

Geomagnetska aktivnost kao posljedica Sunčevih koroninih šupljina u razdoblju od 2010. do 2017.

Jerčić, Veronika

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:793792>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geofizički odsjek

Veronika Jerčić

**GEOMAGNETSKA AKTIVNOST KAO
POSLJEDICA SUNČEVIH KORONINIH
ŠUPLJINA U RAZDOBLJU OD 2010. DO
2017.**

Diplomski rad

Zagreb, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geofizički odsjek

Diplomski sveučilišni studij Fizika – geofizika
Smjer: Seizmologija i fizika čvrste Zemlje

Veronika Jerčić

Diplomski rad

**Geomagnetska aktivnost kao posljedica
Sunčevih koroninih šupljina u razdoblju od
2010. do 2017.**

Voditeljica diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Giuliana Verbanac

Povjerenstvo: 1. _____
2. _____
3. _____

Ocjena diplomskog rada: _____

Zagreb, 2019.

Zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Giuliani Verbanac na svom uloženom trudu i vremenu da napravimo ovaj diplomski, na svim konstruktivnim kritikama i komentarima i posebice na pomoći pri usmjeravanju u znanosti.

Zahvaljujem svojoj obitelji na pruženoj potpori, na svim poticajima da ne odustanem kad zagusti. Bez njihove podrške i vjere u mene ovog rada ne bi bilo.

Popis kratica

Popis kratica korištenih u radu.

AIA	(eng. <i>Atmospheric Imaging Assembly</i>)
AU	astronomska jedinica (eng. <i>Astronomical Unit</i>)
CH	koronina šupljina (eng. <i>Coronal Hole</i>)
CIR	korotirajuće interakcijsko područje (eng. <i>Corotating Interaction Regions</i>)
CME	koronini izbačaji (eng. <i>Coronal Mass Ejections</i>)
DOY	dan u godini (eng. <i>Day Of The Year</i>)
EUV	(eng. <i>Extreme UltraViolet</i>)
EUVI	(eng. <i>Extreme UltraViolet Imager</i>)
HSS	brzi Sunčev vjetar (eng. <i>High Speed Stream</i>)
IMF	interplanetarno magnetsko polje (eng. <i>Interplanetary Magnetic Field</i>)
SDO	(eng. <i>Solar Dynamic Observatory</i>)

Sažetak

U ovom radu analiziramo parametre brzog Sunčevog vjetra, kao i parametre izvora tog vjetra, koroninih šupljina na Suncu (površina u trenutku prelaska preko centralnog meridijana) te njihovu koreliranost s geomagnetskim indeksima. Koristimo podatke satelita u orbiti oko Lagrangeove točke L1 za parametre Sunčevog vjetra, dok su vrijednosti površina koroninih šupljina dobiveni pomoću EUV slika sa SDO/AIA. Vrijednosti geomagnetskih indeksa preuzeti su iz OMNI baze podataka. Istraživanje je pokazalo da postoji umjerena (do snažna) korelacija između geomagnetskih indeksa i parametara Sunčevog vjetra. B_sV komponenta Sunčevog vjetra je najbolje opisana promjenom Dst indeksa (ΔDst), indeksi ap i Dst također najviše reagiraju na B_sV , dok AE indeks najviše reagira na ukupno električno polje BV . To nas dovodi do zaključka da je geomagnetsku aktivnost moguće preciznije opisati i definirati poznavajući parametre nadolazećeg brzog Sunčevog vjetra. Koreliranost geomagnetskih indeksa i površine koroninih šupljina je slaba do toga da je nema, što upućuje na otežanu mogućnost procjene geomagnetske aktivnosti samo na temelju poznavanja površine koroninih šupljina.

Ključne riječi: geomagnetska aktivnost, Sunčev vjetar, koronine šupljine

Geomagnetic activity as a consequence of coronal holes in the period from 2010 to 2017

Abstract

In this work we analyze the parameters of the fast solar wind as well as the parameters of the source of that wind, coronal holes on the Sun (their surface in the moment of their passage over the central meridian) and their correlation with geomagnetic indices. We use the data from satellites in orbit around Lagrange point L1 for solar wind parameters, while the values of coronal hole surfaces were extracted from EUV images from SDO/AIA. Values of geomagnetic indices were taken from the OMNI database. This analysis showed that there is a moderate (up to strong) correlation between geomagnetic indices and the solar wind parameters. The B_sV component of the solar wind is best described by the change of the Dst index (ΔDst), ap and Dst also respond the most to B_sV , while AE reacts the most to the total electric field of the solar wind, BV . That leads us to conclusion that geomagnetic activity can be more precisely described and defined by knowing the parameters of the upcoming fast solar wind. On the other hand, the correlation between geomagnetic indices and the coronal hole surfaces is weak to non-existing, which means that assessing the geomagnetic activity solely on the basis of coronal hole surfaces would be a very challenging task.

Keywords: geomagnetic activity, solar wind, coronal holes

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Teorijska pozadina	3
2.1. Sunce	3
2.2. Magnetizam Sunca	4
2.3. Koronine šupljine	6
2.4. Sunčev vjetar	6
2.5. Geomagnetsko polje i svemirsko vrijeme	9
2.6. Geomagnetski indeksi	10
3. Metoda i analiza podataka	14
3.1. Podatci	14
3.2. Analiza podataka	15
3.3. Primjeri specifičnih slučajeva	17
4. Rezultati	24
5. Diskusija	32
6. Zaključak	35
Literatura	37
Dodatci	39
A Grafovi korelacija	40
B Površine koroninih šupljina	44
C Programi i podatci priloženi na CD-u	46

1. Uvod

Cilj ovog rada je proučiti geomagnetsku aktivnost u razdoblju od 2010. do 2017. godine. To smo postigli provođenjem sistematične analize odnosa između parametara Sunčevog vjetra na 1AU i geomagnetskih indeksa te ujedno parametara Sunčevog vjetra i svojstava koroninih šupljina na Suncu. Dobiveni rezultati i iz njih izvedeni zaključci u konačnici doprinose boljem razumijevanju utjecaja aktivnosti Sunca na Zemljino magnetsko polje.

Sunčev vjetar čini kontinuirani tok elektrona, protona i ioniziranih čestica emitiranih sa Sunca. Igra važnu ulogu u oblikovanju heliosfere (područja interplanetarnog prostora u kojem dominira utjecaj Sunčevog magnetskog polja) i uzrokuje značajnu, i nama jako bitnu, interakciju sa Zemljinim magnetskim poljem, tj. magnetosferom. Magnetosfera (analogno heliosferi) je područje u kojem dominira utjecaj magnetskog polja planeta. Njena glavna uloga je zaštita atmosfere i površine, a samim time i sveg života na planeti od erodirajućeg utjecaja Sunčevog vjetra. Sunčev vjetar najvjerojatnije je igrao glavnu ulogu u otklanjanju, ionako slabih atmosfera s određenih terestrijalnih planeta male mase tijekom rane povijesti formacije Sunčeva sustava (Hegde i sur., 2015), primjer su Merkur i Mars. Interakcija vlastitog magnetskog polja planeta s nabijenim česticama sa Sunca (Sunčev vjetar) i, manjim dijelom, s kozmičkim zrakama rezultira geomagnetskom aktivnošću. Upravo tu interakciju i fenomene prouzročene zračenjem i česticama emitiranim sa Sunca proučava svemirsko vrijeme (eng. *space weather*).

Koronine šupljine su područja smanjene emisije X-zraka i ekstremnih UV-zraka u Sunčevoj atmosferi. Povezane su sa strukturama otvorenog magnetskog polja i smatraju se izvorom brzog Sunčevog vjetra (HSS) (Krieger i Timothy, 1973; Nolte i sur., 1976; Cranmer, 2002; Bilenko i Tavastsherna, 2016). Postoji više razloga zbog kojih su nam koronine šupljine zanimljive za proučavanje. Kao prvo, zbog male gustoće plazme čestice koroninih šupljina se slabo, do nikako, sudaraju. Takva plazma je inače od velikog interesa, s obzirom da ona predstavlja jedan od načina kojima dolazi do koroninog zagrijavanja. Korona je jedan od slojeva Sunčeve atmosfere u kojem temperatura raste s visinom. Zašto i kako dolazi do toga još nije u potpunosti objašnjeno. Također, proširena korona i s njom povezan Sunčev vjetar egzistiraju u vremenski stabilnom stanju (u usporedbi s drugim područjima Sunca). Iz tog razloga se ta područja često koriste kao početna točka teoretskog modeliranja raznih drugih, kompliciranijih pojava i područja Sunca. I posljednje, ali i najvažnije, je što su koronine šupljine (naročito one izrazito stabilne i time dugotrajne) izvor pojava kao što su korotirajuća interakcijska područja (CIR) koja izazivaju uzastopnu geomagnetsku aktivnost (Cranmer, 2009) pri svakoj sunčevoj rotaciji.

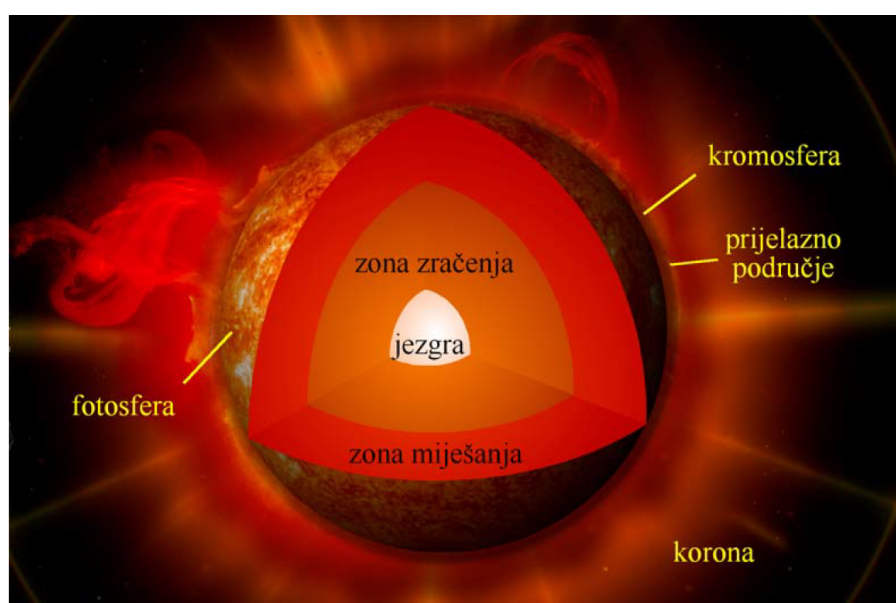
Proučavanje koroninih šupljina važno je i u pogledu njihove uloge u formiranju

svemirskog vremena u blizini Zemljine orbite i utjecaja na geomagnetsku aktivnost. Koronine šupljine i pripadni HSS, zajedno s koroninim izbačajima mase (CME) jedni su od glavnih činitelja svemirskog vremena. Utjecaj CME-ova na Zemlji je jako intenzivan, a nepredvidiv. Za razliku od njih, koronine šupljine su stabilne i dugotrajne pojave na Suncu, zbog čega je predviđanje njihovih posljedica (HSS i CIR) teoretski moguće. Kako svojstva i dinamika koroninih šupljina te Sunčevog vjetra koji nastaje iz njih utječu na Zemljinu magnetosferu i na rezultirajuću geomagnetsku aktivnost je jedno od glavnih pitanja do čijeg odgovora pokušavamo doći ovim radom.

2. Teorijska pozadina

2.1. Sunce

Glavni izvor života na našem planetu predstavlja Sunce, zvijezda Sunčevog sustava smještena u Orionovom kraku galaksije Mliječna staza. Radijus Sunca iznosi 109 radijusa Zemlje (vidi Tablicu 2.1), zbog svoje veličine i boje ono spada u skupinu zvijezda koje nazivamo žutim patuljcima. Većim dijelom sačinjeno je od vodika (72%) koji se termonuklearnim procesima (fuzija) u uvjetima visokog tlaka i temperature pretvara u helij. Takvi procesi ujedno predstavljaju glavni izvor energije Sunca. Helij je nakon vodika sljedeći element po zastupljenosti na Suncu (26%). Preostalih 2% čine uglavnom kisik, ugljik i dušik. Spomenutim procesom fuzije oslobađa se energija u obliku fotona, kojima zbog uvjeta visoke gustoće koji vladaju u unutrašnjosti, treba čak i do 100 000 godina do površine. Energija oslobođena u unutrašnjosti Sunca se prenosi na jedan od dva moguća načina: miješanjem (eng. *convection*) ili zračenjem (eng. *radiation*). Ovisno o temperaturama koje vladaju, unutrašnjost Sunca dijelimo na: jezgru, zonu zračenja i zonu miješanja (slika 2.1).



Slika 2.1. Presjek Sunca s prikazom jezgre (eng. *thermonuclear zone*), zone zračenja (eng. *radiative zone*) i zone miješanja (eng. *convective zone*). Zatim, idući od površine izmjenjuju se: fotosfera (eng. *photosphere*), kromosfera (eng. *chromosphere*), pa preko prijelaznog područja (eng. *transition region*) dolazimo do gornje atmosfere, korone (eng. *corona*). Slika je preuzeta iz Vujnović (2016).

Tablica 2.1. Osnovni podaci o Suncu. Preuzeto iz Vujnović (2016).

Udaljenost od Zemlje	najmanja $147,1 \cdot 10^6$ km; najveća $152,1 \cdot 10^6$ km; prosječna $149,6 \cdot 10^6$ km
Polumjer	695 500 km ili otprilike 109 Zemljina polumjera
Masa	$1,99 \cdot 10^{30}$ kg ili 333 000 puta veća od Zemljine mase
Snaga zračenja (ili tzv. luminozitet)	$3,846 \cdot 10^{26}$ W
Temperatura	na površini (fotosferi) oko 5780 K (5507 °C); u jezgri veća od 15 milijuna K

Budući da je Sunce plinovito, potrebno je precizno definirati pojam površine Sunca. Tako se za površinu Sunca uzima prvi vidljivi sloj na Suncu, tj. fotosfera. Zbog velike mase, gravitacija Sunca ne dozvoljava česticama iz unutrašnjosti da relativno lako pobjegnu zbog čega ne vidimo direktno unutrašnjost Sunca, nego tek slojeve počevši od fotosfere. Sunčevu atmosferu dijelimo, na kromosferu (prvi sloj iznad fotosfere), prijelazno područje i koronu (slika 2.1).

2.2. Magnetizam Sunca

Tijekom životnog ciklusa zvijezde njezina unutrašnjost i površina uvjetovani su magnetskim poljem. Osim što uvjetuje procese i strukture na malim skalama, magnetsko polje, slično kao i gravitacijsko, uvjetuje procese i strukture i na velikim skalama. No, dok je gravitacija ovisna o samo jednom parametru, masi zvijezde, magnetizam ovisi o puno više različitih faktora (masa, brzina rotacije, stratificiranost, a u nekim slučajevima i o povijesti same zvijezde) (Brun i Browning, 2017). Ni danas još sa sigurnošću ne možemo mnogo tvrditi o porijeklu magnetskog polja Sunca. Prema nekim teorijama ono predstavlja ostatak magnetskog polja međuzvjezdanog oblaka iz kojeg je Sunce nastalo, dok drugi vjeruju da je ono stvoreno samim Suncem.

Ne postoji neka općenita teorija magnetizma koja bi nam mogla omogućiti predviđanje karakteristika magnetskog polja u nekom danom trenutku života zvijezde. Kod Sunca su svi uvjeti za postojanje magnetskog polja zadovoljeni (tekuća jezgra, vodljiv materijal u jezgri i dovoljno brza rotacija). Međutim, određene karakteristike Sunčevog polja i dalje ne razumijemo, kao npr. zašto Sunce ima predvidljive reverzale (obrtnja polariteta magnetskog polja). Najraširenija teorija je da je magnetsko polje Sunca rezultat tzv. dinamo efekta, koji pretvara kinetičku energiju konvekcije u unutrašnjosti zvijezde u magnetsku (Brun i Browning, 2017). Rotacija koja se uočava na površini Sunca je zapravo diferencijalna rotacija. Takva rotacija je inače karakteristična za plinovita tijela, kao npr. zvijezde ili velike plinovite planete (npr. Jupiter). Period rotacije ekvatora Sunca je oko 25 dana, dok je period rotacije polarnih područja oko 30 dana (Vujnović, 2016). U slučaju Sunčeve magnetske aktivnosti, postoji određena periodičnost, tzv. Sunčev magnetski ciklus. Vrijeme potrebno da polovi zamjene mjesta

je približno 11 godina, što znači da ukupni period Sunčeva ciklusa u prosjeku iznosi 22 godine. Kroz Sunčev magnetski ciklus, s promjenama polariteta javljaju se razdoblja povećane i smanjene Sunčeve aktivnosti. Aktivnost raste tijekom prvih 3 do 5 godina, zatim opada tijekom narednih 6 do 8 godina ovisno o snazi pojedinog razmatranog ciklusa (Brun i Browning, 2017). Budući da pojava Sunčevih pjega odražava razinu aktivnosti Sunca, praćenjem pjega na Sunčevoj površini moguće je pratiti promjenu ciklusa. Sunčeve pjege su pojava u fotosferi Sunca koja traje u prosjeku desetak dana. U odnosu na svoju okolinu to su tamnija područja upravo zbog manje temperature od okoline. U njima, iz unutrašnjosti Sunca na površinu izbijaju jaka magnetska polja i ta polja sprječavaju prodiranje topline u pjegu (Vujnović, 2016). Sve grupe pjega na jednoj polutki u jednom razdoblju Sunčeve aktivnosti imaju isti polaritet koji se u 22 godine promjeni i opet vrati na početnu vrijednost.

