftverekkel a hibák kiszűrése miatt. Az IGS adatait, különböző szolgáltatásait különböző adatközpontokban érhetjük el.



8.ábra: IGS hálózata

<http://igsb.jpl.nasa.gov/network/complete.html> (2012)

A globális és regionális ionoszféra modell meghatározásához is kezdeti célkitűzésünk 80-80 permanens állomás kiválasztása volt. Ez az az adatmennyiség, amely még nem túl sok a felhasznált hardvernek és a programnak, de alkalmas, hogy valóságot jól modellező adatokat nyerjünk a feldolgozásból. A globálisan, egész Földre kiterjedően elhelyezkedő állomásokat az ingyenesen elérhető IGS állomások közül kerestük ki, míg a regionális, Európát lefedő hálózat alapja az IGS volt, (9. ábra) amit a szintén ingyenesen elérhető EPN állomásokkal sűrítettünk, ahol szükség volt rá. A kiválasztásnál figyelni kellett arra, hogy egyenletesen fedjék le az adott területet, ne legyenek üres helyek a hálózatban. A globális állomásoknál így szükséges volt az óceáni területeken lévő kis szigetek elhelyezkedő állomásokat is kijelölni, valamint az északi sarktól egészen a délig azonos sűrűségben lefedni a Földet, így 90 állomást választottunk ki. Az európai térségben közel 100 állomást jegyeztünk fel az IGS és EPN összefésülésével.

Az állomások elérhetők az alábbi oldalakon:

<http://igsb.jpl.nasa.gov/network/complete.html>

http://www.epncb.oma.be/_networkdata/stationmaps.php

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

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

A feldolgozáshoz az állomások különböző adataira volt szükségünk, amiket a német Kartográfiai és Geodéziai Szövetségi Hivatal (BKG) által fenntartott adatközpontból nyertünk, a GNSS Data Center-ből, amelyben az IGS adatok és termékek mellett az EPN adatai is elérhetőek. Innen töltöttük le az EPN és az IGS állomások tömörített mérési fájljait, valamint az IGS termékek közül a hetekre lebontott földforgás paramétereket és a precíz pályaadatokat. Mivel utóbbiakból kinyerhetőek a műhold órahibák, így ezeket nem volt szükséges külön letölteni. Ezek a kitömörítések és a Bernese-nek megfelelő fájltypus szerinti átnevezés után készen álltak a feldolgozásra. A fájlok letöltését, tömörítését, átnevezését a nagy mennyiségű adatmennyiség miatt egy programmal végeztük el.

5. A feldolgozás

A már említett BPE automatikus feldolgozással nyertük a szükséges adatokat. Ennek a futtatásához el kell készíteni a folyamat leíró fájlját, egy PCF fájlt. Az általa futtatott scriptek a következők (10. ábra):

POLUPD

Az IERS pólusinformációt konvertálja Bernese pólus formátumba.

PRETAB

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

ORBGEN

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

RXOBV3

A RINEX formátumú mérési fájlokat konvertálja bináris Bernese formátumra a kód és fázismérések esetén is. (CZH, CZO, PZH, PZO fájlok állomásokra)

CODSPP

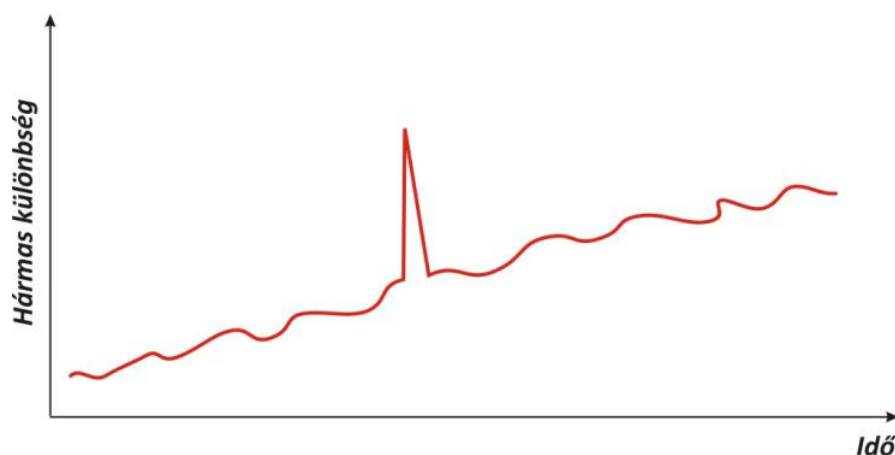
Felhasználja a műhold órahiba fájlt, sztenderd pályát, a pólusfájlt és a mérési fájlt. A vevőóra szinkronizációját végzi a GPS idővel és a kódérések feldolgozásával előzetes állomáskoordinátákat határoz meg, különbségképzés nélkül.

SNGDIF

Az állomások közötti bázisvonalakat állítja elő, egyszeres különbségképzéssel kiejti a műholdóra hibát. Létrehozza az egyszeres különbségfájlokat fázis és kódérés esetén. (CSO,CSH, PSH, PSO fájlok állomáspárookra) Az egyszeres különbség fiktív mérési eredmény, amit úgy kapunk meg, hogy a relatív helymeghatározásnál egy vektor két végpontján a vevőknek azonos időpontban és azonos műholdakra végzett észleléseit kivonjuk egymásból. Így kiesik a műhold órahiba és hardverkésés, de ismeretlenként maradnak a vevők órahibái és hardverkésései valamint a ciklustöbbértelműség is.

MAUPRP

Az egyszeres különbségeket, a pólusfájlt, az órahiba fájlt és a sztenderd pályát használja fel. A fázismérések előfeldolgozását végzi, előzetes koordinátákat hoz létre az hármas különbségképzéssel, így a ciklusugrások keresését és esetleges javítását végzi. Amennyiben a ciklusugrások javítása nem végezhető el, úgy a kimaradt ciklusokat követően új ciklustöbbértelműség paramétert illeszt az egyszeres különbségek fájljába. A hármas különbségképzéssel vizsgálhatjuk meg, hogy terheli-e ciklusugrás a méréseinket. Ez két egymást követő időpontban végzett kettős különbség eltéréseként határozható meg. Ezáltal a hármas különbségek nem tartalmazzák a ciklustöbbértelműségeket sem. Az idő szerint ábrázolva ciklusugrásmentes időszakban a hármas különbségeket, azok lassan változnak. Ciklusugrás esetén az egymást követő kettős különbségekben lévő ciklustöbbértelműségek nem egyeznek meg az egyik vagy a másik műholdra, ezért itt kiugró értékű lesz a hármas különbség (11. ábra). Majd a ciklusugrás után, az azelőtti értékhez hasonló értéket vesz fel, így megállapítható melyik mérési epocha tartalmaz ciklusugrást.



11.ábra: Hármas különbségek ciklusugrás esetén

Ádám és társai (2011)

GPSEST

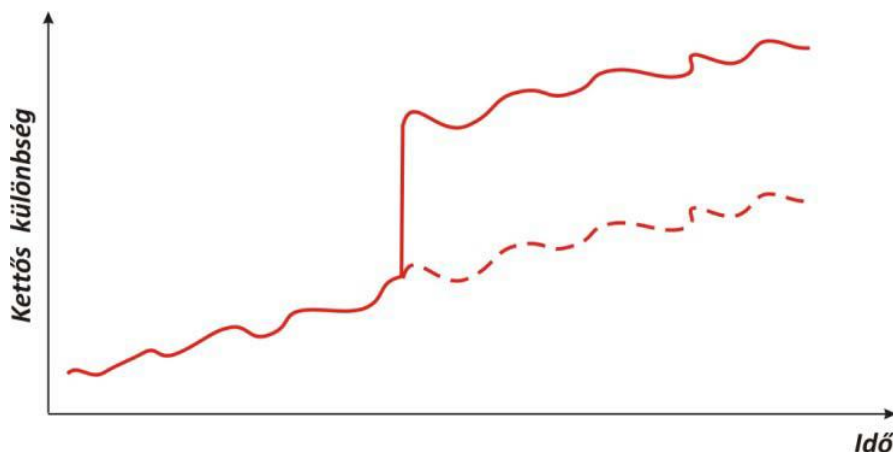
A paraméterek becslésével foglalkozik, mérések kiegyenlítésével. A paraméterek becslését a (12) egyenlet bármelyik tagjára elvégezhetjük, ez a nagy előnye a Bernese-nek az általános GPS feldolgozó szoftverekhez képest, ahol csak a koordináták határozhatóak meg. Ezt a scriptet különböző bemenő adatokkal kétszer futtattuk.

Mint ahogyan azt a 2.4.-es fejezetben láttuk, a fázistávolságok L_4 lineáris kombinációjának feldolgozásához szükségünk van a ciklustöbbsértelműségek ismeretére. Ezért első lépésben az L_1 és L_2 fázistávolságokon elvégezzük a ciklustöbbsértelműségek feloldását. Ehhez a kvázi-ionoszféra mentes (QIF) ciklustöbbsértelműség feloldási technikát alkalmaztuk a Bernese szoftverben.

Ezt követően a második lépésben az L_4 lineáris kombinációval az ismert ciklustöbbsértelműségek felhasználásával becsültük a vertikálisan integrált szabad elektrontartalom értékét.

GPSEST1

A cél a ciklustöbbsértelműség feloldása volt, amihez a kettős különbségeket használtuk. A kettős különbségeket úgy állítjuk elő, hogy vesszük két, ugyanabban az időpontban, de eltérő műholdakra meghatározott egyszeres különbség eltérését (12. ábra). Ekkor a ciklustöbbsértelműségek egész számok, nem foglalják magukba a vevők hardverkéséseit sem. Több epochában elvégezve a mérést a ciklustöbbsértelműségek számíthatóak.



12. ábra: Kettős különbségek ciklusugrás esetén

Ádám és társai (2011)

