

# Utjecaj vulkanske aktivnosti na raspršenje položaja određenog satelitskim navigacijskim sustavima

---

Toman, Ivan

Doctoral thesis / Disertacija

2022

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:094798>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-04**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET

Ivan Toman

**UTJECAJ VULKANSKE AKTIVNOSTI NA  
RASPRŠENJE POLOŽAJA ODREĐENOG  
SATELITSKIM NAVIGACIJSKIM SUSTAVIMA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Rijeka, 2022.

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET

Ivan Toman

**UTJECAJ VULKANSKE AKTIVNOSTI NA  
RASPRŠENJE POLOŽAJA ODREĐENOG  
SATELITSKIM NAVIGACIJSKIM SUSTAVIMA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: dr. sc. Serđo Kos, red. prof.

Komentor: dr. sc. David Brčić, izv. prof.

Rijeka, 2022.

UNIVERSITY OF RIJEKA  
FACULTY OF MARITIME STUDIES

Ivan Toman

**EFFECTS OF VOLCANIC ACTIVITY ON THE  
DISPERSION OF POSITION DERIVED FROM  
SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2022.

*Posvećeno Elzi i Olegu*

## **Zahvala**

*Moje putovanje kroz doktorski studij ne bi bilo moguće realizirati bez srdačne potpore mnogih koji su me pratili u toj plovidbi. Ponekad nemirnoj, ali, to je more. Hvala svima!*

*U prvom redu moram izdvojiti nesebičnu potporu mentora i komentora, ali nadasve kolega i prijatelja, prof. dr. sc. Serđa Kosa i izv. prof. dr. sc. Davida Brčića, koji su uvijek bili na raspolaganju kad je bilo potrebno. Hvala vam za sve vrijeme koje ste izdvojili za mene i za nemjerljivu znanstvenu, tehničku, administrativnu i svaku drugu pomoć. Hvala Davidu i na neizravnoj pomoći; njegovi znanstveni radovi i posebice disertacija imali su velik inspirativni utjecaj na pisanje moje disertacije, a taj utjecaj se zacijelo i osjeća kroz tekst.*

*Nadalje, hvala članovima povjerenstva na konstruktivnim savjetima i pomoći, posebno dragom profesoru Branku Grisogonu.*

*Veliko hvala dugujem Dariju Brzoi i Izidoru Pelajiću na pomoći u pronalaženju hrvatskih riječi za stručne engleske izraze i drugim savjetima iz njihovog područja interesa.*

*Ne smijem zaboraviti posvetiti pasus zahvale prijatelju Ninu Rašiću, čiji su programerski savjeti značajno olakšali statističku analizu i time ubrzali tijek istraživanja.*

*Zahvaljujem svojim kolegama na Pomorskom odjelu Sveučilišta u Zadru na potpori i toplom kolegijalnom odnosu. Posebna zahvala ide Mati Kosoru na nesebičnoj pomoći oko matematičkih problema. Hvala i kolegi i velikom prijatelju Luki Grbiću na podršci.*

*Naposljetku, hvala i svim mojim prijateljima koji su imali razumijevanja za sve vrijeme koje im nisam mogao posvetiti, ispunjavajući obveze dokorskog studija.*

Mentor: dr. sc. Serđo Kos, red. prof.

Komentor: dr. sc. David Brčić, izv. prof.

Doktorska disertacija je obranjena 20. lipnja 2022. na Pomorskom fakultetu u Rijeci, pred Povjerenstvom za obranu u sastavu:

- 1) dr. sc. Jasmin Ćelić, izv. prof., Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, predsjednik
- 2) dr. sc. Branko Grisogono, red. prof., Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički odsjek, član
- 3) dr. sc. Sanjin Valčić, doc., Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, član.

Zamjenski član:

- 1) dr. sc. Zoran Mrak, doc., Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet.

## Sažetak

Satelitski navigacijski sustavi danas nalaze široku upotrebu u prometu i brojnim drugim suvremenim djelatnostima, a koriste se sve intenzivnije i za potrebe znanstvenih istraživanja. U pomorstvu, satelitska navigacija predstavlja temeljni način određivanja položaja i vođenja navigacije. Učinak elektriciteta u Zemljinoj atmosferi na raspršenje položaja izračunanog satelitskim sustavima je vrlo dobro poznat i značajan je u dijelu pomorskih operacija koje zahtijevaju visoki stupanj točnosti. U satelitskoj tehnologiji, uobičajena mjera za količinu elektriciteta u atmosferi je ukupni sadržaj elektrona, kao broj slobodnih elektrona između satelita i površine Zemlje u stupcu presjeka  $1\text{m}^2$  (engl. *Total Electron Content*, TEC). Istraživanja sprege litosferne dinamike i električnih svojstava atmosfere su tek u začetku. Posebno utjecaj vulkanske aktivnosti na atmosferski elektricitet nije dovoljno istražen. Zbog toga su i posljedični učinci vulkanske aktivnosti na položajnu točnost satelitski izračunanog položaja nepoznati.

Cilj disertacije je temeljem statističke analize sprege vulkanske aktivnosti i raspršenja položaja dobivenog satelitskim navigacijskim sustavima odrediti kvalitativne i kvantitativne povezanosti dvaju promatranih objekata istraživanja. U tu svrhu, analizirana je aktivnost 6 vulkana za razdoblje 2000. – 2021., u kontekstu položajne točnosti satelitski određenog položaja u njihovoj blizini. Vulkanska aktivnost je karakterizirana satelitski određenom spektralnom radijancijom kao mjerom za toplinsko zračenje. Raspršenje položaja je određeno iz podataka referentnih GNSS (engl. *Global Navigation Satellite System*) stanica, a kao metoda određivanja položaja izabrano je jednofrekvencijsko određivanje položaja GPS (engl. *Global Positioning System*) sustavom, s modeliranom ionosferskom ispravkom, ali bez korištenja diferencijalnih usluga i ostalih metoda poboljšanja točnosti položaja. Položajna točnost je analizirana kroz 24-satnu aritmetičku sredinu pogreške, srednju kvadratnu pogrešku i standardnu devijaciju pogreške izračuna položaja u blizini vulkana, a kao moguć eksplanatoran parametar za dobivene rezultate analizirana je 24-satna aritmetička sredina i standardna devijacija ukupnog sadržaja elektrona nad vulkanskim područjem.



Istraživanjem je utvrđena korisnička položajna statistička ravnoteža u funkciji vulkanske aktivnosti i pripadajućoj raspodjeli TEC vrijednosti. Rezultati usporedbe položajne točnosti kroz promatrane statističke pokazatelje u aktivnim i neaktivnim periodima vulkana, pokazuju značajne kvantitativne razlike između pojedinih analiziranih vulkana, ali i prilično konzistentan kvalitativni obrazac, poboljšanje položajne točnosti u blizini eruptirajućih vulkana i to za 5 ili 6 (ovisno o promatranim statističkim pokazateljima) od 6 promatranih vulkana. Pritom se izbačen vulkanski aerosol u visinu stratosfere, hipotezom postavlja kao temeljni uzročnik koji ograničava amplitudu ukupnog sadržaja elektrona u ionosferi iznad aktivnog vulkanskog područja, čime posljedično umanjuje pogreške jednofrekvencijskog određivanja položaja GPS sustavom. Rezultati osim toga pokazuju i opadanje točnosti udaljavanjem korisnika sustava od aktivnog vulkana kao i slabljenjem stupnja vulkanske aktivnosti. Iz visoke stohastičnosti rezultata proizlaze specifičnosti statističkog modeliranja izučavane povezanosti, a takvi rezultati ujedno ukazuju i na temeljnu činjenicu da vulkanska aktivnost predstavlja tek sekundaran učinak na položajnu točnost satelitskih navigacijskih sustava, nakon utjecaja Sunčeve aktivnosti, kozmičkog zračenja i drugih primarnih forsirajućih čimbenika na Zemljinu ionosferu. Pokazano je također da pri analizi utjecaja vulkanske aktivnosti na raspršenje položaja određenog GPS sustavom, spomenuti primarni čimbenici stvaraju značajan otežavajući element i umanjeње njihovih učinaka u procesu analize predstavlja velik metodološki izazov. Konačna razmatranja rezultata su pokazala potrebu za proširenjem budućih istraživanja na učinak vulkanske aktivnosti na ostale GNSS sustave i posebno na preciznije metode određivanja položaja satelitskim navigacijskim sustavima.

**Ključne riječi:** globalni navigacijski satelitski sustavi, globalni položajni sustav, raspršenje položaja, litosferna dinamika, vulkanska aktivnost, ukupni sadržaj elektrona, ionosfera, sprega litosfere, atmosfere i ionosfere.

## **Abstract**

Satellite navigation systems have wide application in traffic and many other contemporary activities, while also being increasingly used for scientific research purposes. In maritime traffic, satellite navigation methods are basic means of positioning and navigation. The effect of atmospheric electricity to the dispersion of position derived from satellite navigation systems is well known and it is important in maritime activities where high positional accuracy is required. In satellite technology, the value of Total Electron Content (TEC) is often used as a measure of atmospheric electricity. It is a number of free electrons contained within column of  $1\text{m}^2$  cross section between satellite and surface of the Earth. Scientific research of the coupling between lithosphere dynamics and electrical properties of the atmosphere is at its early developing stage. Specifically, the influence of volcanic activity to the atmospheric electricity is not well understood yet. Because of that, the effects of volcanic activity to the positional accuracy of satellite derived position are not known.

The goal of dissertation is by implementing statistical approach to analyze coupling between volcanic activity and dispersion of position derived from satellite navigation systems, to determine qualitative and quantitative relationship of those objects of research. To that end, the activity of total of 6 volcanoes are analyzed across period between 2000 and 2021 in a context of positional accuracy in their vicinity. The volcanic activity is represented by spectral radiance measured from satellites. The dispersion of position is determined from the data of GNSS (Global Navigation Satellite System) reference stations, while as a method of calculating position, the single frequency, single point positioning is chosen, with modelled ionospheric correction but without using differential services or other means or methods of improving positional accuracy. The positional accuracy is analyzed through 24-hours arithmetic mean of error, mean squared error and standard deviation of error of calculated position in vicinity of volcano. As a possible explanatory parameter for derived results, 24-hour arithmetic mean and standard deviation of total electron content above volcanic area is analyzed.

The research determined the user positional statistical balance in the function of volcanic activity and the corresponding distribution of TEC values. The results of comparison of positional accuracy across used statistical indicators during active and inactive volcanic periods show important quantitative differences among different volcanoes, but also pretty consistent qualitative pattern — the improvement of positional accuracy near active volcanoes for 5 or 6 of 6 analyzed volcanoes, depending on statistical indicator used. The volcanic aerosol injected into stratospheric region is hypothesized to be a basic cause that limits the amplitude of total electron content within ionosphere above active volcanic area, consequently reducing single frequency positional errors from GPS (Global Positioning System). Results also show decreasing of positional accuracy by increasing user distance from active volcano and also reducing accuracy with decreased volcanic activity levels. The specifics of statistical modelling are derived from highly stochastic nature of results, and such results also point to the basic matter of fact — volcanic activity is found to be a secondary factor that effects accuracy of position derived from satellite navigation systems. It only comes after the primary forcing effects on the ionosphere and positional accuracy, such as solar and cosmic rays' activity. It is also shown that those primary forcing effects represent important factor that makes the analyzing of volcanic activity driven effects difficult and thus, reducing their influence to the analysis comes as a great challenge. Final discussion of results has shown the need to expand the future research efforts to the effects of volcanic activity on other GNSS systems and in particular on more accurate methods of positioning using satellite navigation systems.

**Keywords:** Global Navigation Satellite System, Global Positioning System, dispersion of position, lithosphere dynamics, volcanic activity, total electron content, ionosphere, lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling.

# Sadržaj

## 1 Uvod 1

1.1 Problem, motivacija, predmet i objekti istraživanja 4

1.2 Znanstvena hipoteza i pomoćne hipoteze 7

1.3 Svrha i ciljevi istraživanja 8

1.4 Prikaz korištenih znanstvenih metoda 11

1.5 Opis strukture disertacije 13

## 2 Koncept GNSS sustava i određivanja korisničkog položaja 17

2.1 Određivanje korisničkog položaja GNSS sustavima 17

2.1.1 Satelitski navigacijski sustavi 18

2.1.2 Temeljni princip određivanja korisničkog položaja GNSS sustavima 20

2.1.3 Relativistički učinci na mjerenje vremena u GNSS sustavima 24

2.1.4 Složeniji modaliteti određivanja položaja GNSS sustavima 26

2.1.4.1 Višefrekvencijsko i višekonstelacijsko određivanje položaja 26

2.1.4.2 Diferencijalne metode određivanja položaja 27

2.1.5 Struktura satelitskih signala za određivanje položaja 31

2.2 Segmenti GNSS sustava 36

2.3 Prostiranje satelitskih radiovalova 37

2.4 Izvori pogreški i proračun odstupanja u određivanju položaja GNSS sustavima 40

2.5 Utjecaj odstupanja položaja na sigurnost pomorskog prometa 42

## 3 Ionosfersko kašnjenje GNSS signala 47

3.1 Atmosfera, ionosfera i struktura ionosfere 47

3.2 Električni naboj, polje, struje i električna vodljivost atmosfere 51

3.3 Prostorna raspodjela električnog naboja u atmosferi 56

3.3.1 Raspodjela ionizacije atmosfere po visini 56

3.3.2 Raspodjela ionizacije zraka po zemljopisnoj širini 58

<b>3.4</b>	<b>Temeljni koncept modela globalnog električnog kruga</b>	<b>59</b>
<b>3.5</b>	<b>Kemijski i fizikalni ionosferski procesi</b>	<b>62</b>
<b>3.6</b>	<b>Izvori ionizacije atmosfere</b>	<b>65</b>
3.6.1	Ionizacija u procesima konvektivne naoblake	65
3.6.2	Ionizacija Sunčevim zračenjem	66
3.6.3	Ionizacija kozmičkim zračenjem	69
3.6.4	Ionizacija radioaktivnim raspadom	70
3.6.4.1	Radon	70
3.6.4.2	Radioaktivni raspad	71
3.6.4.3	$\alpha$ -raspad i $\alpha$ -čestice	73
3.6.4.4	$\beta$ -raspad i $\gamma$ -zračenje	75
3.6.4.5	Ionizacija radioaktivnim raspadom radona i zračenjem iz tla	76
<b>3.7</b>	<b>Ponori električnog naboja</b>	<b>80</b>
<b>3.8</b>	<b>Utjecaj aerosola na električna svojstva atmosfere</b>	<b>82</b>
<b>3.9</b>	<b>Utjecaj meteoroloških parametara i sastava zraka te antropogenog onečišćenja na ionizaciju</b>	<b>84</b>
<b>3.10</b>	<b>Ukupni sadržaj elektrona</b>	<b>86</b>
<b>3.11</b>	<b>Periodične promjene ukupnog sadržaja elektrona</b>	<b>87</b>
<b>3.12</b>	<b>Neperiodične promjene ukupnog sadržaja elektrona</b>	<b>89</b>
<b>3.13</b>	<b>Ionosferski učinci na satelitske navigacijske signale</b>	<b>92</b>
<b>3.14</b>	<b>Utjecaj ukupnog sadržaja elektrona na određivanje korisničkog položaja</b>	<b>94</b>
<b>3.15</b>	<b>Ispravljanje ionosferskog kašnjenja modeliranjem ionosfere</b>	<b>96</b>
3.15.1	Klobucharov model	97
3.15.2	NeQuick-G model	101
<b>3.16</b>	<b>Metode određivanja ukupnog sadržaja elektrona u ionosferi</b>	<b>102</b>
<b>3.17</b>	<b>Numeričke ionosferske mape</b>	<b>106</b>
<b>4</b>	<b>Sprega litosfere, atmosfere i ionosfere</b>	<b>108</b>
4.1	Utjecaj potresa na ukupan sadržaj elektrona	112

4.2	Upotreba GNSS sustava u istraživanjima seizmički generiranih ionosferskih anomalija	114
4.3	Dosadašnja istraživanja učinaka vulkanske aktivnosti na atmosferski elektricitet i ionosferu	118
4.4	Pregled vlastitih istraživanja	121
<b>5</b>	<b>Strukturna analiza utjecaja vulkanske aktivnosti na raspršenje GPS položaja i ukupan sadržaj elektrona</b>	<b>126</b>
5.1	Područje istraživanja, odabrani vulkani i razdoblje za analizu	127
5.2	Izvori informacija i podataka korištenih u analizi	130
5.2.1	Fizikalni koncept daljinskih motrenja i mjerenja aktivnosti vulkana	130
5.2.2	Satelitsko praćenje i mjerenje aktivnosti vulkana	133
5.2.3	Satelitski termalni senzori MODIS	135
5.2.4	Sustav za automatizirano praćenje vulkanske aktivnosti MODVOLC	138
5.2.5	Međunarodna GNSS služba	140
5.2.6	Jednofrekvencijski proračun položaja referentne stanice u GPS sustavu	141
5.2.7	Korištene referentne stanice za proračun položaja	146
5.2.8	Filtriranje neispravnih podataka s referentnih stanica	147
5.3	Metodologija proračuna odstupanja položaja u GPS sustavu	149
5.4	Metodologija proračuna ukupnog sadržaja elektrona	151
5.5	Statistička analiza odstupanja položaja i ukupnog sadržaja elektrona u ovisnosti o vulkanskoj aktivnosti	153
5.5.1	Proračun i ispravka globalnih čimbenika koji utječu na odstupanje položaja	154
5.5.2	Ujednačavanje frekvencije podataka i korišteni statistički pokazatelji	158
5.5.3	Grupiranje aktivnih i neaktivnih dana i izračun srednjih vrijednosti u grupama	159
5.6	Rezultati analize odstupanja položaja i ukupnog sadržaja elektrona u ovisnosti o vulkanskoj aktivnosti	161

5.6.1	Odvojene analize odstupanja položaja i ukupnog sadržaja elektrona za noćne i dnevne periode	165
5.6.2	Izračun površina između krivulja za aktivne i neaktivne dane	169
5.6.3	Rezultati izračuna površina između krivulja aktivne i neaktivne grupe	171
5.6.4	Osjetljivost odstupanja položaja s obzirom na intenzitet aktivnosti vulkana	175
5.7	<b>Analiza prostornog utjecaja vulkanske aktivnosti na odstupanje položaja</b>	<b>178</b>
5.8	<b>Razmatranja prezentiranih rezultata analize</b>	<b>181</b>
5.9	<b>Moguće promjene utjecaja vulkanske aktivnosti na odstupanje položaja s obzirom na očekivane klimatske promjene</b>	<b>195</b>
5.10	<b>Statističko modeliranje sprege vulkanske aktivnosti i položajne točnosti</b>	<b>196</b>
5.11	<b>Rezultati izračuna korelacije i linearne regresije</b>	<b>199</b>
6	<b>Završna razmatranja rezultata istraživanja</b>	<b>206</b>
6.1	Uspješnost provedbe istraživanja	206
6.2	Ograničenja provedenog istraživanja	207
6.3	Uspješnost izolacije utjecaja vulkanske aktivnosti	208
6.4	Rezultati istraživanja u kontekstu potreba pomorstva	210
7	<b>Zaključci i prijedlozi za daljnja istraživanja</b>	<b>213</b>
	<b>Literatura</b>	<b>218</b>
	<b>Popis kratica, naziva, oznaka i simbola</b>	<b>247</b>
	<b>Popis slika</b>	<b>253</b>
	<b>Popis tablica</b>	<b>256</b>
	<b>Životopis</b>	<b>257</b>

# 1 Uvod

Pomorska navigacija predstavlja znanost i vještinu vođenja broda od početne do završne točke najpovoljnijim putem. Navigacija se tradicionalno provodi upotrebom niza metoda razvijenih u svrhu orijentacije na moru i određivanja položaja broda. Određivanje položaja broda podrazumijeva izračun smjera i udaljenosti u odnosu na poznate objekte u blizini broda ili izračun vrijednosti u koordinatnom sustavu meridijana i paralela. Iz korištenih metoda navigacije proizlazi njezina podjela prema znanstvenim granama koje prevladavaju u zadaćama određivanja položaja broda.

Terestrička navigacija se oslanja ponajviše na mjerenje smjerova (i ponekad udaljenosti) prema markantnim obalnim objektima u blizini broda, a koji se mogu lako prepoznati na pomorskoj karti. Smjerovi su pritom određeni kao kutovi između sjevernog kraja meridijana i objekta, a nazivaju se azimutima. Ucertavanjem tako izmjerenih azimuta na kartu, dobije se geometrijsko mjesto položaja broda, tzv. stajnica. Presjekom barem dviju stajnica na karti određen je položaj broda u odnosu na okolne objekte. Osim mjerenja azimuta moguće je mjeriti i udaljenosti, horizontalne i vertikalne kutove, dubinu mora itd. Nakon ucrtavanja položaja na kartu, mjerenje zemljopisne širine i dužine, tj. položaja broda u koordinatnom sustavu meridijana i paralela, moguće je usporedbom ucrtanog položaja sa skalama širine i dužine na karti. Zemljopisna širina je pritom kutna mjera koja odgovara kutu između ravnine ekvatora i vertikale položaja broda, dok zemljopisna dužina odgovara kutu u središtu Zemlje između početnog meridijana i meridijana položaja broda. Metode terestričke navigacije moguće je primjenjivati isključivo u vidokrugu obale i kad uvjeti plovidbe dozvoljavaju njihovu jasnu vizualnu identifikaciju i omogućuju mjerenja.



Astronomska navigacija je metoda određivanja položaja koja se temelji na mjerenju kutova između horizonta i poznatih nebeskih tijela u poznatom UTC (engl. *Universal Time Coordinated*) vremenu. Matematičkim i geometrijskim proračunima određuje se položaj broda na osnovi tako izmjerenih kutova, a konačni rezultat takvog izračuna je položaj u koordinatnom sustavu Zemlje, zemljopisnoj širini i dužini. Elektronička navigacija podrazumijeva korištenje elektroničkih navigacijskih uređaja, u prvom redu brodskog radara, za mjerenje udaljenosti i kutova od objekata u dometu radarskog uređaja, a zatim se metodama terestričke navigacije određuje položaj broda na pomorskoj karti. Položaj tada predstavlja funkciju udaljenosti i smjera u odnosu na objekt izmjeren radarskim opažanjem, a mjerenje zemljopisne širine i dužine obavlja se identično kao nakon vizualnih mjerenja u terestričkoj navigaciji.

U novije vrijeme, napretkom satelitskih sustava za određivanje položaja korištenjem posebnih prijamnika, omogućen je razvoj satelitske navigacije kao znanstvene grane kojom je moguće određivanje položaja broda s visokim stupnjem točnosti, globalno na Zemlji u svim uvjetima plovidbe. Položaj prijamnika proračunava se softverom u samom prijamniku, a krajnji rezultat matematičkog izračuna su položaj u koordinatnom sustavu meridijana i paralela, tj. zemljopisna širina i dužina antene prijamnika. S pojavom elektroničke karte, položaj broda određen satelitskim prijamnikom se automatski ucrtava i prikazuje na njoj, što značajno povećava preciznost navigacije i smanjuje opterećenje časnika u navigacijskoj straži (Weinrit, 2009). Time se stvaraju i temelji za razvoj integriranih elektroničkih sustava navigacijskog mosta modernog broda.

Od 1993. godine kad je Globalni položajni sustav (dalje: GPS sustav; engl. *Global Positioning System*) postao potpuno operativan s konstelacijom od 24 satelita (Mai, 2012), globalni satelitski navigacijski sustavi (engl. *Global Navigational Satellite Systems*, GNSS) omogućuju korisnicima na površini Zemlje i u zraku određivanje položaja s dotad nedostižnim stupnjem točnosti i pouzdanosti. GNSS sustavi u

pomorstvu se prvenstveno koriste za namjene određivanja položaja i navigacije, a sekundarno i za usklađivanje vremenskog okvira u implementaciji AIS sustava (engl. *Automatic Identification System*) (GSA, 2018a).

Osim određivanja položaja za potrebe pomorskog i drugih grana prometa, industrije, poljoprivrede, građevinarstva, privrede i gospodarstva te geodetskih potreba, kartografije, rasonode itd., GNSS omogućuje i znanstvenoj zajednici pristup vrijednim podacima koji se mogu upotrijebiti u razne znanstvenoistraživačke svrhe (Kumar i sur., 2021). Mjerenjem učinka Zemljine atmosfere na prostiranje GNSS signala, moguće je posredno odrediti različita svojstva atmosfere i time koristiti GNSS mreže kao alat za provođenje mjerenja na daljinu (Jin i sur, 2013). GNSS sustavi imaju značajan potencijal u geofizičkim aplikacijama kao što su sondiranje atmosfere, meteorološke i klimatološke primjene, izučavanje svemirskog vremena te istraživanje litosferne dinamike kao procesa usko povezanih s potresima i vulkanima.

Temeljna metoda satelitskog određivanja položaja korisnika se zasniva na mjerenju vremena koje je potrebno da radiosignal prijeđe put od satelita u Zemljinoj orbiti do antene korisničkog prijamnika na površini ili blizu površine Zemlje. U današnje vrijeme satelitsko određivanje položaja na Zemlji postalo je *de facto* standard u civilnom i vojnom sektoru te svim aspektima djelatnosti gdje je nužno poznavati položaj korisnika s visokim stupnjem točnosti. Promet je samo jedno od područja koje iziskuje takvu potrebu, pa je izračun položaja prometnih sredstava širokodostupnom satelitskom tehnologijom danas neizostavna aktivnost i temelj navigacije, kako u zračnoj i kopnenoj, tako i u pomorskoj grani prometa.

Danas su korisnicima dostupna četiri globalna satelitska navigacijska sustava, uz veći broj dopunskih sustava koji upotpunjuju globalne na regionalnoj razini, povećavajući dostupnost, pouzdanost i/ili točnost globalnih sustava. Globalni satelitski navigacijski sustavi te dopunski sustavi za poboljšanje točnosti i pouzdanosti s konceptualnim pregledom principa rada, detaljnije su opisani u poglavlju 2.

U ostatku uvodnog poglavlja disertacije predstavljena je problematika utjecaja vulkanske aktivnosti na raspršenje položaja određenog satelitskim navigacijskim sustavima. Definirani su osnovni elementi znanstvenoistraživačkog rada: problem, motivacija, predmet i objekti istraživanja. Postavljene su znanstvene hipoteze te su definirani svrha i ciljevi istraživanja. Definirani su ostvareni znanstveni doprinosi disertacije te je napravljen pregled znanstvenih metoda korištenih pri istraživačkom radu. Na kraju uvoda je opisana struktura disertacije.

Disertacija multidisciplinarnim istraživačkim pristupom donosi nove znanstvene spoznaje na polju izučavanja sprege litosfernih procesa povezanih s vulkanskom aktivnošću i posljedičnih učinaka na položajnu točnost satelitskih navigacijskih sustava.

## **1.1 Problem, motivacija, predmet i objekti istraživanja**

Globalni satelitski navigacijski sustav GPS je najstarija i do ovog trenutka uporabno najraširenija inačica GNSS sustava. Većina komercijalnih GPS prijamnika koristi jednofrekvencijsku metodu određivanja položaja pomoću kodnih mjerenja pseudoudaljenosti (poglavljja 2.1 i 5.2.6). Položajna točnost te metode znatno ovisi o količini slobodnog električnog naboja u atmosferi. Atmosferski naboj uzrokuje lom radiosignala upućenih sa satelita čime oni iz pravocrtnog prelaze u krivocrtno prostiranje te mijenjaju brzinu prostiranja. Posljedica tog učinka je produljenje stvarnog prijeđenog puta signala od satelita do antene prijamnika, u odnosu na geometrijsku najkraću udaljenost. Time dolazi do kašnjenja u odnosu na vrijeme u kojem bi se signal detektirao prijamnikom, kad bi se on prostirao električno neutralnim medijem. Takav učinak naziva se ionosferskim kašnjenjem satelitskih signala. Pregled uzroka odstupanja u izračunu korisničkog položaja donosi poglavlje 2.4, a ionosfersko kašnjenje na kojem je stavljen naglasak u ovome radu detaljno je obrađeno u poglavlju 3.

