

A flerek ionoszférára gyakorolt hatása geomágneses szempontból nyugodt időszakokban



Szerző: Erdey Júlia

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

Földtudományi alapszak

Geofizika specializáció

Témavezető: Dr. Barta Veronika

A HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (FI) tudományos főmunkatársa

Az Ionoszféra Kutatócsoport vezetője

Budapest, 2025

Tartalomjegyzék.....	1
1. Bevezetés.....	2
1.1 Az ionoszféra felépítése.....	3
1.2 Az ionoszféra rétegei.....	3
1.3 Ionoszonda és ionogrammok.....	6
1.4 Flerek.....	8
2. Korábbi empirikus vizsgálatok a témában.....	9
3. A tanulmány célja, módszerek és adatok.....	12
3.1 Jelen vizsgálatok fő célja.....	12
3.2 Az események kiválasztása.....	13
3.3 Ionogramok feldolgozása.....	18
3.4 Feldolgozás alaplépései.....	19
3.5 Nyugodt napi f_{min} adatok átlagolása, és a f_{ler} alatti f_{min} értékek attól való eltérése.....	25
4. Eredmények.....	26
4.1 Néhány nap részletes bemutatása.....	26
4.2 Korrelációs vizsgálat.....	29
4.2.1 Az f_{min} és a “geoeffektivitás” paraméter kapcsolata.....	30
4.2.2 Az f_oF_2 és a “geoeffektivitás” paraméter kapcsolata.....	32
5. Összefoglalás.....	34
Források.....	37
Saját eredmények.....	41

1. Bevezetés

Carl Friedrich Gauss, a híres matematikus és fizikus, már 1839-ben felvetette egy olyan, elektromosan nagyon jól vezető, légköri tartomány létezésének lehetőségét, amely nagy hatással lehet a Föld magnetoszférájára. 60 évvel később Guglielmo Marconi elmélete alapján pedig sikeresen valósították meg az első transzatlanti rádiójel továbbítását és vételét, mely a kommunikáció módját egy teljesen új dimenzióba helyezte. Utóbbi eredménynek köszönhetően megszületett az elmélet, amely szerint a Föld felszínének görbülete miatt a rádiójelnek egy ionizált felsőbb rétegről kellett bizonyosan visszaverődnie. [1]

Ezt a réteget ma ionoszférának nevezzük. következőkben ennek a rétegnek a kialakulását, felépítését, illetve a napkitörések (flerek) által okozott változásait mutatom be geomágneses szempontból nyugodt időszakokban a pruhonice-i ionoszonda ionogramjai által meghatározott karakterisztikák szerint, a 25. napciklus kiválasztott eseményei alapján.

1.1 Az ionoszféra felépítése

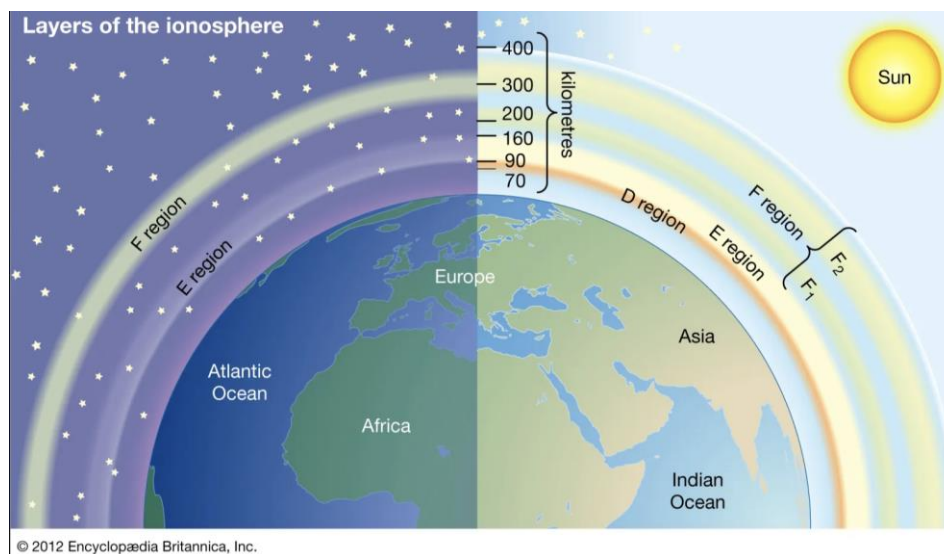
Az ionoszféra a Föld légkörének egy olyan rétege, amely a Föld felszíne felett 50 km-től 1000 km-ig, vagy akár magasabbra is kiterjedhet. Elektronokból, elektromosan töltött atomokból és molekulákból (azaz ionokból) tevődik össze. Körülbelül 80 kilométeres magasságban már olyan ritka a légkör, hogy rövid ideig szabad elektronok létezhetnek, mielőtt egy pozitív ionnal egyesülve semlegesítődnek. Ez a része a légkörnek ezáltal részlegesen ionizált plazmából áll, mely a Nap UV, röntgen és rövidebb hullámhosszú sugárzása miatt alakul ki, hiszen a fotonok elég energiával rendelkeznek ahhoz, hogy az abszorpció során elektronokat szakítsanak le, semleges gázok atomjairól vagy molekuláiról. Ennek a folyamatnak a során az elektron nagy sebességre tesz szert, ezáltal a keletkezett elektromosan töltött gáz felforrósodik, melegebb lesz, mint az ionok és neutrális gázok. Ez a hőmérsékletnövekedés megfigyelhető a légkör hőmérséklet-profiljában is. Az ezzel ellentétes folyamat a fentebb már vázolt rekombináció, amikor is a szabad elektront „elfogja” egy pozitív ion. Ez a folyamat spontán történik, és egy foton emisszióját okozza, mely elviszi az energiát. Ahogy a gázsűrűség növekedik alacsonyabb magasságokban, a rekombinációs folyamat egyre dominánsabbá válik, mivel a gázmolekulák és -ionok távolsága csökken, így gyakrabban ütköznek egymással. Ennek a két folyamatnak az egyensúlya határozza meg az ionizáció mértékét.

Az 1000 km-nél magasabban, de 2000 km-nél alacsonyabban fekvő réteget a légkörnek protonoszférának nevezzük, amely szintén ionizált, és a műholdas kommunikáció és navigáció szempontjából szintén érdemes számba venni hatását. Az integrált elektronsűrűségi érték, a földi érzékelő és a keringő műhold között, melyet az ionoszféra teljes elektrontartalmának (TEC – Total Electron Content) nevezünk, például mindkét réteg elektrontartalmát magába foglalja. A továbbiakban azonban az ionoszféra szigorúan vett határai között maradunk a réteg specifikus vizsgálata érdekében.

Bár az ionoszféra nagyságrendileg egyenlő számú szabad elektront és pozitív iont tartalmaz, az egyik legfontosabb jellemzője az elektronsűrűség, hiszen alapvetően ennek az értéke határozza

meg a réteg specifikus jelenségeit. Az ionoszféra a magnetoszférába van beágyazódva, és ez az elhelyezkedés befolyásolja az ionizált részecskék eloszlását, amit az is jól jelez, hogy az elektronsűrűség Föld körüli eloszlása jobban karakterizálható geomágneses, mint földrajzi koordinátákkal [2][3].

1.2 Az ionoszféra rétegei



1.ábra: Az ionoszféra rétegei éjjel és nappal [4]

Az ionoszféra nem homogén, különböző magasságban lévő részeit több okból is érdemes elkülöníteni. Mindegyik réteg eltérően viselkedik a különböző frekvenciájú rádióhullámok szempontjából, más-más rétegben különbözőek a kölcsönhatások a hullámokkal. Az 1. ábrán is látható, és a következőkben részletesen bemutatandó E és F rétegek például a magas frekvenciás (High Frequency - HF) rádióhullámokat rendkívül jól visszaverik, így alkalmasak a hosszútávú rádiókommunikációra. Szintén a kommunikáció szempontjából érdemes ismerni az egyes rétegek kritikus (azaz legnagyobb) frekvenciáját, mivel annak túllépésével már nem verődnek vissza a hullámok az adott rétegről, így nem tartható fenn a stabil kapcsolat. A rétegek elkülönítésével könnyebben meghatározható az optimális frekvencia is, amelyen a rádiókommunikációt érdemes folytatni. Az üridőjárás- előrejelzéseket – amelyek kulcsfontosságúak a műholdak, GPS rendszerek és egyéb technológiai infrastruktúrák védelme szempontjából – is segíti a rétegek lehető legpontosabb leírása.

A rétegek és jellemző tulajdonságaik:

- D réteg: a D réteg az ionoszféra Földhöz legközelebb eső rétege, a Föld felszínétől 48 és 90 km közötti magasságban található. A rétegben magas a rekombináció mértéke, így több neutrális molekulát tartalmaz.

Az elektronsűrűség itt $\sim 10\text{-}100^{-3}\text{ cm}^{-3}$, emiatt a 0,3-3 MHz közötti középhullámú (Middle Frequency - MF) rádiójelek tudják létezését megmutatni. Az áthaladó rádióhullámok mozgásba hozzák a rétegben található elektronokat, amelyek ennek hatására ütköznek a semleges részecskékkal, energiavesztést okozva. Az alacsonyabb frekvenciájú rádióhullámok erősebben nyelődnek el, mivel jobban elmozdítják az elektronokat, így nagyobb eséllyel adva nekik az ütközésre, tehát az energiavesztés is nagyobb lesz (jól példázza ezt a távoli rádióállomások jeleinek eltűnése a nappali időszakban). Ez a frekvencia növekedésével fordított arányban csökken. Az elnyelési hatás dél körül éri el a maximumát, és a D réteg elvékonyodása miatt éjszakára lecsökken; csupán kis része marad meg ennek a rétegnek a kozmikus sugárzásnak köszönhetően.

Napaktivitási események során (Solar Particle Events, SPE) a D rétegben magas és poláris szélességeken az ionizáció aránya kiugróan megnövekedhet. Ezeket a ritka eseményeket Polar Cap Absorption-nek (PCA) nevezzük, mivel a rádiójelek abszorpciója a területek felett számottevő mértékben megnövekszik. Intenzív események során elnyeli a legtöbb (egyes esetekben az összes) transzpoláris HF rádiójelet. Az ilyen események pár órától akár több napig is eltarthatnak [35].

- E réteg: az E réteget nevezzük az ionoszféra „középső” rétegének, 90 és 150 km között helyezkedik el. Ionizációját főként a lágy röntgensugarak (soft X-ray, 1–10 nm) és a távoli ibolyántúli (far UV) sugarak okozzák, melyek az oxigén (O_2) molekulákat ionizálják (2. ábra).

Az E réteg vertikális struktúráját főként az ionizáció és rekombináció versengő hatásai határozzák meg. Éjjel a rekombináció kerül főszerepbe, mivel nincs jelen a fő ionizációs forrás, a Nap. Ezáltal az E réteg maximális magassága növekszik, így a visszavert rádiójelek távolabb tudnak terjedni, hiszen nagyobb távolságot tesznek meg mielőtt visszaverődnének. Ezért állapíthatjuk meg, hogy a távoli rádiókapcsolatok felvételére az esti időszakok előnyösek.

Az E réteg vizsgálata és megértése összességében tehát kiemelten fontos a rádiókommunikáció és az ionoszféra fizikai tulajdonságainak pontosabb ismerete szempontjából, mivel ez a réteg szerepet játszik a közepes frekvenciájú és egyes magasabb frekvenciájú rádiójelek visszaverésében, különösen a szporadikus E események során.

- Es réteg: az E_s réteg, vagy teljes nevén szporadikus E réteg legjobban úgy írható le, mint a környezeténél magasabb ionizációjú felhőkből álló réteg, mely képes akár 50 MHz-es rádióhullámokat is visszaverni. A szporadikus E élettartama percektől akár órákig is eltarthat, és az E réteggel ellentétben fémionjainak (légkörbe csapódó meteorokból

származó) köszönhetően éjszaka is fennmaradhat. Ez a réteg utat nyithat olyan hosszútávú, kétirányú kommunikációnak, amely egyébként nem szokott megvalósulni. Karakterisztikus tulajdonságai közé tartozik, hogy az északi félteke közepes szélességein június és július hónapokban napi szinten tapasztalható ez a jelenség.

- F réteg: az F réteg, amely a tengerszint fölött 150 és 800 km között helyezkedik el, az ionoszféra legfontosabb állandó rétege. Ez tartalmazza a legtöbb szabadelektront és iont. Stabíl visszaverő felületet alkot a HF rádiójelek számára, mivel az éjszakai órákban is fennmarad. Éppen ez a tulajdonsága teszi megbízhatóvá a HF hosszútávú rádiókommunikáció számára. Két részét különítjük el eltérő jellemzői szerint: az F1 és F2 réteget.

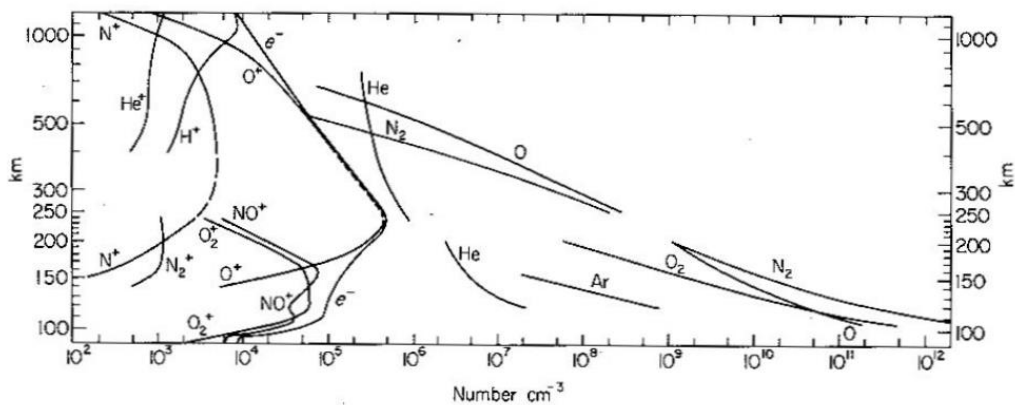
Az F1 réteg az F régió alsó szektora, 150 és 220 km közötti magasságban, kizárólag nappal figyelhető meg. Főként O_2^+ , NO^+ és O^+ ionok keverékéből tevődik össze (2. ábra). Az F1 régió felett az atomos oxigénmolekulák jelenléte válik dominánssá, mivel a könnyebb részecskék magasabban helyezkednek el, a turbopauza környékén (nagyraészt ezek az O^+ molekulák fogják alkotni az F2 réteget). Az ionizációt az F1-rétegben az UV hullámhossznál rövidebb hullámhosszúságú sugarak (20-80 nm) elnyelése okozza. Az F1 réteg az éjszaka során egybeolvad az F2-vel.

Az F1-et bár stabílnak tituláljuk, nem mindig és nem mindenhol figyelhető meg minden nap, mivel az Es réteg megnövekedett elektronsűrűsége, és ezáltal a maximálisan frekvenciája szintén megnövekedhet, ezáltal blokkolva a felette elhelyezkedő az F1 vagy akár F2 rétegeket.

Az F2 réteg az F régió magasabban elhelyezkedő része, amely 220 és 800 km között van jelen. Az alacsonyabb F2-rétegben az atomos oxigén (O) ionizációja és a rekombinációja játssza a legnagyobb szerepet (2. ábra). Magasabban viszont a semleges sűrűség csökkenése és az elektronfelvétel limitálja az elektronsűrűség növekedését. Az plazma mozgását is leginkább a mágneses erőhatások, és a transzport folyamatok befolyásolják, az ionoszféra legdinamikusabb tartományáról beszélünk.

Az F2 a fő visszaverő réteg a HF kommunikáció számára a nappali és éjszakai oldalon egyaránt. Sűrűsége körülbelül állandó, bár mágneses viharok esetén ez az érték nagymértékben ingadozhat, emellett viselkedését befolyásolják a termoszférikus szelek, ami szintén nagy variabilitást eredményezhet.