Još jedan način praćenja Sunčeve aktivnosti je promatranje CME-ova. CME-ovi su vrsta Sunčevih oluja, intenzivne i dinamične pojave koje predstavljaju primjer magnetohidrodinamičkog procesa u Sunčevoj atmosferi. Tim procesom, zbog razlike tlakova i time rezultirajuće nestabilnosti dolazi do izbačaja plazme u interplanetarni prostor. Nastala erupcija ubrzava elektrone i protone na svom putu čime stvara tok čestica velikih energija. Koronini izbačaji su jedna od glavnih tema istraživanja svemirskog vremena jer imaju jako značajan i važan utjecaj za Zemlju te izazivaju jako intenzivnu geomagnetsku aktivnost. Koliko brzo će takve čestice uspijeti doći do Zemlje ovisi o njihovoj brzini te također o interakciji s okolnim Sunčevim vjetrom.

Turbulentna površina Sunca, uvjetovana jakim magnetizmom određenim dijelom je odgovorna za uočenu varijabilnost u Sunčevom zračenju. Samo proučavanje pojava na površini Sunca nam nije dovoljno kako bi mogli precizno razlučiti procese koji se odvijaju u unutrašnjosti, iako vjerojatno postoji interakcija onog uočenog na površini i onog što ne vidimo u unutrašnjosti. Danas, metoda koja donekle omogućava proučavanje procesa u unutrašnjosti Sunca je helioseizmologija (eng. *helioseismology*). Bavi se proučavanjem frekvencija i drugih uočenih svojstva oscilacija kako bi se donijeli zaključci o fizikalnom stanju Sunčeve unutrašnjosti. Oscilacije su stohastički pobuđene turbulentnom konvekcijom u gornjem dijelu konvektivne zone. Materijal, koji je konvekcijom transportiran do površine, hladi se i ponovno tone prema Sunčevoj unutrašnjosti. Na taj način, formira se set vrlo čestih i na maloj skali, široko rasprostranjenih izvora valova. Drugim riječima, dolazi do poremećaja ravnotežnog položaja, te na visokim frekvencijama tlak ima ulogu dominantne povratne sile za spomenute poremećaje ravnotežnog položaja, što u konačnici stvara zvučne valove. Za propagaciju takvih valova ključnu ulogu ima brzina zvuka koja je proporcionalna korijenu temperature (Thompson, 2004). Zbog porasta temperature s dubinom, a time i brzine zvuka, zvučni valovi na određenoj dubini se reflektiraju natrag prema površini, gdje zbog snažno stratificiranih površinskih slojeva ponovno dolazi do njihove refleksije prema unutrašnjosti.

Na taj način zvučni valovi su zarobljeni u rezonantnoj šupljini i formiraju modove diskretnih frekvencija, ω .

2.3. Koronine šupljine

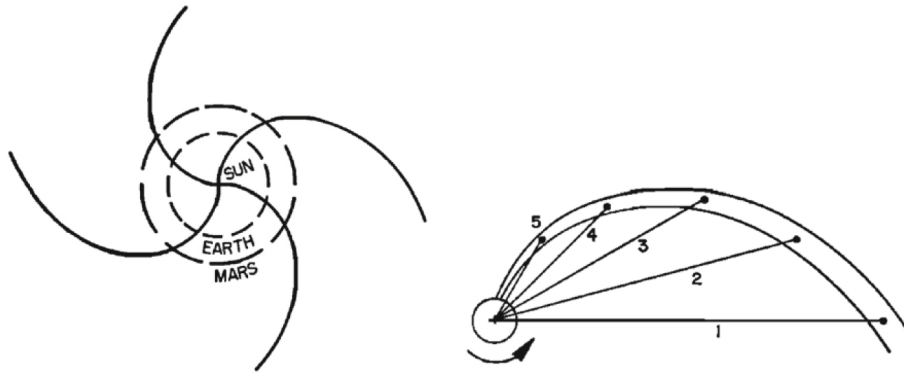
Iako jedan od Maxwellovih zakona kaže da otvorene silnice magnetskog polja ne mogu postojati ($\nabla \cdot B = 0$), pojam otvorenih silnica magnetskog polja se često susreće pri proučavanju magnetskog polja na Suncu. U tom slučaju podrazumijeva se područje na površini Sunca iz kojeg se silnice magnetskog polja pružaju toliko daleko u svemir (stotine R_s) da se njihovo zatvaranje ne može uočiti. Ta područja se nazivaju koronine šupljine. Ističu se svojom tamnom bojom u odnosu na svoju okolinu. Uzrok tome je što ta područja emitiraju manje u ultraljubičastom (UV) i X-spektru, zbog čega su manje temperature od svoje okoline. Područja gdje možemo pronaći koronine šupljine variraju ovisno o razdoblju Sunčevog magnetskog ciklusa (Mikhailutsa, 1995; Ikhsanov i Tavastsherna, 2015; Bilenko i Tavastsherna, 2016). U vrijeme minimuma Sunčeve aktivnosti koronine šupljine su uglavnom ograničene na područja u blizini polova Sunca, dok se za vrijeme maksimuma Sunčeve aktivnosti šire na sve heliografske širine. Međutim, u tom slučaju one tu mogu preživjeti tek nekoliko Sunčevih rotacija nakon čega evoluiraju u različite magnetske konfiguracije. Postoji razlika između koroninih šupljina blizu ekvatora i onih blizu polova. Polarne koronine šupljine, sa svojom velikom površinom dominantno utječu na koronu. Njihovo ukupno protezanje duž heliografskih širina jako ovisi o Sunčevoj aktivnosti (Cranmer, 2002). Duž otvorenih silnica plazma odlazi iz Sunčeve korone. Na taj način nastaje Sunčev vjetar, stalna pojava, medij koji ispunjava cijelu heliosferu te je to jedna od glavnih pojava koje čine svemirsko vrijeme. Zato je za razumijevanje svemirskog vremena važno mapiranje te predviđanje topologije i dinamike koroninih šupljina.

2.4. Sunčev vjetar

Pedestih godina 20.st. došlo je do intenzivnog razmatranja i pokušaja objašnjavanja uočene nestabilnosti sloja Sunčeve atmosfere, korone. Promatrajući koronu za vrijeme pomrčine Sunca bilo je vidljivo da se utjecaj Sunca ne zadržava na površini već da se nastavlja dublje u svemir. Tu pojavu, konstantnog otjecanja materijala (ioniziranih atoma i elektrona) vanjskih slojeva Sunčeve atmosfere duž silnica magnetskog polja u međuplanetarni prostor astronomi su prozvali Sunčev vjetar. Otjecanje materijala Sunčeve korone na velike udaljenosti posljedica je vrlo visoke temperature vanjskih slojeva atmosfere, zbog čega je omogućen bijeg čestica iz gravitacijskog polja. Te čestice, koje formiraju plazmu Sunčevog vjetra su izvrstan električni vodič. Kao posljedica velike vodljivosti plazme vrijedi koncept „zamrznutosti“ magnetskog polja u takvoj plazmi (eng. *frozen flux approximation*) (McFadden i sur., 2006). Drugim riječima, bez obzira

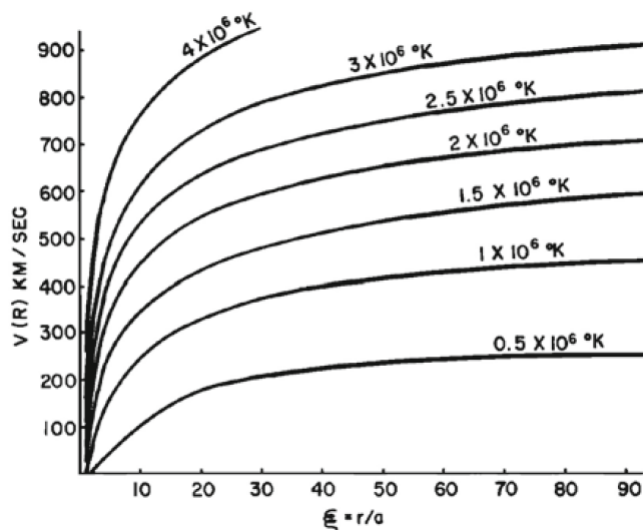
na gibanje elementa plazme, taj element i silnica magnetskog polja ostaju zajedno, a to onda povlači i konstantni tok magnetskog polja. Zbog toga, prilikom širenja Sunčevog vjetra kroz interplanetarni prostor dolazi i do širenja Sunčevog magnetskog polja čime nastaje interplanetarno magnetsko polje (IMF). Područje na kojem se rasprostire utjecaj Sunčevog magnetskog polja nazivamo heliosfera, koja nas štiti od utjecaja galaktičkih zraka.

Razmatranja akceleracije čestica u plinovitom repu kometa sugerira postojanje čestica koje ispunjavaju heliosferu, a istječu radijalno sa Sunca pri brzinama od 400 do 1500 km/s. Ovisno o brzini razlikujemo brzi (>600 km/s), prosječni (~ 450 km/s) i spori (~ 400 km/s) Sunčev vjetar (Richardson, 2018 i tamo navedene reference). Parker (1958) teorijski objašnjava Sunčev vjetar kao radijalnu ekspanziju korone. Prema toj teoriji rotacija Sunca, sideričkog (zvjezdano) perioda 25,38 dana, uzrokuje zakretanje silnica magnetskog polja u Arhimedovu spiralu (lijevi dio slike 2.2), zbog čega je danas još nazivamo i *Parkerova spirala*.



Slika 2.2. Lijevo: Projekcija na Sunčevu ekvatorijalnu ravninu magnetskog polja čije silnice su rastegnute utjecajem toka Sunčevog vjetra, brzine 10^3 km/s. Desno: Razvoj Arhimedove spirale utjecajem Sunčevog vjetra koji izvire iz točke na površini Sunca. Točke ukazuju na položaj plazme emitirane radijalno od 1. do 5. dana. Preuzeto iz Richardson (2018).

Desni dio slike 2.2 pokazuje položaj čestica u toku emitiranom s točke na rotirajućem Suncu tijekom prvog do petog dana. Možemo primjetiti da, iako je tok emitiran radijalno, oblik strujnica je spiralan. Poznata analogija je uzorak toka vode iz rotirajućih vrtnih prskalica. Slika 2.3 pokazuje brzine ekspanzije od nekoliko stotina km/s kao funkciju udaljenosti od Sunca (u jedinici Sunčevog radijusa, R_s ; Zemlja je na $215R_s$) za razne temperature korone.



Slika 2.3. Sferično-simetrična hidrodinamička brzina ekspanzije izotermalne Sunčeve korone kao funkcija r/a gdje je a radijus Sunca. Preuzeto iz Richardson (2018).

Intenzivni Sunčev magnetizam koji uočavamo i njegovi učinci vode k formiranju kompleksnih koronalnih struktura i različitih eruptivnih događaja (npr. baklje, CME-ovi), te do oblikovanja kontinuiranog toka čestica sa Sunca, tj. Sunčevog vjetra. Da nema gubitka mase i kutnog momenta povezanih sa Sunčevim vjetrom evolucija Sunca bi bila uvjetovana jedino onim što se događa u samoj unutrašnjosti, a u tom slučaju bi uočavali promjene jedino na sekularnoj skali (vremenska skala reda veličine stoljeća). Stoga, upravo jer postoji Sunčev vjetar postoje i promjene na Suncu na puno manjoj vremenskoj skali. Uzimajući sve skupa u obzir, Sunce je, kao jedan magnetski sustav jako dinamičan i promjenjiv. Dio znanosti koji se bavi proučavanjem povezanosti starosti Sunca s njegovim magnetskim stanjem i rotacijom naziva se žirokronologija (eng. *gyrochronology*) i magnetokronologija (eng. *magnetochronology*) (Brun i Browning, 2017 i tamo navedene reference).

Uzorak pojavljivanja brzog (HSS) i sporog Sunčevog vjetra javlja se iznova s uzastopnim Sunčevim rotacijama. U određenim slučajevima uočeno je da se HSS javlja uzastopno u barem 4-5 Sunčevih rotacija, što nam govori da su to dugotrajne prostorne značajke koje korotiraju sa Suncem. Do sada, uočeno je da HSS pretežito izvire iz polarnih koroninih šupljina, iako povremeno su mu izvor i koronine šupljine na nižim širinama koje su inače karakterizirane kao područja izvora sporog Sunčevog vjetra (Vršnak i sur., 2007). Sunčev vjetar čini medij koji ispunjava cijeli Sunčev sustav i čije čestice (s pratećim zračenjem) su dominantne u stvaranju geomagnetske aktivnosti. U slučaju da brzi Sunčev vjetar uspije dostići spori (stalna pojava na Suncu), dolazi do interakcije čestica različitih brzina. Javlja se kompresija plazme i magnetskog polja što uzrokuje porast gustoće i povećanje magnetskog polja u toku predvodećeg sporog vjetra. Ako je koronina šupljina iz koje je nastao HSS stabilna tijekom dužeg perioda,

pojava spomenute interakcije se ponavlja sa svakom Sunčevom rotacijom. Nastalu strukturu u području međudjelovanja sporog i brzog vjetra nazivamo korotirajuće interakcijsko područje (CIR) (Vršnak i sur., 2007). Takva struktura također predstavlja jedan od bitnih faktora svemirskog vremena, a time i uzročnika geomagnetske aktivnosti.

2.5. Geomagnetsko polje i svemirsko vrijeme

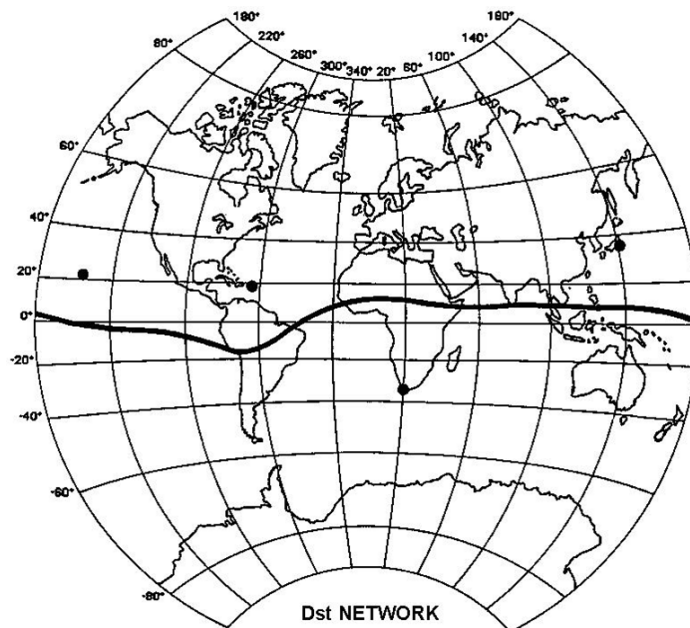
Vanjska jezgra Zemlje je tekuća, sačinjena od vodljivog materijala (uglavnom željezo i nikal). Zbog takve jezgre i postojanja konvekcije u njoj i činjenice da Zemlja ima dovoljno brzu rotaciju zadovoljeni su uvjeti za postojanje magnetskog polja, tzv. geomagnetsko polje. U prvoj aproksimaciji to polje ima oblik dipola sa svojim južnim magnetskim polom trenutno na strani sjevernog geografskog pola i sa sjevernim magnetskim polom na strani južnog geografskog pola. Os magnetskog dipola ne prolazi točno kroz Zemljine geografske polove već se nalazi pod određenim kutom ($11,5^\circ$) u odnosu na os rotacije. Kao i kod Sunca mehanizam kojim se održava geomagnetsko polje je dinamo efekt. Zbog velike vodljivosti tekuće jezgre vrijedi koncept „zamrznutosti“ magnetskog polja u plazmi zbog čega silnice prate gibanje fluida. Nastaju razne strujne petlje koje u konačnici daju geomagnetsko polje. Bitno je napomenuti da ukupno geomagnetsko polje koje uočavamo, uz polje jezgre (koje je najdominantnije) ujedno je i rezultat polja Zemljine kore (magnetične stijene) i vanjskog magnetskog polja koje nastaje interakcijom Sunčevog vjetra i magnetosfere. Kao i kod Sunca i kod Zemlje se javljaju reverzali, no kod Zemlje oni nisu predvidivi. Područje na kojem se rasprostire utjecaj geomagnetskog polja nazivamo magnetosfera. Magnetosfera djeluje kao štit od utjecaja raznih čestica iz Sunčevog sustava (dominantno onih Sunčevog porijekla) i ostatka svemira (analogno ulozu heliosfere samo na manjoj skali). Njen oblik je određen utjecajem Sunčevog vjetra. Zbog tlaka Sunčevog vjetra s dnevne strane magnetosfera je spljoštena te se rasprostire na približno 10-ak radijusa Zemlje (ovisno o Sunčevoj aktivnosti). S noćne strane protezanje magnetosfere je i do 100-tinjak radijusa Zemlje i to nazivamo repom magnetosfere. Dolaskom čestica Sunčevog vjetra na nos magnetosfere dolazi do procesa magnetske rekonekcije. To je proces međudjelovanja dva magnetska polja s antiparalelnim silnicama, „zamrznutim“ svaka u svojoj plazmi. Zbog rekonekcije čestice ne mogu prodrijeti kroz nos magnetosfere već je zaobilaze. Nastavljaju putovati prema noćnoj strani magnetosfere gdje ponovno dolazi do rekonekcije. Ovaj put ta rekonekcije je takva da čestice uspiju prodrijeti unutar magnetosfere. Prema tome, čestice u magnetosferu ulaze kroz magnetosferski rep.

Izraz svemirsko vrijeme (eng. *space weather*) odnosi se na uvjete u interplanetarnom prostoru i na izučavanje fenomena uzrokovanih utjecajem čestica sa Sunca i nastalom interakcijom Zemlje (magnetosfere, ionosfere i termosfere) s tim česticama. Spomenute

čestice koje Sunce otpušta u svakom trenutku prilikom raznih Sunčevih magnetskih aktivnosti (Sunčev vjetar, baklje, CME i slično) imaju veliki utjecaj na satelite, telekomunikaciju i ostalu svemirsku tehnologiju. Također, u velikoj opasnosti se mogu naći i astronauti ako su izvan zaštitnog utjecaja magnetosfere. Predviđanje svemirskog vremena predstavlja veliki izazov. Unatoč značajnom napretku znanosti i tehnologije, pouzdanost i preciznost procjena učinaka svemirskog vremena su još uvijek nedovoljne (Schwenn (2006) i tamo navedene reference). Upravo to je i razlog zbog kojeg je potrebno što bolje proučiti Sunčev vjetar i interplanetarni prostor koji nas okružuje. Daljnjim proučavanjem i time preciznijim i detaljnijim podacima bit će moguće poboljšati naše poznavanje svemirskog vremena i njegovog utjecaja na Zemlju. Što će u konačnici omogućiti bolju pripremu i zaštitu od štetnih utjecaja čestica i popratnog zračenja sa Sunca.

