

# Određivanje parametara modela geomagnetske aktivnosti primjenom nelinearne metode najmanjih kvadrata

---

Ćorković, Martina

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:217:856685>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-11**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Martina Ćorković

ODREĐIVANJE PARAMETARA MODELA  
GEOMAGNETSKE AKTIVNOSTI  
PRIMJENOM NELINEARNE METODE  
NAJMANJIH KVADRATA

Diplomski rad

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA  
SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGRAFIJA

Martina Čorković

Diplomski rad

**Određivanje parametara modela geomagnetske  
aktivnosti primjenom nelinearne metode  
najmanjih kvadrata**

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

Zagreb, 2023.



## Sažetak

U ovom radu ispitujemo uspješnost O'Brien-McPherronovog modela za prognozu geomagnetskih oluja na temelju poremećaja *Dst* indeksa za geomagnetske oluje uzrokovane koroninim izbačajima mase u razdoblju od 1996. do 2020. godine. Koronini izbačaji mase su naj snažniji izbačaji plazme sa Sunca koji mogu doći do Zemlje i uzrokovati promjene magnetskog polja unutar magnetosfere koje se mogu detektirati magnetogramima na površini Zemlje. Također, nelinearnom metodom najmanjih kvadrata tražimo nove vrijednosti parametara tog modela  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  s obzirom na četiri razine solarne aktivnosti definirane preko broja Sunčevih pjega. Isti postupak primjenjujemo i za O'Brien-McPherronov model koji uključuje Svalgaardovu popravku za utjecaj električnog polja međuplanetarnog magnetskog polja na magnetosferu s obzirom na nagib dipola. Rezultati su pokazali da O'Brien-McPherronov model ne može u potpunosti prognozirati magnitudo maksimuma i minimuma *Dst* indeksa te da su odstupanja najveća za nisku i visoku razinu aktivnosti. Pokazali smo da je parametar  $\alpha$  umjereno linearno koreliran s brojem Sunčevih pjega, a  $V_q$  slabo, dok  $b$  ne ovisi o razini aktivnosti. Konačno, pokazali smo da Svalgaardova popravka ne unosi značajno poboljšanje za analizu pojedinačnih geomagnetskih oluja.

Ključne riječi: *Dst* indeks, razina solarne aktivnosti, O'Brien-McPherronov model, parametri modela

# Parameter estimation of the geomagnetic activity model by non-linear least squares

## Abstract

In this study, we investigate the effectiveness of the O'Brien-McPherron model for forecasting geomagnetic storms based on disturbances in the *Dst* index for geomagnetic storms caused by coronal mass ejections from 1996 to 2020. Coronal mass ejections are the most powerful plasma ejections from the Sun that can reach Earth and cause changes in the magnetic field within the magnetosphere, which can be detected by magnetograms on the Earth's surface. Additionally, we seek new values for the parameters of this model  $\alpha$ ,  $b$  and  $V_q$  based on four levels of solar activity, defined by the number of sunspots, using nonlinear least squares. We apply the same procedure to the O'Brien-McPherron model which includes Svalgaard's correction. Svalgaard's correction describes the influence of the interplanetary magnetic field's electric field on the magnetosphere with respect to the dipole tilt. The results have shown that the O'Brien-McPherron model cannot fully predict the magnitudes of the maximum and the minimum of the *Dst* index. The deviations in predicted magnitudes are greatest for low and high activity levels. We have demonstrated that the parameter  $\alpha$  is moderately linearly correlated with the number of sunspots, while  $V_q$  is only weakly correlated. Parameter  $b$  does not depend on the activity level. Finally, we have shown that Svalgaard's correction does not significantly improve the analysis of individual geomagnetic storms.

Keywords: *Dst* index, solar activity level, O'Brien-McPherron model, model parameters

# Sadržaj

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2. Teorijska pozadina</b>	<b>2</b>
2.1. Struktura Sunca	2
2.2. Magnetsko polje Sunca	3
2.3. Magnetsko polje Zemlje	5
2.4. Sunčeva aktivnost	8
2.5. Geomagnetski indeksi	10
<b>3. Metode</b>	<b>13</b>
3.1. Modeli geomagnetske aktivnosti	13
3.1.1. Burtonova jednadžba	13
3.1.2. O'Brien-McPherronov model	14
3.1.3. O'Brien-McPherronov model sa Svalgaardovom popravkom	15
3.2. Nelinearna metoda najmanjih kvadrata	16
3.2.1. Metoda najmanjih kvadrata	16
3.2.2. Levenberg-Marquardtov algoritam	17
3.2.3. Implementacija Levenberg-Marquardtovog algoritma u jeziku Python	18
3.3. Eulerova metoda unaprijed	19
<b>4. Podaci</b>	<b>20</b>
<b>5. Rezultati i diskusija</b>	<b>22</b>
5.1. O'Brien-McPherronov model bez Svalgaardove popravke	22
5.1.1. Konstantni iznosi parametara modela	22
5.1.2. Optimalni iznosi parametara modela	25
5.2. O'Brien-McPherronov model sa Svalgaardovom popravkom	32
5.2.1. Konstantni iznosi parametara modela	32
5.2.2. Optimalni iznosi parametara modela	35
<b>6. Zaključak</b>	<b>37</b>

Literatura	39
Dodatci	41
A Popis događaja	42
B Rezultati optimizacije O'Brien-McPherronovog modela	44
C Rezultati optimizacije O'Brien-McPherronovog modela sa Svalgaardovom popravkom	46
D Programi, podaci i rezultati priloženi na CD-u	48



# 1. Uvod

Sunce je dominantni izvor energije u solarnom sustavu, a njegova magnetska aktivnost koja slijedi 11-godišnji ciklus igra ključnu ulogu u oblikovanju međuplanetarnog prostora. Na turbulentnoj površini Sunca mogu se uočiti brojne eksplozivne pojave, poput Sunčevih pjega, Sunčevog vjetra, baklji i koroninih izbačaja mase, koje izbacuju ogromne količine solarne plazme i visokoenergetskih čestica iz unutrašnjosti Sunca u svemir. Sve takve pojave čine tzv. solarnu aktivnost koja značajno utječe na oblik i sastav Zemljine magnetosfere i ionosfere. Zemljino magnetsko polje je nevidljivi štit koji se proteže i na vrlo velikim udaljenostima od površine planeta, a brani Zemlju od prodiranja štetnih solarnih čestica tako što ih odbija u drugom smjeru ili zarobljava u nekom od strujnih sustava magnetosfere. Za vrijeme povećane solarne aktivnosti do Zemlje često dolaze brzi i intenzivni izbačaji plazme koji uzrokuju deformacije vanjskog geomagnetskog polja ili tzv. geomagnetske oluje. Koronini izbačaji mase, najsnažniji i najeksplozivniji događaji na Suncu, posebno su zanimljivi za proučavanje jer mogu izazvati geomagnetske superoluje koje mogu učiniti veliku štetu na satelitima, GPS sustavima, naponskim mrežama i ostalim tehnološkim sustavima.

U ovom radu želimo ispitati mogućnosti prognoze intenziteta geomagnetskih oluja koje su posljedica koroninih izbačaja mase. Dat ćemo pregled dva jednostavna empirijska modela koji prate nastanak geomagnetskih oluja koristeći *Dst* indeks koji mjeri odstupanja horizontalne komponente geomagnetskog polja na umjerenim geografskim širinama. Također, pokazat ćemo kako koji parametar modela utječe na prognozu pojedine faze geomagnetske oluje te provjeriti ovisnost optimalnih iznosa parametara o razini solarne aktivnosti, tj. o broju Sunčevih pjega.

## 2. Teorijska pozadina

### 2.1. Struktura Sunca

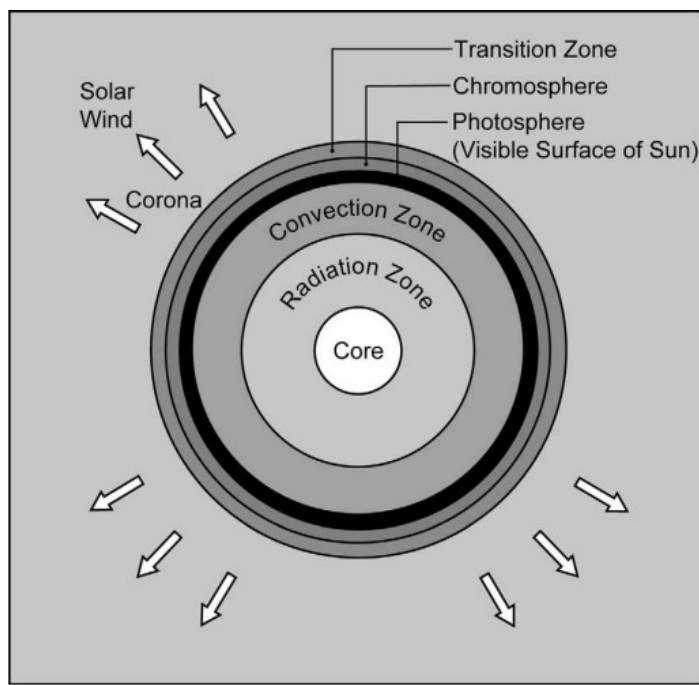
Sunce je Zemlji najbliža zvijezda, klasificirana kao žuti patuljak i stara 4,5 milijardi godina, te najveći izvor energije koji omogućava postojanje života. Također je i dominantno tijelo Sunčeva sustava jer sadrži više od 99% njegove ukupne mase. Polumjer Sunca,  $R_{\odot}$  iznosi 695 500 km ili otprilike 109 Zemljinih polumjera, a masa mu je  $1,99 \cdot 10^{30}$  kg. Proučavanjem apsorpcijskih vrpca u solarnom spektru, zaključeno je da su dva najzastupljenija elementa na Suncu vodik (72%) i helij (26%), a zatim slijede kisik, ugljik i dušik.

Unutrašnjost Sunca dijelimo s obzirom na način prijenosa energije od središta prema površini na jezgru, zonu zračenja te zonu miješanja (slika 2.1). U jezgri polumjera  $0,25R_{\odot}$ , gdje su temperatura  $1,57 \times 10^7$  K i tlak  $2,34 \times 10^{16}$  Pa, odvijaju se termonuklearni procesi u kojima se po četiri jezgre vodika spajaju u jednu jezgru helija, a ostatak mase se pretvara u energiju i oslobađa u obliku  $\gamma$ -zračenja. Ovakav oblik nuklearne fuzije nazivamo proton-proton lancem i tipičan je za zvijezde čija je masa manja ili jednaka Sunčevoj. Kako se fotoni gibaju kroz gustu i stabilno stratificiranu zonu zračenja, tako se sudaraju, apsorbiraju i reemitiraju te gube energiju. Zbog toga im treba oko 170 000 godina da dođu do površine Sunca. Na udaljenosti od otprilike  $0,72R_{\odot}$  počinje zona miješanja u kojoj se energija prenosi puno brže turbulentnom konvekcijom. Ovaj je sloj vrlo nestabilan: paketi plina na dnu se zagrijavaju i dižu, a zatim se hlade emitirajući toplinu na površini te se spuštaju i tako u krug.

Prvi vidljivi sloj na Suncu je fotosfera, debljine 500 km, pa nju uzimamo kao površinu Sunca. Međutim, ta je površina također plinovita, a ne čvrsta. Zbog toga Sunce pokazuje diferencijalnu rotaciju, što znači da ekvator izvrši jednu punu rotaciju brže (25 dana) nego polovi (36 dana). Fotosfera apsorbira gotovu svu energiju koja konvekcijom dolazi do nje i zrači u svemir kao crno tijelo temperature 5778 K. Zbog konvekcijskih ćelija koje iz dubine dopiru do površine Sunca ima zrnati izgled. Uz granule i supergranule, u fotosferi uočavamo i tamna područja povećane magnetske aktivnosti čiji se broj i područje formiranja ponavljaju s višegodišnjim periodom, a zovemo ih Sunčevim pjegama (eng. *sunspots*).

Iznad površine se prostire Sunčeva atmosfera koju s obzirom na gustoću i temperaturu dijelimo na kromosferu, prijelazno područje te koronu. Kromosfera je debela do 3000 km, a karakteriziraju je pad gustoće, odnosno rast temperature s visinom. Intenzitet svijetlosti iz kromosfere je vrlo slab zbog male gustoće plazme pa se ovaj sloj najbolje vidi za vrijeme potpune pomrčine Sunca i tada ima crvenu boju zbog dominantne  $H\alpha$  spektralne linije vodika. Slijedi tanko prijelazno područje, debljine oko 200 km, u kojem temperatura

još brže raste s visinom i dostiže 500 000 K na vrhu. Vanjsku atmosferu Sunca zovemo koronom. U njoj se temperature kreću između 1 i 6 milijuna K, a za vrijeme eruptivnih procesa mogu narasti i do 10 milijuna K. Korona je golim okom vidljiva tijekom pomrčine Sunca, a kontinuirano se može promatrati posebnim teleskopima, koronagrafima, koji diskom blokiraju direktnu Sunčevu svjetlost iz fotosfere. Dugo se vremena nije znalo zašto je Sunčeva atmosfera toplija od njegove površine jer termodinamika to ne može opisati, ali danas se vjeruje da zagrijavanje korone uzrokuju širenje zvučnih i magnetohidrodinamičkih valova iz Sunčeve unutrašnjosti te magnetska rekonekcija. Sunčevu plazmu koja iz korone kontinuirano odlazi u svemir nazivamo Sunčev vjetar (eng. *solar wind*).



Slika 2.1. Struktura Sunca. Unutrašnjost Sunca dijelimo na jezgru (eng. *core*), zonu zračenja (eng. *radiation zone*) i zonu miješanja (eng. *convection zone*). Fotosfera (eng. *photosphere*) je prvi vidljivi sloj i zato ju uzimamo kao površinu Sunca. Atmosferu Sunca dijelimo na kromosferu (eng. *chromosphere*), prijelazno područje (eng. *transition zone*) i koronu (eng. *corona*). Slika je preuzeta iz Moldwin (2008).

## 2.2. Magnetsko polje Sunca

Nastanak i postojanje Sunčevog magnetskog polja i danas su predmeti istraživanja. S jedne strane imamo teoriju koja kaže da je današnje magnetsko polje Sunca ostatak magnetskog polja međuzvjezdanog oblaka iz kojeg se Sunce razvilo. S druge strane znamo da se magnetsko polje drastično i periodično mijenja s godinama, što povlači tvrdnju da se ono kontinuirano stvara u unutrašnjosti Sunca u procesu samoodrživog solarnog dinama koji

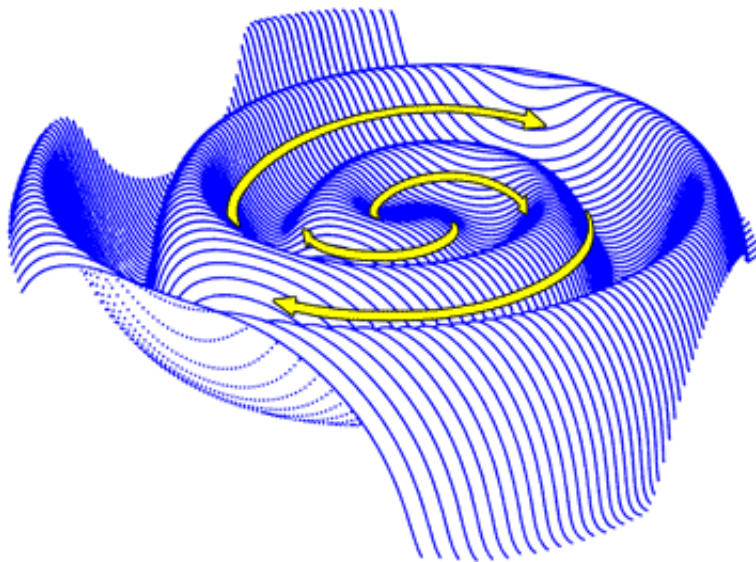
kinetičku energiju konvekcije pretvara u magnetsku. Uspješna teorija mora moći objasniti sljedeće pojave:

- 11-godišnji ciklus broja Sunčevih pjega: Na početku ciklusa je broj pjega minimalan te raste tijekom narednih 3 do 5 godina i doživljava maksimum, a zatim pada tijekom narednih 6 do 8 godina do ponovnog minimuma i kraja ciklusa. Ciklus je prvi opisao Schwabe (1843).
- Spörerov zakon ili tzv. leptirov dijagram koji prikazuje mjesta nastanka Sunčevih pjega: Mjesta nastanka Sunčevih pjega nisu nasumična, već su koncentrirana između  $40^{\circ}\text{N}$  i  $40^{\circ}\text{S}$ . Na početku ciklusa pjege nastaju na umjerenim širinama obiju hemisfera, a zatim se spuštaju prema ekvatoru. Ovakvo ponašanje pjega prvi je zamijetio Carrington (1863), a prvi je dijagram napravio Maunder (1904).
- Haleov zakon: Sunčeve pjege dolaze u paru, a polaritet svih vodećih pjega na jednoj hemisferi je jednak i suprotan onom vodećih pjega na drugoj hemisferi. Uz to, polaritet se obrće iz ciklusa u ciklus. Magnetsku prirodu Sunčevih pjega otkrio je Hale (1908).
- Joyev zakon: Vodeća Sunčeva pjege nalazi se bliže ekvatoru od prateće pjege. Razlika je to veća, što se pjege nalaze na većim heliografskim širinama. Ovu su pojavu prvi opisali Hale et al. (1919).
- 22-godišnji magnetski ciklus i obrtaje magnetskih polova: Magnetski polovi na Suncu zamijene mjesta svakih 11 godina, što znači da im treba 22 godine da se vrate na polazno mjesto. Puni magnetski ciklus definirali su Hale i Nicholson (1925).

Magnetsko polje općenito nastaje zbog postojanja električnih struja. U unutrašnjosti te na površini Sunca imamo električne struje zbog gibanja vrućeg ioniziranog plina. Silnice magnetskog polja zamišljamo kao neprekidne elastične petlje koje se mogu deformirati, rastezati i zakretati, a to se postiže različitim načinima gibanja fluida. Na početku ciklusa je magnetsko polje Sunca relativno jednostavno i slično dipolnom polju sa silnicama koje izviru iz jedne hemisfere i poniru u drugu, ali diferencijalna rotacija Sunca vuče i zavrće silnice u sve jače toroidno polje (tzv.  $\Omega$ -efekt). Nakon solarnog maksimuma, spiralna gibanja plazme, koja su posljedica djelovanja Coriolisove sile na konvektivne ćelije u zoni miješanja, ispravljaju toroidne silnice u novo dipolno polje suprotnog polariteta od početnog polja (tzv.  $\alpha$ -efekt). Ovo je pojednostavljeni princip alfa-omega solarnog dinama koji uzrokuje obrtanje magnetskih polova svakih 11 godina. Za velike razlike u amplitudi broja Sunčevih pjega između uzastopnih ciklusa odgovoran je vrlo promjenjiv

meridionalni tok, tj. sporo strujanje plazme duž meridijana od ekvatora prema polovima na površini (20 m/s) te još sporije strujanje u suprotnom smjeru ispod površine (1 – 2 m/h).