Az F régió fölött előtérbe kerülnek a könnyebb ionok, mint például a He és a H (2. ábra). Ezek az F régiónál magasabban, de a plazmaszférát nem elérve helyezkednek el, ezért az ionoszféra ezen tartományát „topside” ionoszférának nevezzük. [5][6][7]



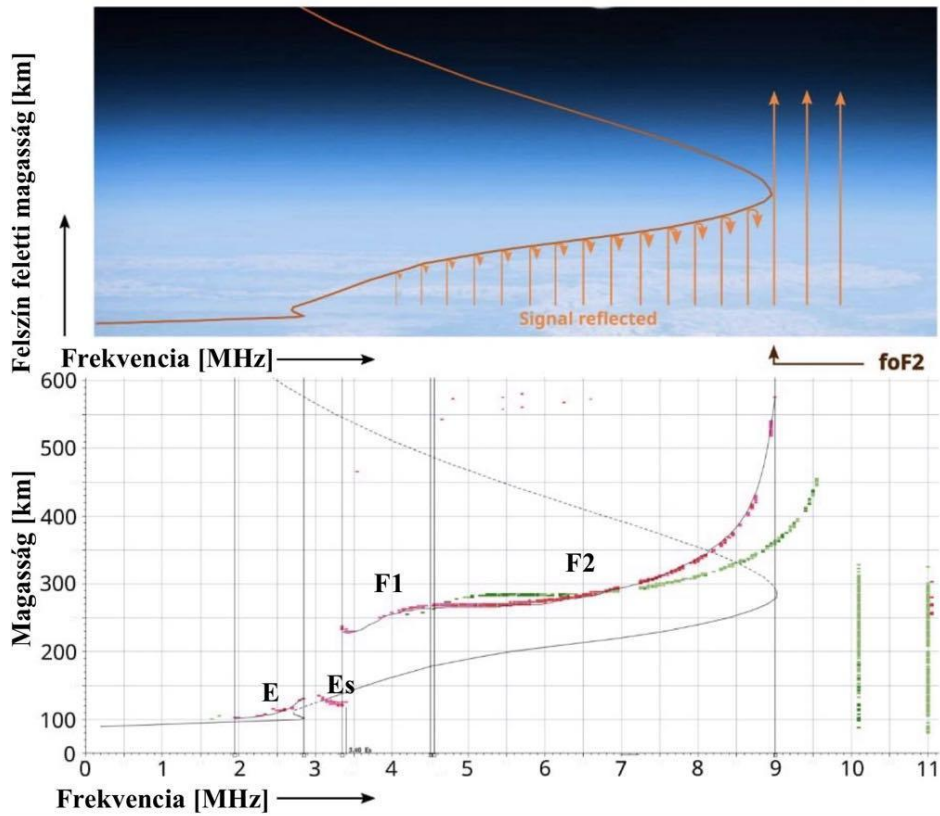
2.ábra: A nappali ionoszféra és a semleges légkör összetétele tömegspektrométerrel végzett mérések alapján [Rishbeth and Garriott, 1969] [8]

1.3 Ionoszonda és ionogrammok

Az ionoszonda egy olyan műszer, melyet az ionoszféra pontos vizsgálatára és annak változásainak földfelszíni megfigyelésére fejlesztettek ki, alaptechnológiáját Gregory Breit és Merle A. Tuve alakították ki 1925-ben. Az ionoszonda legfontosabb részei a következők:

- Egy magas frekvenciás (High Frequency, HF) rádióadó, mely 0,5-től 23 MHz-ig vagy 1-től 40 MHz-ig sugároz ki elektromágneses hullámokat, bár a gyakorlatban általában ezt a határt körülbelül 1 és 14 MHz közé szűkítik.
- Egy HF vevő, amely automatikusan követni tudja az adó frekvenciáját.
- Egy antenna megfelelő sugárzási mintázattal, mely hatékonyan sugároz vertikálisan felfelé és megfelelően működik a teljes használt frekvenciatartományban.
- Digitális vezérlő és adatelemző áramkörök

A rádiótranszmitter a HF tartomány egy részét vagy egészét pásztázza, rövid impulzusokat kibocsátva. Ezek az ionoszféra különböző rétegeiről visszaverődnek, melyeket a vevő fogad és a digitális vezérlő és adatelemző áramkörök segítségével ezen visszaverődések alapján meg lehet határozni az adott magasságban lévő elektronsűrűséget. Ezáltal feltérképezhető az ionoszféra szerkezete és az egyes rétegek jellemzői. Az ionoszonák által gyűjtött adatok kulcsfontosságúak az ionoszférikus folyamatok megértéséhez, hiszen ezek befolyásolják a rádióhullámok terjedését, különösen a HF tartományban, amelyet kommunikációra és navigációra használnak. [9][10]



3. ábra: Az ionoszféra leképezése rádióhullámok segítségével

Az eredmény, amit kapunk egy grafikon (3. ábra), mely a visszaverődés látszólagos magasságát a kibocsátott frekvencia függvényében ábrázolja, ezt nevezzük ionogramnak. Minden ionoszféra réteg nagyjából sima görbeként jelenik meg a grafikonon, melyeket az adott réteg kritikus frekvenciájánál aszimptota választ el egymástól. Megfigyelhető, hogy a görbék egy felfelé ívelő szakasszal kezdődnek, ami annak köszönhető, hogy a sugárzott hullámot az alatta lévő, közeli, de nem azonos plazmafrekvenciájú ionizáció lassítja, de nem veri vissza. Ez a felfelé ívelő szakasz az F1 és F2 réteg találkozásánál nappal nem mindig figyelhető meg, mivel ilyenkor azok egybeforognak, ezért szokás a rétegeket a görbe inflexiós pontja alapján elkülöníteni. Minden réteg kritikus frekvenciáját az aszimptota alapján határozzuk meg, míg az egyes rétegek virtuális magasságát a görbe legalacsonyabb pontjától skálázzuk. A grafikonon két különálló komponens jelenik meg: az „ordinary” (O) komponens piros színnel és az „extraordinary” (X) komponens zöld színnel. Ezek eltérő viselkedése a Föld mágneses terének hatására alakul ki. Míg az O komponens a Föld mágneses tere mellett is tartja a polarizációját, addig az X komponens módosítja a geomágneses tér. Azért hasznos ezt a két komponens külön vizsgálni, mivel jobban megérthetjük a földi mágneses tér hatását a kibocsátott EM hullámokra. Jelen dolgozatban kizárólag az O komponenssel foglalkoztam, mivel geomágneses szempontból nyugodt időszakokban ez ad nekünk olyan karakterisztikákat, amelyek az események hatására bekövetkező változásokat jól mutatják.

A Digiszondák (Digisonde), melyeket a Lowell Digisonde International (LDI) fejlesztett ki, még részletesebb információt nyújtanak nekünk az ionoszféráról. A Digiszondával készített ionogramokon megtalálható a pontos hely és idő, ahol és amikor a felvétel készült, az ionoszférikus rétegek kritikus frekvenciái, a rétegek virtuális magasságai. A szondák automatikusan rögzítik az elektronsűrűség profilokat, amely alapján meghatározzák a teljes elektrontartalmat (Total Electron Content, TEC), illetve megbecslik a maximálisan felhasználható frekvenciákat (Maximal Useable Frequency, MUF), azaz azokat a frekvenciákat, melyek ideálisak a HF jel továbbításához megadott távolságra. [11]

Az ionogram megjelenése és az elemzés módja jelentősen függ a nappali és éjszakai változásoktól, az évszakok váltakozásától, valamint a napciklustól. A legtöbb ionoszférikus folyamat mozgatórugója a Nap miatt kialakuló fotoionizáció. Az ibolyán túli (Ultraviolet, UV), röntgen (X-ray) és ezeknél kisebb frekvenciájú sugárzások teljesen más mértékben érik az ionoszférát a napsütötte és a sötét féltekén (hemiszférán). Ennek szemléltetésére megfelelő példa, hogy míg nappal az F réteg felbomlik F1 és F2 rétegre, addig éjszaka ezek összeolvadnak és egy réteggé léteznek. Az évszakok változásával változik a Nap beesési szöge is (Solar Zenith Angle, SZA), emiatt a Napból érkező EM hullámok hatása is, ezért szükséges az évszakokat is figyelembe venni az ionogramok feldolgozásakor, mivel ezek is befolyásolják a rétegek megjelenését, vagy akár egyes rétegek kialakulását. Mindezek mellett meghatározó jelentőségű a vizsgálatok szempontjából az is, hogy a Nap a napciklus melyik időszakában jár, hiszen aktív időszakokban markánsan változik a beérkező EM hullámok intenzitása és a töltött részecskék száma.

A felhasznált ionogramok részletes elemzésére a későbbiekben térek ki.

1.4 Flerek

Már évtizedek óta ismert, hogy a flerek, vagy másnéven napkitörések hatása a légkör nappali féltekére jelentős. Legmarkánsabban dél körül tapasztalható ezeknek az eseményeknek a hatása, mivel ekkor az SZA közel 0° , azaz ekkor legjelentősebb az ionizáció mértéke. A napkitörések tulajdonképpen hatalmas robbanások a Nap felszínén, melyek rendkívül széles frekvenciatartományon sugároznak EM energiát, főként a röntgen és extrém UV (EUV) tartományban. A flereket gyakran követik koronakidobódások (Coronal Mass Ejection, CME), amikor a Nap koronájának anyaga kilöködik a bolygóközi térbe. Utóbbi események tranziens jellegűek, időtartamuk csupán percektől óráig terjed. EM sugárzás mellett ezeket az eseményeket nagyszámú nagyenergiájú töltött részecske kidobódása is követheti (pár MeV nagyságrendben), melyek szintén elérhetik a Föld légkörét.

A flereket csúcsteljesítményük alapján osztályozzák W/m^2 mértékegységben, melyet a Geostationary Environmental Operational Satellite (GOES) röntgen műszere és a Solar Heliospheric Observatory (SHO) solar EUV monitorja (SEM) észlel két röntgen sávban: 0.1-50 nm-es és 26-34 nm-esben. A flereket az erősségük magnitúdója szerint soroljuk be logaritmikus skálán: B- ($10\text{E-}7 \text{ W/m}^2$ és $10\text{E-}6 \text{ W/m}^2$ között), C- ($10\text{E-}6 \text{ W/m}^2$ és $10\text{E-}5 \text{ W/m}^2$)

, M- ($10E-5 \text{ W/m}^2$ és $10E-4 \text{ W/m}^2$) és X- ($10E-4 \text{ W/m}^2$ felett) osztályú csoportokba, melyeken belül intenzitásuk szerint számot is kapnak. Ezeket a határértékeket speciálisan a GOES műhold adataira adták meg. [12]

Napkitörések során hirtelen megnő a röntgen és az EUV sugárzás a Nap által megvilágított féltekén, mely szignifikáns ionizációt okoz a légkör neutrális komponenseiben, ezzel extra ionizációt okozva a D, E és F rétegekben. Míg a röntgensugárzás le tud jutni a mélyebb rétegekig (D réteg), addig az EUV sugárzás főként a magasabb rétegekben (E, F) okoz releváns változásokat. Ez az extra ionizáció az EM hullámok felerősödő abszorpciójához vezet. Ez a felerősödés a hullámok intenzitásától függően az ionogramokon parciális vagy totális, úgynevezett „radio fade-out”-ot okozhat, azaz az ionogramon nem jól, vagy egyáltalán nem láthatóak a rétegek; emellett hirtelen D réteg abszorpcióhoz és a TEC szintjének megemelkedéséhez vezethet.

2. Korábbi empirikus vizsgálatok a témában

Az ionoszférikus abszorpciót riométerekkel (Relative Ionospheric Opacity Meter, azaz relatív ionoszféra-átlátszóságmérő) tudjuk mérni, amely rögzíti a kozmikus rádióajt megadott frekvenciákon ($\sim 20\text{--}50 \text{ MHz}$ -es tartományban). Ezeknek az eszközöknek a többsége magas szélességeken található, ezért elsősorban az ott bekövetkező abszorpciós változásokról szolgáltatnak információt. Az Imaging Riometer for Ionospheric Studies (IRIS) adatait felhasználva, melyek a 23. napciklus során (1996 augusztus – 2008 december) Kilpisjärvi állomáson rögzítettek, azt a következtetést vonták le, hogy az M4-es osztályú flerek a legkevésbé intenzívek azok közül, melyek még hatást tudnak gyakorolni a kozmikus zaj abszorpcióra. Ezen kívül meghatározták, hogy az eltérő osztályú flerek milyen erősségű elnyelést tudnak okozni az ionoszférában. Képalkotó riométereket is használatba vettek, hogy megvizsgálják a rövidhullámú jelvesztés (short wave fadeout) gyakoriságának és térbeli kiterjedésének frekvenciafüggését. [13]

Az f_{min} paraméter, amely az első olyan rádióhullám frekvenciáját jelöli, amelyet az ionoszféra már visszaver, egy kvalitatív mutatónak tekinthető a nem elhajló („non-deviative”) rádióhullámok abszorpciójának jellemzésére. Az abszorpció felerősödésének fellépésénél a paramétert abszorpciós indexnek használják, főként az X osztályú flerek és sarki elnyelődések esetén.

Sharma et al. (2010) [14] kapcsolatot találtak a napkitörések és az f_{min} paraméter megnövekedése ($>100\%$) között. Az egyenlítői és alacsony szélességeken előforduló fler effektusokról már korábban készültek tanulmányok (Sripathi et al., 2013) [15], ebben a rétegek hiányát vélték felfedezni az ionogramokon az X osztályú flerek bekövetkeztekor. A jelek eltűnése („fade-out”) párhuzamban volt a felszíni VLF mérések amplitúdó emelkedésével, ami

pedig feltételezhetően a D réteg felerősödött ionizációja miatt következett be. Ez okozhatta a megnövekedett abszorpciót is.

Mindezek mellett részleges jelhiány fellépését is detektálták ionogramokon az Egyenlítőhöz közeli brazil szektorban is (Denardini et al., 2016) [16], illetve a rétegek hiánya és azt követően megemelkedett f_{min} értékek léptek fel az egyenlítői régióban (Nogueira et al., 2015) [17].

Barta et al. (2019) [18] a flerek ionoszférikus abszorpcióra tett hatását vizsgálták ionogramok szisztematikus elemzésével közepes és alacsony szélességeken különböző SZA-k esetén. Minden ionoszonda állomáson részleges vagy teljes adathiány ("fade-out") következett be intenzívebb ($>M6$) flerek esetén. A teljes adathiány időtartama 15 és 150 perc között mozgott, és nagyban függött a zenitszögtől. Emellett szintén napállásszögfüggő f_{min} (2-9 MHz) és df_{min} (minimum diszperziós frekvencia) (1-8 MHz) emelkedést figyeltek meg. Az f_{min} és df_{min} paraméter növekvő tendenciát mutatott a röntgenfluxus növekedésével. Eredményeik alapján a df_{min} paraméter megfelelő mérőszáma az abszorpció relatív változásának, főként a kevésbé intenzív ($<M6$) flerek esetén, mivel akkor kevésbé fordul elő az ionogramon a rétegek eltűnése. Ez volt a legfontosabb előzmény a dolgozat megszületéséhez. [19]

Barta et al. (2019) a 2006. december 5-6-ai napkitörések hatását Európa felett felszíni (ionoszonda, VLF) és műholdas adatok (GNSS Vertical Total Electron Content – VTEC és DEMETER VLF eszközök) felhasználásával vizsgálta. K_p és Dst indexek alapján megállapították, hogy 2006. december 5-e geomágneses szempontból nyugodt volt, míg 6-án geomágneses vihar zajlott. Teljes visszaverődési jelhiány lépett fel az 5-i X9-es esemény következtében, illetve az f_{min} (2–9 MHz) és Δf_{min} (150%–300% relatívan) szélességfüggő növekedését figyelték meg minden állomáson az 5-i X9-es és 6-i M6-os fler idején.

A teljes "fade-out" miatt az X9-es fler esetében nem voltak vizsgálhatóak Európában az foE és $foF2$ paraméterek. December 6-án a pozitív ionoszférikus vihar miatt megnövekedett $foF2$ értékeket detektáltak (2–3 MHz-el nagyobb a referencia napoknál) minden állomáson, ám a fler hatása csupán az foE változásaiban volt megfigyelhető: 2 MHz-ről 2,5-2,7-re változott, amely ~25%–30%-os elektronsűrűség megnövekedésre utal az E rétegben. Az M1.8-as és C4.8-as fler esetén nem voltak felfedezhetők hasonló változások.

Az X9-es fler során szélességfüggő VTEC emelkedést is észleltek (2–3 Total Electron Content Unit – TECU). A VTEC reziduális értékeinek elemzése során a változás üteme 10%-20%-kal nőtt a csökkenő szélesség függvényében. December 6-án a VTEC változásai (5-10 TECU) megnövekedett ionizációt mutatott (pozitív ionoszférikus vihar) a geomágneses viharnak köszönhetően ($G1$, $Kp_{max}=5$, $Dst_{min}=-60$). Ez a növekedés háromszor akkora volt, mint amit az előző napi X9-es napkitörés okozott, illetve az M6-os fler esetén nem volt megfigyelhető növekedés. Ebből arra következtettek, hogy a VTEC adatok csupán akkor használhatóak fel a fler ionoszférára gyakorolt hatásainak vizsgálatára, amikor nincs geomágneses vihar.

Mindezek mellett egy új módszer is kidolgozásra került az ionoszférikus abszorpció változásainak értékelésére európai Digiszondák (DPS-4D) amplitúdó adatainak

összegyűjtésével. Az amplitúdó változások 3 állomáson (Juliusruh, Pruhonice és San Vito) 68% és 1430% között vettek fel értékeket 2,5 MHz-en (ezek főként a D réteg abszorpció-növekedése miatt léptek fel). Az amplitúdó-variációk 4 MHz-en – amelyek a kumulatív elnyelési variációkat tükrözik az E- és D-rétegekben – 18% és 565% között mozogtak, ami valamivel alacsonyabb érték, mint 2,5 MHz-en. A kumulatív elnyelési variáció azt jelenti, hogy az ionoszféra különböző rétegeiben (különösen a D- és E-rétegben) az elnyelés mértéke változik, és ezek összessége határozza meg a rádióhullámok erősségének ingadozását az adott frekvencián.

Azonban az amplitúdó módszernek 2 fő korlátja van: nem használható 3 MHz-nél magasabb frekvenciákon napfelkeltekor és naplementekor és negatív ionoszférikus viharok alatt, melyeket geomágneses zavarok hoztak létre és ennek következtében az foF2 értéke 4 MHz alá csökken. A második akadályt pedig az jelenti, hogy nincs amplitúdóadat az alacsonyabb frekvenciasávokon (2,5–3,5 MHz) intenzívebb flerek ($M3<$) után a részleges vagy teljes “fade-out” miatt. [20]

Egy másik hasznos módszer a jel-zaj-arány meghatározása (signal-to-noise ratio, SNR), amikor a csendes napokat hasonlítjuk össze azokkal a napokkal, amikor a Nap aktivitást mutatott. Ez is egy megfelelő módszer az abszorpciók változások kimutatására (Paula et al., 2022). Ez alapján három feltételt határoztak meg, amelyet egy napkitörésnek teljesítenie kell, hogy kimutatható zavarokat okozzon az ionoszférában. [21]

1. A geoeffektív kemény röntgensugárzás intenzitása (geoeffective hard X-ray irradiance): olyan röntgensugárzást kell kibocsátania a flernek, amely eléri a Földet és elég erős változásokat okoz ahhoz, hogy észlelhető legyen.
2. A geoeffektív kemény röntgensugárzás energiája (geoeffective hard X-ray radiant exposure), azaz a sugárzás által leadott energia mennyisége egy adott felületen az 1. pontban ismertetettekhez hasonló kritériumokat követel.
3. Napmagasság (SZA): magasabb napállásnál a felületet intenzívebben éri a sugárzás.