Ionizacija zraka prvenstveno nastaje uslijed Sunčevog zračenja. Fotoni elektromagnetskog (EM) zračenja ultraljubičastog i X dijela spektra, predaju molekulama zraka količinu energije dovoljnu za njihovu ionizaciju. Osim EM zračenja, i zračenje sa Sunca te iz dubokog Svemira u obliku čestica doprinosi ionizaciji atmosfere. Ionizacija je proces izdvajanja elektrona iz neutralnih atoma zraka, čime se stvaraju parovi iona ( $e^+$ ) i slobodnog elektrona ( $e^-$ ). Osim količine primljenog zračenja sa Sunca i iz Svemira, postoji cijeli niz fizikalnih, kemijskih i nuklearnih procesa koji diktiraju omjer između brzine ioniziranja zraka i brzine rekombiniranja slobodnog naboja u neutralne atome i molekule. Cijeli skup navedenih procesa određuje ukupni stupanj ionizacije zraka na putu prostiranja satelitskog signala, čime se definira ionosfersko kašnjenje signala te posljedično odstupanje u izmjerenoj udaljenosti satelita i prijarnika. Uslijed nepoznatog iznosa odstupanja izmjerene udaljenosti, dolazi i do odstupanja u izračunu položaja prijarnika u odnosu na njegov stvaran položaj na Zemlji. Procesi ionizacije i rekombinacije električnog naboja opisani su u poglavlju 3.

Značajan broj znanstvenoistraživačkih radova pokazuje jasan utjecaj seizmike na ionosferu i ukupni sadržaj elektrona. Njihov pregled dan je u poglavlju 4.1. Dinamika unutar Zemljine litosfere često se prostorno i vremenski povezuje s anomalijama ukupnog sadržaja elektrona. Ukupni sadržaj elektrona (npr. Klobuchar, 1975; Parkinson, 1996; Petrovski i Tsujii, 2012) je mjera koja opisuje količinu električnog naboja u atmosferi te je jedna od temeljnih fizikalnih veličina korištenih u disertaciji. Modeli koji fizikalno nastoje objasniti spregu tektonike i anomalija u ionosferi nazivaju se modeli sprege litosfere, atmosfere i ionosfere (engl. *Lithosphere, Atmosphere and Ionosphere Coupling* – LAIC) i detaljno su obrađeni u četvrtom poglavlju. Najveći dio aktualnih LAIC modela podrazumijeva učinak pojačane emanacije radona iz tla. Radon je plin koji ima radioaktivna svojstva i kao takav značajno pojačava ionizaciju zraka. Temeljni koncept LAIC modela hipotezira kako dodatna ionizacija radonom posljedično utječe na ukupni

sadržaj elektrona na putu satelitskog signala do prijamnika i time modulira njegovo kašnjenje te stvara posljedičnu promjenu odstupanja u izračunanom položaju.

Potresi i kroz LAIC spregu s njima povezane ionosferske anomalije su mnogo detaljnije izučavani fenomeni u znanstvenoj literaturi, u odnosu na povezanost vulkana i posljedičnih ionosferskih učinaka. Ipak, dosadašnja istraživanja pokazuju postojanje nedvojbene ali složene veze koja se može pripisati najmanje trojkom učinku vulkanske aktivnosti; pojačanoj emanaciji radona te prostiranju akustičkih i težinskih valova, ali za razliku od potresa dodatno i izbačenim česticama i aerosolima iz vulkanskog kratera u atmosferu. Ova istraživanja su razmatrana detaljno u poglavlju 4.3.

S obzirom na aspekte pomorske plovidbe i srodnih djelatnosti u kojima se zahtijeva značajna točnost određivanja položaja (IMO, 2001), kao i na prethodno iznesena znanstvena saznanja o povezanosti litosferne i ionosferne dinamike, postavlja se pitanje kakav učinak ima vulkanska aktivnost na točnost određivanja položaja satelitskim navigacijskim sustavima i je li takav utjecaj bitan za pomorsku navigaciju ili neke druge pomorske aktivnosti?

Disertacija je osmišljena tako da kroz multidisciplinarni znanstvenoistraživački proces, ponudi dio odgovora na ta pitanja. Znanstveno istraživanje provedeno u sklopu disertacije je dizajnirano u cilju ispitivanja pogreški u izračunu položaja korisničkih jednofrekvencijskih GPS prijamnika, kakvi danas prevladavaju u većini na brodovima civilne pomorske flote. S obzirom na brojnost različitih metoda određivanja položaja satelitskim navigacijskim sustavima te na tehnološke razlike između pojedinih GNSS sustava, raspoloživ prostor disertacije ne omogućuje sustavnu analizu svih mogućih kombinacija metoda i sustava. U tom smislu, ova disertacija predstavlja metodološki obrazac za izučavanje učinaka vulkanske aktivnosti na točnost položaja određenog satelitskim navigacijskim sustavima.

Iz opisane problematike proizlazi da je **znanstveni problem istraživanja** kvalitativno i kvantitativno utvrđivanje učinaka vulkanske aktivnosti na raspršenje položaja određenog GNSS sustavima. **Predmet istraživanja** je povezanost vulkanske aktivnosti i raspršenja položaja određenog GNSS sustavima preko utjecaja na ionosfersko kašnjenje signala. **Objekti istraživanja** su raspršenje položaja dobivenog GNSS sustavima, promjene vulkanske aktivnosti u vremenu, dinamika ukupnog sadržaja elektrona u ionosferi, uzročno-posljedična povezanost vulkanske aktivnosti i položajne pogreške te statistička analiza i modeliranje povezanosti litosferne i ionosferne dinamike. Pritom je kao GNSS sustav na kojem je izvršeno ispitivanje izabran GPS kao najraširenija inačica, a metoda određivanja položaja jednofrekvencijska, također kao metoda koja je najčešće korištena u komercijalnim korisničkim prijamnicima na brodovima civilne mornarice.

Općenito, tijekom eksploatacije satelitskih navigacijskih sustava, razvijene su brojne metode i usluge poboljšanja njihove točnosti. Sustavi za poboljšanje točnosti i naprednije metode određivanja položaja su ukratko opisani u drugom poglavlju, ali istraživanje provedeno u disertaciji pretpostavlja da korisničko određivanje položaja ne uključuje korištenje tih sustava i metoda. Kombinacije različitih GNSS sustava te specifičnih metoda i usluga poboljšanja točnosti, predložene su u 7. poglavlju za buduća istraživanja na temu povezanosti položajnog raspršenja s vulkanskom aktivnošću.

## 1.2 Znanstvena hipoteza i pomoćne hipoteze

Temeljem definiranog problema, predmeta i objekata znanstvenog istraživanja te s obzirom na dosadašnja saznanja, postavljena je **osnovna znanstvena hipoteza** koja je testirana provedenim znanstvenoistraživačkim radom:

*"Kvantitativnim definiranjem povezanosti aktivnosti vulkana i raspršenja položaja dobivenih GNSS sustavom, moguće je unaprijed predvidjeti magnitudu raspršenja položaja u takvim uvjetima te odrediti u kojim korisničkim aplikacijama ona može biti značajna."*

S ciljem dokazivanja osnovne hipoteze proizlaze i sljedeće **pomoćne hipoteze**:

1. Vulkanska aktivnost utječe na poremećaje ukupnog sadržaja elektrona u ionosferi, čime mijenja veličinu ionosferskog kašnjenja satelitskog signala na putu do korisničkog prijamnika;
2. Budući da aktualni modeli za umanjenje utjecaja ionosferskog kašnjenja u jednofrekvencijskim prijamnicima uopće ne uključuju ove učinke u obračun ispravke, odstupanja u položaju dobivena takvim prijamnicima u vulkanski aktivnim područjima ostaju nekorrigirana;
3. Postoji uzročno-posljedična veza između dinamike litosfere, električnih svojstava atmosfere i raspršenja položaja dobivenog GNSS sustavima;
4. Odgovarajućim statističkim analizama moguće je odrediti statističku ravnotežu korisničkog položaja u funkciji vulkanske aktivnosti.

### **1.3 Svrha i ciljevi istraživanja**

**Svrha provedenog istraživanja** u ovoj disertaciji je ostvarivanje znanstvenog doprinosa izučavanju i razumijevanju sprege vulkanske aktivnosti i fizikalnih parametara u atmosferi koji utječu na točnost određivanja položaja GNSS sustavima u područjima pod utjecajem vulkanske aktivnosti. Također, svrha istraživanja je i spoznaja o magnitudi položajne pogreške dobivene upotrebom jednofrekvencijskih GPS prijamnika pod utjecajem vulkanske aktivnosti.

Provedenim istraživanjem postignuti su sljedeći **ciljevi**:

1. Ispitana je povezanost vulkanske aktivnosti i položajne pogreške dobivene izračunom položaja GPS jednofrekvencijskim prijamnicima, u području koje je pod njezinim utjecajem;

2. Ispitana je povezanost vulkanske aktivnosti i ukupnog sadržaja elektrona u ionosferi iznad vulkanskog područja, vodeći računa o eliminaciji ili minimiziranju ostalih utjecajnih čimbenika na ukupni sadržaj elektrona;
3. Ispitana je uzročno-posljedična veza vulkanske aktivnosti kroz ukupni sadržaj elektrona kao mogući eksplanatoran fizikalni parametar;
4. Uspoređeni su rezultati s ekvivalentnim vrijednostima položajne pogreške izvan vulkanskog područja, također vodeći računa o eliminaciji ili minimiziranju ostalih utjecajnih čimbenika na položajnu pogrešku i ukupni sadržaj elektrona;
5. Statističkom analizom promjena položajne pogreške u ovisnosti o geografskoj udaljenosti od vulkana i geografskom položaju u odnosu na vulkan, određen je utjecaj vulkanske aktivnosti na različitim geografskim udaljenostima od vulkana;
6. Ustanovljena je povezanost prostornog utjecaja vulkanske aktivnosti na položajnu točnost, s prevladavajućim zračnim strujanjima u troposferi i stratosferi kao eksplanatornim parametrom uočenih rezultata;
7. Ustanovljen je stupanj kvalitativne i kvantitativne povezanosti vulkanske aktivnosti i položajne točnosti;
8. Ispitana je mogućnost statističkog modeliranja sprege aktivnosti vulkana i rezultirajuće položajne točnosti;
9. Analizirani su fizikalni koncepti iz modela sprege litosfere, atmosfere i ionosfere te su postavljene hipoteze koje objašnjavaju dobivene rezultate istraživanja;



10. Određena je statistička ravnoteža korisničkog GPS položaja dobivenog jednofrekvencijskim mjerenjima u funkciji vulkanske aktivnosti i ukupnog sadržaja elektrona u ionosferi iznad vulkanskog područja, za svaki vulkan zasebice.

Temeljem provedenog istraživanja i dobivenih rezultata, ostvareni su sljedeći **znanstveni doprinosi**:

1. Rezultati istraživanja su dali znanstveni doprinos kvalitativnom i kvantitativnom saznanju o sprezi vulkanske aktivnosti i reakcija ionosfere te posljedičnog raspršenja položaja određenog jednofrekvencijskim GPS sustavom. Teorijski znanstveni doprinos se pritom očituje u utvrđenoj statističkoj ravnoteži korisničkog položaja dobivenog jednofrekvencijskim GPS prijarnikom u funkciji vulkanske aktivnosti i ukupnog sadržaja elektrona u ionosferi iznad vulkanskog područja;
2. Postavljene su hipoteze koje daju mehanističko objašnjenje uočenih pravilnosti u položajnoj točnosti kao funkciji vulkanske aktivnosti;
3. Definirani su kriteriji intenziteta vulkanske aktivnosti potrebnog za postizanje određenog učinka na položajnu točnost;
4. Dan je doprinos saznanju o kvalitativnom i kvantitativnom utjecaju geografske udaljenosti korisnika i smjera u odnosu na vulkan, na vezu vulkanske aktivnosti i položajne pogreške;
5. Određene su specifičnosti učinaka vulkanske aktivnosti na položajnu točnost na različitim vremenskim skalama.

## 1.4 Prikaz korištenih znanstvenih metoda

Za potrebe istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji preuzeti su podaci koji definiraju vulkansku aktivnost, dobiveni satelitskim mjerenjem toplinskog zračenja u infracrvenom spektru. Korišteni su podaci mjerenja dobiveni satelitskim senzorom MODIS (engl. *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) koji se nalazi na NASA-inim (engl. *The National Aeronautics and Space Administration*) satelitima *Terra* i *Aqua*. Podaci o toplinskom zračenju vulkana, prikupljeni MODIS senzorom, preuzeti su u obrađenom obliku iz sustava za identifikaciju i praćenje vulkanske aktivnosti MODVOLC (Wright i sur., 2002; 2004). Rezultirajuća fizikalna veličina koja se koristila kao mjera za aktivnost vulkana je spektralna radijancija. Prikupljeni su podaci o aktivnosti 6 vulkana na različitim geografskim područjima Zemlje. Podaci o aktivnosti obrađeni su s ciljem kvantificiranja vulkanske aktivnosti.

Za potrebe određivanja odstupanja položaja dobivenih jednofrekvencijskim GPS sustavom, preuzeti su opservacijski i navigacijski zapisi u RINEX formatu (engl. *Receiver Independent Exchange Format*) s mreže referentnih GNSS stanica IGS (engl. *International GNSS Service*). Također su preuzete pripremljene datoteke za identifikaciju i uklanjanje vrijednosti sklopovskih kašnjenja. Iz tih zapisa dvofrekvencijskom metodom određen je ukupan sadržaj elektrona, a metodom jednofrekvencijskog izračuna položaja u jednoj točki određen je položaj svake referentne stanice. Tako dobiveni vremenski nizovi ukupnog sadržaja elektrona i položaja stanice računani su za po jednu referentnu stanicu koja se nalazi u blizini svakog od 6 analiziranih vulkana.

Statistički su obrađeni izračunani podaci odstupanja položaja i ukupnog sadržaja elektrona u kontekstu vulkanske aktivnosti. Pritom su za svaki vulkan formirane dvije grupe dana. Prvu grupu je sačinjavalo 100 najaktivnijih, a drugu grupu 100 najmirnijih dana, prema apsolutnom iznosu spektralne radijancije po podacima

MODVOLC sustava. Statističkom obradom podataka ukupnog sadržaja elektrona i prostornog odstupanja položaja unutar tako formiranih grupa, određeni su pokazatelji učinka vulkanske aktivnosti na promatrane parametre.

Usporedbom rezultata prostornog odstupanja položaja i ukupnog sadržaja elektrona, kvalitativno i kvantitativno je određeno u kojoj mjeri ukupan sadržaj elektrona može objasniti izračunano raspršenje položajne točnosti. Pritom su uočene razlike u rezultatima ovisno o specifičnostima promatranih vulkana te su postavljene hipoteze koje objašnjavaju zbog čega nastaju takve razlike.

Za svaki analizirani vulkan izrađen je jednostavan statistički model koji se temelji na izračunu linearne regresije prema podacima spektralne radijancije i prostornog odstupanja izračunanog položaja. Iz tako dobivenih jednadžbi moguće je izračunati očekivanu vrijednost nepoznatog parametra uz poznat drugi. Izračunani su koeficijenti korelacije takvih dvaju setova podataka te je provedeno razmatranje primjenjivosti modeliranja u kontekstu dobivenih rezultata, posebno njihove visoko stohastičke naravi.

Osim za svakom vulkanu obližnju referentnu GNSS stanicu, pri analizi učinka vulkana Etna izračunan je učinak njezine aktivnosti na položajnu pogrešku na dodatnih 6 referentnih stanica u Sredozemlju i Europi. Iz dobivenih rezultata doneseni su zaključci o svojstvima prostornog utjecaja i to u zonalnom i meridionalnom smjeru, budući da su rezultati pokazali značajne razlike i po udaljenosti od vulkana i po smjeru.

Sveukupno dobiveni rezultati su postavljeni u kontekst cjelokupnog znanstvenog saznanja iz dosad objavljenih radova na tematiku sprege vulkanske aktivnosti, ionosferskih učinaka i položajne pogreške dobivene GNSS sustavima. Izvršeno je testiranje, verificiranje i validacija postavljene osnovne hipoteze – učinka vulkanske aktivnosti na raspršenje položaja dobivenih jednofrekvencijskim GPS sustavom.

Pomoćna programska podrška korištena za provedbu dijela opisanih znanstvenih metoda je:

1. Proračun ukupnog sadržaja elektrona iz RINEX datoteka: GPS-TEC (Krishna, 2017);
2. Proračun položaja referentnih stanica iz RINEX datoteka: RTKLIB (Takasu, 2018);
3. Obrada podataka i vizualizacija: Jupyter lab, Python (Van Rossum i Drake, 1995) i biblioteke Numpy, Pandas, Matplotlib, Seaborn, Scipy, Scikit-learn.

Detaljan opis korištenih metoda kratko navedenih u ovom odjeljku, prikazan je u odgovarajućim dijelovima 5. poglavlja.

## **1.5 Opis strukture disertacije**

Uvodno poglavlje uvodi u problematiku disertacije, daje pregled elemenata znanstvenoistraživačkog rada; problem, motivaciju, predmet i objekte istraživanja, zatim postavlja osnovnu i pomoćne znanstvene hipoteze, svrhu i ciljeve istraživanja te daje pregled korištenih znanstvenih metoda i ostvarenih znanstvenih doprinosa.

Drugo poglavlje konceptualno opisuje temeljni princip rada GNSS sustava i osnovnu metodu određivanja korisničkog položaja temeljenu na mjerenju pseudoudaljenosti, s naglaskom na GPS sustav. Donosi se pregled segmenata GNSS sustava, opisuju se relativistički učinci na mjerenje vremena, a donosi se i uvod u problematiku složenijih metoda za određivanje položaja, razvijenih u cilju postizanja veće položajne točnosti. Posebno se pritom naglašava ionosfersko kašnjenje signala kao glavni izvor odstupanja u određivanju položaja jednofrekvencijskim GPS prijammnicima. Problematika određivanja položaja s visokim stupnjem točnosti se postavlja u kontekst pomorske plovidbe te drugih pomorskih djelatnosti koje koriste satelitske navigacijske sustave za određivanje položaja i vođenje navigacije.

U trećem poglavlju daje se pregled strukture atmosfere i ionosfere te se uvodi u problematiku atmosferskog električnog naboja. Opisuju se fizikalni i kemijski te nuklearni procesi koji ioniziraju atmosferu. Opisuju se i procesi koji neutraliziraju postojeći električni naboj u atmosferi te se pritom naglašava učinak atmosferskog aerosola na neutralizaciju naboja. Daje se pregled globalnog električnog kruga i njegovih promjena. Definira se ukupni sadržaj elektrona kao temeljni pokazatelj količine slobodnog naboja u atmosferi. Donosi se pregled periodičnih i neperiodičnih promjena ukupnog sadržaja elektrona te se dovodi u vezu ukupan sadržaj elektrona s prostiranjem satelitskih signala za određivanje položaja. Konačno, daje se i pregled metoda za ublažavanje učinaka ionosferskog kašnjenja satelitskih signala uzrokovanog slobodnim nabojem u atmosferi modeliranjem ionosfere. Kraj poglavlja rezerviran je za prikaz metoda određivanja ukupnog sadržaja elektrona u ionosferi.

Četvrto poglavlje uvodi u problematiku utjecaja litosferne dinamike na atmosferski elektricitet, globalni električni krug te na ionosfersko kašnjenje satelitskih signala. Donosi se pregled dosadašnjih istraživanja na području sprege litosfere, atmosfere i ionosfere. Postavljaju se temeljni koncepti modela sprege te se posebice naglašava upotreba GNSS mreža za istraživanje ionosferskih poremećaja povezanih s litosfernom dinamikom. GNSS se tako predstavlja alatom za izučavanje ne samo sprege, već indirektno i procesa koji se odvijaju u Zemljinoj kori te na tlu, a povezani su s dinamičkim procesima vezanim za potrese i vulkane. U ovom poglavlju daje se i pregled dosad objavljenih vlastitih istraživanja povezanih s tematikom disertacije.

Peto poglavlje donosi analizu utjecaja vulkanske aktivnosti na raspršenje položaja u GPS sustavu i na ukupni sadržaj elektrona u ionosferi nad vulkanskim područjem. Poglavlje započinje opisom metodologije istraživanja provedenog u disertaciji. Definira se područje istraživanja, odabrani vulkani i vremensko razdoblje za analizu te izvori korištenih podataka. Matematički se predstavlja metodologija izračuna položaja jednofrekvencijskim GPS sustavom, kao i metoda

izračuna ukupnog sadržaja elektrona korištenjem dvofrekvencijskih mjerenja s referentnih GPS stanica. Daje se pregled metoda statističke obrade dobivenih rezultata i daju objašnjenja metodološkog pristupa u cilju umanjavanja solarnog i sekundarnih utjecaja na rezultate analize. Donosi se pregled metode analize utjecaja geografske udaljenosti vulkana na odstupanje položaja te metode analize povezanosti intenziteta vulkanske aktivnosti na položajnu točnost. Daju se razmatranja rezultata i stavlja ih se u kontekst dosad objavljenih istraživanja drugih autora. Postavljaju se hipoteze kojima je cilj mehanistički objasniti uočene pravilnosti dobivene analizama. S obzirom na dobivene rezultate koji ukazuju na osjetljivost mehanizma utjecaja na visinu donje granice stratosfere, razmatraju se i moguće promjene utjecaja vulkanske aktivnosti na položajnu točnost u budućnosti, a u kontekstu očekivanih klimatskih promjena. Na kraju poglavlja razmatra se mogućnost izrade statističkog modela veze vulkanske aktivnosti i položajne točnosti jednofrekvencijskih GPS sustava. Donose se razlozi odabira specifičnog statističkog modela s prikazom matematičke formulacije i rezultata modela s koeficijentima za svaki pojedini vulkan. Proračunavaju se korelacijski koeficijenti i provodi regresijska analiza. Naglašava se visoka stohastičnost dobivene statističke ravnoteže između vulkanske aktivnosti i raspršenja položaja dobivenog jednofrekvencijskim GPS mjerenjima te ukupnog sadržaja elektrona. Iznesena su ograničenja modela i razmotren je aspekt primjenjivosti statističkog modeliranja u kontekstu visoke stohastičnosti analizirane sprege.

Šesto poglavlje donosi završnu raspravu o rezultatima istraživanja, ograničenjima koja proizlaze iz korištenih metoda te podataka i njihovog prikupljanja. U ovo poglavlje uključena je i rasprava o aspektima mogućnosti primjene predloženih modela i općih rezultata istraživanja na buduće teorijske i praktične primjene. Poglavlje je zaključeno utjecajima rezultata istraživanja na pomorsku navigaciju i druge pomorske djelatnosti u kojima se zahtijeva visok stupanj točnosti određivanja položaja.

U sedmom poglavlju su dani konačni zaključci i prijedlozi za daljnji znanstvenoistraživački rad na području povezanosti vulkanske aktivnosti i GNSS sustava.

## **2 Koncept GNSS sustava i određivanja korisničkog položaja**

Ovo poglavlje donosi pregled aktualnih GNSS sustava i dodatnih podsustava kao što su regionalne inačice te dodatni sustavi za poboljšanje satelitskih navigacijskih usluga. Pojašnjen je temeljni princip rada GNSS sustava s naglaskom na uslugu određivanja korisničkog položaja, uz osnovni pregled relativističkih učinaka na mjerenje vremena. Detaljan matematički opis metode izračuna položaja prijarnika jednofrekvencijskom metodom u jednoj točki, koja je izravno korištena u istraživanju, prikazan je u poglavlju 5 koje opisuje metodologiju istraživačkog rada disertacije. U ovome je poglavlju prikaz ograničen na konceptualni pristup određivanju položaja GNSS sustavima. Pritom je opisana struktura satelitskih signala za određivanje položaja uz pregled arhitekture sustava. Prostiranje GNSS radiovalova kroz prostor i prijenosni medij je također uključeno u ovo poglavlje, a zatim se kratko razmatraju izvori pogrešaka u određivanju položaja i daje se temeljni račun ukupnog odstupanja izračunanog položaja. Poglavlje završava razmatranjem utjecaja odstupanja položaja na sigurnost pomorskog prometa.

### **2.1 Određivanje korisničkog položaja GNSS sustavima**

Kroz povijest pomorstva, navigacija kao znanost nastojala je neprestano razvijati i usavršavati metode određivanja položaja broda na moru. Poznavanje položaja temeljni je uvjet pouzdanog vođenja broda po isplaniranom putu i uspješne realizacije plana putovanja.

Čovjek je najprije počeo ploviti po rijekama i uz obalu te se položaj njegovog plovila određivao isključivo vizualno, pamćenjem i raspoznavanjem okolnih predjela. Kasnije, otiskuje se dalje od obale i orijentira koristeći nebeska tijela, prati pravce stalnih vjetrova i usmenom predajom s generacije na generaciju prenosi svoja znanja i iskustva. Naposljetku, razmjena dobara i prijevoz ljudi počinje



zahtijevati korištenje sve optimiziranijih putova kako bi se maksimizirala ekonomska dobit (npr. Mohović, 2003). Takva plovidba nije moguća bez sustavnog pristupa određivanju i kontroli položaja broda, zbog čega se razvijaju instrumentalne metode za tu namjenu.

Tijekom 1950-ih godina, u vrijeme hladnog rata između NATO saveza i Varšavskog pakta, intenzivno se provodi istraživanje u cilju razvoja efikasnog naoružanja i pratećih sustava. Američka ratna mornarica tada započinje s razvojem satelitskog sustava za potrebe navigacije tadašnjih podmornica klase Polaris, čime započinje era satelitske navigacije (Stansell, 1971). Razvijaju se različiti satelitski navigacijski sustavi, najprije u vojne, a ubrzo i civilne korisničke namjene. Nakon Sjedinjenih Američkih Država, Ruska Federacija (tada SSSR) također započinje razvoj vlastitog satelitskog navigacijskog sustava, a zatim slijede globalni projekti Europske unije, te Kine, uz nekoliko regionalnih inačica drugih država.

### ***2.1.1 Satelitski navigacijski sustavi***

Određivanje položaja broda korištenjem radiosignala s umjetnih satelita započinje projektom Transit američke mornarice, koji postaje dostupan javnosti od 1967. godine. Ubrzo nakon primjene kao navigacijskog sustava za podmornice, uviđaju se brojne prednosti korištenja sustava i za potrebe površinskih plovnih jedinica. Transit je satelitski sustav koji je koristio Dopplerov pomak frekvencije za izračun geografskog položaja prijarnika na Zemlji (Stansell, 1971; Danchik, 1984). Daljnji napori u izvedbi točnijeg i pouzdanijeg sustava za satelitsko pozicioniranje dovode do razvoja novog sustava nazvanog NAVSTAR (engl. *Navigation System with Timing and Ranging*), kasnije preimenovanog u GPS. GPS postaje potpuno operativno funkcionalan 1993. godine. Danas GPS sustav općenito pruža dva nivoa usluga pozicioniranja, standardni (SPS – engl. *Standard Positioning Service*) i precizan (PPS – engl. *Precise Positioning Service*). SPS koristi C/A kôd na L1 frekvenciji, dok PPS odašilje P(Y) kôd na L1 i L2 frekvenciji (Mai, 2012) (za detalje vidjeti poglavlje 2.1.5).

Nakon GPS, razvijeni su srodni satelitski navigacijski sustavi koji dijele zajednički naziv GNSS. GNSS predstavlja sve satelitske sustave koji omogućuju korisnicima korištenje usluga određivanja položaja prijarnika u trodimenzionalnom koordinatnom sustavu Zemlje, vođenja navigacije te korištenja referentnog vremenskog okvira (engl. *Positioning, Navigation and Timing*, PNT).

Jedna od mogućih podjela GNSS sustava je prema kriteriju prostorne pokrivenosti. Globalni sustavi pokrivaju cijelu površinu Zemlje, dok su regionalni ograničeni na neko manje geografsko područje. Trenutačno djeluju četiri globalna sustava. To su osim američkog GPS, još i ruski GLONASS (rus. *Global'naja Navigacionnaja Sistema*), europski Galileo i kineski BeiDou. Dodatni regionalni sustavi koji rade na istom principu su japanski QZSS (engl. *Quasi-Zenith Satellite System*) i indijski IRNSS-NAVIC (engl. *Indian Regional Navigation Satellite System, Navigation with Indian Constellation*) (Teunissen i Montenbruck, 2017; United Nations, 2010; Camacho-Lara, 2013).

U cilju poboljšanja točnosti određivanja položaja razvijene su različite pomoćne metode. Pritom su danas najzastupljeniji SBAS (engl. *Satellite-Based Augmentation Systems*) sustavi za poboljšanje točnosti, koji koriste referentne Zemaljske stanice za određivanje položajne pogreške u sustavu te geostacionarnim satelitima odašilju ispravku korisničkim prijarnicima (Teunissen i Montenbruck, 2017; Camacho-Lara, 2013). Pregled aktualnih SBAS sustava prikazan je u poglavlju 2.1.4.2.

GNSS sustavi se danas koriste u svim granama prometa i brojnih drugih djelatnosti, a u pomorstvu, širokim prihvaćanjem GNSS sustava za potrebe određivanja položaja plovila na moru i vođenja navigacije, krajem 20. stoljeća stvorena je i potpuno nova grana pomorske elektroničke i radionavigacije – satelitska navigacija.