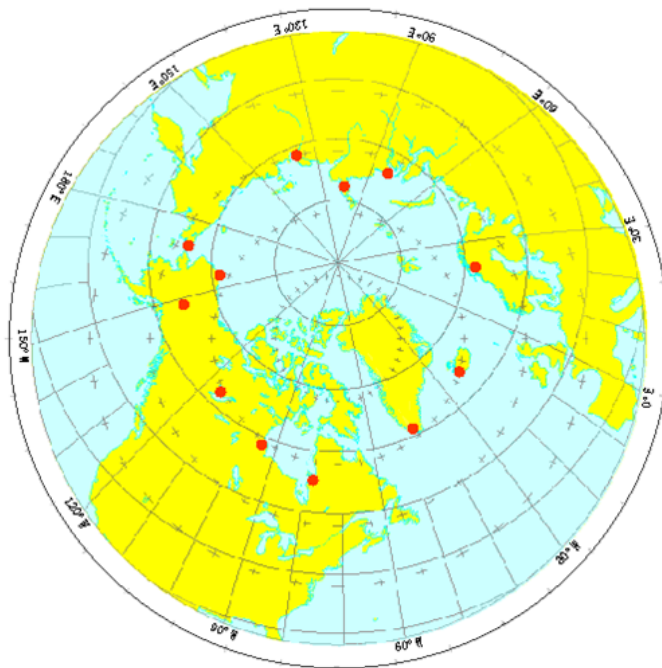
2.6. Geomagnetski indeksi

Geomagnetski indeksi prvotno su osmišljeni kako bi pomoću njih mogli napraviti kvantitativnu analizu poremećaja geomagnetskog polja koje uzrokuje interakcija Sunčevog vjetra i sustava magnetosfere i ionosfere.



Slika 2.4. Karta postaja koje se koriste pri izračunu Dst indeksa (preuzeto s <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html>).

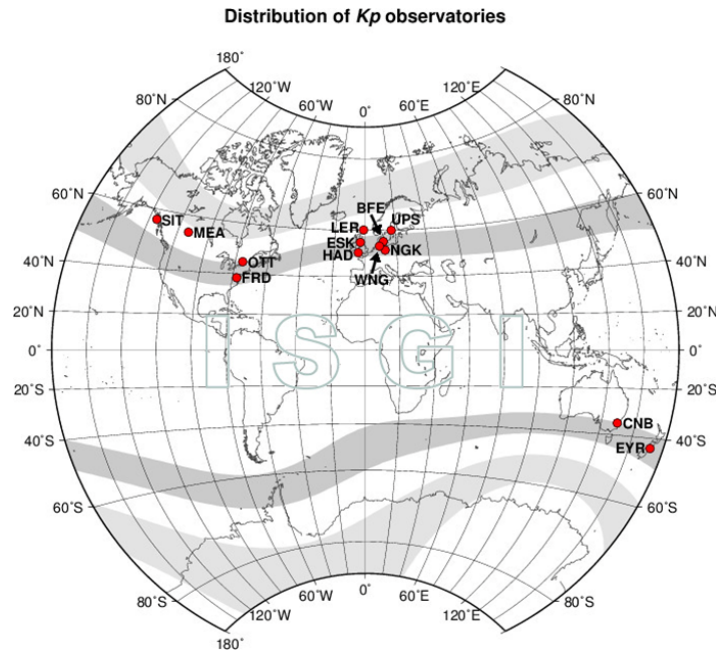
Dst indeks nastao je kao rezultat opsežnog razmatranja magnetskih oluja. Uočeno je da u vrijeme magnetskih oluja dolazi do izraženog pada horizontalne komponente Zemljinog magnetskog polja, H . Početak magnetske oluje obilježen je naglim porastom u vrijednosti H . Karakteristično je da nakon tog trenutka koji obilježi početak mag-



Slika 2.5. Karta postaja koje se koriste pri izračunu AE indeksa (preuzeto s <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/ae2/AETABLE1.html>).

netske oluje, H ostaje iznad svoje prosječne vrijednosti i po nekoliko sati te taj period definira inicijalnu fazu magnetske oluje. Nakon toga slijedi veliki globalni pad H , koji označava glavnu fazu magnetske oluje. Točna vrijednost pada H je mjera jačine poremećaja. Dst označava spomenuto polje poremećaja, osnosimetrično u odnosu na os dipola. Uglavnom poprma negativne vrijednosti što upućuje na smanjenje geomagnetskog polja. Uzrok tog pada je ekvatorijalna prstenasta struja u magnetosferi. Pozitivne vrijednosti Dst indeksa uglavnom su uzrokovane kompresijom magnetskog polja magnetosfere zbog porasta tlaka izazvanog Sunčevim vjetrom. Kontinuirano bilježenje Dst indeksa omogućava kontinuirano praćenje magnetskih oluja. Osim prstenaste struje Dst je rezultat i drugih čimbenika, kao struje magnetopauze, struje repa magnetosfere pa čak i induciranih struja u Zemljinoj kori (Verbanac i sur., 2013). Varijacije Dst indeksa i njegove usporedbe s drugim geofizičkim parametrima omogućuju kvantitativnu analizu geomagnetskih poremećaja. Dst je dobiven iz H komponente mjerene na 4 stanice raspoređene što je ravnomjernije moguće (slika 2.4) u ekvatorijalnom području. (Preuzeto s <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html>.)

AE (eng. *auroral electrojet*) indeks je mjera aktivnosti elektrojet struja u auroralnom pojasu. Izvorno su ga uveli Davis i Sugiura 1966. godine. Kao i kod Dst indeksa i AE indeks se dobije na temelju razmatranja horizontalne komponente geomagnetskog polja, H . Određuje se iz podataka na izabranim postajama (10-13, slika 2.5) koje su raspoređene duž auroralne zone na sjevernoj hemisferi. Kao prvi korak pri računanju AE



Slika 2.6. Karta postaja koje se koriste pri izračunu Kp indeksa (preuzeto s http://isgi.unistra.fr/indices_kp.php).

indeksa je provođenje normalizacije podataka. Računa se bazna vrijednost na temelju podataka 5 najmirnijih dana u pojedinom mjesecu za svaku postaju. Dobivena bazna vrijednost se zasebno na svakoj postaji oduzima od svakog jednogminutnog podatka u tom mjesecu. Za svaki dani trenutak (UT), biraju se među dobivenim vrijednostima najmanja i najveća. Pomoću tih vrijednosti definiramo AU (eng. *auroral upper*) i AL (eng. *auroral lower*) indekse koji predstavljaju gornju i donju envelopu svih podataka s razmatranih postaja. Razlika dvaju indeksa ($AU-AL$) daje AE indeks. AE indeks opisuje sveukupnu aktivnost elektrojet struja, AU i AL indeksi predstavljaju auroralnu elektrojet struju najvećeg intenziteta u istočnom, tj. zapadnom smjeru. Kako bi dobili što pouzdaniju vrijednost indeksa poželjno je koristiti što veći broj postaja. (Preuzeto s <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/ae2/onAEindex.html>.)

ap indeks je trosatni indeks koji je direktno povezan s tzv. Kp indeksom. Trosatni, globalni Kp indeks se također izvodi na temelju poremećaja horizontalne komponente geomagnetskog polja. Uveo ga je Julius Bartels 1949. te je ujedno osmislio i način kako iz njega izvesti i ap indeks. Podaci o horizontalnim komponentama se dobivaju s 13 subauroralnih postaja (slika 2.6). Naziv Kp dolazi od njem. *planetarische Kennziffer* što znači planetarni indeks. Prema tome, kako bi odredili ap indeks prvo se određuje Kp indeks koji se računa na temelju lokalnog K indeksa. K indeks se određuje iz trosatnog raspona (razlika najveće i najmanje vrijednosti) horizontalne komponente magnetskog polja na kojoj se uočava najveći poremećaj. Uklanjaju se varijacije unaprijed definiranih tzv. mirnih dana s magnetograma. K indeks poprima vrijednosti od 0 do 9 prema

kvazilogaritamskoj skali koja je specifična za pojedinu postaju. Statističkim metodama uklanjaju se lokalni efekti i postavljaju se temelji za daljnje računanje planetarnog Kp indeksa. Kp i ap indeksi (te ostali s njima povezani planetarni indeksi) se općenito koriste kao kvantitativna analiza geomagnetske aktivnosti u umjerenim širinama (preuzeto s <https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>).

3. Metoda i analiza podataka

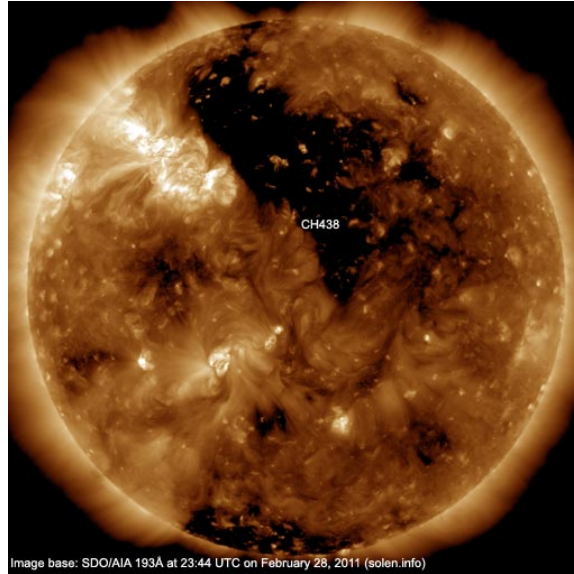
3.1. Podatci

U radu su korišteni sljedeći podatci:

- parametri Sunčevog vjetra (magnetsko polje B i brzina V , mjera električnog polja plazme Sunčevog vjetra BV i dio y komponente Sunčevog električnog polja, $E_y = B_s V$, gdje je $B_s = B_z$ za $B_z < 0$ i $B_s = 0$ za $B_z > 0$, Verbanac i sur., 2013),
- površina koronine šupljine koja prelazi preko Sunčevog centralnog meridijana (CH),
- prosječne satne vrijednosti geomagnetskih indeksa Dst i AE ,
- prosječne 3-satne vrijednosti geomagnetskog indeksa ap .

Analizirane koronine šupljine odabrane su pretežito prema radu Hofmeister i sur. (2018) (Dodatak B). U našoj analizi izbačen je događaj 20.3.2017. jer je na grafovima uočen kao znatno odstupajuća vrijednost (eng. *outlier*). Dodatno, uzeta je u obzir koronina šupljina uočena na Sunčevom disku 26.2.2017. Za nju nemamo podataka o površini pa nije uzeta u obzir pri računanju statistike vezanu za površinu CH . Provedeno istraživanje obuhvaća razdoblje od 2010. do 2017. godine. Pri referiranju na određeni dan u godini koristimo kraticu DOY kao standardni način označavanja vremenskog trenutka. Navedeno razdoblje obuhvaća minimum (djelomično) i maksimum 24. Sunčevog ciklusa. Budući da je pojavnost CME-ova dominantna u vrijeme maksimuma ciklusa obratili smo posebnu pažnju da se oni ne uzmu u obzir pri analizi. Ukoliko su plazmeni parametri Sunčevog vjetra za neki događaj pokazivali naznaku prisutnosti CME-a, provjeravalo se postoji li zabilježeni CME u postojećim katalozima u razmatranom razdoblju. U tu svrhu koristila su se 2 kataloga CME-a: SOHO/LASCO katalog (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html) i Richardson i Cane (2010) lista (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>). Dodatno je za izabrane koronine šupljine provjeravana klasifikacija generiranog Sunčevog vjetra kao HSS-a u katalogu: <http://www.geodin.ro/varsiti/> (navedeni katalog ne sadrži događaje s Dst vrijednosti veće od -30 nT). Također se dodatno provjeravala pojava koronine šupljine na Sunčevom disku (http://www.solen.info/solar/old_reports/, slika 3.1)

Vrijednosti indeksa Dst , AE i ap te podaci o magnetskom i električnom polju, gustoći i brzini IMF-a preuzeti su s <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>. Preciznije, podaci se odnose na parametre Sunčevog vjetra u blizini Zemlje koje bilježi nekoliko svemirskih letjelica u L1 (Lagrangeova točka) orbiti. Osim preuzetih parametara Sunčevog vjetra računati su i produkti BV i $B_s V$. Produkt BV predstavlja mjeru



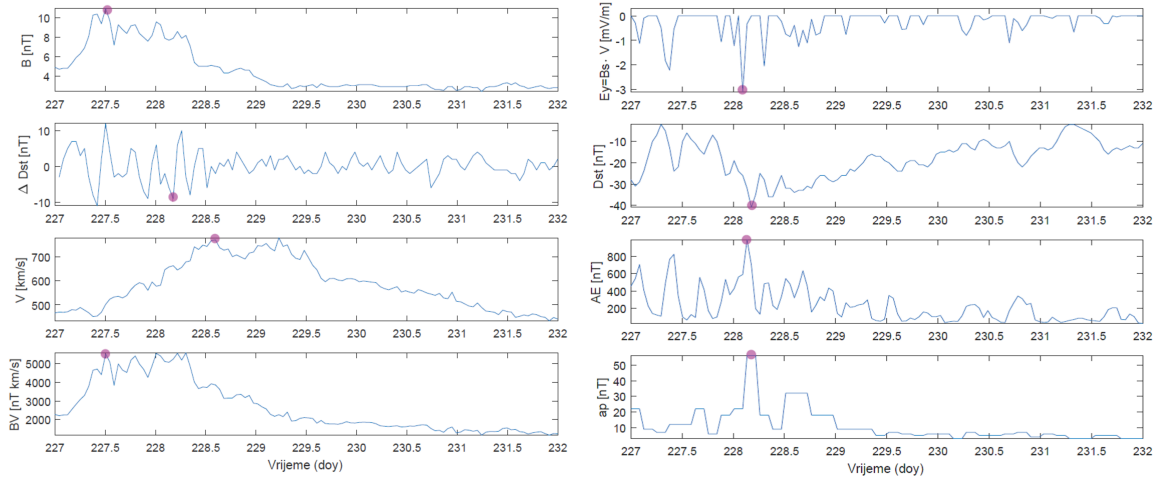
Slika 3.1. Primjer slike SDO/AIA 193Å : koronina šupljina koja je 28.2.2011. prešla preko Sunčevog centralnog meridijana. Slika je preuzeta s http://www.solen.info/solar/old_reports/.

električnog polja plazme Sunčevog vjetra dok $B_s V$ predstavlja jedan dio y komponente Sunčevog električnog polja u koordinatnom sustavu čija z -os je paralelna geomagnetskoj osi u GSM sustavu (eng. *Geocentric Solar Magnetic system*). Južna komponenta magnetskog polja IMF-a (B_s) je glavni parametar odgovoran za geomagnetsku aktivnost. Naime, prijenos energije je najpovoljniji kada IMF ima snažnu južnu komponentu B_s (Verbanac i sur., 2013), čime je omogućena rekonekcija na nosu magnetosfere. Podaci o površinama koroninih šupljina preuzeti su iz rada Hofmeister i sur. (2018) (vidi Dodatak B). Svojstva koroninih šupljina određena su pomoću EUV filtergrama od 193Å dobivenim pomoću letjelice SDO, i EUV filtergrama od 195Å dobivenim pomoću letjelica STEREO A i STEREO B. Detaljniji opis dan je u radu Hofmeister i sur. (2018).

3.2. Analiza podataka

Za svaku od koroninih šupljina analiziranih u ovom radu crtani su grafovi svih spomenutih indeksa i parametara Sunčevog vjetra (Dodatak C). Grafovi su početno crtani u intervalu od prvog do sedmog dana od trenutka prolaska koronine šupljine preko centralnog meridijana. U tom intervalu traženi su odgovarajući maksimumi ili minimumi (Dst). Obzirom da je jedan od kriterija prema kojima su birane koronine šupljine ujedno i da je ta šupljina jedina koja se nalazi duž centralnog meridijana u trenutku razmatranja, jedini izraženi maksimumi koji se uočavaju na grafu su stoga morali pripadati razmatranoj koroninoj šupljini. Izuzeci toga su slučajevi kada imamo javljanje CME-a, čija pojavnost se provjeravala i bila je uzeta u obzir. Vremenski raz-

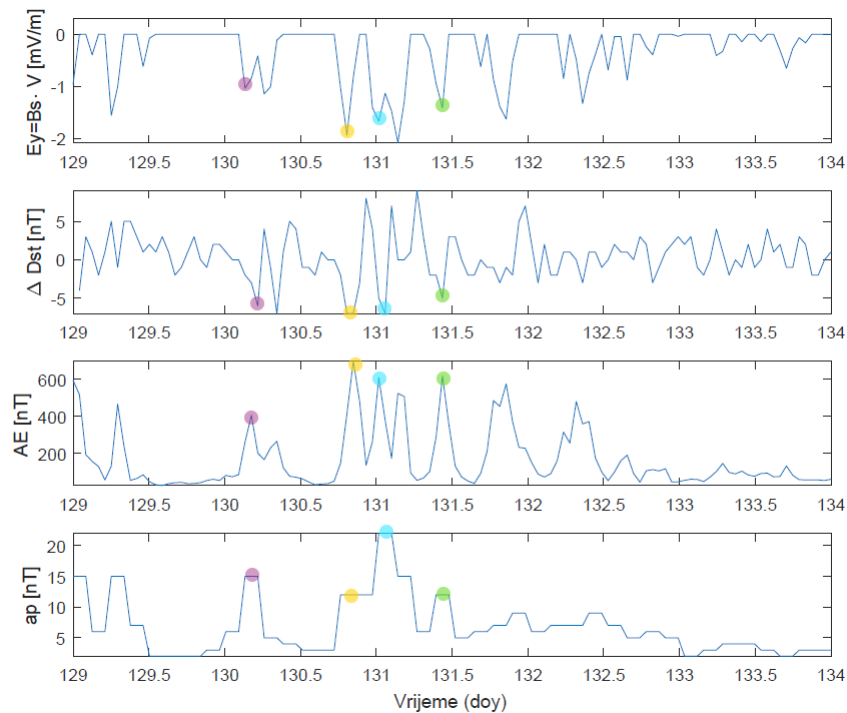
maci između maksimuma i minimuma pojedinih geomagnetskih indeksa i parametara Sunčevog vjetra dobiveni u radu Verbanac i sur. (2011) su korišteni kao smjernice u ovom radu. Na slici 3.2 dan je primjer odabira maksimuma, tj. minimuma pojedinih indeksa i parametara Sunčevog vjetra.