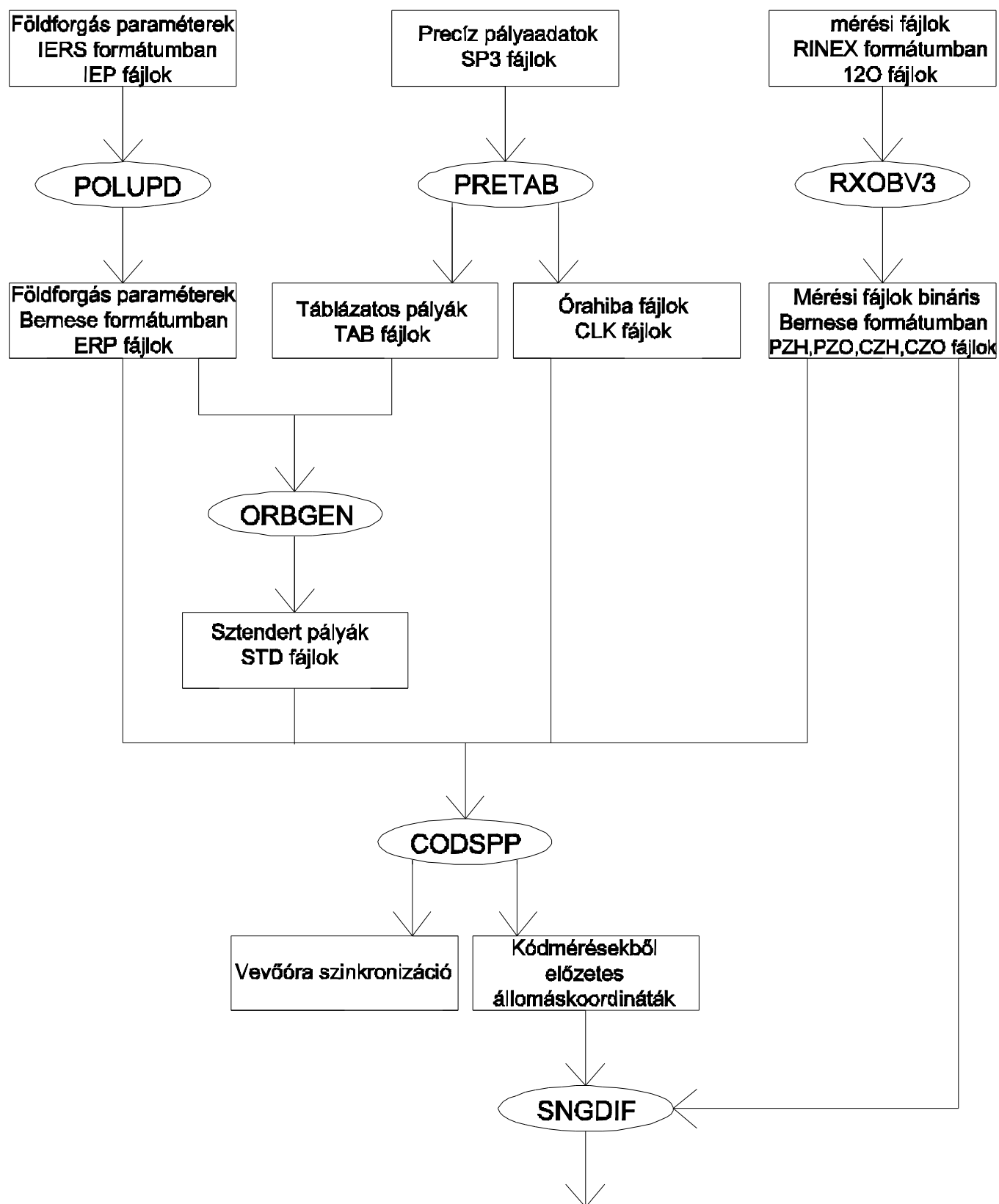
A GPSEST Felhasználja az egyszeres különbségeket, a sztenderd pályát, az állomások koordinátáit, a földforgás paramétereit, a műholdak hardverkéséseinek márciusra vonatkozó adatait. A ciklustöbbsértelműségek feloldását bázisvonalanként végzi el, amiknek első

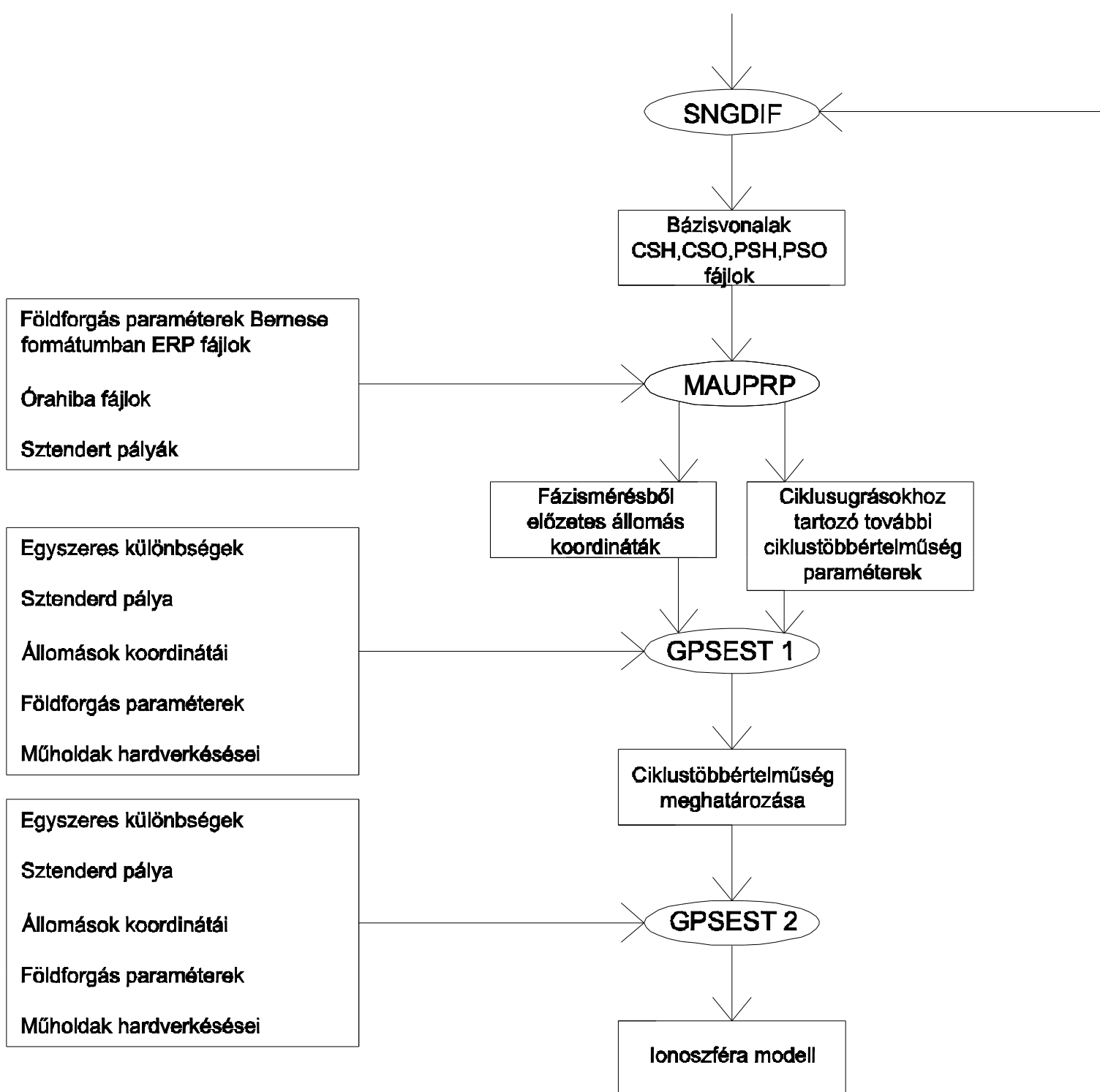
koordinátáját megköjtük. A QIF ciklustöbbsértelműség feloldási technika az L_1 -es és L_2 -es frekvenciákon végzi el a feloldást. A troposzféra hatásának 'a priori' modelljeként a Saastamoinen-modell hidrosztatikus késleltetését és a Niell leképezési függvényt használtuk fel, a nedves késleltetést 2 óránként becsültük az adatokból.

GPSEST2

Majd újra futtatva ezt a scriptet néhány módosítással meghatározhatjuk az ionoszféra modellt. Ez szintén az egyszeres különbségeket, a sztenderd pályát, az állomások koordinátáit, a földforgás paramétereit, a műholdak hardverkéséseinek márciusra vonatkozó adatait és még az előző futtatásból meghatározott ciklustöbbsértelműségeket használja fel. Ennek a számítása már az L_4 frekvencián történik, 2 órás felbontásban, 3 fokos magassági szög feletti műholdakat felhasználva, az állomások koordinátáinak megkötésével. Az ionoszférát 10 fokig és rendig felírt gömbfüggvénysorral modelleztük. Először 12 fokú és rendű gömbfüggvénysorral próbáltuk ki a számítást, de ekkor torzított eredményt kaptunk, ahol nem volt állomás adatunk, oda nem illő eredményt mutatott. Az eredmény pedig a 2.4.-es fejezetben már említett gömbfüggvény együtthatók egy-egy ION fájlban és a vertikálisan integrált szabad elektrontartalom értékei egy szabályos lefedettségű rácsra vonatkozóan egy-egy IONEX fájlban (*Schaer és Gurtner (1998)*) a vizsgált időszak napjaira lebontva. A globális modell egy napjának számítása 2,5 óra alatt futott le, a regionális modellnél ez szintén hasonló időtartamot igényelt.

Feldolgozás Bernese 5.0 GPS szoftverrel





10. ábra: A Bernese 5.0 GPS szoftverrel való feldolgozás folyamatábrája

6. A feldolgozás eredménye

A Bernese-vel megalkotott globális és regionális ionoszféra modell adatait külön-külön a vizsgált napokra vonatkozó IONEX fájlokban kaptuk meg, mindösszesen 14-14 db adatsort. Ezek az adatok - rácshálóként lefedve a megfigyelt területet - tartalmazzák a négyzetméterre vonatkoztatott elektronszámot, TEC egységet. A fájl első része a fejléc, ahol a fontosabb információkat találhatjuk meg: többek között azt a magasságot, amely magasan lévő gömbhéjra integrálva képzeljük el az elektronokat (450km); azt a két mérési epochát, melyek meghatározzák a felhasznált GNSS mérések kezdeti-, és befejezési időpontját; a rácshálónak a szélességi és hosszúsági kiterjedését fokokban megadva, a Bernese futtatás időpontját és a

1												START	
OF TEC MAP													
2012	3	4	0	0	0								EPOCH
OF CURRENT MAP													
87.5-180.0		180.0	5.0	450.0									
LAT/LON1/LON2/DLON/H													
123	124	124	123	123	122	120	119	117	115	112	110	108	
106	105	103											
102	102	102	102	103	103	105	106	107	109	110	111	113	
114	115	115											
116	116	117	117	117	117	116	116	116	116	115	115	115	
115	114	114											
114	114	114	114	113	113	113	113	114	114	114	114	114	
115	115	116											
117	117	118	119	120	121	122	123	123					
85.0-180.0		180.0	5.0	450.0									
LAT/LON1/LON2/DLON/H													
214	225	233	238	240	238	233	224	212	198	182	164	147	
131	116	103											

13. ábra: IONEX fájl törzsrészének egy részlete

felhasznált permanens állomások, műholdak számát. A programban alkalmazott állomások száma azért változhat az IONEX fájlokban, mert nem biztos, hogy minden nap az összes állomás felhasználható volt. Lehet, hogy néhány kiesik, így volt olyan, hogy a globális modellezésnél 70 helyett szélső esetben 67-et, míg regionálisnál 82 helyett csak 79-et alkalmazott a Bernese.

A fájl törzsrészében (13. ábra) van a két óránként megállapított elektronszám a rácsháló minden pontjára. A lefedett területet a két áttelnes sarokpontjának ellipszoidi földrajzi koordinátaival és az észak-déli irányú rácsfelbontással adhatjuk meg. A háló pontjait

négy szögadattal – sorban a nyugati, keleti, déli és északi – jellemezhetjük. A rácsfelbontás szerint nyugat-keleti irányban 5 fokenként, míg észak-déli irányban 2,5 fokenként változnak a szögek. A hálót úgy állítja elő a Bernese, hogy a legészakibb pontból kezdve végighalad kelet fele a területen 5 fokenként, majd délre ugrik 2,5 fokot és ismét kelet fele mozog 5 fokenként és így tovább. Ezeket az adatsorokat használhattuk fel a szemléletes ábrák, diagramok elkészítéséhez és a következtetések levonásához.