### **2.1.2 Temeljni princip određivanja korisničkog položaja GNSS sustavima**

Princip određivanja položaja prijamnika GNSS sustavima temelji se na matematičkom proračunu koordinata prijamnika, pri čemu osnovu za proračun daju poznate efemeride satelita i izmjereno vrijeme prostiranja radiosignala od satelita do prijamnika (Parkinson i Spilker, 1996; Teunissen i Montenbruck, 2017). Temelj metodologije izračuna položaja zasniva se pritom na triangulaciji.

Tri su temeljna preduvjeta za rad satelitskih navigacijskih sustava:

1. Zajednički sustav vremena (engl. *System Time*, ST);
2. Zajednički georeferentni koordinatni sustav, odnosno geodetski datum;
3. Ispunjena pretpostavka o konstantnoj brzini prostiranja satelitskog signala (brzina svjetlosti u vakuumu,  $c = 2,99792458 \cdot 10^8$  m/s).

Nakon odašiljanja, kodirani signal sa satelita se prostire prema površini Zemlje brzinom svjetlosti. Udaljenost između satelita i prijamnika  $\rho_r^s$  definirana je pritom vremenom prostiranja signala  $\tau_r^s$  kao:

$$\rho_r^s(t) = c \cdot \tau_r^s \quad (1)$$

Pretpostavimo li u idealiziranom konceptu da su satovi u korisničkom prijamniku i satelitu u potpunosti sinkronizirani te da Zemljina atmosfera kao i slučajne pogreške mjerenja zbog instrumentalnog šuma ne postoje, jednadžba udaljenosti može se napisati kao (Teunissen i Montenbruck, 2017):

$$\begin{aligned} \rho_r^s(t) &= \\ &= |\mathbf{r}_r(t) - \mathbf{r}^s(t - \tau)| \\ &= [(x_r(t) - x^s(t - \tau))^2 + (y_r(t) - y^s(t - \tau))^2 + (z_r(t) - z^s(t - \tau))^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (2)$$

gdje je  $\mathbf{r}_r = (x_r, y_r, z_r)^T$  nepoznat vektor položaja prijamnika. Ako prijamnik nije stacionaran, tad je njegov položaj izražen kao funkcija vremena.  $\mathbf{r}^s = (x_s, y_s, z_s)^T$  je vektor položaja satelita i njegove koordinate su poznate, budući da su zakodirane u navigacijskoj poruci koju odašilje. Ova dva vektora se tipično odnose na Zemaljski referentni sustav ECEF (engl. *Earth Centered, Earth Fixed coordinate system*). U ECEF sustavu GPS koristi WGS-84 referentni okvir (geodetski datum) za pretvorbu pravokutnih (x, y i z) u sferne koordinate (zemljopisna širina, dužina i nadmorska visina) (Parkinson i Spilker, 1996; Petrovski i Tsujii, 2012; Petrovski, 2014; Teunissen i Montenbruck, 2017).

Za razliku od GPS sustava koji koristi WGS-84, GLONASS sustav za referentni geodetski datum upotrebljava PZ-90, a Galileo GTRF. BeiDou koristi referentni geodetski datum BDC (Subirana i sur., 2011; Teunissen i Montenbruck, 2017).

Mjerenjem udaljenosti jednog satelita moguće je definirati da se položaj prijamnika nalazi negdje na sferi sa satelitom  $S_1$  u centru, s polumjerom sfere jednakim izmjerenoj udaljenosti ( $\rho_r^1$ ). Mjerenjem udaljenosti još dvaju satelita moguće je odrediti polumjere drugih dviju sfera sa satelitima  $S_2$  i  $S_3$  u središtima sfera. U zamišljenom idealnom slučaju kad nema pogrešaka u sustavu i uz apsolutno točno mjerenje, presjecište triju sfera dogodit će se u točki koja predstavlja položaj prijamnika (Parkinson i Spilker, 1996 ; Teunissen i Montenbruck, 2017), kako je prikazano na slici 1.

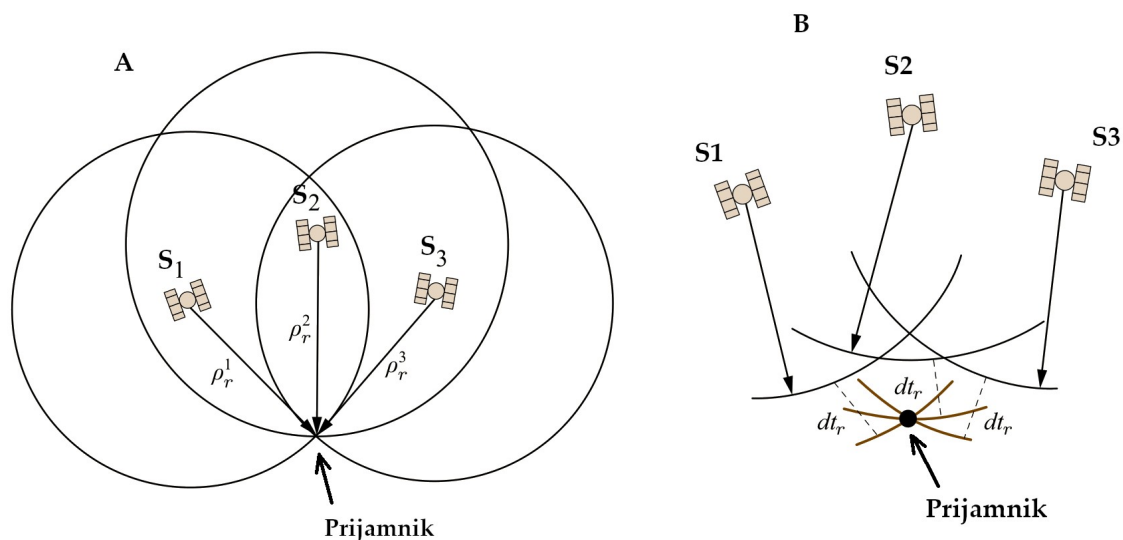
U principu bi podaci dobiveni ovakvom metodom bili dovoljni za izračun položaja kad ne bi postojale pogreške u sustavu. Tad bi se rješenje položaja prijamnika moglo izraziti u matematičkom obliku:

$$\rho_r^1 = \sqrt{(x_r - x^1)^2 + (y_r - y^1)^2 + (z_r - z^1)^2} \quad (3)$$

$$\rho_r^2 = \sqrt{(x_r - x^2)^2 + (y_r - y^2)^2 + (z_r - z^2)^2} \quad (4)$$

$$\rho_r^3 = \sqrt{(x_r - x^3)^2 + (y_r - y^3)^2 + (z_r - z^3)^2} \quad (5)$$

gdje je  $\rho_r$  u slučaju nepostojanja pogreški geometrijska udaljenost satelita i prijamnika, dok su vektorske razlike položaja satelita i prijamnika u ECEF sustavu dane u članovima jednadžbi ispod drugog korijena.



Slika 1: Određivanje položaja presjecanjem sfera nastalih mjerenjem pseudoudaljenosti (A), te ispravak položaja za odstupanje sata korisničkog uređaja (B), crtkane linije  
Izvor: Izradio autor prema Teunissen i Montenbruck (2017)

Kako je naglašeno, u prethodno iznesenom idealiziranom konceptu su zanemareni svi izvori pogrešaka mjerenja. U stvarnom svijetu, u prvom redu postoje pogreške koje nastaju uslijed međusobnog odstupanja satova u prijamniku i satelitima, zatim učinci atmosfere na prostiranje signala te drugi izvori pogrešaka, kako je navedeno u poglavlju 2.4. Zbog toga se po prijemu signala temeljem kodne razlike i brzine prostiranja signala kao rezultat proračuna ne dobije stvarna geometrijska udaljenost satelita i prijamnika, već pseudoudaljenost.

Sat prijamnika odstupa od satelitskih satova za nepoznatu vrijednost ( $dt_r$ ), a također i satelitski satovi odstupaju od vremena sustava za određen iznos ( $dt_s$ ), pa se stoga može pisati:

$$p_r^s = \rho_r^s + c \cdot (dt_r - dt_s) \quad (6)$$

gdje  $p_r^s$  označava pseudoudaljenost prijamnika od satelita,  $\rho_r^s$  geometrijsku udaljenost, a  $c$  brzinu svjetlosti.

Na slici 1 prikazan je princip određivanja položaja prijamnika koristeći tri izmjerene pseudoudaljenosti. U dijelu slike **A** se polazi od idealizirane pretpostavke nepostojanja pogrešaka u mjerenju, pa se tri sfere čiji radijusi su definirani izračunanim pseudoudaljenostima, preklapaju u istoj točki u kojoj se nalazi korisnički prijamnik. U dijelu slike **B** se pretpostavlja odstupanje korisničkog sata u odnosu na referentno vrijeme sustava za određen iznos, koji pomnožen brzinom svjetlosti daje iznos pogreške pseudoudaljenosti ( $dt_r \cdot c$ ). Sateliti  $S_{1-3}$  se nalaze u središtima sfera s (pseudo)udaljenostima  $\rho_r^{1-3}$ .

Odstupanja satelitskih satova od vremena sustava odašilju se unutar navigacijske poruke satelitskog signala, dok se ispravljanje odstupanja sata prijamnika vrši dodatnim mjerenjima korištenjem bar još jednog dodatnog satelita (Kaplan i Hegarty, 2006; Parkinson i Spilker, 1996; Teunissen i Montenbruck, 2017). Iz tog proizlazi da je minimalno potreban broj satelita za određivanje korisničkog položaja, četiri. Tri satelita su nužna za triangulaciju, a četvrti za korekciju odstupanja satova.

Ako je dostupan veći broj satelita od četiri, iterativnom metodom najmanjih kvadrata poboljšava se konačno rješenje trodimenzionalnog položaja prijamnika u koordinatnom sustavu. Matematički prikaz metode za izračun položaja prijamnika koristeći jednofrekvencijsku metodu u jednoj točki, dan je u poglavlju 5.2.6.

Osim pogreški koje su uzrokovane odstupanjima satova od vremena sustava, na točnost izračuna pseudoudaljenosti utječu i različiti čimbenici koji mijenjaju uvjete prostiranja signala kroz atmosferu. Pri prolasku elektromagnetskog vala kroz atmosferu dolazi do loma (refrakcije) – promjene brzine i smjera prostiranja (npr. Sameda, 2006). Zbog tih čimbenika dolazi do razlika u izmjerenim

pseudoudaljenostima u iznosu više desetaka metara. Njihov ukupan učinak može se podijeliti na električno neutralne uzroke, te uzroke koji nastaju uslijed pojave slobodnog električnog naboja (Teunissen i Montenbruck, 2017).

Električno neutralna grupa čimbenika koji uzrokuju atmosfersku refrakciju signala je funkcija temperature i parcijalnih tlakova pojedinih plinova, kao i parcijalnog tlaka vodene pare. S obzirom da se najveći dio ovih učinaka očituje u najgušćem sloju atmosfere, tj. troposferi, uobičajen naziv za ovu grupu učinaka je troposfersko kašnjenje signala.

Slobodan električni naboj u atmosferi također uzrokuje refrakciju signala i posljedično kašnjenje, a s obzirom da je najveći dio slobodnog naboja koncentriran u ionosferi, uobičajen naziv za ove učinke je ionosfersko kašnjenje signala. Ovi izvori pogrešaka su temeljni čimbenici čiji se učinci analiziraju u ovoj disertaciji, u kontekstu njihove varijabilnosti pod forsiranjem vulkanskom aktivnošću. Detaljan pristup problematici električnog naboja u atmosferi donosi treće poglavlje disertacije.

### ***2.1.3 Relativistički učinci na mjerenje vremena u GNSS sustavima***

Opća i specijalna teorija relativnosti (Einstein i Lawson, 1921) predviđaju da će vrijeme u satelitima koji se nalaze u GNSS orbitama, za promatrača na površini Zemlje, prolaziti 38  $\mu$ s na dan brže nego pokazuju odgovarajući referentni satovi na Zemlji. Taj ukupan učinak dnevne razlike u proteku vremena sastoji se od triju glavnih komponenti (Ashby, 2003; Teunissen i Montenbruck, 2017; Subirana i sur., 2013):

1. Dilatacija vremena zbog brzine kretanja satelita od 3,874 km/s za promatrača na Zemlji stvara privid usporenja satelitskog sata za 7  $\mu$ s/dan;
2. Gravitacijski crveni pomak zbog razlike u gravitacijskom potencijalu promatrača na Zemlji i satelita, stvara privid ubrzanja satelitskog sata za 45  $\mu$ s/dan;

3. Sagnacov učinak<sup>1</sup> zbog rotacije Zemljinog referentnog okvira tijekom vremena prostiranja signala od satelita do prijarnika, za prijarnik nepomičan u odnosu na Zemlju, iznosi do najviše 133 ns.

Osim spomenutih komponenti koje su u aktualnim GNSS sustavima korigirane, postoje i sporedni učinci, primjerice promjene gravitacijskog crvenog pomaka zbog spljoštenosti Zemlje te gravitacijski učinci drugih nebeskih tijela, prvenstveno Sunca i Mjeseca. Ovi učinci su dovoljno mali da ih na trenutačnom stupnju GNSS tehnologije nije potrebno ispravljati, ali u budućim primjenama koje će zahtijevati znatno veće razine točnosti i ti učinci će se morati uzeti u obzir (Kouba, 2004).

Navedene relativističke komponente pod točkama 1 i 2 su akumulirajuće naravi te je za njih u GPS sustavu ispravka ugrađena u satelitske satove kojima je frekvencija postavljena na vrijednost 10,2299999543 MHz. Promatraču na površini Zemlje tako prilagođeni satelitski satovi imat će prividno frekvenciju 10,23 MHz koja predstavlja fundamentalnu frekvenciju sustava. Proračunom se može pokazati da bi bez ove ispravke, razlika u vremenu stvorila akumulirajuću pogrešku položaja i do 10 kilometara u samo jednom danu.

S obzirom na činjenicu da su orbite satelita elipse, njihova udaljenost u odnosu na središte Zemlje je ovisna o položaju satelita u orbiti. Uslijed te promjene i brzina kretanja satelita te njegov gravitacijski potencijal se ponešto razlikuju među pojedinim točkama orbite, pa se time mijenjaju i relativistički učinci. Te periodične promjene relativističkih učinaka nije moguće ispraviti unaprijed, stoga se kompenziraju pri proračunu u prijarniku na način da sateliti u kodiranoj navigacijskoj poruci odašilju parametre potrebne za računski proračun te ispravke (više o kodovima i navigacijskoj poruci donosi poglavlje 2.1.5). Primjerice, s ekscentricitetom GPS orbite od 0,02, promatrač na Zemlji uočava prividnu sinusoidnu varijaciju u proteku satelitskog vremena amplitude 46 ns (Teunissen i Montenbruck, 2017).

---

1 Sagnacov učinak se javlja zbog promjene duljine puta kojim se prostire satelitski signal, uslijed pomicanja prijarnika u prostoru pod utjecajem Zemljine rotacije.



### **2.1.4 Složeniji modaliteti određivanja položaja GNSS sustavima**

U konceptualnom prikazu određivanja položaja iznesenom u prethodnom poglavlju, podrazumijevao se najjednostavniji modalitet rada sustava koji se naziva jednofrekvencijsko određivanje položaja u jednoj točki (engl. *Single Point Positioning* – SPP). Osim tog modaliteta razvijen je niz drugih, složenijih i točnijih. U ovome poglavlju prikazane su najčešće korištene metode za poboljšanje točnosti izračuna položaja. S obzirom da je istraživanje u radu provedeno korištenjem SPP metode, prikazi složenijih metoda bit će ograničeni na osnovni pregled.

#### **2.1.4.1 Višefrekvencijsko i višekonstelacijsko određivanje položaja**

Precizno određivanje položaja (engl. *Precise Point Positioning* – PPP) je metoda koja primarno koristi fazna mjerenja vala nosioca, dok kodna mjerenja kojima se koristi SPP metoda imaju sporednu ulogu u ovom načinu određivanja položaja. PPP metoda se temelji na izračunu linearne kombinacije kodnih i faznih mjerenja dvjema frekvencijama u cilju eliminacije učinaka kašnjenja signala uslijed atmosferskih utjecaja (Teunissen i Montenbruck, 2017; Zumberge i sur., 1997; Bishath i Gao, 2009; Bisnath i sur., 2018).

U novije vrijeme sve češće se koristi metoda višefrekvencijskog određivanja položaja u svrhu izračuna položaja korisnika s većom točnošću u odnosu na jednofrekvencijski izračun. Ranije je takva tehnologija bila rezervirana za vojne svrhe, a zatim je preko ekskluzivnih industrijskih primjena ušla u civilnu uporabu. Uslijed visoke cijene, široka upotreba u civilnom sektoru do trenutka pisanja ove disertacije nije zaživjela u općoj pomorskoj navigaciji, gdje se i dalje kao osnovna metoda koristi jednofrekvencijsko određivanje položaja u jednoj točki (SPP) temeljeno na jednofrekvencijskim kodnim opservacijama (Montenbruck, 2003).

Metoda višefrekvencijskog određivanja položaja korigira utjecaj ionosferskog kašnjenja signala izravnim mjerenjem učinka. Pritom se metoda oslanja na linearnu kombinaciju faznih mjerenja ( $\phi_{IF}$ ) pomoću dviju različitih frekvencija (Teunissen i Montenbruck, 2017; Hoque i Jakowski, 2008):

$$\phi_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_2 , \quad (7)$$

gdje su  $f_1$  i  $f_2$  korištene frekvencije valova nosioca satelitskih signala,  $\phi_1$  i  $\phi_2$  izmjerene faze valova nosioca, dok oznaka " $_{IF}$ " predstavlja rješenje oslobođeno utjecaja ionosferskog kašnjenja (engl. *Ionospheric Free*).

Pritom se u GPS sustavu takvi prijamnici koriste kodnim i faznim opservacijama L1 i L2c ili novijeg L5 signala. Uz primjenu PPP metode moguće je postići centimetarsku točnost izračunanog položaja, a posebno kombiniranjem s ispravkama referentnih stanica (sljedeće poglavlje).

Ublažavanje pogreške položaja moguće je i korištenjem više GNSS sustava odjednom, korištenjem prijamnika koji su predviđeni za prijam i obradu signala višestrukih sustava. Na primjer, Kos i sur. (2018) pokazuju da se korištenjem više od jednog GNSS sustava odstupanje položaja u horizontalnoj ravnini općenito smanjuje, a smanjenje se pritom pripisuje nižoj vrijednosti geometrijske raspodjele točnosti (engl. *Dilution Of Precision – DOP*) uslijed većeg broja vidljivih satelita istovremeno.

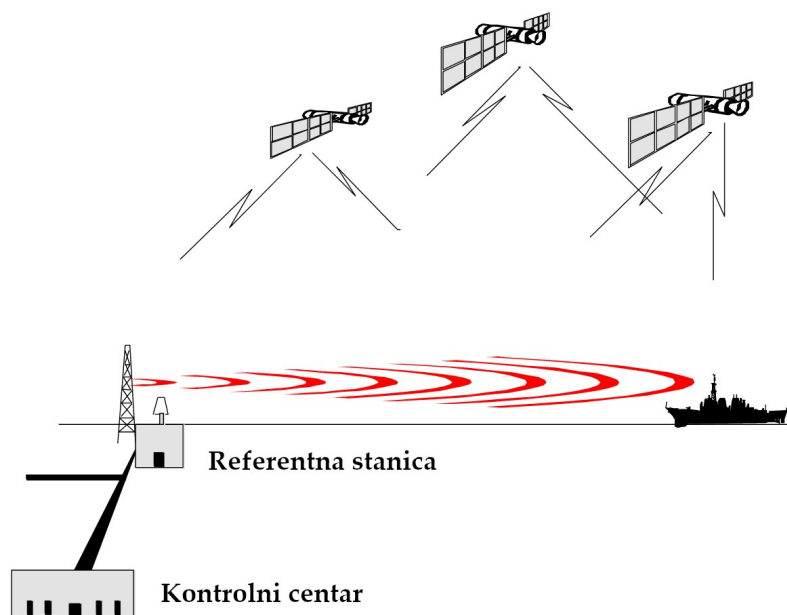
#### 2.1.4.2 Diferencijalne metode određivanja položaja

Diferencijalne metode koriste usluge ispravke položaja dobivene mjerenjima referentnim GNSS stanicama. Postoje dvije temeljne inačice diferencijalnih GNSS sustava. Prva inačica se temelji na lokalnim mjerenjima i emitiranju ispravki lokalnim odašiljačima, a druga pokriva šire geografske regije satelitski temeljenim uslugama ispravke.

U obalnoj navigaciji gdje zbog gustog pomorskog prometa postoji potreba za točnijim određivanjem položaja *de facto* je standardizirana uporaba DGNSS (engl. *Differential GNSS*) usluga s lokalnom pokrivenošću. One omogućuju poboljšanje

točnosti izračunanog položaja za korisnike koji posjeduju kompatibilne prijamnike s mogućnošću primanja dodatnih DGNSS radiosignala (Teunissen, 1991; Kee i Parkinson, 1996; Teunissen i Montenbruck, 2017).

Diferencijalna metoda određivanja položaja omogućuje neizravno umanjene pogrešaka u izračunu položaja. Diferencijalni sustavi se koriste mrežama referentnih GNSS stanica. Konceptualno, referentne stanice računaju razliku između položaja dobivenog GNSS sustavom i poznatog stvarnog položaja antene prijarnika stanice. Tako dobivena razlika emitira se prijarnicima u blizini u obliku položajne ispravke, koji ju koriste u cilju popravljjanja svojeg izračunanog položaja (Teunissen, 1991; Kee i Parkinson; 1996; Enge i sur., 1988; Matosevic i sur, 2006).



Slika 2: Arhitektura DGNSS sustava  
Izvor: Izradio autor prema Hall (1996)

Udaljavanjem od referentne stanice točnost ispravke opada. Razlozi za opadanje točnosti su prema Monteiro i sur. (2005):

- Nemogućnost da referentna stanica i korisnik uvijek primaju signal sa istih satelita;

- Različit iznos ionosferskog kašnjenja u području referentne stanice i korisnika;
- Različit iznos troposferskog kašnjenja u području referentne stanice i korisnika.

Monteiro i sur. (2005) su izračunali opadanje točnosti udaljavanjem od referentne stanice za 0,22 m/100km.

Sustavi za poboljšanje točnosti GNSS pozicioniranja koji se temelje na raspodjeli satelitskih ispravki nazivaju se SBAS sustavima (Diggelen, 2009, Teunissen i Montenbruck, 2017).

SBAS sustavi se sastoje od triju elementa (Teunissen i Montenbruck, 2017):

- Mreža referentnih stanicama;
- Centralna jedinica za procesiranje podataka;
- Sateliti u geostacionarnoj orbiti za raspodjelu ispravki položaja.

Mreža referentnih stanica u realnom vremenu prikuplja podatke o položajnoj točnosti sustava i prosljeđuje ih u centralnu jedinicu koja vrši provjere podataka i generira ispravke položaja. Tako kreirane ispravke se odašilju na geostacionarne satelite (geostacionarna orbita – 35.785 km visine) koji ih emitiraju korisničkim prijamnicima opremljenima sklopovskim i softverskim rješenjima za njihovo primanje i primjenu (European Space Agency, 2011). Operativno je implementiran veći broj aktualnih SBAS mreža, čiji popis donosi sljedeći paragraf (Camacho-Lara, 2013):

Kao diferencijalne SBAS usluge, u Sjevernoj Americi od 2003. je implementiran sustav WAAS (engl. *Wide Area Augmentation System*) dok je u Europi aktivan sustav EGNOS (engl. *European Geostationary Navigation Overlay Service*). SBAS sustav Ruske Federacije se naziva SDCM (engl. *System for Differential Corrections and Monitoring*). U srodne sustave spadaju i SNAS (engl. *Satellite Navigation Augmentation System*) za kineski BeiDou sistem. Također, u istu grupu spadaju još i japanski MSAS sustav (engl. *Multi – functional Satellite Augmentation System*) za

QZSS, indijski sustav GAGAN (engl. *GPS Aided Geo Augmented Navigation*) za IRNSS-NAVIC, korejski KAAS (engl. *Korea Augmentation Satellite System*), afrički SBAS ASECNA/AFI (engl. *The Agency for Air Navigation Safety in Africa and Madagascar; African-Indian ocean*), australski SPAN (engl. *Southern Positioning Augmentation Network*), te SACCSA sustav (španj. *Solución de Aumentación para Caribe, Centro y Sudamérica*) koji je u implementaciji na području južne Amerike (Choy i sur., 2016; Teunissen i Montenbruck, 2017; European GNSS Agency). Geografska pokrivenost aktualnih SBAS sustava prikazana je na slici 3.



Slika 3: Pokrivenost aktualnih SBAS sustava  
Izvor: GSA(2018b)

SBAS je modernija inačica implementacije diferencijalnih GNSS usluga u odnosu na DGPS. Najveću prednost pritom SBAS pokazuje u prostornoj pokrivenosti područja. Tijekom posljednjih godina u pomorskoj navigaciji odvija se postupna tranzicija s GNSS i DGNSS na upotrebu SBAS-GNSS sustava. Europska GNSS agencija (engl. *European GNSS Agency*, GSA) predviđa uvođenje faze 3 – implementacije EGNOS v3 signala na L1 i L5 frekvencijama do 2025. godine, čime bi se ostvarila usluga u skladu sa zahtjevima IMO rezolucija A.1046 (27) i A.915

(22) (Lopez-Martinez i sur., 2020, IMO, 2001; IMO, 2011). U cilju pouzdanijeg primanja SBAS podataka, implementira se dodatno odašiljenje signala zemaljskim MF (engl. *Medium Frequency*) i AIS stanicama (Lopez-Martinez i sur., 2020).

Promatrajući isključivo GPS sustav, podsustav za diferencijalnu metodu pozicioniranja naziva se DGPS (engl. *Differential Global Positioning System*). DGPS sustav je prvi operativni diferencijalni GNSS sustav. Primjena DGPS protokola u američkim obalnim vodama uspostavljena je na inicijativu Obalne straže od 1990. godine (Hall, 1996).

Osim opisanih klasičnih diferencijalnih metoda (DGNSS i SBAS), naprednija metoda diferencijalnog određivanja položaja je kinematičko pozicioniranje u stvarnom vremenu (engl. *Real Time Kinematics – RTK*) (Rietdorf, Daub, i Loef, 2006). U ovom modalitetu referentna stanica (engl. *base*) omogućuje pokretnom korisniku (engl. *rover*) eliminaciju fazne neodređenosti mjerenja što metodu čini točnijom u odnosu na klasični DGNSS/SBAS koji koristi kodne ispravke. Nedostatak RTK metode u odnosu na DGNSS/SBAS je ograničena efektivna udaljenost referentne stanice i pokretnog korisnika na najviše 10 – 20 km (Teunissen i Montenbruck, 2017; Parkinson i Spilker, 1996).

Ovisno o konkretnoj namjeni i zahtjevima točnosti, višefrekvencijski prijamnici pri implementaciji PPP metode mogu dodatno kombinirati RTK metodu ili mrežnu verziju RTK metode (Rizos i Han, 2003; Teunissen i Montenbruck, 2017). Kombinacija RTK i PPP metoda (PPP-RTK) objedinjuje prednosti koje se očituju u točnosti određivanja položaja i brzini inicijalnog izračuna (Teunissen i Montenbruck, 2017).

### **2.1.5 Struktura satelitskih signala za određivanje položaja**

Struktura signala koje odašilju navigacijski sateliti se razlikuje među pojedinim GNSS sustavima. Čak i unutar istog sustava, a ovisno o generaciji satelita, struktura signala, frekvencije valova nosioca i ukupni broj različitih emitiranih signala bit će često nešto drugačiji. S obzirom na činjenicu da je u ovome radu

analiziran učinak vulkanske aktivnosti na GPS sustav, u ovome poglavlju razmatranja će s općenitih GNSS sustava biti usmjerena konkretnije prema GPS sustavu. Prikaz strukture signala ostalih GNSS sustava je izvan područja interesa ovog istraživanja te su oni stoga većim dijelom izostavljeni iz pregleda. U daljnjem dijelu poglavlja bit će opisani satelitski signali za određivanje položaja koje odašilju GPS sateliti s posebnim naglaskom na signale koji se koriste za jednofrekvencijsko određivanje položaja.

Modulacija signala predstavlja varijaciju amplitude, frekvencije ili faze vala nosioca u vremenu, čime se postiže mogućnost prijenosa kodirane informacije signalom. Prema moduliranom parametru, razlikuje se amplitudna, frekvencijska i fazna modulacija signala (Frenzel, 2018).