Slika 3.2. Primjer biranja maksimuma/minimuma indeksa i parametara Sunčevog vjetra koronine šupljine koja je 14.8.2013. (DOY 226) prešla preko centralnog meridijana.

Kada se HSS približava Zemlji, sateliti u L1 orbiti prvo bilježe porast vrijednosti magnetskog polja. U otprilike to isto vrijeme dolazi i do porasta gustoće plazme Sunčevog vjetra. Porast brzine uočava se približno jedan dan nakon porasta magnetskog polja (slika 3.2). Prema Verbanac i sur. (2011) porast brzine u L1 događa se otprilike 3,75 dana nakon prolaska koronine šupljine preko centralnog meridijana na Sunčevom disku. Naravno, treba uzeti u obzir da su to statistički dobivene vrijednosti te da su varijacije do određene mjere uvijek moguće. Promjene u vrijednostima geomagnetskih indeksa, od trenutka prolaska koronine šupljine preko centralnog meridijana su skoro simultane. U našem slučaju (slika 3.2) promjene geomagnetskih indeksa nastupaju nakon malo više od jednog dana od prolaska koronine šupljine preko centralnog meridijana. Minimum Dst indeksa može kasniti četvrtinu dana u odnosu na pojavu maksimuma AE i ap indeksa te stoga, približno znamo kada možemo očekivati njegovu pojavu. Kašnjenje minimuma Dst indeksa u odnosu na AE i ap je pak konzistentno s činjenicom da su AE i ap maksimumi istovremeni s ΔDst (Verbanac i sur., 2011).

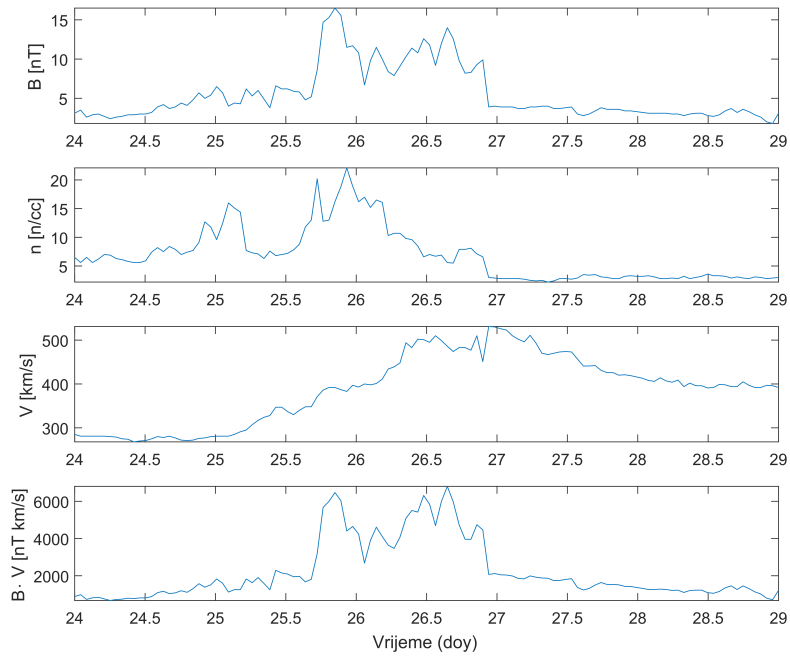
Pokušali smo proširiti podatke kako bi poboljšali statistiku. Za svaku koroninu šupljinu birano je više izraženih minimuma električnog polja i njegovih posljedica, maksimuma AE i ap indeksa te promjena Dst indeksa, ΔDst . Vrijednost ΔDst dobivena je kao razlika dviju uzastopnih vrijednosti Dst indeksa. Primjer odabira vršnih vrijednosti dan je na slici 3.3.



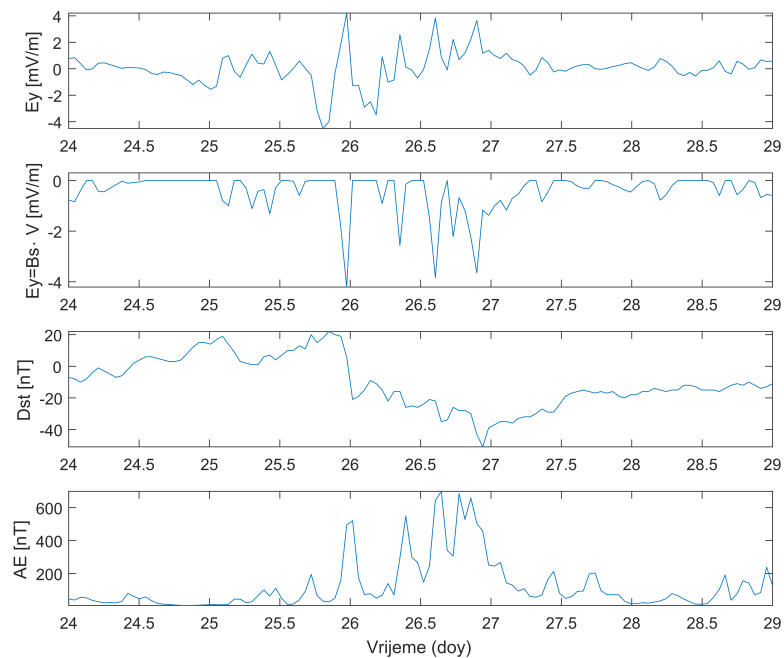
Slika 3.3. Primjer biranja višestrukih maksimuma/minimuma indeksa i parametara Sunčevog vjetrova koronine šupljine koja je 8.5.2014. (DOY 128) prešla preko centralnog meridijana.

3.3. *Primjeri specifičnih slučajeva*

Slika 3.4 se na prvi pogled čini kao dosta „lijep“ primjer parametara IMF-a, tj. čista situacija bez dvosmislenosti pri očitavanju. Imamo porast magnetskog polja, približno 2 dana nakon što je koronina šupljina prešla preko centralnog meridijana. Zatim izraziti skok u brzini čija vrijednost nakon toga polagano opada tijekom nekoliko dana, što je karakteristično za HSS. Međutim, ako pogledamo Dst indeks na slici 3.5, uočavamo da ne postoji samo jedan izraziti minimum već da taj indeks opada, tijekom cijelog 26. dana, s potencijalno traženim minimumom na kraju tog dana. Na istoj slici vidimo da izračunati $E_y (= B_s V)$ upravo u tom razdoblju kad Dst indeks opada ima više izraženih negativnih vrijednosti. Koji od tih minimuma $B_s V$ -a je ispravno odabrati?



Slika 3.4. Prikaz magnetskog polja, gustoće, brzine i umnoška magnetskog polja i brzine čestica Sunčevog vjetra čiji izvor je koronina šupljina koja je 23.1.2013. (DOY 23) prešla preko centralnog meridijana.

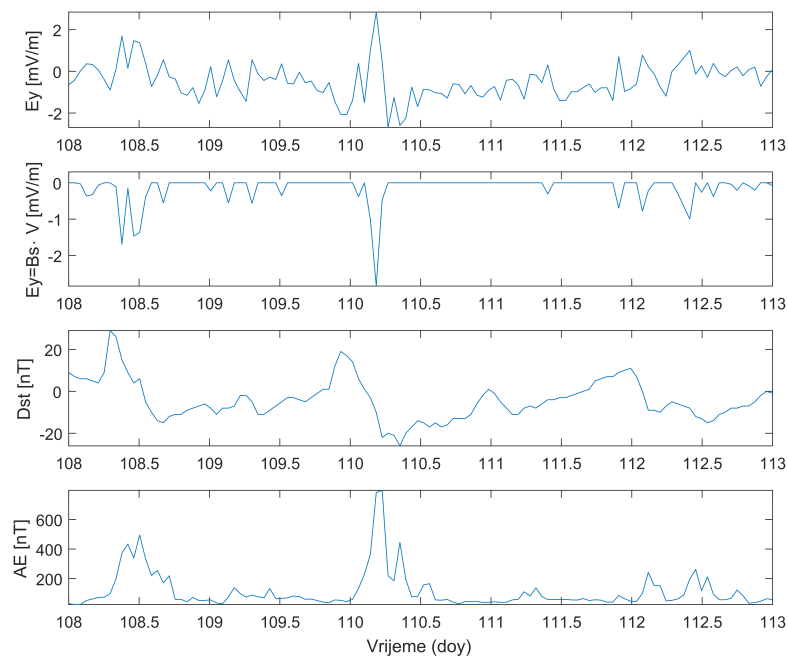


Slika 3.5. Prikaz električnog polja (preuzete i izračunate vrijednosti) te indeksa Dst i AE koji su rezultat utjecaja Sunčevog vjetra čiji izvor je koronina šupljina koja je 23.1.2013. (DOY 23) prešla preko centralnog meridijana.

Odabran je najveći minimum koji se dogodio pred kraj 25. dana i pridružen je mi-

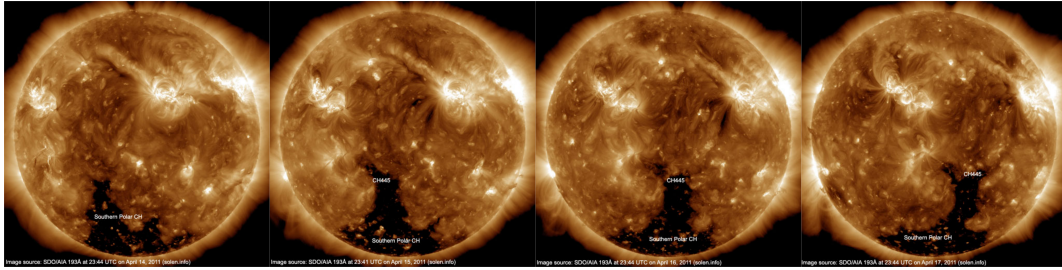
nimumu Dst indeksa krajem 26. dana. Zato jer je ta izrazita negativna vrijednost $B_s V$ -a ono što prvo uzrokuje naglo opadanje Dst indeksa. Svi daljnji minimumi koje uočavamo su pomogli održavanju tog indeksa negativnim duže vrijeme te njegova vrijednost nije ponovno postala pozitivna tijekom cijelog 26. dana. Istu tu situaciju možemo zamijetiti i kod AE indeksa. Ne postoji jedan izraziti skok tog indeksa, već njegova povećana vrijednost tijekom cijelog 26. dana te se na grafu točno može pratiti utjecaj negativnih komponenti električnog polja i reakcija AE indeksa. Stoga, pri razmatranju geomagnetskih indeksa moramo uzeti u obzir da razmatrana komponenta električnog polja u konačnici ima kumulativni učinak na indekse.

Drugi specifičan primjer je koronina šupljina koja se na centralnom meridijanu nalazila 16.4.2011. (DOY 106). Ta koronina šupljina predstavlja produžetak južne polarne koronine šupljine. Ako gledamo graf Dst indeksa (slika 3.6) možemo uočiti da se javljaju dva istaknutija minimuma Dst indeksa, jedan na DOY 108, a drugi na DOY 110.



Slika 3.6. Prikaz električnog polja (preuzete i izračunate vrijednosti) te indeksa Dst i AE koji su rezultat utjecaja Sunčevog vjetera čiji izvor je koronina šupljina koja je 16.4.2011. (DOY 106) prešla preko centralnog meridijana.

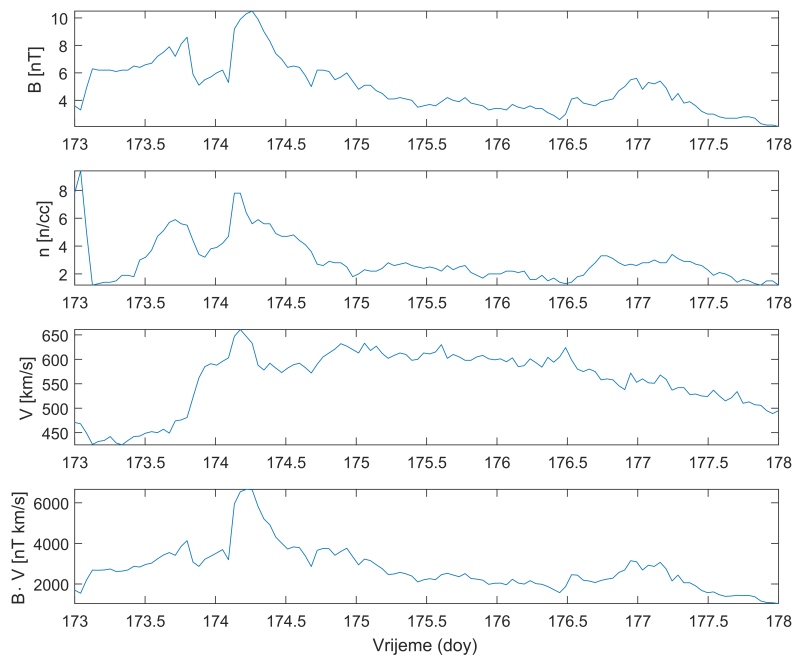
Razmatrajući kataloge CME-a, vidimo da nije bilo značajnijih izbačaja sa Sunca u razmatranom periodu, ali ono što je moglo uzrokovati te minimume je upravo poseban oblik razmatrane koronine šupljine (slika 3.7).



Slika 3.7. Prikaz koronine šupljine duž Sunčevog diska od 14.4.2011. (DOY 104) do 17.4.2011. (DOY 107).

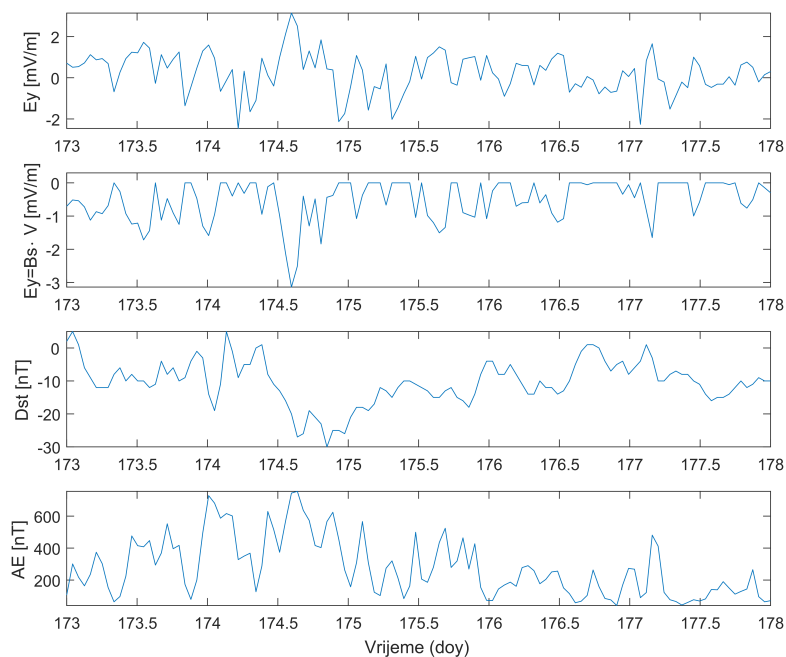
Drugim riječima polarna koronina šupljina i njena izražajna ekstenzija su najvjerojatnije razlog duplog Dst minimuma koji se javljaju na DOY 108 i na DOY 110. Budući da je Dst minimum vidljiv na DOY 108 manje izražen od minimuma na DOY 110, kao glavni poremećaj kojeg je ova koronina šupljina uzrokovala uzimamo minimum vidljiv na DOY 110. Maksimumi indeksa AE i ap također se javljaju na DOY 110 te i oni predstavljaju još jedan pokazatelj kada se točno javlja odgovarajući minimum Dst indeksa. Osim spomenutih indeksa, vrijeme pojave maksimuma brzine, kao i minimuma $E_y (= B_s V)$ i maksimuma samog magnetskog polja doprinose donesenom zaključku.

Još jedna od poteškoća pri analizi podataka je pojava utjecaja drugih magnetskih aktivnosti Sunca uz prisutnu koroninu šupljinu. To je osobito problem u vrijeme maksimuma Sunčevog magnetskog ciklusa. Jedan takav primjer je koronina šupljina koja je 20.6.2011. (DOY 171) prešla preko Sunčevog centralnog meridijana. Uz nju se 19.6., 20.6., kao i 21.6.2011. javio djelomični halo (eng. *partial halo*), prema podacima CME liste (SOHO/LASCO podaci, dok na listi Richardson i Cane (2010) spomenuti događaji nisu navedeni). Uz povećano magnetsko polje možemo zamijetiti i povećanu vrijednost brzine (slika 3.8). Obzirom da je brzina (relativno) naglo porasla, ali jako sporo opada (kroz narednih 5 dana) potvrđuje nam da to nije slučaj samo CME-a, već mora postojati i HSS (u slučaju čistog CME-a brzina bi naglo porasla, ali i naglo opala).



Slika 3.8. Prikaz magnetskog polja, gustoće, brzine i umnoška magnetskog polja i brzine čestica Sunčevog vjetra čiji izvor je koronina šupljina koja je 20.6.2011. (DOY 171) prešla preko centralnog meridijana.