A nagy mennyiségre való tekintettel egy erre írt programmal gyűjtöttük ki az adatokat az IONEX fájlból. Ennek eredményei az előállított .grd fájlok. Ezek 3 oszlopot tartalmaznak: szélességi és hosszúsági fokokat és a kiszámított TEC egységet (14.ábra). Ezeket használtuk a GMT programban (Wessel és Smith (1998)) a .gmt fájlok előállításához, ehhez meg kellett adni épp melyik grd fájlal foglalkozunk, négy fokértékkal a vizsgált területet, a rácsfelbontást, a létrehozandó fájl nevét. Az eredményeink ellenőrzéséhez letöltöttük az IGS napi ionoszféra

87.5	-180.0	-1.6
87.5	-175.0	-1.6
87.5	-170.0	-1.5
87.5	-165.0	-1.5
87.5	-160.0	-1.5
87.5	-155.0	-1.4
87.5	-150.0	-1.4
87.5	-145.0	-1.3
87.5	-140.0	-1.3
87.5	-135.0	-1.3
87.5	-130.0	-1.2
87.5	-125.0	-1.2
87.5	-120.0	-1.2
87.5	-115.0	-1.1
87.5	-110.0	-1.1

megoldásait. A .gmt fájloknak és az IGS által meghatározott ionoszféra adatokból származó .gmt fájloknak az összehasonlítására, képeztük a különbségüket

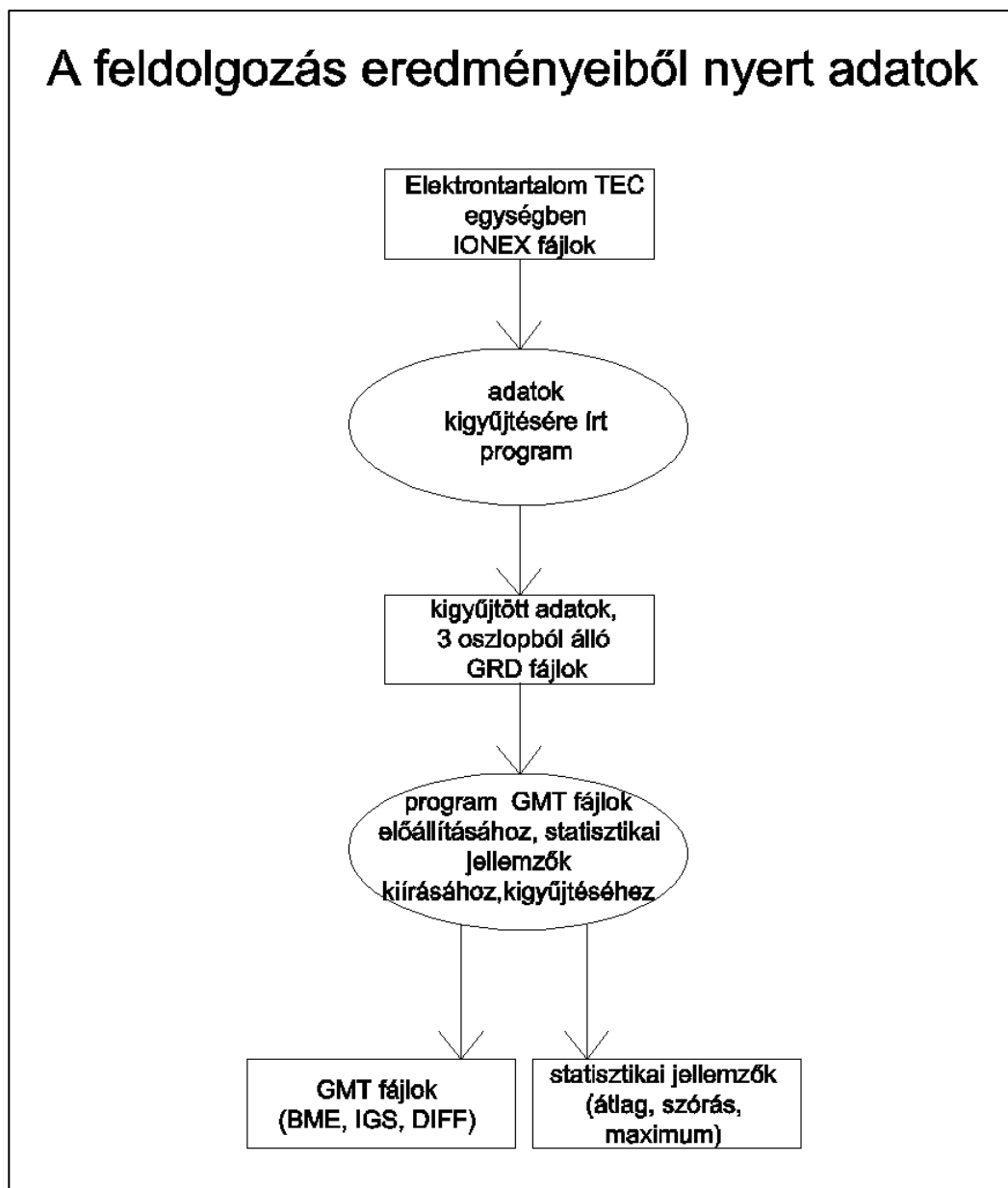
a GMT *grdmath* paranccsal, létrehoztuk a DIFF-nek nevezett .gmt fájlkat. Majd a GMT *grdinfo* nevű parancsának segítségével kiírathatjuk a már létrehozott fájlok rácselemeinek statisztikai jellemzőit: átlagértéket, szórást és maximum értéket, de ezek sok számunkra lényegtelen szöveges részt is tartalmaznak (15. ábra).

14. ábra: Ionex fájlból kigyűjtött grd fájl egy részlete

```
BME201203040000.gmt: Title: BME201203040000.gmt
BME201203040000.gmt: Command: xyz2grd -R-180/175/-87.5/87.5 -I5/2.5 -: -GBME201203040000.gmt
201203040000.grd
BME201203040000.gmt: Remark:
BME201203040000.gmt: Gridline node registration used
BME201203040000.gmt: Grid file format: nf (# 18) GMT netCDF format (float) (COARDS-compliant)
[DEFAULT]
BME201203040000.gmt: x_min: -180 x_max: 175 x_inc: 5 name: x nx: 72
BME201203040000.gmt: y_min: -87.5 y_max: 87.5 y_inc: 2.5 name: y ny: 71
BME201203040000.gmt: z_min: -0.899999976158 z_max: 79 name: z
BME201203040000.gmt: scale_factor: 1 add_offset: 0
```

15. ábra A statisztikai jellemzőket tartalmazó .gmt fájl egy részlete

Az előző lépéseket minden vizsgált 2 órás időpontra el kellett végezni, ezeket egy program segítségével gyorsíthatjuk, amivel az összes GMT-ben számítandót elvégezhetjük és az ezzel létrehozott *grdinfo* fájlban a statisztikai jellemzői közül is hivatkozunk azokra az oszlopokra, amelyek számunkra hasznosak, így csak azokat gyűjtjük ki, a teljes időszakra vonatkozóan. A .gmt fájlokat használtuk a térképen való megjelenítésre és a statisztikai jellemzőkkel Excel segítségével pontdiagramokat készítettünk. Minden statisztikai jellemzőt - átlagértéket, szórást és maximumot is - ábrázolhatunk a saját eredményeinkre (BME előtaggal jelöltük), az IGS-es referenciamodellre (IGS előtaggal jelöltük) és a kettő különbségére vonatkozóan (DIFF előtaggal jelöltük) (16. ábra).



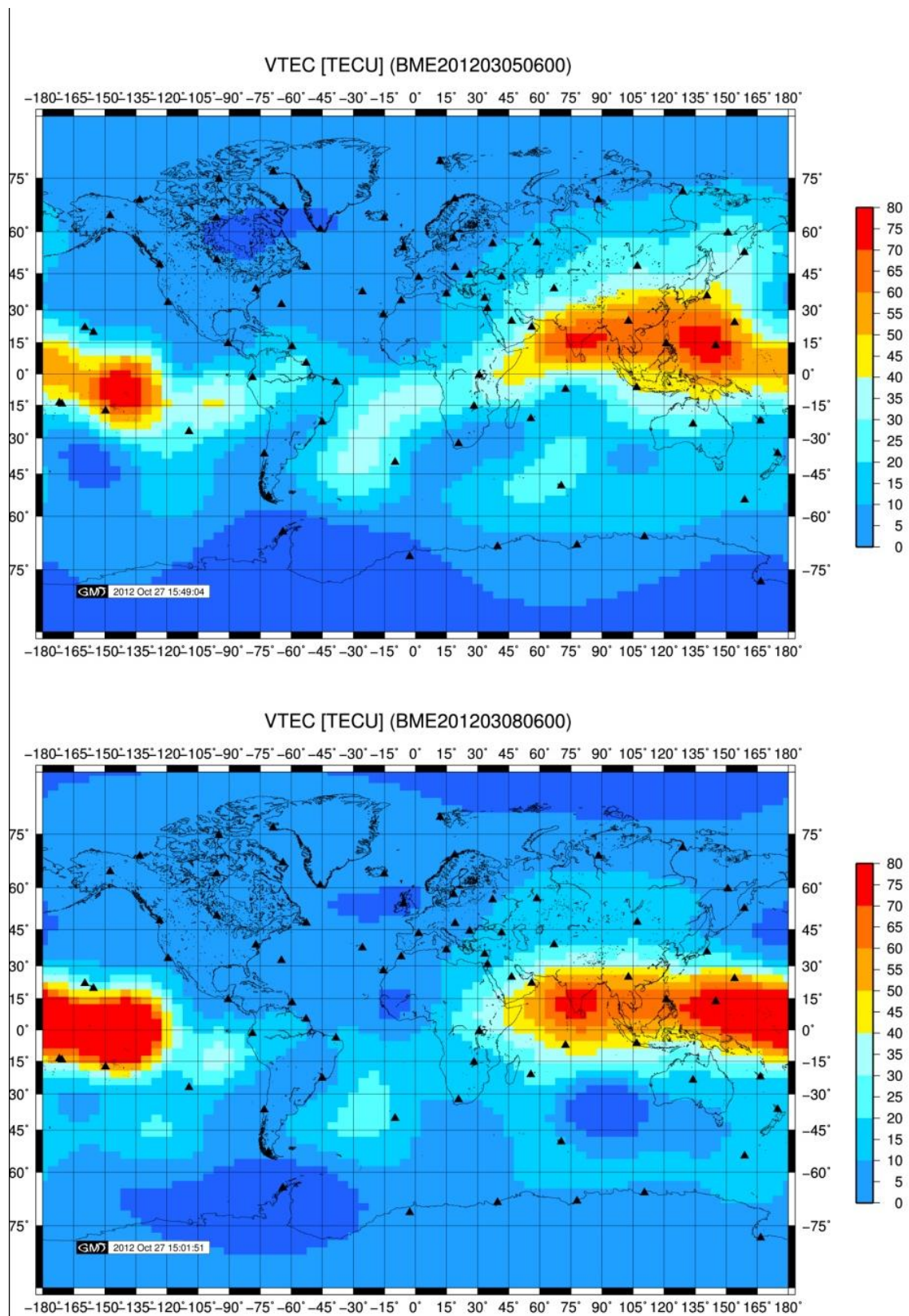
16. ábra: A feldolgozásból nyert adatok folyamatábrája