A GNSS felszíni és műholdas vevői megnyitották az utat a TEC flerek hatása által okozott változásainak mélyebb vizsgálata felé nagy időbeli és térbeli felbontással (Afraimovich, 2000; Zhang et al., 2002; Tsurutani et al., 2005, 2006). Nogueira et al. (2015) megfigyelték a TEC értékek hirtelen ugrását a nappal megvilágított féltekén napkitörés esemény során. Sripathi et al. (2013) erős korrelációt mutattak ki a megnövekedett TEC értékek és a fler intenzitása és az SZA között. Utóbbi tanulmány igazolta Zhang és Xiao (2005) kutatásait, mely szerint a megemelkedett TEC változik a zenitszöggel.

Mindezek alapján megállapíthatjuk tehát, hogy az ionoszféra állapota számos szempontból megváltozik egy fler esemény során, és a hatás mértéke különböző tényezőktől függ. Ezek a tényezők magukban foglalják a napállásszöveget, a semleges összetétel eloszlását, az ionizációs és rekombinációs folyamatokat, a napkitörés időbeli lefolyását, valamint a nap sugárzási spektrumát az X-sugaraktól az EUV-tartományig.

A statisztikák arra engednek következtetni, hogy azok a flerek, amelyek közelebb történnek a napkorong centrumához, sokkal nagyobb hatással tükröződnek a TEC adatokban, mint azok, amelyek a napkorong széléhez közel következnek be. Ez jobban feltárható, ha a kitöréseket a röntgen-csúcsszintjük szerint csoportosítva elemezzük. [22]

Mahajan et al. (2010) [23] arra jutottak, hogy a röntgen és az EUV fluxus között gyenge korreláció lép fel csupán. Viszont ez nem meglepő eredmény, mivel a forrása a két különböző sugárzásnak nem egyezik meg, illetve a szín-magnitúdó diagramjaik (Color-Magnitude Diagram – CMD) változnak a napkorong centrumától a szélek felé haladva. Míg a röntgensugárzás a napkorona aktív régiójából származik, az EUV kibocsátás az aktív és inaktív közötti átmeneti régiótól a koronáig képződik (Bauer 1973). Mivel az EUV emisszió nagy része alacsonyabb szélességű régiókból származik, kijutásuk során jobban elnyelődnek a nap atmoszférájában.

Mikor a fler helyzete a Napon nem szerepelt az analízisben, a fluxusok rossz korrelációs értéket mutattak az EUV értékekkel, viszont ennek figyelembe vétele után javult ez az érték, kiemelve a CMD (központi meridiántól vett távolság) jelentőségét. [24]

3. A tanulmány célja, módszerek és adatok

3.1 Jelen vizsgálatok fő célja

Korábbi tanulmányokra alapozva fő célom a flerek ionoszférára gyakorolt hatásának vizsgálata volt ionoszonda adatok (ionogramok) felhasználásával geomágneses szempontból nyugodt időszakokban. A vizsgálatokhoz az ionogramok kézi kiértékelése és az f_{min} és f_{oF2} paraméterek pontos meghatározása, illetve a paraméterek változásának (idősorának) vizsgálata volt szükséges a kiválasztott eseményeknél. Ezen kívül egy geoeffektivitás paraméter meghatározása korrelációs elemzések segítségével az ionogramokból származtatott paraméterek és a fler intenzitása (röntgen fluxus) és a fler egyéb tulajdonságai (az állomás zenitszöge az esemény időpontjában, a központi meridiántól vett távolság) között.

Mivel az ionoszféra és a magnetoszféra szorosan csatolt rendszert alkot a Föld körül, geomágneses vihar esetén az ionoszféra állapota is változik. Ilyen esetben nem lehetne pontosan megállapítani, hogy a megfigyelt változások valóban a fler hatásának tudható-e be, vagy a geomágneses zavarok befolyásolják őket, így a vizsgálatokhoz geomágneses szempontból nyugodt időszakokban bekövetkező fler eseményeket választottam ki.

3.2 Az események kiválasztása

A megfelelő események kiválasztását a Hinode Flare Catalogue [25] nevű oldalon kezdtem. A Hinode egy japán űrmisszió, amelyet a Japán Űrkutatási Intézet (ISAS) és a Japán Űrügynökség (JAXA) fejlesztett és indított, a Nemzeti Csillagászati Observatórium (NAOJ) közreműködésével. Nemzetközi partnerekként az Amerikai Űrkutatási Hivatal (NASA) és a Brit Tudományos és Technológiai Létesítmény Tanács (STFC) is részt vesznek a projektben. A projekt fő célja a Nap részletes megfigyelése és az azon történő események vizsgálata az űridőjárási események előrejelzése céljából.

A flerek ezen az oldalon időintervallum és erősség szerint is kategorizálva vannak. C8, vagy annál nagyobb intenzitású flereket választottam feldolgozásra, amik 6 és 15 óra között érték el a maximum (peak) intenzitásukat világidőben, mivel ekkor észlelhető igazán a hatásuk az európai kontinens felett, összefüggésben az állomások fler időszakai SZA-jével. Mivel a 25. nappciklus intenzív időszakába léptünk, nem kevés ilyen esemény történt az utóbbi években.

A kiválasztás során figyelembe vettem, hogy az események megfelelő napszakban történtek-e, és hogy az események között eltelt-e legalább 30 perc, mivel az átfedések torzíthatják az adatokat, és pontatlan eredményekhez vezethetnek.

Azok a napok, amelyeken geomágneses vihar is jelentkezett, kiszűrésre kerültek. Ezt két fő index mértéke alapján lehetett meghatározni, a kiválasztás során a következő küszöbértékek figyelembevételével.

- Kp (planetary-K) index: karakterizálja a geomágneses vihar erősségét (magnitúdóját). Amennyiben ez az érték 4 alatt maradt az adott napon, geomágneses szempontból nyugodt napnak volt tekinthető. Fontos megemlíteni, hogy a Kp-index nem előrejelzés és nem is a jelenlegi állapotok mutatója; mindig egy adott időszakot jellemez visszamenőleg.
- Dst (Disturbance storm time) index: a Föld egyenlítői mágneses zavarait és ezáltal a gyűrűáram erősségét méri. A mágneses tér csökkenését (depresszióját) mutatja nT egységekben. Amennyiben ez az érték nem csökkent -40 nT alá, nyugodtnak tekintettem a kiválasztott napot.

Az adatok elemzéséhez a NASA OMNIWeb [26] nevű oldalát használtam, ami egy adott napon belül kirajzolja a megfelelő értékeket és azok változásait.

A szűrés után is számos esemény maradt, amely megfelelt a követelményeknek, ezért további szűkítést végeztem: 41 eseményre 2023-ból és 11-re 2024-ből (utóbbi már nagyobb problémát jelentett, tekintve, hogy 2024-ben számtalan geomágneses vihar fordult elő), ezek közül is próbáltam a nagyobb intenzitásúakat választani, illetve figyelembe vettem, hogy több napszakban és évszakban forduljanak elő események, hiszen mindezek befolyással vannak a hatásukra. Így 52 feldolgozandó naphoz jutottam, ami kellően részletes statisztikát tudott nyújtani a vizsgálatokhoz. Mindemellett feldolgozásra került 11, flerek és geomágneses szempontból nyugodt nap is a napkitörések által okozott nyugodt napitól való eltérések

meghatározásához. Ezen napok feldolgozását 6 és 16 óra (UTC) között végeztem, mivel a flereket is ebből az időtartományból választottam ki.

Intenzitás	Kezdet (UTC)	Csúcs (UTC)	Vég (UTC)	X-ray-A [W/m ²]	X-ray-B [W/m ²]	Proton flux [protons/(cm ² sr keV s)]	Azimuth [°] (fler peaktime)	phi	lambda
M9.4	2024.06.23 12:51	2024.06.23 13:01	2024.06.23 13:11	2.52E-05	9.40E-05	2.54E-03	35	-19	5.327556
M6.1	2024.06.06 14:50	2024.06.06 15:06	2024.06.06 15:22	1.35E-05	6.14E-05	2.36E-03	54.53	-20	-10.74736
X1.5	2024.05.29 14:11	2024.05.29 14:37	2024.05.29 15:39	3.21E-05	1.44E-04	3.27E-03	50.87	-19	-9.516839
M9.13	2024.05.04 6:02	2024.05.04 6:19	2024.05.04 6:30	2.88E-05	9.16E-05	2.54E-03	64.78	26	38.634768
M6.1	2024.03.28 15:40	2024.03.28 15:56	2024.03.28 16:03	1.89E-05	6.56E-05	8.23E-02	76.11	-13	-149.09916
M7.1	2024.03.28 6:16	2024.03.28 6:29	2024.03.28 6:36	2.09E-05	7.23E-05	5.35E-02	74.36	-14	-150.93317
M7.4	2024.03.20 7:23	2024.03.20 7:36	2024.03.20 7:47	1.90E-05	7.50E-05	3.61E-03	67.28	-10	-145.05336
X1.7	2024.02.22 6:17	2024.02.22 6:32	2024.02.22 6:40	5.46E-05	1.70E-04	1.50E-02	85.78	16	-135.69993
X2.5	2024.02.16 6:42	2024.02.16 6:53	2024.02.16 6:58	7.37E-05	2.59E-04	2.53E-02	84.52	-19	60.08439
X3.4	2024.02.09 12:53	2024.02.09 13:14	2024.02.09 13:32	1.02E-04	3.36E-04	3.07E-03	69.71	-37	151.863635
M6.3	2023.12.15 7:03	2023.12.15 7:15	2023.12.15 7:23	1.63E-05	6.36E-05	1.47E-02	87.82	3	148.53526
M1.1	2023.11.24 9:17	2023.11.24 9:33	2023.11.24 9:43	1.38E-06	1.15E-05	2.01E-03	72.42	-15	5.0459412
M1.1	2023.11.23 14:25	2023.11.23 14:37	2023.11.23 14:42	1.44E-06	1.12E-05	3.71E-04	86.39	20	-2.592505
M1.2	2023.11.20 8:54	2023.11.20 9:03	2023.11.20 9:12	2.96E-06	1.28E-05	5.07E-03	73.32	19	-20.018805
M1.6	2023.11.02 12:18	2023.11.02 12:22	2023.11.02 12:26	4.55E-06	2.10E-05	2.81E-03	68.13	-18	-38.57676
M1.4	2023.11.01 11:37	2023.11.01 12:26	2023.11.01 13:01	2.58E-06	1.43E-05	1.26E-02	68.11	-9	-143.01511
M2.3	2023.10.10 12:08	2023.10.10 12:17	2023.10.10 12:29	4.60E-06	2.37E-05	5.44E-04	59.79	13	-57.13411
M8.7	2023.09.21 12:42	2023.09.21 12:54	2023.09.21 13:02	2.43E-05	8.80E-05	1.84E-03	55.45	7	103.27811
M8.2	2023.09.20 14:11	2023.09.20 14:19	2023.09.20 14:25	2.67E-05	8.31E-05	8.06E-03	65.22	7	102.66223
M1.1	2023.09.11 14:38	2023.09.11 14:49	2023.09.11 14:59	1.99E-06	1.13E-05	4.88E-03	66.21	-6	-155.7656
M4.1	2023.07.28 15:39	2023.07.28 15:58	2023.07.28 16:13	6.57E-06	4.13E-05	2.19E-03	64.39	26	-142.6047
C9.1	2023.07.12 10:23	2023.07.12 10:29	2023.07.12 10:33	1.26E-06	9.66E-06	1.29E-02	29.01	25	35.99305
M6.9	2023.07.12 8:49	2023.07.12 8:55	2023.07.12 9:00	2.04E-05	7.32E-05	2.21E-02	38.15	25	-100.14308
M2.0	2023.07.11 14:19	2023.07.11 14:35	2023.07.11 14:45	4.14E-06	2.02E-05	3.11E-02	49.06	25	-91.94194

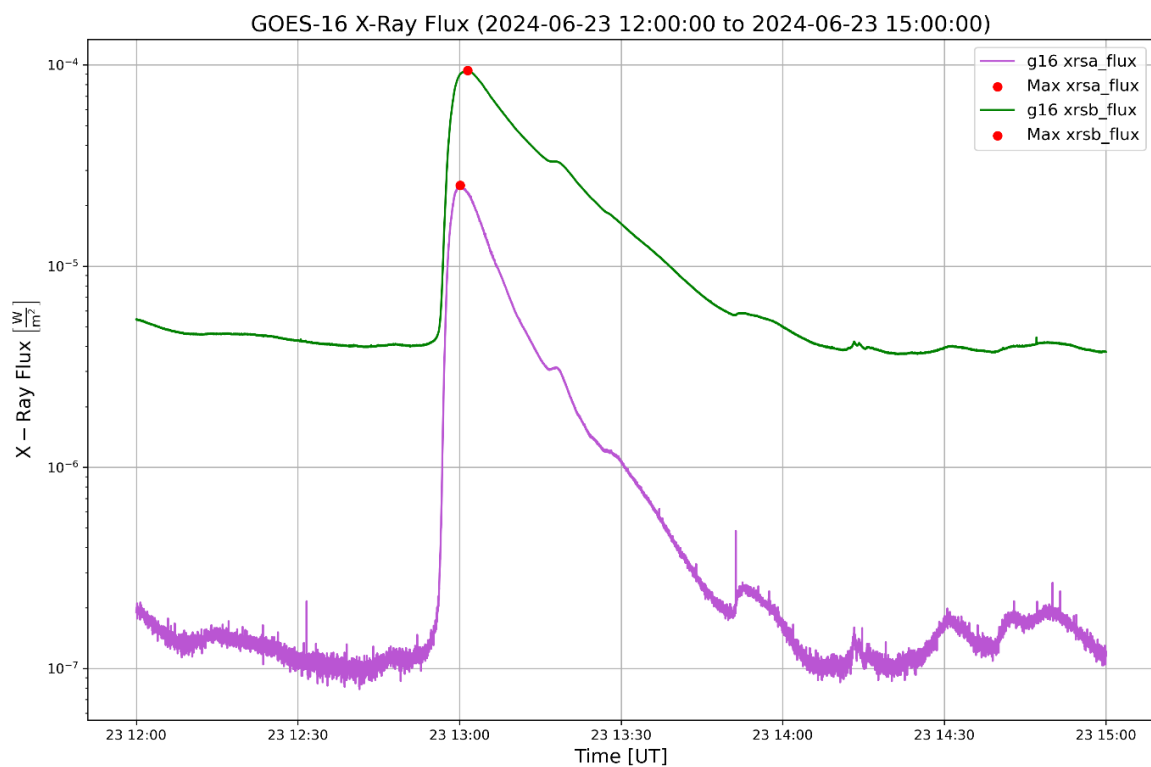
M1.0	2023.07.06 10:32	2023.07.06 10:49	2023.07.06 11:07	1.61E-06	1.07E-05	2.18E-03	27.51	15	153.317823
C8.1	2023.07.05 10:55	2023.07.05 11:00	2023.07.05 11:04	1.37E-06	8.55E-06	8.58E-03	27.23	16	166.341841
M1.4	2023.07.04 12:20	2023.07.04 12:35	2023.07.04 12:55	2.67E-06	1.49E-05	1.11E-03	32.22	16	178.796184
C8.8	2023.07.02 8:45	2023.07.02 8:53	2023.07.02 8:58	1.26E-06	8.96E-06	2.19E-03	37.33	17	166.24417
M1.9	2023.06.28 8:26	2023.06.28 8:44	2023.06.28 8:59	3.51E-06	1.99E-05	5.51E-04	38.24	20	-126.63575
M1.1	2023.06.22 10:57	2023.06.22 11:21	2023.06.22 11:36	1.41E-06	1.17E-05	1.45E-03	26.77	-12	-154.60296
M1.0	2023.06.21 15:31	2023.06.21 15:38	2023.06.21 15:43	1.70E-06	1.07E-05	5.50E-04	58.68	19	-94.88473
M1.1	2023.06.21 12:31	2023.06.21 12:44	2023.06.21 12:54	1.62E-06	1.18E-05	7.33E-04	33.01	-13	-156.23012
M4.7	2023.06.07 11:18	2023.06.07 11:46	2023.06.07 11:59	8.28E-06	4.73E-05	3.61E-04	28.66	-15	51.749384
M1.0	2023.05.31 12:23	2023.05.31 12:26	2023.05.31 12:30	1.79E-06	1.11E-05	9.11E-04	32.84	-17	-160.20846
M1.4	2023.05.30 13:28	2023.05.30 13:38	2023.05.30 14:00	3.23E-06	1.66E-05	5.51E-04	41.96	-20	-126.64634
M1.3	2023.05.30 10:15	2023.05.30 10:22	2023.05.30 10:29	3.06E-06	1.41E-05	5.51E-04	29.16	-22	-76.79927
M1.0	2023.05.30 7:54	2023.05.30 8:10	2023.05.30 8:19	2.40E-06	1.25E-05	5.47E-04	43.46	-22	-75.50357
M1.1	2023.05.25 14:37	2023.05.25 14:46	2023.05.25 14:53	1.90E-06	1.20E-05	7.48E-04	52.94	-26	-98.04784
M1.0	2023.05.24 9:51	2023.05.24 9:58	2023.05.24 10:02	1.97E-06	1.09E-05	9.26E-04	31.58	17	-86.18962
M1.6	2023.05.18 12:39	2023.05.18 12:49	2023.05.18 12:56	2.32E-06	1.69E-05	5.45E-04	37.56	18	-92.36035
M2.2	2023.05.18 11:32	2023.05.18 11:47	2023.05.18 12:00	4.37E-06	2.26E-05	5.44E-04	31.96	18	-95.74491
M1.2	2023.05.05 15:18	2023.05.05 15:31	2023.05.05 15:39	1.37E-06	1.25E-05	1.47E-03	63.58	15	133.08325
C9.5	2023.05.05 6:52	2023.05.05 7:06	2023.05.05 7:16	9.23E-07	9.67E-06	2.55E-03	57.29	9	112.72827
M3.9	2023.05.04 8:05	2023.05.04 8:44	2023.05.04 9:08	7.55E-06	3.97E-05	1.27E-03	43.51	14	132.27673
M7.1	2023.05.01 13:02	2023.05.01 13:09	2023.05.01 13:13	2.47E-05	7.72E-05	1.67E-03	43.72	-24	-98.79766
M1.3	2023.04.11 9:51	2023.04.11 10:16	2023.04.11 10:23	2.17E-06	1.40E-05	9.04E-04	42.81	-19	105.12181
M1.2	2023.03.29 13:47	2023.03.29 14:07	2023.03.29 14:15	2.05E-06	1.29E-05	7.51E-04	60.09	-21	-1.50417
C9.4	2023.03.18 7:10	2023.03.18 7:16	2023.03.18 7:20	1.68E-06	9.67E-06	1.12E-02	71.13	-19	10.176059
M1.0	2023.03.17 15:04	2023.03.17 15:07	2023.03.17 15:11	2.35E-06	1.36E-05	1.23E-02	71.81	-22	155.018794
M1.1	2023.03.08 9:53	2023.03.08 10:12	2023.03.08 10:46	2.00E-06	1.20E-05	7.40E-04	56.42	9	-142.52728
M1.3	2023.03.06 8:57	2023.03.06 9:12	2023.03.06 9:37	2.82E-06	1.32E-05	4.46E-03	61.52	22	-36.66407
M3.3	2023.03.03 10:10	2023.03.03 10:32	2023.03.03 10:48	7.10E-06	3.32E-05	3.11E-03	57.53	21	-11.80948