GPS sateliti emitiraju signale za civilnu upotrebu valova nosioca koji se nalaze u L pojasu EM spektra, između 1 i 2 GHz (IEEE, 2003). Frekvencije L pojasa pružaju dobre uvjete prostiranja signala s obzirom na atmosfersko upijanje i raspršenje, a antena prijarnika može biti vrlo malih dimenzija što omogućuje izradu minijaturnih uređaja za različite mobilne primjene.

S obzirom da svi sateliti istog sustava koriste identičnu frekvenciju signala, potrebno je primijeniti tehniku koja će omogućiti dijeljenje raspoložive širine kanala (engl. *bandwidth*). Za tu svrhu se u pravilu koriste tehnike višestrukog pristupa frekvencijskom pojasu (engl. *multiple access*, MA). Općenito su u upotrebi tri vrste višestrukih pristupa nekom frekvencijskom pojasu (Lee i Miller, 1998):

1. Višestruki pristup raspodjelom vremena (engl. *Time Division Multiple Access*, TDMA);
2. Višestruki pristup raspodjelom frekvencija (engl. *Frequency Divison Multiple Access*, FDMA);
3. Višestruki pristup kodnom raspodjelom (engl. *Code Division Multiple Access*, CDMA).



Moguća je i kombinacija dviju različitih tehnika višestrukih pristupa frekvencijskom pojasu. Većina GNSS sustava koristi kodnu raspodjelu s izravnom sekvencom (engl. *Direct Sequence Code Division Multiple Access*, DS-CDMA) pri čemu svaki satelit koristi jedinstven kôd u obliku binarne pseudoslučajne sekvence. Za razliku od ostalih, GLONASS sustav koristi FDMA raspodjelu frekvencijskog pojasa s mogućnošću kombiniranja s kodnom raspodjelom (CD/FDMA) (Teunissen i Montenbruck, 2017).

Originalni GPS kodovi se emitiraju s 15 najstarijih satelita (Block IIA i IIR) na valovima nosiocima L1 (1575,42 MHz) i L2 (1227,6 MHz). Frekvencije valova nosioca se temelje na fundamentalnoj frekvenciji sustava od 10,23 MHz te se mogu prikazati kao:

$$L1 = 10,23 \text{ MHz} \cdot 154 = 1575,42 \text{ MHz} \quad , \quad (8)$$

$$L2 = 10,23 \text{ MHz} \cdot 120 = 1227,6 \text{ MHz} \quad . \quad (9)$$

Na L1 frekvenciji se odašilje kodni signal grubog mjerenja (engl. *coarse/acquisition* – C/A) i taj kôd nije enkriptiran što znači da je dostupan svim korisnicima. Dodatno, na obje frekvencije se odašilje i kôd preciznog mjerenja (engl. *Precision*, P-) te se nakon kriptiranja naziva Y-kodom, iz čega proizlazi uobičajeni naziv P(Y)-kôd (engl. *P(Y)-code*). P(Y)-kôd ima 10 puta uži opseg i 10 puta veću učestalost izmjene podataka što mu omogućuje znatno bolju preciznost u izračunu položaja. Dekriptijski pristup tom kodu ograničen je za vojnu upotrebu NATO saveza i vladine agencije Sjedinjenih Američkih Država.

Inicijalno je zamišljeno da određivanje položaja "grubim" C/A-kodom bude znatno manje točno u odnosu na P(Y)-kôd, međutim u praksi se pokazalo da to nije u potpunosti slučaj te da se naprednim algoritmima u prijamnicima može postići gotovo identična točnost položaja korištenjem oba koda. Zbog toga je do kraja travnja 2000. godine C/A signal namjerno degradiran unošenjem slučajne pogreške (engl. *Selective Availability*, SA), no iza 1. svibnja 2000. pogreška je isključena



trajno, čime C/A kôd omogućuje vrlo precizno mjerenje položaja. Velika prednost kodiranog P(Y) signala danas se očituje u zaštiti od malicioznog lažiranja (engl. *spoofing*) (Rabbani, 2006).

Noviji sateliti lansirani između 2005. i 2009. godine (Block IIR-M) emitiraju dva nova navigacijska signala – novi kôd za vojnu upotrebu na L1 i L2 (M-kod) te novi kôd za civilnu upotrebu na L2 frekvenciji (naziv: L2C). Uvođenjem drugog ("grubog") koda za civilnu upotrebu na L2, omogućeno je višefrekvencijsko određivanje položaja i civilnim korisnicima (Rabbani, 2006, Teunissen i Montenbruck, 2017). Block IIF i Block III sateliti emitiraju i modernizirani kôd L5 na L5 frekvenciji, a Block III još i dodatan kôd za civilnu upotrebu na L1 (naziv: L1C). L5 frekvencija se također temelji na fundamentalnoj frekvenciji od 10,23 MHz:

$$L5 = 10,23 \text{ MHz} \cdot 115 = 1176,45 \text{ MHz} \quad . \quad (10)$$

Pritom, modernizirani kodovi L5 i L1C koriste modulacije šire propusnosti. L1C kôd omogućuje kompatibilnost GPS i Galileo sustava. Razlika L5 i L1 frekvencije je veća u odnosu na razliku L2 i L1, što omogućuje bolju točnost ispravki ionosferskog kašnjenja u primjeni L5 i L1 frekvencije u dvofrekvencijskim izračunima (Teunissen i Montenbruck, 2017).

Kodovi predstavljaju ponavljajuće pseudoslučajne<sup>2</sup> sekvence bitova, emitirane definiranom brzinom i imaju definiranu duljinu. Kôd svakog satelita je jedinstven, što omogućuje prijamniku da identificira pojedine satelite (kodna raspodjela frekvencije vala nosioca, CDMA).

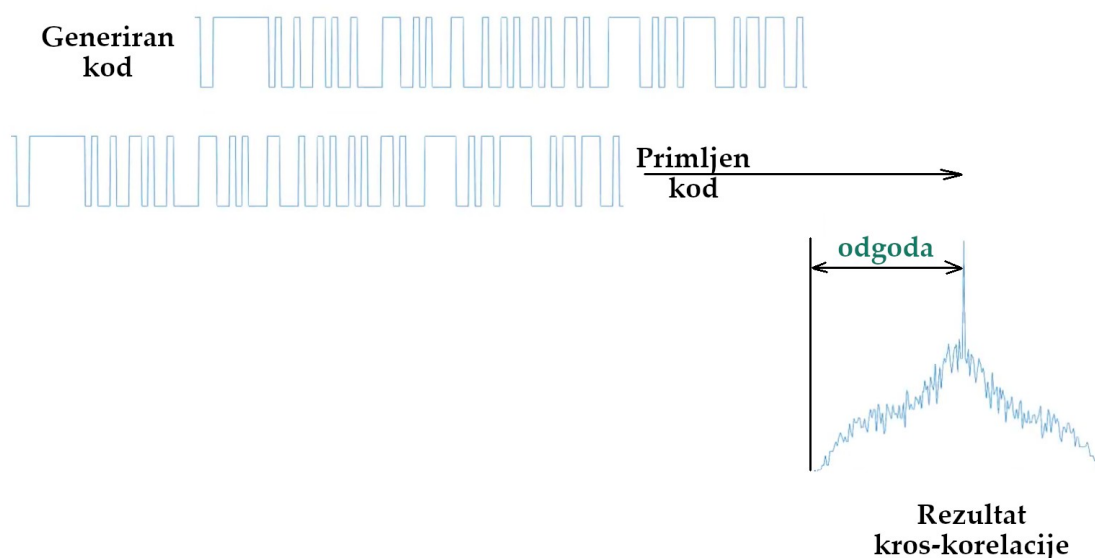
U kontekstu informacijskog sadržaja signala, valovi nosioci signala su modulirani kodovima za određivanje položaja u kojima su kodirane informacije s navigacijskim elementima nužnim za određivanje položaja. Ove informacije se nazivaju navigacijska poruka (Parkinson i Spilker, 1996; Teunissen i Montenbruck,

---

2 Pseudoslučajna sekvenca je ona koja statistički zadovoljava uvjet slučajnosti, ali je dobivena definiranim determinističkim algoritmom i stoga je ponavljajuća.

2017). Navigacijska poruka u GPS sustavu sadrži ispravke netočnosti satelitskih satova i relativističkih učinaka zbog ekscentriciteta orbite, razliku UTC i vremena GPS sustava, status i položaj satelita (efemeride) te koeficijente modela za ispravku ionosferskog i troposferskog kašnjenja (GPS Directorate, 2013; Misra i Enge, 2004; Subirana i sur., 2013).

Procedura određivanja pseudodudaljenosti temelji se na sljedećem konceptu. Pretpostavimo da su satovi u satelitu i prijamniku potpuno sinkronizirani. U istom trenutku, satelit i prijamnik generiraju identičan pseudoslučajan kod. Satelit odašilje taj kôd signalom i prijamnik ga prima s određenim vremenskim kašnjenjem.



Slika 4: Princip određivanja vremenske odgode primanja signala

Primljeni signal se metodom kros-korelacije uspoređuje s generiranom replikom. Kros korelacija je tehnika uspoređivanja dvaju vremenskih nizova, čime rezultat analize pokazuje iznos vremenskog zaostajanja jednog u odnosu na drugi promatrani niz. Pri usporedbi primljenog kodiranog signala s njegovom identičnom replikom, najviši iznos rezultata kros korelacije pojavit će se onda kad

se oba signala dovedu u fazu, tj. onda kad je vremensko zaostajanje signala u odnosu na repliku jednako nuli (Slika 4). Potreban iznos relativnog pomaka kodova za postizanje vršne vrijednosti kroz korelacije, predstavlja vremensku odgodu primanja signala, odnosno pseudoudaljenost satelita i prijarnika (Parkinson i Spilker, 1996; Teunissen i Montenbruck, 2017).

## 2.2 Segmenti GNSS sustava

GNSS sustavi se sastoje od svemirskog segmenta (sateliti u orbitama oko Zemlje), kontrolnog segmenta (stanice za praćenje i upravljanje) te korisničkog segmenta (prijamnici). Većina autora dijeli arhitekturu GNSS sustava u spomenuta tri segmenta, dok se prema nekim autorima i prijenosni medij (atmosfera) može smatrati "segmentom" sustava.

Svemirski segment obuhvaća satelite u Zemljinim orbitama. GNSS sateliti se nalaze u srednjoj orbiti (engl. *Medium Earth Orbit* – MEO). Srednja orbita je visinska regija koja se nalazi između niske i visoke orbite. Aktualni GNSS sateliti u ovoj orbiti imaju radijuse velikih poluosi između 25.510 i 29.600 kilometra, što odgovara ophodnim vremenima između 11 h i 16 min te 14 h i 5 min (Teunissen i Montenbruck, 2017).

GPS sateliti imaju radijus velike poluosi 26.560 km i ophodno vrijeme 11 h i 58 min. Poredani su u šest orbitalnih ravnina koje se nalaze pod međusobnim kutom od 60°, a u odnosu na ravninu nebeskog ekvatora inklinirane su pod kutom od 55°. Ekcentricitet putanje iznosi manje od 0,02. S obzirom na visinu orbite, svaki satelit pokriva otprilike 34 % Zemljine površine uz minimalni kut elevacije satelita promatran s površine Zemlje od 5°. Nominalan broj GPS satelita je 24, a zbog redundancije održava se do 32 operativna satelita u svakom trenutku (Subirana sur., 2013; Parkinson, 1996; Teunissen i Montenbruck, 2017). Za rad i odašiljanje radiosignala sateliti koriste električnu energiju iz baterija koja se nadopunjuje preko solarnih panela (Medina-Castro i sur., 2020).

Kontrolni segment GNSS sustava je zadužen za kontrolu položaja i statusa satelita i upravljanje cijelim sustavom (Subirana i sur., 2013; Teunissen i Montenbruck, 2017). U GPS sustavu, glavna kontrolna stanica nalazi se u *Schriever Air Force Base* u Koloradu, a rezervna kontrolna stanica smještena je u Kaliforniji. Stanice za praćenje primaju signale sa satelita i prosljeđuju u glavnu kontrolnu stanicu koja temeljem tih podataka računa položaje i brzine satelita, odstupanja i promjene odstupanja satova. U glavnoj kontrolnoj stanici se temeljem prikupljenih informacija pripremaju navigacijske poruke koje se šalju na satelite, odakle se u konačnici odašilju korisničkim prijateljima (Parkinson, 1996; Teunissen i Montenbruck, 2017; Medina-Castro i sur., 2020).

Korisnički segment predstavljaju prijatelji koji se općenito sastoje od elektroničkog sklopa prijatelja, antene, napajajućeg dijela te dodatne opreme poput spojnih kabela, ekrana, kućišta itd. Po prijemu signala, u prijatelju se identificiraju pojedini sateliti, računaju pseudoduljenosti te konačno položaj u koordinatnom sustavu. U GPS sustavu, civilni prijatelji za tu namjenu koriste standardnu korisničku uslugu sustava (US DOD, 2008), dok autorizirani korisnici mogu primiti preciznu uslugu (US DOD, 2007). Mnogi GNSS prijatelji imaju mogućnost korištenja usluga s više različitih GNSS sustava.

## 2.3 Prostiranje satelitskih radiovalova

EM valovi se šire kroz zrakoprazan prostor pravocrtno i pritom je njihovo prostiranje opisano valnim jednadžbama koje proizlaze iz Maxwellovih jednadžbi (Levin i Miller, 1981; Dyson, 1990):

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \epsilon \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E} \quad , \quad (11)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \epsilon \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{H} \quad , \quad (12)$$

gdje  $\nabla^2$  označava vektorski Laplaceov operator,  $\epsilon$  i  $\mu$  su električna permitivnost i magnetska permeabilnost, vektori  $\mathbf{E}$  i  $\mathbf{H}$  su jakost električnog i magnetskog polja, a  $t$  predstavlja vrijeme. Brzina prostiranja EM valova (fazna brzina) definirana je kao:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (13)$$

Brzina prostiranja kroz medij ovisi o vrijednostima konstanti  $\epsilon$  i  $\mu$ .

Pri prolasku EM vala kroz medij (npr. atmosfera) dolazi do pojave loma (refrakcije). Pritom se definira indeks loma koji povezuje brzinu prostiranja vala kroz vakuum ( $c$ ) i kroz medij ( $v$ ) prema relaciji (Davies, 1965; Someda, 2006):

$$n = \frac{c}{v} \quad (14)$$

Iz (14) proizlazi da će pri prostiranju EM vala kroz medij njegova brzina biti umanjena za faktor koji je jednak indeksu loma za taj medij.

Fermatovo načelo (npr. Feynman i sur., 2011) kaže da se EM val između dviju zadanih točaka širi onom putanjom za koju je potreban protok najkraćeg vremena. Iz tog načela proizlazi zakon o refrakciji EM valova.

Kad EM val naiđe na medij indeksa loma  $n$ , ne širi se pravocrtno kao u vakuumu već je njegov kut daljnjeg prostiranja opisan zakonom refrakcije (Snellovim zakonom) (npr. Feynman i sur., 2011):

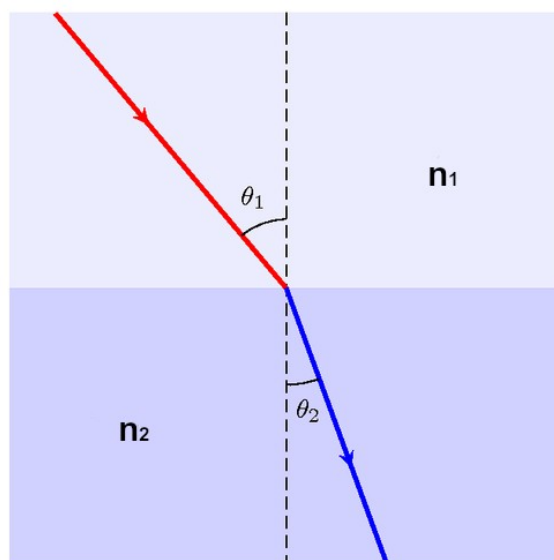
$$\sin \Theta_i = n \sin \Theta_r \quad (15)$$

gdje je  $\Theta_i$  kut prostiranja EM vala u vakuumu, a  $\Theta_r$  kut u mediju. Kad medij nije homogen, gornji izraz postaje:

$$n_1 \sin \Theta_1 = n_2 \sin \Theta_2 \quad (16)$$

Pritom se kut prostiranja mijenja prema onoj strani medija koja ima viši indeks loma.

Skretanjem EM vala od pravocrtnog prostiranja povećava se ukupan prijeđeni put od satelita do prijarnika što uzrokuje kašnjenje signala za određivanje položaja. Uzroci kašnjenja signala detaljno su obrađeni u poglavlju 3.



Slika 5: Zakon refrakcije

Slika 5 konceptualno prikazuje zakon refrakcije koji povezuje kut prostiranja EM vala  $\theta$  i indeks loma  $n$ . U primjeru na slici,  $n_2 > n_1$ .

Nedisperzivni medij je onaj u kojem brzina prostiranja signala ne ovisi o frekvenciji vala nosioca. U njemu su fazna i grupna brzina vala identične ( $v_p = v_g$ ).

Disperzivni medij je onaj u kojem brzina prostiranja signala ovisi o frekvenciji vala. Može se pokazati da pri prostiranju signala kroz disperzivni medij, brzina prostiranja EM vala nosioca (fazna brzina) i grupna brzina kojom se prostire signal informacije moduliran u val nosioc nisu identične. Grupna brzina je ona brzina kojom se kroz prostor kreće informacija, tj. kôd navigacijskog signala te je mjera za brzinu gibanja valne energije (npr. Teunissen i Montenbruck, 2017).

Ako je  $f_c$  frekvencija vala nosioca, a valni broj  $k = 2\pi/\lambda$  gdje je  $\lambda$  valna duljina, može se definirati grupna brzina izrazom (Teunissen i Montenbruck, 2017):

$$v_g = 2\pi \left. \frac{df}{dk} \right|_{f=f_c} \quad (17)$$

Svaki medij u kojem je indeks refrakcije funkcija frekvencije je disperzivan. Električno neutralna atmosfera je većinom nedisperzivna za EM valove, dok je električno nabijena atmosfera (ionosfera) za EM valove disperzivna. Zbog razlike brzine vala nosioca i grupne brzine, nastaje divergencija koda i vala nosioca (engl. *code-carrier divergence*) (Misra, Pratap, i Per Enge, 2006) te se zato u GNSS terminologiji učinak kašnjenja često naziva grupnim kašnjenjem (engl. *group delay*).

## 2.4 Izvori pogreški i proračun odstupanja u određivanju položaja GNSS sustavima

Pri određivanju položaja GNSS sustavima različiti čimbenici uzrokuju kašnjenje signala i unose druge elemente odstupanja položaja. Refrakcija EM vala pri prolasku kroz električno nabijen medij (ionosferu) je temeljni uzrok kašnjenja signala te uzrokuje odstupanja u izračunanom položaju između 0 i 5 metara (Teunissen i Montenbruck, 2017).

Osim ionosferskog, do dodatnog kašnjenja dolazi refrakcijom signala kroz troposferu uslijed učinaka promjene gustoće te parcijalnih tlakova plinova i vodene pare po slojevima zraka te njihove nepravilne prostorne koncentracije uslijed opće atmosferske cirkulacije, lokalnih sinoptičkih procesa itd. Troposfersko kašnjenje je značajno manje izraženo od ionosferskog i uzrokuje oko 0,2 m pogreške u izračunu položaja (Teunissen i Montenbruck, 2017), a u praksi se ispravlja empiričkim modeliranjem (Saastamoinenov model, Hopfieldov model, itd.); (Saastamoinen, 1972; Hopfield, 1969). Viher (2011) istražuje utjecaj temperature, vlažnosti i tlaka zraka na refrakciju radiovalova u troposferi i nalazi značajan udio nestandardnih

refrakcija koje se najčešće javljaju u atmosferskom graničnom sloju te pokazuju pravilnost godišnjeg hoda. Viher također pokazuje da se u troposferi broj pojava anomalne refrakcije smanjuje s visinom.

Višestruki putovi (Lau, 2021, Pirsiavash i sur., 2018) su izvori pogrešaka koje nastaju pri refleksiji signala od objekata u blizini prijarnika prije nego stigne do njegove antene. Ovisno o uvjetima u okolišu prijarnika, to može uzrokovati odstupanja i na desetke metara (Kaplan, 2006; Pirsiavash i sur., 2018). U slučaju prominentno postavljene antene prijarnika u odnosu na okolišne reflektirajuće površine, učinak višestrukih putova se značajno umanjuje i rezultirajuća pogreška u pravilu iznosi manje od 1 m (Teunissen i Montenbruck, 2017).

Pod pojmom šum prijarnika podrazumijevaju se odstupanja u mjerenju koja nastaju uslijed hardverskih i softverskih nesavršenosti uređaja te iznos ovih pogrešaka zavisi od kvalitete sklopovlja i softverskog rješenja prijarnika. U pravilu odstupanja zbog ovog uzroka iznose  $< 1$  m (Teunissen i Montenbruck, 2017).

Prethodno navedeni izvori pogrešaka nazivaju se pogreškama korisničkog segmenta (engl. *User Equipment Error* – UEE) te uključuju čimbenike pogrešaka korisničke opreme i okolišnih uvjeta.

Druga grupa pogrešaka nastaje u svemirskom i kontrolnom segmentu sustava (engl. *Signal-In-Space Range Error* – SISRE). Odstupanja u određivanju položaja iz ove grupe nastaju uslijed nedovoljno točno poznatih orbita satelita, odstupanja satelitskih satova od sustavnog vremena i grupnih kašnjenja odašiljanja signala. Iznosi pogrešaka uslijed ovih čimbenika iznose  $< 2$  m i pritom najveći dio otpada na netočnosti satelitskih satova (Teunissen i Montenbruck, 2017).

Ukupna vrijednost korisničke raspodjele pogrešaka (engl. *User Equivalent Range Error* – UERE) dobiva se kao (Teunissen i Montenbruck, 2017) :

$$UERE = \sqrt{SISRE^2 + UEE^2} \quad . \quad (18)$$



Konačno, na iznos odstupanja izračuna položaja utječe i geometrijska raspodjela točnosti (engl. *Geometric Dilution Of Precision* – GDOP). Ovaj učinak predstavlja omjer točnosti mjerenja pseudoudaljenosti i određivanja položaja (Subirana i sur., 2013). U slučaju nepovoljnog geometrijskog rasporeda satelita na nebu (primjerice, ako se većina prijamniku vidljivih satelita nalazi na istoj strani neba), vrijednost GDOP će biti velika te će ukupna pogreška izražena kao umnožak korisničke raspodjele pogrešaka i GDOP, također biti velika. U teorijskom slučaju kad bi svi sateliti ležali u istoj ravnini u odnosu na prijamnik, GDOP vrijednost bi postala beskonačna i izračun položaja tada ne bi bio moguć. Matematički se ukupna navigacijska pogreška položaja može izraziti kao

$$\sigma_T = UERE \cdot GDOP \quad , \quad (19)$$

gdje je  $\sigma_T$  ukupna pogreška izračunanog položaja (Teunissen i Montenbruck, 2017).

S obzirom na navedene uzroke odstupanja u mjerenju, formira se opservacijska jednadžba pseudoudaljenosti koja glasi (Teunissen i Montenbruck, 2017):

$$p_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + I_r^s + e_r^s \quad , \quad (20)$$

gdje je  $p_r^s$  geometrijska udaljenost prijamnika od satelita,  $dt_r$  odstupanje sata u prijamniku,  $dt^s$  odstupanje satelitskog sata,  $c$  brzina svjetlosti,  $T_r^s$  troposfersko kašnjenje signala,  $I_r^s$  ionosfersko kašnjenje signala, dok  $e_r^s$  predstavlja sve ostale čimbenike pogreške (šum prijamnika, višestruki putovi i drugi mali učinci).

## 2.5 Utjecaj odstupanja položaja na sigurnost pomorskog prometa

S razvojem pomorske navigacije zahtjevi za točnošću određivanja položaja plovnih jedinica postaju sve složeniji. Svjetska pomorska organizacija (engl. *International Maritime Organization*, IMO) još je početkom stoljeća prepoznala potrebu za međunarodnim civilnim satelitskim sustavom za određivanje položaja i navigaciju

koji bi bio dostupan globalno na svim svjetskim morima za potrebe pomorske plovidbe i srodnih djelatnosti. IMO pritom posebno naglašava potrebu za preciznim određivanjem položaja plovila u uvjetima ograničenih plovnih putova kao što su lučki bazeni i plovni kanali, kao i unutarnji plovni putovi (IMO, 2001).

Određivanjem položaja visokog stupnja točnosti pomoću GNSS sustava, pomorskoj plovidbi su omogućeni značajni razvojni potencijali. U prvom redu, sigurnost prometa na moru umnogome je unaprijeđena uvođenjem u upotrebu pouzdanog globalnog sustava za određivanje položaja broda i vođenje navigacije. Plovna područja opasna za navigaciju oduvijek su predstavljala značajan rizik. Određivanje položaja broda terestričkim i astronomskim metodama nije uvijek pouzdano, a često je i neprovedivo sa zahtijevanom točnošću. Poznavanje položaja broda s visokim stupnjem točnosti u uvjetima rizičnih voda za navigaciju od presudne je važnosti za sigurnost broda, tereta, posade i okoliša. Precizno vođenje broda po optimalnoj plovnoj ruti donosi brodaru i bolje ekonomske prihode, a teret stiže na odredište brže nego bi to bilo u protivnom moguće. Danas se određivanje položaja GNSS sustavima smatra primarnom metodom određivanja položaja i navigacije, a podaci o položaju iz GNSS prijamnika integrirani su u praktično sve navigacijske sustave zapovjedničkog mosta modernog broda (Norris, 2010; Weinrit, 2017; IMO, 1998; 2002; 2006).

Zahtjevi za točnošću i pouzdanošću određivanja položaja u pomorskoj navigaciji variraju ovisno o vrsti aktivnosti. Primjerice, oceanska navigacija općenito ne predstavlja aktivnost u kojoj je nužno vrlo točno poznavanje položaja broda. Suprotno tome, operacije u ograničenim plovnim područjima, ekološki osjetljivim područjima te u odobalnim eksploatacijama nafte i plina tradicionalno se smatraju aktivnostima koje zahtijevaju povećanu točnost i pouzdanost određivanja položaja. Danas se s posebnom pažnjom pristupa postavljanju standarda za točnost i integritet položajnih sustava za buduće primjene u domeni autonomnih plovila.

Izostanak ljudske posade na takvim brodovima ne dopušta odstupanja u izračunu položaja kakva su prihvatljiva na klasičnim brodovima kojima upravlja posada broda (Thomas i sur., 2011; Filjar, 2011; Kos i sur., 2018).

Pomorska plovidba se u kontekstu zahtjeva za točnošću određivanja položaja i vođenja navigacije može općenito podijeliti na:

- Oceansku plovidbu;
- Obalnu plovidbu;
- Plovidbu u prilazima lukama i drugim ograničenim akvatorijima;
- Plovidbu u području luka i unutarnjim plovnim putovima.

Osim plovidbe i njezinih elemenata poput izbjegavanja sudara, koordinacije brod-brod ili brod-kopno, operacija unutar lučkih sustava itd., razlikuju se i ostale pomorske operacije kao npr.:

- Rad službe nadzora i upravljanja pomorskim prometom (engl. *Vessel Traffic Service – VTS*, te *Vessel Traffic Management and Information System – VTMIS*) (Komadina i sur., 2013);
- Operacije traganja i spašavanja na moru (Medić i sur., 2019);
- Hidrografske i oceanografske aktivnosti, obilježavanje plovnih putova;
- Pomorsko inženjerstvo, građevinski radovi na pomorskoj infrastrukturi polaganje kabela i cjevovoda;
- Odobalne operacije, eksploatacija podmorja;
- Specifični oblici plovidbe kao što su tegljenje i potiskivanje te lomljenje morskog leda.

S obzirom na specifičnu aktivnost, zahtijevana prostorna točnost provođenja plovidbe i drugih pomorskih operacija bit će definirana na različitim razinama. IMO u Rezoluciji A.915(22) određuje posebne zahtjeve za točnošću određivanja položaja prema vrsti aktivnosti kako slijedi (GSA, 2018a; IMO, 1997; 2001):

*Kategorija 1 (zahtijevano odstupanje < 10 m u horizontalnoj ravnini):*

- Opća obalna i oceanska plovidba;

- Inicijalni prilaz u operacijama traganja i spašavanja;
- Analiza pomorskih nezgoda u obalnoj i oceanskoj plovidbi;
- Ribolovne namjene;
- Prilaz lučkim područjima;
- Upravljanje prometom, koordinacija plovidbe;
- Izbjegavanje sudara i kontrola plovidbe po planiranoj ruti;
- Plovidba unutrašnjim plovnim vodama;
- Oceanografske aktivnosti.