7. Az eredmények ábrázolása

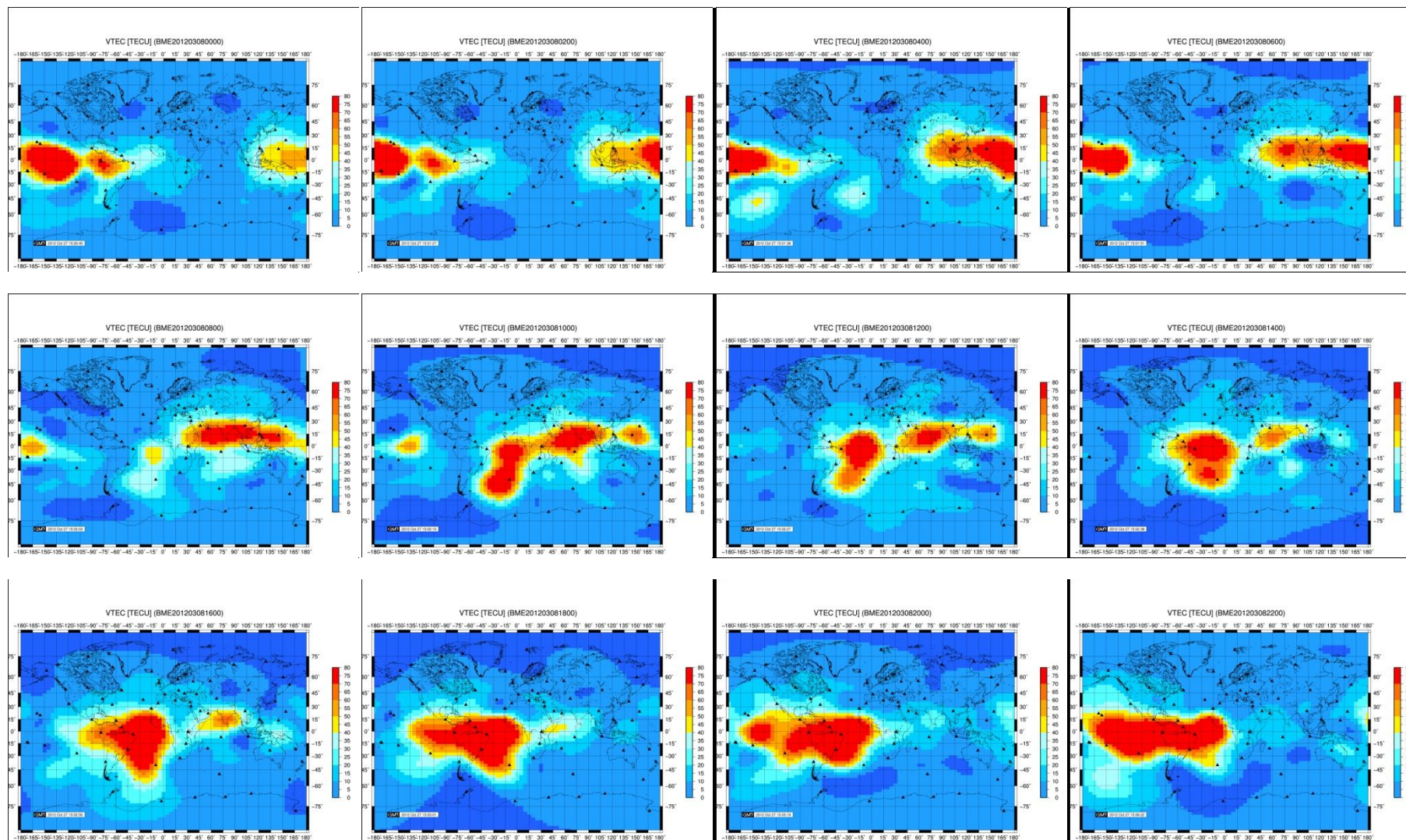
A GMT programmal (Wessel és Smith (1998)) elkészített térképeken feltüntettük a felhasznált permanens állomásokat. A kép címében a VTEC [TECU] mutatja, hogy amit ábrázolunk, az a vertikálisan integrált szabad elektrontartalom értéke TEC egységben. A címben találhatjuk azt is, hogy milyen időpontra vonatkozik a 2 óránként elkészített térkép, például a BME201203080400 2012. március 8. hajnali 4 órás ionoszféra modellt szemlélteti. A térképeken ábrázoltuk a síkba terített teljes Földet, a szélességi és hosszúsági köröket 15 fokonként tüntettük fel. Oldalt a térkép mellett található a TEC egységeket 0-tól 80-ig tartalmazó skála, amelynek színe 10 egységenként változik. Kezdetben sötétebb kék, ami a

skála emelkedésével világosodik, majd a 40-es egységtől már a sárga árnyalatainak sötétítésével jelöli az értékek növekedését. Az eredményeket a 6. fejezetben már említett nyugat-keleti irányban 5 fokos, észak-déli irányban 2,5 fokos felbontású rácsháló pontjainak értékeivel ábrázoltuk. Ez látható a színek változásánál, hiszen nem folyamatos az átmenet, hanem $5 \times 2,5$ fokos téglalapokból áll össze a kép.

A *globális modell térképei* az egész Földre tartalmaznak értékeket. Megfigyelhetjük, hogy akármelyik órára vonatkozó képen az Egyenlítő mentén található a legnagyobb szabad elektrontartalom. Sőt a térképek egymás után való vetítésével látható, hogy ez a maximum a Nap látszólagos mozgásának megfelelően vándorol az Egyenlítő mentén. Ez megfelel annak, amit a 2.2.-es fejezetben megfogalmaztunk, hogy a TEC értékek gradiensei közepes szélességeken sokkal kisebbek, mint az Egyenlítőhöz közeli területeken vagy a pólusokon. Az is megvizsgálható, hogy azokon a területeken ahol nem volt elég sűrűn vagy egyáltalán nem volt felhasználható permanens állomás - főleg a déli féltekén figyelhető ez meg - torzított eredményt kaptunk. Ilyen például a maximum közelében található minimum (BME201203080200, BME201203080600, BME201203081000, BME201203081400, BME201203081800, BME201203082200) vagy pedig olyan helyen lévő maximum, ami már túl délre esik az Egyenlítőtől (BME201203080400, BME201203081600). A 2012. március 5-én a napfolttevékenység után bekövetkező napkitörés hatása március 8-án a reggeli órákban volt a legjobban érezhető, ezért mutatom be a március 8-án lévő szabad elektrontartalmakat ábrázoló 2 óránkénti térképeket (18. ábra). Ezeket a térképeket egy nyugodt nap térképeivel összehasonlítva láthatjuk, hogy ekkor magasabb az elektrontartalom, nagyobb területre terjed ki a legmagasabb TEC egység is (17. ábra).

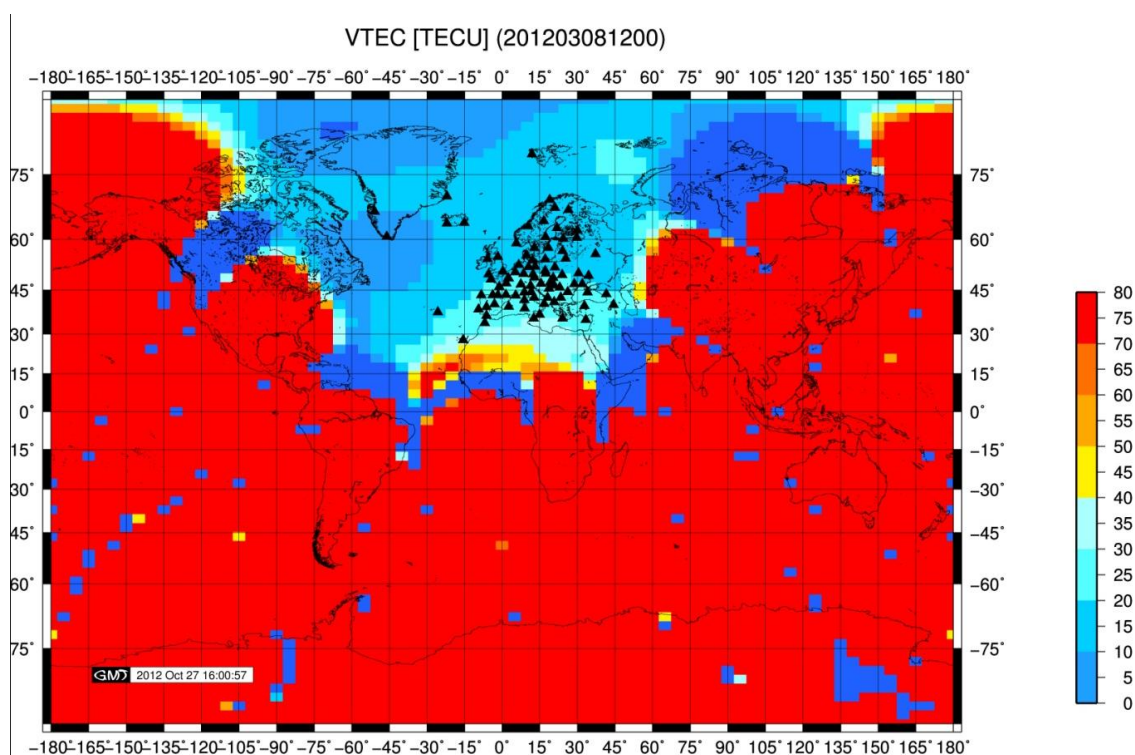


17. ábra: Globális modellezés eredményei 2012. 03. 06-án és 2012. 03. 08-án 6 órakor



18. ábra: A globális modell 2 óránként előállított térképei 2012. 03. 08.

A regionális modell térképei is az egész Földet tartalmazzák, de a valós TEC értékeket csak a permanens állomásokkal lefedett területen és annak szűkebb környezetében kapunk. A kép nagy részén lévő maximumérték nem reális és az abban lévő minimumértékek sem, az állomások hiánya miatt ábrázolja így a program. Megállapítható, hogy a déli területek felé növekszik a szabad elektrontartalom, a 15 fok körül elhelyezkedő maximum még valós. A térkép a regionális modellre viszont a megfelelő állomássűrűség miatt pontosabban ábrázolja a változásokat (19. ábra). Az ábrán első ránézésre nem látható, hogy a napkitörés hatására az Európa feletti ionoszférikus aktivitás jelentősen megnőtt volna. Ennek egyik oka, hogy a vizsgált terület meglehetősen messze található az Egyenlítőtől.

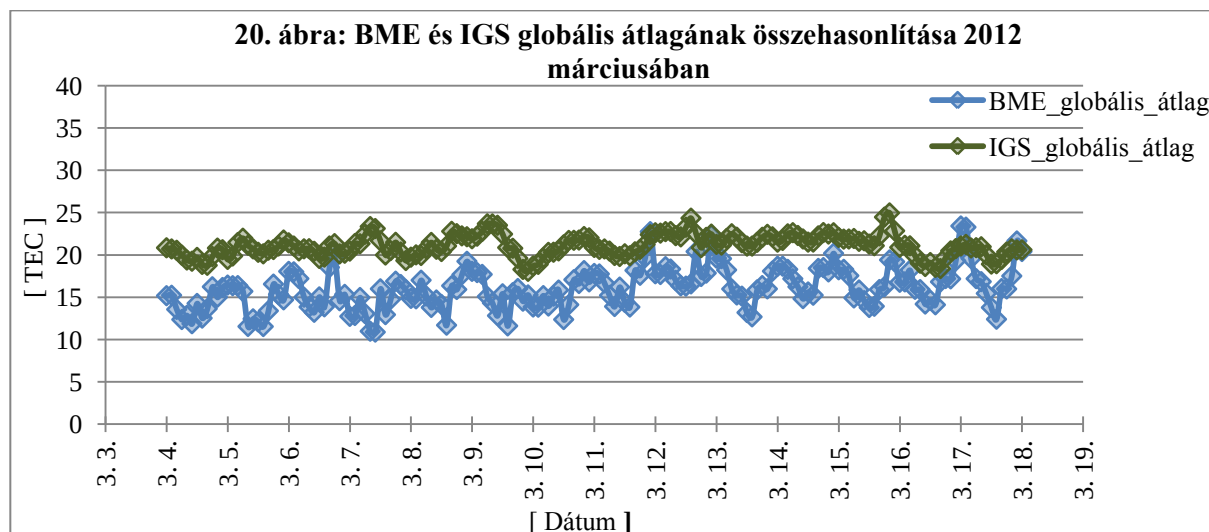


19. ábra: A regionális modell 2012.03.08-án 12 órakor

A 6. fejezetben már bemutatott módon nyert statisztikai jellemzőkből - átlag, szórás és maximum - Excel segítségével pontdiagramokat készítettünk. A regionális és globális modellek esetében is ábráztuk a saját számításaink statisztikai jellemzőit, valamint ugyanezeknek az IGS által számított eredményeit is. A 6. fejezetben már említett BME és IGS fájlok összehasonlítására GMT-ben grdmath paranccsal létrehozott DIFF fájloknak a jellemzői is megjelenítettük. Ezen kívül a broadcast pályák GPS méréseinek átlagát, szórását és maximumát is összehasonlítottuk a globális és regionális eredményeinkkel. Ezeken a pontdiagramokon ábráztuk a 2 óránkénti eredményeket, a vízszintes tengelyen a dátumot tüntettük fel, míg a függőlegesen a szabad elektrontartalmat. A TEC egységeket azonos

terjedelmű skálákon ábrázoltam, hogy könnyen összehasonlíthatóak legyenek az értékek. A továbbiakban ezeknek az idősoroknak a vizsgálatát foglalom össze.