I.táblázat: Fler események jellemzői (ϕ -szélesség a napkorongon, λ -hosszúság a napkorongon)

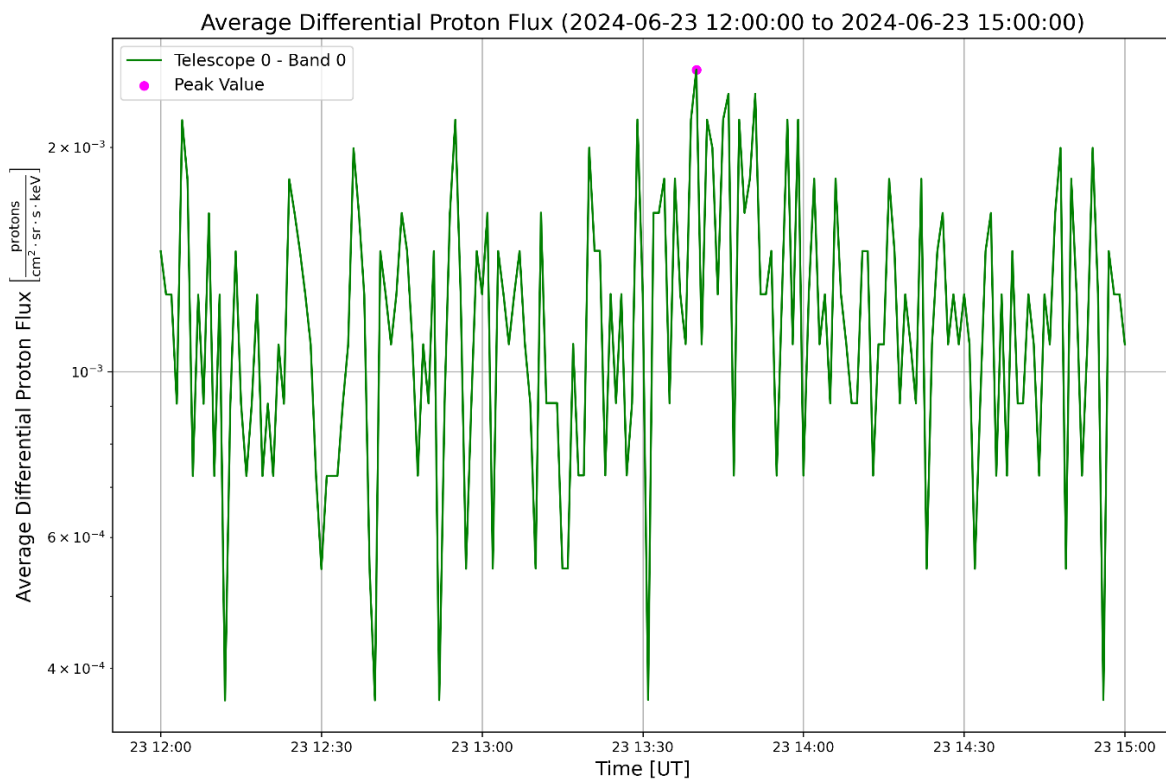
Nap	Dst (napi min) [nT]	Kp (napi max)	Max fler	X-ray-A [W/m ²]	X-ray-B [W/m ²]	Proton flux [protons/(cm ² sr keV s)]
2023.08.13	-1	2	C2.4	8.23E-07	2.60E-06	4.37E-03
2023.08.28	-12	2	C2.3	2.42E-07	1.04E-06	1.28E-03
2023.08.31	-35	2	C2.4	1.94E-07	2.11E-06	1.12E-02
2023.11.17	-23	2	C1.7	2.27E-07	1.80E-06	9.20E-04
2023.12.27	-2	2	C1.9	2.17E-07	1.40E-06	1.85E-02
2024.01.15	-13	2.3	C2.8	3.02E-07	2.91E-06	8.33E-03
2024.01.17	-7	1.3	C2.5	4.55E-07	2.66E-06	1.45E-03
2024.01.27	-10	2.3	C2.9	4.61E-07	2.99E-06	3.99E-03
2024.02.01	-9	2	C3.0	4.73E-07	3.12E-06	1.26E-02
2024.02.20	-18	2.3	C2.8	3.20E-07	2.92E-06	1.48E-02
2024.04.07	-22	2.3	C1.1	3.74E-07	5.85E-07	7.31E-04

2.táblázat: Referencianapok adatai (phi-szélesség a napkorongon, lambda-hosszúság a napkorongon)

A flerek időintervalluma alatti maximum röntgen- és protonfluxus adatokat is kinyertem a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) adatbázisából korábban megírt kódokkal, melyek képesek beolvasni és grafikonon megjeleníteni a változásokat.



4. ábra: A beérkező röntgensugárzás két sávbán a 2024.06.23.-ai fler során (M9.4) (A piros jelzés a maximum röntgen értékénél helyezkedik el)



5. ábra: A beérkező protonfluxus a 2024.06.23-i fler során (M9.4) (A lila jelzés a maximum proton fluxus értékénél helyezkedik el)

A GOES műhold két röntgensávot használ, amelyeket X-ray-A és X-ray-B sávoknak nevezünk. Az előbbi 1-8 ángström (0,1-0,8 nm), az utóbbi 0,5-4,0 ángström (0,05-0,4 nm) tartományban végez méréseket, melyet két gázzal töltött ionkamra tesz lehetővé. Ezek a beérkező röntgensugárzás hatására ionizálódnak, ezzel elektromos teret keltve, melyet mér a műhold detektora. Az érzékelők különböző műszerek segítségével kiküszöbölik a különböző zajok által keltett interferenciát, így tisztán a röntgensugárzás hatása lesz érzékelhető. [27][28] A rövidebb hullámhosszú 'A' sáv a nagyobb energiájú napkitörések észlelésére, illetve gyorsabb reakcióképessége miatt a hirtelen változásokra, míg a hosszabb hullámhosszú 'B' sáv a kisebb energiájú flerek jellemzőinek stabilabb meghatározásához hasznos. Ezeknek a sávoknak az együttes vizsgálata a napkitörések intenzitásának és spektrális eloszlásának nagyobb pontosságú meghatározását teszi lehetővé. [29]

A proton fluxus vizsgálata ebben a tanulmányban még nem kerül tárgyalásra, viszont meg kell jegyezni, hogy a napkitörések során kibocsátott nagy energiájú protonok jelentős hatással lehetnek nem csak ionoszférára, de a Földön és űrben található eszközökre is. [30][31]

3.3 Ionogramok feldolgozása

Az ionogramok feldolgozását a SAO Explorer 3.6-os verziójával végeztem. Ezt a szoftvert a Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) készítette, és főként ionoszondák által mért ionogramok elemzésére szolgál. Ennek a programnak a segítségével az ionoszféra különböző paramétereinek, például a maximális visszaverődési frekvencia és a kritikus frekvencia meghatározását, valamint az ionoszférikus rétegek változásait tudjuk nyomon követni.

A Hinode Flare Catalogue-ban nem csak a fler csúcsertékének ideje, de a kezdeti és lecsengési ideje is szerepelt, amelyeket szintén kigyűjtöttem. Ezek megfelelő iránymutatást adtak ahhoz, hogy hány órától kezdjem az ionogramok feldolgozását és mikor fejezzem be. Az ionogramok feldolgozását a fler kezdete előtt nagyjából egy órával és a fler lecsengését követően nagyjából 1,5-2 órával bővítettem ki. Ez bőséges időt adott arra, hogy látszódjanak a fler előtti nyugodt ionogramok jellemzői, a napkitörés hatása, illetve a rétegek vissza- vagy vissza-nem-állása az eredeti állapotukba.

A skálázás menete a következőképpen folyik: maga a szoftver is képes valamennyire felismerni a rétegeket, viszont ez közel sem olyan pontos, mint a manuális feldolgozás, ezért minden egyes ionogramot kézzel szokás skálázni tudományos vizsgálatokhoz. Az ionoszondák által készített ionogramok elérhetők a programban. Saját vizsgálataimhoz a pruhonicei digiszondát (PQ052) választottam, mivel ez a digiszonda megbízható adatokkal szolgál, kevésszer fordul elő úgynevezett „data-gap”, amikor egyáltalán nem érhető el ionogram egy adott időszakra. Ez egyben egy közepes földrajzi szélességet jelent, ami alkalmas a globális mintázatok tanulmányozására, mivel az Egyenlítő és a Sarkpont között, átmeneti zónában helyezkedik el. Sajnos a soproni ionoszonda a vizsgált periódusban többször meghibásodott, ezért nem amellet döntöttem.

A skálázást témavezetőm segítségével, illetve a T-FORS projekt által összegyűjtött kézikönyvek (mint például a "Scaling Ionograms" Phil Wilkinson-tól, vagy "Manual of Ionogram Scaling" N. Wakai, H. Ohya és T. Koizumi-tól) [32] használatával sikerült elsajátítanom szakmai gyakorlatom keretében, melyet a soproni HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Intézetben végeztem.

A pruhonicei digiszonda 5 perces felbontásban működik, így gyakorlatom végére több, mint 2000 ionogram került feldolgozásra manuálisan. Az 5 percenként készülő kép az ionoszféra állapotáról lehetőséget ad a réteg karakterisztikaiban bekövetkező változások részletesebb vizsgálatára. Nem csak az esemény előtti és utáni helyzetét tudjuk nyomon követni, hanem ezeknek a változásoknak a felépülését is, illetve fontos lehet a gyakoribb frekvenciával történő felvétel készítése rövid ideig tartó eseményeknél.

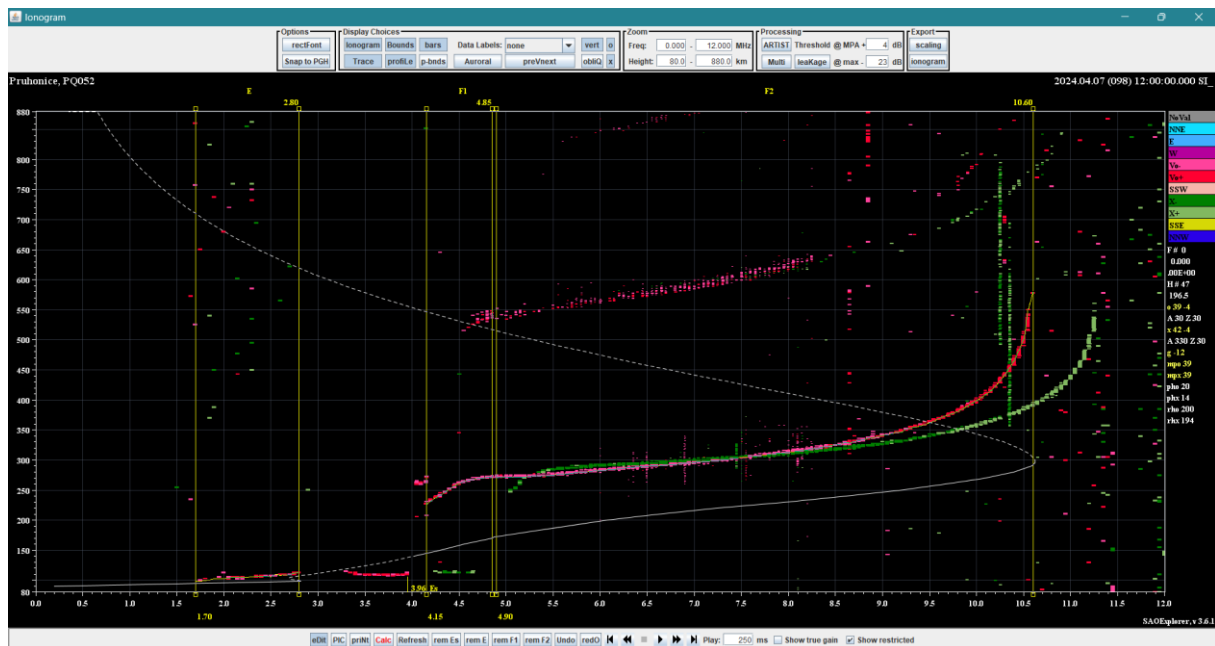
3.4 Feldolgozás alaplépései

Az ionogramok elemzése két fájl együttes feldolgozásán alapul, melyeket a Prague Mirror cseh adatbázisból értem el a SAO Explorer programon belül. Először letöltöttem az események idejéhez vagy a nyugodt napokhoz tartozó .GRM fájlt, mely a megfigyelésekkel kapcsolatos metaadatokat, kalibrációs beállításokat és elemzési paramétereket tartalmazza. A másik fájl típus mellyel a feldolgozást végeztem a .SAO kiterjesztésű: ez tárolja az ionoszféra megadott rétegeinek tulajdonságait, az elektronsűrűséget, illetve lehetővé teszi ezek vizuális megjelenítését is. Fontos, hogy a feldolgozás előtt és után külön fájlokba mentünk el a munkánkat, mivel gyakori problémát jelent sajnos, hogy a feldolgozás közben meghibásodik a program és ezzel a fájlunk is.

Feldolgozás előtt a program az időpontok mellett tájékoztatásul kiírja, hogy "SI_", mely azt indikálja számunkra, hogy a skálázási adatsor (S), illetve a hozzátartozó ionogram is elérhető. Ez az elemzés után megváltozik "SIE"-re, ami az operátor által korábban vagy jelenleg szerkesztett vagy ellenőrzött skálázási adatok (E) jelenlétét tanúsítja.

Egy nyugodt nap feldolgozása

Példaképpen 2024.04.07. mint nyugodt nap 12:00-kor készült ionogramjának képét ismertetem az alábbiakban. Ezen a napon a legnagyobb fler erőssége, mely elérte a Földet mindössze C1.1-es erősségű volt, ezért kiváló példával szolgál az ionoszféra csendes körülmények közti bemutatására.



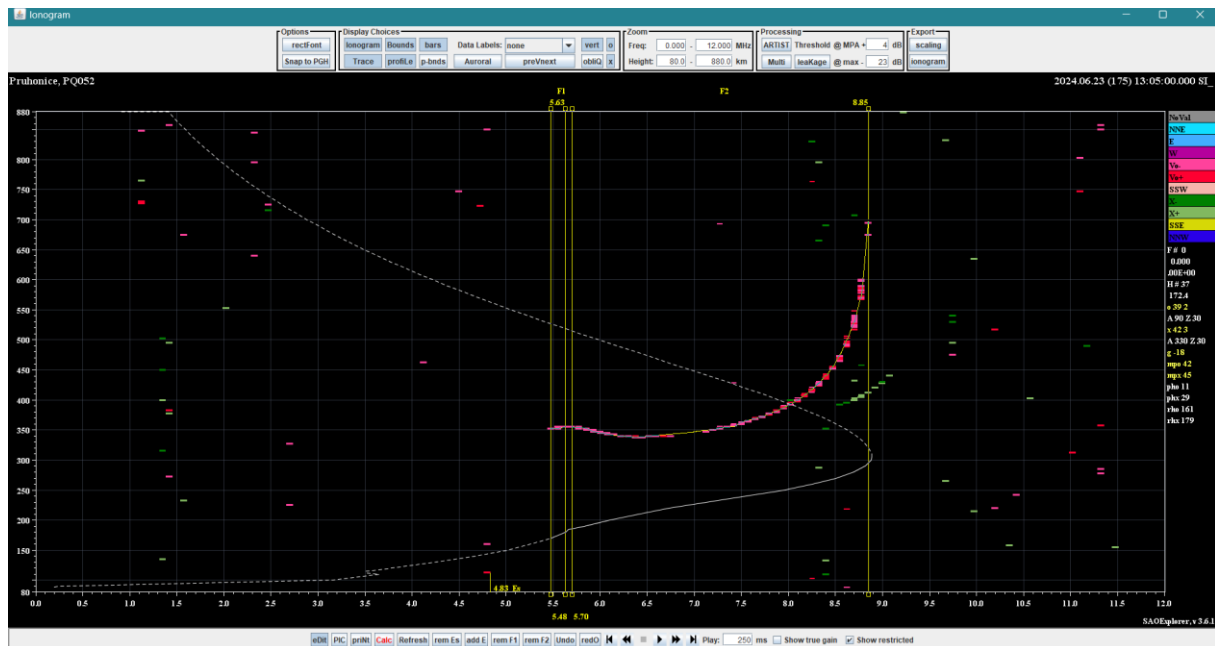
6. ábra: Ionogram nyugodt napon (2024.04.07. 12:00 UT)

A grafikonról feldolgozás után kiválóan leolvashatók a rétegek nevei, az, hogy éppen milyen magasságban helyezkednek el, emellett az első és az utolsó visszaverődésük frekvenciája. A jobb felső sarokban pedig látható, hogy a nap hányadik órájában és percében történt az észlelés.