*Kategorija 2 (zahtijevano odstupanje < 1 m u horizontalnoj ravnini):*

- Pomorsko inženjerstvo, konstrukcija, održavanje, polaganje kabela i cijevovoda;
- Postavljanje i održavanja plovidbenih oznaka;
- Lučke operacije, lučki VTS/VTMIS sustavi i ograničeni plovni putovi;
- Analiza pomorskih nezgoda u prilazima lučkom području, ograničenim plovnim putovima i unutarnjim plovnim vodama;
- Finalni prilaz u operacijama traganja i spašavanja;
- Istraživanje i eksploatacija podmorja;
- Operacije u ustavama, tegljenje, potiskivanje i operacije ledolomaca;
- Hidrografska ispitivanja.

*Kategorija 3 (zahtijevano odstupanje < 0,1 m u horizontalnoj ravnini):*

- Održavanje dubine i širine plovnih kanala, građevinski radovi;
- Sustavi za upozoravanje na opasnost od sudara u unutarnjim plovnim vodama;
- Dokovanje brodova;
- Operacije rukovanja teretom;
- Automatski privez i odvez broda.

Iako se u pomorstvu primarni fokus aspekta točnosti položaja nalazi u horizontalnoj ravnini, za neke od specifičnih operacija zahtijeva se i točnost određivanja položaja u vertikalnoj ravnini. Primjer za takve aktivnosti je

postavljanje eksploatacijskih platformi gdje je neophodna visoka vertikalna točnost određivanja položaja pa pritom odstupanje u vertikalnoj ravnini, prema IMO standardu ne smije premašivati 10 cm.

S obzirom na činjenicu da je danas GNSS primarni izvor određivanja položaja u pomorstvu te da većinu korisničke opreme i dalje čine jednofrekvencijski satelitski prijamnici (Brčić, 2015), točnost određivanja položaja dobivenog takvim prijamnicima još uvijek predstavlja važan aspekt sigurnosti plovidbe i drugih pomorskih operacija. Iz IMO zahtjeva za točnošću određivanja položaja izvidno je da jednofrekvencijski prijamnici bez podrške za diferencijalno poboljšanje točnosti ne mogu ispuniti zahtjeve točnosti u iznad navedenim aktivnostima kategorija 2 i 3. Za pomorske operacije iz tih kategorija nužna je upotreba DGNSS/SBAS opreme (IALA, 2015), a za kategoriju 3 i primjena još točnijih metoda određivanja položaja, kao što je upotreba višefrekvencijskih prijamnika te implementacija PPP i/ili RTK metoda.

S obzirom na duboku integraciju GNSS sustava u cjelinu navigacijskog mosta broda, točnost određivanja položaja satelitima preslikava se i na točnosti i pouzdanost rada povezanih sustava. Primjerice, točnost protusudarnih podataka dobivenih AIS sustavom izravno zavisi od točnosti određivanja položaja GNSS prijamnicima na oba broda (Weintrit, 2017). Iz tog proizlazi da će sigurnost plovidbe biti uvjetovana ne samo izravno poznavanjem točnog položaja, već i neizravno preko svih sustava koji ovise o točnom poznavanju položaja vlastitog broda kao i brodova u neposrednoj blizini. Štoviše, i praćenje prometa te upravljanje njime uz obalne službe nadzora, bit će kudikamo sigurnije provodivo kad su pogreške položaja brodova u akvatoriju, prijavljene AIS sustavom, manje.

## 3 Ionosfersko kašnjenje GNSS signala

S dosadašnjeg pregleda tehnološke tematike, principa rada satelitskih navigacijskih sustava, ovim poglavljem se smjer disertacije približava geofizičkoj domeni. Sljedeći naslovi donose pregled fizikalnih razloga pojave kašnjenja satelitskih signala pri prolasku kroz električno nabijene slojeve Zemljine atmosfere. Kroz pregled strukture atmosfere po slojevima te fizikalne mehanizme njezine ionizacije, definiraju se njezina električna svojstva i dinamika te se opisuje globalni električni krug. Razmatraju se različiti čimbenici koji utječu na magnitudu ionosferskog kašnjenja satelitskih signala. Matematički se povezuje atmosferski elektricitet i kašnjenje signala te se dovodi u vezu ukupni sadržaj elektrona i točnost određivanja korisničkog položaja GNSS sustavom. Predstavljaju se modeli ionosfere koji se koriste u GNSS sustavima za ispravljanje kašnjenja signala. Na kraju poglavlja se daje pregled metoda za određivanje jakosti ionizacije atmosfere (izračun ukupnog sadržaja elektrona).

### 3.1 Atmosfera, ionosfera i struktura ionosfere

Atmosfera je plinoviti omotač Zemlje koji se zajedno s njom vrti (npr. Gelo, 2000). Donja granica atmosfere je Zemljina površina, dok gornju nije moguće jednostavno definirati zbog eksponencijalnog smanjenja gustoće atmosfere porastom visine. Umjesto definiranja gornje granice, moguće je mnogo jasnije odrediti granice slojeva atmosfere koji posjeduju određena fizikalna ili EM svojstva.

Atmosfera se sastoji od atoma i molekula u plinovitom stanju. U sloju do oko 100 km visine, omjer osnovnih plinova (dušik, kisik i argon) se ne mijenja mnogo (Jacob, 1999). Osim ovih osnovnih plinova, na visinama između 10 i 70 km pojavljuje se ozon (Fabian i Dameris, 2014) koji ima svojstvo znatnog upijanja ultraljubičastog zračenja i na taj način bitno utječe na stupanj ionizacije zraka,

posljedično modulirajući ionosfersko kašnjenje satelitskih signala. Vodena para je neravnomjerno raspoređena u atmosferi i njezin udio varira od 0 do 4 % te ponešto utječe na refrakciju satelitskih signala stvarajući njihovo troposfersko kašnjenje.

Atmosferu se može podijeliti po slojevima prema njihovim fizikalnim svojstvima. Glavna podjela atmosfere po visini temelji se na temperaturnim svojstvima slojeva (npr. Saha, 2008). Najniži sloj od površine Zemlje do visine ~ 6 km u polarnim te ~ 18 km u ekvatorskim područjima karakterizira opadanje temperature porastom visine po stopi oko 6,5 K/km. Taj sloj se naziva troposfera. Iznad nje se nalazi tropopauza u kojoj je temperatura slabo promjenjiva daljnjim porastom visine i male je debljine. Sloj iznad tropopauze je stratosfera koja se nastavlja do visine oko 60 km, u kojoj temperatura zraka porastom visine raste kao posljedica sve jačeg upijanja UV zračenja u području ozona. Iza tanke stratopauze koja se nalazi iznad stratosfere, dolazi mezosfera i proteže se do visine od oko 80 km, u kojoj se temperatura smanjuje s visinom sličnom stopom kao u troposferi. Termosfera se nalazi iznad mezosfere i u njoj zbog upijanja Sunčevog zračenja među vrlo rijetkim atomima kisika i dušika temperatura brzo raste. Na visini od oko 600 km temperatura doseže i 2000 K tijekom dana. Iza termosfere definira se i egzosfera u kojoj se zbog još viših temperatura plinovi nalaze u stanju plazme.

Osim po temperaturnim svojstvima atmosferu se može promatrati i prema električnim svojstvima koja su u primarnom fokusu ovog rada. U tom kontekstu, česta podjela atmosfere u literaturi je ona prema električnoj vodljivosti. Električna vodljivost ovisi o koncentraciji, tj. prostornoj gustoći električno nabijenih čestica – iona i elektrona. U tom se kontekstu može definirati sloj sa znatno povećanom koncentracijom električnog naboja, visoke električne vodljivosti, koji se naziva ionosfera. Ionosferom se obično smatraju visine iznad 50 km kad se količina električnog naboja počne naglo povećavati porastom visine. Gornja granica ionosfere nije jasno definirana, a općenito se smatra da se nalazi ugrubo na visinama oko 2000 km gdje gustoća atmosfere postaje toliko mala da se u jedinici volumena nalazi za praktična razmatranja zanemariv broj iona i elektrona.

Ionosfera nastaje ionizacijom zraka. Ionizacija je proces stvaranja električno nabijenih čestica i u atmosferi prvenstveno nastaje apsorpcijom energije pristigle iz Svemira, u molekulama zraka (Sunčevo i kozmičko zračenje). Detaljan opis uzroka i mehanizama ionizacije donosi poglavlje 3.6.

Samo manji postotak (do 1 %) molekula u sloju ionosfere je električno nabijen (Kamide i Chian, 2007). Strukturu ionosfere definira omjer stvaranja i neutraliziranja naboja u nekom trenutku, u nekoj regiji ionosfere. Što je veći taj omjer, to se više električno nabijenih čestica nalazi u jedinici volumena atmosfere. Sukladno tome, ionosferu se može dijeliti prema slojevima koji nastaju različitim fotokemijskim procesima ionizacije.

Stopa promjene gustoće slobodnog naboja zavisi od omjera brzine ionizacije i rekombinacije i može se izraziti kao (Rishbeth, 1988):

$$\frac{\delta N}{\delta t} = q - L - \nabla \cdot (Nv) \quad , \quad (21)$$

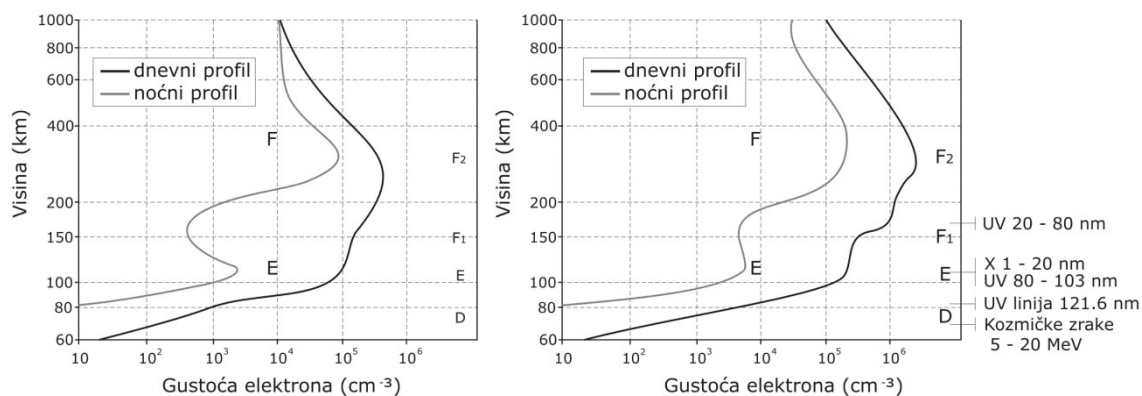
gdje je  $q$  brzina ionizacije,  $L$  brzina rekombinacije, te  $\nabla \cdot (Nv)$  gubitak naboja uslijed prijenosa u drugo područje. U nižim slojevima gubitak uslijed prijenosa se može zanemariti, dok je u višim slojevima ionosfere značajan, gdje postoje izražene magnetske sile na električno nabijene čestice (sloj koji se naziva magnetosfera).

Moguće je definirati različite slojeve ionosfere koji primarno nastaju drugačijim fizikalnim procesima ionizacije. Pritom se slojevi označavaju slovima kako slijedi.

Ionosferski sloj D se nalazi na visinama od 50 do 90 km i nastaje prvenstveno upijanjem UV zračenja Sunca tijekom dana. Koncentracija slobodnog naboja u sloju D je relativno mala u odnosu na ostale slojeve, a noću potpuno iščezava zbog nepostojanja izravnog osunčavanja (npr. Hunsucker i Hargreaves 1995; Grebowsky i Aikin, 2009; Hargreaves, 1995; Kelley, 2009; Zolesi i Cander, 2013).



Sloj E se nalazi iznad sloja D, na visinama od 90 do 140 km. Većinom nastaje kao posljedica upijanja X valnih duljina i mnogo je izraženiji od sloja D. Također kao i sloj D, aktivan je tijekom izravnog osunčavanja, dok noću slabi (npr. Hunsucker i Hargreaves 1995; Grebowsky i Aikin, 2009; Hargreaves, 1995; Kelley, 2009; Zolesi i Cander, 2013).



Slika 6: Tipičan vertikalni profil gustoće elektrona u ionosferi srednjih zemljopisnih širina za vrijeme niske (lijevo) i visoke (desno) Sunčeve aktivnosti

Izvor: Brčić (2015)

Na većim visinama nalazi se sloj F koji se dijeli na F1 (140 — 210 km) i F2 (210 km naviše), a ponekad se u literaturi izdvaja i sloj G za visine veće od 400 km. F slojevi se primarno ioniziraju Sunčevim zračenjem EUV (engl. *Extreme UltraViolet*) i X valnih duljina, ali za razliku od nižih slojeva, rekombinacija naboja na tim visinama je mnogo sporija. Uslijed male gustoće atmosfere, statistička vjerojatnost rekombinacije pozitivnog i negativnog naboja je bitno manja nego na nižim visinama. Zbog toga su F slojevi općenito postojani i tokom noćnih sati, iako ponešto prorijeđeni. Najniži stupanj ionizacije u dnevnom hodu se javlja krajem noći, pred početak osunčavanja. Osim doba dana, na intenzitet ionizacije utječe i kut upada Sunčevog zračenja pa je tako ionizacija izraženija na ljetnoj hemisferi te u ekvatorskom području (Hunsucker i Hargreaves 1995; Grebowsky i Aikin, 2009; Hargreaves, 1995; Kelley, 2009; Zolesi i Cander, 2013).

## 3.2 Električni naboj, polje, struje i električna vodljivost atmosfere

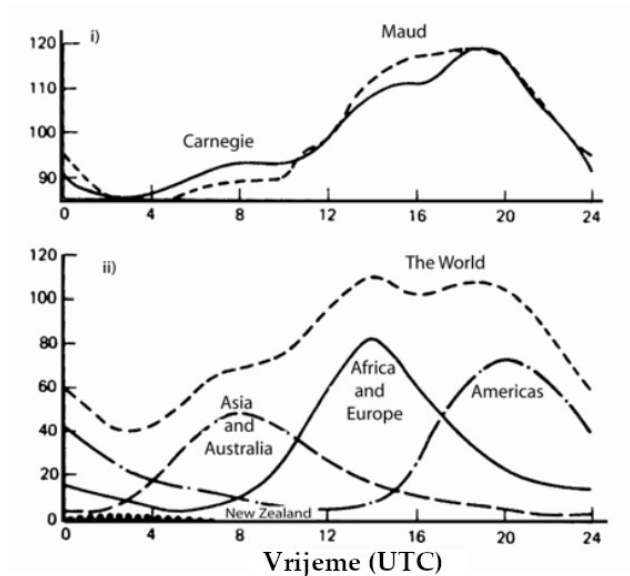
Još u doba B. Franklina (Franklin, 1752), znanstvenici su nastojali objasniti munje i povezati ih s električnošću. Tadašnja istraživanja pokazuju da u atmosferi postoji određena količina električnosti ne samo pri pojavi olujnih oblaka, već i pri potpuno vedrom vremenu (Lemonnier, 1752). Kasnija istraživanja ovog fenomena uspostavljaju saznanje o postojanju električnog polja srednje jakosti oko 130 V/m u prizemnom sloju atmosfere. Ovo električno polje lijepog vremena usmjereno je prema tlu. Suprotno tome, pri grmljavinskim olujama električno polje je obično suprotnog smjera (od tla prema bazi olujnog oblaka) i jakosti koje prelaze ponekad i više od 10.000 V/m (npr. Volarić, 2004).

Dotadašnji stav da je zrak nevodljiv i da je prijenos naboja kroz zrak moguć samo električnim izbojima, ispravlja Coulomb (1785a – 1785c) koji otkriva da je zrak barem donekle vodljiv. Kelvin mjeri električni gradijent lijepog vremena u iznosu od 137 V/m (Aplin, 2013). Elster i Geitel oko 1895. otkrivaju postojanje atmosferskih iona – električno nabijenih čestica u zraku (npr. Volarić, 2004). Marconi eksperimentalno potvrđuje da je moguć prijam radiosignala preko Atlantskog oceana, ali bez teorijskog objašnjenja zbog čega (Corazza, 1988). Naravno, kasnija saznanja pokazuju da "refleksija" radiovalova od ionosfere omogućuje prijenos informacije na tolike udaljenosti. Kennelly i Heaviside (Kennelly, 1902; Griffiths, 2018) otkrivaju postojanje sloja zraka visoke električne vodljivosti na visini između otprilike 90 i 150 km, koji po njima dobiva naziv Kennelly-Heavisideov sloj (McAdie, 1925). Danas je taj sloj poznatiji kao ionosferski sloj E. Hess (1912) otkriva temeljem Bergwitzovih mjerenja vodljivosti balonom (Bergwitz, 1910) da ionizacija zraka i vodljivost u početku opadaju porastom visine, ali zatim počinju ponovo značajno rasti. Sukladno povećanju stupnja ionizacije porastom visine, uspostavlja teoriju postojanja ionizirajućeg kozmičkog zračenja koje dolazi iz Svemira (Friedlander, 2012).

Wilson (1921) ukazuje na postojanje električnih strujanja, suprotno ranijem viđenju atmosferskog elektriciteta kao elektrostatickog sustava. Pritom se iznosi hipoteza da su električne struje u atmosferi posljedica postojanja grmljavinske naoblake u kojoj se razdvaja naboj na negativni u donjem dijelu te pozitivni u gornjem dijelu oblaka, dok se zatim naboj polako vraća u suprotnom smjeru u područjima vedrog vremena.

Daljnji radovi (Whipple, 1929; Whipple i Scrase, 1936) dovode u vezu dnevnu prostornu raspodjelu grmljavinske naoblake na planeti i tzv. Carnegievu krivulju (Parkinson i Torrenson, 1931; Harrison, 2013) dobivenu mjerenjima atmosferskog elektriciteta na istraživačkim brodovima Carnegie i Maud. Pokazalo se da promjene u mjerenom električnom polju ne ovise o geografskom položaju broda, već su dnevni porasti i opadanja jakosti polja uvijek funkcija UTC vremena.

Objašnjenje za takvu pojavu se pronašlo u dnevnoj korelaciji jakosti električnog polja i intenziteta grmljavinskih procesa na planeti. Slika 7 u gornjem dijelu prikazuje srednje dnevne promjene električnog polja pri vedrom vremenu iznad oceana, prema mjerenjima s brodova Carnegie i Maud (Parkinson i Torrenson, 1931). Srednja globalna grmljavinska aktivnost (Whipple i Scrase, 1936) prikazana je u donjem dijelu slike. Moguće je uočiti gotovo idealno poklapanje jakosti globalnog električnog polja i globalne grmljavinske aktivnosti. Tijekom UTC razdoblja kad Sunce daje najviše energije za termički inicirane konvektivne procese zemljopisnim dužinama planete koje imaju najveću koncentraciju kopna (Europi i Africi te sjevernoj i južnoj Americi), globalno se na Zemlji bilježi najveći broj grmljavinskih pražnjenja u jedinici vremena. Budući da upravo ta UTC razdoblja pokazuju i najveći iznos mjenog električnog polja bilo gdje na planeti, postavila se teorija koja kaže da globalno električno polje na planeti barem dijelom generiraju grmljavinski procesi.



Slika 7: Srednje dnevne promjene električnog polja prema mjerenjima s brodova Carnegie i Maud

Izvor: Reproducirano iz (Lay, 2008), prema (Roble i Tzur, 1986)

Prvi analitički model atmosferskog elektriciteta temeljen na grmljavinskoj aktivnosti izveli su Roble i Hays (1979). Ovi modeli pretpostavljaju pozitivan električni naboj pri vrhu oblaka i negativan pri dnu te da razdvajanje naboja prema visinskim slojevima u grmljavinskim procesima dovodi do pojave globalnog električnog polja u atmosferi. Iako je takav stav generalno prihvaćen već desetljećima, pojavile su se novije rasprave koje dovode u pitanje ispravnost te teorije. Tako danas postoji i pomalo kontroverzna hipoteza koja tvrdi da je uzročno-posljedična veza zapravo suprotna te da se električni naboj razdvaja u uvjetima vedrog vremena (Pulinets i Khachikyan, 2020).

Svojstvo atmosfere da provodi električnu struju naziva se atmosferska električna vodljivost. Zrak provodi struju zahvaljujući slobodnim elektronima i ionima i proporcionalna je njihovoj gustoći te prostornoj mobilnosti. Zbog toga, električna vodljivost raste s porastom ionizacije zraka, tj. povećanjem vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona. Vodljivost atmosfere također ovisi i o meteorološkim uvjetima; porast koncentracije molekula vodene pare i čestica aerosola smanjuje vodljivost atmosfere (npr. Chandrashekara, 2006). Utjecaj koncentracije aerosola na električna

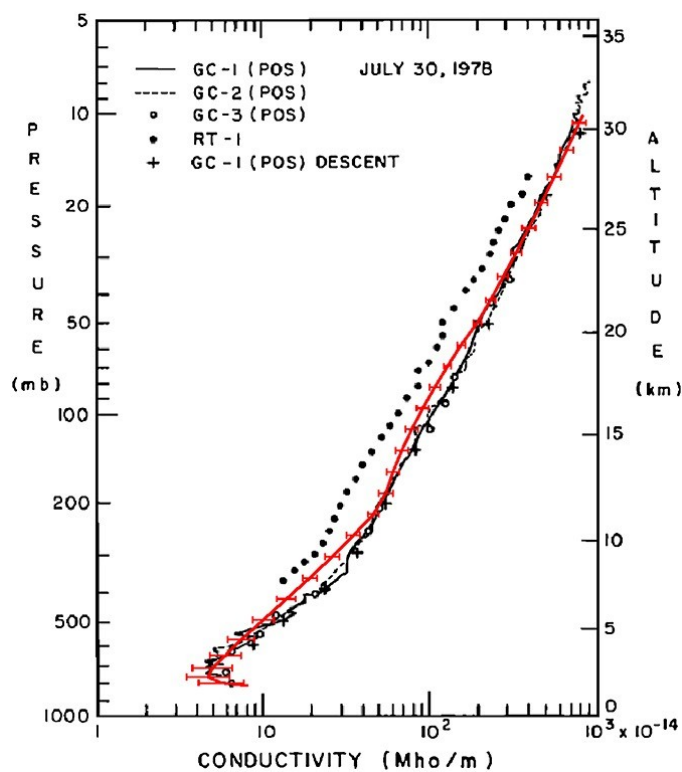
svojstva atmosfere igra jednu od temeljnih uloga u razmatranjima rezultata disertacije. Zbog toga je detaljan pregled učinaka aerosola na koncentraciju slobodnog naboja i električnu vodljivost atmosfere prikazan u poglavlju 3.8.

Električna vodljivost atmosfere može se izraziti jednačbom (npr. Volarić, 2004):

$$\lambda = e \cdot \left( \sum_i n_i^+ k_i^+ + \sum_i n_i^- k_i^- \right) , \quad (22)$$

gdje je  $e$  elementarni naboj,  $n_i$  broj iona  $i$ -te vrste u jedinici volumena te  $k_i$  pokretljivost iona. Ioni se obično razvrstavaju na male, srednje i velike (spomenute  $i$ -te vrste) (npr. Volarić, 2004).

Vodljivost u pravilu raste s visinom te se u donjoj troposferi do visine oko 3 km ne mijenja značajno. Povećanjem visine vodljivost naglo raste te je na 10 km visine 12 do 15 puta veća nego u donjoj troposferi te dalje raste povećanjem visine prema ionosferi (Ragini i sur., 2008; Volarić, 2004). Visinski profili vodljivosti dobiveni su balonskim mjerenjima, (npr. Rosen i Hofmann, 1981; 1988) te zrakoplovima (Mach i sur., 2009; 2010; 2011).



Slika 8: Vertikalni profil vodljivosti atmosfere  
 Oznake na dijagramu predstavljaju različite metode mjerenja  
 Izvor: Baumgaertner i sur. (2013b)

Na slici 8 prikazan je vertikalni profil vodljivosti atmosfere do visine 35 km, dobiven balonskim mjerenjima različitim instrumentima. Pri dnu slike je vidljivo povećanje vodljivosti prizemnog sloja uzrokovano ionizacijom uslijed emanacije  $^{222}\text{Rn}$  iz tla. Nakon smanjenja vodljivosti porastom visine, dolazi do ponovnog rasta eksponencijalnom stopom koja se nastavlja sve do vrha mjerenja (Baumgaertner i sur., 2013b).

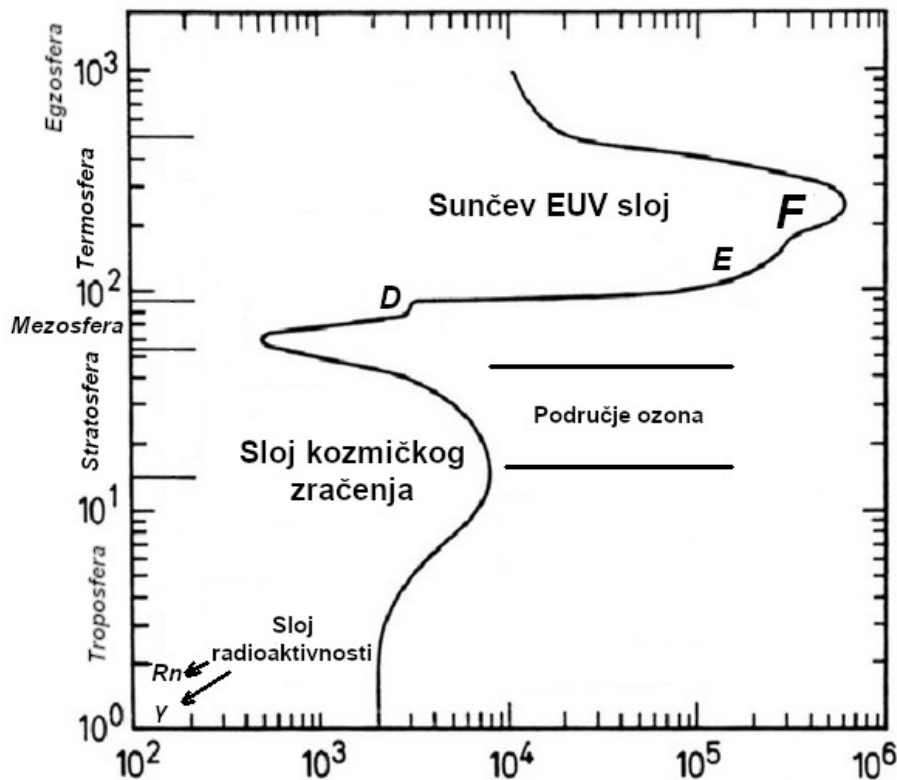
### **3.3 Prostorna raspodjela električnog naboja u atmosferi**

Iz dosad ustanovljene povezanosti koncentracije električnog naboja i električne vodljivosti atmosfere te prikazanog vertikalnog profila vodljivosti može se zaključiti da se i koncentracija električnog naboja povećava porastom visine. U nastavku razmatranja donosi se detaljniji pregled raspodjele koncentracije električnog naboja po visini te po zemljopisnoj širini.

#### ***3.3.1 Raspodjela ionizacije atmosfere po visini***

Na slici 9 je shematski prikazana vertikalna raspodjela stupnja ionizacije atmosfere po slojevima s naznačenim primarnim mehanizmima ioniziranja pojedinog sloja (Viggiano i Arnold, 1995; Zolesi i Cander, 2013). Na osi apscise je koncentracija naboja ( $\text{cm}^{-3}$ ) a na osi ordinate visina (km). Najniži sloj zraka uz tlo, ionizira se prvenstveno gama zračenjem iz stijena u tlu. Zatim slijedi sloj do nekoliko kilometara visine koji se pretežno ionizira radioaktivnim raspadanjem radona. Oba procesa odvijaju se isključivo iznad kopna, dok nad oceanima sloj ioniziran radioaktivnošću ne postoji. Sloj zraka pri vrhu troposfere i u stratosferi se najvećim dijelom ionizira kozmičkim zračenjem. Ovaj sloj značajno reagira na varijacije u Sunčevoj aktivnosti i posebice se aktivira tijekom solarnih oluja i koronarnih izbačaja mase čije visokoenergetske čestice dopijuju do Zemlje.

Najviši sloj električnog naboja (ionosfera), nalazi se na visinama iznad 50 km i predstavlja područje koje se prvenstveno ionizira Sunčevim zračenjem EUV i X dijela spektra. U ovom sloju ionizacija je najintenzivnija, ali se odvija samo tijekom dana kad je sloj izravno osunčan Sunčevim zračenjem. Ispod visine od ~ 50 km, ionizacija Sunčevim EUV zračenjem naglo prestaje zbog jakog upijanja ovih valnih duljina u sloju ozona koji se nalazi u stratosferi.