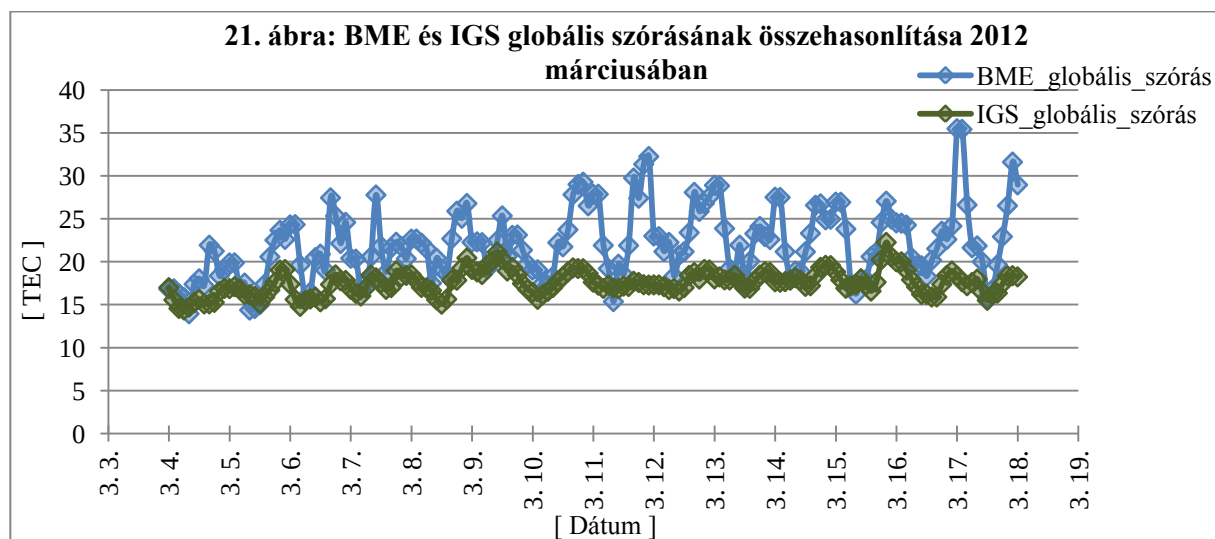
A *globális idősorok* alapján a napi változások nem mutathatóak ki, több emelkedő és csökkenő részt is tartalmaz egy nap alatt a modellünk átlagértékeinek pontdiagramja. Látható, hogy ehhez képest a globális IGS adatokból előállított átlagérték-idősorok kevésbé ugrálnak, ennek oka, hogy több állomást használtak fel, teljesen lefedték a területet és azok több feldolgozás átlagaként kapott eredmények. Nemcsak a változásuk, hanem értékük is eltér egymástól, átlagosan 5 TEC egységgel magasabb az IGS eredménye (20. ábra). Az idősorainkat elemezve nem látható, hogy a napkitörés jelentősen megnövelte volna a szabad elektrontartalom globális átlagértékét. Ennek az az oka, hogy a hatás csak egy kis területre terjedt ki az Egyenlítő mentén, így a globális átlagokban ez a hatás elenyésző.

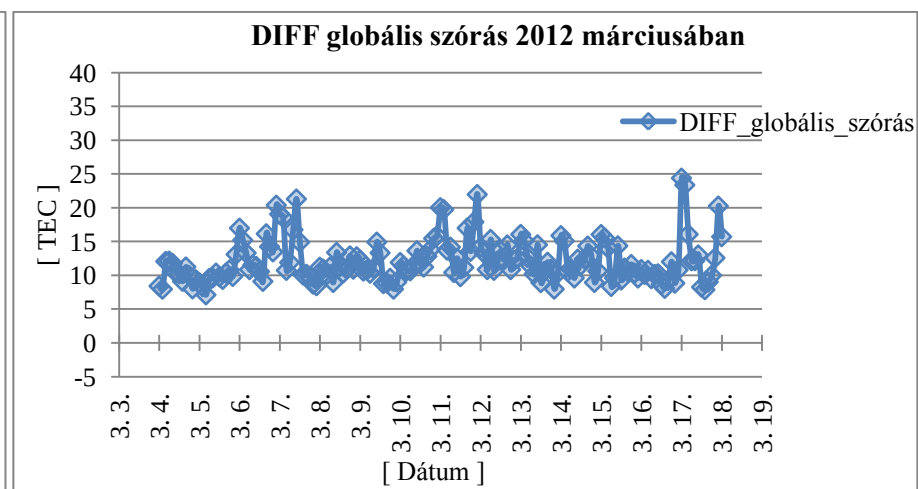
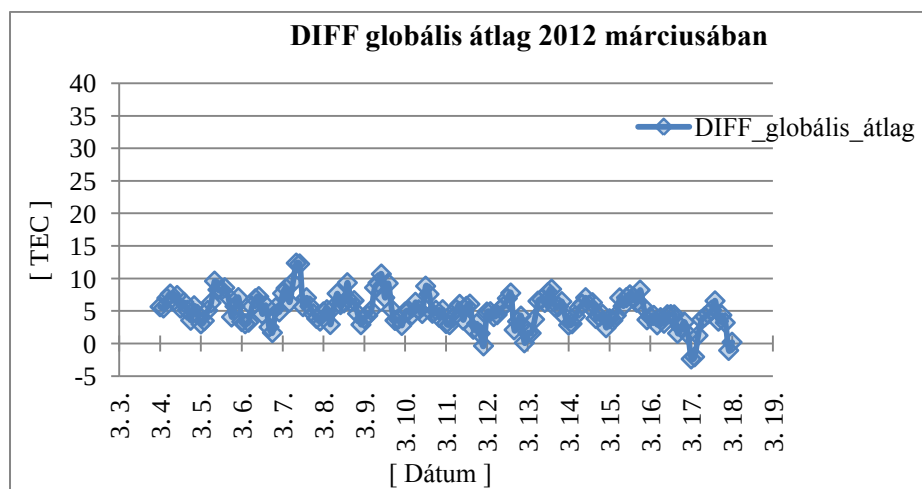
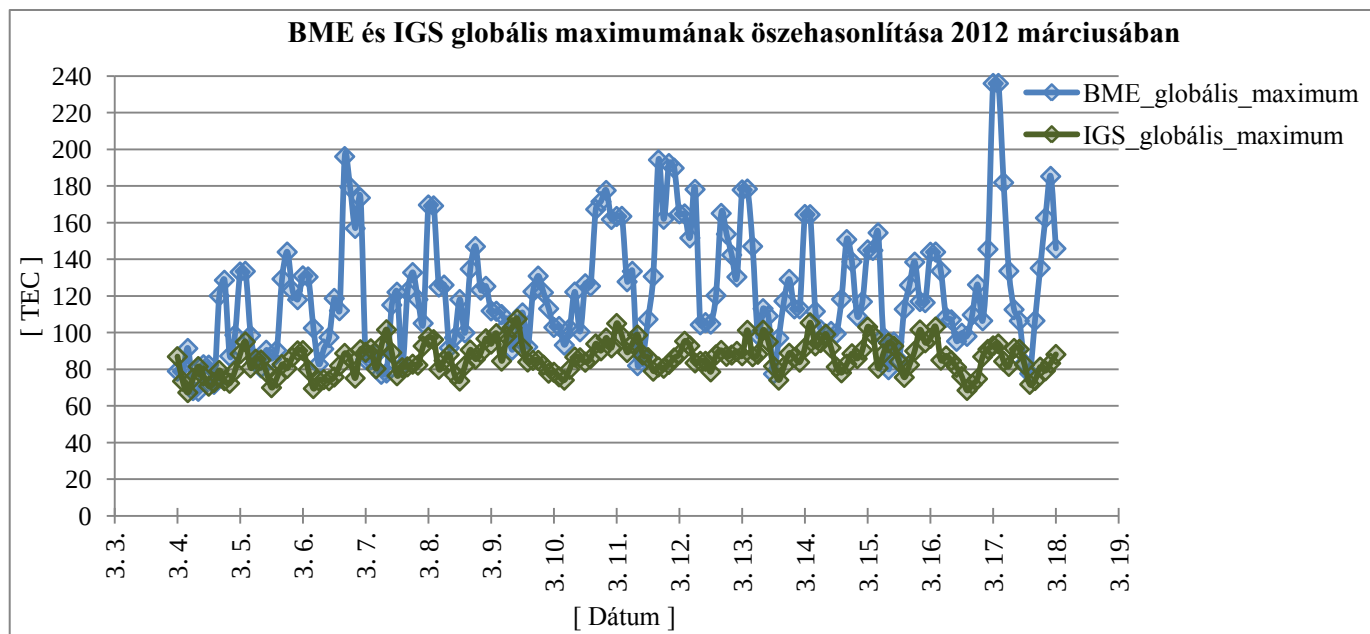


Az előbbi két különbség a maximumoknál is megfigyelhetők. Már az átlagértékeink nagy változásából következtethetünk, arra hogy eredményeink szórása is nagy lesz, nagyobb, mint az összehasonlításként használt IGS méréseké (21. ábra). A DIFF idősorokon pedig az IGS és saját méréseink statisztikai jellemzői közötti különbségeket tanulmányozhatjuk, nagyobb különbségek jelentkeznek a 7-8. időszak körül az átlag és a szórás esetében is (22. ábra).

A nagyon magas differenciák- a reális TEC értékek kétszerese- a lokális maximumok melletti nem valós lokális minimumokkal magyarázhatóak. Ennek megoldása lehet a még alacsonyabb fokú és rendű gömbfüggvény használata az ionoszféra modellezésnél vagy még további állomások felhasználása. Mivel utóbbi már a feldolgozás kezdetén is nehézségeket okozott, ezért a fok és rendszám csökkentése lenne célszerű. A valótlan minimumokkal magyarázható az átlagértékek eltérése is, hogy a BME átlagai alacsonyabbak, mint az IGS

eredményei. Továbbá ugyanez okozza a szórások különbözőségét is, hogy a BME szórásai nagyobbak, mint az IGS szórásai.