Plazma koja odlazi sa Sunca nosi sa sobom magnetsko polje daleko u svemir i time stvara međuplanetarno magnetsko polje (eng. *interplanetary magnetic field*, IMF). To je posljedica tzv. koncepta zamrznutosti magnetskog polja u plazmi (eng. *frozen flux approximation*) prema kojem se element plazme i silnice magnetskog polja koje kroz njega prolaze gibaju zajedno ako je plazma vrlo vodljiva. Međuplanetarno magnetsko polje je najprije radijalno izduženo jer se plazma kreće duž magnetskih silnica. Polja iznad i ispod solarnog ekvatora imaju različite polaritete, odnosno pokazuju prema i od Sunca pa se u ekvatorijalnoj ravnini stvara neutralna ploha (eng. *heliospheric current sheet*). Kako se udaljenost od Sunca povećava, rotacija Sunca uzrokuje deformaciju neutralne plohe i magnetskog polja u strukturu nalik Arhimedovoj spirali, koju često zovemo i Parkerovom spiralom (slika 2.2).

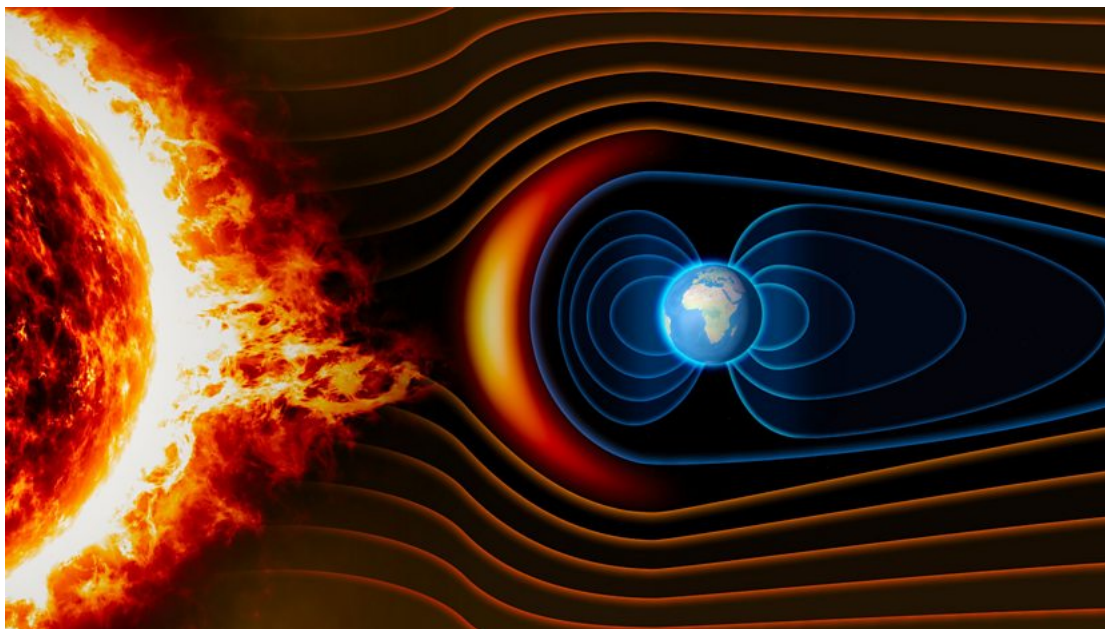


Slika 2.2. Deformacija neutralne ravnine u Parkerovu spiralu zbog rotacije Sunca oko svoje osi. Slika je preuzeta s: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c4/Parker\\_spiral.gif?20131202043727](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c4/Parker_spiral.gif?20131202043727).

### ***2.3. Magnetsko polje Zemlje***

Magnetsko polje Zemlje nazivamo još i geomagnetskim poljem. Ono je u prvoj aproksimaciji dipolno blizu površine Zemlje, ali je vrlo deformirano na velikim udaljenostima (slika 2.3). Danas se os dipolnog polja nalazi pod kutem od oko  $11^\circ$  u odnosu na os

rotacije Zemlje, a južni magnetski pol se nalazi na sjevernoj geografskoj polutci. U 19. je stoljeću C. F. Gauss zaključio da se izvor dipolnog polja nalazi u unutrašnjosti Zemlje, a ne izvan nje i pokazao je da je ta komponenta magnetskog polja inverzno proporcionalna s kvadratom polumjera Zemlje,  $R_Z$ . To je otkriće potaknulo razvoj različitih teorija o mehanizmu nastanka i održavanja geomagnetskog polja. Prvo se mislilo da su izvor polja feromagnetski materijali u Zemljinoj jezgri, ali to nije moguće jer se Curiejeva temperatura<sup>1</sup> postiže već na dubini od oko 20 km ispod površine. Druga teorija kaže da je geomagnetsko polje posljedica Zemljine rotacije, ali do danas nije pronađena fundamentalna veza između mase u gibanju i pripadnog magnetskog polja. Danas se vjeruje da je izvor samoodrživog dipolnog polja, kao i na Suncu, dinamo efekt. Iako je geomagnetski dinamo u vanjskoj tekućoj jezgri Zemlje najvažniji izvor (glavno polje), ukupnom geomagnetskom polju doprinose i magnetične stijene u Zemljinoj kori (polje kore) te struje magnetosfere (vanjsko polje).



Slika 2.3. Geomagnetsko polje. Blizu površine Zemlje geomagnetsko polje je dipolno. Silnice geomagnetskog polja su na dnevnoj strani Zemlje sabijene zbog pritiska Sunčevog vjetrova na magnetopauzu, dok su na noćnoj strani izdužene. Slika je preuzeta s: <https://ichef.bbci.co.uk/images/ic/832xn/p09kklfs.jpg>.

Glavno polje (eng. *main field*) opisuje više od 90% opaženog geomagnetskog polja. Iz zapisa u stijenama znamo da mora postojati barem 3 milijarde godina. Posljedica je konvektivnih gibanja tekućih električki vodljivih materijala kroz već postojeće (originalno)

<sup>1</sup>Curiejeva temperatura je temperatura iznad koje feromagnetični materijali gube svoja svojstva i postaju paramagnetični. Za željezo iznosi 770°C.

magnetsko polje, zbog čega nastaju električne struje. Te električne struje i same proizvode magnetsko polje zbog kojeg fluid u gibanju stvara dodatno (sekundarno) magnetsko polje iste orijentacije kao i originalno. Originalno i sekundarno polje se superponiraju u novo, jače polje u kojem je dodatna energija pohranjena nauštrb smanjenja kinetičke energije gibanja. Izvor gibanja fluida je termalno zagrijavanje unutar Zemljine jezgre, koju dijelimo na krutu unutrašnju i tekuću vanjsku. S vremenom dolazi do smrzavanja unutarnjeg ruba vanjske jezgre pri čemu se otpušta energiju koja radijalno putuje prema vanjskom rubu jezgre, a zatim i površini Zemlje, i pri tome zagrijava unutrašnjost. Ovakvo je gibanje fluida i stvaranje magnetskog polja na Zemlji moguće jer su zadovoljeni sljedeći uvjeti: u unutrašnjosti postoji sloj vodljivog fluida, postoji ostatak inicijalnog magnetskog polja iz doba formiranja planeta te postoji Coriolisova sila koja zakreće gibanje fluida.

Blizu površine Zemlje uočljiv je utjecaj magnetskog polja kore u vidu anomalija glavnog polja. U kori su temperature dovoljno niske da magnetični materijali mogu biti u čvrstom stanju i postati magnetizirani pod utjecajem glavnog polja. Pri tome razlikujemo dva tipa magnetizacije: induciranu, u kojoj se magnetski momenti materijala poravnjavaju s orijentacijom jačeg magnetskog polja samo za vrijeme postojanja tog polja, te trajnu, koja u Zemljinoj kori postoji zbog rastaljenih stijena koje su u sebi zarobile oblik dipolnog polja tijekom stvrdnjavanja.

Magnetosfera je prostor oko Zemlje u kojem dominira utjecaj geomagnetskog polja. Magnetopauza je granica koja razdvaja magnetosferu od IMF-a. Oblik magnetopauze se kontinuirano prilagođava tlačenju od dolaznog Sunčevog vjetra. S dnevne strane Zemlje na prosječnoj udaljenosti od  $10R_Z$  imamo tzv. magnetski nos gdje dolazi do kompresije silnica geomagnetskog polja, a s noćne strane je tzv. magnetski rep koji se proteže i do  $200R_Z$ . U vanjsku magnetosferu ubrajamo struju magnetopauze, struju magnetskog repa te struju neutralne ravnine, dok u unutrašnjoj magnetosferi imamo prstenastu struju. Vanjska i unutrašnja magnetosfera su međusobno, ali i s ionosferom povezane sustavom struja koje teku paralelno sa silnicama geomagnetskog polja.

Struja magnetopauze teče po površinskom sloju dnevne strane magnetopauze i posljedica je razdvajanja nabijenih čestica dolaznog Sunčevog vjetra. Kad se solarna plazma približi magnetopauzi, geomagnetsko polje zbog Lorenzove sile odbije elektrone u jednom smjeru, a ione u drugom. Struja magnetopauze u ekvatorijalnoj ravnini teče od istoka prema zapadu, što znači da stvara magnetsko polje koje je usmjereno tako da pojačava geomagnetsko polje s unutarnje strane magnetopauze.

Prstenastu struju čine čestice srednjih energija, između 1 i 200 keV koje u ekvatorijalnoj ravnini kruže oko Zemlje u smjeru kazaljke na satu na udaljenostima između 2 i 5  $R_Z$ . Dakle, prstenasta struja proizvodi magnetsko polje koje je orijentirano suprotno geomag-

netskom polju na površini Zemlji i time ga umanjuje. Prstenasta struja gubi čestice kroz proces izmjene naboja. Ako se hladni neutralni atom iz više atmosfere sudari s visokoenergetskim pozitivnim ionom iz prstenaste struje, ion će preuzeti elektron od atoma i postati visokoenergetski neutral koji može pobjeći iz atmosfere jer više ne osjeća magnetsku silu. Prethodno neutralna čestica postaje nabijena, ali ima puno manju kinetičku energiju od izvornog iona. Zato je potreban kontinuirani priljev novih visokoenergetskih čestica kako bi prstenasta struja bila strabilna duži period vremena. Za vrijeme geomagnetskih oluja uočava se posebno velik priljev  $O^+$  iona koji akceleriraju prema prstenastoj struji iz polarne ionosfere i tada je prstenasta struja vrlo jaka, a na površinskim stanicama mjeri se velik pad iznosa komponenti geomagnetskog polja.

Čestice Sunčevog vjetra ulaze u magnetosferu procesom magnetske rekonekcije. Tom se pojavom općenito opisuje interakcija dvaju antiparalelnih magnetskih polja koja se međusobno približavaju i za koja vrijedi koncept zamrznutosti polja u plazmi. Orijentacija IMF-a koje dolazi do Zemlje ovisi o položaju Zemlje u Parkerovoj spirali, a kada je vertikalna komponenta IMF-a,  $B_z$  u GSM sustavu<sup>2</sup> negativna dolazi do magnetske rekonekcije na nosu magnetopauze. Dešava se prespajanje magnetskih silnica koje ne dopušta prolazak solarne plazme pa ona zaobilazi nos i giba se duž magnetopauze do repa. U repu se ponovno događa magnetska rekonekcija, ali na način koji omogućava ulazak čestica u magnetosferu. Čestice koje ulaze stvaraju plošnu struju repa u magnetskoj ekvatorijalnoj ravnini Zemlji.

## 2.4. Sunčeva aktivnost

Geomagnetske oluje dijelimo na ponavljajuće i neponavljajuće. Ponavljajuće su ponajviše vezane uz koronine šupljine (eng. *coronal holes*, CH) koje traju po nekoliko mjeseci i stvaraju korotirajuća interakcijska područja (eng. *corotating interaction regions*) u Sunčevom vjetru koja se ponavljaju pri svakoj Sunčevoj rotaciji. Neponavljajuće geomagnetske oluje se javljaju sporadično tijekom Sunčeve rotacije, a primarno su izazvane koroninim izbačajima mase (eng. *coronal mass ejection*, CME). Iako su jake geomagnetske oluje često nepoželjne jer mogu oštetiti elektroenergetske mreže, telekomunikacijske mreže i satelite u orbiti te izložiti astronaute opasno velikim dozama zračenja, ljubiteljima promatranja neba su dobrodošle jer mogu izazvati polarnu svijetlost i na nižim geografskim širinama od uobičajenih.

---

<sup>2</sup>GSM sustav (eng. *geocentric solar magnetospheric coordinates*) je desni Kartezijev koordinatni sustav s ishodištem u središtu Zemlje. Koordinata  $x$  se nalazi duž spojnice Zemlja-Sunce i pozitivna je u smjeru prema Suncu. Koordinata  $y$  je okomita na ravninu koju određuju os magnetskog dipola Zemlje i  $x$ -koordinata i pozitivna je u smjeru sumraka. Koordinata  $z$  je okomita na  $xy$ -ravninu.



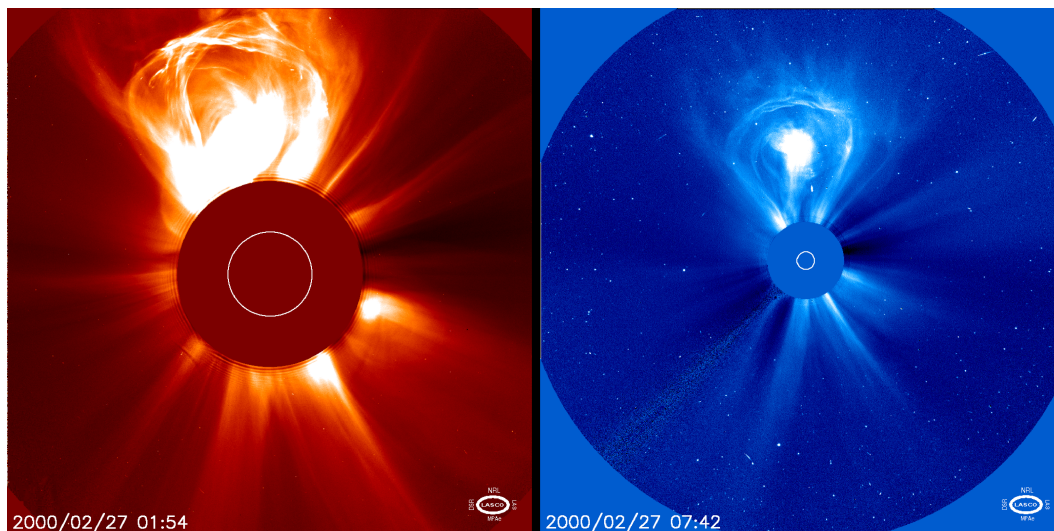
Sunčeve pjege su jedan od najpoznatijih primjera Sunčeve aktivnosti. Javljaju se u Sunčevoj fotosferi, a uočavamo ih kao privremene tamne mrlje. Tamnije su jer im je temperatura niža (3000 – 4500 K) od temperature okolne površine (5778 K) zbog vrlo velikog magnetskog toka koji inhibira konvekciju. Pjege se najčešće javljaju u parovima suprotnih magnetskih polariteta tako da su spojene silnicama magnetskog polja koje izviru iz jedne, a poniru u drugu pjegu. Životni vijek im je između nekoliko dana i nekoliko mjeseci, a promjer između 16 i 160 000 km. Najtamnije središte pjege zovemo umbra i u tom je području magnetsko polje najjače i usmjereno normalno na fotosferu. Oko pojedinačne ili grupe više umbri može postojati nešto svijetliji obrub, penumbra, koji je sastavljen od radijalno izduženih filamenata. Iako se broj pjega ponavlja s periodom od 11 godina, nisu svi ciklusi identični. U rasponu od tri stoljeća, koliko se vrše opažanja broja pjega, najkraći ciklus je trajao 9 godina, a najduži 14. Također, uočeno je nekoliko intervala u kojima je ukupan broj pjega bio drastično manji od prosječnog.

Koronine šupljine su područja na površini Sunca iz kojih se magnetske silnice pružaju toliko daleko u svamir da ih možemo smatrati otvorenima. Koronine šupljine su tamnije od svoje okoline jer emitiraju manje zračenja u ekstremno ultraljubičastom i X-spektru pa im je temperatura niža. Područje formiranja varira ovisno o razdoblju solarnog ciklusa: za vrijeme minimuma prevladavaju polarne CH, dok ih za vrijeme maksimuma ima na svim heliografskim širinama. Iz koroninih šupljina na nižim širinama kontinuirano otječe spori Sunčev vjetar.

Sunčevi bljeskovi ili tzv. baklje (eng. *solar flare*) su kratkotrajne, ali vrlo intenzivne eksplozije u Sunčevoj atmosferi. Uočavamo ih svakodnevno, a traju od nekoliko minuta do pola sata. Bljeskovi također prate 11-godišnji ciklus pa ih se javlja više i oslobađaju veću količinu energije za vrijeme solarnog maksimuma. Do pojave baklje dolazi kada magnetska energija pohranjena u Sunčevoj atmosferi ubrza nabijene čestice plazme pa one počnu emitirati elektromagnetsko zračenje koje se širi brzinom svjetlosti. Dio zračenja koji dođe do dnevne strane Zemlje apsorbira se u ionosferi, što uzrokuje povećanu ionizaciju ionosfere te ometa širenja radio valova.

U ovom radu analizirat ćemo geomagnetske oluje prouzrokovane koroninim izbačajima mase. Koronini izbačaji mase su najeksplozivniji događaji u Sunčevoj atmosferi pri kojima se izbacuju milijarde tona guste plazme iz korone, a magnetsko polje koje se prenosi tom plazmom je jače od pozadinskog međuplanetarnog magnetskog polja. Izbačaji izgledaju poput petlje ili žarulje i karakteriziraju ih vrlo svijetla jezgra okružena tamnom šupljinom te svijetli vodeći rub (slika 2.4). CME-ovi putuju od Sunca brzinama od 250 do 3000 km/s pa tako najbržim izbačajima usmjerenima prema Zemlji treba tek 15 – 18 sati da stignu do nas, a sporijima treba i po nekoliko dana. Ako izbačaji putuju brzinama većima od brzine

pozadinskog Sunčevog vjetra, onda nastaju udarni valovi. Kako CME-ovi propagiraju od Sunca, tako raste i njihova veličina pa najveći CME-ovi mogu postići radijalnu veličinu od 0,25 AU kad dođu do Zemlje koja se nalazi na 1 AU. Točan mehanizam nastanka CME-ova nije poznat, ali vjeruje se da su izbačaji posljedica magnetske rekonekcije, tj. rekonfiguracije silnica unutar koroninog magnetskog polja u manje napeto stanje pri čemu dolazi do naglog otpuštanja elektromagnetske energije (balklja) te naglog ubrzavanja plazme od Sunca (CME). CME-ovi prate solarni ciklus pa su brojniji i intenzivniji za vrijeme solarnog maksimuma. Međutim, vrhunac pojavljivanja CME-ova postiže se 6 – 12 mjeseci nakon što broj Sunčevih pjega postigne svoj maksimum (Chen, 2011). Najvažniji parametri za analizu CME-ova su veličina, brzina i smjer gibanja, a računaju se pomoću slika koje bilježe koronagrafi na satelitima. Neizbježan dolazak CME-a prvi opaža Deep Space Climate Observatory (DSCOVR) satelit, lociran u Lagrangeovoj L1 točki. Nagli skok u gustoći plazme, ukupnoj jačini IMF-a i brzini Sunčevog vjetra ukazuju da je udarni val stigao do satelita te da će za 15 – 60 min stići do Zemlje. Ovakva mogućnost upozorenja je vrlo važna za zaštitu tehnoloških sustava u svemiru i na površini Zemlje jer CME-ovi izazivaju najveće geomagnetske oluje.