Slika 9: Vertikalna raspodjela stupnja ionizacije  
 Izvor: Priredio autor prema Viggiano i Arnold (1995)

Stvaranje slojeva ionozacije i vertikalna distribucija gustoće elektrona može se približno opisati Chapmanovom funkcijom ionizacije (Chapman, 1931; Teunissen i Montenbruck, 2017; Zolesi i Cander, 2013), po kojoj je gustoća elektrona ( $n_e$ ) funkcija visine prema relaciji:

$$n_e = N_0 \exp\left(\frac{1}{2}[1 - z - \sec \chi \exp(-z)]\right) ,$$

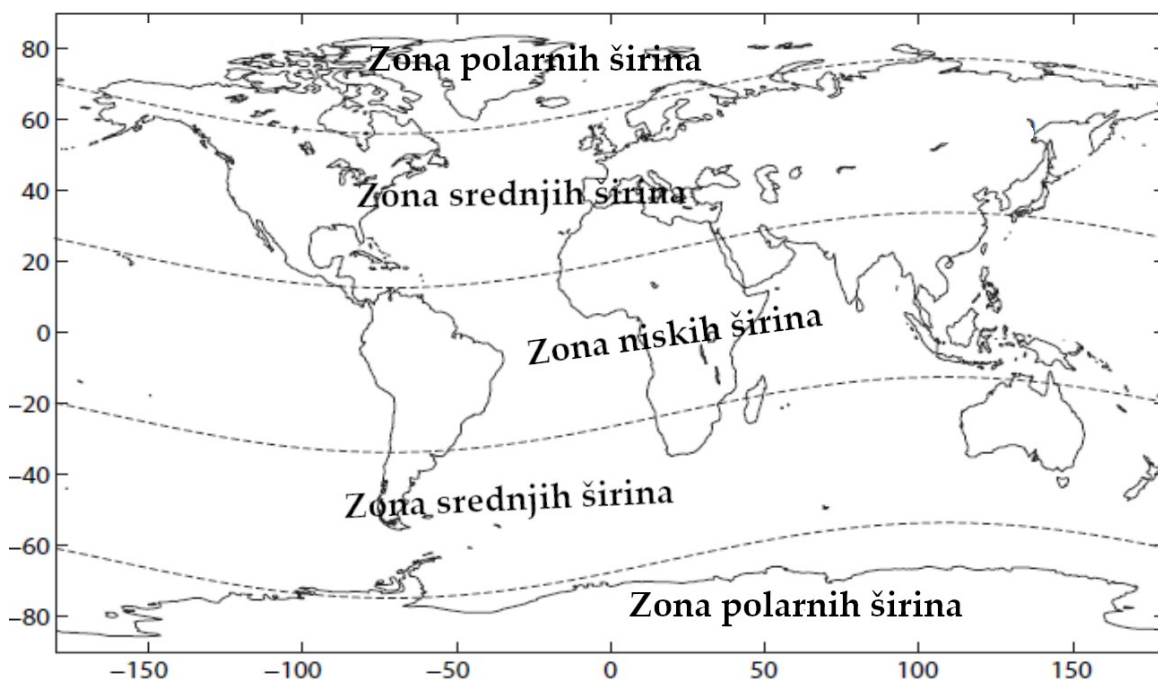
gdje je  $z = \frac{h - h_0}{H}$

te pritom  $N_0$  označava vršnu vrijednost gustoće elektrona u sloju,  $h$  visinu iznad površine Zemlje te  $h_0$  visinu na kojoj se nalazi vršna vrijednost gustoće elektrona.  $H$  je atmosferska skala visine, a  $\chi$  zenitni kut upada Sunčevog zračenja.



### 3.3.2 Raspodjela ionizacije zraka po zemljopisnoj širini

Ionizacija zraka se općenito dosta mijenja ovisno o zemljopisnoj širini. Ionosfera se u literaturi često dijeli na tri pojasa koji imaju znatno različita svojstva ovisno o geomagnetskoj širini (Zolesi i Cander, 2013; Memarzadeh, 2009), kako je prikazano na slici 10. Najbolje je istražena ionosfera srednjih širina. U tom području ionizacija se prvenstveno odvija Sunčevim UV i X zračenjem (Hunsucker i Hargreaves, 2003; Schunk i Nagi, 2009). Ti procesi se javljaju i u niskim i visokim geomagnetskim širinama, ali tamo su bitni i drugi čimbenici i mehanizmi koji definiraju regionalna svojstva ionosfere.



Slika 10: Ionosferske zone prema geomagnetskoj širini

Izvor: *Priredio autor prema Başçiftçi i sur. (2018).*

Zona niskih geomagnetskih širina ima općenito najveću koncentraciju električnog naboja. Nalazi se u području do oko  $25^\circ$  zemljopisne širine od magnetskog ekvatora te je pod snažnim utjecajem EM sila zbog horizontalno usmjerenog magnetskog polja (Hunsucker i Hargreaves, 2003). Stoga dolazi do pojave znatne električne vodljivosti i posljedično se stvara električna mlazna struja (engl.

*electrojet*) u E sloju ionosfere, dok na sloj F djeluje elektrodinamička vertikalna sila koja ga podiže uvis. Uslijed tih dinamičkih pomaka dolazi do čestih pojava anomalija u gustoći naboja. Pri takvim anomalijama gustoća naboja općenito je manja u području geomagnetskog ekvatora (engl. *Equatorial Ionization Anomaly*) (Rishbeth, 1988; Schunk i Nagy, 2009).

U polarnim geomagnetskim područjima je obratna situacija. Koncentracija električnog naboja tamo je općenito najmanja. Geomagnetsko polje je usmjereno gotovo vertikalno što uvjetuje znatno kompleksnija svojstva ionosfere u odnosu na srednje i niske geomagnetske širine. Silnice magnetskog polja su povezane s vanjskim dijelom magnetosfere što je čini izravno podložnom utjecaju Sunčevog vjetra i međuplanetarnog magnetskog polja. Kratkoročne varijacije koncentracije naboja su u tom području značajne (Schunk i Nagy, 2009; Hunsucker i Hargreaves, 2003).

### **3.4 Temeljni koncept modela globalnog električnog kruga**

Prostorna raspodjela električnog naboja definira električni potencijal između različitih područja u atmosferi, uključujući tlo. S obzirom na postojanje naboja, zrak posjeduje i električnu vodljivost, što u kombinaciji s potencijalom uzrokuje stvaranje električnih struja. Tako uzrokovana kretanja naboja opisuju se konceptom globalnog električnog kruga (engl. *Global Electric Circuit – GEC*).

Vertikalne električne struje u globalni električni krug s gornje strane zatvara ionosfera kao prilično dobar vodič naboja. Vodljivi slojevi u tlu zatvaraju donji dio globalnog električnog kruga. Prostornu raspodjelu elektrona i iona u ionosferi definira električno polje između ionosfere i tla, budući da ono uzrokuje prostorni pomak nabijenih čestica u geomagnetskom polju Zemlje.

Postoje različiti mehanizmi stvaranja ionosferskog električnog polja. Primjerice, magnetohidrodinamički procesi u magnetosferi koji nastaju temeljem interakcije solarnog vjetra i Zemljinog magnetskog polja stvaraju struje iz magnetosfere prema

polarnom području ionosfere (Hargreaves, 1979), uslijed čega nastaje polje do 100 mV/m u području ionosfere (Denisenko i Zamay, 1992). Slijede ionosferski vjetrovi koji uzrokuju prijenos naboja iz jednog područja ionosfere u drugi. Uslijed takvog gibanja naboja kroz geomagnetsko polje nastaje električno polje iznosa do 10 mV/m (Hargreaves, 1979). Električno polje modificiraju i električne struje koje su posljedica grmljavinske aktivnosti u donjoj atmosferi (Denisenko, 2019).

Williams i Mareev (2014) razmatraju dotad manje poznate čimbenike koji modificiraju globalni električni krug. To su: elektrizirana naoblaka pljuskovitog karaktera oborine bez pojave grmljavine, mezoskalni konvektivni sustavi, vertikalni prijenos naboja uslijed turbulentne konvekcije po vedrom vremenu, utjecaj grmljavinskih pražnjenja te varijabilnosti GEC-a uslijed promjena globalne grmljavinske aktivnosti diljem planete forsiranih ENSO fazama. Na kraćoj vremenskoj skali varijabilnost GEC je određena i tjednim ciklusima uslijed antropogenog forsiranja ciklički promjenjivom količinom aerosola, itd.

Osim navedenih čimbenika, i seizmička aktivnost ima svoju ulogu u definiranju detalja globalnog električnog kruga. U novijoj literaturi razmatraju se lokalne promjene u globalnom električnom krugu koje su posljedica ionizacije zraka u blizini aktivnih tektonskih rasjeda, koje nastaju uslijed povećane emanacije radona (Pulinets, 2009; Pulinets i Davidenko, 2014; Pulinets i Davidenko, 2018). Pritom se kao temeljni fizikalni koncept veze seizmičke aktivnosti i GEC-a, smatraju promjene u električnoj vodljivosti planetarnog graničnog sloja<sup>3</sup> (Morozov i Kupovykh, 2017). Slyunyaev i sur. (2014) razmatraju utjecaj promjena vodljivosti atmosfere na ionosferski potencijal.

Pulinets i Khachikyan (2020; 2021) analiziraju moguću povezanost dnevnih varijacija globalnog električnog polja i globalne seizmičke aktivnosti te pokazuju intrigantne rezultate analize. Koeficijent korelacije između globalne seizmičke aktivnosti i Carnegieve krivulje prema iznesenoj analizi iznosi  $R = 0,86$ . Ovakav

---

3 Planetarni granični sloj je niski sloj atmosfere u kojem su osobine zračne mase prvenstveno definirane utjecajem podloge, trenja, turbulencije i vertikalnog miješanja.

rezultat nameće koncept koji ukazuje na usku povezanost seizmičkih procesa s mehanizmima koji definiraju električno polje i GEC. Autori postavljaju hipotezu koja kaže da dnevne fluktuacije u seizmičkoj aktivnosti pojačanom emanacijom radona forsiraju globalno električno polje, ali i stvaraju poboljšane uvjete za razvoj grmljavinske aktivnosti u vrijeme pripremne faze potresa, što je prilično u suprotnosti s dosadašnjim općim stavom o poklapanju Carnegieve krivulje s dnevnim hodom globalne grmljavinske aktivnosti po kontinentima uzrokovane termičkim razlozima. Postoji li uzročno-posljedična veza grmljavinskih procesa i seizmičke aktivnosti ili je riječ o slučajnoj korelaciji te ako postoji, forsiraju li procesi seizmike grmljavinsku aktivnost ili obratno, za sad ostaje nepoznanica. Buduća istraživanja te tematike trebala bi dati objašnjenje ovih intrigantnih zapažanja.

Tinsley i Zhou (2006) objavljuju model globalnog električnog kruga koji na realističniji način, u odnosu na prethodne teorije, objedinjuje vanjske utjecaje iz Svemira, internu varijabilnost uslijed prijenosa radona dinamičkim procesima u atmosferi te promjenjivu koncentraciju atmosferskog aerosola. U radu pokazuju kako vulkanske erupcije izbacivanjem  $\text{SO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$  u stratosferu omogućuju posljedično kreiranje ultrafinih čestica aerosola i klasteriranje molekula vode oko iona. Posljedično dolazi do značajnog smanjenja vodljivosti u stratosferi, posebno u visokim zemljopisnim širinama. Autori temelje svoje simulacije na podacima u koncentraciji atmosferskih čestica dobivenim balonskim mjerenjima (Deshler i sur., 1993) nakon erupcije vulkana Pinatubo, te na analizi satelitskih podataka od Bingen i sur. (2004) koji uključuju aerosole Pinatubo i El Chiron erupcija. Pritom se navodi da čestice ostaju mjesecima u stratosferi nakon erupcije, posljedično smanjujući stratosfersku električnu vodljivost.

Promatrano na mikrofizičkoj skali, ionizacijom oslobođeni slobodni elektroni i pozitivni ioni su pri normalnim atmosferskim uvjetima nestabilni te se u pravilu smještaju na neutralne molekule zraka. Elektroni i ioni se pritom najčešće spajaju s molekulom kisika ili vode i tad se rezultirajuća struktura naziva molion. Tako

stvorene molekule pozitivnog ili negativnog naboja polariziraju okolne neutralne molekule zraka te privlače sebi prostorno bliske djelovanjem EM sile, formirajući na taj način nakupine molekula (engl. *cluster*) nazvane malim ionima (npr. Volarić, 2004).

Veliki ioni (Langevinovi ioni) nastaju u pravilu odlaganjem malih iona na aerosole ali i procesima direktne ionizacije raspršivanjem kapljica vode, otkidanjem s površine vode, izgaranjem materije u šumskim požarima, drobljenjem snijega u snježnim vijavicama, trenjem u uzvratnoj prašini itd. (npr. Volarić, 2004).

Klasifikacija malih i velikih iona je vezana samo za masu čestica, dok je naboj malog i velikog iona identičan (u pravilu = 1 e). S obzirom na drugačiju masu, fizikalna i kemijska interakcija s okolinom može biti drugačija. Primjerice, na velike ione sila teža utječe značajnije nego na male pa se oni suhom depozicijom ubrzano talože prema tlu, dok mali ioni ostaju mnogo dulje lebdjeti u zraku.

Kroz atmosferu neprekidno teče vertikalna električna struja vedrog vremena, vrlo male gustoće oko  $3 \cdot 10^{-12} \text{ Am}^{-2}$ . Ona donosi pozitivan električni naboj na površinu Zemlje. Ohmov zakon pritom povezuje vertikalnu struju  $I$ , vodljivost atmosfere  $\lambda$  i jakost električnog polja  $E$  (npr. Volarić, 2004):

$$I = \lambda \cdot E \quad . \quad (23)$$

Učinak vertikalne električne struje vedrog vremena očituje se u balansiranju učinka polariziranja naboja između površine Zemlje i visoke atmosfere grmljavinskim procesima.

### 3.5 Kemijski i fizikalni ionosferski procesi

Ionizacija je proces oslobađanja elektrona iz atoma, pri čemu kao produkt nastaju slobodni elektron i pozitivno nabijen ion (ostatak atoma). Za postizanje ovog procesa potrebno je atomu predati određenu energiju. Minimalna potrebna energija za taj proces se naziva energija ionizacije. Energija za ionizaciju može imati

različite izvore, prirodne ili umjetne. Do atoma i molekula medija koji se ionizira, energija dolazi zračenjem. Zračenje, kao emitiranje energije u prostor, u kontekstu ionizacije može biti dvojako. Razlikuje se EM zračenje i nuklearno zračenje.

U slučaju EM zračenja, riječ je o emisiji energije EM valovima koja nastaje uslijed termičke vibracije atoma i molekula tijela koje ih emitira u prostor. Nuklearno (radioaktivno) zračenje, nastaje u jezgri nestabilnih atoma i manifestira se u obliku čestica velike kinetičke energije (alfa i beta čestice, dalje u tekstu  $\alpha$ -čestice i  $\beta$ -čestice, te neutroni). Nuklearni procesi osim čestica kao osnovnog nositelja energije stvaraju još i fotone, tj. EM zračenje, u pravilu visoke frekvencije (gama zračenje;  $\gamma$ -zračenje).

Ionizirajuće zračenje, bez obzira na fizikalnu narav, je svako ono koje nosi dovoljnu količinu energije i u stanju je predati tu energiju elektronima atoma.  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  radioaktivno zračenje koje potječe iz jezgre atoma, elektroni i protoni dovoljne kinetičke energije, fragmenti nuklearne fisije, neutroni te EM zračenje kratkih valnih duljina (velike energije), kao što je zračenje u X ili ekstremnom ultraljubičastom dijelu spektra, primjeri su ionizirajućeg zračenja. Među ionizirajuće čestice spadaju još i neutrino te antineutrino, predstavljajući jedno od područja znanosti koje danas prolazi kroz intenzivna istraživanja.

Energija ionizacije kao najmanji potreban iznos energije za izdvajanje elektrona iz atoma može se prikazati relacijom:



gdje je  $X$  atom ili molekula,  $X^+$  je rezultirajući ion nakon procesa ionizacije, dok  $e^-$  predstavlja slobodan elektron, izdvojen iz atoma ili molekule  $X$ . Iznos potrebne energije za ionizaciju ovisi o kemijskom elementu i općenito raste s lijeva na desno u redu te odozdo prema gore u koloni periodičnog sustava elemenata (Miessler i Tarr, 1999). Na primjer, za najčešći element u atmosferi, dušik, prva ionizirajuća energija (dovoljna za izbacivanje jednog elektrona iz atoma) iznosi približno 14,5 eV.

U slučaju zračenja čestica iz atomske jezgre, energija se prenosi u kinetičkom obliku te energija koju nosi čestica zavisi o njezinoj masi i brzini:

$$E = (\Delta m)c^2 \quad , \quad (25)$$

gdje je  $\Delta m$  razlika mase izvorne čestice i zbroja masa produkata raspada, a  $c$  brzina svjetlosti.

Kad energiju za ionizaciju nose fotoni, tj. EM zračenje, iznos energije fotona definiran je frekvencijom (valnom duljinom):

$$E = hf \quad , \quad (26)$$

gdje je  $h$  Planckova konstanta ( $6,62607015 \cdot 10^{-34}$  Js), a  $f$  frekvencija EM vala (Hz).

U prirodi se zrak ionizira različitim prirodnim procesima. Izvori ionizacije zraka su općenito zračenje iz Svemira ili radioaktivni procesi pri tlu. Nad oceanima (sve visine) te na visini većoj od nekoliko kilometara iznad kopna, Sunčevo zračenje predstavlja primarni izvor ionizacije zraka (Richmond, 1986), dok se na maloj visini nad kopnom zrak primarno ionizira nuklearnim raspadanjem radioaktivnih kemijskih elemenata iz tla, prvenstveno radona (Hoppel, 1986; Chandrashekara, 2006). U osnovne mehanizme ionizacije u troposferi spadaju i razdvajanje pozitivnog i negativnog naboja u procesima evolucije konvektivne naoblake (Beard i Ochs, 1986).

Sporedni izvori ionizacije su kozmičko zračenje (većinom protoni i  $\alpha$ -čestice te sekundarni učinci kao posljedica kaskadnih procesa u sudarima čestica primarnog zračenja i česticama u atmosferi), zatim radioaktivni raspad nestabilnih atomskih jezgara koje se nalaze prirodno u tlu (zračenje iz stijena u tlu), a u novije vrijeme se javlja i ionizacija kao posljedica radioaktivnog onečišćenja uslijed antropogene aktivnosti.

## 3.6 Izvori ionizacije atmosfere

Gustoća električnog naboja u jedinici volumena zraka, ovisi o omjeru brzine ionizacije i brzine rekombinacije naboja. Mehanizmi koji ioniziraju zrak, tj. povećavaju brzinu ionizacije su izvori, a mehanizmi koji ga neutraliziraju, tj. povećavaju brzinu rekombinacije su ponori atmosferskog naboja. U ovom poglavlju opisani su izvori atmosferskog naboja.

### *3.6.1 Ionizacija u procesima konvektivne naoblake*

Grmljavinska naoblaka jedan je od osnovnih uzročnika pojave električnog naboja u atmosferi (npr. Beard i Ochs, 1986). Još u 18. stoljeću, Benjamin Franklin je ustanovio postojanje naboja povezanog s grmljavinskim oblacima. Wilson (1916; 1920) iznosi pretpostavku o grmljavinskom oblaku kao električnom dipolu. Modernija istraživanja električne strukture kumulonimbusa pokazala su nakupljanje negativnog naboja uz bazu oblaka pri izotermama između  $-10^{\circ}\text{C}$  i  $-20^{\circ}\text{C}$ , dok je glavina pozitivnog naboja smještena uz vrh oblaka (npr. Volarić, 2004).

Radovi novijeg datuma pokazuju da je raspodjela naboja unutar grmljavinskog oblaka znatno kompleksnija od jednostavnog dipola. Stolzenburg (1998) primjerice pokazuje četiri područja razdvajanja naboja unutar konvektivnih uzlaznih strujanja u oblaku te šest ili više područja izvan područja uzlaznih strujanja. Znatno odvajanje naboja u konačnici dovodi do pojave električnih pražnjenja u oblaku te između oblaka i tla, što se očituje u pojavi munja i grmljavine.

Nešto manje je jasan točan elektrokemijski mehanizam na razini čestica, koji u području grmljavinskog oblaka razdvaja pozitivan i negativan električni naboj, tj. ionizira i polarizira oblak. Postavljeno je nekoliko teorija koje nastoje objasniti ovaj proces. Primjerice, Wilson (1916) postavlja danas glavinom odbačenu hipotezu o nakupljanju negativnog naboja na česticama kiše koje padaju kroz oblak i pritom tvrdi da one češće prikupljaju negativan nego pozitivan naboj zbog polarizacije

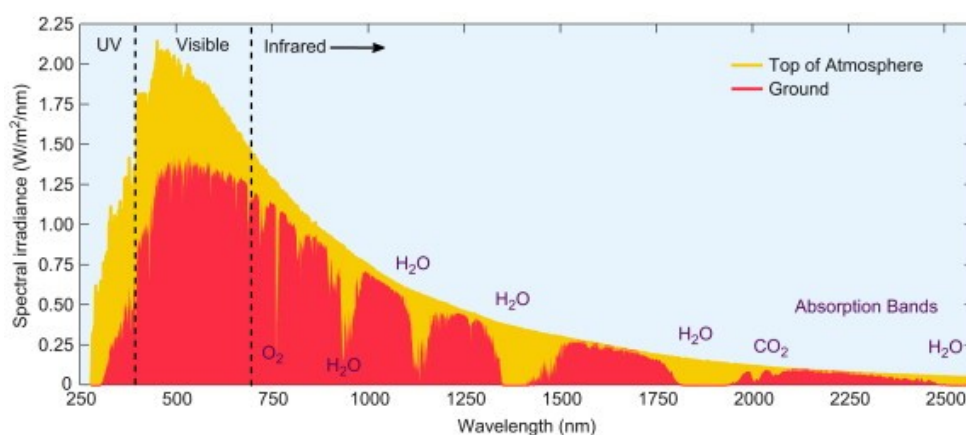


kapljica uslijed postojanja električnog polja između negativno nabijene površine Zemlje i pozitivno nabijene ionosfere. Simpson (1927) navodi Lenardov učinak separacije električnog naboja na kapljicama vode (Lenard, 1892) kao uzrok razdvajanja naboja u grmljavinskom oblaku. Na temelju laboratorijskih eksperimenata, Reynolds (1957) tvrdi da se (veći) komadi tuče u kontaktu s okolnim (manjim) kristalima leda nabijaju negativnim nabojem, a budući da padaju većom brzinom, dolazi do povlačenja negativnog naboja prema dnu oblaka. Razdvajanje naboja u grmljavinskim procesima već dugo se smatra primarnim razlogom postojanja globalnog električnog kruga (Williams, 2009).

### 3.6.2 Ionizacija Sunčevim zračenjem

Sunce zrači energiju u oba spomenuta oblika – EM i nuklearnom. Pritom najveći dio izračene energije otpada na EM zračenje. Manji dio Sunčeve energije do Zemlje dolazi u obliku subatomske čestice velike kinetičke energije (Sunčev vjetar).

Raspodjela valnih duljina u EM spektru Sunčevog zračenja određena je Stefan-Boltzmannovim i Wienovim zakonom (Stefan, 1879; Boltzmann, 1884; Wien, 1896). S obzirom na temperaturu površine Sunca od oko 5800 K, prema Wienovom zakonu, najveći intenzitet zračenja otpada na valne duljine vidljivog spektra EM zračenja.



Slika 11: Raspodjela spektralne iradijancije Sunčevog zračenja po valnim duljinama na gornjoj granici atmosfere

Izvor: Reproducirano iz Cleveland i Morris (2014).

Na slici 11 prikazana je raspodjela spektralne iradijancije Sunčevog zračenja po valnim duljinama na gornjoj granici atmosfere (žuto) i na tlu (crveno). Razlika između žutog i crvenog područja predstavlja iradijanciju koja je upijena u plinovima u atmosferi; pritom se izdvaja veći broj apsorpcijskih pojasa valnih duljina u kojima dolazi do neselektivnog upijanja zračenja (Cleveland i Morris 2014).

Dio Sunčevog spektra EM zračenja otpada i na ultraljubičasti pojas valnih duljina. Einstein (1905) je postavio teoriju fotoelektričnog efekta koja pokazuje da fotoni EM zračenja dovoljno velike energije uzrokuju ionizaciju materije. Također, Einstein pokazuje kako je energija fotona ovisna samo o valnoj duljini te da nije ovisna o intenzitetu zračenja. Stoga, sposobnost EM zračenja da ionizira materiju ne zavisi od intenziteta zračenja, već od frekvencije, odnosno, valne duljine.

Maksimalna kinetička energija elektrona u procesu fotoionizacije iznosi:

$$K_{max} = h(\nu - \nu_0) \quad , \quad (27)$$

gdje je  $h$  Planckova konstanta,  $\nu$  frekvencija EM zračenja, a  $\nu_0$  je granična frekvencija za određenu materiju (atom, molekulu). Kinetička energija elektrona bit će pozitivna (tj. nastupit će fotoelektrični efekt), ako je  $\nu > \nu_0$ , odnosno ako je frekvencija zračenja veća od granične frekvencije za tu materiju (npr. Fromhold, 1991).

Apsolutna minimalna energija fotona nužna za pojavu ionizacije iznosi 3,89 eV i odnosi se na kemijski element Cezij. Prema *US Federal Communications Commission*, ionizirajućim zračenjem se smatra ono koje ima energiju fotona veću od 10 eV, što odgovara valnoj duljini od 124 nm i nalazi se na početku ekstremnog ultraljubičastog dijela spektra (EUV). Valne duljine EUV spektra su između 124 i 10 nm, s energijama fotona 10 eV do 124 eV (npr. Cleveland i Ulcek, 1999).

Sunce emitira zračenje u EUV dijelu spektra iz područja Sunčeve korone i Sunčevih baklji, a posebno su intenzivne emisije EUV zračenja u periodima koronalnih izbačaja mase (engl. *Coronal Mass Ejection* – CME). S obzirom na vremenski vrlo

promjenjivu narav emisije u EUV dijelu spektra i proces fotoionizacije u Zemljinoj atmosferi je posljedično promjenjivog intenziteta u vremenu. Fotoionizacijski i drugi povezani procesi koje Sunce generira u atmosferi, posebno njezinim najvišim slojevima, nazivaju se svemirskim vremenom (engl. *space weather*) (Bothmer i Daglis, 2007).

Osim emisijom EM valova ionizirajuće energije u EUV dijelu spektra, Sunce u manjoj mjeri ionizira atmosferu Zemlje i emisijom čestica, uglavnom protona i  $\alpha$ -čestica. One se znatno ubrzavaju oko solarnih baklji te posebno uslijed koronalnih izbačaja mase. Za razliku od EM zračenja, na solarne čestice koje nose električni naboj, djeluje Zemljino magnetsko polje, otklanjajući njihovu putanju uslijed djelovanja Lorentzove sile (Lorentz, 1895). Većina čestica zato ne posjeduje dovoljnu energiju za doći do Zemljine atmosfere. Čestice veće kinetičke energije koje se izbacuju iz područja intenzivnih Sunčevih baklji i koronalnih izbačaja mase, uspijevaju doseći Zemljinu atmosferu i tad uzrokuju različite pojave svemirskog vremena, kao što je polarna svjetlost ali i općenito znatno pojačan intenzitet ionizacije gornjih slojeva atmosfere (Meyer-Vernet, 2007).

Takve protonske oluje sa Sunca predstavljaju potencijalnu opasnost za slabije zaštićenu svemirsku opremu, uključujući GNSS satelite. Solarne protonske oluje veće energije stignu do Zemlje u kratkom vremenu i posljedično predstavljaju velik izazov za predviđanje. Istraživanje izvorišta ovih čestica i danas je aktivna tematika heliofizike (npr. Brooks i Yardley, 2021).

Fotoionizacija u ionosferi prvenstveno nastaje izbacivanjem elektrona iz molekule kisika ( $O_2$ ), atoma kisika (O) te molekule dušika ( $N_2$ ). Molekule kisika se fotoioniziraju valnim duljinama manjim od 102,7 nm, dok se atomi kisika i molekule dušika fotoioniziraju zračenjem valnih duljina manjim od 91,1 te 79,6 nm (Britannica, 2021). U stratosferi, na visinama 40 – 50 km nalazi se znatna koncentracija ozona ( $O_3$ ). Ozon jako upija ultraljubičasto Sunčevo zračenje i zato je ionizacija u EUV spektru zanemariva na nižim visinama (npr. Volarić, 2004).