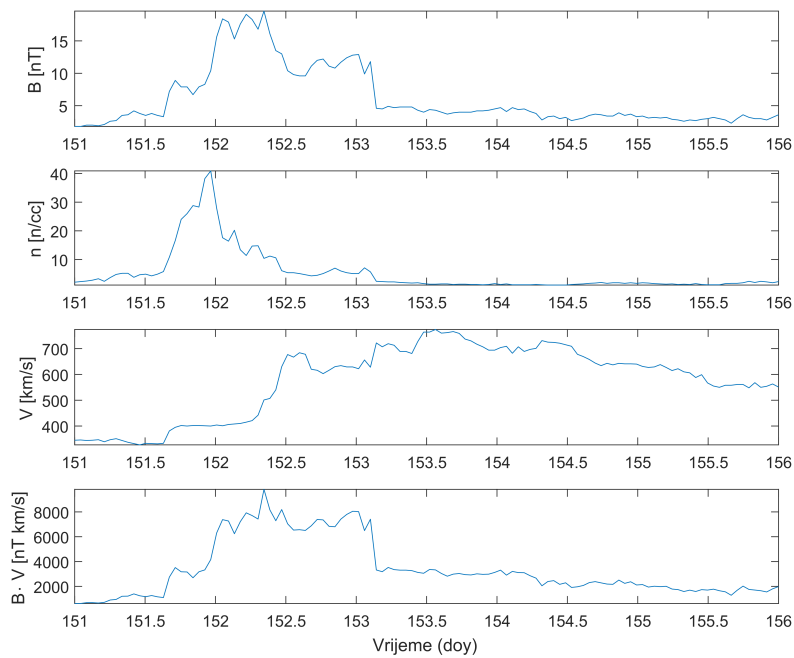
Razmatramo li dalje, uočavamo izrazito oscilatorno električno polje (slika 3.9). Obzirom da se ne javlja jedinstveni, istaknuti maksimum električnog polja također doprinosi zaključku da se u ovom slučaju morao javiti još jedan magnetski događaj na Suncu uz uočenu koroninu šupljinu. Na isti zaključak navode nas i povećane (oscilatorne) vrijednosti indeksa AE i ap (slika 3.9). Ne javlja se samo jedan istaknuti skok, kao što bi očekivali u slučaju pojave samo HSS-a, već nam izrazita vremenska varijabilnost indeksa ukazuje na izrazitu varijabilnost magnetske aktivnosti.



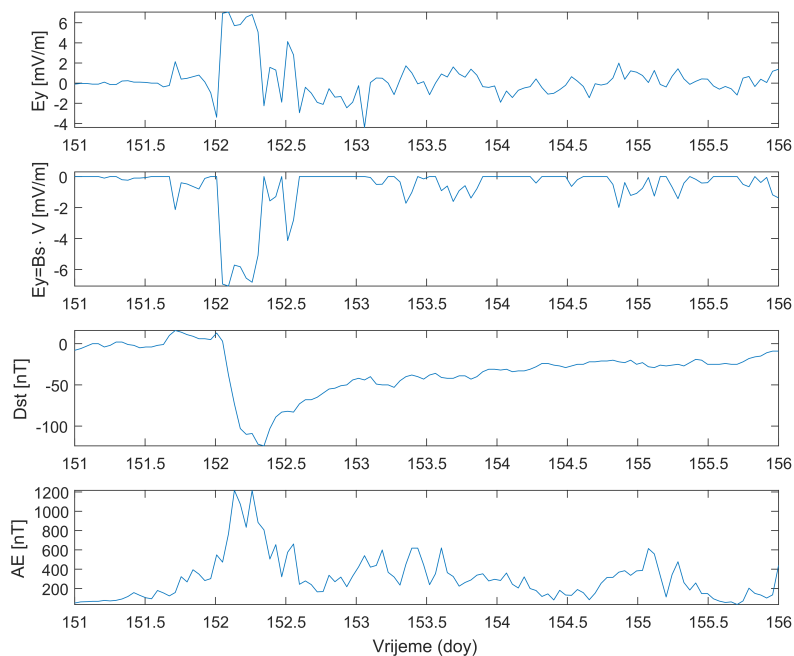
Slika 3.9. Prikaz električnog polja (preuzete i izračunate vrijednosti) te indeksa Dst i AE koji su rezultat utjecaja Sunčevog vjetera čiji izvor je koronina šupljina koja je 20.6.2011. (DOY 171) prešla preko centralnog meridijana.

Uzimajući u obzir sve navedeno, možemo zaključiti da je ovo primjer kada uz razmatranu koroninu šupljinu imamo i CME. Dst minimum odgovarajuće koronine šupljine se najvjerojatnije dogodio 23.6.2011. (DOY 174). Vremenski razmak od kad je koronina šupljina prešla preko centralnog meridijana i kad je Dst minimum zabilježen na Zemlji (3 dana) odgovara vrijednosti koju bi i očekivali na osnovu prijašnjih istraživanja (Verbanac i sur., 2011).

Daljnji primjer je koronina šupljina koja je 29.5.2013. (DOY 149) prešla preko centralnog meridijana. Još je jedan od slučajeva kad nemamo miješanja drugih utjecaja raznih magnetskih aktivnosti na Suncu. Imamo izražen maksimum magnetskog polja otprilike 2 dana nakon prolaska šupljine preko centralnog meridijana, zatim maksimum brzine koji se javlja sredinom narednog dana nakon maksimuma magnetskog polja (slika 3.10). To približno odgovara predviđenim vrijednostima vremenskih razmaka između B i V (Verbanac i sur., 2011). Ono što je specifično kod ovog slučaja, što se minimum Dst indeksa (te i maksimum AE indeksa, slika 3.11) javlja prije samog maksimuma brzine (približno jedan dan prije). Na prvi pogled, to je neočekivana situacija s obzirom da je porast u vrijednosti indeksa posljedica nadolazećeg HSS-a, te ne bi očekivali da će se posljedica vremenski javiti prije uzroka. Međutim, u ovom slučaju CIR se javlja ispred samog HSS-a. Zbog interakcije čestica različitih brzina formira se udarni val (područje šoka) koji je uzrok javljanja maksimuma/minimuma geomagnetskih indeksa prije samog maksimuma brzine.



Slika 3.10. Prikaz magnetskog polja, gustoće, brzine i umnoška magnetskog polja i brzine čestica Sunčevog vjetra čiji izvor je koronina šupljina koja je 29.5.2013. (DOY 149) prešla preko centralnog meridijana.



Slika 3.11. Prikaz električnog polja (preuzete i izračunate vrijednosti) te indeksa Dst i AE koji su rezultat utjecaja Sunčevog vjetra čiji izvor je koronina šupljina koja je 29.5.2013. (DOY 149) prešla preko centralnog meridijana.

4. Rezultati

U ovom radu ukupno je razmatrano 52 slučaja koroninih šupljina (Dodatak B) uočeni na Sunčevom disku. Minimumi i maksimumi razmatranih geomagnetskih indeksa i parametara Sunčevog vjetra dani su u tablici 4.1. U tablici 4.2 dani su koeficijenti, početno pretpostavljene linearne korelacije, R između geomagnetskih indeksa i parametara Sunčevog vjetra, kao i površine koronine šupljine CH . Vidimo iz tablice da je Dst indeks negativno koreliran sa svim parametrima Sunčevog vjetra kao i s površinom CH . Također, to vrijedi i za promjenu Dst indeksa, ΔDst . Negativna korelacija je očekivana, Dst indeks je osmišljen tako da se njegova vrijednost sve više smanjuje jačanjem geomagnetske aktivnosti. Drugim riječima, zbog vanjskih magnetskih utjecaja (zbog kojih rastu vrijednosti geomagnetskih indeksa) dolazi do jačanja prstenaste struje, što je kvantitativno prikazano smanjivanjem vrijednosti Dst indeksa (odnosno ako gledamo njegovu apsolutnu vrijednost onda porastom). Iz tablice 4.2 možemo uočiti da je najveća korelacija između ΔDst i dijela y komponente električnog polja, B_sV ($R=-0,82$).

Tablica 4.1. Minimalne i maksimalne vrijednosti geomagnetskih indeksa (Dst , AE , ap i ΔDst), parametara Sunčevog vjetra (B_sV , BV , B , V) i površina koroninih šupljina (CH)

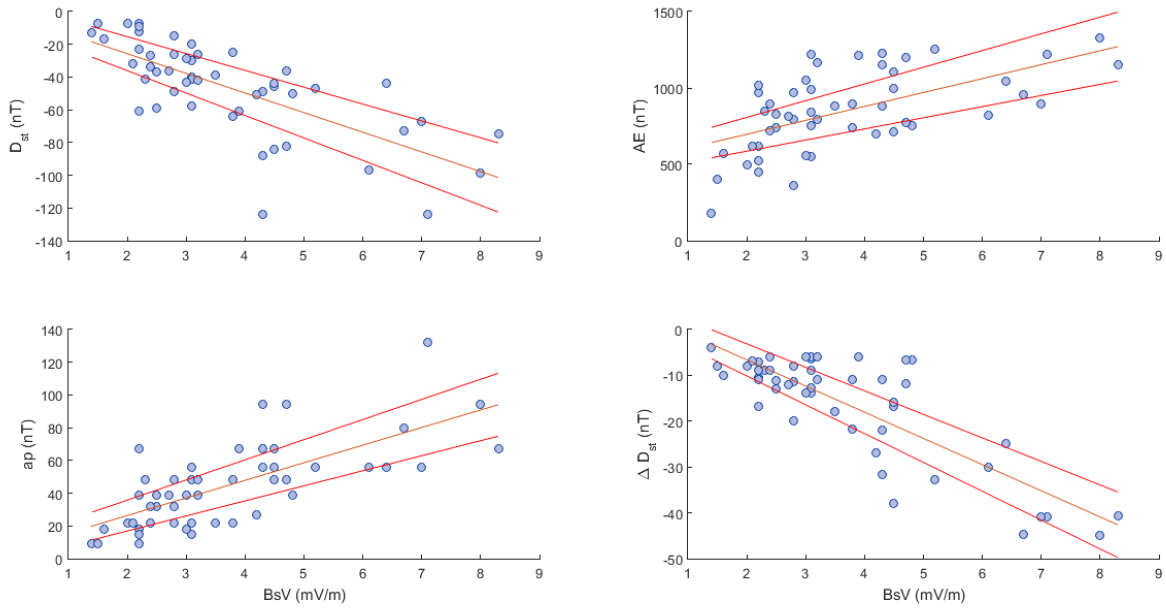
	min	max
$ Dst $ (nT)	7	124
AE (nT)	176	1327
ap (nT)	9	132
$ \Delta Dst $ (nT)	4	45
B_sV (mV/m)	1,4	8,3
BV (mV/m)	2,8	11,6
B (nT)	7,3	22,6
V (km/s)	381	775
CH (10^{10}km^2)	2,1	28,7

Tablica 4.2. Koeficijenti linearne korelacije, R između geomagnetskih indeksa (Dst , AE , ap i ΔDst) i parametara Sunčevog vjetra (B_sV , BV , B , V) te površine koroninih šupljina (CH).

	Dst	AE	ap	ΔDst
B_sV	-0,71	0,59	0,71	-0,82
BV	-0,69	0,68	0,70	-0,54
B	-0,66	0,58	0,65	-0,63
V	-0,41	0,61	0,50	-0,03
CH	-0,14	0,32	0,19	-0,02

Na slici 4.1 prikazana je korelacija B_sV -a i geomagnetskih indeksa dok su pripadni koeficijenti linearne regresije dani u tablici 4.3. Grafovi linearnih korelacija ostalih

parametara (BV , B , V i CH) s geomagnetskim indeksima dani su u Dodatku A ovog rada.



Slika 4.1. Korelacije B_sV - Dst , B_sV - AE , B_sV - ap i B_sV - ΔDst zajedno s dobivenim pravcem linearne regresije i označenim intervalom pouzdanosti (68%).

Tablica 4.3. Koeficijenti a i b linearne regresije ($y = ax + b$) dijela y komponente električnog polja (B_sV) i geomagnetskih indeksa (prikazano na slici 4.1).

	a	b
B_sV - Dst	$-12,00 \pm 1,70$	$-1,73 \pm 6,91$
B_sV - AE	$91,10 \pm 18,15$	$514,76 \pm 73,76$
B_sV - ap	$10,75 \pm 1,55$	$4,86 \pm 6,29$
B_sV - ΔDst	$-5,71 \pm 0,58$	$4,79 \pm 2,34$

Između brzine Sunčevog vjetra i Dst indeksa postoji slaba korelacija ($R=-0,41$), dok između brzine i promjene Dst indeksa, ΔDst uopće nema korelacije ($R=-0,03$). Iako brzina nema direktno jaku vezu s Dst indeksom, utjecaj brzine je indirektan. Utjecaj brzine izražen je u ukupnom električnom polju (BV) i njegovoj komponenti E_y ($=B_sV$) koji pokazuju izraženu korelaciju s Dst indeksom ($R=-0,69$ i $R=-0,71$). Između površine CH i Dst indeksa ne nalazimo nikakvu korelaciju ($R=-0,14$), kao ni između CH i ΔDst ($R=-0,02$). Indeksi ap i AE uglavnom pokazuju umjerenu do izraženu korelaciju s parametrima Sunčevog vjetra dok s površinom CH korelacija je slaba ili je nema.

Osim linearne povezanosti geomagnetskih indeksa s parametrima Sunčevog vjetra

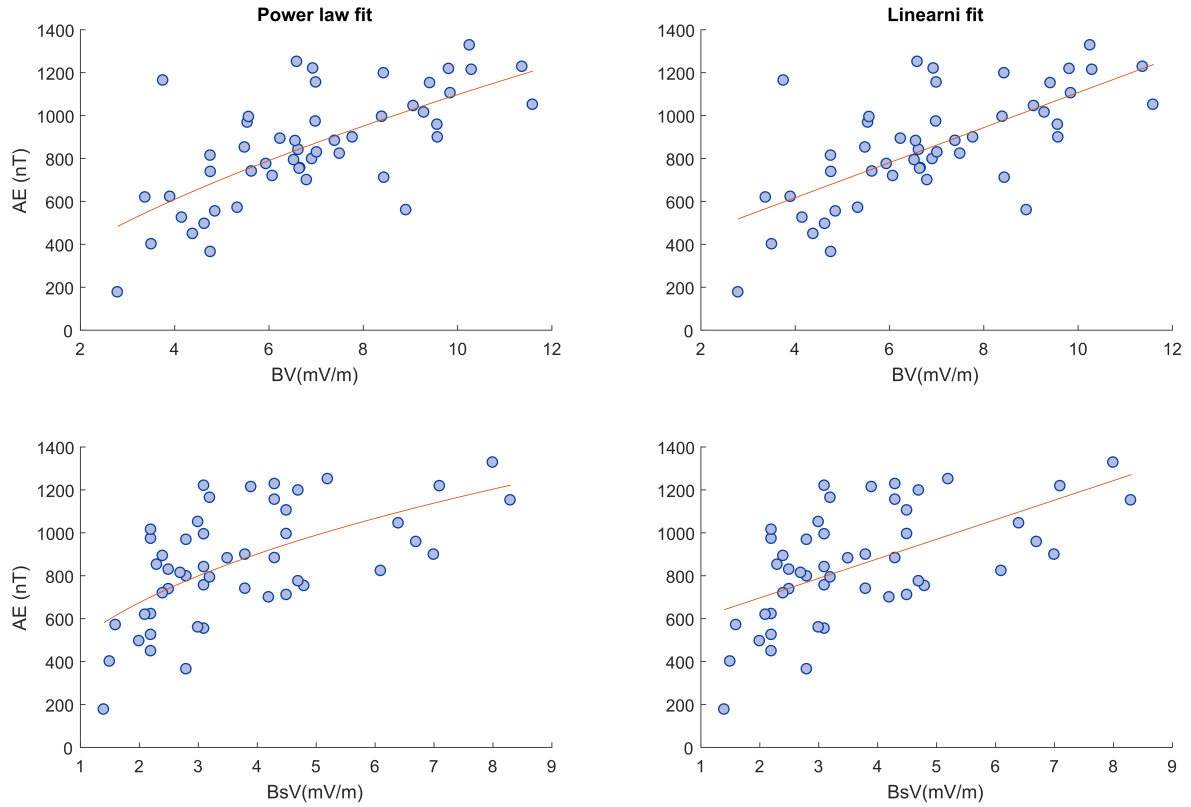
BV i B_sV , ispitali smo i nelinearnu povezanost oblika

$$y = ax^b. \quad (4.1.)$$

Tablica 4.4. Koeficijenti a i b iz izraza 4.1. te koeficijenti korelacije, R_{pow} između parametara Sunčevog vjetra (B_sV , BV) i geomagnetskih indeksa (Dst , AE , ap).

	a	b	R_{pow}
B_sV-Dst	$-13,92 \pm 3,05$	$0,93 \pm 0,14$	$-0,72$
B_sV-AE	$505,41 \pm 56,72$	$0,42 \pm 0,08$	$0,62$
B_sV-ap	$14,41 \pm 2,95$	$0,88 \pm 0,13$	$0,71$
$BV-Dst$	$-3,32 \pm 1,61$	$1,35 \pm 0,23$	$-0,69$
$BV-AE$	$250,23 \pm 52,69$	$0,64 \pm 0,10$	$0,69$
$BV-ap$	$3,95 \pm 1,74$	$1,25 \pm 0,21$	$0,70$

Prema podacima u tablici 4.4, vidi se da su vrijednosti koeficijenata korelacije približno jednaki i u slučaju linearnog i *power law* fita. Međutim, ako pogledamo vrijednosti potencije b u slučaju veze B_sV-AE i $BV-AE$ možemo primjetiti da je ta vrijednost nešto bliže vrijednosti 0,5 nego vrijednosti 1, što upućuje na nelinearnu vezu između geomagnetskog indeksa AE s električnim poljem BV i s dijelom njegove y komponente, B_sV . Također, vrijednosti korelacija su nešto više nego u slučaju provedene linearne regresije.