Slika 2.4. Koronin izbačaj mase u obliku žarulje zabilježen LASCO koronagrafom u kanalu C2 (lijevo) i C3 (desno) 27. veljače 2000. Bijele kružnice predstavljaju veličinu Sunca. Slika je preuzeta s: <https://soho.nascom.nasa.gov/gallery/images/las02.html>.

## 2.5. Geomagnetski indeksi

Geomagnetski indeksi su prvotno osmišljeni kao alternativa magnetogramima za interpretaciju i polukvantitativno mjerenje geomagnetske aktivnosti. Koriste se za analizu

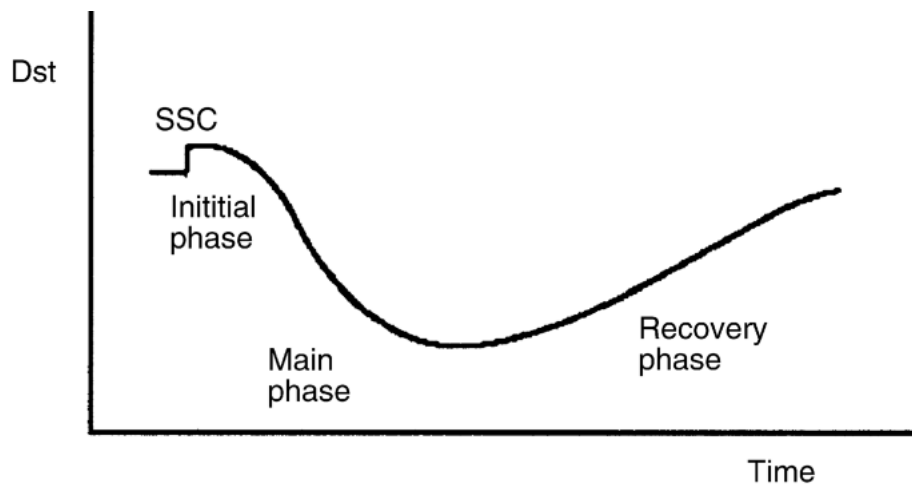
poremećaja geomagnetskog polja koji su posljedica međudjelovanja Sunčevog vjetra i magnetosfere.

*Kp indeks* je trosatni indeks globalne razine geomagnetske aktivnosti. Uveo ga je J. Bartels 1949. godine. Računanje *Kp* indeksa odvija se u tri koraka i pri tome se koriste podaci o horizontalnoj komponenti geomagnetskog polja sa 13 izabраниh subauralnih postaja. Prvo se računa trosatni *K* indeks tako da se za svaku postaju i svaki trosatni vremenski interval zabilježi najveća razlika između apsolutnog minimuma i apsolutnog maksimuma svih triju komponenti geomagnetskog polja. Zatim se ti iznosi najvećih razlika pomoću tablica za svaku postaju pretvaraju u kvazilogaritamski *K* indeks s vrijednostima između 0 i 9. U drugom koraku se računa *Ks* indeks uklanjanjem dnevnih i sezonskih varijacija iz *K* indeksa. Konačno, *Kp* indeks se za svaki trosatni interval dobiva uprosječivanjem *Ks* indeksa po svim postajama.

*AE indeks* je mjera geomagnetske aktivnosti u auroralnom pojasu zbog doprinosa auroralnih elektrojet struja. Definirali su ga T. N. Davis i M. Sugiura 1966. godine. Za izračun se koriste podaci s uniformno raspoređenih postaja duž subauroralne zone. *AE* indeks je definiran kao razlika između *AU* i *AL* indeksa, pri čemu *AU* i *AL* indeksi predstavljaju gornju i donju envelopu magnetograma superponiranih poremećaja horizontalne komponente geomagnetskog polja.

*Dst indeks* mjeri odstupanje horizontalne komponente geomagnetskog polja na umjerenim geografskim širinama za vrijeme geomagnetskih oluja od polja u mirnim uvjetima zbog doprinosa isključivo prstenaste struje. Uveo ga je M. Sugiura 1964. godine. Pratimo li razvoj geomagnetske oluje pomoću *Dst* indeksa, uočiti ćemo tri faze: nagli početak, glavnu fazu te fazu oporavka (slika 2.5). Prije nailaska geomagnetske oluje, u mirnim uvjetima, *Dst* indeks održava neku početnu vrijednost koja je uglavnom slabo negativna. Nagli početak oluje traje između desetak minuta i sat vremena, a prepoznamo ga po porastu dinamičkog tlaka Sunčevog vjetra. Istovremeno s maksimumom tlaka postiže se mali skok u pozitivnom smjeru na maksimalnu vrijednost *Dst* indeksa. To se dešava jer tlak Sunčevog vjetra gura magnetopauzu bliže Zemlji pa struja magnetopauze jača da može zaustaviti daljnje prodiranje Sunčevog vjetra, a time jača i horizontalna komponenta geomagnetskog polja. Burlaga i Ogilvie (1969) su utvrdili da je nagli početak oluje povezan s nailaskom magnetohidrodinamičkog udarnog vala, tj. vrlo tankog prijelaznog sloja u kojem se naglo mijenjaju parametri Sunčevog vjetra iz jednog ravnotežnog stanja (iza plazme) u drugo (ispred plazme). Također, amplituda naglog početka proporcionalna je drugom kvadratu dinamičkog tlaka (Siscoe, Formisano i Lazarus, 1968). Iako se najčešće nakon naglog početka oluje javlja glavna faza, Akasofu i Chapman (1963) su pokazali da postoje slučajevi u kojima nakon dugog i jakog naglog početka (3 – 10 h) nema izražene glavne

faze, ali i slučajevi gdje se glavna faza javlja nakon vrlo kratkog i slabog naglog početka (20 – 30 min). Uz to, amplituda naglog početka i minimum *Dst* indeksa za vrijeme glavne faze međusobno su nezavisni (Piddington, 1963). Glavna faza započinje kada vertikalna komponenta međuplanetarnog magnetskog polja (u GSM sustavu) postane pozitivna i premaši neku graničnu vrijednost (Russell, McPherron i Burton, 1967). U ovoj fazi *Dst* indeks brzo, u roku od nekoliko sati, pada i postiže duboki minimum. To je posljedica naglog jačanja prstenaste struje zbog ulaska čestica u nju. Konačno, faza oporavka započinje kada se vertikalna komponenta IMF-a počne smanjivati i poprimiti negativne vrijednosti. To označava kraj geomagnetske oluje i smirivanje magnetske aktivnosti. Prstenasta struja gubi više čestica nego što ih dobiva pa se *Dst* indeks tijekom više dana postepeno vraća na početnu vrijednost koju je imao prije geomagnetske oluje, pri čemu brzina oporavka ovisi o magnitudi minimuma iz glavne faze.



Slika 2.5. Tipični izgled *Dst* indeksa za vrijeme geomagnetske oluje. Nagli početak oluje (eng. *storm sudden commencement*) prepoznamo po slabom maksimumu *Dst* indeksa. U glavnoj fazi (eng. *main phase*) indeks brzo pada i postiže duboki minimum. Faza oporavka (eng. *recovery phase*) označava slabljenje i kraj oluje, odnosno polagano vraćanje *Dst* indeksa na baznu vrijednost prije geomagnetske oluje. Slika je preuzeta iz Lester (2007).

## 3. Metode

### 3.1. Modeli geomagnetske aktivnosti

U prethodnom smo poglavlju objasnili kako je stanje geomagnetske aktivnosti povezano s promjenama prstenaste struje i  $Dst$  indeksa. Iako nam je poznato koji su parametri Sunčevog vjetra i IMF-a najvažniji pri razmatranju geomagnetskih poremećaja, potpuni fizikalni mehanizmi koji objašnjavaju kako prstensata struja dobiva i gubi čestice su vrlo kompleksni i nelinearni te još nisu otkriveni. Zato se razvijaju pojednostavljeni empirijski modeli pomoću kojih utvrđujemo statističke veze između različitih parametara na temelju povijesnih mjerenja. Međutim, takvi modeli često sadrže konstante kojima se vrijednosti mogu promijeniti s vremenom zbog promjena u parametrima Sunčevog vjetra, fazi solarnog ciklusa ili uvjetima u magnetosferi. Također, konstante modela će se mijenjati s razvojem tehnologije zbog poboljšanja u načinu prikupljanja podataka na satelitima i opservatorijima, a superračunala će omogućiti upotrebu sve kompleksnijih numeričkih metoda analize podataka. Zato se empirijski modeli periodično preispituju i određuju se nove vrijednosti parametara koje najbolje opisuju trenutne podatke.

#### 3.1.1. Burtonova jednadžba

Burtonova jednadžba (Burton, McPherron i Russell, 1975) jedan je od prvih modela za prognozu  $Dst$  indeksa na temelju poznavanja brzine,  $v$  i gustoće Sunčevog vjetra,  $n$  te magnitude vertikalne komponente IMF-a u GSM sustavu,  $B_z$ . Model empirijski objašnjava promjenu  $Dst$  indeksa kao posljedicu promjena  $y$ -komponente električnog polja IMF-a,  $E_y$  i dinamičkog tlaka Sunčevog vjetra,  $p$ . Pri tome je  $E_y = v B_z \cdot 10^{-3}$  mV/m i  $p = n v^2$  eV/cm<sup>-3</sup>. Tri ključna elementa Burtonovog modela su:

1. Doprinos struje magnetopauze: Instrumenti na površini mjere poremećaje horizontalne komponente geomagnetskog polja koji su najvećim dijelom uzrokovani promjenama u prstenastoj struji, ali postoji i mali utjecaj struje magnetopauze. Burton je uveo konstantu  $c = 20$  nT koja iskazuje doprinos prstenaste struje i struje magnetopauze u mirnim uvjetima. Također, iskoristio je eksperimentalno potvrđenu tvrdnju da je doprinos poremećaja struje magnetopauze proporcionalan s drugim kvadratom dinamičkog tlaka Sunčevog vjetra i uveo je član  $b\sqrt{p}$ , pri čemu je  $b = 15, 8$  nT (nPa)<sup>-1/2</sup>.
2. Ulazak čestica u prstenastu struju: Burton je jednostavno pretpostavio da je stopa ulaska čestica u prstenastu struju funkcija samo  $E_y$  IMF-a,  $f(E_y)$ . Pokazao je da za negativne iznose  $E_y$  nema promjene jačine prstenaste struje, dok je za pozitivne

iznose ovisnost linearna. Uočio je da za male iznose  $E_y$  krivulja koja spaja izmjerene točke ima veći nagib od cjelokupnog pravca regresije pa je uveo odstupanje od 0,5 mV/m. Zato je  $f(E_y) = 0$  za  $E_y < 0,5$  mV/m te  $f(E_y) = \alpha(E_y - 0,5)$  za  $E_y > 0,5$  mV/m, pri čemu je  $\alpha = -5,4$  nT m (mV h)<sup>-1</sup>.

3. Gubitak čestica iz prstenaste struje: Burton je zanemario doprinose različitih mehanizama disipacije i iskoristio je najjednostavniju pretpostavku da je stopa slabljenja prstenaste struje proporcionalna jačini prstenaste struje,  $d_t Dst = -a Dst$ . Pri tome je parametar  $a^{-1} = 7,7$  h tzv. vrijeme slabljenja i konstantno je za sve geomagnetske oluje.

Navedeni iznosi parametara modela određeni su analizom deset geomagnetskih oluja iz 1967. i 1968. godine. Dakle, jednadžbe Burtonovog modela su

$$\frac{dDst^*}{dt} = f(E_y) - a Dst^*, \quad (3.1.)$$

$$Dst = Dst^* + b\sqrt{p} - c, \quad (3.2.)$$

$$f(E_y) = \begin{cases} 0 & E_y < 0.5 \\ \alpha(E_y - 0.5) & E_y > 0.5 \end{cases}, \quad (3.3.)$$

$$a = 0,13 \text{ h}, \quad b = 15,8 \text{ nT (nPa)}^{-1/2}, \quad c = 20 \text{ nT}, \quad \alpha = -5,4 \text{ nT m (mV h)}^{-1}. \quad (3.4.)$$

### 3.1.2. O'Brien-McPherronov model

U ovom ćemo radu koristiti korekciju Burtonove jednadžbe prema O'Brien i McPherron (2000). Oni su primjenili Burtonovu jednadžbu na set podataka koji obuhvaća stotine geomagnetskih oluja različitih jačina te mirnih perioda u razdoblju od 1964. do 1996. godine kako bi odredili nove iznose parametara i bolje objasnili fizikalne mehanizme ulaska i izlaska čestica iz prstenaste struje. O'Brien-McPherronov sustav jednadžbi je

$$\frac{dDst^*}{dt} = f(E_y) - \frac{1}{\tau(E_y)} Dst^*, \quad (3.5.)$$

$$Dst = Dst^* + b\sqrt{p} - c, \quad (3.6.)$$

$$f(E_y) = \begin{cases} 0 & E_y < 0.5 \\ \alpha(E_y - 0.5) & E_y > 0.5 \end{cases}, \quad (3.7.)$$

$$\tau(E_y) = \tilde{\tau} e^{\frac{v_0}{v_q + E_y}}, \quad (3.8.)$$

$$\alpha = -4,4 \text{ nT m (mV h)}^{-1}, \quad b = 7,3 \text{ nT (nPa)}^{-1/2}, \quad V_q = 4,7 \text{ mV/m}, \quad (3.9.)$$

$$\tilde{\tau} = 2,4 \text{ h}, \quad V_0 = 9,7 \text{ mV/m}, \quad c = 11 \text{ nT}. \quad (3.10.)$$

Najveća promjena u odnosu na Burtonov model je ta da vrijeme slabljenja prstenaste struje,  $\tau(E_y)$  više nije konstanta, već se eksponencijalno mijenja ovisno o iznosu  $E_y$  IMF-a i smatra se posljedicom gubitka čestica prstenaste struje zbog reakcija izmjene naboja. Dakle,  $\tau$  je zapravo vrijeme potrebno da se neutral i pozitivni ion sudare i izmjene elektron, a ono je određeno gustoćom, dimenzijom i brzinom čestica u vanjskoj atmosferi te položajem točke zrcaljenja pri kojoj se naboji reflektiraju kad putuju duž geomagnetskih silnica. Eksponencijalno ponašanje  $\tau$  je posljedica eksponencijalnog pada gustoće vanjske atmosfere s udaljenošću od Zemlje. Prije se pretpostavljalo da  $\tau$  ovisi o magnitudi  $Dst$  indeksa jer se razlikuje od oluje do oluje: kraće je za intenzivne geomagnetske oluje, a duže za slabije oluje. Međutim, O'Brien i McPherron su pokazali da je ta ovisnost samo prividna jer je  $Dst$  indeks slabo koreliran s  $E_y$ , što znači da  $\tau$  zapravo ovisi o  $E_y$ . U polarnim regijama gdje su silnice geomagnetskog polja okomite, Sunčev vjetar ulazi u magnetosferu i inducira električno polje, tzv. konvekcijsko polje usmjereno od zore prema sumraku. Čestice reagiraju na to polje te započinju gibanje po otvorenim i zatvorenim konvekcijskim trajektorijama, pri čemu potonje pripadaju prstenastoj struji. Položaj granice između otvorenih i zatvorenih trajektorija ovisi o jačini konvekcijskog polja. Ako se granica nalazi bliže površini Zemlje, prstenasta struja će se isto nalaziti niže, u području s većom gustoćom čestica. Zbog veće gustoće čestica, sudari i izmjene naboja su češće i prstenasta struja brže gubi čestice. Konačno, ključna činjenica je ta da jačina konvekcijskog polja ovisi o jačini  $E_y$  IMF-a. Konstanta  $V_0$  skalira utjecaj ukupnog (mirnog i poremećenog) konvekcijskog električnog polja, a  $V_q$  mirnog polja na trajanje faze oporavka.

S druge strane, pokazali su da je Burtonova funkcija ulaska čestica u prstenastu struju,  $f(E_y)$  dovoljno dobra aproksimacija, ali su izračunali novu vrijednost konstante  $\alpha = -4,4 \text{ nT m (mV h)}^{-1}$ . Također, iskoristili su istu jednadžbu za doprinos struje magnetopauze, ali se njihove konstante  $b = 7,26 \text{ nT (nPa)}^{-1/2}$  i  $c = 11 \text{ nT}$  dosta razlikuju od Burtonovih.

### 3.1.3. O'Brien-McPherronov model sa Svalgaardovom popravkom

O'Brien i McPherron (2002) su uveli još jednu modifikaciju u svoj model. Dugo je poznato da postoje sezonske varijacije u geomagnetskoj aktivnosti, ali još uvijek nisu poznati mehanizmi koji ih uzrokuju. Postoje pretpostavke koje takve varijacije povezuju s promjenama kuta  $\theta$ , što je nagib osi Zemljinog magnetskog dipola u ravnini okomitoj na spojnicu Zemlja-Sunce, te kuta  $\psi$  između vektora brzine Sunčevog vjetra, za koji uzimamo da je u smjeru  $x$ -osi GSM sustava, i smjera dipola. Najraširenije objašnjenje za postojanje sezon-

skih varijacija bio je Russell-McPherronov efekt prema kojemu uvijek kad je  $\theta < 90^\circ$  postoji povećana šansa da do Zemlje dođe južno orijentirano IMF i da se desi magnetska rekonekcija na dnevnoj strani magnetopauze. Međutim, utvrđeno je da je Russell-McPherronov efekt samo dio priče jer postoji nekakva ovisnost varijacije  $Dst$  indeksa o kutu  $\psi$  koju ovaj efekt ne može objasniti. O'Brien i McPherron su uvrstili Svalgaardovu empirijsku funkciju

$$S(\psi) = \frac{1,15}{(1 + 3 \cos^2(\psi))^{2/3}} \quad (3.11.)$$

koja mijenja utjecaj  $E_y$  IMF-a na magnetosferu u svoj prethodni model kako bi pokušali objasniti utjecaj promjene  $\psi$  na iznos  $Dst$  indeksa. Jednadžbe O'Brien-McPherronovog modela za Svalgaardovom popravkom glase

$$\frac{dDst^*}{dt} = f(E_y) - \frac{1}{\tau(E_y)} Dst^*, \quad (3.12.)$$

$$Dst = Dst^* + b\sqrt{p}\sqrt{S(\psi)} - c\sqrt{S(\psi)}, \quad (3.13.)$$

$$f(E_y) = \begin{cases} 0 & E_y < 0.5 \\ \alpha S(\psi) (E_y - 0.5) & E_y > 0.5 \end{cases}, \quad (3.14.)$$

$$\tau(E_y) = \tilde{\tau} e^{\frac{V_0}{S(\psi)(V_q + E_y)}}. \quad (3.15.)$$

$$\alpha = -3,7 \text{ nT m (mV h)}^{-1}, \quad b = 8,6 \text{ nT (nPa)}^{-1/2}, \quad V_q = 4,7 \text{ mV/m}, \quad (3.16.)$$

$$\tilde{\tau} = 2,4 \text{ h}, \quad V_0 = 7,3 \text{ mV/m}, \quad c = 11 \text{ nT}. \quad (3.17.)$$

## 3.2. Nelinearna metoda najmanjih kvadrata

### 3.2.1. Metoda najmanjih kvadrata

Metoda najmanjih kvadrata jedna je od najvažnijih metoda regresijske analize. Cilj joj je pronaći iznose parametara matematičkog modela koji najbolje opisuje skup izmjerenih podataka, odnosno odrediti pravac regresije koji najbolje slijedi točke u dijagramu rasipanja.