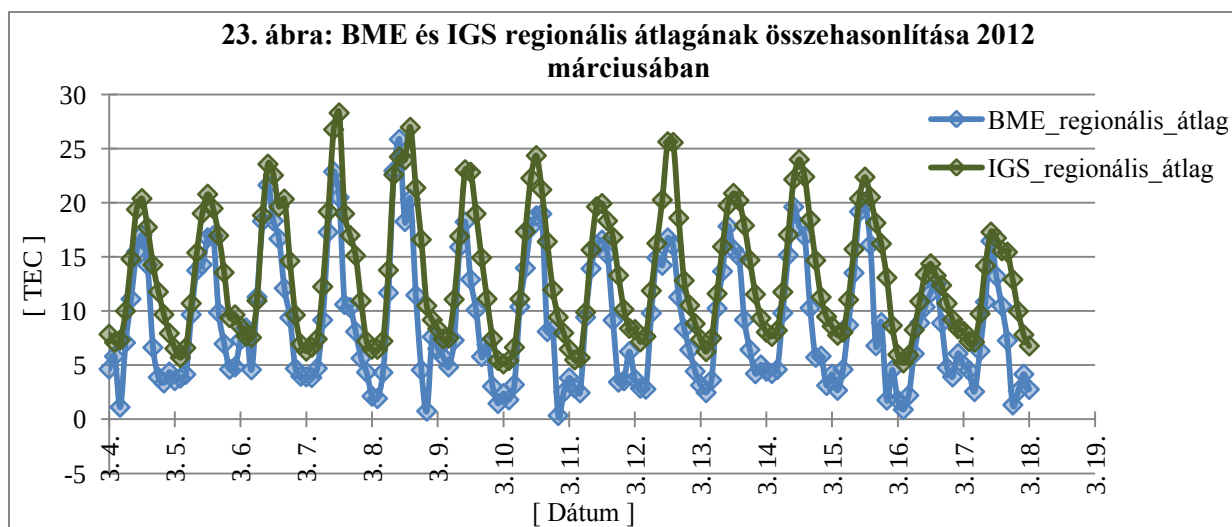




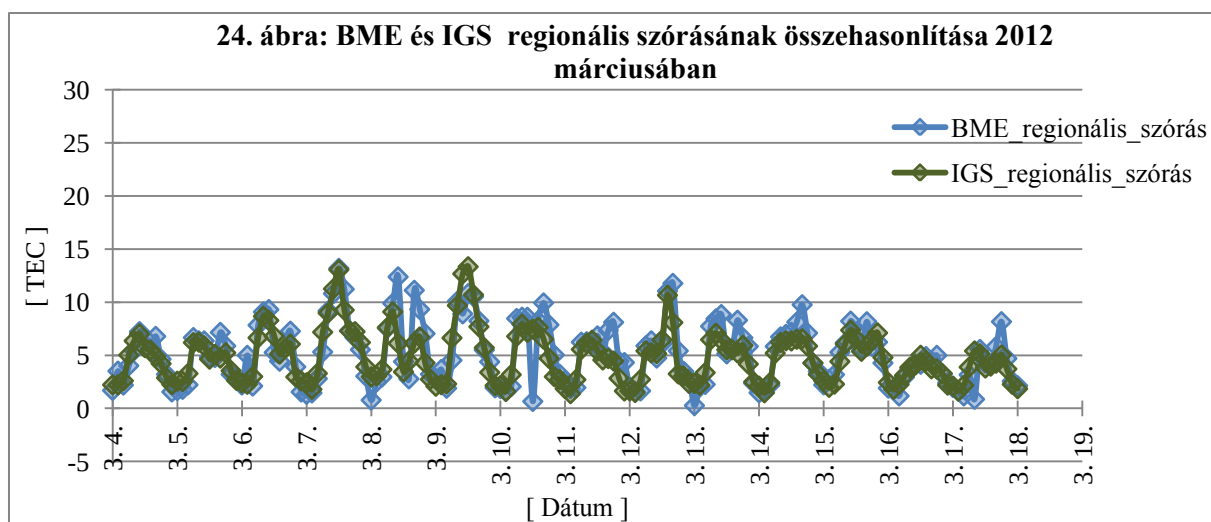
22. ábra: Globális modell további statisztikai jellemzői

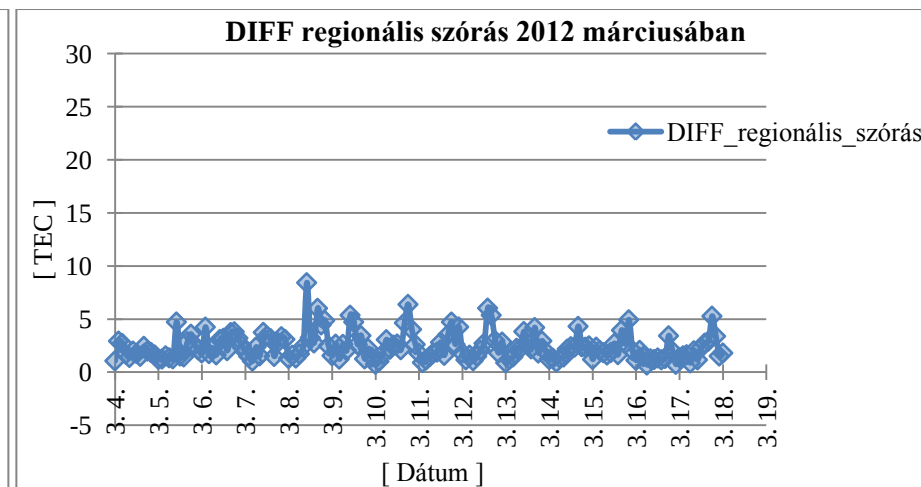
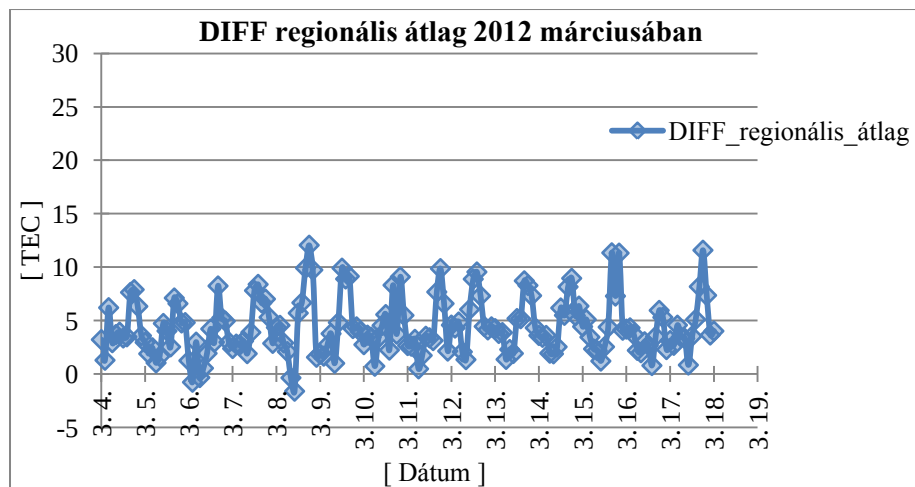
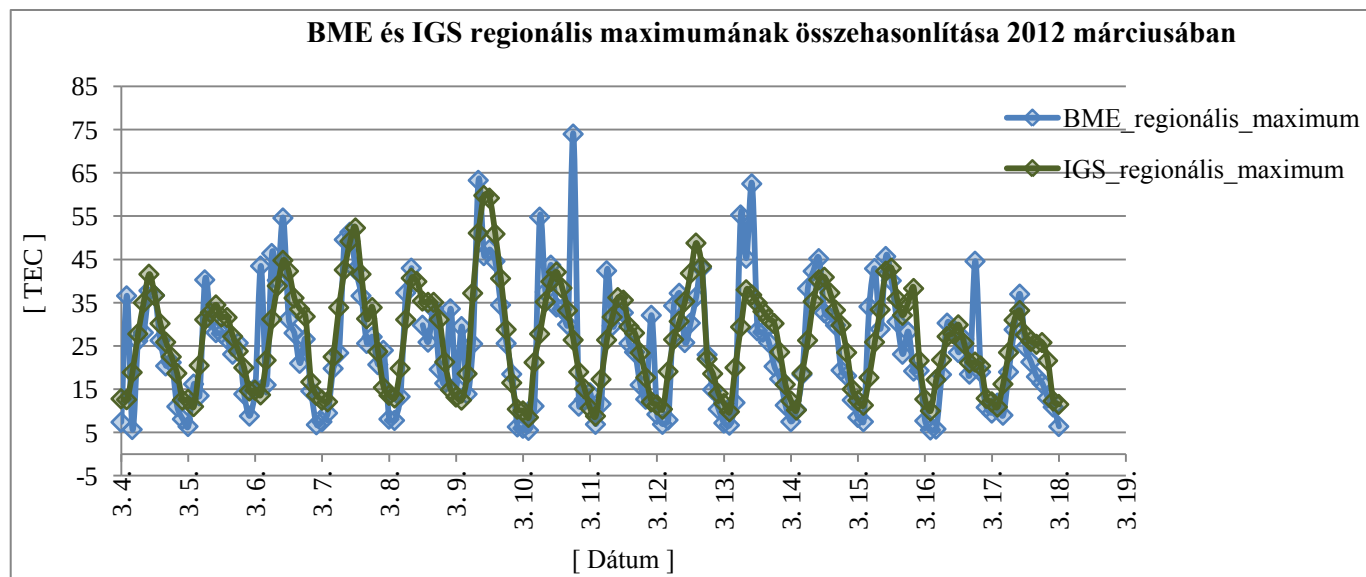
A *regionális idősorokat* vizsgálva már látható a napi változás, viszont az a maximumértékét a 2.2.-es fejezetben említett ellentétben nem 14 óránál éri el, hanem előbb inkább 12 és 13 óra körül. Ennek magyarázata lehet, hogy a regionális modell - 20° - 50° között helyezkedik el, ennek a közepe 15° -ra esik, ami a Föld 1 órányi elfordulásának felel meg, így Greenwichi UTC-hez képest 1 órával korábban van a maximum. A regionális modell megfelelő sűrűségben tartalmazza az állomásokat, ezért itt nem mutatkozik olyan nagy eltérés a különböző modellek statisztikai jellemzői között, mint globális esetében. Fontos, hogy az értékek alacsonyabbak, mint a globális modellnél, hiszen ez nem tartalmazza az Egyenlítő közelében lévő magas elektrontartalmú helyeket.

Az IGS és saját számításunk átlagának összehasonlítása esetén a növekvő és csökkenő tendenciák mindkettőnél ugyanott mutatkoznak, az átlagok napi maximumai több helyen is közel azonosak, a napi minimumok viszont minden esetben 5 TECU eltérést mutatnak, az IGS eredményei a magasabbak. A napkitörés hatása március 8-án érte el a Földet, amit a modellünk átlagértékei jól szemléltetnek, ekkor a legmagasabbak. Ezzel szemben az IGS átlagoknál ez nem mutatkozik ilyen egyértelműen (23. ábra).



Az IGS és saját szórásaink összevetésénél azt tapasztaljuk, hogy egybevág a kettő (24. ábra). Ezt támasztja alá az eltérések (DIFF) szórás-idősora is. Ahogy az átlagérték eltéréseinek (DIFF) időszora sem nagy amplitúdójú. A maximumok értékei is hasonlóak, ahol jelentősen eltérnek egymástól, ott az adatok a rácsháló széléről származnak, amik torzított értékűek (25. ábra).