Ezen a képen kiválóan megfigyelhető az E réteg, illetve egy egészen kiterjedt sporadikus E (Es) réteg is, melynek helyét az utolsó visszaverődés frekvenciájánál jelöljük, magasságát a legalsó, Földhöz legközelebb eső pontjához illesztjük, mivel a réteg itt képes a legstabilabban visszaverni a rádióhullámokat, így ez egy konzisztens referenciapontként szolgál. Megfigyelhető az egybeforrt F1 és F2 réteg is, amiket megszokott módon az inflexiók ponthoz közel választunk el. Érdekességgé megfigyelhető az F1 réteg előtt egy „buborék” is, ami nagy valószínűséggel egy Travelling Ionospheric Disturbance (TID) jelenléte az ionogramon. Ennek az igazolásához azonban szükséges, hogy az ez előtti, illetve utáni ionogramokat is lássuk, mivel az ionoszféra rendkívül dinamikus réteg, folyton változásban van, így állapota csak folyamatokban értelmezhető.

Egy napkitöréses (fleres) nap bemutatása

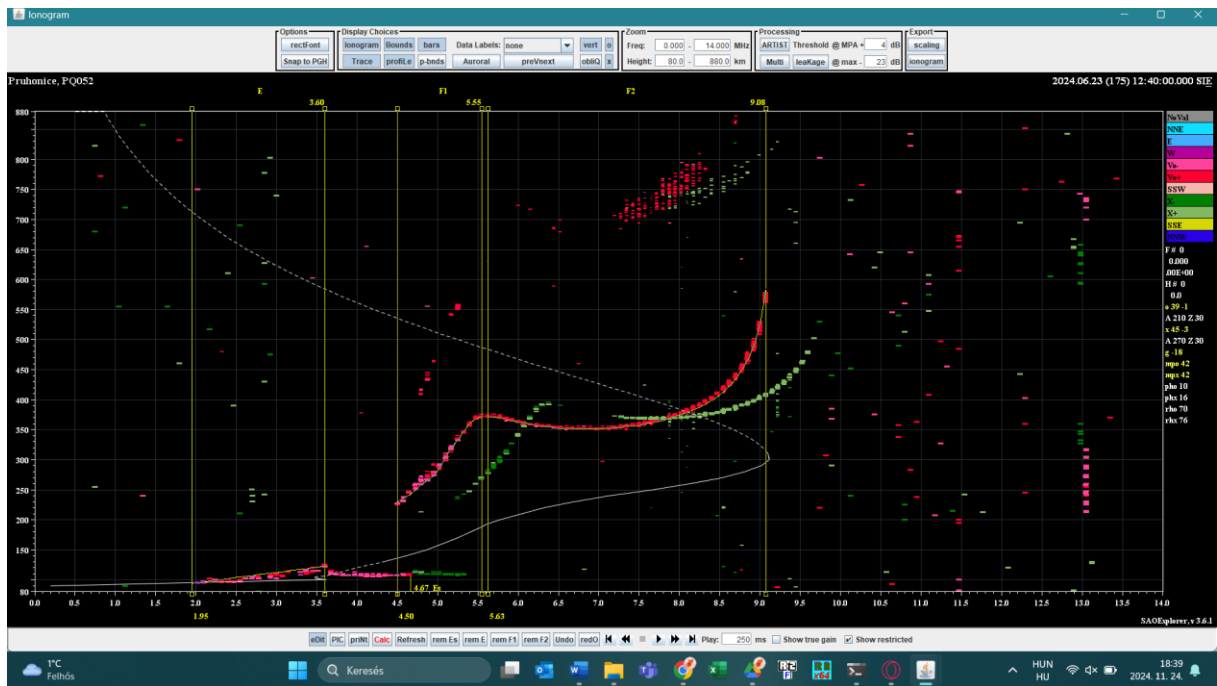
A fler ionoszférára gyakorolt hatásának demonstrálására a 2024.06.23. napi 12:51-től 13:11-ig (UTC) tartó, M9,4 erősségű flert választottam ki, melynek csúcsidőpontja (peak-je) 13:01-kor volt. Választásom azért esett erre a példára, mivel ekkor a Nap még nagy magasságban járt a Föld felett (kicsi volt az állomás SZA-je az esemény csúcsidőpontjában), illetve a vizsgált események közül ez relatíve nagy erősségű volt.



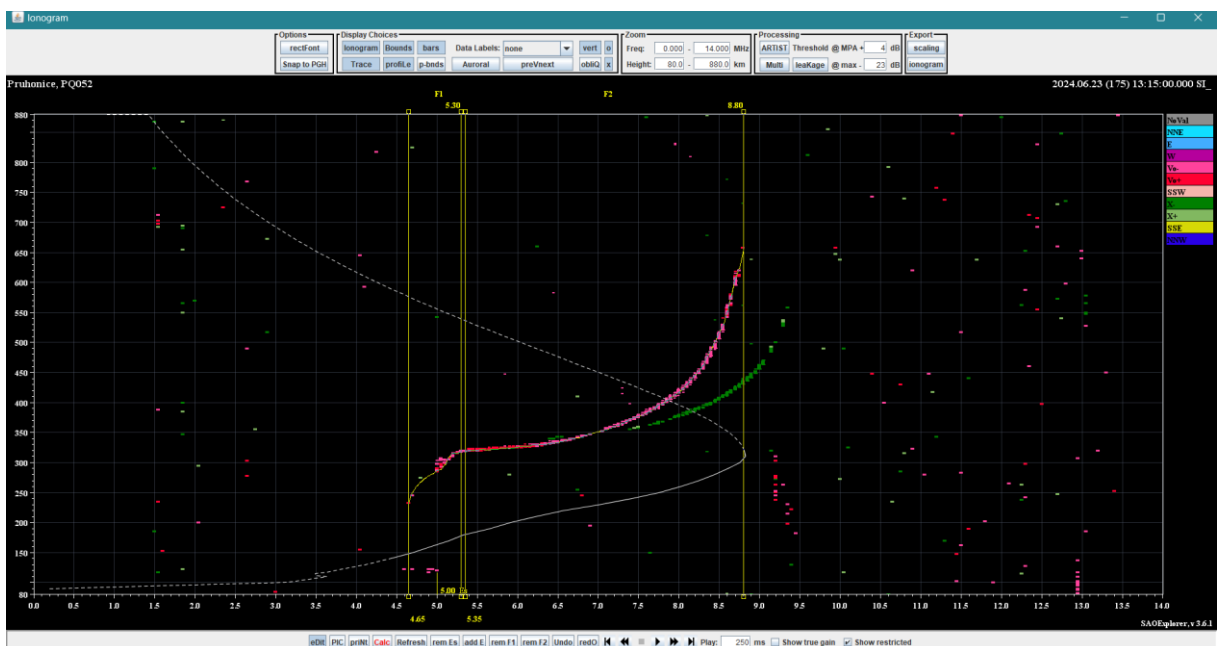
7. ábra: M9.4-es fler hatása az ionoszféra rétegeire (2024.06.23. 13:05 UT)

Itt a fler csúcs időpontja utáni első ionogramot választottam szemléltetésül, mivel ekkor figyelhetők meg legjobban a rétegek módosulásai, hiszen ekkor a legerősebb a beérkező sugárzás.

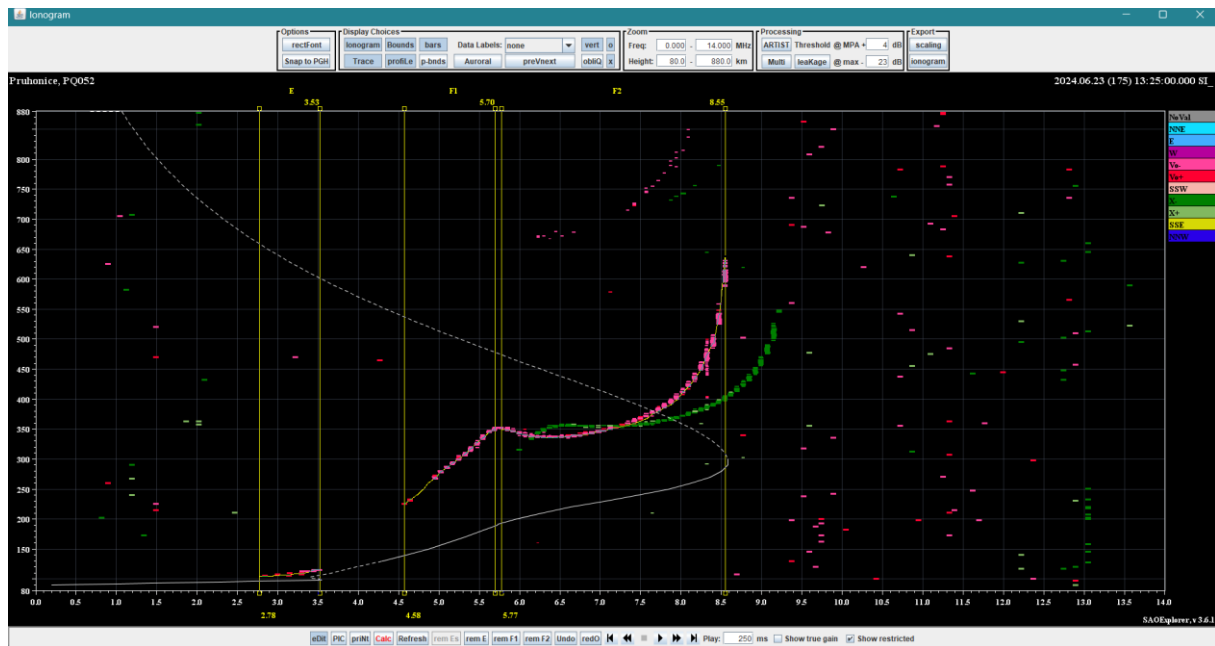
Látható, hogy az E réteg (és esetleg, ha lenne, Es réteg) teljesen eltűnt az ionogramról. Ennek oka az, hogy a Földhöz legközelebb eső D réteg a röntgen sugárzásnak köszönhetően rendkívül ionizálttá vált, illetve a napkitörést követően megnőtt az abszorpció is az alsó ionoszférában, azaz a szondázó EM hullámok elnyelődtek, nem történt visszaverődés az E rétegről. Emellett a hirtelen ionizáció az E rétegben is változásokat okozott, befolyásolta az elektronok eloszlását. Az F rétegekben több szabad elektront eredményezett, ezáltal növelve a rétegek sűrűségét. Napkitörés után tehát az F réteg képes nagyobb távolságokra közvetíteni a magasabb frekvenciájú jeleket, ám ez a jelenség átmeneti és nem konzisztens, sőt, vezethet a rádiójelek szcintillációjához, azaz zavarához és szétszóródásukhoz. [33]



8.ábra: Rétegek állapota a fler előtt (12:40 UT)



9.ábra: A rétegek helyreállása (13:15 UT)



A fler lecsengését követően a rétegek visszatértek a fler előtti, vagy ahhoz közeli állapotukba.

Text fájlok

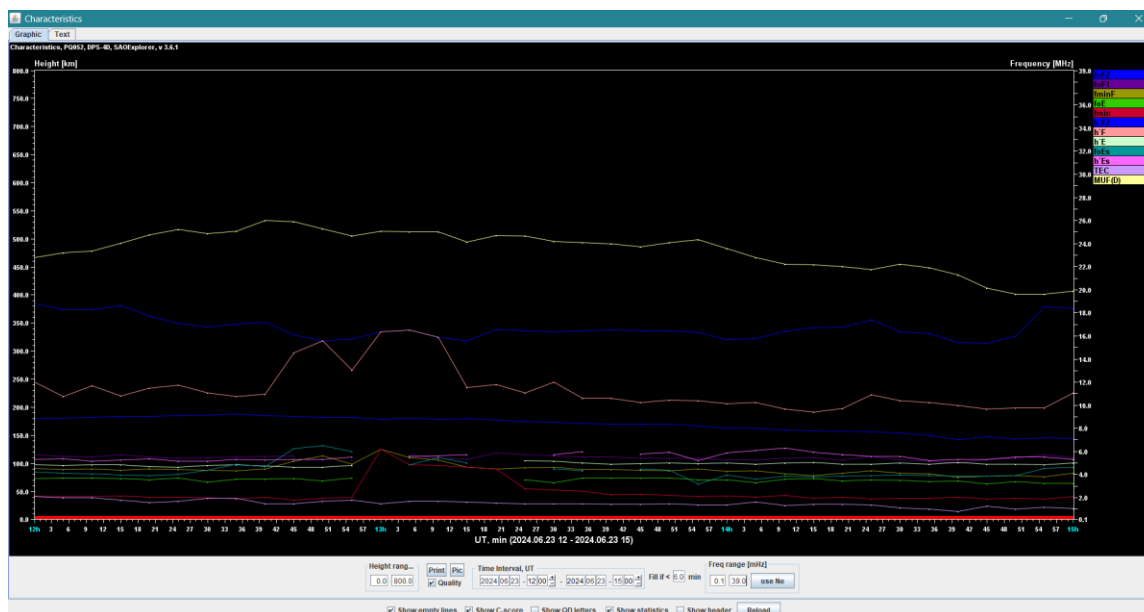
A feldolgozással egy időben a program menti az adott időpontokban az ionoszféra karakterisztikáit, mint a rétegek maximális (kritikus) frekvenciáját és magasságát, a TEC-et, a visszavert frekvenciákat és további fontos adatokat. Ez nagyban megkönnyíti a későbbiekben a feldolgozást, mivel azonnal elérhetővé teszi az értékeket.