Neka imamo  $n$  parova podataka  $(x_i, y_i)$ , gdje su  $x_1, \dots, x_n$  nezavisne varijable, a  $y_1, \dots, y_n$  opažene, kojima želimo prilagoditi teorijski model  $f(\mathbf{x}, \mathbf{p})$  sa  $m < n$  nepoznatih parametara  $p_1, \dots, p_m$ . Osnovna ideja metode najmanjih kvadrata jest da je od svih mogućih pravaca regresije najvjerojatniji onaj za koji je suma kvadrata odstupanja između opaženih



podataka i teorijskog predviđanja minimalna. Zato definiramo objektanu funkciju modela

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \mathbf{p}))^2. \quad (3.18.)$$

Minimum objektne funkcije postiže se kada je gradijent te funkcije jednak nuli. S obzirom da model ima  $m$  parametara, postojat će  $m$  gradijentnih jednadžbi

$$\frac{\partial S}{\partial p_j} = -2(y_i - f(x_i, \mathbf{p})) \frac{\partial f(x_i, \mathbf{p})}{\partial p_j} = 0, \quad j = 1, \dots, m. \quad (3.19.)$$

Ovo su polazne jednadžbe svakog problema najmanjih kvadrata.

Linearna metoda najmanjih kvadrata koristi se u problemima u kojima se funkcija modela može zapisati kao linearna kombinacija parametara

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = x_{1,1} p_1 + \dots + x_{1,m} p_m + \dots + x_{n,1} p_1 + x_{n,m} p_m. \quad (3.20.)$$

Rješenja gradijentnih jednadžbi ovakvih problema mogu se napisati u zatvorenom obliku pa se oni gotovo uvijek rješavaju analitički.

Većina stvarnih sustava sadrži puno složenije ovisnosti i potrebno je koristiti nelinearnu metodu najmanjih kvadrata. Kod nelinearnih sustava su derivacije objektne funkcije  $S$  najčešće funkcije i nezavisne varijable i samih parametara modela pa se gradijentne jednadžbe ne mogu riješiti jednoznačno. Zato je potrebno odrediti neke početne vrijednosti parametara i utočniti ih iterativnim postupkom. U svakoj se iteraciji iznos parametara zamjenjuje novom procjenom  $\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \boldsymbol{\delta}$ , gdje je  $\boldsymbol{\delta}$  vektor pomaka. Vektor pomaka određuje smjer i veličinu promjene parametara, a može se napisati na različite načine koji definiraju različite iterativne algoritme za rješavanje nelinearnih najmanjih kvadrata.

### 3.2.2. Levenberg-Marquardtov algoritam

Levenberg-Marquardtov algoritam, također poznat i pod imenom prigušena metoda najmanjih kvadrata, robusna je i efikasna metoda optimizacije problema nelinearnih najmanjih kvadrata. Neovisno su je razvili K. Levenberg (1944) i D. Marquardt (1963) kao kombinaciju Gauss-Newtonove metode i metode gradijentnog pomaka.

Gauss-Newtonova metoda u svakoj iteraciji linearizira objektanu funkciju razvijajući je u Taylorov red prvog reda i zatim računa parametre modela rješavajući linearnu metodu najmanjih kvadrata. Ova je metoda efikasna kada su početne procjene parametara blizu optimalnim iznosima jer pretpostavlja da je objektana funkcija lokalno kvadratična. Jed-

nadžba ažuriranja iznosa parametara za Gauss-Newtonov korak je

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k - [\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k]^{-1} \mathbf{J}_k^T \mathbf{r}_k, \quad (3.21.)$$

gdje je  $\mathbf{p}_k$  vektor parametara u  $k$ -toj iteraciji,  $\mathbf{J}_k$  je Jacobijeva matrica objektne funkcije s obzirom na parametre u  $k$ -toj iteraciji i  $\mathbf{r}_k$  je vektor ostataka u  $k$ -toj iteraciji.

Metoda gradijentnog pomaka može se koristiti za bilo koju glatku i nekonveksnu funkciju. Računajući gradijent objektne funkcije u svakoj iteraciji, ažurira iznose parametara u smjeru koji smanjuje vrijednost objektne funkcije. Ova je metoda manje osjetljiva na početne uvjete, ali sporije konvergira prema minimumu. U ovom je slučaju jednadžba ažuriranja iznosa parametara

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k - \alpha \nabla f, \quad (3.22.)$$

pri čemu je  $\alpha$  adaptivni parametar koji kontrolira veličinu koraka u smjeru negativnog gradijenta, a  $\nabla f$  je vektor gradijenta objektne funkcije s obzirom na parametre u  $k$ -toj iteraciji.

Levenberg-Marquardtov algoritam započinje kao Gauss-Newtonova metoda i koristi takav način ažuriranja parametara dokle god iteracije vode prema konvergenciji. Međutim, ako dođe do zastoja ili divergencije, Levenberg-Marquardtov algoritam omogućava dinamičnu promjenu u metodu gradijentnog pomaka. To se postiže uvođenjem adaptivnog parametra prigušenje  $\lambda$ . Što je parametar  $\lambda$  manji, to se algoritam više ponaša kao Gauss-Newtonova metoda. U svakoj se iteraciji iznos  $\lambda$  prilagođava s obzirom na napredak postignut u minimiziranju objektne funkcije. Ako je Gauss-Newtonov korak umanjio objektu funkciju, iznos  $\lambda$  se smanjuje te je u sljedećoj iteraciji još jači utjecaj Gauss-Newtonove metode. S druge strane, ako je objektna funkcija ostala ista ili se povećala, iznos  $\lambda$  se uvećava kako bi u sljedećem koraku povećali utjecaj metode gradijentnog pomaka. Jednadžba ažuriranja iznosa parametara za Levenberg-Marquardtov algoritam glasi

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k - [\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k + \lambda \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{J}_k^T \mathbf{r}_k, \quad (3.23.)$$

pri čemu je jedina razlika u odnosu na Gauss-Newtonov korak dodavanje adaptivnog parametra prigušenja  $\lambda$  pomnoženog jediničnom matricom  $\mathbf{I}$ .

### 3.2.3. Implementacija Levenberg-Marquardtovog algoritma u jeziku Python

Za određivanje parametara O'Brien-McPherronovog modela Levenberg-Marquardtovim algoritmom u jeziku Python koristit ćemo funkciju `curve_fit()` iz biblioteke SciPy. Algoritam je implementiran kao u Fortranovoj biblioteci MINPACK prema radu J. J. Morea (1977). Uvjeti za korištenje ove funkcije su da je broj nepoznatih parametara modela

strogo manji od broja ulaznih podataka te da nema gornje i donje granice unutar kojih se smiju tražiti najbolje vrijednosti parametara. Ulaz funkcije čine funkcija našeg modela i vrijednosti nezavisnih varijabli. Početne procjene svih parametara unosi korisnik, a vektor pomaka automatski računa funkcija. Funkcija prestaje s radom kada se postigne uvjet konvergencije da je razlika u iznosima svih parametara među uzastopnim iteracijama manja od  $10^{-8}$ . Izlaz funkcije daje vektor najboljih procjena parametara našeg modela te informaciju o nepouzdanosti tih procjena preko matrice kovarijance.

### 3.3. Eulerova metoda unaprijed

Za računalno rješavanje diferencijalnih jednadžbi potrebno je iskoristiti neku numeričku metodu koja aproksimira derivacije razlikama između dvije susjedne točke. Kako O'Brien-McPherronovim modelom želimo predvidjeti ponašanje  $Dst$  indeksa u idućem trenutku, prirodno je koristiti tzv. podijeljenu razliku unaprijed

$$y'(t) \approx \frac{y(t+h) - y(t)}{h}, \quad (3.24.)$$

gdje je  $h$  korak mreže, tj. udaljenost između razmatranih točki. Primjenom takve aproksimacije na diferencijalnu jednadžbu  $y'(t) = f(t, y(t))$  u čvoru  $t_i$  dobivamo bazu jednokoračne eksplicitne Eulerove metode unaprijed

$$y_{i+1} = y_i + h f(t_i, y_i). \quad (3.25.)$$

Ovako diskretizirana jednadžba (3.5.) O'Brien-McPherronovog modela glasi

$$Dst^*[i+1] = Dst^*[i] + f(E_y)[i] - \frac{1}{\tau(E_y)[i]} Dst^*[i], \quad (3.26.)$$

pri čemu je odabran jednosatni korak mreže i koristi se kao ulaz funkcije `curve_fit()`.

## 4. Podaci

Glavni zadatak ovog rada bio je odrediti nove iznose parametara O'Brien-McPherronovog modela sa i bez Svalgaardove popravke tijekom geomagnetskih oluja izazvanih koroninim izbačajima mase za različite razine solarne aktivnosti (eng. *activity levels*) definirane prema kriteriju broja Sunčevih pjega (SN). Analiziran je interval od 1996. do 2020. godine koji obuhvaća 23. i 24. solarni ciklus.

U radu su korišteni satni srednjaci vertikalne komponente IMF-a u GSM sustavu  $B_z$  [nT], brzine  $v$  [km/s] i dinamičkog tlaka Sunčevog vjetra  $p$  [nPa] te geomagnetskog  $Dst$  indeksa [nT] preuzeti iz OMNIWeb baze podataka (King i Papitashvili, 2005, <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>). Kut  $\psi$  u Svalgaardovoj popravci smo za svaki sat u godini izračunali iz satnih vrijednosti jediničnog vektora u smjeru Zemljinog dipola transformiranog u GSE sustav za 2001. godinu.

Analiza je napravljena za četiri različite razine solarne aktivnosti s obzirom na broj Sunčevih pjega. Dakle, godine koje pripadaju pojedinoj razini nisu nužno poredane uzastopno. Razine su definirane prema Verbanac i Bandić (2021): vrlo niska aktivnost: SN = 0 – 20, niska aktivnost: SN = 20 – 60, umjerena aktivnost: SN = 60 – 140 i visoka aktivnost: SN > 140. Mjesečni srednjaci broja Sunčevih pjega su preuzeti iz SILSO baze podataka (<https://www.sidc.be/SILSO/datafiles/>).

Ukupno je analizirano 48 CME događaja (Dodatak A). Za svaku razinu aktivnosti izabrano je po 12 događaja iz Richardson i Cane (2010) kataloga (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.html>) koji zadovoljavaju sljedeće uvjete:

1. Izmjereni  $Dst$  indeks ne odstupa previše od idealnog teorijskog izgleda za tri faze geomagnetske oluje.
2. U izmjerenim podacima nema rupa ili ih ima tek nekoliko koje nisu na samom početku geomagnetske oluje ili blizu ekstrema bilo koje korištene varijable i mogu se jednostavno linearno interpolirati.
3. Odabrani su intervali koji sadrže samo po jedan cjeloviti CME događaj i ne uključuju početak ili kraj bilo kojih drugih događaja.

Svaki odabrani događaj traje između dva i četiri dana. Dane u godini označavamo kraticom DOY (eng. *day of year*). S obzirom da nas zanima samo ponašanje  $Dst$  indeksa za vrijeme geomagnetskih oluja, bilo je potrebno vrlo precizno odabrati svaki pojedini vremenski interval koji će se analizirati. Ako odaberemo interval u kojem je geomagnetska oluja okružena s više mirnih dana, doći će to podcjenjivanja parametara jer će model pokušati izgladiti ekstreme naglog početka i glavne faze oluje. Zatim smo pokušali

ograničiti intervale tako da počinju na sat u kojem se postiže maksimum  $Dst$  indeksa jer to označava početak prve faze geomagnetske oluje, a završavaju na sat u kojem je CME događaj prošao Zemlju. Međutim, to je opet dovelo do krivih procjena parametara jer model ne zna da prije svog maksimuma  $Dst$  indeks treba imati približno konstantne i niže vrijednosti i jer interval ne uključuje potpunu fazu oporavka s obzirom da se gubitak čestica iz prstenaste struje nastavlja i neko vrijeme nakon prestanka djelovanja CME događaja. Zato su granice odabrane tako da prije naglog početka oluje uključuju otprilike pola dana mirnog razdoblja, a kraj je onda kada se  $Dst$  indeks vrati na početku vrijednost prije geomagnetske oluje.

Svaki smo događaj analizirali na četiri načina:

1. Primjenili smo O'Brien-McPherronov model uz zadane vrijednosti parametara  $\alpha = -4,4 \text{ nT m (mV h)}^{-1}$ ,  $b = 7,3 \text{ nT (nPa)}^{-1/2}$ ,  $V_q = 4,7 \text{ mV/m}$  i  $V_0 = 9,7 \text{ mV/m}$ .
2. Levenberg-Marquardtovim algoritmom smo tražili optimalne iznose parametara  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  O'Brien-McPherronovog modela.
3. Primjenili smo O'Brien-McPherronov model sa Svalgaardovom popravkom uz zadane vrijednosti  $\alpha = -3,7 \text{ nT m (mV h)}^{-1}$ ,  $b = 8,6 \text{ nT (nPa)}^{-1/2}$ ,  $V_q = 4,7 \text{ mV/m}$  i  $V_0 = 7,3 \text{ mV/m}$ .
4. Levenberg-Marquardtovim algoritmom smo tražili optimalne iznose parametara  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  O'Brien-McPherronovog modela sa Svalgaardovom popravkom.

Odlučili smo se za optimizaciju samo tri parametra kako ne bi došlo do tzv. prepodešavanja modela (eng. *overfitting*). To je neželjeno ponašanje statističkog modela pri kojem model odlično opisuje postojeće podatke, a loše nove podatke pa se ne može koristiti za prognozu. To toga dolazi jer model ima preveliku slobodu pa se pokušava prilagoditi svakoj pojedinoj točki krivulje zadanih podataka, tj. šumu u podacima umjesto da uhvati trend krivulje u širem intervalu. Odabrali smo parametre  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  jer svaki od njih utječe na po jednu od tri faze geomagnetske oluje.

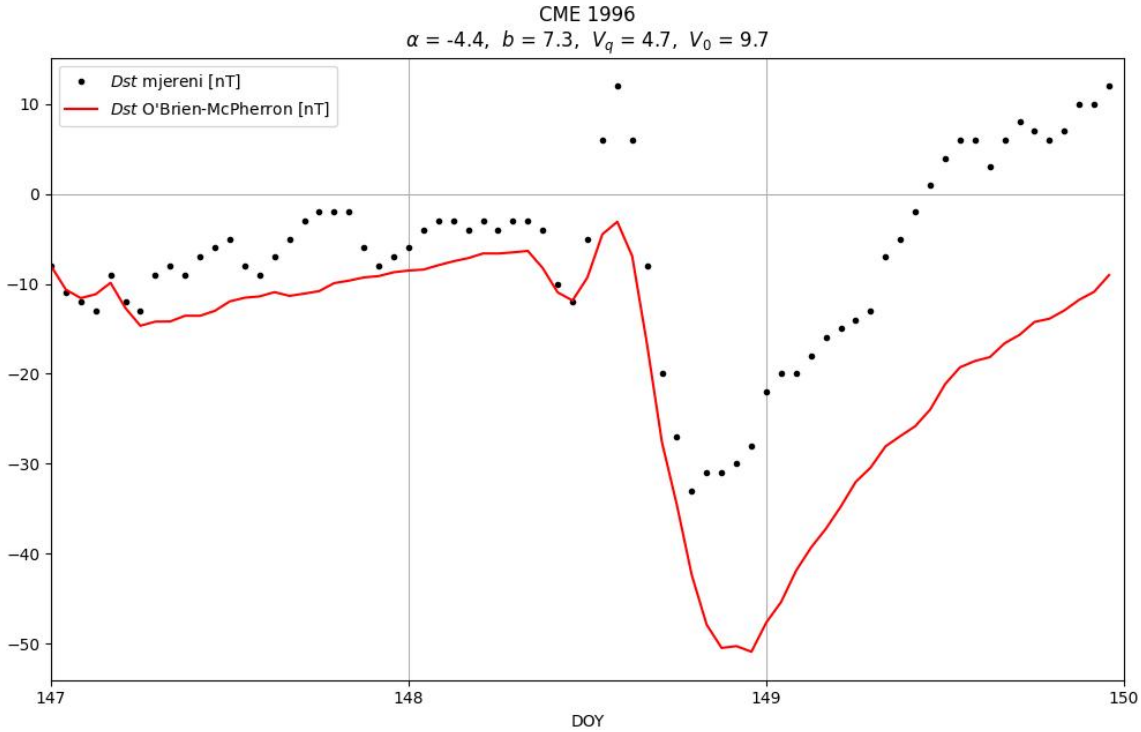
## 5. Rezultati i diskusija

### 5.1. O'Brien-McPherronov model bez Svalgaardove popravke

#### 5.1.1. Konstantni iznosi parametara modela

Najprije smo modelirali sve odabrane CME događaje koristeći O'Brien-McPherronov model bez Svalgaardove popravke uz konstante iznose svih parametara modela kako su ih oni odredili:  $\alpha = -4,4 \text{ nT m (mV h)}^{-1}$ ,  $b = 7,3 \text{ nT (nPa)}^{-1/2}$ ,  $V_q = 4,7 \text{ mV/m}$ ,  $V_0 = 9,7 \text{ mV/m}$ ,  $c = 11 \text{ nT}$  i  $\tilde{\tau} = 2,4 \text{ h}$ . Model uspijeva reproducirati pad i oporavak  $Dst$  indeksa tijekom odabranih geomagnetskih oluja, ali u svakom se slučaju primjećuju odstupanja od krivulje izmjerenih podataka.

Za najnižu razinu aktivnosti prosječni izmjereni minimum  $Dst$  indeksa iznosi  $-53 \text{ nT}$ , pri čemu osam događaja ne dostiže tu vrijednost, a jedno značajno odstupanje je minimum od  $-122 \text{ nT}$ . Najplići postignuti minimum za ovu razinu iznosi svega  $-25 \text{ nT}$ . Odstupanje od idealnog teorijskog izgleda uočava se u fazi oporavka gdje se u većini slučajeva javljaju sekundarni maksimum i minimum  $Dst$  indeksa. Razlog tome je što su glavna faza i faza oporavka povezane s iznosom južno orijentirane komponente IMF-a, a u razdobljima smanjenje solarne aktivnosti imamo CME slabijeg intenziteta pa i male promjene dinamičkog tlaka Sunčevog vjetra mogu nadjačati utjecaj magnetkog polja i uzokovati pozitivan rast  $Dst$  indeksa. Svi nedostaci O'Brien-McPherronovog modela za vrlo nisku razinu aktivnosti dobro su vidljivi na slici 5.1 gdje je prikazana slaba geomagnetska oluja uzrokovana CME događajem koji je došao do Zemlje 26. svibnja 1996. godine i trajao tri dana. O'Brien-McPherronov model ne uspijeva pratiti česte skokove  $Dst$  indeksa u mirnom razdoblju i predviđa puno glađu krivulju koja se nalazi ispod stvarne. Također, ni u jednom slučaju ne pokazuje dovoljno velik maksimum  $Dst$  indeka. Model se posebno loše ponaša u području minimuma  $Dst$  indeksa i faze oporavka. Za 11 događaja je model precijenio dubinu minimuma  $Dst$  indeksa, a samo za jedan je razlika između izmjerenog i predviđenog iznosa tek  $0,5 \text{ nT}$ . Prosječno odstupanje vrijednosti minimuma iznosi  $17 \text{ nT}$ , s tim da je veće za dublje minimume. Modelirane krivulje faze oporavka dobro prate oblik stvarnih krivulja, ali su pomaknute ispod njih u negativnom smjeru.