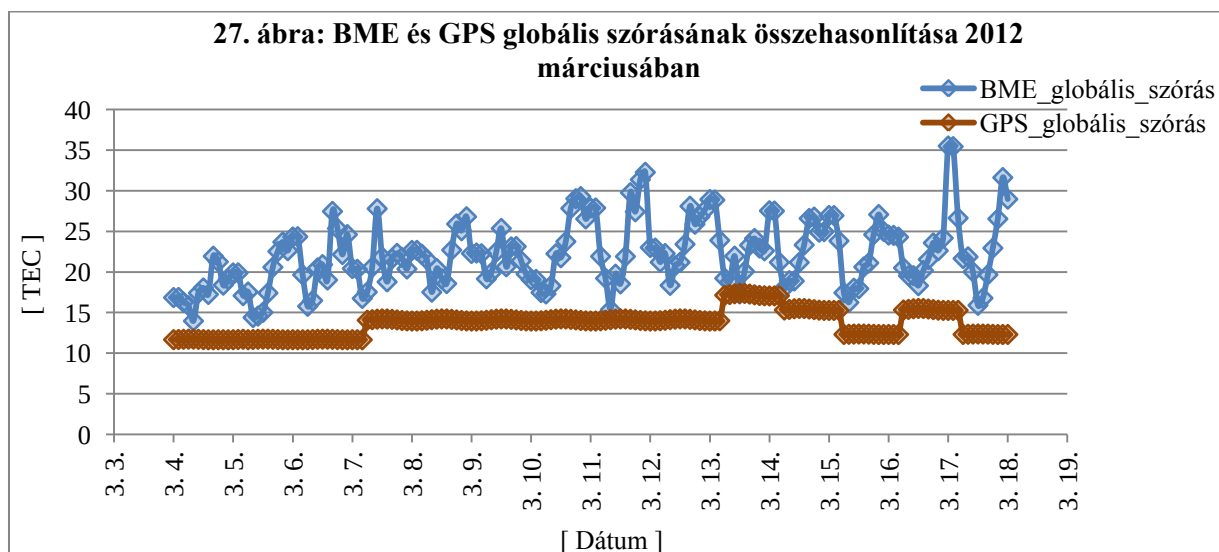
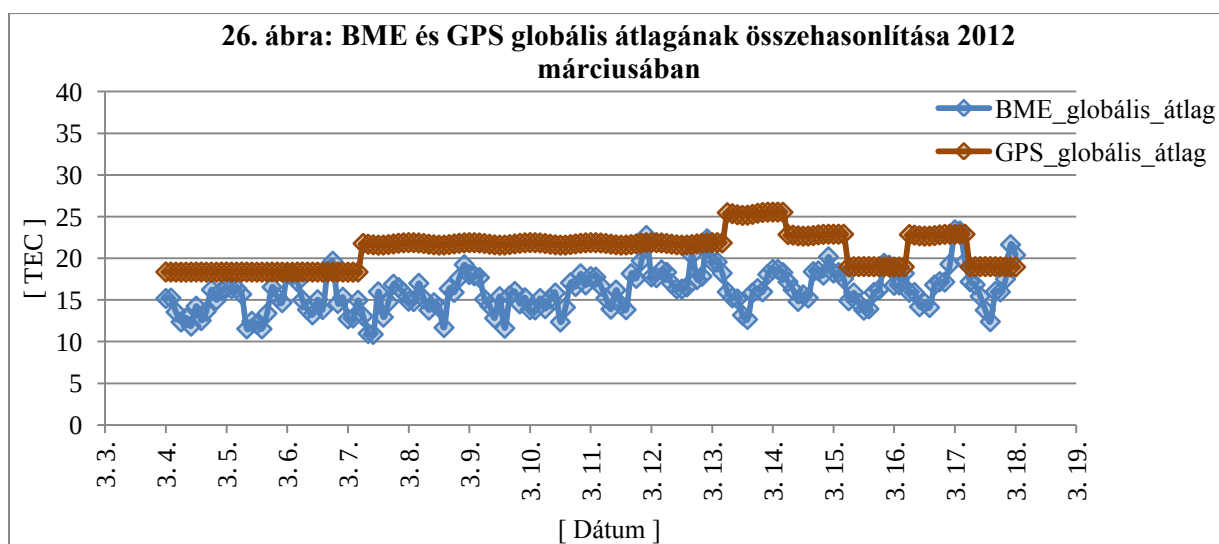


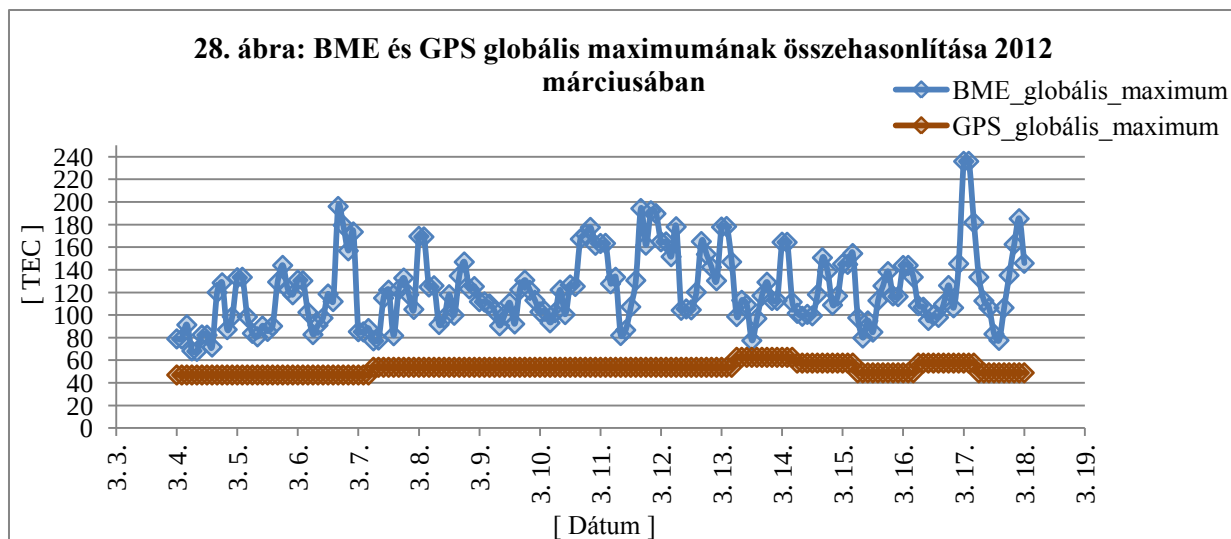


25. ábra: Regionális modell további statisztikai jellemzői

A következőkben összehasonlítjuk az eredményeinket a GPS műholdak fedélzeti pályaelemeiből meghatározott ionosferikus késleltetések értékeivel. A GPS elnevezésű modell adatai a fedélzeti pálya meghatározásokból származnak, ezek a pályamegoldások geodéziai pontossághoz elegendőek, de nagyobb kiterjedésű hálózatok feldolgozásához már nem felelnek meg. A GPS fedélzeti pályák a Klobuchar-féle együtthatók alapján lettek levezetve, tehát Klobuchar modellek. A GPS mérések átlagértékeiből és szórásaiból csak az látszik, hogy a Klobuchar modellek együtthatóit legfeljebb naponta módosítják. Sőt a vizsgált időszak alatt volt majdnem egy hét, amikor nem történt együttható változás. Ezt mutatja a hosszabb vízszintes szakasz az átlag és szórás értékeknél (26. ábra, 27. ábra, 28. ábra).

A GPS modellnek a globálissal való összehasonlítása, nem mutat jelentős eredményt, ezért vizsgáltuk ezt a regionális modellre is.

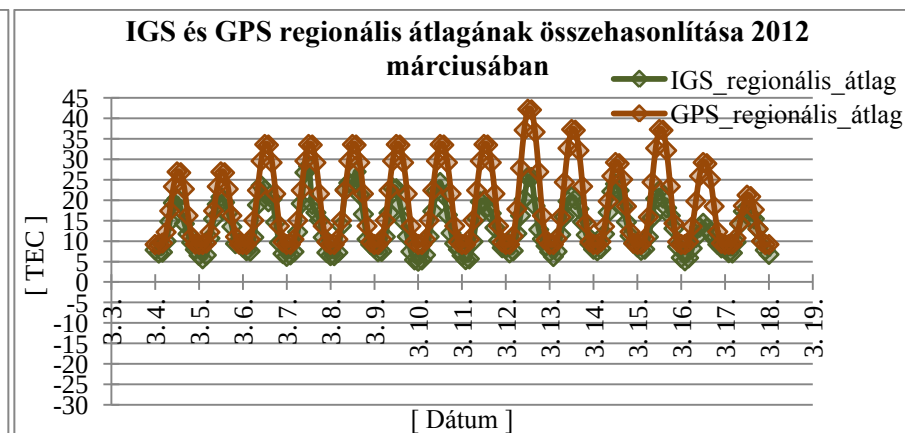
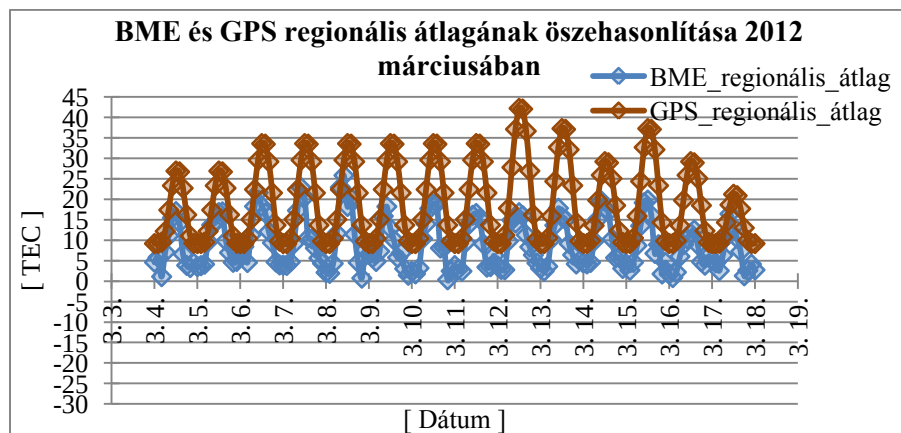




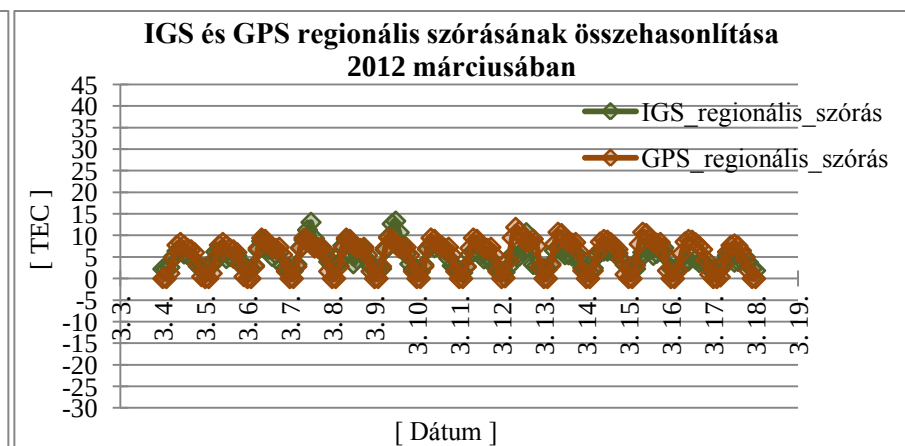
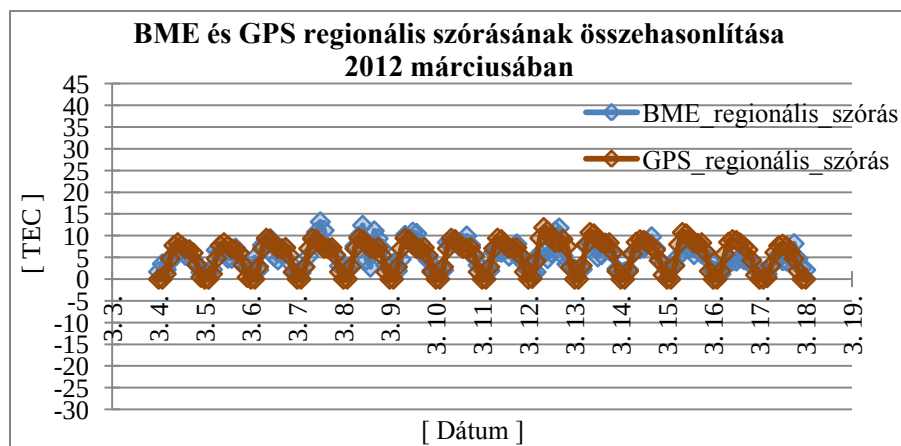
A GPS modelleket ezután összehasonlítottuk a regionális eredményekkel, az IGS és a saját modellünk értékeivel is. Az idősorok TEC egységeit egységes kiterjedésű skálákon ábrázoltam, hogy összevethetőek legyenek. A diagramokról megállapítható, hogy a GPS a leginkább szabályos idősor, a következő az IGS majd végül a saját modellünk következik a sorban.