Characteristics													
Graphic		Text											
Save As ...													
yyy.MM.dd (DDD)	HH:mm:ss	C-score	foF2	foF1	fminF	foE	fmin	h'F2	h'F	h'E	foEs	h'Es	TECMUF(D)
2024.06.23 (175)	12:00:00	100	8.825	5.72	4.55	3.66	2.15	384.5	244.9	98.0	4.20	107.3	41.2 22.81
2024.06.23 (175)	12:05:00	100	8.888	5.59	4.42	3.69	2.10	373.5	218.9	96.1	4.14	108.5	39.1 23.20
2024.06.23 (175)	12:10:00	100	8.944	5.51	4.50	3.69	2.10	373.5	238.7	97.4	4.08	103.6	39.0 23.38
2024.06.23 (175)	12:15:00	100	9.025	5.72	4.40	3.66	2.15	381.0	220.1	97.4	3.98	108.0	34.6 24.05
2024.06.23 (175)	12:20:00	100	9.038	5.51	4.50	3.54	2.02	362.0	233.7	94.9	3.90	108.5	30.8 24.76
2024.06.23 (175)	12:25:00	100	9.113	5.43	4.42	3.69	2.02	349.0	239.9	93.6	4.01	103.6	32.9 25.22
2024.06.23 (175)	12:30:00	100	9.125	5.47	4.40	3.36	2.00	343.0	226.0	96.5	4.36	103.6	37.5 24.86
2024.06.23 (175)	12:35:00	100	9.263	5.51	4.35	3.62	1.88	348.0	218.8	97.4	4.88	107.5	38.0 25.08
2024.06.23 (175)	12:40:00	100	9.113	5.59	4.50	3.62	2.02	351.0	223.8	95.0	4.67	106.0	28.7 26.01
2024.06.23 (175)	12:45:00	100	9.025	5.62	5.15	3.66	1.80	329.0	297.0	93.6	6.24	107.3	28.3 25.92
2024.06.23 (175)	12:50:00	100	8.925	—	5.63	3.46	1.95	318.1	318.1	93.6	6.48	107.3	32.3 25.28
2024.06.23 (175)	12:55:00	100	8.962	5.29	4.88	3.69	2.02	321.5	266.0	96.1	6.01	111.0	34.9 24.66
2024.06.23 (175)	13:00:00	100	8.800	—	6.20	—	6.20	334.2	334.2	—	—	—	28.2 25.05
2024.06.23 (175)	13:05:00	100	8.888	5.66	5.47	—	4.83	337.5	337.5	—	4.83	112.2	32.3 25.04
2024.06.23 (175)	13:10:00	100	8.794	5.43	5.25	—	4.80	325.0	325.0	—	5.49	113.5	32.3 25.04
2024.06.23 (175)	13:15:00	100	8.825	5.32	4.65	—	4.65	318.1	235.0	—	5.00	116.0	31.8 24.15
2024.06.23 (175)	13:20:00	100	8.738	5.88	4.50	—	4.50	339.0	240.5	—	—	—	29.7 24.71
2024.06.23 (175)	13:25:00	100	8.587	5.74	4.58	3.54	2.77	336.0	225.1	104.8	—	—	27.9 24.66
2024.06.23 (175)	13:30:00	100	8.525	5.62	4.65	3.31	2.65	334.5	244.9	103.6	4.46	116.0	28.5 24.20
2024.06.23 (175)	13:35:00	100	8.438	5.51	4.42	3.69	2.55	336.7	216.0	101.1	4.31	120.9	28.6 24.09
2024.06.23 (175)	13:40:00	100	8.363	5.51	4.42	3.69	2.25	337.9	216.5	99.0	—	—	27.0 24.00
2024.06.23 (175)	13:45:00	100	8.375	5.42	4.40	3.71	2.30	337.0	209.0	99.8	4.46	117.2	27.6 23.73
2024.06.23 (175)	13:50:00	100	8.363	5.43	4.35	3.69	2.17	337.0	212.7	101.0	4.36	119.7	27.9 24.09
2024.06.23 (175)	13:55:00	100	8.194	5.43	4.50	3.54	2.10	333.0	211.4	99.8	3.17	104.8	26.5 24.33
2024.06.23 (175)	14:00:00	100	8.025	5.27	4.25	3.56	2.15	321.0	206.5	100.6	3.96	118.4	26.0 23.56
2024.06.23 (175)	14:05:00	100	7.988	5.29	4.35	3.31	2.02	323.0	208.9	98.6	3.62	123.4	31.2 22.77
2024.06.23 (175)	14:10:00	100	7.838	5.43	4.05	3.62	2.17	335.4	196.6	101.0	3.85	127.1	24.9 22.23
2024.06.23 (175)	14:15:00	100	7.825	5.47	3.90	3.66	1.95	341.6	191.6	102.3	3.81	119.7	27.4 22.16
2024.06.23 (175)	14:20:00	100	7.763	5.29	4.13	3.46	2.02	343.0	197.8	98.6	3.85	116.0	26.9 22.01
2024.06.23 (175)	14:25:00	100	7.688	5.59	4.35	3.54	1.88	356.0	222.6	98.6	3.93	112.2	26.0 21.76
2024.06.23 (175)	14:30:00	100	7.575	5.27	4.10	3.51	1.95	334.2	211.5	101.1	3.96	112.2	21.2 22.20
2024.06.23 (175)	14:35:00	100	7.388	5.13	4.05	3.39	1.95	331.0	208.9	98.6	3.93	104.8	18.5 21.91
2024.06.23 (175)	14:40:00	100	7.013	4.99	3.75	3.46	2.02	315.5	202.7	102.3	3.84	107.3	14.2 21.28
2024.06.23 (175)	14:45:00	100	7.262	5.32	3.85	3.21	1.90	314.0	196.6	98.6	3.87	107.3	23.8 20.13
2024.06.23 (175)	14:50:00	100	7.088	5.43	3.90	3.39	1.95	327.0	199.0	98.6	3.93	111.0	19.2 19.62
2024.06.23 (175)	14:55:00	100	7.163	5.74	3.83	3.24	1.88	379.0	199.0	97.4	4.53	111.0	21.6 19.65
2024.06.23 (175)	15:00:00	100	7.125	5.47	4.10	3.26	2.10	376.0	226.0	101.1	4.65	107.5	19.4 19.91
QI		7.825	5.37	4.13	3.46	1.95	329.0	208.9	97.4	3.93	107.3	26.0	22.20
Med		8.525	5.47	4.42	3.55	2.10	337.0	220.1	98.6	4.14	111.0	28.3	24.05
Qu		8.925	5.59	4.55	3.69	2.25	349.0	239.9	101.0	4.65	116.0	32.3	24.76
V		12.903	3.87	9.60	6.34	14.29	5.9	14.1	3.7	17.47	7.8	22.3	10.64
Avg		8.348	5.48	4.48	3.54	2.49	341.5	233.0	98.6	4.39	111.5	28.8	23.45
Min		7.013	4.99	3.75	3.21	1.80	314.0	191.6	93.6	3.17	103.6	14.2	19.62
Max		9.263	5.88	6.20	3.71	6.20	384.5	337.5	104.8	6.48	127.1	41.2	26.01

11. ábra: Karakterisztikák egyszerű megjelenítése (2024.06.23.-ai M9.4-es fler idején)

Ezeket automatikusan le tudjuk menteni, vagy egyszerűen kijelölni belőle a kívánt időszakot és egy erre megfelelő programban (az én választásom a Notebook++ volt) le tudjuk menteni azokat.

A karakterisztikák alapján a program a kinyert adatokból automatikusan készít grafikonokat , így a feldolgozás után azonnal, vagy akár közben is nyomon követhetjük az adott intervallumunkban az ionoszféra jellemzőinek változásait.



12. ábra: Karakteristikák egyszerű megjelenítése vizuálisan (2024.06.23i M9,4-es fler idején)

A 12. ábrán piros színnel megjelenítve már látható az fmin, azaz az első visszaverődéshez tartozó frekvencia hirtelen megugrása, majd a fler lecsengését követően ennek a jelenségnek is a csillapodása. Ezek az ábrák kifejezetten reménykeltők voltak, mivel azt jelentették, hogy az ionoszféra ezen karakterisztikája tükrözi a napkitörés hatását, viszont a kérdést, hogy mennyiben áll korrelációban a fler okozta beérkező röntgen sugárzással, az állomás zenitszögével és magának a napkitörésnek az elhelyezkedésével a Napon még nem válaszolták meg.

3.5 Nyugodt napi fmin adatok átlagolása, és a fler alatti fmin értékek attól való eltérése

A munkát a referencianapok feldolgozása után kapott fmin értékek átlagolásával kezdtem, amelyet Python segítségével hajtottam végre. Mivel ezek jelentették az alap paramétereket, melyekhez képest az események közbeni fmin értékek vizsgálatát végeztem. Eközben még választottam új fler eseményeket a 2024. évből. Mivel kevés volt az elsőként feldolgozott időintervallumban az olyan esemény, amikor nem volt geomágneses vihar, ezért kiszélesítettem a határokat 5 és 19 óra közé, és ebben az időszakban vettem minden 5 percre egy átlagértéket. A referencianapok napi menetében is észrevehető némi természetes ingadozás, de ez elhanyagolható mértékű.

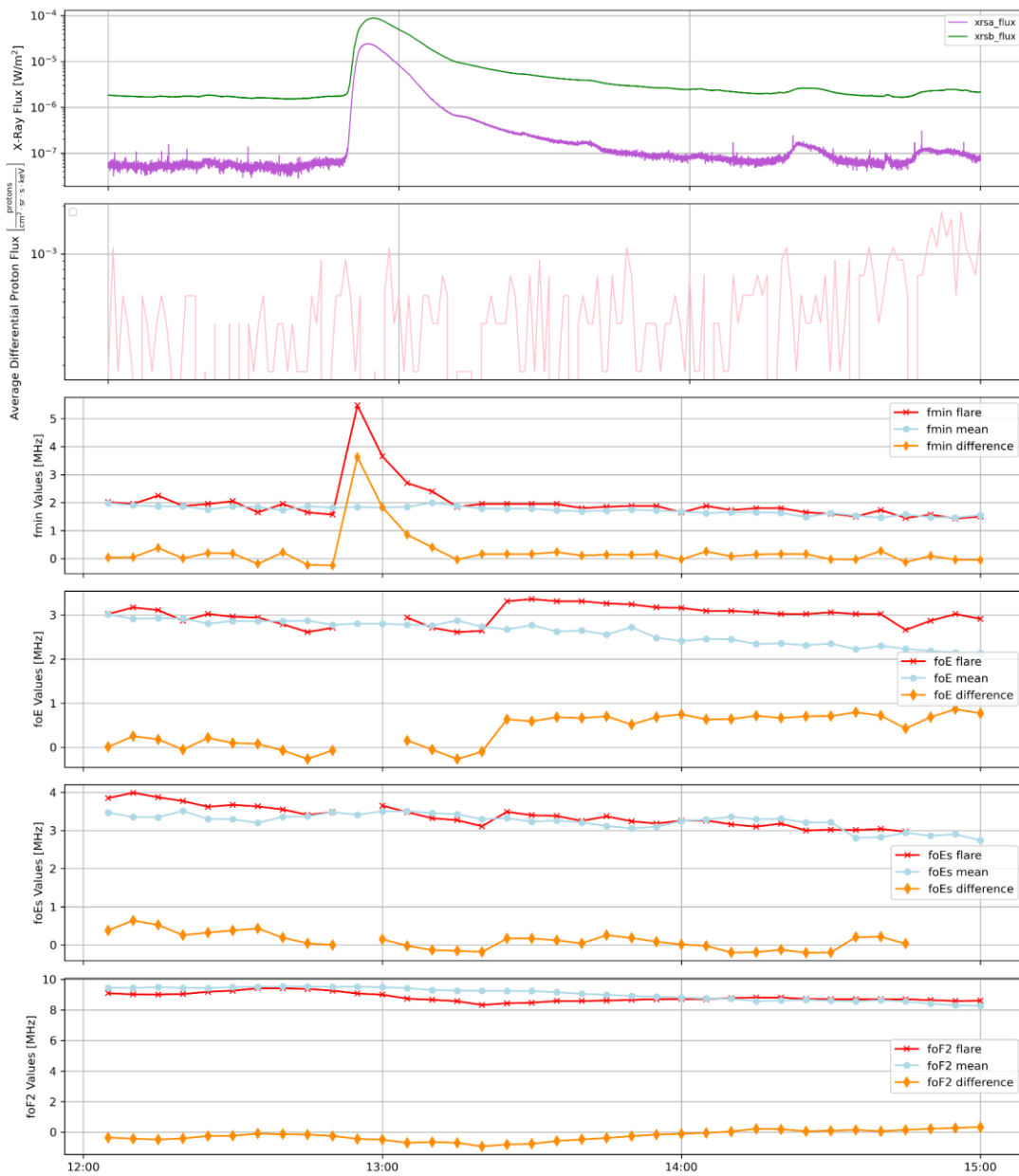
Ezután következett az események vizsgálata a referenciaadatokhoz képest. Minden esemény fmin értékeiből kivontam a referencia értékek átlagolt fmin értékeit, ezáltal megkaptam a dfmin számértékeket az egyes esetekre.

Ezek kiváló szemléltetést nyújtanak a flerek lefolyása alatt az ionoszférikus abszorpció nagyléptékű változására. Ugyanezt a folyamatot elvégeztem a foE, foEs és foF2 paraméterekre is, mely esetekben az egyes rétegek kritikus frekvenciájának fler következtében fellépő

változásait tudtam vizsgálni. Egyedüli nehézséget az jelentett, hogy a könyvtárak, melyekkel dolgozni szerettem volna a letöltött Jupyter Notebook-omban, nem megfelelő verzióban, vagy nem voltak elérhetőek, ezért Anacondában hoztam létre egy environmentet, amelyben be tudtam hívni a megfelelő könyvtárak szükséges verzióit.

4. Eredmények

4.1 Néhány nap részletes bemutatása

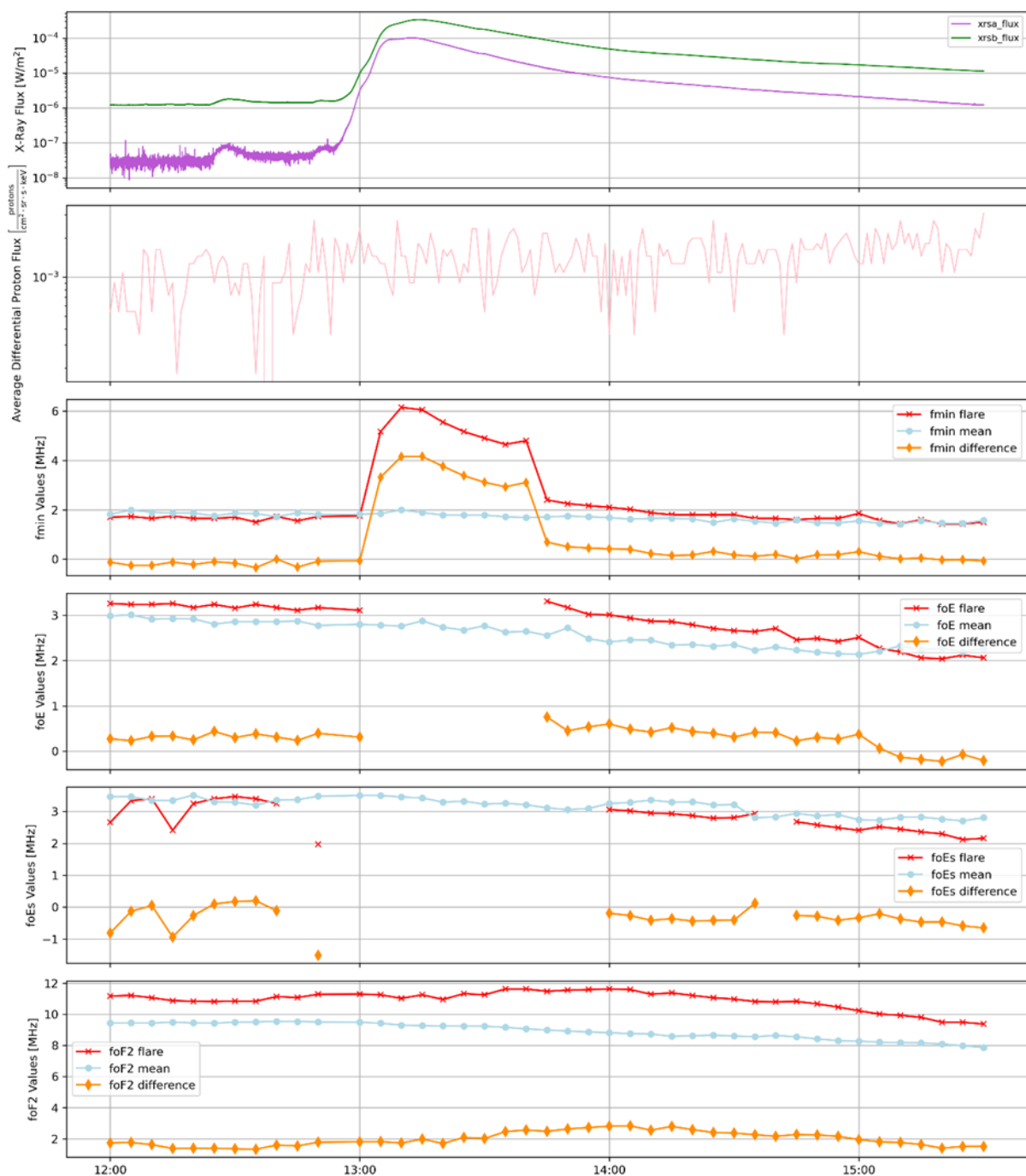


13. ábra: 2023.09.21-én történt M8.7-es erősségű flar hatása az ionoszféra rétegeire

A 13. ábra a 2023.09.21-én történt fler ionoszféra rétegeire gyakorolt hatását szemlélteti. A fler (M8.7) 12:42-től 13:02 óráig tartott 12:54-es csúcsidőponttal, tehát ez relatíve rövidebb eseménynek számít, viszont az adott rétegek jól tükrözik az M8.7-es fler által okozott változásokat.

Az f_{min} értékekben látszik a várt ugrás, az alsó rétegek az elnyelődés miatt nem verik vissza a rádióhullámokat, az első visszavert frekvencia (f_{min}) nagyobb, mint a referenciaidőszakokban. Az előbb leírtak miatt láthatunk hiányt az foE és foEs görbék kontinuitásában is, illetve az foE rétegben is felfedezhetünk a jelek visszatérése után egy emelkedést. Az F2 rétegben, nem meglepő módon, nem látunk jelentősebb változást, a referencianapoktól való eltérését legnagyobb valószínűséggel az adott évszak okozta (az ősz jelenti az átmeneti időszakot a réteg sűrűségének növekedésében, ez befolyásolja a visszaverési tulajdonságait). Szintén nem lehetett markáns ingadozást felfedezni a protonfluxusban sem.

Mivel ez az esemény relatíve rövid és nem túl nagy intenzitású volt, a módosulások, melyeket okozott, rövid intervallumban voltak megfigyelhetők, gyors lecsengésűek voltak.



14. ábra: 2024.02.09-én történt X3.4-es erősségű flar hatása az ionoszféra rétegeire

A 2024.02.09-én történt X3.4-es intenzitású flar esetében már más sajátosságokat figyelhetünk meg. Az esemény 12:53 és 13:32 között játszódtott le, a csúcshoz tartozó időpont 13:14. Lényegében az előző és ezen esemény hatása hasonló volt, viszont a változás, melyet okozott, ez utóbbi esetben maradandóbbnak bizonyult, több időbe telt, mire az ionoszféra vissza tudott térni nyugodt helyzetébe. Ez feltehetően az intenzitásnak, illetve az esemény hosszú időtartamának tudható be. A dfmin görbe kitérése jóval dominánsabb és hosszabb idejű, illetve a tárgyalt jelenségek miatt az foE és foEs idősorokban a kontinuitás jelentősen megszakadt.

Szintén felfedezhető az foE rétegben is visszaverődött frekvencia megugrása. Az F2-es rétegben bekövetkező állandó eltérés ismét az évszaknak tulajdonítható.