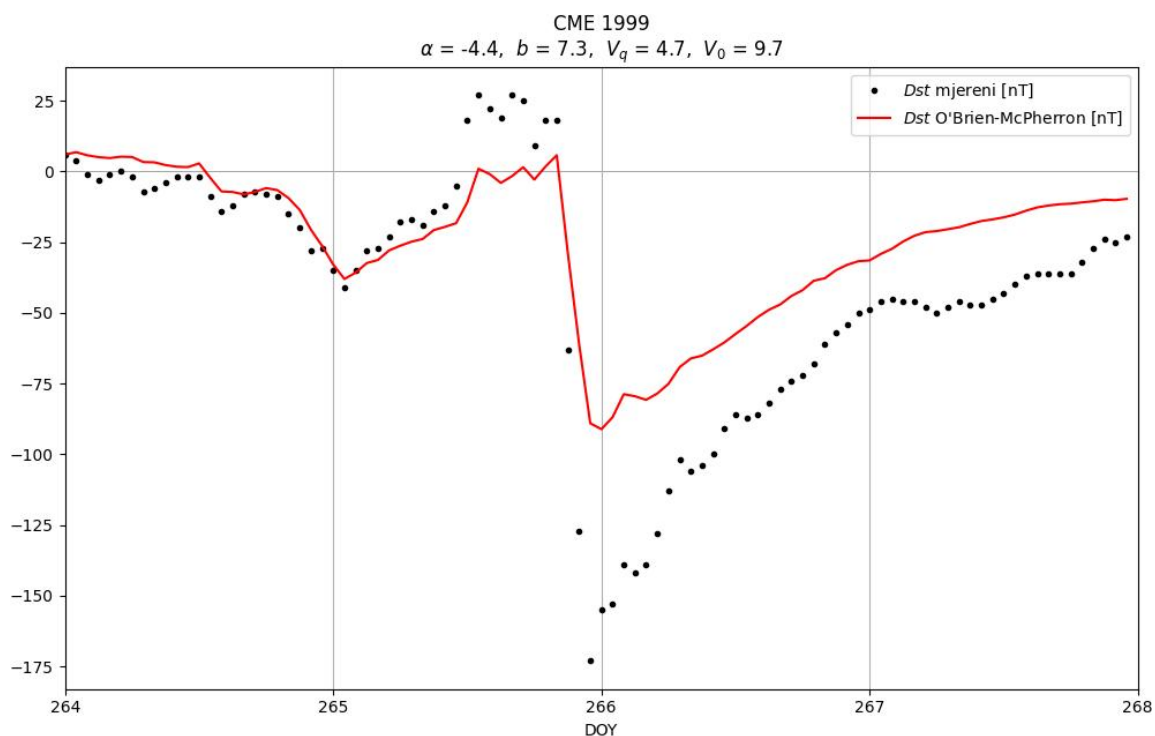
Slika 5.1. Reprezentativni primjer O'Brien-McPherronovog modela bez Svalgaardove popravke s konstantnim parametrima za vrlo nisku razinu aktivnosti. Prikazana je geomagnetska oluja uzrokovana koroninim izabačajem mase od 26. do 29. svibnja 1996. godine. Iznad slike su navedeni konstantni iznosi parametara O'Brien-McPherronovog modela.

Za nisku razinu aktivnosti je prosječni izmjereni minimum *Dst* indeksa jednak  $-110$  nT. Od toga su dva značajno plića minimuma iznosa  $-45$  i  $-49$  nT te jedan puno dublji,  $-374$  nT. Model ponovno ne može pogoditi sve varijacije *Dst* indeksa u mirnom dijelu dana i u svakom slučaju podcjenjuje njegov maksimum. U šest slučajeva model podcjenjuje dubinu minimuma *Dst* indeksa, u četiri precjenjuje, a u dva imamo odlično poklapanje. Prosječno odstupanje u pozitivnom smjeru iznosi  $23$  nT, a u negativnom  $28$  nT.

Prosječni izmjereni minimum *Dst* indeksa za umjerenu razinu aktivnosti iznosi  $-121$  nT pri čemu imamo dva događaja koja značajno odstupaju od te vrijednosti,  $-43$  i  $-422$  nT. Kao ni za prethodne razine aktivnosti, model ne može uhvatiti satne fluktuacije *Dst* indeksa u mirnom razdoblju niti doseći stvarni maksimum. Međutim, sada su vrijednosti minimuma *Dst* indeksa najčešće dobro pogođene uz prosječno odstupanje od  $15$  nT u negativnom smjeru. Iznimka je najsnažnija geomagnetska oluja, čiji je modelirani minimum plići za  $101$  nT.

Za visoku razinu aktivnosti prosječni izmjereni minimum *Dst* indeksa iznosi  $-142$  nT, pri čemu pet oluja ima minimum dublji od  $-150$  nT. Iznosi stvarnih minimuma su

za većinu slučajeva dobro pogođeni, ali se ističu tri događaja s minimumima od  $-173$ ,  $-201$  i  $-292$  nT čija su odstupanja modelirane krivulje u pozitivnom smjeru redom 82, 108 i 101 nT. No, takvo ponašanje modela je očekivano jer O'Brien i McPherron nisu uzimali u obzir minimume dublje od  $-150$  nT pri izračunu svojih parametara jer su tako intenzivne geomagnetske oluje bile vrlo rijetke u njihovom skupu podataka. Zato je više iznenađujuće da predviđanje najsnažnije oluje s izmjerenim minimumom od  $-300$  nT odstupa svega 11 nT. Slika 5.2 prikazuje snažnu geomagnetsku oluju koja je trajala od 21. do 25. rujna 1999. godine. Vidimo da model relativno dobro prati skokoviti izgled  $Dst$  indeksa prije naglog početka oluje, ali njegov maksimum i dalje nije dovoljno jako izražen. Također, za događaje za koje imamo veliko podcjenjivanje magnitude minimuma glavne faze, modelirana krivulja faze oporavka je pomaknuta iznad stvarne krivulje i manje je strma.



Slika 5.2. Reprezentativni primjer O'Brien-McPherronovog modela bez Svalgaardove popravke s konstantnim parametrima za visoku razinu aktivnosti. Prikazana je geomagnetska oluja uzrokovana koroninim izabačajem mase od 21. do 25. rujna 1999. godine. Iznad slike su navedeni konstantni iznosi parametara O'Brien-McPherronovog modela.

Pokazali smo da se uspješnost prilagodbe O'Brien-McPherronovog modela izmjerenim vrijednostima  $Dst$  indeksa tijekom geomagnetskih oluja značajno mijenja između razmatranih razina solarne aktivnosti. Za vrlo nisku razinu aktivnosti imamo konstantno precijenjivanje dubine minimuma  $Dst$  indeksa tijekom glavne faze oluje. Slaganje mod-



ela i stvarnih krivulja je u prosjeku najbolje za nisku i umjerenu razinu aktivnosti, pri čemu je prognoza minimuma *Dst* indeksa najtočnija za umjerenu razinu. Visoka razina aktivnosti predstavlja značajan problem O'Brien-McPherronovom modelu jer sadrži vrlo snažne geomagnetske oluje s minimumima glavnih faza koje premašuju  $-150$  nT, a model nije primjenjiv na njih i zato se javljaju velika podcjenjivanja inteziteta modeliranih oluja. Također, model niti u jednom slučaju ne prognozira dovoljno velik intezitet naglog početka oluje.

### 5.1.2. Optimalni iznosi parametara modela

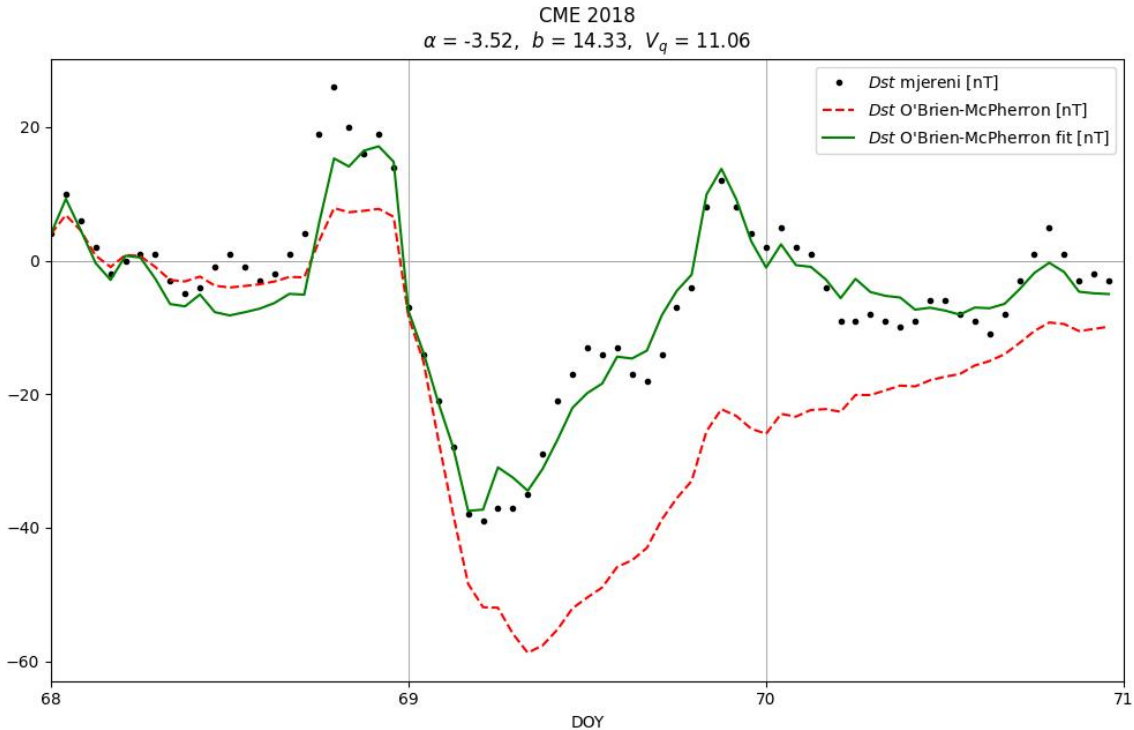
Nadalje, željeli smo vidjeti možemo li malo izmijeniti O'Brien-McPherronov algoritam da dobijemo bolje slaganje s izmjerenim vrijednostima. To smo radili tako da smo zadržali iste konstantne iznose parametara  $V_0$ ,  $c$  i  $\tilde{\tau}$  kao u prethodnoj analizi, ali smo dopustiti da parametri  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  variraju kako bismo Levenberg-Marquardtovim algoritmom našli njihove optimalne iznose za svaku razinu aktivnosti. U tablici 5.1 su prikazani rasponi, srednje vrijednosti i standardne devijacije parametara  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  za svaku razinu aktivnosti, a rezultati pojedinačnih događaja se nalaze u dodatku B.

Tablica 5.1. Rasponi, srednje vrijednosti i standardne devijacije parametara  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  za O'Brien-McPherronov model bez Svalgaardove popravke po razinama solarne aktivnosti.

razina aktivnosti	$\alpha$ [nT m (mV h) <sup>-1</sup> ]			$b$ [nT (nPa) <sup>-1/2</sup> ]			$V_q$ [mV/m]		
	raspon	$\bar{\alpha}$	$\sigma$	raspon	$\bar{b}$	$\sigma$	raspon	$\bar{V}_q$	$\sigma$
vrlo niska	[-4,99, -3,07]	-3,8	0,3	[2,15, 15,05]	10	2	[5,49, 11,06]	7,6	0,7
niska	[-7,67, -2,47]	-4,2	0,2	[2,62, 18,78]	12	2	[4,27, 6,44]	5,5	0,2
umjerena	[-5,54, -3,01]	-4,3	0,2	[1,82, 24,77]	11	3	[3,94, 10,00]	5,8	0,3
visoka	[-8,57, -3,50]	-5,3	0,2	[2,69, 20,63]	11	2	[4,18, 11,61]	5,6	0,3

Optimizacijom parametara uspjeli smo dobiti puno bolje slaganje modela i stvarne krivulje za vrlo nisku razinu aktivnosti. Novi model može reproducirati većinu fluktuacija *Dst* indeksa iz sata u sat u mirnom periodu i fazi oporavka. Također, modelirani maksimumi *Dst* indeksa su puno izraženiji i u nekim slučajevima dostižu izmjerene iznose. Za to je odgovoran parametar  $b$ . Geomagnetske oluje s puno satnih fluktuacija *Dst* indeksa i većim maksimumom zahtijevaju veći iznos  $b$ , a mirnije oluje manji. Zato se optimalni  $b$  kreće u velikom rasponu, od 2,15 do 15,05 nT (nPa)<sup>-1/2</sup>, a prosječno iznosi  $(10 \pm 2)$  nT (nPa)<sup>-1/2</sup> što je vrlo blizu Burtonovoj vrijednosti od 11 nT. od Najveće poboljšanje se vidi u procjeni minimuma *Dst* indeksa. U svim događajima imamo odlično poklapanje

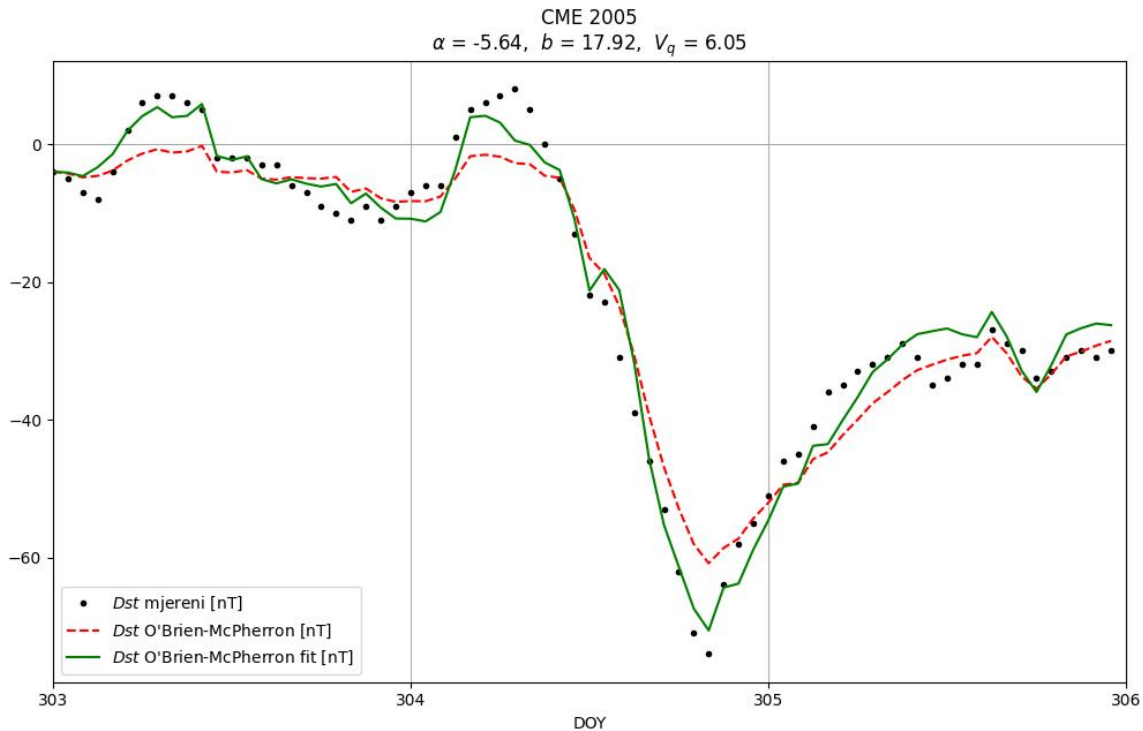
stvarnog i predviđenog minimuma s prosječnim odstupanjem od svega 2 nT. Parametar  $\alpha$ , koji regulira magnitudu minimuma, poprima iznose između  $-5,0$  i  $-3,1$  nT m (mV h) $^{-1}$  pri čemu oluje s negativnijim minimumom  $Dst$  indeksa imaju negativniji  $\alpha$ . Optimalni prosječni  $\alpha$  za vrlo nisku razinu aktivnosti je veći od O'Brien-McPherronovog i iznosi  $(-3,8 \pm 0,3)$  nT m (mV h) $^{-1}$ . Faze oporavka su također za sve događaje odlično prilagođene izmjerenim iznosima. Prosječni optimalni  $V_q$  iznosi  $(7,6 \pm 0,7)$  mV/m, što je dosta veće od O'Brien-McPherronovog iznosa.



Slika 5.3. Reprezentativni primjer optimiziranog O'Brien-McPherronovog modela bez Svalgaardove popravke s variranim parametrima za vrlo nisku razinu aktivnosti. Prikazana je geomagnetska oluja uzrokovana koroninim izabačajem mase od 9. do 12. ožujka 2018. godine. Iznad slike su navedeni procjenjeni optimalni iznosi parametara za ovaj događaj.