A GPS átlagértékei jól szemléltetik a napi Klobuchar modelleket. A regionális összevetésekből megfigyelhető, hogy az átlagérték kétszer akkora a GPS modellnél, mint az IGS vagy BME esetén (29. ábra). Ez ellenkezik 2.4-es fejezetben bemutatottal, ezt a túlmodellezés okozhatta. Az IGS értékei valamivel közelebb állnak a GPS mérések eredményeihez, mint a BME megoldása. A GPS adatokból nem látszik a napkitörés hatása, nincs maximuma az átlagoknak, március 6-12. között a napi változása ugyanolyan.

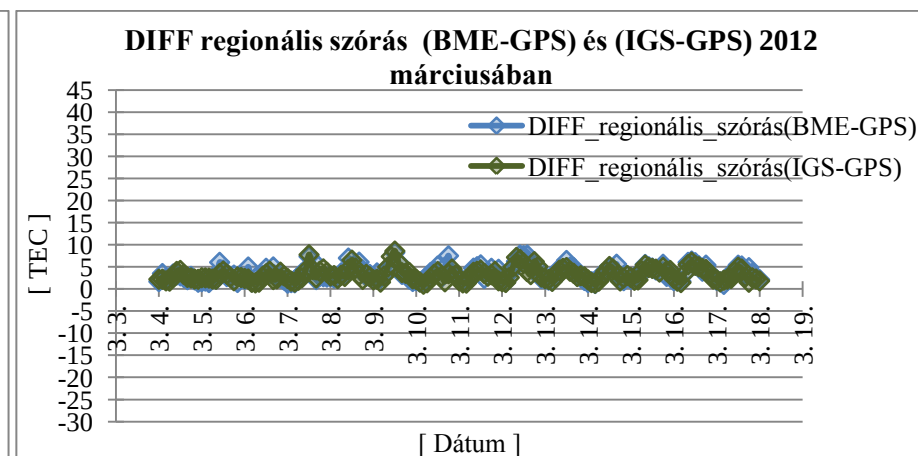
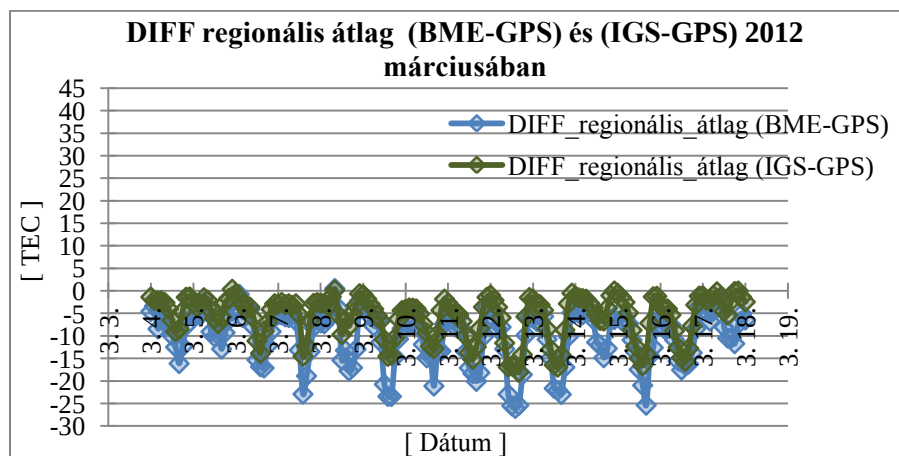
A GPS mérések szórásai is nagyon hasonlóak a vizsgált időszakban, míg az IGS és a BME értékei nem ilyen szabályosan változók, viszont az értékek nem térnek el jelentősen (30. ábra). Ebben az esetben is vizsgáltuk a statisztikai jellemzők eltéréseit (DIFF) is. A modellek különbségeinek átlagértékeiből láthatjuk, hogy az IGS-GPS kevésbé szór, mint a BME-GPS. Ebből is látszik, hogy az IGS és GPS átlagértékei közelebb estek egymáshoz. A szórások is a BME-GPS esetén magasabbak (31. ábra). A GPS maximumait megfigyelve nem tapasztalunk kiugró értékeket, ennek is szabályos a változása. A maximumoknál a BME esetén látszik néhány magasabb érték, ami valószínűleg a lefedett terület szélén lévő, pontatlan eredmény (32. ábra).



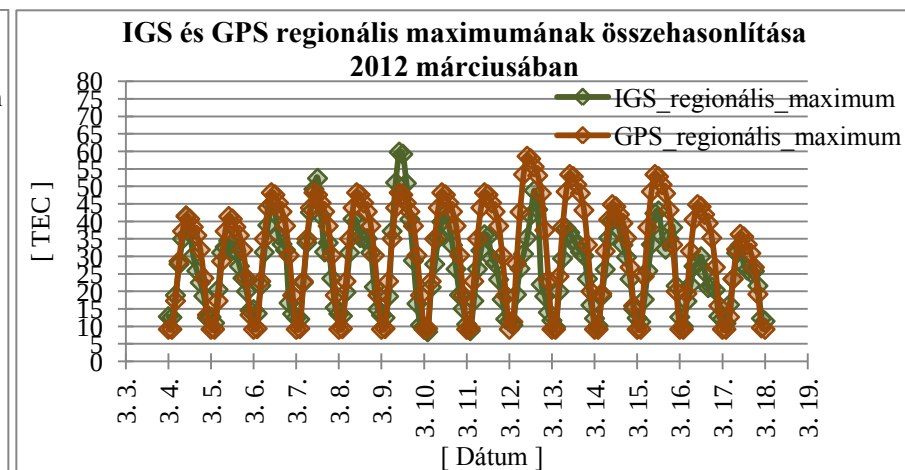
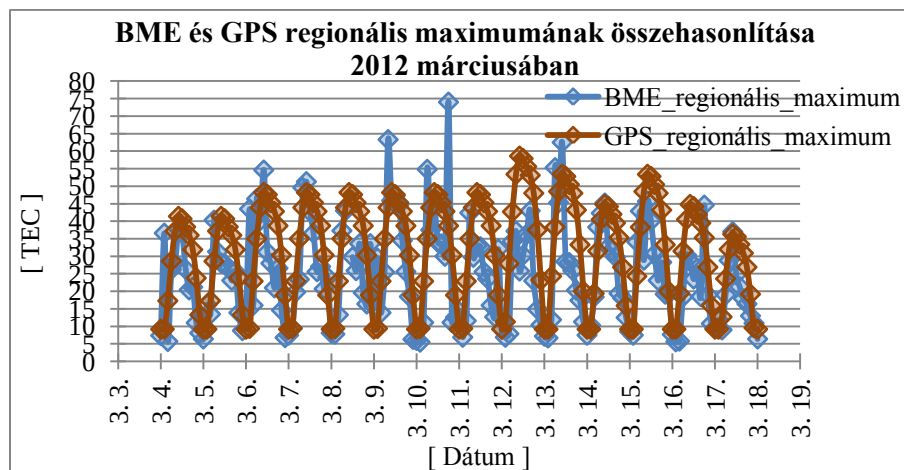
29. ábra: A regionális átlagok összehasonlítása



30. ábra: A regionális szórások összehasonlítása



31. ábra: A regionális DIFF értékek átlagának és szórásának összehasonlítása



32. ábra: A regionális maximumok összehasonlítása

8. Összegzés

A dolgozatban ismertettük a vizsgálatunkhoz szorosan kapcsolódó fogalmakat, jelenségeket és az ionoszféra modellek előállításához szükséges mérések feldolgozását. Ehhez a Nemzetközi GNSS Szolgálat (IGS) és EUREF Permanens Állomás (EPN) hálózat adatait vettük igénybe, a globális modellhez 70 db állomást, a regionálishoz 82 állomást használtunk fel. 2012. március 5-én bekövetkezett - az utóbbi öt év legnagyobb- napkitörését elemeztük, ezért a hatásának kimutatásához a március 4-18. időszakot vizsgáltuk. A napkitörés hatása az ionoszférában március 8-án érződött. A feldolgozást a Bernese 5.0 GPS szoftverrel végeztük el, a fázismérésekre az L_4 lineáris kombinációt alkalmazva. A nagy mennyiségű adatra való tekintettel, munkánk gyorsítása érdekében adatbevitelre és egyes fájlok létrehozására programokat használtunk. Az eredményeket GMT szoftverrel térképeken jelenítettük meg és Excel segítségével idősorokat készítettünk. Az idősorokat elkészítettük az IGS meghatározására és a fedélzeti pálya GPS megoldásokra is, ezekkel vetettük össze a kapott értékeket.

Ezek alapján megállapítható, hogy egy pontos, valóságot jól tükröző globális modell előállítása nagyon nehéz. Ugyanis az IGS állomások több helyen sem voltak felhasználhatóak, mert nem volt meg a koordinátájuk vagy a mérési fájljuk. Az is előfordult, hogy egy nagyobb óceáni, sarki területen egyetlen állomás sem volt. Így nem sikerült egyenletes állomáshálózatot létrehozni, egyrészt ezért is térhetett el jelentősebben a feldolgozásunk eredménye és az IGS által megadott értékektől. Másrészt az IGS modell 10 feldolgozás átlagolásával áll elő, a szoftverek hibáinak kiküszöbölése miatt.

A meghatározott globális ionoszféra térképek alapján viszont megfigyelhető, a napkitörés hatása, 8-án nagyobb területen voltak magasabb TEC egységek, mint egy előtte lévő nyugodt napon (17. ábra).

A regionális hálózatunk egyenletes eloszlású, az IGS értékekkel már egybevágóbbak a statisztikai jellemzők. A napi maximumértékek a vizsgált területre vonatkozóan nálunk inkább 12-13 óra körül jelentkeztek. Az átlagértékek alakulása jól mutatja a napkitörés hatását, mert március 8-án a legmagasabbak, amit az IGS modell eredményei nem jeleznek ilyen pontosan (23. ábra).

A globális GPS modell eredményeivel ellentétben regionális léptékben a modell értékei már vizsgálhatóak. A regionális modell szabályszerű váltakozású a BME és IGS modellekhez

képest, de kevésbé pontos (ha feltételezzük, hogy az IGS ionoszféra megoldása a mai legpontosabb ionoszféra modell).

Az eredmények azt mutatják, hogy kimutatható volt a napkitörés hatása az ionoszféra aktivitására. Ugyanakkor ez a hatás nem volt túl jelentős, a napkitörés megközelítőleg 7-8 TEC egységgel növelte meg a regionális modell alapján a vizsgált terület TEC átlagértékeinek maximumát, ami L_1 vivőjelen 1,1-1,3 méteres távolsághibát okozott.

Irodalomjegyzék

Ádám J., Bányai L., Borza T., Busics Gy., Kenyeres A., Krauter A. és Takács B. (2004) *Műholdas helymeghatározás Műegyetemi Kiadó, Budapest*

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

Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., és Meindl, M. (2007) *Bernese GPS Software Version 5.0, Astronomical Institute, University of Bern*

Eötvös Lóránd Tudományegyetem Csillagászati Tanszék (2012) *ELTE interaktív csillagászati portál* <http://astro.elte.hu/icsip/nap/index.html>

Frey S. (2011) *Eltűnőben van a napfoltciklus, Űrvilág asztronautikai hírportál* http://www.urvilag.hu/a_nap_es_bolygotestvereink/20110621_eltunoben_van_a_napfoltciklus

FÖMI (2012) *Új GNSSnet.hu ionoszféra monitorozó rendszer* <http://www.fomi.hu/portal/index.php/hirek-aktualitasok/329-uj-gnssnet-hu-ionoszfera-monitorozo-rendszer>

Schaer, S. és Gurtner, W. (1998) *The IONosphere Map EXchange Format Version 1 (IONEX) Astronomical Institute, University of Bern*

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

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

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

Wessel, P. és Smith, W. H. F (1998), *The Generic Mapping Tools (GMT)*