4.2 Korrelációs vizsgálat

A korreláció kiszámításához minden esemény csúcs körüli idejéből kiválasztottam a legnagyobb f_{min} értéket, mivel ez jelenti a maximális változást, amit a napkitörés az ionoszféra f_{min} mutatójában tud okozni. Ez általában a f_{ler} csúcsának idejével, azaz a maximális röntgenbesugárzás idejével egyezett meg, ám voltak alkalmak, mikor néhány perc eltérés volt a három paraméter maximuma között, ez a GOES adatok és a Hinode katalógus eltéréseiből származik.

Miután ezeket kinyertem, következett a geoeffektivitás kiszámolása minden egyes esetre, amely tulajdonképpen azt írja le, hogy a napkitörések mennyire tudják befolyásolni a Föld környezetét, különösképpen az ionoszférát.

Több tanulmány is foglalkozott azzal, hogy mely paraméterek határozzák meg egy f_{ler} földi ionoszférára gyakorolt hatását (Mahajan et al., 2010; Zhang et al, 2011; Zaalov et al., 2015). A számításba vett paraméterek a következők voltak: a röntgenfluxus mértéke, az állomás zenitszöge a kitörés időpontjában, illetve az esemény elhelyezkedése a Napon. [34][35]

Az ionoszféra válaszána becslésére gyakran használnak empirikus modelleket, mint például a D-RAP modellt, amely figyelembe veszi a napkitörések okozta röntgensugárzás hatását és a változás előrejelzéséhez különböző képleteket használ.

Korábbi tanulmányok alapján az ionoszféra változásának léptéke a napkitörés hatására a következő módon adható meg:

$$\text{Ionoszféra változása} = P_{X-ray} \times \cos \cos (\Phi) \times \cos \cos (\lambda) \times \cos \cos (SZA), \quad (1)$$

ahol a P_{X-ray} : a napkitörés röntgensugárzásának csúcsteljesítménye (külön vizsgálva sávonként),

Φ : a napkitörés földrajzi szélessége a napkorongon

λ : a napkitörés földrajzi hosszúsága a napkorongon

SZA : a napszög, amely azt az irányt adja meg, amelyből a nap sugárzása egy adott mérőállomáshoz képest érkezik. [30]

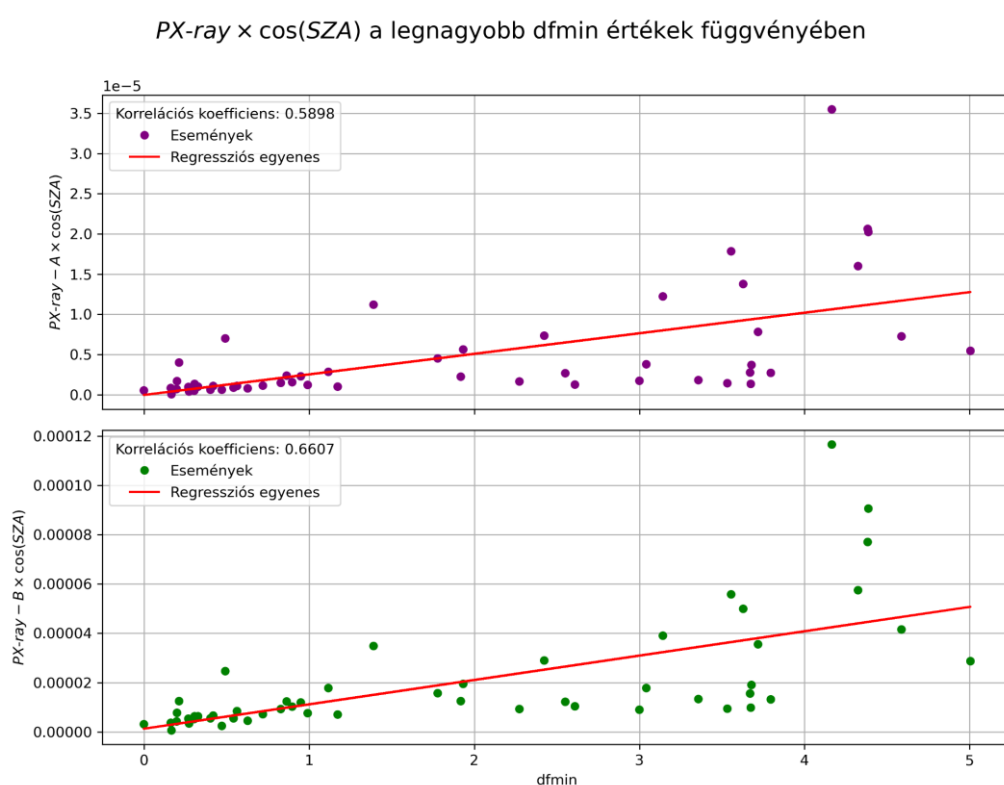
A változás léptékét a D-RAP modell és más kutatások, például Zaalov et al. (2015) alapján az alábbi képlettel közelíthetjük:

$$\text{Abszorpció változása} = P_{X-ray} \times \cos \cos (\Phi) \times \cos \cos (\lambda) \times \cos (SZA)^{0.75}, \quad (2)$$

Itt a napszög (SZA) hatását 0,75-ös kitevővel veszik figyelembe, amely azt jelzi, hogy az abszorpció nem lineárisan, hanem egy csillapított görbe szerint csökken a napszög növekedésével.

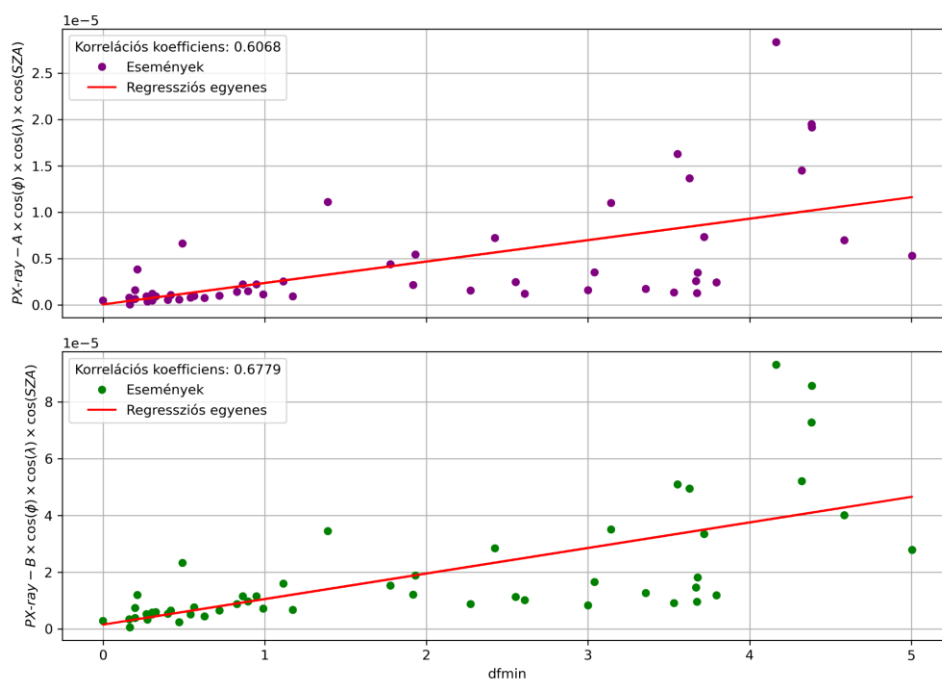
Jelen tanulmányban mindkét képletet figyelembe vettem, illetve variációikat is a legerősebb korreláció megtalálásának érdekében. Az ionoszféra flerre adott válaszána vizsgálatá során az egyenletek által adott számértékek változását vizsgáltam a df_{min} változásának függvényében, és a következő eredményekre jutottam:

4.2.1 Az f_{min} és a “geoeffektivitás” paraméter kapcsolata



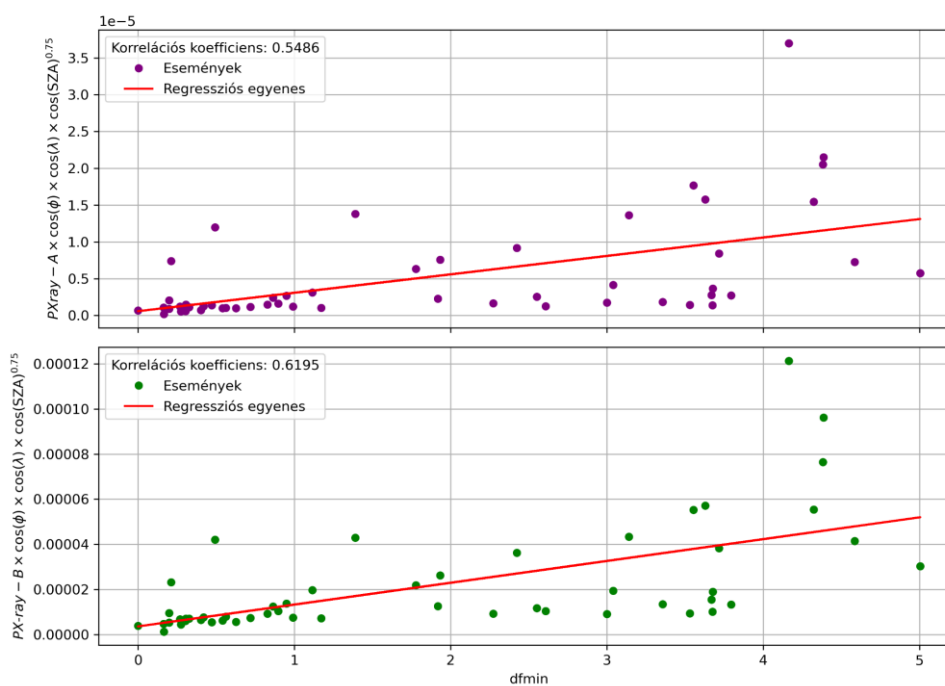
15. ábra: A df_{min} kapcsolata a röntgenfluxus és az állomás zenitszögének szorzatával

$PX\text{-ray} \times \cos(\phi) \times \cos(\lambda) \times \cos(SZA)$ a legnagyobb $dfmin$ értékek függvényében



16. ábra: A $dfmin$ kapcsolata a “geoeffektivitás” paraméterrel, amikor az esemény Napkorongon való helyzetét is figyelembe vesszük

$PX\text{-ray} \times \cos(\phi) \times \cos(\lambda) \times \cos(SZA)^{0.75}$ a legnagyobb $dfmin$ értékek függvényében



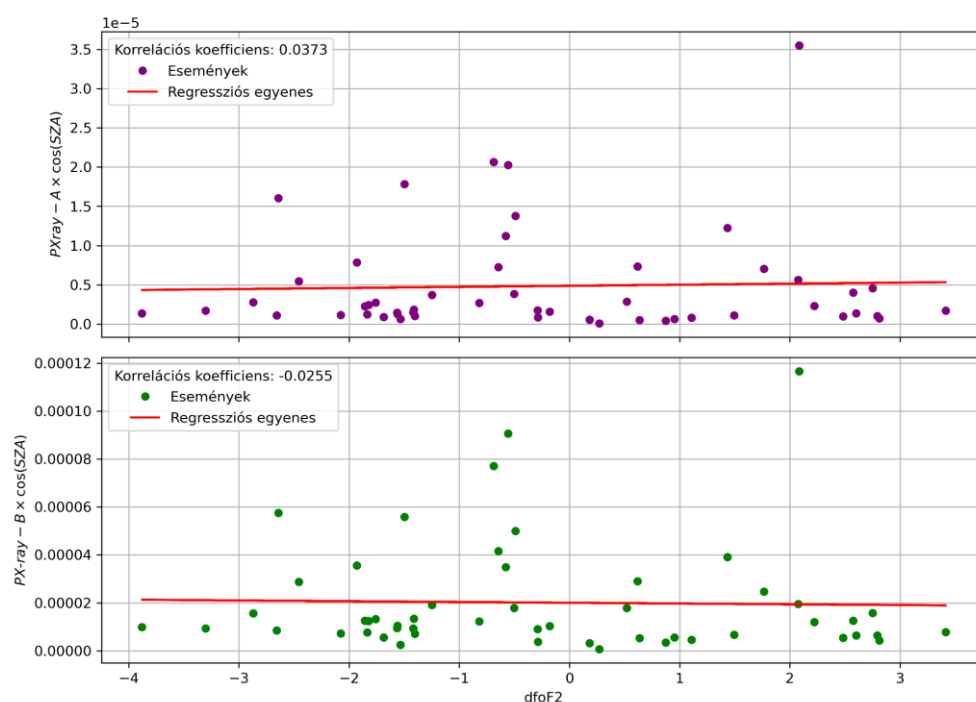
17. ábra: A $dfmin$ kapcsolata a “geoeffektivitás” paraméterrel, amikor a SZA-t 0,75-ödikre emeljük

Az egyenletek első típusa, amit figyelembe vettem, még nem tartalmazta a fler elhelyezkedését a napkorongon, azonban már így is felfedezhető volt egy jelentősebb korreláció (a röntgen A sávja esetén 0,5898, B sávja esetén 0,6607) a df_{min} és a fler “geoeffektivitás” paramétere között. A napkoordináták bevonásával ezek az értékek javultak (0,6068 ill. 0,6779 a GOES röntgen A és B csatornája által mért fluxusokra), mivel így már az is figyelembe lett véve, hogy a Nap különböző időpontokban és helyzetekben eltérő geometriai viszonyokkal sugározza az energiát a Föld felé. A korreláció értékek csökkentek a df_{min} és a “geoeffektivitás” paraméter között abban az esetben, amikor a röntgenfluxus 0,75-ig hatványát vettük figyelembe (A csatorna esetén 0,5486, B csatorna esetén 0,6195). Érdekes, hogy a korrelációs értékek mindegyik esetben nagyobbak voltak a röntgenfluxus B röntgensávbeli változását figyelembe véve. Ez alapján úgy tűnik, hogy az f_{min} paraméter által leírt abszorpció változás főként a hosszabb hullámhosszú röntgenfluxus változásokra reagál, azaz az abban a magasságtartományban végbemenő változások inkább a röntgen hosszabb hullámhosszúságú változásaihoz kötődnek. Feltehetően nagyobb korrelációs értékhez jutnánk, ha évszak szerint is elkülönítenénk az eseményeket, mivel az is okozhat kiemelkedő változásokat a rétegek állapotában. Fontos még megjegyezni, hogy a “geoeffektivitás” paraméterek meghatározásánál az esemény időtartama még nem lett figyelembe véve.

4.2.2 Az foF2 és a “geoeffektivitás” paraméter kapcsolata

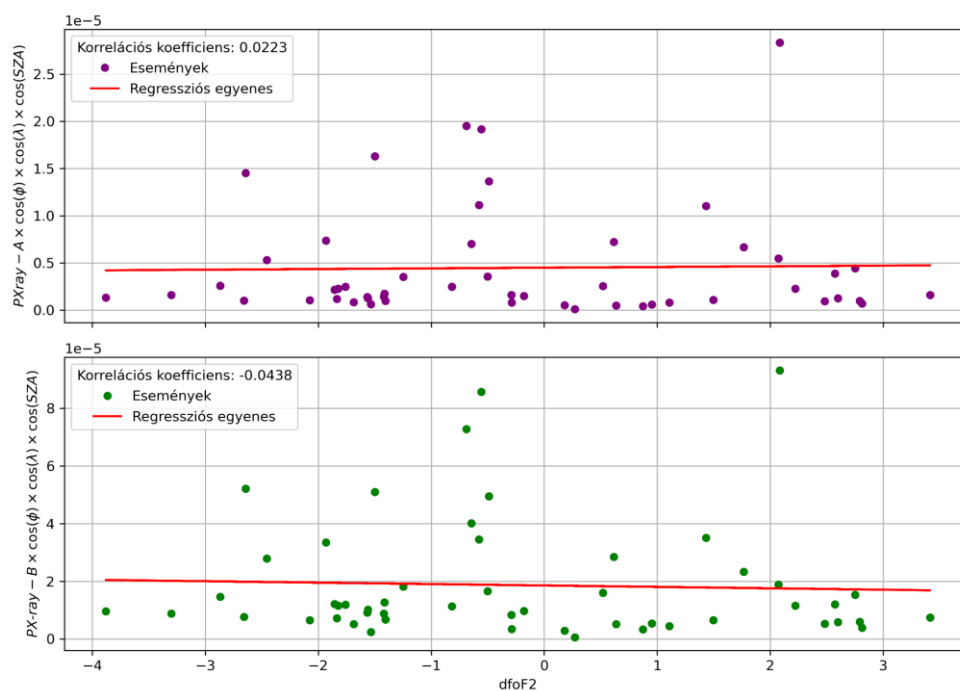
A fent leírt vizsgálatokat elvégeztem a $dfoF2$ paraméterre is, ez esetben sokkal alacsonyabb korrelációs együtthatókat, mondhatni a korreláció hiányát kaptam.