Za nisku razinu aktivnosti smo također dobili odličnu prilagodbu modela za sve događaje. Maksimumi  $Dst$  indeksa su u većini slučajeva puno izraženiji, a svi predviđeni minimumi se poklapaju s izmjerenim iznosima s prosječnim podcjenjivanjem od 8 nT. U prosjeku optimalni  $\alpha$  za nisku razinu iznosi  $(-4,2 \pm 0,2)$  nT m (mV h) $^{-1}$ . Na slici 5.3 je prikazana geomagnetska oluja koja je tijekom mirnog razdoblja prije naglog početka 1. ožujka 2000. godine imala jedan značajan skok  $Dst$  indeksa na pozitivnu vrijednost koja je malo manja od iznosa samog maksimuma. Prošli model nije uspio reproducirati niti jedan od tih skokova u potpunosti. Krivulja optimalnog modela se malo razlikuje od krivulje običnog O'Brien-McPherronovog modela u području između naglog pada  $Dst$  indeksa i

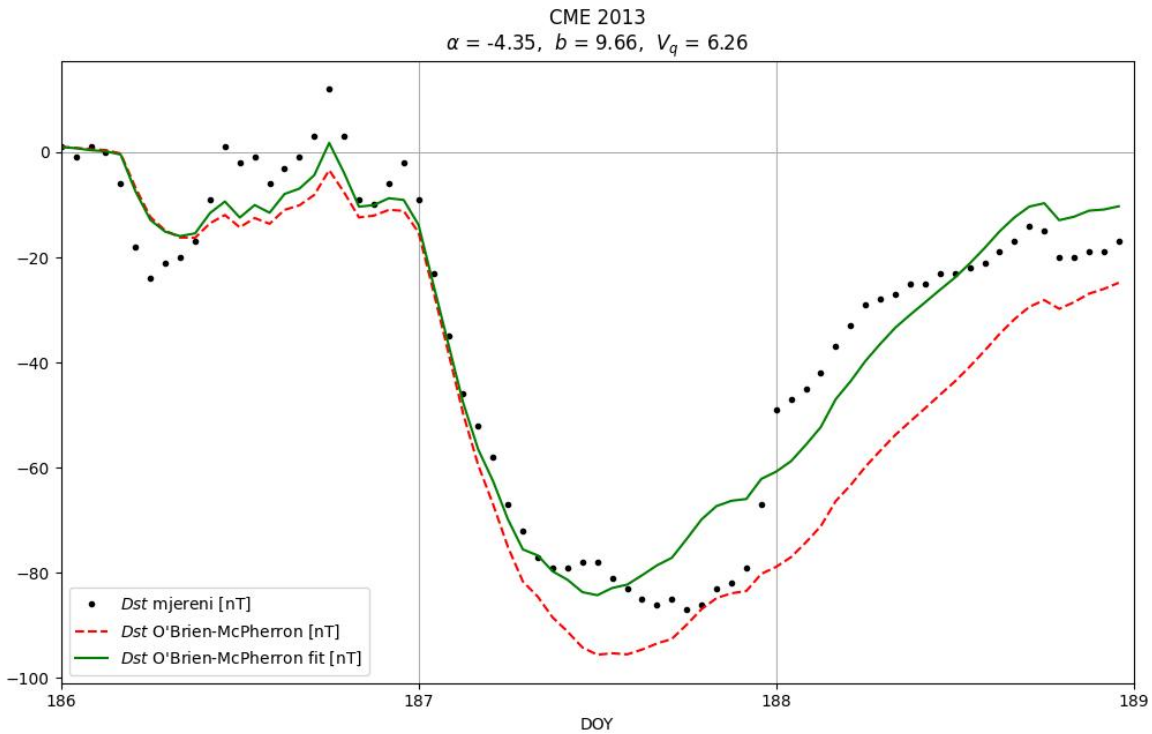
kraja oluje, ali pokazuje vrlo velik napredak u prognozi prethodno spomenutih skokova, pri čemu posebno dobro prati iznose manjeg skoka. Najveća razlika među modelima je u iznosu parametra  $b$  koji u ovom slučaju iznosi  $17,92 \text{ nT (nPa)}^{-1/2}$ . Možemo zaključiti da veći iznosi  $b$  omogućuju modelu da bolje reagira na česte i nagle promjene dinamičkog tlaka Sunčevog vjetera, a kako se tlak ponaša drugačije od slučaja do slučaja, tako je i raspon vrijednosti koje  $b$  može poprimiti jako velik. Na kraju se dobije prosječni optimalni  $b$  od  $(11 \pm 2) \text{ nT (nPa)}^{-1/2}$ . Prosječni optimalni parametar  $V_q$  je manji od onoga za prethodnu razinu i iznosi  $(5,5 \pm 0,2) \text{ mV/m}$ .



Slika 5.4. Reprezentativni primjer optimiziranog O'Brien-McPherronovog modela bez Svalgaardove popravke s variranim parametrima za nisku razinu aktivnosti. Prikazana je geomagnetska oluja uzrokovana koroninim izabačajem mase od 29. veljače do 3. ožujka 2000. godine. Iznad slike su navedeni procjenjeni optimalni iznosi parametara za ovaj događaj.

Što se tiče umjerene razine aktivnosti, zanimljivo je promotriti ponašanje modela u slučaju geomagnetske oluje iz lipnja 2013. godine (slika 5.5). Optimizirana krivulja prolazi kroz izmjerene iznose  $Dst$  indeksa od trenutka minimuma do kraja faze oporavka, dok se krivulja običnog O'Brien-McPherronovog modela nalazi ispod svih izmjerenih vrijednosti. Parametri  $\alpha$  i  $b$  oblikuju nagli početak i glavnu fazu oluje pa zaključujemo da fazu oporavka mora kontrolirati parametar  $V_q$ . Što je iznos parametra  $V_q$  veći, to se  $Dst$  indeks brže vraća na baznu vrijednost koju je imao prije geomagnetske oluje i krivulja je strmija.

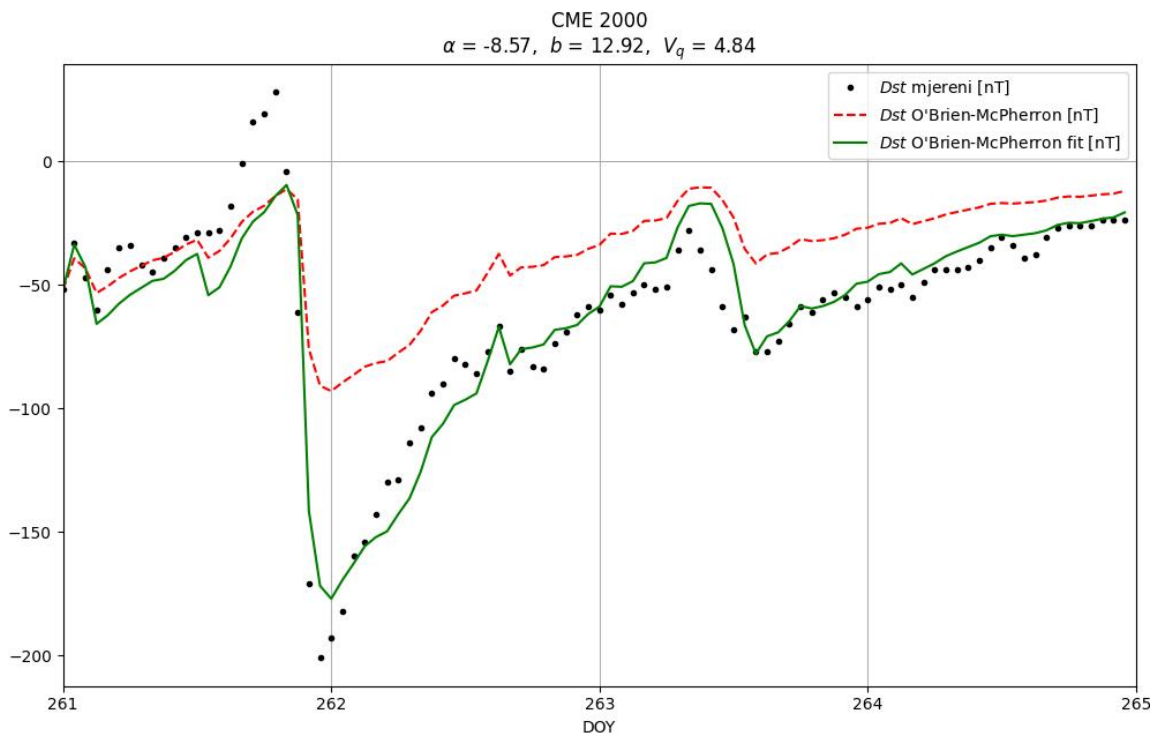
Također,  $V_q$  utječe na vertikalni pomak minimuma, ali u puno manjoj mjeri od parametra  $\alpha$ . Veći iznosi  $V_q$  će blago dignuti minimum u pozitivnom smjeru. To je u skladu s očekivanjem jer i  $\alpha$  i  $V_q$  skaliraju međudjelovanje  $y$ -komponente električnog polja IMF-a i konvekcijskog polja Zemlje koje uzrokuje ubacivanje i gubitak čestica iz prstenaste struje. Prosječni optimalni parametri za umjerenu razinu aktivnosti su  $\alpha = (-4, 3 \pm 0, 2)$  nT m (mV h)<sup>-1</sup>,  $b = (11 \pm 3)$  nT (nPa)<sup>-1/2</sup> i  $V_q = (5, 8 \pm 0, 3)$  mV/m. Prosječni  $\alpha$  je vrlo blizak O'Brien-McPherronovom iznosu od  $-4, 4$  nT m (mV h)<sup>-1</sup>, što objašnjava činjenicu da njihov model najbolje prognozira magnitudu minimuma glavne faze za geomagnetske oluje koje pripadaju ovoj razini. Parametar  $b$  se gotovo nije promijenio ni po rasponu ni po srednjoj vrijednosti u odnosu na obje prethodne razine aktivnosti, a  $V_q$  je vrlo sličan onome za nisku razinu.



Slika 5.5. Reprezentativni primjer optimiziranog O'Brien-McPherronovog modela bez Svalgaardove popravke s variranim parametrima za umjerenu razinu aktivnosti. Prikazana je geomagnetska oluja uzrokovana koroninim izabačajem mase od 5. do 8. lipnja 2000. godine. Iznad slike su navedeni procjenjeni optimalni iznosi parametara za ovaj događaj.

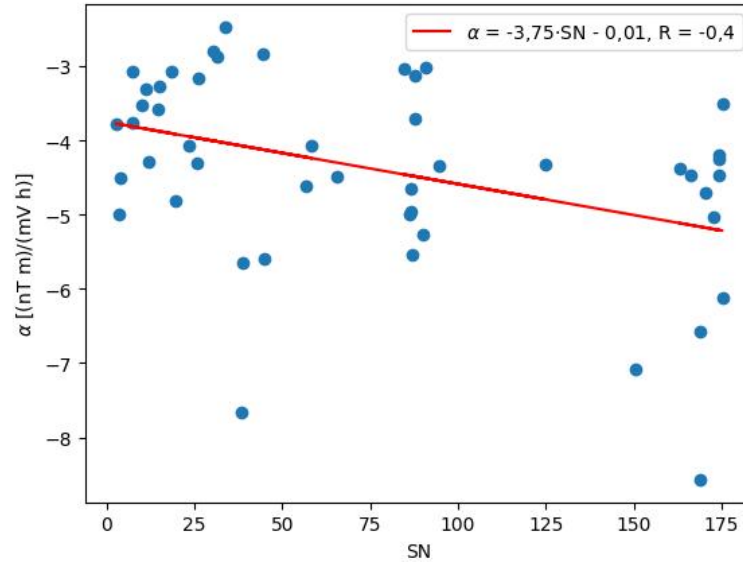
Od posebne je važnosti analiza visoke razine aktivnosti jer će omogućiti primjenu O'Brien-McPherronovog modela i na najsnažnije geomagnetske oluje. Pogledamo li rezultate tri ekstremna događaja koja smo naveli u poglavlju 5.1.1. (slika 5.6), vidjet ćemo da su magnitude najdubljih minimuma glavne faze prosječno podcijenjene za svega 25 nT od izmjenjenog iznosa, a to su omogućili veliki negativni iznosi parametra  $\alpha$ . Prosječni

optimalni  $\alpha$  za ovu razinu iznosi  $\alpha = (-5, 3 \pm 0, 2) \text{ nT m (mV h)}^{-1}$ . Poboljšanje prognoze magnitude maksimuma  $Dst$  indeksa postoji u većini slučajeva, ali nije toliko izraženo. Parametar  $b$  ponovno ima vrlo širok raspon, a prosječno iznosi  $(11 \pm 3) \text{ nT (nPa)}^{-1/2}$ . Prosječni  $V_q$  iznosi  $(5, 6 \pm 0, 3) \text{ mV/m}$  pa su krivulje tijekom faze oporavka strmije i bolje prate izmjerene vrijednosti.



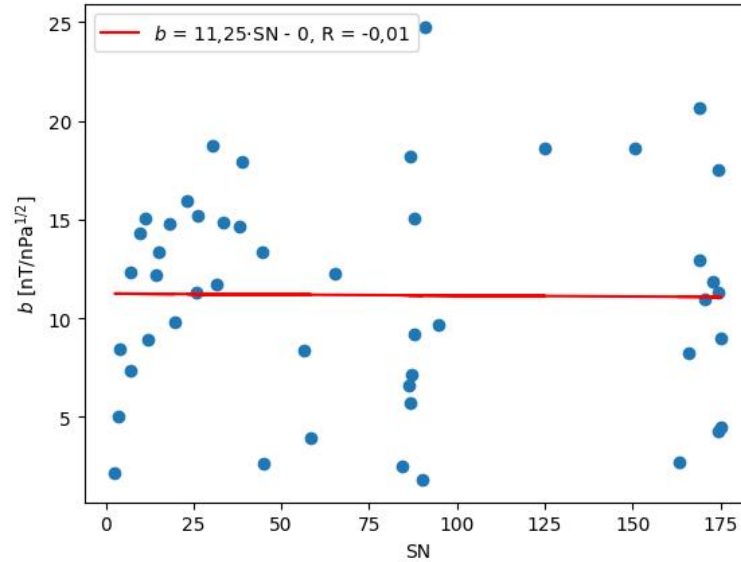
Slika 5.6. Reprezentativni primjer optimiziranog O'Brien-McPherronovog modela bez Svalgaardove popravke s variranim parametrima za visoku razinu aktivnosti. Prikazana je geomagnetska oluja uzrokovana koroninim izabačajem mase od 17. do 21. rujna 2000. godine. Iznad slike su navedeni procjenjeni optimalni iznosi parametara za ovaj događaj.

Dakle, pokazali smo da parametri  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  poprimaju različite vrijednosti za različite geomagnetske oluje. Kako smo oluje grupirali prema razinama solarne aktivnosti s obzirom na broj Sunčevih pjega, napravili smo regresijsku analizu između sva tri parametara i broja Sunčevih pjega da provjerimo postojanje ovisnosti iznosa parametara o razini aktivnosti. Na slici 5.7 vidimo dijagram raspršenja između optimalnih iznosa parametra  $\alpha$  za svih 48 događaja i mjesečnih srednjaka broja Sunčevih pjega tijekom tih događaja. Vidimo da apsolutne vrijednosti parametra  $\alpha$  rastu s većim brojem pjega, a linearnom regresijom smo dobili koeficijent korelacije jednak  $-0,4$ . Taj rezultat je u skladu s očekivanjem jer smo pokazali da  $\alpha$  određuje magnitudu minimuma  $Dst$  indeksa glavne faze oluje, a poznato je da intenzitet CME događaja, koji utječe na dubinu minimuma, raste s brojem pjega i većom solarnom aktivnošću.



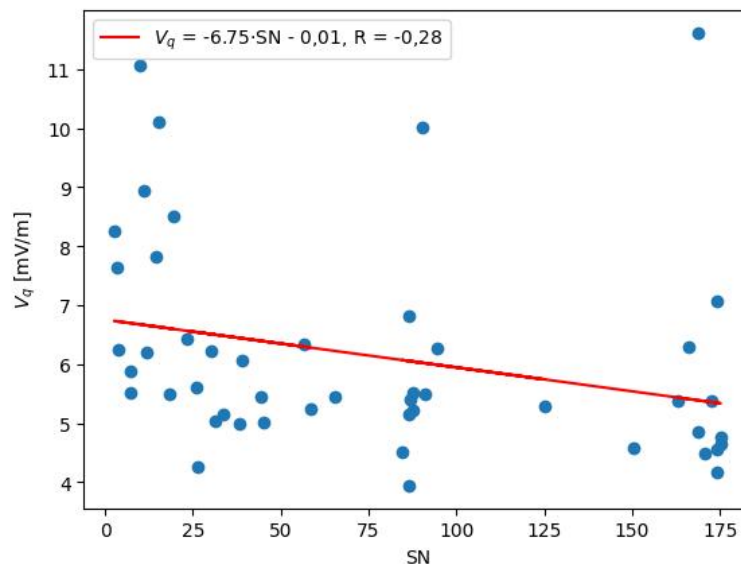
Slika 5.7. Linearna regresija između broja Sunčevih pjega i optimalnih iznosa parametra  $\alpha$  za O'Brien-McPherronov model bez Svalgaardove popravke.

Analogno, na slici 5.8 je prikazana linearna regresija između parametra  $b$  i broja pjega. Dijagram raspršenja ne pokazuje nikakvu ovisnost između vrijednosti  $b$  i broja pjega, a koeficijent korelacije linearne regresije je 0. Prethodno smo pokazali da je raspon optimalnih vrijednosti  $b$  za sve razine aktivnosti jako širok, ali su srednjaci po razinama gotovo isti. S obzirom da  $b$  predstavlja doprinos poremećaja struje magnetopauze zbog djelovanja dinamičkog tlaka Sunčevog vjetra, možemo zaključiti da magnitude poremećaja tlaka koji uzrokuju maksimum  $Dst$  indeksa pri naglom početku oluje ne ovise o razini solarne aktivnosti.



Slika 5.8. Linearna regresija između broja Sunčevih pjega i optimalnih iznosa parametra  $b$  za O'Brien-McPherronov model bez Svalgaardove popravke.

Konačno, slika 5.9 prikazuje dijagram raspršenja između optimalnih iznosa parametra  $V_q$  i broja Sunčevih pjega. Linearna regresija ukazuje na slabu korelaciju s koeficijentom korelacije  $-0,28$ . Očekujemo da postoji nekakva veza između  $V_q$  i broja pjega jer  $V_q$  kontrolira utjecaj električnog konvekcijskog polja unutar magnetosfere na brzinu kojom prstenasta struja dobiva i gubi čestice, a poznato je da na konvekcijsko polje utječe jačina električnog polja IMF-a, koja je pak određena brzinom i intezitetom magnetskog polja CME.



Slika 5.9. Linearna regresija između broja Sunčevih pjega i optimalnih iznosa parametra  $V_q$  za O'Brien-McPherronov model bez Svalgaardove popravke.

Možemo zaključiti kako uzimanje razine solarne aktivnosti u obzir značajno popravlja prognozu O'Brien-McPherronovog modela. Pokazali smo da parametar  $\alpha$  regulira intenzitet glavne faze geomagnetske oluje te da je umjereno koreliran s brojem Sunčevih pjega. Što je  $\alpha$  negativniji, to je minimum  $Dst$  indeksa dublji. Parametar  $b$  je najvažniji za prognozu magnitude maksimuma  $Dst$  indeksa tijekom naglog početka oluje i srednja vrijednost mu je gotovo ista za svaku razinu aktivnosti, ali za pojedini događaj može poprimiti vrijednosti iz vrlo širokog raspona ovisno o ponašanju dinamičkog tlaka Sunčevog vjetera tijekom tog događaja. Parametar  $V_q$  je slabo linearno koreliran s brojem pjega, a mijenja nagib krivulje za vrijeme faze oporavka tako da veći iznos  $V_q$  uzrokuje brži povratak  $Dst$  indeksa na baznu vrijednost.

## 5.2. O'Brien-McPherronov model sa Svalgaardovom popravkom

### 5.2.1. Konstantni iznosi parametara modela

Sve smo događaje također modelirali koristeći O'Brien-McPherronov model koji uključuje Svalgaardovu popravku sa konstantnim iznosima parametara:  $\alpha = -3,7 \text{ nT m (mV h)}^{-1}$ ,  $b = 8,6 \text{ nT (nPa)}^{-1/2}$ ,  $V_q = 4,7 \text{ mV/m}$ ,  $V_0 = 7,3 \text{ mV/m}$ ,  $c = 11 \text{ nT}$  i  $\tilde{\tau} = 2,4 \text{ h}$ . U odnosu na originalni model, promijenjeni su iznosi konstanti  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_0$ .