### **3.6.3 Ionizacija kozmičkim zračenjem**

Zemlja se neprekidno "bombardira" visokoenergetskim električno nabijenim česticama iz Svemira (npr. Grieder, 2001). Kozmičko zračenje su protoni i jezgre atoma koje kroz Svemir putuju iznimno velikim brzinama, blizu brzine svjetlosti. Osim Sunca, ove čestice se generiraju i drugdje u galaksiji i Svemiru. Galaktičko kozmičko zračenje je ono koje pristiže iz područja izvan Sunčevog sustava. Za razliku od ionizacije u atmosferi iznad ozonskog sloja ( $> 50$  km) gdje je glavni mehanizam ionizacije Sunčevo EUV zračenje, na visinama nižim od 50 km prevladava ionizacija kozmičkim zračenjem (Usoskin i sur., 2009).

Suprotno Sunčevom EUV zračenju i solarnom vjetru koji ioniziraju samo danju, kozmičke zrake koje dolaze iz dubokog Svemira ioniziraju neprekidno, i danju i noću. Maksimalnu ionizaciju kozmičke zrake ostvaruju na visinama oko 13 km, gdje stvaraju oko  $5 \cdot 10^7$  ionskih parova u  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Na nižim visinama utjecaj kozmičkih zraka na ionizaciju je manji te pri tlu kreiraju  $1 - 2 \cdot 10^6$  ionskih parova u  $\text{m}^3/\text{s}$  (npr. Volarić, 2004; Bazilevskaya i sur., 2008). Ionizacija kozmičkim zračenjem je intenzivnija u višim zemljopisnim širinama uslijed geomagnetskog efekta usmjeravanja čestica prema polarnim regijama. Također, stupanj ionizacije varira s 11-godišnjim Sunčevim ciklusom aktivnosti (Gringel i sur., 1986; Toman i sur., 2018).

Kao električno nabijene čestice u interakciji su sa Zemljinim magnetskim poljem te se kroz njega ne kreću pravocrtno za razliku od fotona EM zračenja. Također zbog utjecaja magnetskog polja na kozmičko zračenje, najjači učinak ionizacije ove čestice imaju u polarnom području (Mishev, 2013). Galaktičko kozmičko zračenje ima veću energiju po čestici pa prodire dublje kroz atmosferu i najjači učinak ionizacije ima u visokoj troposferi. Suprotno tome, solarni protoni nose manju energiju te ioniziraju većinom stratosferu u značajnijoj mjeri u odnosu na galaktičko zračenje (Baker i sur., 2012). Ipak, u uvjetima solarnih oluja (engl. *Solar Proton Events* – SPE) i izbačajima koronarne mase, pojavljuju se i čestice vrlo visoke energije i do nekoliko GeV po čestici (npr. Mironova, 2015).

Osim izoliranog učinka ionizacije poput čestica nešto niže energije, visokoenergetske čestice sudarom s molekulama plinova u atmosferi startaju nuklearno-elektromagnetsko-mionsku kaskadu, kreirajući cijeli niz elementarnih čestica (elektroni, mioni, pioni, kaoni i nukleoni). Fluks niza spomenutih čestica također za posljedicu ima daljnju ionizaciju s maksimumom između 17 i 27 km visine, ovisno o solarnoj aktivnosti. Kaskadni učinak sekundarnih čestica na ionizaciju značajniji je u nižim zemljopisnim širinama gdje se kozmičke čestice kreću okomitije na Zemljino magnetsko polje (npr. Mishev, 2013).

Solarne čestice energije do 100 MeV u pravilu izgube energiju ionizacijom u atmosferi iznad 30 km visine, dok one više energije prodiru u niže slojeve (Bazilevskaya i sur., 2008, Mironova, 2015). Prema Quack i sur. (2011) te Velinov i sur. (2013), najizraženiji učinak solarnih čestica na ionizaciju uočava se na visinama između 40 i 90 km i to osobito u polarnom području.

### ***3.6.4 Ionizacija radioaktivnim raspadom***

Prisutnost radioaktivnih kemijskih elemenata u atmosferi također je jedan od uzroka ioniziranja zraka. Najzastupljeniji radioaktivni element u zraku je radon (Rn). Rn je iznimno važan čimbenik u izučavanju učinaka litosferne dinamike na atmosferski elektricitet i ionosferu, jer se nalazi u tlu, pri čemu procesi povezani s potresima i vulkanima u pravilu dovode do pojave anomalnih stopa emanacije Rn iz tla u atmosferu. U sljedećem poglavlju opisan je mehanizam ionizacije zraka zbog Rn.

#### **3.6.4.1 Radon**

Rn je kemijski element s atomskim brojem 86. U prirodi se nalazi u plinovitom stanju, bez boje je, okusa i mirisa. Radioaktivan je i nastaje u lancu radioaktivnosti težih prema lakšim kemijskim elementima, iz uranija ( $^{238}\text{U}$ ) prema olovu ( $^{206}\text{Pb}$ ), pri čemu nastaje izravno radioaktivnim raspadom radija ( $^{226}\text{Ra}$ ). Rn ima kratko vrijeme poluraspada ( $T_{1/2}$ ), a od ukupno 39 poznatih izotopa, najstabilniji je  $^{222}\text{Rn}$ , čiji  $T_{1/2}$

iznosi 3,82146 dana (Belotti i sur., 2015). Rn se smatra prirodnim onečišćivačem okoliša, jer je štetan po zdravlje. Udisanje povećane koncentracije Rn dovodi do povećanja vjerojatnosti razvoja plućnih karcinoma (Rosario i Wichmann, 2006).

Kao plemeniti plin koji u vanjskoj atomskoj ljusci ima 8 elektrona, uglavnom je kemijski inertan. Rn se u prirodi nalazi u tragovima i pojavljuje se kao posljedica radioaktivnog raspada uranija i torija (Th) koji se nalaze u izobilju u stijenama tla te kao takav polako izlazi iz tla u atmosferu uslijed napuštanja kristalne rešetke minerala u kojem je nastao emanacijom te difuzijom kroz tlo ili konvektivnim/advektivnim procesima dolazi do površine i ulazi u atmosferu. Permeabilnost tla govori o stupnju lakoće kojom se Rn kreće kroz tlo prema površini, i zavisi od geološkog sastava i strukture tla. Nakon što se Rn nađe u atmosferi, raznosi se zračnim strujanjem, stoga njegova koncentracija na otvorenom prostoru naglo pada, ali u zatvorenim prostorijama može biti znatno povećana i onda predstavlja potencijalnu ugrozu za zdravlje (Wilkening i sur., 1990; Civilna zaštita RH, 2021).

#### **3.6.4.2 Radioaktivni raspad**

S obzirom da je Rn radioaktivan kemijski element, on prolazi kroz proces radioaktivnog raspada (engl. *radioactive decay*). Ovaj proces je ključan za ionizaciju zraka zbog Rn, budući da produkti radioaktivnog raspada ioniziraju zrak.

Standardni model elementarnih čestica je teorija koja opisuje djelovanje triju od četiriju fundamentalnih sila (EM te jaka i slaba nuklearna) i daje klasifikaciju svih poznatih elementarnih čestica (npr. Oerter, 2006). Kvarkovi su elementarne čestice koje međusobnim kombiniranjem stvaraju kompozitne (složene) čestice, hadrone (Han, 1999). Najstabilniji hadroni su protoni i neutroni, a oni zajedno čine atomsku jezgru. Protoni nose pozitivan električni naboj, a s obzirom da je elektrostatička sila između dvaju naboja istoga predznaka odbojna (Coulomb, 1785a-c), proizlazi da među protonima atomske jezgre postoji odbojna sila. Da se atomska jezgra ne bi

raspala pod utjecajem elektrostatičke sile među protonima, zaslužna je jaka nuklearna sila koja je privlačna među nukleonima (protoni i neutroni) atoma. Budući da je na udaljenostima reda veličine tipične atomske jezgre ona snažnija od elektrostatičke odbojne sile, protoni i neutroni atoma ostaju zajedno u jezgri.

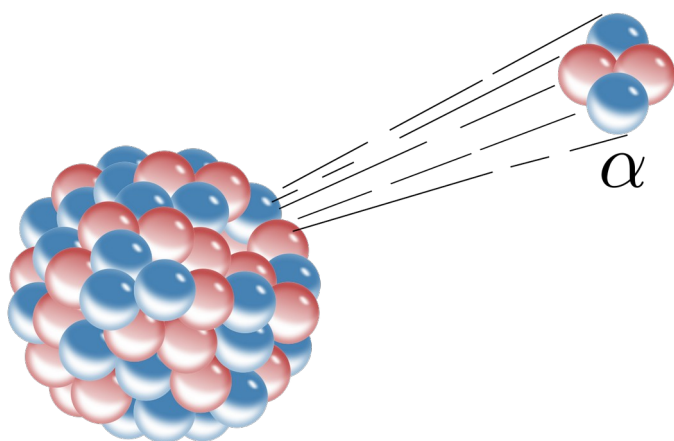
Elementarne čestice odgovorne za jaku nuklearnu silu koja djeluje između kvarkova nazivaju se gluoni. To su čestice bez mase kao i fotoni. Kvarkovi razmjenjuju gluone u svom međudjelovanju i tako stvaraju jako polje koje drži kvarkove zajedno. Međudjelovanje kvarkova prenosi se emisijom i apsorpcijom gluona isto kao što se i EM međudjelovanje prenosi fotonima. Gluoni su vektorski baždareni bozoni i teorija kvantne kromodinamike predviđa postojanje osam neovisnih tipova. U skladu s tom teorijom gluoni su čestice koje imaju tzv. "boju". Postoji 8 različitih kombinacija "boje" i "antiboje" koje gluoni mogu nositi. Gluoni zbog svog jakog međudjelovanja ne mogu postojati zasebno kao slobodne čestice, nego su uvijek dio složenih čestica hadrona. U atomu se međudjelovanje između nukleona ne prenosi direktno gluonima već hadronima koji se zovu mezoni (npr. Han, 1999).

Jaka nuklearna sila naglo opada povećanjem udaljenosti. Teži kemijski elementi (koji tipično imaju zbroj protona i neutrona  $> \sim 210$ ) su u pravilu nestabilni, budući da su jezgre tih atoma toliko velike da jaka nuklearna sila postaje preslaba na tako velikim polumjerima atomske jezgre. Odbojna elektrostatička sila tad u određenim uvjetima postaje dominantna i razbija atomsku jezgru. Ona u usporedbi s jakom nuklearnom silom, pri povećanju udaljenosti opada znatno sporije (s kvadratom udaljenosti (Coulomb, 1785a-c)) te u teoriji djeluje sve do beskonačne udaljenosti. Kad elektrostatička sila u velikoj atomskoj jezgri nadvlada jaku nuklearnu silu, dolazi do nuklearnog raspada jezgre. Taj događaj se naziva alfa-raspad ( $\alpha$ -raspad).

### 3.6.4.3 $\alpha$ -raspad i $\alpha$ -čestice

$\alpha$ -raspad karakterizira iznenadno napuštanje jezgre dvaju protona i dvaju neutrona (tj. jezgre helija;  $\text{He}^{2+}$ , ili  $\alpha$ -čestice;  $\alpha^{2+}$ ), pri čemu ostatak jezgre postaje novi kemijski element s atomskim brojem manjim za 2 te masenim brojem manjim za 4. U tom procesu atom povećava svoju stabilnost, reduciranjem svoje veličine.

$\alpha$ -raspad se prikazuje kemijskom jednačbom:



Slika 12: Koncept  $\alpha$ -čestice

Izvor: Reproducirano sa <https://tinyurl.com/2p9aujw7>

Nastala  $\alpha$ -čestica ima pozitivan električni naboj iznosa  $2e^+$  pa je sama po sebi (dvostruki) električni ion. Posjeduje tipično veliku kinetičku energiju reda veličine 5 MeV i brzinu gibanja oko 4 % brzine svjetlosti. Dubina penetracije  $\alpha$ -čestica u materiju nije velika te se kroz zrak gustoće uz tlo kreće tek nekoliko cm prije nego izgubi kinetičku energiju interakcijom

s okolnim atomima i molekulama. Pritom, njezina kinetička energija se većim dijelom troši na ioniziranje medija kroz koji prolazi.

Do iznenadnog izbacivanja  $\alpha$ -čestice iz jezgre dolazi kad odbojna elektrostatička sila nadvlada privlačnu jaku nuklearnu silu. Tipična energija  $\alpha$ -čestice iznosi između 4 i 9 MeV, dok je za svladavanje energetske barijere jake nuklearne sile potrebna energija od oko 25 MeV. Zbog toga se proces  $\alpha$ -raspada određene količine radioaktivne tvari ne događa trenutačno već se moraju stvoriti lokalni uvjeti koji omogućuju odvajanje  $\alpha$ -čestice od pojedine jezgre atoma. Takav uvjet osigurava mehanizam kvantnog tunela (MacColl, 1932).



Prema kvantnom modelu čestica, one su ujedno i valovi, a njihova lokacija u prostoru je funkcija vjerojatnosti matematički opisana valnom funkcijom  $\Psi$ . U kvantnom kontekstu, položaj čestice u prostoru nije određen u apsolutnom smislu, već je položaj predstavljen oblakom vjerojatnosti, stoga postoji određena vjerojatnost  $P > 0$  da se u nekom trenutku  $\alpha$ -čestica nađe na dovoljno velikoj udaljenosti od ostatka jezgre atoma, kad će jaka nuklearna sila postati slabija od odbojne elektrostatičke sile. Vjerojatnost izbacivanja  $\alpha$ -čestice ovisi o iznosu energetske barijere (prvenstveno o atomskoj masi). Što je vjerojatnost veća (generalno veća atomska masa, tj. nestabilniji kemijski element), to češće dolazi do izbacivanja  $\alpha$ -čestica iz jezgri takvih atoma, odnosno vrijeme poluraspada takvog radioaktivnog elementa je kraće (npr. Beiser, 2002).

Ovaj radioaktivni proces opisuje Gamowova teorija  $\alpha$ -raspada (Stuewer, 1986), u kojoj su temeljni postulati:

- Parovi 2 protona i 2 neutrona ( $\alpha$ -čestice) unutar atoma su u konstantnom titranju unutar jezgre koju na okupu održava potencijalna energetska barijera jake nuklearne sile.
- Uvijek postoji vjerojatnost  $P > 0$  da  $\alpha$ -čestica prođe kroz barijeru uslijed mehanizma kvantnog tunela.
- Vjerojatnost  $\alpha$ -raspada atoma u jedinici vremena iznosi:

$$\lambda = \nu T = \frac{\nu}{2R_0} T \quad , \quad (29)$$

gdje je  $\lambda$  broj proporcionalan vjerojatnosti  $\alpha$ -raspada i naziva se konstanta raspadanja,  $\nu$  učestalost "sudara"  $\alpha$ -čestice s potencijalnom energetsom barijerom,  $T$  vjerojatnost tuneliranja kroz barijeru za pojedini sudar,  $\nu$  brzina  $\alpha$ -čestice nakon napuštanja jezgre, a  $R_0$  je radijus jezgre.

Gamowova teorija predviđa da su konstanta raspadanja i energija  $\alpha$ -čestice usko povezane, pa tako energije  $\alpha$ -čestice koje nastaju iz radioaktivnih elemenata kraćih vremena poluraspada imaju veću kinetičku energiju od  $\alpha$ -čestice nastalih iz elemenata kraćih duljih vremena poluraspada (Mittal i sur., 2018).

Geiger-Nuttallov zakon (Geiger i Nuttall, 1911) povezuje konstantu raspadanja i udaljenost koju  $\alpha$ -čestica prolazi u zraku (proporcionalnu kinetičkoj energiji) i pritom eksperimentalno potvrđuje iznad spomenutu vezu kinetičke energije  $\alpha$ -čestice i vremena poluraspada radioaktivnih elemenata. U suvremenom obliku, ovaj zakon se prikazuje kao:

$$\log_{10}(\lambda) = -a_1 \frac{Z}{\sqrt{E}} + a_2 \quad , \quad (30)$$

gdje je  $Z$  atomski broj radioaktivnog elementa,  $E$  ukupna kinetička energija novonastalog elementa i  $\alpha$ -čestice, dok su  $a_1$  i  $a_2$  konstante.

Prosječan domet  $\alpha$ -čestice u zraku iznosi nekoliko desetaka milimetara. Na tom putu,  $\alpha$ -čestica ionizira atome i molekule zraka pored kojih prolazi, izbacujući njihove elektrone iz atomskih orbita i pri svakom takvom pojedinačnom procesu troši mali dio svoje kinetičke energije. Nakon što potroši veći dio energije, brzina joj jako opada i tad konačno uslijed privlačne elektrostatičke sile zbog svojeg  $2^+$  naboja, prihvaća dva slobodna elektrona pretvarajući se u atom helija, završavajući svoj životni ciklus prema jednadžbi:



#### 3.6.4.4 $\beta$ -raspad i $\gamma$ -zračenje

Radioaktivno zračenje osim kreiranjem  $\alpha$ -čestica, očituje se i  $\beta$ -raspadom te  $\gamma$ -zračenjem. Koji radioaktivni proces će se odvijati ovisit će o kemijskom elementu. Za dio tematike ove disertacije koji se odnosi na ionizirajuće zračenje Rn,

relevantan je  $\alpha$ -raspad pa je teorijska podloga tog procesa opisana detaljnije. Rn ne prolazi kroz proces  $\beta$ -raspada niti emitira  $\gamma$ -zračenje, stoga će ove pojave biti opisane samo kratko.

U procesu  $\beta$ -raspada, iz jezgre atoma radioaktivnog elementa izbacuje se  $\beta$ -čestica ( $e^-$  ili  $e^+$ ), pri čemu atomska jezgra zadržava maseni broj, ali se omjer protona i neutrona mijenja. Taj proces se naziva nuklearna transmutacija kemijskog elementa u drugi element koji posjeduje stabilniji omjer neutrona i protona. Ovisno o tome postoji li u izotopu relativni višak neutrona ili protona u odnosu na  $\beta$ -stabilnu konfiguraciju (vidjeti u literaturi NZ-dijagram; npr. Mackintosh i sur., 2001), doći će do pretvorbe jednog neutrona u proton ili jednog protona u neutron i pritom će se emitirati  $\beta$ -čestica (koja će u prvom slučaju biti elektron, a u drugom pozitron). Pri emitiranju  $e^-$ , govorimo o  $\beta^-$  raspadu, a pri emitiranju  $e^+$ , o  $\beta^+$  raspadu.  $\beta$ -čestice prodiru dublje kroz materiju od  $\alpha$ -čestica, nose manju energiju (reda veličine 1 MeV) te imaju nešto manju sposobnost ionizacije u odnosu na  $\alpha$ -čestice.

U procesu  $\gamma$ -zračenja, iz radioaktivnog elementa se ne emitira čestica, već EM zračenje (fotoni) valnih duljina  $\gamma$ -spektra. Ove valne duljine su visokoenergetske i zato su u mogućnosti lako ionizirati zrak, a prodiru kroz medij mnogo dublje od  $\alpha$  i  $\beta$ -čestica. Emisija  $\gamma$ -zračenja se odvija kad se uslijed drugih radioaktivnih procesa jezgra atoma nalazi u povišenom energetsom stanju u odnosu na svoje temeljno stanje.

#### **3.6.4.5 Ionizacija radioaktivnim raspadom radona i zračenjem iz tla**

Atomi  $^{222}\text{Rn}$  prolaze radioaktivni  $\alpha$ -raspad pretvarajući se pritom u  $^{218}\text{Po}$  (polonij).  $\alpha$ -čestice izbačene iz jezgre  $^{222}\text{Rn}$  imaju energiju 5,489 MeV koja je dovoljna za ionizaciju okolnih atoma i molekula zraka koje se nađu na putanji  $\alpha$ -čestice. Istraživanja Rn kao plina koji pokazuje svojstvo ioniziranja zraka sežu još u prvu polovicu 20. stoljeća (Holweck i Wertenstein, 1930). Golubenko i sur. (2020) pokazuju da je  $^{222}\text{Rn}$  osnovni uzročnik električne vodljivosti donjeg sloja atmosfere.

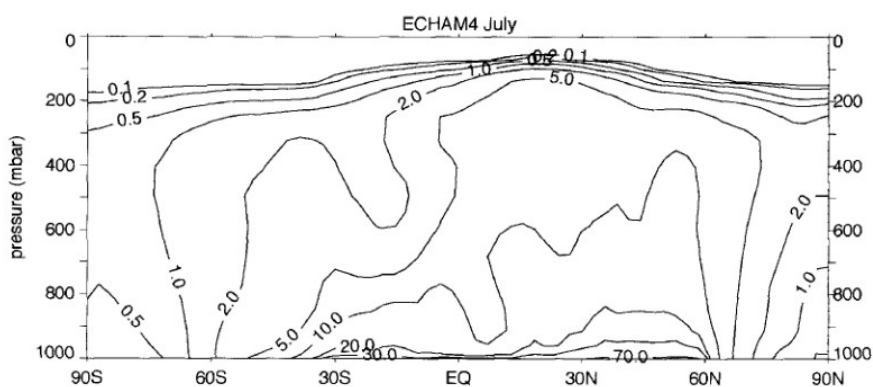
S obzirom na relativno kratko vrijeme poluraspada  $R_n$  od oko 3,8 dana, njegova najveća koncentracija, a time i učinak ionizacije zraka bit će u najnižem sloju atmosfere. Hoppel i sur. (1986) daju stopu ionizacije od  $5-10 \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$  pri tlu. S konvektivnim zračnim strujanjima  $R_n$  je u mogućnosti doći i na veću visinu od tla, ali prosječno njegova koncentracija s porastom visine opada i smatra se da se najvećim dijelom nalazi na visinama ispod 3 km od tla.

Struktura planetarnog graničnog sloja (PBL) umnogome uvjetuje raspršenje kemijskih elemenata u donjem dijelu atmosfere (npr. Garratt, 1994). Turbulencija, termičke zračne struje i drugi advekcijski i konvekcijski mehanizmi u PBL prenose zračne česti unutar sloja i efektivno ga miješaju. U pravilu, pri dinamičkim meteorološkim uvjetima sa značajnim strujanjem zraka te tijekom dana i to osobito nad kopnom i razvedenim reljefom, PBL je vrlo dobro izmiješan. Suprotno tome, u uvjetima pojave statički stabilnog sloja zraka tijekom noći, temperaturne inverzije te slabih zračnih strujanja, miješanje zračnih slojeva izostaje. Shodno tome, i koncentracija  $R_n$  unutar PBL znatno će ovisiti o njegovim dinamičkim karakteristikama – dobu dana i godišnjem dobu, geografskom položaju kao i općim sinoptičkim uvjetima (npr. Volarić, 2004).

Pokazuje se da je koncentracija  $R_n$  inverzno proporcionalna visini PBL (Hsu i sur., 1980; Sesana i sur., 2003; Desideri i sur., 2006) pa će i koncentracija slobodnog električnog naboja te vertikalna distribucija u donjih nekoliko kilometara zraka, kao posljedica ionizacije  $R_n$ , ovisiti o stabilnosti i visini PBL. U stabilnom stupcu zraka (npr. zimska kontinentalna anticiklona)  $R_n$ , a time i ionizirani električni naboj bit će koncentriran u površinskom sloju zraka. Suprotno tome, u uvjetima nestabilne stratifikacije PBL, kad postoji izraženo vertikalno miješanje u sloju (npr. pri sunčanom vremenu ljeti nad kopnom), koncentracija  $R_n$  i naboja bit će raspoređena do vrha sloja (do par kilometara visine) gotovo homogeno. U sinoptički neporemećenom dnevnom hodu nad kopnom, pokazuje se da su najviše koncentracije  $R_n$  uz tlo oko izlaska Sunca, a najmanje u poslijepodnevrim satima (Galeriu i sur., 2011). Treba naglasiti da će ako se iz razmatranja isključe svi drugi

čimbenici poput aerosola, naoblake, oborine itd., ukupna integrirana količina naboja u zračnom stupcu od tla do vrha atmosfere biti identična tokom dana, unatoč različitoj vertikalnoj raspodjeli po slojevima koju uvjetuje promjenjiva visina PBL.

Detener i sur. (1999) koristeći numeričke modele simulirali su prostornu raspodjelu  $^{222}\text{Rn}$ . Rezultati vertikalne raspodjele Rn dobivene pomoću klimatskog modela ECHAM4 za srpanj prikazani su na slici 13.

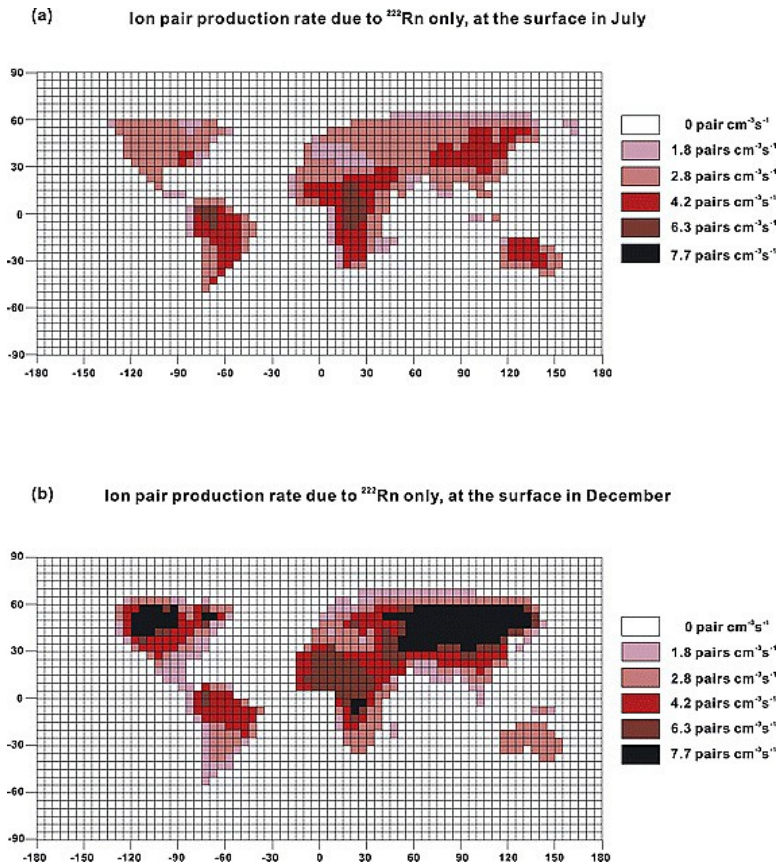


Slika 13: Srednja zonalna vrijednost omjera miješanja Rn ( $\cdot 10^{21}$ )

Izvor: Detener i sur. (1999)

Iz slike je uočljivo brzo opadanje koncentracije s porastom visine, te također maksimum koncentracije oko 30 °N što odgovara zemljopisnom pojasu maksimalnog konvektivnog prijenosa u srpnju.

Tinsley i Zhou (2006) su proveli simulaciju prostorne raspodjele stope ionizacije uzrokovane utjecajem Rn. Rezultati simulacije ionizacije površinskog sloja zraka za srpanj i prosinac prikazani su na slici 14.



Slika 14: Prostorna raspodjela stope ionizacije radonom u srpnju (gore) i prosincu (dolje)

Izvor: Tinsley i Zhou (2006).

Tijekom prosinca (Slika 14 – b), kad je nad zimskom hemisferom zima, vidi se znatno veća stopa ionizacije površinskog sloja zraka nad kontinentom u odnosu na ljetni period (Slika 14 – a). To je u skladu s razmatranom raspodjelom Rn po visini koja je primarno određena vertikalnom stabilnošću donjeg sloja troposfere. Tijekom zimskih mjeseci nad kopnom prevladava stabilna stratifikacija zraka i vertikalna miješanja su slaba te se Rn zadržava u najnižem sloju zraka. To je u suprotnosti situaciji u ljetnom periodu, kad je uslijed jačeg zagrijavanja podloge stratifikacija nad kopnom labilnija i vertikalna miješanja zraka podižu Rn na veću visinu, stoga je posljedično površinska stopa ionizacije manja.

Pokazuje se također da je u donjem dijelu atmosfere iznad kopna, ionizacija radioaktivnim raspadom Rn primarni izvor kreiranja ionskih parova. U usporedbi s utjecajem kozmičkog zračenja koje pri tlu stvara  $1 - 2 \cdot 10^6$  ionskih parova u  $m^3$  zraka u sekundi, ionizacija uslijed Rn kreira većinom između 2 i  $8 \cdot 10^6$  ionskih parova (Slika 14). Također, i direktnim zračenjem iz stijena u tlu (većinom  $\gamma$ -zračenje) dodatno se ionizira najniži sloj stopom oko  $4 \cdot 10^6$  parova po  $m^3/s$  (npr. Volarić, 2004).