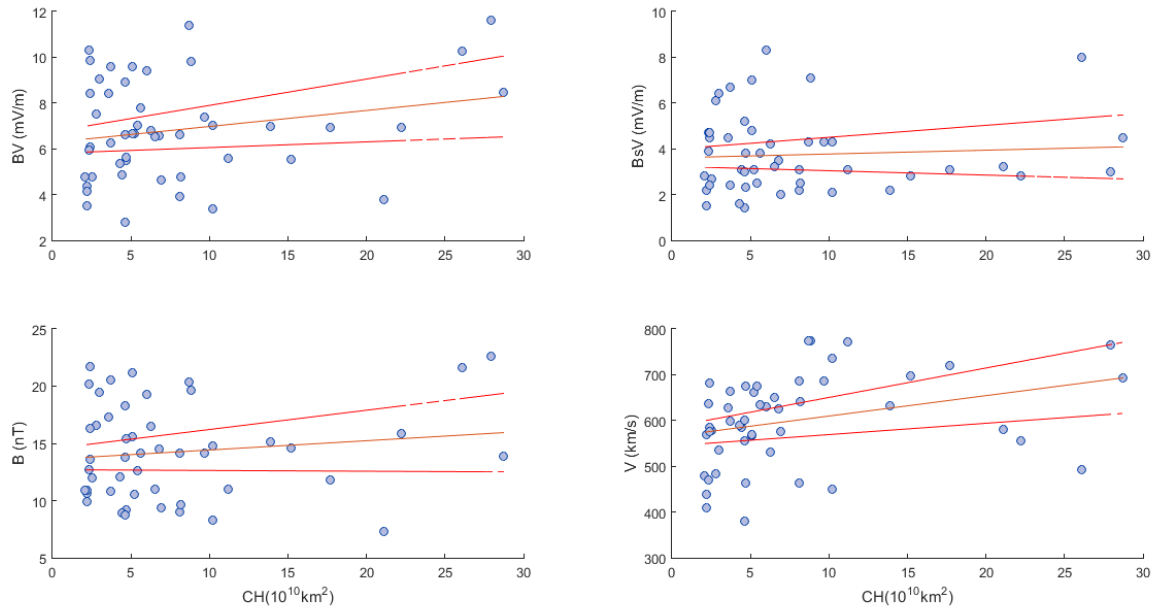


Slika 4.2. Power law i linearni fit za odnose $BV-AE$ i B_sV-AE .

Tablica 4.5. Koeficijenti linearne korelacije, R između parametara Sunčevog vjetra (B_sV , BV , B , V) i površine koronine šupljine (CH).

	B_sV	BV	B	V
CH	0,07	0,22	0,13	0,31

U tablici 4.5 dani su koeficijenti linearne korelacije R između površine CH i parametara Sunčevog vjetra. Korelacije su uglavnom slabe do toga da ih uopće nema. Najveća korelacija se uočava između površine CH i brzine Sunčevog vjetra ($R=0,31$, slaba korelacija), dok najmanja korelacija je s dijelom y komponente Sunčevog električnog polja, B_sV ($R=0,07$), tj. korelacije s tom komponentom električnog polja nema. Na slici 4.3 prikazani su odnosi površine CH s parametrima Sunčevog vjetra, a u tablici 4.6 dani su pripadni koeficijenti linearne regresije.



Slika 4.3. Veza CH - BV , CH - B_sV , CH - B i CH - V zajedno s dobivenim pravcem linearne regresije i označenim intervalom pouzdanosti (68%).

Tablica 4.6. Koeficijenti a i b linearne regresije ($y = ax + b$) površine koronine šupljine (CH) i parametara Sunčevog vjetra (prikazano na slici 4.3).

	a	b
CH - BV	$0,07 \pm 0,04$	$6,28 \pm 0,47$
CH - B_sV	$0,02 \pm 0,04$	$3,61 \pm 0,37$
CH - B	$0,08 \pm 0,09$	$13,61 \pm 0,91$
CH - V	$4,45 \pm 1,97$	$565,22 \pm 20,62$

Rezultati dobiveni u radu Verbanac i sur. (2011) daju koeficijente linearne korelacija između CH i B iznosa 0,42 za podatke iz 2005. godine i 0,32 za podatke iz 2006., što upućuje na povezanost CH i B . Kako bi istražili potencijalni uzrok ne postojanja korelacije u slučaju naših podataka, pokušali smo podijeliti podatke na određena razdoblja i u sklopu tih razdoblja tražiti korelaciju između CH i B . Pokušali smo grupirati podatke na samo dva pa sve do pet različitih razdoblja. Isprva smo krenuli s podjelom tako da svaka grupa ima podjednak broj podataka. Razmotrimo prvo podjelu na tri razdoblja s prvim koje obuhvaća 2010., 2011., 2012. i približno do polovice 2013. godine (ukupno 16 događaja). Zatim drugo razdoblje koje obuhvaća drugu polovicu 2013., sve do svibnja 2015. godine (ukupno 16 događaja). Posljednje razdoblje obuhvaća ostatak 2015. godine i sve do kraja razmatranog razdoblja (ukupno 17 podataka). Podaci korelacija za ta razdoblja dani su u tablici 4.7. Vidimo da ipak postoji slaba (skoro umjerena) korelacija između magnetskog polja Sunčevog vjetra i površine

Tablica 4.7. Koeficijenti linearne korelacije, R između magnetskog polja Sunčevog vjetra, B i površine koronine šupljine (CH) za tri različita razdoblja unutar ukupnog vremena razmatranja.

razdoblje	R
2010.- 17.7.2013.	0,43
31.7.2013.-15.5.2015.	0,46
24.5.2015.-2017.	-0,42

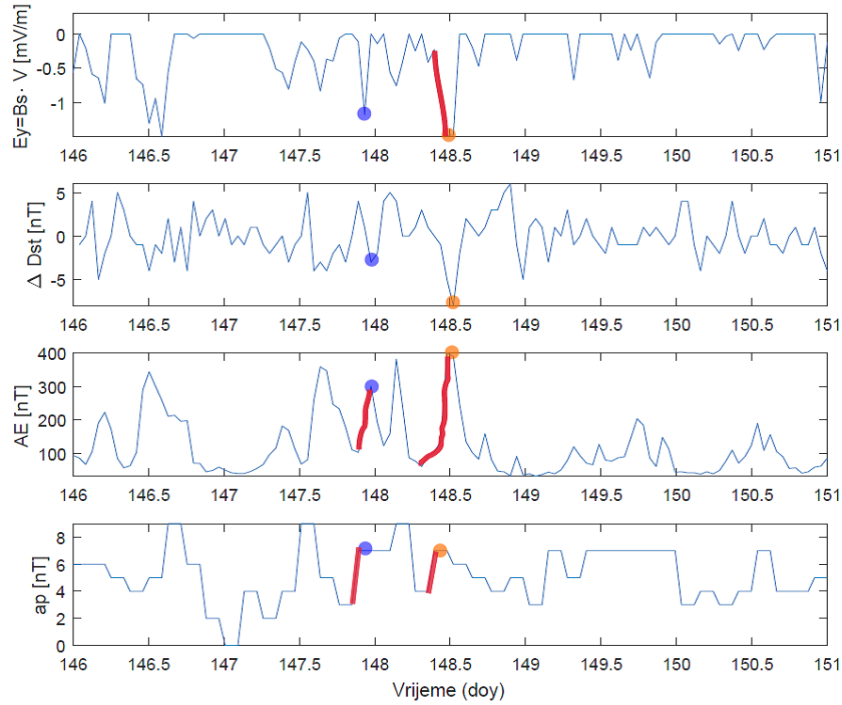
CH . Pokušali smo i s gušćim podjelama kako bi na taj način što učinkovitije razdvojili vrijeme minimuma i maksimuma Sunčevog magnetskog ciklusa. Na taj način i dobijemo bolje rezultate. Međutim, ako uzmemo u obzir ograničen broj podataka s kojim raspolažemo, podjelom na sve gušća razdoblja sve više smanjujemo broj podataka s kojim radimo. S nedovoljnim brojem podataka u setu ne možemo očekivati pouzdane statističke rezultate. Tako da stajemo s podjelom ukupnog razdoblja na tri, jer već i tu vidimo da korelacija između B i površine CH ipak postoji.

Osim verzije gdje smo za jednu koroninu šupljinu određivali samo jedan maksimum/minimum indeksa i parametara Sunčevog vjetra pokušali smo proširiti set podataka. Za svaku koroninu šupljinu biran je veći broj maksimuma/minimuma indeksa AE , ap i ΔDst i parametra Sunčevog vjetra B_sV na način opisan u poglavlju 3.2.. U tablici 4.8 prikazani su koeficijenti linearne korelacije R za taj slučaj (više izabranih vrhova indeksa i parametra Sunčevog vjetra povezano s jednim događajem na Suncu).

Tablica 4.8. Koeficijenti linearne korelacije, R između geomagnetskih indeksa (AE , ap i ΔDst) i parametra Sunčevog vjetra B_sV u verziji s više maksimuma/minimuma za jedan događaj.

	AE	ap	ΔDst
B_sV	0,62	0,71	-0,79

Uspoređujući tablicu 4.8 s tablicom 4.2 uočavamo da nismo dobili ništa značajno bolje rezultate, uglavnom se vrijednosti korelacija podudaraju. Kako bi to dalje poboljšali pokušali smo razmotriti promjene indeksa koje su uzrokovane dijelom y komponente električnog polja, B_sV (ili preciznije njenom promjenom). Ujedno smo s tim podacima istražili i valjanost *power law* fita. Slika 4.4 ilustrira način određivanja promjena za slučaj 24.5.2015. (DOY 144).



Slika 4.4. Primjer određivanja promjena dijela y komponente Sunčevog električnog polja, $B_s V$ i promjena geomagnetskih indeksa (označeno crvenom bojom na grafu) time uzrokovanih na slučaju koronine šupljine koja je 24.5.2015. (DOY 144) prešla preko centralnog meridijana na Suncu.

Međutim, razmatrajući koeficijente korelacije, ni s ovakvim podacima (tablica 4.9) nismo postigli nikakva značajna poboljšanja.

Tablica 4.9. Koeficijenti linearne korelacije, R između geomagnetskih indeksa (AE , ap i ΔDst) i parametra Sunčevog vjetra $B_s V$, pri čemu smo uzimali u obzir promjene tih veličina u verziji s više biranih maksimuma/minimuma za jedan događaj.

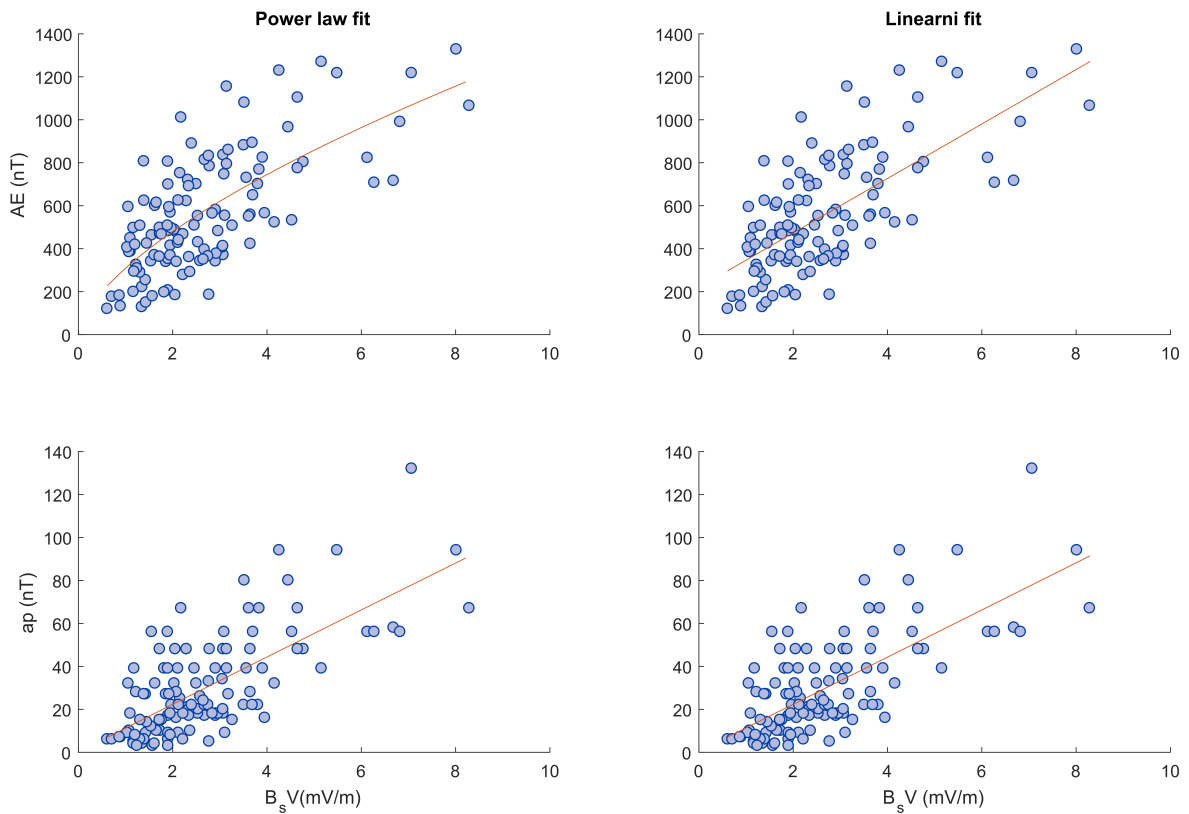
	AE	ap	ΔDst
$B_s V$	0,69	0,70	-0,78

Rezultati koeficijenata a i b (iz izraza 4.1.) i koeficijenta korelacije za *power law* fit između $B_s V-AE$ i $B_s V-ap$ prikazani su u tablici 4.10. Jedino je za te odnose proveden *power law* fit jer smo jedino za njih i očekivali potencijalno bolju korelaciju.

Tablica 4.10. Koeficijenti a i b iz izraza 4.1. te koeficijenti korelacije, R_{pow} za odnos $B_s V-AE$ i $B_s V-ap$. Za slučaj kad smo razmatrali više maksimuma indeksa AE i ap i više minimuma parametra $B_s V$ za jednu koroninu šupljinu, pri čemu smo uzimali u obzir promjene tih veličina.

	a	b	R_{pow}
$B_s V-AE$	$308,96 \pm 23,77$	$0,63 \pm 0,06$	0,70
$B_s V-ap$	$11,26 \pm 1,52$	$0,99 \pm 0,09$	0,70

Prema podacima (tablica 4.10) ni s *power law* fitom nismo postigli nikakva značajna poboljšanja što se tiče vrijednosti koeficijenta korelacije. Još se možemo osvrnuti na vrijednosti parametra b (iz izraza 4.1.) dan u tablici 4.10. Vrijednost tog koeficijenta za odnos B_sV - ap je vrlo blizu 1, što bi značilo da je linearna regresija u tom slučaju ipak najprimjerenija. U slučaju odnosa B_sV - AE koeficijent b je bliže vrijednosti 0,5 nego 1, što bi značilo da je *power law* regresija ipak primjerenija (slika 4.5).



Slika 4.5. Power law i linearni fit za B_sV - AE i B_sV - ap za slučaj kad smo razmatrali više maksimuma indeksa AE i ap i više minimuma parametra B_sV za jednu koroninu šupljinu pri čemu smo uzimali u obzir promjene tih veličina.

5. Diskusija

S obzirom na podatke u tablici 4.2 možemo zaključiti kako na dio y komponente električnog polja Sunčevog vjetra ($E_y = B_s V$) najviše reagira promjena Dst indeksa, ΔDst . Iz toga slijedi da Sunčev vjetar ima veliki utjecaj na prstenastu struju (i njezinu promjenu) čije magnetsko polje je suprotnog smjera od Zemljinog magnetskog polja. Ukupnu promjenu Dst indeksa u određenom razdoblju vremena možemo direktno povezati s ukupnom vrijednosti $B_s V$ u tom razdoblju, što je ujedno i razlog tako izraženoj korelaciji između ΔDst i $B_s V$. Primjer toga dan je u poglavlju 3.3. (Primjeri specifičnih slučajeva) kad smo razmatrali slučaj 23.1.2013. Na slici 3.5 dobro se uočava kako $B_s V$ ima kumulativni učinak na Dst indeks. Prema tome, možemo pisati

$$\frac{\Delta Dst}{\Delta t} = \sum E_y = \sum B_s V \quad (5.1.)$$

Prema ostalim podacima tablice 4.2 za slučaj kad smo razmatrali po jedan maksimum/minimum indeksa i parametara Sunčevog vjetra po koroninoj šupljini iznosimo sljedeće zaključke. AE indeks najviše reagira na ukupno električno polje, BV . Indeksi ap i Dst , kao i sama promjena Dst indeksa, ΔDst se mogu dobro objasniti utjecajem $B_s V$. Jer je površina CH slabo korelirana s Dst indeksom očekivano je da će i s promjenom tog indeksa biti također slaba. Prema Verbanac i sur. (2011) znamo da je vrijeme od kad prođe koronina šupljina preko centralnog meridijana do kad Dst postigne svoj minimum u prosjeku 3,5 dana. Prema Vršnak i sur. (2007) su to 4 dana. Prema tome teško bi bilo i očekivati jaku i izraženu vezu između dviju pojava koje su prostorno i vremenski na velikoj udaljenosti.