Pogledamo li svih 48 događaja, najviše se ističe činjenica da je za svaki događaj prognozirani minimum plići od onog kojeg prognozira običan O'Brien-McPherronov model. To



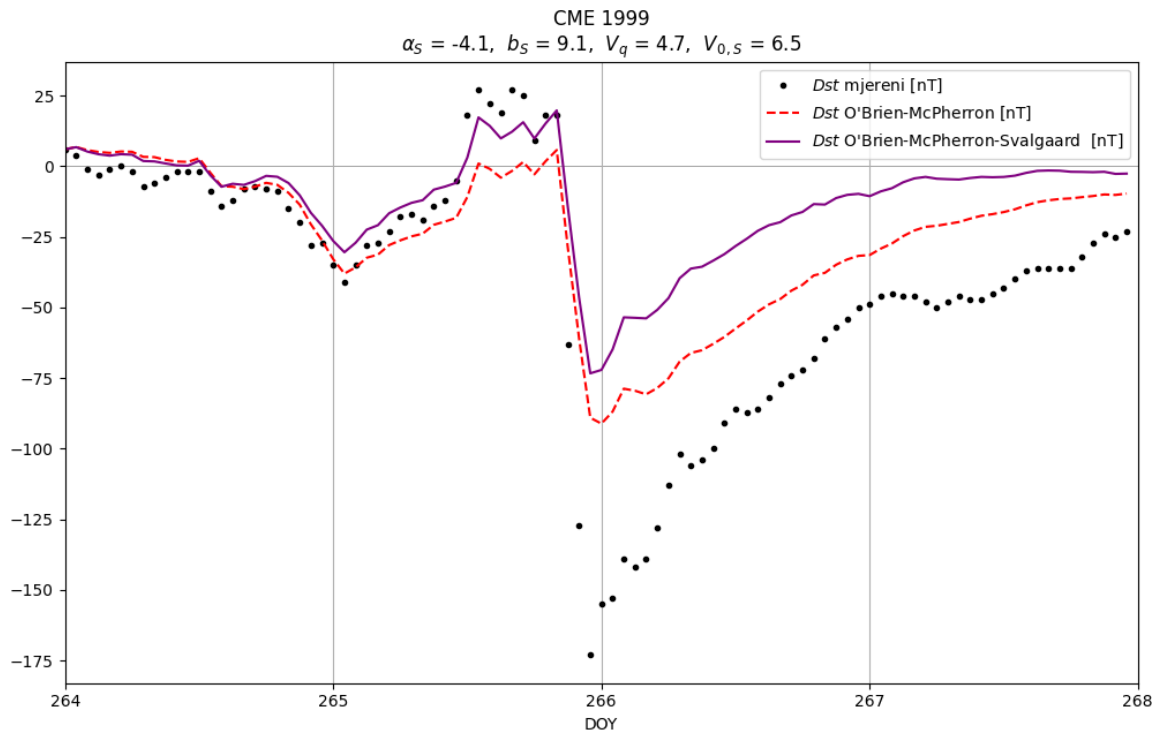
je dobro u slučaju vrlo niske razine aktivnosti gdje je originalni model konstantno precijenjivao magnitudu minimuma glavne faze, ali je loše za ostale razine, a pogotovo za vrlo visoku razinu jer model sa Svalgaardovom popravkom još više podcijenjuje jačinu geomagnetske oluje. Ranije smo pokazali da magnitudu minimuma određuje iznos parametra  $\alpha$ . Originalni model koristi isti konstantni iznos parametra  $\alpha = -4,4 \text{ nT m (mV h)}^{-1}$  kroz cijelu godinu, dok novi model zapravo varira iznos tog parametra ovisno o Svalgaardovoj funkciji,  $S(\psi)$  koja je se mijenja s UT vremenom. Zato je za pojedini događaj ukupni iznos parametra  $\alpha$ , kojeg ćemo označiti s  $\alpha_S$ , jednak umnošku konstante  $\alpha$  i trenutnog iznosa Svalgaardove funkcije, tj.  $\alpha_S = \alpha S(\psi)$ . Prvo, konstanta  $\alpha$  predložena za ovaj model iznosi  $-3,7 \text{ nT m (mV h)}^{-1}$ , što je više od iznosa originalnog modela. Drugo, Svalgaardova funkcija tijekom godine postiže iznose u rasponu od 0,74 do 1,14. Pri tome ima dva minimuma za vrijeme zimskog i ljetnog solsticija, a dva maksimuma postiže tijekom proljetnog i jesenskog ekvinocija. Dakle, ako se nalazimo u periodu godine kad je  $S(\psi) < 1$ , onda će za pojedini događaj biti  $\alpha_S > \alpha$  i model će prognozirati plići minimum *Dst* indeksa u glavnoj fazi oluje. No, čak i kad smo u dijelu godine kad je  $S(\psi) > 1$ ,  $\alpha_S$  će poprimati veće iznose od  $\alpha$ , a čak ni tijekom maksimuma Svalgaardove funkcije neće doseći originalnu O'Brien-McPherronovu vrijednost, što je posljedica dovoljno velike razlike u konstantnim iznosima  $\alpha$ . Zato za sve događaje uočavao pomak krivulje glavne faze u pozitivnom smjeru iznad krivulje običnog O'Brien-McPherronovog modela.

Ukupni parametar  $b$  ovog modela za pojedini događaj,  $b_S$  je jednak umnošku konstantnog iznosa i drugog korijena trenutnog iznosa Svalgaardove funkcije,  $b_S = b \sqrt{S(\psi)}$ . Dakle,  $b_S$  kroz godinu poprma iznose između  $7,39$  i  $9,18 \text{ nT (nPa)}^{-1/2}$ . Iznosi originalnog i novog parametra su jednaki samo za geomagnetske oluje oko solsticija, dok je za ostatak godine novi parametar uvijek malo veći. Zato se prognozirane krivulje naglog početka oluje oba modela ili poklapaju ili se češće nova krivulja nalazi malo iznad originalne i prognozira nešto veću magnitudu maksimuma *Dst* indeksa.

Konačno, ukupni parametar  $V_0$  modela sa Svalgaardovom popravkom,  $V_{0,S}$  jednak je konstantnom iznosu podijeljenom s iznosom Svalgaardove funkcije tijekom pojedine geomagnetske oluje,  $V_{0,S} = V_0 S^{-1}(\psi)$ . Zbog inverzne ovisnosti,  $V_{0,S}$  postiže svoj maksimum iznosa  $9,86 \text{ mV/m}$  oko solsticija, a minimum od  $6,40 \text{ mV/m}$  oko ekvinocija. Vidimo da maksimalni iznos odgovara konstanti  $V_0 = 9,7 \text{ mV/m}$  originalnog modela, a u ostatku godine je  $V_{0,S}$  manji. Parametar  $V_0$  utječe na ponašanje faze oporavka na način da manji iznosi  $V_0$  skraćuju vrijeme slabljenja prstenaste struje  $\tau$ , što znači da su gubitak čestica i povratak na baznu vrijednost *Dst* indeksa brži pa je i nagib krivulje strmiji.

Reprezentativan primjer O'Brien-McPherronovog modela sa Svalgaardovom popravkom je snažna geomagnetska oluja koja se desila tijekom jesenskog ekvinocija 1999. godine u

vrijeme visoke solarne aktivnosti (slika 5.10). Kao što smo prethodno naveli, iako prosječni  $\alpha_S$  tijekom ove oluje ima maksimalnu vrijednost od  $-4,1 \text{ nT m (mV h)}^{-1}$ , ona je i dalje manja od originalnog parametra  $\alpha$  pa vidimo da je prognozirani nešto blaži minimum  $Dst$  indeksa, odnosno prognozirani je minimum koji još više podcjenjuje intenzitet glavne faze oluje. Također, prosječni  $b_S$  je maksimalan pa model puno bolje doseže izmjereni maksimum naglog početka oluje. S druge strane, prosječni  $V_{0,S}$  tijekom ove geomagnetske oluje je minimalan zbog čega je krivulja faze oporavka pomaknuta iznad prognoze originalnog modela te je malo strmija.



Slika 5.10. Reprezentativni primjer O'Brien-McPherronovog modela sa Svalgaardovom popravkom s konstantnim parametrima za visoku razinu aktivnosti. Prikazana je geomagnetska oluja uzrokovana koroninim izabačajem mase od 21. do 25. rujna 1999. godine. Iznad slike su navedeni prosječni ukupni iznosi parametara tijekom ova četiri dana.

Zaključujemo kako Svalgaardova popravka ne doprinosi značajnom poboljšanju prognoze O'Brien-McPherronovog modela za pojedinačne geomagnetke oluje. Iako se vidi napredak u dobroj procjeni dubine minimuma  $Dst$  indeksa za vrlo nisku razinu solarne aktivnosti, za sve ostale razine imamo još veće podcjenjivanje intenziteta geomagnetske oluje, a mala poboljšanja u procjeni magnitude naglog početka nisu dovoljna da nadvladaju takve pogreške. Međutim, ovaj model niti nije namjenjen za točnu prognozu pojedinačnih oluja. Primarna mu je svrha statističkim vezama reproducirati opaženu varijaciju  $Dst$  indeksa tijekom jedne cijele godine. Ta je varijacija posljedica promjene u međudjelovanju

električnih polja IMF-a i magnetosfere. S obzirom da uzrok te promjene u međudjelovanju još nije poznat, Svalgaardova funkcija ju pokušava povezati s promjenom nagiba dipola Zemlje, tj. promjene kuta  $\psi$ .

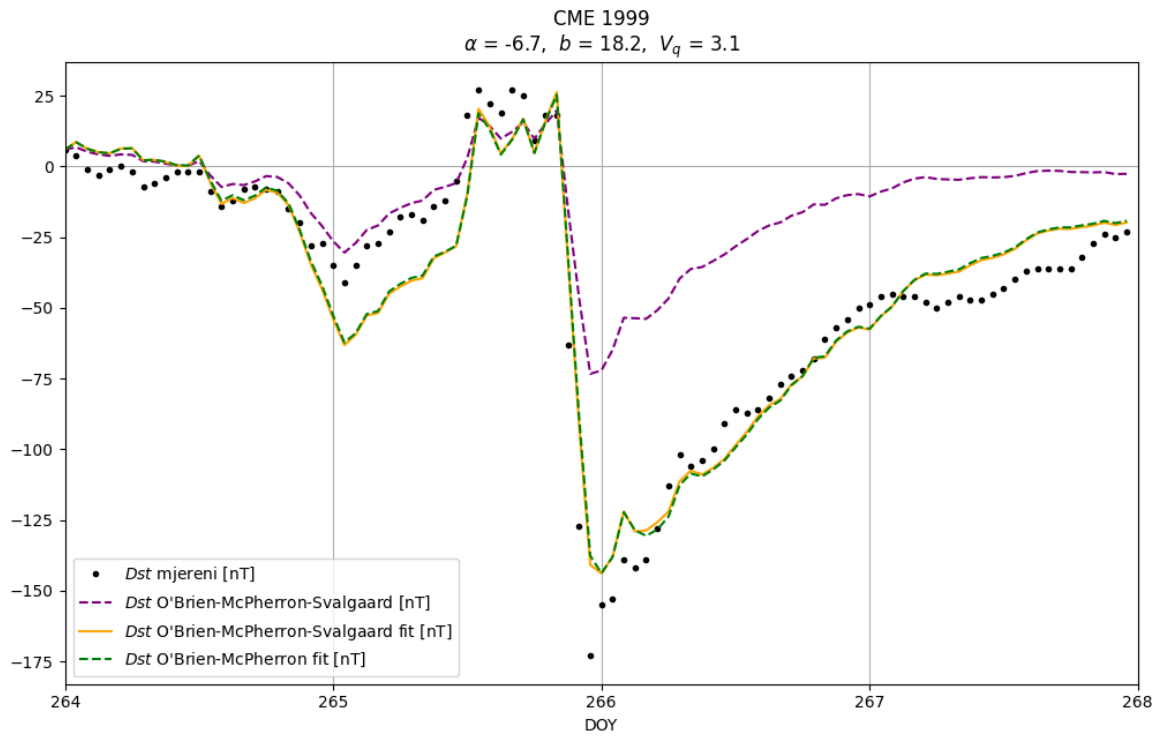
### 5.2.2. Optimalni iznosi parametara modela

Na kraju smo napravili i optimizaciju parametara  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  za O'Brien-McPherronov model sa Svalgaardovom popravkom. U tablici 5.2 su prikazani rasponi, srednje vrijednosti i standardne devijacije parametara  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  za svaku razinu aktivnosti, a rezultati pojedinačnih događaja se nalaze u dodatku C.

Tablica 5.2. Rasponi, srednje vrijednosti i standardne devijacije parametara  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  za O'Brien-McPherronov model sa Svalgaardovom popravkom po razinama solarne aktivnosti.

razina aktivnosti	$\alpha$ [nT m (mV h) <sup>-1</sup> ]			$b$ [nT (nPa) <sup>-1/2</sup> ]			$V_q$ [mV/m]		
	raspon	$\bar{\alpha}$	$\sigma$	raspon	$\bar{b}$	$\sigma$	raspon	$\bar{V}_q$	$\sigma$
vrlo niska	[-4,87, -3,11]	-4,1	0,3	[0,83, 15,60]	10	2	[3,61, 9,80]	5,8	0,6
niska	[-7,76, -2,85]	-4,5	0,2	[4,71, 18,71]	13	2	[2,69, 5,43]	4,1	0,2
umjerena	[-5,95, -3,42]	-4,6	0,2	[2,11, 26,79]	11	3	[2,91, 7,86]	4,4	0,3
visoka	[-8,14, -3,44]	-5,5	0,2	[4,95, 21,98]	12	2	[3,06, 9,43]	4,2	0,3

Uspjeli smo procijeniti optimalne iznose parametara i tako prilagoditi O'Brien-McPherronov model sa Svalgaardovom popravkom za prognozu izoliranih događaja. Ponovno vidimo da parametar  $\alpha$  najviše ovisi o broju Sunčevih pjega, dok parametar  $b$  ne ovisi o razini aktivnosti, ali se značajno mijenja od jedne geomagnetske oluje do druge. Za razliku od optimiziranog modela bez Svalgaardove popravke, u ovom slučaju imamo malo manju razliku između srednjih optimalnih iznosa  $V_q$  za vrlo nisku i ostale razine. To pripisujemo razlici u iznosu parametra  $V_0$  među modelima jer i  $V_q$  i  $V_0$  utječu na ponašanje krivulje tijekom faze oporavka. Iako smo sada dobili prognoze po razinama aktivnosti koje su puno bolje od modela sa Svalgaardovom popravkom i konstantnim parametrima, krivulje su gotovo identične onima koje daje optimizirani O'Brien-McPherronov model bez popravke (slika 5.11).



Slika 5.11. Reprezentativni primjer optimiziranog O'Brien-McPherronovog modela sa Svalgaardovom popravkom s variranim parametrima za visoku razinu aktivnosti. Prikazana je geomagnetska oluja uzrokovana koroninim izabačajem mase od 21. do 25. rujna 1999. godine. Iznad slike su navedeni procjenjeni optimalni iznosi parametara za ovaj događaj.

## 6. Zaključak

U ovom smo radu željeli provjeriti koliko je O'Brien-McPherronov model dobar za prognozu pojedinačnih geomagnetskih oluja u razdoblju 23. i 24. Sunčevog ciklusa te smo pokušali pronaći nove optimalne iznose parametara modela i provjeriti njihovu ovisnost o razini solarne aktivnosti definirane s obzirom na broj Sunčevih pjega. Također smo provjerili unosi li Svalgaardova funkcija, koja modulira utjecaj električnog polja IMF-a na magnetosferu u ovisnosti o UT vremenu, značajno poboljšanje u prognozu O'Brien-McPherronovog modela.

Najprije smo pokazali da O'Brien-McPherronov model može modelirati tipični izgled poremećaja *Dst* indeksa, ali da ne može precizno prognozirati magnitude maksimuma naglog početka geomagnetske oluje i minimuma indeksa tijekom glavne faze. Odstupanje prognoze maksimuma je približno jednako u svim slučajevima, dok se za minimum razlikuje među razinama aktivnosti. Za vrlo nisku razinu imamo konstantno precjenjivanje dubine minimuma, a kod visoke razine veliko podcjenjivanje. Potonje je veći problem jer dubina minimuma *Dst* indeksa govori o intenzitetu geomagnetske oluje, a snažnije geomagnetske oluje mogu nanijeti i veću štetu na tehnološke sustave u magnetosferi. Geomagnetske oluje koje pripadaju niskoj i umjerenoj razini aktivnosti su bolje prognozirane, a najmanje odstupanje u prognozi minimuma glavne faze imamo za umjerenu razinu. Niti u jednom slučaju model nije uspio pogoditi manje fluktuacije *Dst* indeksa koje su posljedica promjena u dinamičkom tlaku Sunčevog vjetra, a prognozirane krivulje faze oporavka su najčešće vertikalno pomaknute u odnosu na izmjerene iznose.

Zatim smo Levenberg-Marquardtovim algoritmom za rješavanje nelinearne metode najmanjih kvadrata procijenili optimalne iznose parametara  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  za sve četiri razine solarne aktivnosti. Pokazali smo da parametar  $\alpha$  kontrolira magnitudu minimuma *Dst* indeksa tijekom glavne faze. Veći apsolutni iznosi  $\alpha$  uzrokuju dublji minimum. To je tako jer  $\alpha$  skalira funkciju ubacivanja čestica u prstenastu struju, a što je ubacivanje veće, to je prstenasta struja jača i poremećaj horizontalne komponente geomagnetskog polja iz koje se računa *Dst* indeks je veći. Za vrlo nisku i nisku razinu aktivnosti smo dobili srednju optimalnu vrijednost  $\alpha$  koja je veća od O'Brien-McPherronove, a za umjerenu i visoku je manja, tj. negativnija. Time smo ispravili precjenjivanje slabih geomagnetskih oluja i podcjenjivanje geomagnetskih superoluja. Pokazali smo da je  $\alpha$  umjereno linearno koreliran s brojem Sunčevih pjega pri čemu je koeficijent korelacije  $-0,4$ . To je također u skladu s očekivanjem jer s porastom broja pjega raste i intenzitet CME, a snažnije geomagnetske oluje uzrokuju veću stopu ubacivanja solarnih čestica u magnetosferu. Parametar  $b$  je odgovoran za modeliranje maksimuma *Dst* indeksa tijekom naglog početka geomagnetske oluje te omogućuje modelu da bolje pogađa male promjene

indeksa zbog promjena dinamičkog tlaka Sunčevog vjetra. Pokazali smo da on ne ovisi o broju Sunčevih pjega, nego mijenja vrijednosti iz širokog raspona od jedne geomagnetske oluje do druge. Srednja optimalna vrijednost  $b$  za svaku razinu je gotovo ista i veća od O'Brien-McPherronovog iznosa, ali se slaže s Burtonovim iznosom od  $11 \text{ nT (nPa)}^{-1/2}$ . Pokazali smo da parametar  $V_q$  utječe na nagib krivulje tijekom faze oporavka te da u maloj mjeri mijenja vertikalni položaj minimuma  $Dst$  indeksa jer  $V_q$  kontrolira nepoznati mehanizam međudjelovanja električnih polja IMF-a i magnetosfere koji je odgovoran za ubacivanje i gubitak čestica iz prstenaste struje. Veći iznos  $V_q$  će uzrokovati strmiji nagib krivulje faze oporavka i malo dignuti minimum glavne faze u pozitivnom smjeru. Dobili smo slabu linearnu korelaciju između  $V_q$  i broja pjega s koeficijentom korelacije  $-0,28$ .