$PX\text{-ray} \times \cos(SZA)$ a legnagyobb dfoF2 értékek függvényében



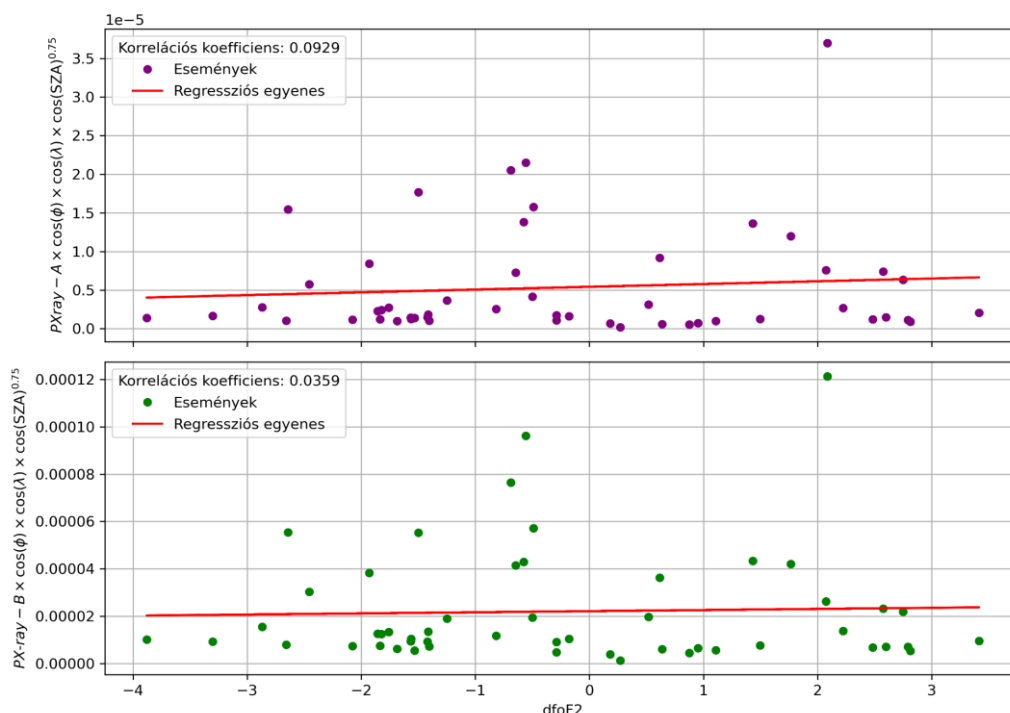
18. ábra: A dfoF2 kapcsolata a röntgenfluxus és az állomás zenitszögének szorzatával

$PX\text{-ray} \times \cos(\phi) \times \cos(\lambda) \times \cos(SZA)$ a legnagyobb dfoF2 értékek függvényében



19. ábra: A dfoF2 kapcsolata a “geoeffektivitás” paraméterrel, amikor az esemény Napkorongon való helyzetét is figyelembe vesszük

$PX\text{-ray} \times \cos(\phi) \times \cos(\lambda) \times \cos(SZA)^{0.75}$ a legnagyobb dfoF2 értékek függvényében



20. ábra: A dfoF2 kapcsolata a “geoeffektivitás” paraméterrel, amikor a SZA-t 0,75-ödikre emeljük

Itt is a két ismert képletet használtam, és szembeötlő különbségeket lehet felfedezni; a fler által okozott ionoszféra változás, azaz a fler geoeffektivitás paramétere nincs összhangban az foF2 paraméter referencia napokhoz viszonyított változásával, kicsi korrelációs értéket mutat. Ez megerősíti a feltételezett hipotézist, hogy a röntgensugárzás az ionoszféra alacsonyabb rétegeire gyakorol jelentősebb változást, míg a magasabb tartományokban nem tudjuk ugyanezt kimutatni.

5. Összefoglalás

Dolgozatomban a flerek ionoszférára gyakorolt hatását vizsgáltam geomágneses szempontból nyugodt időszakokban, összehasonlítva az ionosondázásból származtatott egyes értékeket (dfmin, dfoF2) a flerek egyes tulajdonságaival. A flerek során nagy energiájú röntgen és EUV sugárzás éri a Föld körüli térséget, így a légkört is, melynek része az ionoszféra. A sugárzás az ionoszféra különböző rétegeiben eltérő mértékű ionizációt és az ionoszférán áthaladó elektromágneses hullámok fokozott elnyelődését (abszorpcióját) okozza, főként a felszínhez közelebbi rétegekben. Az elmúlt évtizedek során jelentek meg tanulmányok hasonló témákban, azonban ezek jellemzően kisebb adatmintákra támaszkodtak, döntően a nagy intenzitású

eseményekre fókuszáltak, és nem feltétlenül a közepes földrajzi szélességeken végzett mérésekre alapultak.

A vizsgálatokhoz 52 fler eseményt választottam ki geomágneses szempontból nyugodt ($K_p < 4$, $Dst > -40$ nT) időszakokban. A fler időszakában, és a referencianapok során mért, több mint 2000 db ionogram kézi feldolgozásával meghatároztam az ionoszféra rétegeinek legfontosabb karakterisztikus paramétereit, amelyek jelen kutatásban az f_{min} , f_oE , f_oEs , és f_oF2 voltak.

Az ionoszondázásból származó paraméterek idősorainak vizsgálata során az f_{min} paraméter egyértelmű változásokat mutatott a referencianapokhoz képest a flerek alkalmával. Intenzívebb napkitörések során az E, Es és F réteg paramétereiben adathiányt tapasztaltam, amely a fler alatt fellépő teljes elnyelődésnek tulajdonítható. Intenzív napkitörések esetén az f_oE paraméter megemelkedett értékeit figyeltem meg a kitörés előtti időszakhoz viszonyítva. Hasonló, napkitöréshez kapcsolódó változást az f_oEs és f_oF2 paraméterekben nem tapasztaltam.

Vizsgáltam továbbá az ionoszférikus paraméterek (df_{min} , $dfoF2$) és a vizsgált napkitörések "geoeffektivitás" paramétere közötti korrelációt. A "geoeffektivitás" paraméter meghatározásánál, korábbi vizsgálatok eredményei alapján, figyelembe vettem a röntgenfluxus mértékét, az állomás zenitszögét a kitörés időpontjában, illetve az esemény elhelyezkedését a Napkorongon. A df_{min} és a fler "geoeffektivitás" paramétere között pozitív korrelációt tapasztaltam, amely jelentősebb ($\sim 0,7$) volt akkor, amikor az esemény helyzetét is figyelembe vettem a Napon.

A statisztikai eredmény azt jelzi, hogy a df_{min} paraméter relatíve érzékeny indikátor a napkitörések hatásaira, különösen a hosszabb hullámhosszú (26-34 nm) tartományban bekövetkező fluxusváltozásokra

Az f_oF2 és a "geoeffektivitás" paraméter között nagyon kicsi (néhol negatív) korrelációs értékeket tapasztaltam, azaz a flerek nem okoznak kimutatható változásokat az F2 réteg kritikus frekvenciájában még geomágneses szempontból nyugodt időszakokban sem.

Kitekintés

Geomágneses viharok esetén a magas frekvenciás távkommunikáció problémákba ütközhet a fler események miatt bekövetkező ionoszférikus változásoknak köszönhetően. A df_{min} értékek vizsgálata segíthet a valós idejű rádiózajok észlelésében.

A helymeghatározásban is problémákat szülhetnek ezek az események, mivel a hullámok, amelyeket a műhold (pl. GPS, Galileo) kibocsát, az ionoszférában késleltetést szenvednek. Ez jelentős eltérésekhez vezet, a pontos helymeghatározást ellehetetleníti.

A légi közlekedésben is magasfrekvenciás rádiókommunikációt alkalmaznak (főként a sarkvidéki közlekedésben), így magas naptevékenység idején, és ennek következtében fellépő ionoszférikus zavarok során nem tudnak megbízható kommunikációt fenntartani.

A földi vezeték nélküli kommunikációs rendszerekben is interferencia alakulhat ki, ezzel instabillá téve az adatátvitelt. [36]

Tervek a jövőre nézve

Kutatásom folytatásaként a flerek, esetlegesen más naptevékenységi mechanizmusok (pl. nagyenergiájú részecskék) ionoszférára gyakorolt hatásának vizsgálatával geomágneses szempontból nyugodt időszakokban, több paraméter bevonásával, mint például TEC, protonfluxus, EUV szeretnék foglalkozni.

Források

[1] Barta Veronika, Berényi Kitti, Buzás Attila, Kiszely Márta, Szabóné André Karolina, Szárnya Csilla. "Földrengések nyomai a felsőlégkörben?" Fizikai Szemle, 2023. október.

https://epss.hun-ren.hu/wp-content/uploads/2023/11/fizikai_szemle_f%C3%B6ldreng%C3%A9s_ionoszf%C3%A9ra_v%C3%A9gleges.pdf?utm_source=chatgpt.com

[2] "ionoszféra - a földi légkör 60-1000 km közötti tartománya - távközlési és műholdas lexikon." frekvencia.hu.

<https://frekvencia.hu/lexikon/i/ionoszfera.htm>

[3] "Revolutions in Understanding the Ionosphere: Earth's Interface to Space" - NASA <https://www.nasa.gov/solar-system/revolutions-in-understanding-the-ionosphere-earths-interface-to-space/>

[4] Encyclopaedia Britannica. (n.d.). *Ionosphere and magnetosphere*. In *Britannica.com*.

<https://www.britannica.com/science/ionosphere-and-magnetosphere>

[5] "Investigating the effect of large solar flares on the ionosphere based on novel Digisonde data comparing three different methods" - Attila Buzás, Daniel Kouba, Jens Mielich, Dalia Burešová, Zbyšek Mošna, Petra Koucká Knížová, Veronika Barta (2023) <https://www.frontiersin.org/journals/astronomy-and-space-sciences/articles/10.3389/fspas.2023.1201625/full>

[6] "Introduction to Ionospheric Physics" - Rishbeth and Garriott (1969)

<https://archive.org/details/introductiontoio0000rish>

[7] Bencze, P., Burešová, D., Laštovička, J. and Márcz, F. (2004) Behaviour of the F1-region, and Es and spread-F phenomena at European middle latitudes, particularly under geomagnetic storm conditions, ANNALS OF GEOPHYSICS, SUPPLEMENT TO VOL. 47, N. 2/3.

[8] H. Rishbeth and O. K. Garriott. "Introduction to Ionospheric Physics." Academic Press, 1969.

[9] "Digisonde Data Processing Systems (DPS)" - University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research (UMLCAR)

https://ulcar.uml.edu/digisonde_dps.html

[10] Reinisch, B. W., & Galkin, I. A. (2011). Global ionospheric radio observatory (GIRO). *Advances in Space Research*, 47(5), 903-912.

<https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.5047/eps.2011.03.001>

- [11] “Training About the Basic Properties of the Ionosphere as Seen on the Ionograms” - T-FORS Knowledge Hub <https://t-fors.eu/t-fors-users/knowledge-hub/training-about-the-basic-properties-of-the-ionosphere-as-seen-on-the-ionograms>
- [12] Buzás, A., Kouba, D., Mielich, J., Burešová, D., Mošna, Z., Koucká Knížová, P., & Barta, V. (2023). Investigating the effect of large solar flares on the ionosphere based on novel Digisonde data comparing three different methods. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 10. <https://www.frontiersin.org/journals/astronomy-and-space-sciences/articles/10.3389/fspas.2023.1201625/full>
- [13] "Ionospheric Absorption Variation Based on Ionosonde and Riometer Data and the NOAA D-RAP Model over Europe During Intense Solar Flares in September 2017" - Attila Buzás, Daniel Kouba, Jens Mielich, Dalia Burešová, Zbyšek Mošna, Petra Koucká Knížová, Veronika Barta
<https://www.mdpi.com/2072-4292/16/21/3975>
- [14] Sharma, S., Nakamura, R., & Baumjohann, W. (2010). Dynamics of space weather: Storm-substorm relationships. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A10), A10220.
- [15] Sripathi, S., Balachandran, N., Veenadhari, B., Singh, R., & Emperumal, K. (2013). Response of the equatorial and low-latitude ionosphere to an intense X-class solar flare (X7/2B) as observed on 09 August 2011. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(9), 5916–5927.
- [16] Denardini, C. M., Dasso, S., & Gonzalez-Esparza, J. A. (2016). Review on space weather in Latin America. 3. Development of space weather forecasting centers. *Advances in Space Research*, 58(10), 1960–1967.
- [17] Nogueira, P. A. B., Abdu, M. A., Batista, I. S., Souza, J. R., & Sobral, J. H. A. (2015). Ionospheric responses to solar flares as observed at the Brazilian sector. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 123, 62–71.
- [18] Barta, V., Satori, G., Berényi, K. A., Kis, Á., & Williams, E. (2019). Effects of solar flares on the ionosphere as shown by the dynamics of ionograms recorded in Europe and South Africa. *Annales Geophysicae*, 37(4), 747–761.
- [19] Yamazaki, Y., & Maute, A. (2019). Sq and EEJ—A review on the daily variation of the geomagnetic field caused by ionospheric dynamo currents. *Annales Geophysicae*, 37(5), 747–790.
<https://www.google.com/url?q=https://angeo.copernicus.org/articles/37/747/2019/&sa=D&source=docs&ust=1732116660750359&usg=AOvVaw0ECqrRx1mVvl87AluhHt6p>
- [20] Barta, V., Satori, G., Berényi, K. A., Kis, Á., & Williams, E. (2019). Effects of solar flares on the ionosphere as shown by the dynamics of ionograms recorded in Europe and South Africa. *Annales Geophysicae*, 37(4), 747–761. <https://angeo.copernicus.org/articles/37/747/2019/>

- [21] Amory-Mazaudier, C., Klausner, V., Balan, N., Bencherif, H., Farges, T., Fleury, R., ... & Zafimahazo, N. (2022). A Comprehensive Study of the Ionosphere during the September 2017 Storm: Ground-Based and Space Observations. *Remote Sensing*, 14(8), 1898. <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/8/1898>
- [22] Nishioka, M., Tsugawa, T., Kubota, M., & Ishii, M. (2010). Conjugate observations of ionospheric disturbances during the geomagnetic storm on 15 December 2006. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A9), A09323. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2010JA016089>
- [23] Mahajan, A. S., Shaw, M., Oetjen, H., Hornsby, K. E., Carpenter, L. J., Kaleschke, L., Tian-Kunze, X., Lee, J. D., Moller, S. J., Edwards, P., Commane, R., Ingham, T., Heard, D. E., & Plane, J. M. C. (2010). Evidence of reactive iodine chemistry in the Arctic boundary layer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D20).
- [24] Astafyeva, E., & Yasyukevich, Y. (2010). Geomagnetic storms, super-storms, and their impact on GPS-based navigation systems. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A10), A10309. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2010JA015576>
- [25] Hinode Flare Catalogue, Institute for Space-Earth Environmental Research (ISEE), Nagoya University https://hinode.isee.nagoya-u.ac.jp/flare_catalogue/
- [26] OMNIWeb Data Explorer, NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>
- [27] GOES X-ray Flux, NOAA Space Weather Prediction Center (SWPC) <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux>
- [28] GOES XRS README Document, NOAA National Geophysical Data Center (NGDC) https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/doc/GOES_XRS_readme.pdf
- [29] White, S. M., Kundu, A., & Gopalswamy, N. (2004). Solar Flare X-ray Diagnostics with GOES. *University of Maryland, Department of Astronomy*. https://www.astro.umd.edu/~white/papers/04_goes.pdf
- [30] GOES-16 SGPS Level-2 Averaged 1-Minute Data, NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI) <https://data.ngdc.noaa.gov/platforms/solar-space-observing-satellites/goes/goes16/l2/data/sgps-l2-avg1m/>
- [31] NASA (2023). Five Questions About Space Weather and Its Effects on Earth, Answered. *NASA Technology*. <https://www.nasa.gov/technology/five-questions-about-space-weather-and-its-effects-on-earth-answered/>

[32] Knowledge Hub: Handbooks, T-FORS (Training for Operational Readiness and Sustainability)

<https://t-fors.eu/t-fors-users/knowledge-hub/handbooks>

[33] Zhan, X., Liu, H., & Liu, H. (2020). An analysis of global ionospheric disturbances and scintillations during the September 2017 storm using ground-based and space-based measurements. *Aerospace Systems*, 3(2), 87–97.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s42401-020-00067-6>

[34] SunCalc

<https://www.suncalc.org/#/50.0008,14.5597,13/2006.12.05/10:03/8848/0>

[35] Heliophysics Events Knowledgebase (HEK), Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory (LMSAL)

<https://www.lmsal.com/hek/>

[36] Ionospheric Prediction for HF Systems, Bureau of Meteorology, Australian Space Weather Services (SWS)

Saját eredmények

- C8-asnál nagyobb intenzitású flerek kigyűjtése a Hinode Flare Catalogue-ból 2022.08.-ig visszamenőleg
- Események napjainak geomágneses vizsgálata, és a nyugodt napok kiválasztása ($K_p < 4$, $Dst > -40$ nT) az OMNIWeb weboldal segítségével
- 52 esemény és 11 referencianap ionogramjainak manuális skálázása (~ 2000 ionogram) és ezzel a skálázási módszerek elsajátítása
- Kapott referenciaparaméterek átlagolása és az események ezen adatsortól való különbségének meghatározása (df_{min} , $dfoF2$)
- Az események maximum röntgensugárzásának és protonfluxusának meghatározása Python kóddal
- Napszög (Solar Zenith Angle – SZA) adatok kigyűjtése
- Flerek napkoordinátáinak kigyűjtése
- “Geoeffektivitás” és a képlet variációinak kiszámolása, majd ennek korrelációs vizsgálata a df_{min} és $foF2$ paraméterekkel
- A df_{min} és a fler “geoeffektivitás” paramétere között pozitív korrelációt kimutatása, amely jelentősebb (~ 0,7) volt akkor, amikor az esemény helyzetét is figyelembe vettem a Napon.
- Vizsgálataim, azt mutatták, hogy
 - az $foF2$ és a “geoeffektivitás” paraméter között nagyon alacsony a korreláció, azaz a flerek nem okoznak kimutatható változásokat az F2 réteg kritikus frekvenciájában még geomágneses szempontból nyugodt időszakokban sem, viszont,
 - a df_{min} paraméter relatíve érzékeny indikátor a napkitörések hatásaira, különösen a hosszabb hullámhosszú (26-34 nm) tartományban bekövetkező fluxusváltozásokra.