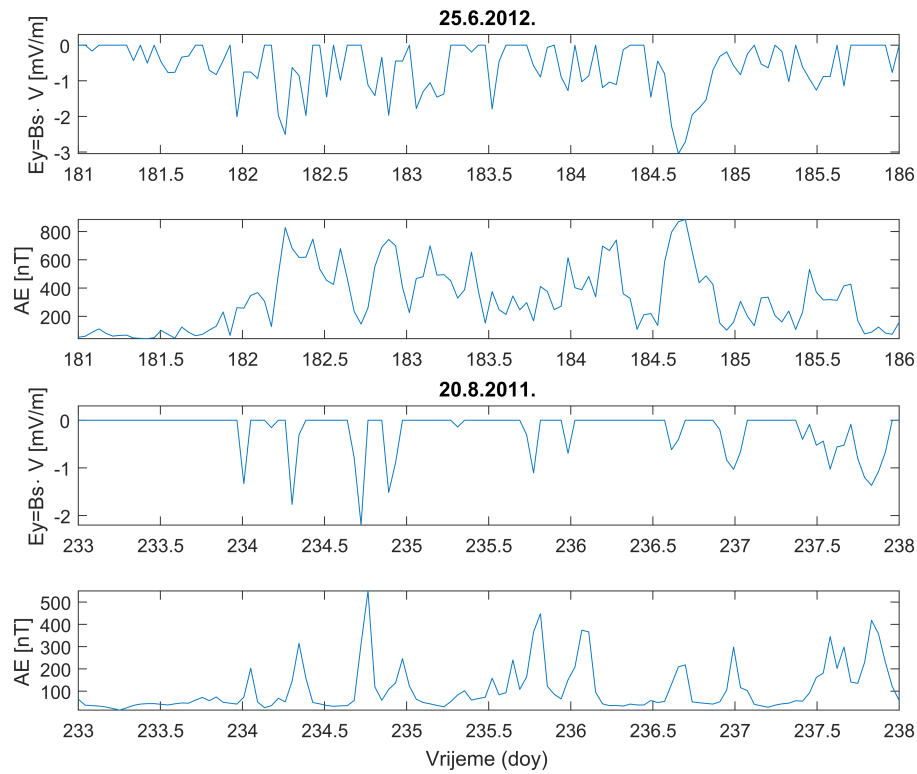
Rezultati u ovom radu, dani u tablici 4.2 uspoređivani su s rezultatima dobivenim u radovima Verbanac i sur. (2011) i Verbanac i sur. (2013). Vrijednosti se pretežito podudaraju s onima u radu Verbanac i sur. (2011). Zaključci o tome javlja li se slaba, umjerena ili izražena korelacija između određenih parametara Sunčevog vjetra i geomagnetskih indeksa su isti. Razlike se javljaju u slučaju odnosa $BV-\Delta Dst$, $B-\Delta Dst$ i $B-Dst$, za koje je u ovom radu dobivena umjerena korelacija dok je u radu Verbanac i sur. (2011) dobivena slaba korelacija. Također, u slučaju odnosa $V-Dst$ i $V-ap$ korelacija je slaba, dok je kod Verbanac i sur. (2011) umjerena. Jedan od mogućih uzroka razlike u korelacijama je različiti period i sama duljina odabranog perioda razmatranja. U radu Verbanac i sur. (2011) razmatrani period je interval od 200 dana u razdoblju slabije aktivnosti CME-a (DOY= 60 – 261 2006. godine), dok u našem slučaju, pojedini događaji koje razmatramo se nalaze razmješteni unutar razdoblja od 7 godina s pažljivo izbačenim utjecajima CME aktivnosti. U radu Verbanac i sur. (2013) nije pronađena nikakva korelacija između brzine Sunčevog vjetra i indeksa ap , Dst i AE . Za razliku od toga, prema rezultatima u tablici 4.2 postoji srednja do umjerena korelacija brzine i spomenutih indeksa. Međutim, kao što je spomenuto i u samom radu Verbanac

i sur. (2013), ako se razmatraju odvojeno samo događaji iz razdoblja u 2005. i 2006. godini, ne uključujući događaje koji su bili u vrijeme kada je heliosfera bila pod jačim utjecajem CME aktivnosti (1998, 2002, 2003 i 2004) dobije se srednja do umjerena korelacija za odnose $V-Ap$ ($R = 0,42$), $V-Dst$ ($R = -0,37$) i $V-AE$ ($R = 0,58$).

Općenito, korelacija između površine CH i parametara Sunčevog vjetra nam je jako bitna budući da nam ona do određene mjere može pomoći pri procjeni geomagnetske aktivnosti na temelju veličine koronine šupljine. Podjelom ukupnog vremena razmatranja na manja razdoblja razdvojili smo period minimuma i maksimuma aktivnosti 24. Sunčevog magnetskog ciklusa. Upravo to je razlog poboljšanju korelacije između magnetskog polja Sunčevog vjetra i površine CH . Treba uzeti u obzir da minimum i maksimum aktivnosti i dalje nisu u potpunosti strogo odvojeni, posebno zato jer se u 24. ciklusu javljaju dva maksimuma (prvi koji se javio 2011. godine i koji je lokalni maksimumi i drugi, ujedno i globalni maksimum koji se javio 2014.). Ovaj pokušaj nam je ipak dao mogućnost da naslutimo razlog tako slaboj korelaciji koju smo isprva dobili uzimajući u obzir podatke iz cijelog ciklusa.

Detaljno provjeravajući vrijednosti birane u slučaju razmatranja više potencijalnih maksimuma/minimuma indeksa i parametara Sunčevog vjetra uočeno je da se javljaju nekonzistentnosti među podacima. Među izabranim podacima javljaju se primjeri gdje jednake vrijednosti B_sV (ili njenih promjena) ne izazivaju jednaki odgovor kod primjerice AE indeksa (isto vrijedi i za ap i Dst indekse). Potencijalni uzrok tome je okolina pojedinog B_sV minimuma. Na slici 5.1 na oba grafa prikazana je promjena B_sV u vremenu. Pojedini minimumi na oba grafa imaju približno jednake vrijednosti, međutim promjene koje uzrokuju u geomagnetskim indeksima se razlikuju upravo zbog okoline pojedinog minimuma B_sV . Jer ne sudjeluje nužno samo jedan minimum B_sV -a u stvaranju posljedica. Kao što se vidi u slučaju koronine šupljine 25.6.2012., ostali minimumi koji se nalaze oko određenog B_sV minimuma kojeg razmatramo također doprinose stvaranju promjena kod geomagnetskih indeksa. Drugim riječima u takvim slučajevima teško je strogo razlučiti utjecaj samo jednog minimuma na geomagnetske indekse. Za razliku od slučaja za koroninu šupljinu 20.8.2011. gdje su ti minimumi relativno izolirani (odvojeni) jedni od drugih pa je njihov utjecaj na pojedini geomagnetski indeks „čišći”. Stoga, uzimanjem većeg broja maksimuma/minimuma indeksa i parametra Sunčevog vjetra B_sV za jedan događaj moguće je da na kraju unosimo dodatno raspršenje u podatke. Iz tog razloga računate korelacije ne ispadaju ništa bolje nego kad smo razmatrali samo po jedan maksimum/minimum indeksa i parametara Sunčevog vjetra za pojedinu koroninu šupljinu. Isto vrijedi kad smo s takvim podacima pokušali *power law* fit. Nismo dobili ništa bolju korelaciju. Međutim, s obzirom na izgled grafa (slika 4.5, odnos B_sV-AE) i s obzirom na vrijednosti koeficijenta b u tablici 4.10 ipak bi mogli zaključiti da je odnos B_sV-AE bolje opisan nelinearnom relacijom 4.1. gdje je koeficijent b približno jednak vrijednosti 0,5. Rezultati takve analize bi

se vjerojatno mogli poboljšati kad bi bilo moguće izdvojiti samo one „čiste” slučajeve. Odnosno one slučajeve gdje smo sigurni koji točno minimum $B_s V$ -a je uzrokovao točno koji i koliki maksimum (tj. minimum) geomagnetskog indeksa. Ovo je vrijedno dalje ispitati. Takvom dodatnom analizom preciznije bi opisali promjene koje se događaju u magnetosferi te bi ujedno mogli doprinjeti i boljem razumijevanju uzroka tih promjena.



Slika 5.1. Grafovi $B_s V$ parametra Sunčevog vjetra nastalog od koroninih šupljina koje su 25.6.2012. i 20.8.2011. prešle preko centralnog meridijana zajedno s odgovarajućim grafovima AE indeksa.

6. Zaključak

Ovaj rad je započet s ciljem da što bolje analiziramo odnos koroninih šupljina na Suncu i od njih nastalog Sunčevog vjetra (HSS i CIR) sa Zemljinim magnetskim poljem. Saznati kako različiti dijelovi Zemljinog magnetskog polja reagiraju na HSS, što bi u konačnici trebalo dovesti do boljih procjena i boljeg razumijevanja svemirskog vremena. S obzirom na dobivene podatke došli smo do zaključka da postoji veza između promjene Dst indeksa (ΔDst) i ukupnog djelovanja $B_s V$ (E_y), dana izrazom 5.1. (u poglavlju Diskusija). Upravo ta komponenta električnog polja (od razmatranih parametara Sunčevog vjetra) ima najveći utjecaj na ekvatorijalnu prstenastu struju, tj. na njezinu promjenu opisanu ΔDst . Ukupno električno polje Sunčevog vjetra, BV ima najveći utjecaj na polarne krajeve (opisane AE indeksom), dok $B_s V$ ima najveći utjecaj na umjereni i ekvatorijalni pojas (opisani ap i Dst indeksom). Brzina Sunčevog vjetra V najbolje je korelirana AE indeksom dok na magnetsko polje B najbolje reagira Dst indeks, tj. ekvatorijalna prstenasta struja. Prema našim podacima uočavamo da ne postoji korelacija između CH i Dst indeksa, kao ni između CH i ΔDst . To je i očekivano, CH je općenito, slabo do nikako korelirana sa svim geomagnetskim indeksima razmatranim u ovom radu. Prema tome, možemo očekivati da će procjena geomagnetske aktivnosti na temelju površina koroninih šupljina biti jako otežana i komplicirana. S druge strane korelacije parametara Sunčevog vjetra i geomagnetskih indeksa su umjerenе, pa skoro i jake, što nam govori da bi procjena geomagnetske aktivnosti na temelju poznavanja svojstava Sunčevog vjetra trebala biti izvediva. Što u konačnici i ima smisla jer je Sunčev vjetar taj koji direktno utječe na geomagnetsku aktivnost na Zemlji, dok koronine šupljine utječu indirektno upravo preko Sunčevog vjetra. Uspoređujući naše rezultate s rezultatima drugih radova (Verbanac i sur., 2011 i Verbanac i sur., 2013) pronašli smo slaganje. Pokazali smo da je odgovor magnetosfere različit na različitim geografskim širinama za isti parametar Sunčevog vjetra. Također, kao i u radu Verbanac i sur. (2011) pokazali smo da ukupno električno polje Sunčevog vjetra (ali i njegova južna komponenta $B_s V$) igraju ključnu ulogu u procesu prijenosa energije od Sunčevog vjetra na magnetosferu. Odstupanja sa spomenutim radovima se javljaju zbog različitih perioda, tj. intervala razmatranja i ponajviše zbog CME-ova čiji utjecaj se još uvijek može pronaći za određene događaje razmatrane u radu Verbanac i sur. (2013). Prilikom daljnjih razmatranja koroninih šupljina treba dodatnu pozornost obratiti na što veću kvalitetu podataka. Kako bi to ostvarili potrebno je što bolje isfiltrirati utjecaje ostalih magnetskih aktivnosti na Suncu (posebno CME-a) koji imaju veliki utjecaj na rezultate. Što je još jedan razlog zašto je procjena utjecaja HSS-a i CIR-a na magnetosferu tako zahtjevna. Također, s početkom novih misija istraživanja Sunca (primjerice Parker svemirska letjelica) pomoću novih, bolje opremljenih instrumenata, dodatno će poboljšati kvalitetu podataka, a time i omogućiti bolja saznanja o

aktivnostima na Suncu i posljedično o svemirskom vremenu.

Razlog zašto smo prvotno dobili slabu korelaciju između CH i B je bio u tome što smo zajedno razmatrali razdoblja minimalne i maksimalne aktivnosti Sunčevog ciklusa. Jednom kad smo njih razdvojili korelacije su postale izraženije. Prema tome, kako bi dodatno poboljšali rezultate analize koroninih šupljina, poželjno je istraživanja provoditi u različitim fazama Sunčevog magnetskog ciklusa. Na taj način bi mogli bolje razlučiti različite utjecaje svemirskog vremena na magnetosferu ovisno o fazi Sunčevog ciklusa, odnosno o razini Sunčeve aktivnosti.

Procjenjivanje utjecaja koroninih šupljina, tj. HSS-a i CIR-a na magnetosferu je od izuzetne važnosti zbog potencijalnih šteta koje te pojave mogu uzrokovati. Sateliti i ostali uređaji u orbiti Zemlje su pod stalnom opasnošću od učinka čestica sa Sunca i dolazećeg zračenja. Također, astronauti koji se nalaze u orbiti Zemlje ili čak i izvan zaštitnog magnetskog polja Zemlje su u velikoj opasnosti od čestica HSS-a. Procjena jakosti, te područja magnetosfere gdje dolazi do najizraženijih učinaka HSS je moguća, ali jako otežana prvenstveno zbog utjecaja drugih magnetskih pojava na Suncu koje predstavljaju šum u podacima. Zbog toga je ovakva analiza utjecaja HSS na magnetosferu od velike važnosti, iako je još uvijek potrebna daljnja, opsežnija analiza s kvalitetnijim podacima.

Literatura

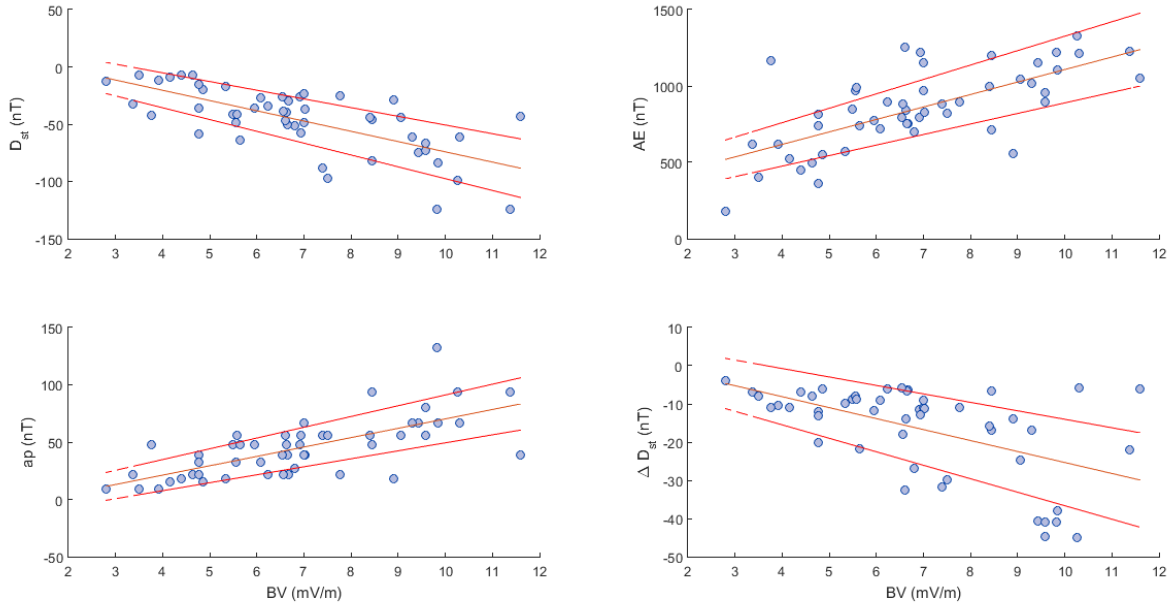
- Bilenko, I. A. i K. S. Tavastsherna (2016). Coronal Hole and Solar Global Magnetic Field Evolution in 1976 – 2012. *Solar Physics* 291(8), 2329–2352.
- Brun, A. S. i M. K. Browning (2017). Magnetism, dynamo action and the solar-stellar connection. *Living Reviews in Solar Physics* 14(1), 4.
- Cranmer, S. (2002). Coronal holes and the solar wind. *COSPAR Colloquia Series* (January), 1–10.
- Cranmer, S. R. (2009). Coronal Holes Imprint / Terms of Use. *Living Reviews in Solar Physics* 6, 66.
- Hegde, M., K. M. Hiremath, V. H. Doddamani, i S. R. Gurumath (2015). Solar Wind Associated with Near Equatorial Coronal Hole. *Journal of Astrophysics and Astronomy* 36(3), 355–374.
- Hofmeister, S. J., A. Veronig, M. Temmer, S. Vennerstrom, B. Heber, i B. Vršnak (2018). The Dependence of the Peak Velocity of High-Speed Solar Wind Streams as Measured in the Ecliptic by ACE and the STEREO satellites on the Area and Co-latitude of Their Solar Source Coronal Holes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*.
- Ikhsanov, R. N. i K. S. Tavastsherna (2015). Latitude – Temporal Evolution of Coronal Holes in Cycles 21 – 23. *55(7)*, 877–883.
- Krieger, A. S. i A. F. Timothy (1973). A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream. *Solar Physics* 29(2), 505–525.
- McFadden, L., P. Weissman, i T. Johnson (2006). *Encyclopedia of the Solar System* (second ed.). Academic Press.
- Mikhailutsa, V. P. (1995). The dipole-quadrupole cycle of the background solar magnetic field. *Solar Physics* 159(1), 29–44.
- Nolte, J. T., A. S. Krieger, i A. F. Timothy (1976). Coronal holes as sources of solar wind. *Solar Physics* 46, 303–322.
- Parker, E. N. (1958). Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields. *Astrophysical Journal* 128, 664–676.
- Richardson, I. G. (2018). Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere. *Living Reviews in Solar Physics* 15(1).

- Richardson, I. G. i H. V. Cane (2010, jun). Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996 - 2009): Catalog and Summary of Properties. *Solar Physics* 264, 189–237.
- Schwenn, R. (2006). Space Weather : The Solar Perspective Imprint / Terms of Use. *Living Reviews in Solar Physics* 3(2).
- Thompson, M. J. (2004, 08). Helioseismology and the Sun's interior. *Astronomy & Geophysics* 45(4), 4.21–4.25.
- Verbanac, G., B. Vršnak, S. Živković, T. Hojsak, A. M. Veronig, i M. Temmer (2011). Solar wind high-speed streams and related geomagnetic activity in the declining phase of solar cycle 23. *Astronomy & Astrophysics* 533, 231–232.
- Verbanac, G., S. Živković, B. Vršnak, M. Bandić, i T. Hojsak (2013). Comparison of geoeffectiveness of coronal mass ejections and corotating interaction regions. *Astronomy & Astrophysics* 558, A85.
- Vršnak, B., M. Temmer, i A. M. Veronig (2007). Coronal holes and solar wind high-speed streams: I. Forecasting the solar wind parameters. *Solar Physics* 240(2), 315–330.
- Vujnović, V. (2016). *Astronomija 1*. Zvezdarnica Zagreb-Zagrebački astronomski savez.