Nadalje, pokazali smo da Svalgaardova popravka ne unosi značajno poboljšanje u prognozu O'Brien-McPherronovog modela za pojedinačne događaje. To se dešava jer je tijekom cijele godine za model sa Svalgaardovom popravkom parametar  $\alpha$  pozitivniji od vrijednosti  $\alpha$  originalnog modela pa su prognoze magnitude minimuma uvijek pliće, što je posebno problematično za snažne geomagnetske oluje. S druge strane, u najvećem dijelu godine je novi parametar  $b$  malo veći od originalnog iznosa pa su magnitude naglog početka bolje pogođene, ali u manjoj mjeri nego što su minimumi lošije prognozirani. No, to smo i očekivali jer su O'Brien i McPherron iskoristili Svalgaardovu popravku kako bi pokušali numerički reproducirati opaženu godišnju varijaciju  $Dst$  indeksa, a ne radi preciznije prognoze izoliranih geomagnetskih oluja pa su iznosi parametara izračunati na temelju podataka i tijekom geomagnetskih oluja i tijekom mirnih razdoblja.

Konačno, radi potpunosti smo odredili i optimalne iznose parametara  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  za model sa Svalgaardovom popravkom za svaku razinu solarane aktivnosti. Uočili smo da parametri pokazuju iste ovisnosti o broju Sunčevih pjega kao za optimizirani model bez popravke, a male razlike u optimalnim iznosima konstanti između dvaju modela postoje kako bi se kompenzirao doprinos Svalgaardove funkcije u ukupnom iznosu parametara. Dakle, iako smo optimizacijom modela sa Svalgaardovom popravkom dobili puno bolje slaganje s izmjerenim podacima, krivulje su gotovo identične onima koje daje jednostavniji optimizirani model bez popravke. Zato predlažemo da se za prognozu pojedinačne geomagnetske oluje izazvane koroninim izbačajem mase koristi običan O'Brien-McPherronov model pri čemu se iznosi parametara biraju u skladu s razinom solarne aktivnosti za vrijeme te geomagnetske oluje.

## Literatura

Akasofu, S. I. i S. Chapman (1963). The development of the main phase of magnetic storms. *Journal of Geophysical Research* 68(1), 125 – 129.

Burlaga, L. F. i K. W. Ogilvie (1969). Causes of sudden commencements and sudden impulses. *Journal of Geophysical Research* 74(11), 2815 – 2825.

Burton, R. K., R. L. McPherron i C. T. Russell (1975). An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst. *Journal of Geophysical Research* 80(31), 4204 – 4214.

Carrington, R. C. (1863). *Observations of the spots on the Sun from November 9, 1853, to March 24, 1861, made at Redhill*. London: Williams and Norgate.

Chen, P. F. (2011). Coronal Mass Ejections: Models and their observational basis. *Living Reviews in Solar Physics* 8(1), 1 – 92.

Hale, G. E. (1908). On the probable existence of a magnetic field in sun-spots. *Astrophysical Journal* 28, 315 – 342.

Hale, G. E., F. Ellerman, S. B. Nicholson i A. H. Joy (1919). The magnetic polarity of sun-spots. *Astrophysical Journal* 49, 153 – 178.

Hale, G. E. i S. B. Nicholson (1925). The law of sun-spot polarity. *Astrophysical Journal* 62, 270 – 300.

King, J. H. i N. E. Papitashvili (2005). Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data. *Journal of Geophysical Research* 110, A02104, doi: 10.1029/2004JA010649.

Lester, M. (2007). Storms and substorms, magnetic. U: Gubbins, D., Herrero-Bervera, E., eds. *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Dordrecht: Springer, 926 – 928.

Maunder, E. W. (1904). Note on the distribution of sun-spots in heliographic latitude, 1874 to 1902. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 64(8), 747 – 761.

Moldwin, M. (2008). *An Introduction to Space Weather*. Cambridge: Cambridge University Press.

More, J. J. (1977). The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. U: Watson, G. A., ed. *Numerical Analysis. Lecture Notes in Mathematics* 630. Berlin, Heidelberg: Springer, 105 – 116.

- O'Brien, T. i R. L. McPherron (2000). An empirical phase space analysis of ring current dynamics: Solar wind control of injection and decay. *Journal of Geophysical Research* 105(A4), 7707 – 7719.
- O'Brien, T. i R. L. McPherron (2002). Seasonal and diurnal variation of Dst dynamics. *Journal of Geophysical Research* 107(A11), 1314, doi: 10.1029/2002JA009435.
- Piddington, J. H. (1963). Theories of the geomagnetic storm main phase. *Planetary and Space Science* 11(11), 1277 – 1288.
- Richardson, I. G. i H. V. Cane (2010). Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996 – 2009): Catalog and Summary of Properties. *Solar Physics* 264, 189 – 237.
- Schwabe, H. (1843). Sonnenbeobachtungen im Jahre 1843. *Astronomische Nachrichten* 21, 233–236.
- Siscoe, G. L., V. Formisano i A. J. Lazarus (1968). Relation between geomagnetic sudden impulses and solar wind pressure changes – an experimental investigation. *Journal of Geophysical Research* 73(15), 4869 – 4874.
- Verbanac, G. i M. Bandić (2021). Origin and characteristics of the southward component of the interplanetary magnetic field. *Solar Physics* 296(12), 183.



# Dodatci

## A Popis događaja

Popis odabranih 48 geomagnetskih oluja. Za svaku oluju su navedeni godina, dani početka i završetka oluje te srednji mjesečni broj Sunčevih pjega i izmjerena vrijednost minimuma  $Dst$  indeksa.

događaj	godina	DOY početak	DOY kraj	SN	$Dst_{\min}$
VN 1	1996	147	150	11.2	-33
VN 2	1997	9	11	14.5	-78
VN 3	2017	233	236	19.6	-48
VN 4	2017	251	253	18.3	-122
VN 5	2017	359	361	15.1	-27
VN 6	2018	68	71	9.9	-39
VN 7	2018	157	159	7.2	-25
VN 8	2018	176	179	7.2	-48
VN 9	2019	130	133	2.6	-51
VN 10	2019	133	136	3.9	-65
VN 11	2020	110	113	3.6	-59
VN 12	2020	278	281	11.9	-40
N 1	1997	195	198	30.4	-45
N 2	1997	214	217	33.6	-49
N 3	1997	245	249	38.2	-98
N 4	1998	6	9	58.4	-77
N 5	2004	311	314	56.6	-374
N 6	2005	139	143	45	-83
N 7	2005	162	166	44.5	-106
N 8	2005	303	306	38.9	-74
N 9	2006	103	107	26.2	-98
N 10	2006	230	234	25.9	-79
N 11	2016	286	290	31.5	-110
N 12	2017	147	150	23.3	-125
U 1	1998	47	51	65.4	-100
U 2	1999	106	109	125	-91
U 3	2003	323	326	86.9	-422
U 4	2011	217	220	86.3	-115

U 5	2011	269	271	86.6	-118
U 6	2012	137	139	90.2	-43
U 7	2012	168	171	86.6	-86
U 8	2012	196	200	84.5	-139
U 9	2012	305	309	87.7	-65
U 10	2012	317	321	87.7	-108
U 11	2013	157	159	90.9	-78
U 12	2013	186	189	94.6	-87
V 1	1999	264	268	150.5	-173
V 2	2000	21	25	166.1	-96
V 3	2000	42	45	170.6	-135
V 4	2000	60	63	174.3	-44
V 5	2000	97	100	175.2	-292
V 6	2000	114	118	175.2	-60
V 7	2000	159	162	172.7	-90
V 8	2000	197	200	174.2	-300
V 9	2000	201	204	174.2	-92
V 10	2000	245	248	168.8	-56
V 11	2000	261	265	168.8	-201
V 12	2000	311	314	163.1	-159

## B Rezultati optimizacije O'Brien-McPherronovog modela

Rezultati optimizacije običnog O'Brien-McPherronovog modela za 48 događaja. Za svaki su događaj navedeni procjenjeni najbolji iznosi parametara  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  i pripadne standardne devijacije te iznos prognozirano minimuma  $Dst$  indeksa.

događaj	$\alpha$	$\sigma_\alpha$	$b$	$\sigma_b$	$V_q$	$\sigma_{V_q}$	$Dst_{\min}$
VN 1	-3.315	0.215	15.05	1.394	8.931	0.7	-32.977
VN 2	-3.578	0.186	12.21	3.325	7.833	0.864	-73.469
VN 3	-4.815	0.468	9.777	2.451	8.509	1.218	-49.334
VN 4	-3.076	0.15	14.757	1.792	5.485	0.25	-128.829
VN 5	-3.276	0.476	13.36	3.326	10.102	1.797	-25.061
VN 6	-3.52	0.239	14.332	1.065	11.058	1.237	-37.477
VN 7	-3.066	0.216	7.358	1.481	5.881	0.367	-25.396
VN 8	-3.758	0.207	12.333	1.621	5.523	0.249	-46.902
VN 9	-3.777	0.268	2.149	2.205	8.253	0.993	-48.394
VN 10	-4.507	0.2	8.463	1.789	6.258	0.268	-61.577
VN 11	-4.995	0.385	5.053	1.824	7.648	0.656	-59.978
VN 12	-4.291	0.229	8.944	0.946	6.198	0.28	-40.531
N 1	-2.806	0.151	18.781	2.142	6.222	0.334	-47.534
N 2	-2.470	0.111	14.873	1.017	5.15	0.229	-50.674
N 3	-7.670	0.337	14.633	2.031	4.994	0.148	-93.506
N 4	-4.061	0.172	3.929	1.404	5.251	0.175	-73.782
N 5	-4.605	0.11	8.397	1.975	6.348	0.382	-351.31
N 6	-5.592	0.288	2.618	1.418	5.023	0.195	-76.735
N 7	-2.833	0.125	13.329	2.222	5.454	0.295	-92.146
N 8	-5.641	0.163	17.923	1.869	6.054	0.184	-70.606
N 9	-3.153	0.120	15.212	2.378	4.268	0.158	-83.174
N 10	-4.3	0.231	11.28	1.779	5.6	0.284	-81.119
N 11	-2.862	0.087	11.733	1.838	5.035	0.13	-106.84
N 12	-4.061	0.119	15.975	1.388	6.436	0.236	-108.544
U 1	-4.482	0.191	12.248	2.066	5.455	0.22	-100.871
U 2	-4.328	0.212	18.596	1.898	5.296	0.214	-83.863
U 3	-5.536	0.205	7.174	5.375	5.409	0.282	-405.866

U 4	-4.986	0.234	6.594	1.81	3.943	0.155	-95.415
U 5	-4.959	0.254	5.686	2.268	5.162	0.263	-117.119
U 6	-5.263	0.392	1.818	4.359	10.005	1.047	-39.221
U 7	-4.657	0.254	18.178	1.1	6.809	0.477	-79.387
U 8	-3.039	0.088	2.471	1.734	4.508	0.222	-126.69
U 9	-3.116	0.158	15.038	1.784	5.222	0.245	-60.704
U 10	-3.71	0.142	9.162	1.778	5.526	0.239	-100.562
U 11	-3.011	0.131	24.766	3.327	5.497	0.3	-72.396
U 12	-4.349	0.161	9.662	3.25	6.262	0.264	-84.267
V 1	-7.077	0.254	18.618	1.827	4.576	0.113	-143.824
V 2	-4.474	0.177	8.21	1.291	6.288	0.278	-93.703
V 3	-4.711	0.229	10.986	2.006	4.495	0.157	-108.265
V 4	-4.19	0.266	11.291	2.26	7.058	0.535	-39.188
V 5	-6.112	0.286	8.972	3.855	4.773	0.179	-268.664
V 6	-3.505	0.183	4.482	3.41	4.654	0.33	-57.675
V 7	-5.039	0.289	11.833	1.381	5.379	0.248	-80.860
V 8	-4.255	0.091	4.248	1.506	4.176	0.067	-309.359
V 9	-4.477	0.145	17.517	2.575	4.548	0.126	-88.218
V 10	-6.579	0.466	20.63	2.561	11.615	1.425	-57.848
V 11	-8.569	0.377	12.916	2.17	4.844	0.119	-177.120
V 12	-4.379	0.2	2.694	3.233	5.385	0.262	-131.628

## C Rezultati optimizacije O'Brien-McPherronovog modela sa Svalgaardovom popravkom

Rezultati optimizacije O'Brien-McPherronovog modela sa Svalgaardovom popravkom za 48 događaja. Za svaki su događaj navedeni procjenjeni najbolji iznosi konstanti  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  i pripadne standardne devijacije te iznos prognoziranog minimuma  $Dst$  indeksa.

događaj	$\alpha$	$\sigma_\alpha$	$b$	$\sigma_b$	$V_q$	$\sigma_{V_q}$	$Dst_{\min}$
VN 1	-4.041	0.283	15.383	1.572	7.282	0.655	-32.824
VN 2	-4.322	0.251	11.75	4.033	6.19	0.875	-73.944
VN 3	-4.868	0.411	10.188	2.261	6.326	0.862	-47.837
VN 4	-3.112	0.136	15.603	1.678	3.607	0.169	-131.844
VN 5	-3.893	0.466	12.971	3.176	9.798	1.594	-25.792
VN 6	-3.299	0.217	13.475	1.002	7.138	0.807	-37.182
VN 7	-3.699	0.272	6.9	1.603	4.544	0.285	-25.713
VN 8	-4.535	0.232	11.933	1.591	4.524	0.197	-47.934
VN 9	-3.726	0.23	0.828	2.133	5.441	0.553	-46.777
VN 10	-4.437	0.169	8.175	1.598	4.809	0.181	-61.057
VN 11	-4.841	0.370	4.898	1.773	5.921	0.536	-59.351
VN 12	-4.031	0.211	8.635	0.910	4.266	0.199	-40.526
N 1	-3.215	0.173	18.711	2.179	4.847	0.267	-46.147
N 2	-2.847	0.128	14.956	1.037	3.781	0.171	-50.044
N 3	-7.762	0.359	14.681	2.083	3.377	0.107	-94.3
N 4	-4.551	0.188	4.796	1.434	4.288	0.147	-70.405
N 5	-5.301	0.123	9.994	1.93	4.279	0.285	-343.847
N 6	-6.014	0.27	4.709	1.314	4.129	0.153	-80.005
N 7	-3.57	0.155	13.7	2.348	4.799	0.283	-92.585
N 8	-5.715	0.151	18.271	1.775	4.607	0.139	-71.205
N 9	-3.111	0.1	14.21	2.107	2.687	0.098	-83.877
N 10	-4.744	0.242	12.226	1.747	4.099	0.216	-81.128
N 11	-2.909	0.079	11.512	1.686	3.374	0.083	-106.415
N 12	-4.504	0.129	16.604	1.536	5.427	0.21	-111.223
U 1	-4.475	0.173	11.671	1.914	3.777	0.152	-96.55
U 2	-4.452	0.201	18.707	1.836	3.785	0.151	-84.34
U 3	-5.528	0.243	5.138	6.564	4.031	0.284	-419.141

U 4	-5.632	0.272	6.166	1.879	2.909	0.123	-97.072
U 5	-4.816	0.23	6.023	2.062	3.339	0.174	-117.209
U 6	-5.949	0.465	2.969	4.707	7.86	0.991	-40.231
U 7	-4.92	0.25	19.024	1.105	5.485	0.376	-80.03
U 8	-3.609	0.092	2.105	1.589	3.688	0.186	-123.876
U 9	-3.416	0.166	15.469	1.732	3.979	0.196	-62.719
U 10	-4.188	0.162	10.103	1.973	4.116	0.192	-97.757
U 11	-3.555	0.125	26.79	3.063	4.738	0.233	-73.91
U 12	-4.64	0.162	7.226	3.415	4.782	0.193	-82.614
V 1	-6.743	0.23	18.191	1.708	3.058	0.075	-143.867
V 2	-4.752	0.171	8.911	1.26	4.876	0.216	-91.323
V 3	-5.284	0.256	13.93	2.205	3.258	0.122	-111.31
V 4	-4.246	0.264	10.667	2.334	5.004	0.42	-39.16
V 5	-6.212	0.286	7.267	3.647	3.148	0.125	-274.343
V 6	-3.438	0.178	5.323	3.463	3.45	0.267	-54.992
V 7	-5.812	0.355	13.314	1.628	4.24	0.21	-77.509
V 8	-5.46	0.105	7.259	1.515	3.342	0.048	-319.041
V 9	-4.756	0.157	18.364	2.912	3.616	0.114	-87.447
V 10	-6.522	0.436	21.979	2.407	9.428	1.313	-58.597
V 11	-8.144	0.347	12.355	2.052	3.253	0.081	-175.169
V 12	-4.769	0.187	4.953	3.022	3.813	0.166	-129.671

## D Programi, podaci i rezultati priloženi na CD-u

Popis korištenih Python programa i podataka koje smo analizirali u radu te dobivenih slika. Svi programi, podaci i slike su priloženi na CD-u.

1. krivulje\_1.py
2. krivulje\_2.py
  - Programi koji crtaju krivulje O'Brien-McPherronovog i O'Brien-McPherronovog modela sa Svalgaardovom popravkom uz konstantne iznose parametara za 48 odabranih događaja.
3. krivulje\_3.py
4. krivulje\_4.py
  - Programi koji traže optimalne iznose parametara  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  O'Brien-McPherronovog i O'Brien-McPherronovog modela sa Svalgaardovom popravkom za svaki od 48 događaja koristeći Levenberg-Marquardtov algoritam te crtaju pripadne krivulje.
5. linregres.py
  - Program koji računa linearnu regresiju između parametara  $\alpha$ ,  $b$  i  $V_q$  sa brojem Sunčevih pjega te crta dijagram raspršenja i pravac regresije za svaki parametar.
6. VeryLowSN.rar
7. LowSN.rar
8. MidSN.rar
9. HighSN.rar
  - Sadrže po 12 tekstualnih datoteka s podacima za pojedinačne događaje svake razine aktivnosti o mjesečnom srednjaku broja Sunčevih pjega, terminu događaja (godina, DOY, sat), vrijednostima parametara Sunčevog vjetra ( $B$ ,  $B_z$ ,  $V$ ,  $p$ ) i vrijednostima geomagnetskog  $Dst$  indeksa.
10. psi.csv
  - Tablica satnih vrijednosti kuta  $\psi$  i Svalgaardove funkcije za 2001. godinu.



11. krivulje\_1.rar

- Sadrži 48 slika krivulja O'Brien-McPherronovog modela koje je dao program krivulje\_1.py.

12. krivulje\_2.rar

- Sadrži 48 slika krivulja O'Brien-McPherronovog modela sa Svalgaardovom popravkom koje je dao program krivulje\_2.py.

13. krivulje\_3.rar

- Sadrži 48 slika krivulja optimiziranog O'Brien-McPherronovog modela koje je dao program krivulje\_3.py.

14. krivulje\_4.rar

- Sadrži 48 slika krivulja optimiziranog O'Brien-McPherronovog modela sa Svalgaardovom popravkom koje je dao program krivulje\_4.py.