Dodatci

A Grafovi korelacija

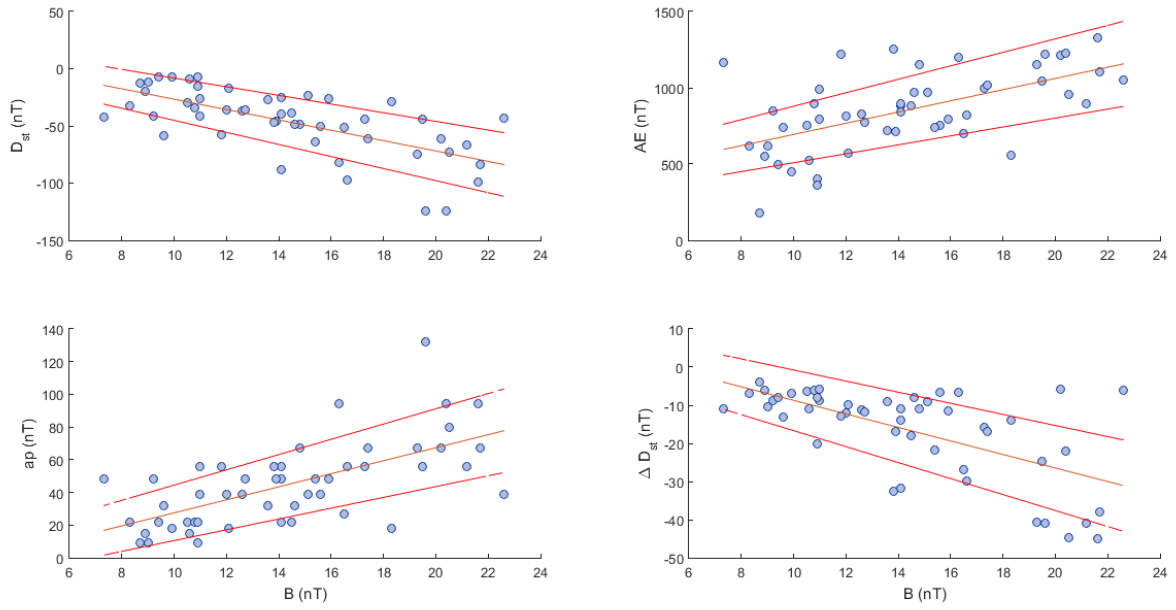
U ovom dodatku priloženi su grafovi korelacija parametara Sunčevog vjetra s geomagnetskim indeksima za slučaj kad smo razmatrali jedan maksimum/minimum geomagnetskog indeksa i parametara Sunčevog vjetra po koroninoj šupljini. Također, priložene su tablice s odgovarajućim koeficijentima linearne regresije ($y = ax + b$). Odgovarajući koeficijenti korelacije dani su u poglavlju Rezultati u tablici 4.2.



Slika A1. Korelacije $BV-Dst$, $BV-AE$, $BV-ap$ i $BV-\Delta Dst$ zajedno s dobivenim pravcem linearne regresije i označenim intervalom pouzdanosti (68%).

Tablica A1. Koeficijenti a i b linearne regresije ($y = ax + b$) električnog polja (BV) i geomagnetskih indeksa.

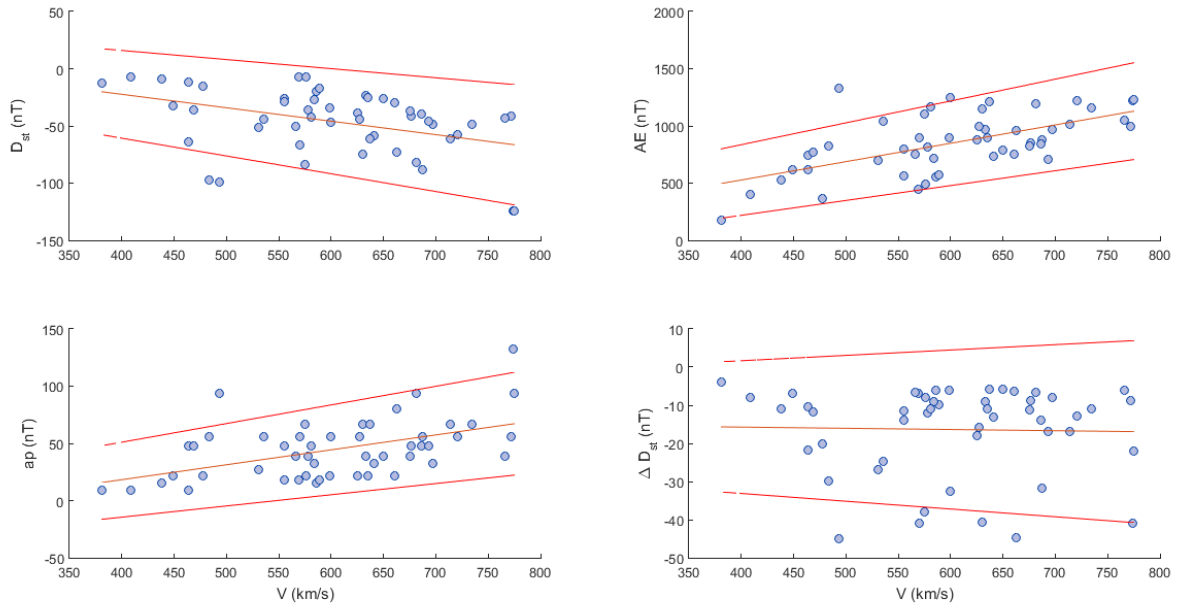
	a	b
$BV-Dst$	$-8,95 \pm 1,35$	$15,34 \pm 9,76$
$BV-AE$	$81,66 \pm 12,62$	$290,78 \pm 91,00$
$BV-ap$	$8,18 \pm 1,21$	$-11,55 \pm 8,70$
$BV-\Delta Dst$	$-2,87 \pm 0,65$	$3,38 \pm 4,72$



Slika A2. Korelacije B - Dst , B - AE , B - ap i B - ΔDst zajedno s dobivenim pravcem linearne regresije i označenim intervalom pouzdanosti (68%).

Tablica A2. Koeficijenti a i b linearne regresije ($y = ax + b$) magnetskog polja (B) i geomagnetskih indeksa.

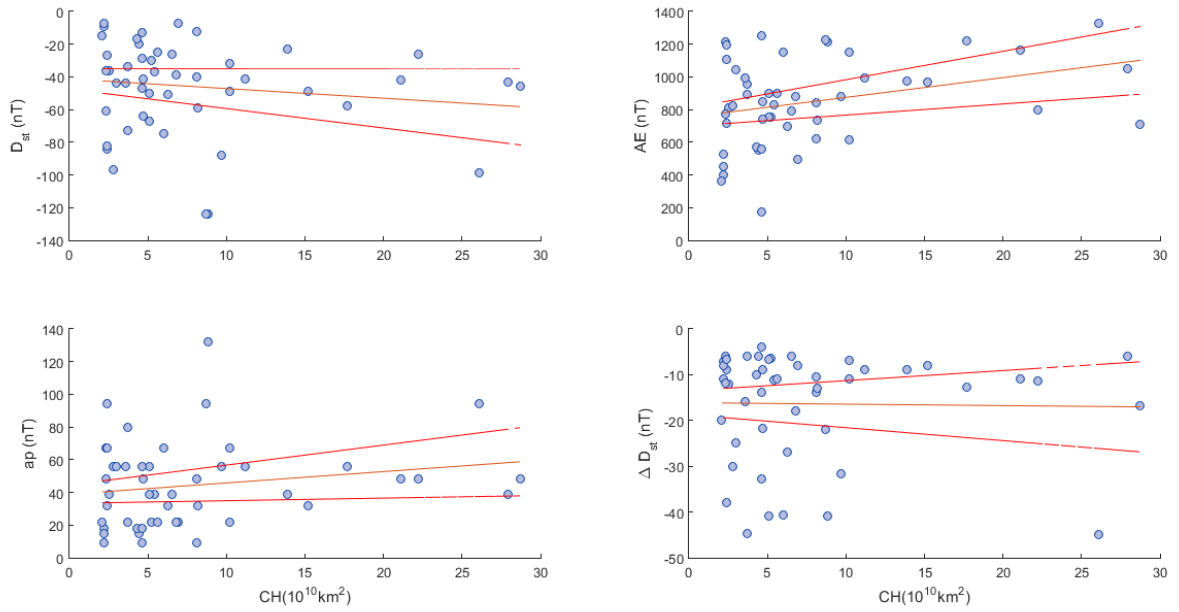
	a	b
B - Dst	$-4,53 \pm 0,74$	$18,60 \pm 11,00$
B - AE	$36,71 \pm 7,40$	$326,92 \pm 110,21$
B - ap	$3,97 \pm 0,68$	$-12,36 \pm 10,11$
B - ΔDst	$-1,77 \pm 0,32$	$9,03 \pm 4,73$



Slika A3. Korelacije V - Dst , V - AE , V - ap i V - ΔDst zajedno s dobivenim pravcem linearne regresije i označenim intervalom pouzdanosti (68%).

Tablica A3. Koeficijenti a i b linearne regresije ($y = ax + b$) brzine (V) i geomagnetskih indeksa.

	a	b
V - Dst	$-0,12 \pm 0,04$	$24,62 \pm 23,05$
V - AE	$1,60 \pm 0,30$	$-114,8 \pm 185,57$
V - ap	$0,13 \pm 0,03$	$-33,90 \pm 19,71$
V - ΔDst	$-0,003 \pm 0,017$	$-14,47 \pm 10,46$



Slika A4. Podaci $CH-Dst$, $CH-AE$, $CH-ap$ i $CH-\Delta Dst$ zajedno s dobivenim pravcem linearne regresije i označenim intervalom pouzdanosti (68%).

Tablica A4. Koeficijenti a i b linearne regresije ($y = ax + b$) površine koronine šupljine (CH) i geomagnetskih indeksa.

	a	b
$CH-Dst$	$-0,59 \pm 0,60$	$-41,24 \pm 6,23$
$CH-AE$	$12,10 \pm 5,27$	$753,65 \pm 55,01$
$CH-ap$	$0,69 \pm 0,53$	$38,88 \pm 5,54$
$CH-\Delta Dst$	$-0,03 \pm 0,25$	$-16,12 \pm 2,61$

B Površine koroninih šupljina

Set podataka korišten u radu Hofmeister i sur. (2018) čiji je dio o površinama koroninih šupljina korišten i u ovom radu. U našoj analizi izbačen je događaj 20.3.2017., dodatno, uzeta je u obzir koronina šupljina uočena na Sunčevom disku 26.2.2017.

Date	Satellite	$\varphi_{\text{Satellite}}$ [°]	A_{CH} [10^{10} km ²]	φ_{CH} [°]	v_p [kms ⁻¹]	Kp
2010-08-23	SDO	6	8.0	30	686	4.7
2010-09-19	SDO	7	6.5	25	627	4.0
2010-10-21	SDO	5	4.7	11	659	5.0
2011-02-28	SDO	-7	9.7	23	669	5.3
2011-04-16	SDO	-5	22.2	-58	536	5.0
2011-06-20	SDO	1	5.2	-16	657	4.0
2011-07-28	SDO	5	8.1	42	679	5.0
2011-08-20	SDO	6	2.2	10	561	3.3
2011-09-09	SDO	7	6.0	5	646	5.7
2012-05-28	SDO	-1	8.1	45	449	2.7
2012-06-03	SDO	0	10.2	13	700	5.7
2012-06-25	SDO	2	5.4	47	491	2.7
2012-08-22	SDO	6	4.4	3	664	3.7
2012-09-18	SDO	7	2.5	4	576	4.7
2013-01-23	SDO	-5	6.3	-44	525	4.3
2013-05-29	SDO	0	8.8	1	769	7.0
2013-06-20	SDO	1	15.2	36	697	4.0
2013-07-17	SDO	4	13.9	30	632	4.7
2013-07-31	SDO	5	5.1	34	541	4.7
2013-08-14	SDO	6	11.2	30	772	5.3
2013-09-11	SDO	7	6.9	29	566	3.7
2013-10-17	SDO	5	4.6	37	379	2.3
2013-12-31	SDO	-2	6.8	6	617	4.3
2014-01-18	SDO	-4	4.3	31	581	3.3
2014-02-24	SDO	-7	2.8	-13	476	5.3
2014-05-08	SDO	-3	10.2	-50	444	3.7
2014-07-24	SDO	5	2.2	-3	438	3.0
2014-11-13	SDO	2	8.2	33	637	4.3
2014-12-04	SDO	0	27.9	-52	740	4.7
2015-01-02	SDO	-3	26.1	-56	517	5.3
2015-01-30	SDO	-5	28.7	-57	705	5.0
2015-02-11	SDO	-6	4.7	0	462	5.0
2015-04-17	SDO	-5	2.4	-19	571	4.3
2015-05-15	SDO	-2	3.0	-11	537	5.3
2015-05-24	SDO	-1	2.2	-9	421	2.3
2015-06-05	SDO	0	3.7	-25	647	6.0
2015-06-10	SDO	0	3.7	-4	587	4.3
2015-07-02	SDO	3	5.1	-25	552	5.3
2015-07-07	SDO	3	2.3	0	627	4.7
2015-08-12	SDO	6	2.4	0	577	6.0
2015-10-05	SDO	6	8.7	1	772	7.3
2015-10-10	SDO	6	21.1	42	577	5.0

2015-10-17	SDO	5	2.1	8	461	3.7
2015-11-07	SDO	3	17.7	31	707	5.3
2015-11-15	SDO	2	2.3	14	466	5.0
2015-12-12	SDO	0	4.6	14	603	5.3
2016-05-07	SDO	-3	2.4	-8	672	6.3
2016-06-02	SDO	0	3.6	0	632	5.3
2016-12-28	SDO	-2	4.6	-4	554	3.7
2017-01-24	SDO	-5	5.6	-8	634	4.3
2017-02-20	SDO	-7	6.5	-12	633	4.7
2017-03-20	SDO	-7	14.5	-18	672	5.3

C Programi i podatci priloženi na CD-u

Popis MATLAB skripti i podataka korištenih u analizi podataka. Skripte zajedno s podacima nalaze se na CD-u.

1. indeksi_B.m
2. indeksi_BsV.m
3. indeksi_BV.m
4. indeksi_V.m
 - Skripte koje crtaju linearni odnos parametara Sunčevog vjetra (B , B_sV , BV i V) s geomagnetskim indeksima (Dst , AE , ap i ΔDst) i računaju koeficijent korelacije i parametre ($y = Ax + B$) linearnog fita.
5. indeksi_A_CH_Hofmeister.m
 - Računa korelacije podataka površine (A_{CH}) iz rada Hofmeister i sur. (2018) s geomagnetskim indeksima (Dst , AE , ap i ΔDst).
6. ACH_Hofmeister_param.m
 - Računa korelacije podataka površine (A_{CH}) iz rada Hofmeister i sur. (2018) s parametrima Sunčevog vjetra (B , B_sV , BV i V).
7. power_law_indeksi_BsV.m
8. power_law_indeksi_BV.m
 - Računa power law fit geomagnetskih indeksa (Dst , AE i ap) s parametrima Sunčevog vjetra (B_sV i BV).
9. power_law_indeksi_BsV_vise_pikova_s_razlikama.m
 - Power law fit između geomagnetskih indeksa (AE i ap) i parametra Sunčevog vjetra B_sV , za slučaj kad smo gledali promjene geomagnetskih indeksa zbog promjena vrijednosti E_y , a ne samo kao posljedicu uočenog maksimuma E_y .
10. indeksi_BsV_vise_pikova.m
 - Crta korelaciju između geomagnetskih indeksa (ΔDst , AE i ap) i parametra Sunčevog vjetra B_sV za slučaj kad smo gledali više maksimuma.
11. indeksi_BsV_vise_pikova_razlike.m

- Crta korelaciju između geomagnetskih indeksa (ΔDst , AE i ap) i parametra Sunčevog vjetra B_sV za slučaj kad smo gledali promjene geomagnetskih indeksa kao posljedicu promjene vrijednosti E_y , a ne samo kao posljedicu uočenog maksimuma E_y .
12. indeksi_BsV_kombinacija.m
13. indeski_BsV_vise_pikova_razlike_komb.m
- Usporedba podataka za slučaj samo jednog izabranog maksimuma i slučaja kada smo gledali više maksimuma (uzimajući u obzir promjenu geomagnetskih indeksa zbog promjene vrijednosti E_y).
14. crtanje_podataka.m
- Crta grafove promjene geomagnetskih indeksa (Dst , AE i ap) i parametara Sunčevog vjetra (B , B_z , BV , V , n i E_y) u vremenu.
15. crtanje_podataka2.m
- Crta grafove promjene parametra E_y i geomagnetskih indeksa ΔDst , AE i ap u vremenu i pomoću funkcije `ginput` traži vrijednost odabranog maksimuma.
16. crtanje_podataka3.m
- Dodatak na skriptu `crtanje_podataka2.m`, rezultat je Slika 5.1.
17. crtanje_AE_BsV_BV_jedanpik.m
- Rezultat je Slika 4.2.
18. crtanje_indeksi_BsV_vise_pikova_s_razlikama.m
- Rezultat je Slika 4.5.
19. Tablica s peakovima.xlsx
- Tablica s popisom datuma prelaska koronine šupljine preko centralnog meridijana, zajedno s vrijednostima geomagnetskih indeksa (AE , ap , Dst i ΔDst) i parametara Sunčevog vjetra (B , V , E_y , BV) za slučaja s jednim biranim maksimumom.
20. Tablica s vise peakova.xlsx

- Tablica s popisom datuma prelaska koronine šupljine preko centralnog meridijana, zajedno s vrijednostima geomagnetskih indeksa (AE , ap i ΔDst) i parametra Sunčevog vjetra (E_y) za slučaj s više biranih maksimuma i kada su gledane promjene vrijednosti E_y i promjene geomagnetskih indeksa (AE i ap) uzrokovanih time.