### 3.7 Ponori električnog naboja

Ukupan sadržaj elektrona u zračnom stupcu u nekom trenutku je određen balansom između izvora i ponora električnog naboja. Izvori definiraju stopu ionizacije dok ponori definiraju stopu rekombinacije (neutralizacije, razaranja) električnog naboja. Rekombinacija iona i slobodnih elektrona temeljni je mehanizam uklanjanja naboja iz atmosfere. Do rekombinacije dolazi i uslijed spajanja malih iona suprotnih predznaka u neutralnu molekulu ili spajanja malog i velikog iona suprotnog predznaka u neutralnu kondenzacijsku jezgru. Procesom rekombinacije se smanjuje ionizacija zraka, tj. opada ukupan sadržaj elektrona i električna vodljivost zraka (npr. Volarić, 2004).

Nakon ionizacije zraka, tijekom vremena dolazi do procesa rekombinacije pozitivno nabijenih iona i slobodnih elektrona. U tom se procesu spajaju slobodan elektron s pozitivnim ionom, čime se kao produkt stvara neutralna molekula visoke energije. Takve molekule su u pravilu nestabilne i spontano se dekompoziraju, pretvarajući internu energiju u kinetičku energiju rezultirajućih atoma. Najvažniji proces ionosferske rekombinacije je spajanje slobodnih elektrona s pozitivnim ionima kisika ( $O_2$ ) i dušikovog oksida (NO) (npr. Britannica, 2021):



Atomi visoke kinetičke energije zrače energiju u obliku EM zračenja, emitirajući pritom slabu svjetlost u zelenom i crvenom dijelu vidljivog spektra (engl. *airglow*).

Rekombinacija slobodnog elektrona i pozitivno nabijenog iona moguća je različitim procesima; disocijativna rekombinacija, radijativna rekombinacija i rekombinacija sudarom triju tijela (ion, elektron i aerosol) su neki od primjera neutralizacije ionosferskog naboja. (Flannery, 2006).

Zakovitost promjene količine naboja u vremenu može se napisati kao razlika brzine ionizacije i brzine neutralizacije (Israel, 1970; Kulmala i sur., 2001; Volarić, 2004; Hirsikko i sur., 2011):

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha n^2 - \eta_1 n N - \eta_2 n N_0 \quad (34)$$

gdje su:

$dn$  = promjena broja iona u vremenu  $dt$

$q$  = broj proizvedenih malih iona u  $m^3$  zraka u s

$n$  = broj malih iona u  $m^3$  zraka

$N$  = broj velikih iona u  $m^3$  zraka

$N_0$  = broj kondenzacijskih jezgara u  $m^3$  zraka

$\alpha$  = koeficijent rekombinacije malih iona

$\eta_1$  = koeficijent rekombinacije malih iona s velikim ionima

$\eta_2$  = koeficijent aglomeracije (pripajanja) malih iona s česticama aerosola.

Ponorima električnog naboja može se smatrati i prijenos naboja iz jednog područja u drugo, čime izvorišna regija gubi naboj. Slično vrijedi i za difuzivne procese gubitka naboja iz određenog sloja ionosfere.

Usljed djelovanja Zemljinog magnetskog polja, ioni i elektroni difuzijom prelaze u niže slojeve. Na visinama preko 300 km, naboj difuzijom može prijeći znatnu vertikalnu udaljenost, reda veličine 50 km u nekoliko sati (Ferraro, 1945; Rishbeth, 1975). Ovaj proces je značajan u visokim zemljopisnim širinama gdje je magnetsko polje usmjereno pod velikim kutem u odnosu na horizont. U nižim zemljopisnim



širinama difuzivni proces uklanjanja naboja je vrlo ograničen uslijed horizontalno položenog magnetskog polja. Posljedično tome, u nižim zemljopisnim širinama gustoća naboja je definirana gotovo u potpunosti fotokemijskim procesima ionizacije i rekombinacije naboja.

### 3.8 Utjecaj aerosola na električna svojstva atmosfere

Proveden je veći broj istraživanja na temu utjecaja prirodnog i antropogenog aerosola u zraku na električnu vodljivost atmosfere (npr. Retalis, 1991; Ragini, 2009; Kamsali, 2011; Manes, 1976; Sheftel, 1994; Kamsali, 2009). Pokazuje se da je gubitak slobodnog naboja brži u prisustvu veće koncentracije aerosola, stoga atmosferski aerosol utječe na opće smanjenje električne vodljivosti zraka te smanjenje koncentracije slobodnog električnog naboja u atmosferi. Ovo će se pokazati i kao ključni mehanizam koji objašnjava rezultate provedene analize u disertaciji.

Osim velike količine krutih i relativno teških čestica (pepeo) koji brzo silom težom padnu na tlo, preostali vulkanski aerosol mikronskih dimenzija se većim dijelom sastoji od sumporne kiseline ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) koja nastaje izbacivanjem sumporovog dioksida ( $\text{SO}_2$ ) i spajanjem s vodenom parom ( $\text{H}_2\text{O}$ ) u zraku. U slučaju jačih erupcija, značajne količine aerosola dopijevaju u stratosferu (Robock, 2000; Kremser, 2016). Snažne erupcije poput vulkana Pinatubo iz 1991. godine ubacuju reda veličine 10 Tg  $\text{SO}_2$  u stratosferu. Prve procjene eksplozivne erupcije vulkana Hunga Tonga u 2022., govore čak o dosezanju visine mezosfere (~ 55 km) eruptivnom materijom.<sup>4</sup>

Temeljem satelitskih mjerenja izračunano je da je između 1978. i 2014. u gornju troposferu i donju stratosferu vulkanski  $\text{SO}_2$  fluks iznosio 1 do 2 Tg godišnje (Carn i sur., 2016). Znatna količina istraživanja u znanstvenoj literaturi rađena je u cilju određivanja utjecaja vulkanskih erupcija na klimu planete (npr. Hegerl i sur., 2003; Sigl i sur., 2015; Santer i sur., 2015; Hansen i sur., 1978; Rampino i Self; 1982). Iz takvih istraživanja se pokazuje da vulkanski aerosol u stratosferi povećava

---

<sup>4</sup> <https://www.bbc.com/news/science-environment-60088413>

raspršenje Sunčevog zračenja (Rayleightovo raspršenje), rezultirajući negativnim radijacijskim forsiranjem na vrhu atmosfere i posljedičnim hlađenjem površine planete.

Temeljni uzrok rekombinacije slobodnog naboja u troposferi je spajanje iona i elektrona s atmosferskim aerosolom (Lee i Lucas, 2007) kojeg u pravilu ima najviše u najnižem sloju zraka budući da je osnovno izvorište aerosola površina Zemlje. Koncentracija iona u zraku je određena mehanizmima njihovog kreiranja i neutralizacije, tj. omjerom učinaka izvora i ponora (Siingh, Pant i Kamra, 2007). Prema zakonitosti koja pokazuje razliku ionizacije i neutralizacije (izraz 34), koncentracija aerosola (član  $N_0$ ) ima negativan utjecaj u promjeni broja slobodnih iona ( $dn$ ) u vremenu ( $dt$ ). Količina atmosferskih iona i električna vodljivost zraka su inverzno povezane s koncentracijom atmosferskog aerosola (Siingh i sur., 2007). Iz tog proizlazi da će povećanje koncentracije aerosola u post eruptivnom razdoblju imati negativan učinak na količinu slobodnog naboja u atmosferi.

Osim primarno, utjecaja na klimu planete, u određenoj mjeri je izučavan utjecaj stratosferskog aerosola vulkanskog porijekla i na električna svojstva atmosfere. Tinsley i Zhou (2006) sugeriraju snažan utjecaj vulkanskog aerosola na stratosfersku vodljivost. Pokazuju da pri jačoj vulkanskoj aktivnosti može doći do reduciranja vodljivosti do 3 reda veličine u trajanju mjesecima nakon događaja kao npr. iza erupcije vulkana Pinatubo u 1991. godini. English i sur. (2013) simuliraju povećanje koncentracije aerosola nakon erupcija vulkana Pinatubo (1991.) i Toba (prije 74.000 godina) koristeći 3D mikrofizički model aerosola (WACCM/CARMA) (Garcia i sur., 2007; Toon i sur., 1988) te pokazuju povećanje koncentracije aerosola u troposferi i posebno značajno povećanje u stratosferi. U stratosferi u periodu od erupcije vulkana Pinatubo do 6 mjeseci nakon erupcije, koncentracija sulfata je porasla na jedan do dva reda veličine iznad normalnih vrijednosti. Za erupciju vulkana Toba, vrijednosti u stratosferi su porasle i do tri reda veličine preko normalnih, a preko dva reda veličine iznad normale su se zadržale više od 30 mjeseci iza erupcije.

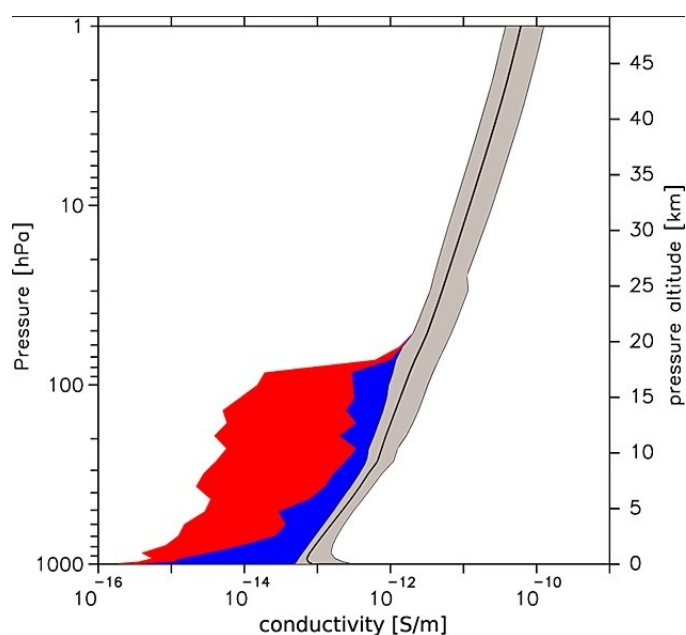
Baumgaertner i sur. (2013a) sličnim modeliranjem pokazuju da bi erupcija 100 puta jača od erupcije vulkana Pinatubo iz 1991., smanjila vodljivost atmosfere na visini od 20 km praktično na nulu, u periodu od erupcije do nekoliko mjeseci nakon erupcije i to u gotovo cijelom pojasu zemljopisnih širina od 40 °S do 40 °N, po svim zemljopisnim dužinama. Globalni zonalni utjecaj na smanjenje vodljivosti atmosfere posljedica je stratosferske pretežno zonalne cirkulacije (Oberheide i sur., 2002), dok se uslijed položaja vulkana (15 °N) većina aerosola zadržava u tropskim i umjerenim zemljopisnim širinama. Ista simulacija pokazuje porast ukupnog električnog otpora s 200 na 300  $\Omega$  mjesec dana nakon erupcije te smanjenje ukupnog iznosa vertikalne električne struje neporemećene atmosfere s 1,3 na ispod 1 kA. Nakon erupcije, opadanje učinka vulkanskog aerosola na vodljivost stratosfere se smanjuje brže nego ukupna količina aerosola u sloju. Razlog tome se nalazi u koagulaciji manjih čestica u veće, čime se ne mijenja ukupna masa aerosola ali se smanjuje broj izoliranih čestica o kojem primarno ovisi smanjenje vodljivosti (Baumgaertner i sur., 2013a).

### **3.9 Utjecaj meteoroloških parametara i sastava zraka te antropogenog onečišćenja na ionizaciju**

U najnižem sloju atmosfere, ionizacija značajno zavisi o meteorološkim parametrima i sastavu zraka. Israel (1970) povezuje određene promjene u promjeni ionizacije s visinom, s postojanjem slojeva aerosola. Gustoća naboja u donjim slojevima zraka je pod znatnim utjecajem vjetra i oborine. Vjetar kao prostorni prijenosnik aerosola i iona utječe na prostornu raspodjelu gustoće naboja. Vertikalna zračna strujanja miješaju koncentraciju iona po visini, stvarajući homogene, dobro izmiješane slojeve. Naoblaka i oborina uklanjaju ione i time smanjuju koncentraciju naboja iz donjih slojeva zraka. Zračne mase koje imaju svoje izvorište nad urbanim područjima sadrže malo iona, zbog značajne količine

aerosola i polutanata. Općenito količina krutih čestica u zraku, primjerice pustinjske prašine, reducira količinu iona, budući da ih privlači na sebe te im smanjuje mobilnost (Retalis, 1991; Ragini, 2009; Kamsali, 2011).

Baumgaertner i sur. (2013b) modeliranjem koristeći CESM1(WACCM) simulacije pokazuju gubitak vodljivosti atmosfere uzrokovan naoblakom i atmosferskim aerosolima (Slika 15). Crveno područje na slici pokazuje gubitak vodljivosti kao posljedicu učinka naoblake, a plavo kao posljedicu učinka aerosola u odnosu na vertikalni profil vodljivosti bez tih utjecaja (sivo).



Slika 15: Modelirani gubitak električne vodljivosti zraka u troposferi uslijed naoblake i aerosola

Izvor: Baumgaertner i sur. (2013b)

U zraku se uvijek nalazi određena količina čestica, kao posljedica prirodnih ili antropogenih procesa. U prirodne izvore spadaju vulkanske erupcije, čestice soli iz oceana, biljna pelud, dim od izgaranja vegetacije, prašina podignuta s tla itd. Antropogenu grupu čine produkti izgaranja fosilnih goriva i drugi industrijski procesi koji u velikoj mjeri povećavaju ukupnu koncentraciju zračnih polutanata. Povećana koncentracija atmosferskog aerosola kao posljedica antropogenog utjecaja u posljednjim desetljećima, dovodi do smanjenja električne vodljivosti

atmosfera te smanjenja koncentracije električnog naboja u zraku (Cobb i Wells, 1970; Manes, 1976; Sheftel, 1994; Kamra i Deshpande, 1995; Deshpande i Kamra, 2002; Kamsali, 2009).

### 3.10 Ukupni sadržaj elektrona

Električna svojstva atmosfere mogu se opisati jakošću električnog polja u nekoj točki prostora, električnim potencijalom između dviju točaka u prostoru, električnom vodljivošću ili otporom, jakošću električne struje, količinom slobodnog naboja u jedinici volumena itd. U domeni satelitske tehnologije, uobičajeno se kao temeljna veličina kojom se opisuje količina naboja iznad neke točke na Zemlji koristi ukupni sadržaj elektrona (engl. *Total Electron Content* – TEC). Ukupni sadržaj elektrona je integrirani broj slobodnih elektrona od antene prijarnika do antene satelita, u stupcu presjeka  $1 \text{ m}^2$  (Klobuchar, 1975; 1983; 1987; Parkinson, 1996; Petrovski i Tsujii, 2012) i može se iskazati kao:

$$TEC = \int N(h) dh \quad , \quad (35)$$

gdje je  $N$  gustoća slobodnih elektrona u stupcu te  $h$  visina iznad površine tla. Jedinica za ukupni sadržaj elektrona je TEC jedinica (engl. *Total Electron Content Unit* – TECU). 1 TECU iznosi  $10^{16} \text{ e}^-/\text{m}^2$ .

Ukupan sadržaj elektrona iznad neke točke na Zemlji ovisi o ukupnim učincima stvaranja i neutralizacije slobodnog naboja u cijelom stupcu na putu radiosignala. Iz tog proizlazi da će vrijednosti TEC varirati prostorno i vremenski, te prvenstveno biti određene intenzitetom ionizacije zraka. Promjene ukupnog sadržaja elektrona tijekom vremena mogu biti periodične i neperiodične (Davoudifar i sur., 2021; Talaat i Zhu, 2016).

Kad se satelit nalazi u zenitu korisnika ( $\chi = 0^\circ$ ), staza prostiranja signala kroz atmosferu je najkraća. Zbog toga će i količina elektrona na putu signala biti najmanja pri  $\chi = 0^\circ$ . Porastom zenitnog kuta ( $\chi > 0^\circ$ ) povećava se duljina staze prostiranja signala kroz atmosferu pa i ukupna količina elektrona na stazi signala

raste. Posljedično tome se razlikuje vertikalna vrijednost ukupnog sadržaja elektrona (engl. *Vertical Total Electron Content* – VTEC) te vrijednost ukupnog sadržaja elektrona na stvarnoj stazi signala, pri različitim elevacijskim kutovima satelita (engl. *Slant Total Electron Content* – STEC) (Klobuchar, 1987; Petrovski i Tsujii, 2012; Manucci, 1988; Teunissen i Montenbruck, 2017). Pritom se koristi funkcija preslikavanja (engl. *mapping function*) za svođenje izravno opaženih vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona pri elevacijskim kutovima na referentnu vertikalnu vrijednost (Lanyi i Roth, 1988; Petrovski i Tsujii, 2012; Teunissen i Montenbruck, 2017):

$$M_{TEC}(z) = \frac{STEC}{VTEC} \quad , \quad (36)$$

gdje je STEC ukupan sadržaj elektrona pri zenitnom kutu satelita  $\chi > 0^\circ$ , a VTEC vertikalna vrijednost ukupnog sadržaja elektrona.

### 3.11 Periodične promjene ukupnog sadržaja elektrona

Periodične okolišne promjene koje dovode do pojačane ili smanjene stope ionizacije atmosfere uzrokuju periodične promjene ukupnog sadržaja elektrona. Pritom vremenska skala promjene odgovara periodima ciklusa promjena okolišnih uvjeta. Osnovne periodične promjene uvjeta dolaze od astronomskih čimbenika i posebice interakcije u sustavu Sunca i Zemlje (Mendillo, 2006). Položaj određene točke na Zemlji u odnosu na Sunce određuje dnevni i godišnji hod stupnja ionizacije i time ukupnog sadržaja elektrona nad tom točkom (Klobuchar, 1983). Osim promjena uzrokovanih Zemljinom rotacijom i revolucijom oko Sunca te promjene nagnutosti osi ravnine ekvatora u odnosu na ravninu ekliptike, Sunce prolazi kroz cikluse svoje aktivnosti (npr. Hathaway, 2015). Ti mehanizmi su temeljni čimbenici koji stvaraju periodične promjene vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona nad nekim mjestom na Zemlji.

Najveća količina slobodnog naboja nastaje uslijed upijanja Sunčevog zračenja kratkih valnih duljina u molekulama u ionosferskom sloju F. Zbog toga će dnevni hod osunčavanja tog ionosferskog područja ponajviše određivati dnevni hod ionizacije sloja, a time i imati najveći utjecaj na dnevni hod ukupnog sadržaja elektrona (Klobuchar, 1988). Dnevni hod intenziteta osunčavanja ovisan je ponajprije o upadnom kutu zračenja. Najveće vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona pojavljuju se tijekom dnevnih sati kad je osunčavanje najintenzivnije, budući da zračenje sa Sunca do atmosfere dolazi pod velikim upadnim kutom (Klobuchar, 1983; 1988; Parkinson i Spilker, 1996; Rishbeth, 1988). Godišnji hod ukupnog sadržaja elektrona karakteriziraju povećane vrijednosti na ljetnoj i smanjene na zimskoj hemisferi.

Sunce prolazi kroz periode pojačane i smanjene aktivnosti koji se nazivaju solarnim ciklusima. Trajanje pojedinog ciklusa iznosi 11 godina (npr. Hathaway, 2015), odnosno punog magnetskog ciklusa 22 godine (Owens i sur., 2015). Tijekom svakog ciklusa, na Sunčevoj površini se uočava po jedan maksimum i jedan minimum učestalosti pojave pjega. Sunčeve pjege su lokalizirana tamnija područja na površini Sunca, hladnije zone koje nastaju uslijed smanjene konvekcije užarene mase, a uzrokovane su lokalnim anomalijama u magnetskom toku (Ruzmaikin, 2001). Trajanje pojedinih pjega iznosi od nekoliko dana do nekoliko mjeseci. U periodima kad su pjege učestalija pojava, Sunčeva aktivnost je pojačana (Li i sur., 2014) i tad Sunce u prostor zrači veću količinu električki nabijenih čestica velike energije (većinom  $\alpha$ -čestice i pojedinačni protoni). U mirnijim periodima, zračenje visokoenergetskih čestica u prostor je mnogo slabije.

Dolaskom solarnih čestica do ionosfere pojačava se ionizacija atoma i molekula zraka te dolazi do povećanja vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona. Prema tome, ukupan sadržaj elektrona se periodički mijenja i u fazi je sa solarnim ciklusima (Goodman, 2005; Toman i sur., 2018).

Sunčeva rotacija s periodom od oko 27 dana također utječe na promjene ionosferskih svojstava, budući da su na Suncu aktivna područja često nepravilno raspoređena pa količina solarnih energetske čestice koje dopijevaju do Zemlje varira ovisno o usmjerenosti pojedinih regija Sunca u prostoru (Laštovička, 2009).

Novija istraživanja (Sun i sur., 2019) su pokazala da i periodične promjene u klimatskom fenomenu El Nino/ENSO (engl. *El Niño Southern Oscillation*) također imaju učinak na ukupan sadržaj elektrona u atmosferi, stoga se s obzirom na njihovu periodičnost i ovi učinci se svrstavaju pod periodične promjene u TEC vrijednostima. Zanimljivo je primijetiti da su Leamon i sur. (2021) pokazali jaku korelaciju prijelaza solarnih ciklusa i tranzicije ENSO faze. Zbog toga nije potpuno jasno utječe li ENSO na svojstva ionosfere ili zapravo solarne faze generiraju promjene i u ionosferi i u ENSO dinamici, predstavljajući tako zajednički uzrok cikličkih varijacija, a da je pritom uzročno-posljedična veza ENSO faza i ukupnog sadržaja elektrona barem dijelom prividne naravi.

### **3.12 Neperiodične promjene ukupnog sadržaja elektrona**

Neperiodične promjene ukupnog sadržaja elektrona su većinom povezane s nepravilnim promjenama u Sunčevoj aktivnosti te utjecajem atmosferske dinamike na njezina električna svojstva. U ovu skupinu spadaju utjecaji tektonike i vulkanske aktivnosti na ionosferu.

Geomagnetske oluje nastaju kad na kraćoj vremenskoj skali znatna količina energije u obliku visokoenergetskih čestica sa Sunca dođe u interakciju sa Zemljinim magnetskim poljem (Lockwood i sur., 1999; Grebowsky i Aikin, 2009, Tsurutani i Gonzalez, 1993). Pojava geomagnetskih oluja korelira s jačim poremećajima u ukupnom sadržaju elektrona (npr. Afraimovich, 2000; 2001; 2013, Blagojević i sur., 2016). Do navedenih situacija dolazi većinom uslijed erupcija plazme i koronarnih izbačaja mase sa Sunca a one su znatno češće oko perioda maksimuma solarne aktivnosti (Howard, 2011, Cane, 2000, Barta i sur., 2019).

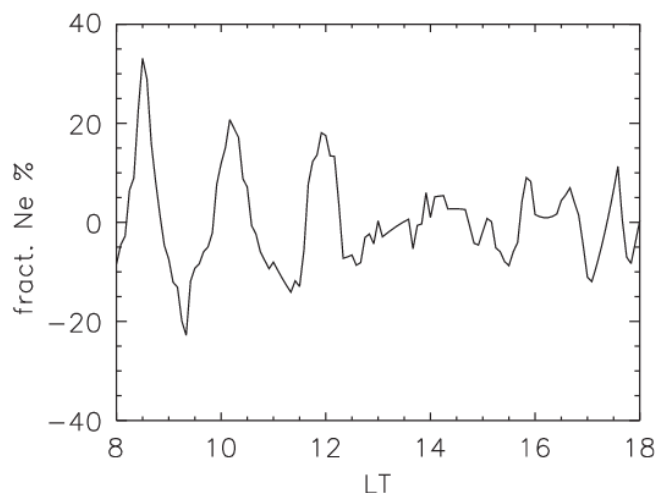


Dodatno pojačanje učinka solarnih oluja na ionizaciju atmosfere dolazi od činjenice da znatna anomalna količina energije sa Sunca sažima Zemljinu magnetosferu te visokoenergetske električki nabijene čestice neotklonjene dopijevaju na mnogo manju visinu iznad tla prije nego na njih počne otklanjajućim silama djelovati magnetsko polje Zemlje (Welling i sur., 2021).

Putujući ionosferski poremećaji (engl. *Travelling Ionospheric Disturbances* – TID) nastaju kao posljedica prostiranja energije ionosferskih težinskih valova (Hines, 1960; Nappo, 2013) do ionosfere. Akustički i težinski valovi u troposferi općenito nastaju turbulencijom pri prelasku zračnih strujanja preko orografske prepreke, konvektivnim procesima, tornadima, vulkanskim erupcijama, potresima, tsunamijima itd. (npr. Grigoriev, 1999, Godin i sur., 2020). Težinski valovi prostiru svoju energiju u vertikalnom i horizontalnom smjeru, uslijed čega uzrokuju pojavu putujućih ionosferskih poremećaja.

Vincent (2009) pokazuje da većina valova zamijećena u donjoj stratosferi prenosi energiju u srednju i višu atmosferu. Sprega slojeva koja nastaje prijenosom energije težinskih valova prema višim slojevima u većoj mjeri definira opću cirkulaciju srednje i više atmosfere (npr. Nappo, 2013, Alexander, 2010). Pritom se najveći prijenos energije događa u područjima s izraženom orografijom, a navodi se također da se prijenos energije težinskih valova u periodima povećane Sunčeve aktivnosti primjećuje do većih visina.

Putujući ionosferski poremećaji manifestiraju se kao oscilirajuća promjena u ukupnom sadržaju elektrona. Primjer jedne takve oscilacije u količini elektrona u F2 sloju ionosfere prikazan je na slici 16. Ionosferska količina elektrona u sloju F2 je mjerena u Londonu, 1. siječnja 2000. Prikazan je rezultat obrade nakon primjene filtra koji uklanjaju periode dulje od 2 h. Na dijagramu je jasno vidljiva oscilacija u količini elektrona kao posljedica putujućih ionosferskih poremećaja, posebno u prvoj polovici prikazanog razdoblja.



*Slika 16: Oscilacija u količini elektrona u F2 sloju uslijed putujućih ionosferskih poremećaja*

*Izvor: MacDougall i sur. (2009)*

Pokazuje se da u pravilu periodi putujućih ionosferskih poremećaja iznose između 15 min i 2 h, a tipična vrijednost fazne brzine oko 200 m/s (MacDougall i sur., 2009, Waldock i Jones, 1986).

Osim orografski generiranih težinskih valova, uočeni su utjecaji još nekih meteoroloških fenomena u troposferi na ukupan sadržaj elektrona, poput tropskih ciklona (Vadas i Liu, 2009; Immel i sur., 2009; Laštovička, 2009) te planetarnih valova (Laštovička, 2009).

Od novijih radova, primjerice, Yu i Liu (2021) pokazuju degradaciju točnosti usluge preciznog određivanja položaja (PPP metoda, poglavlje 2.1.4.1) u blizini tropskog ciklona i za 460 % u odnosu na normalne meteorološke uvjete i također otkrivaju značajno povećanje vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona. Williams i sur. (2021) analiziraju anomalije ukupnog sadržaja elektrona povezane s aktivnošću tropskog ciklona te zaključuju da su upravo atmosferski težinski valovi vjerojatna mehanistička poveznica između tropskog ciklona i uočenih ionosferskih anomalija.

### 3.13 Ionosferski učinci na satelitske navigacijske signale

Gustoća elektrona u ionosferi je najvažniji parametar koji određuje ionosferski indeks loma radiovalova (Gordon, 1987). Slobodni električni naboj na stazi prostiranja satelitskog signala do prijamnika može uzrokovati kašnjenje signala za određivanje položaja za više od 100 ns i time stvoriti pogrešku u određivanju pseudoudaljenosti za više od 30 m (Klobuchar, 1988; 1995; Davies, 1990). Pritom za vremensko kašnjenje signala od 1 ns, potreban je ukupni sadržaj elektrona od 2,85 TECU, a taj iznos kašnjenja stvorit će pogrešku u izračunu pseudoudaljenosti od oko 0,3 m (Parkinson i Spilker, 1996).

Ionosfersko grupno kašnjenje signala i napredovanje faze vala nosioca može se prikazati izrazima (Klobuchar, 1983):

$$\Delta t_p = \frac{40,3}{c \cdot f^2} TEC \quad , \quad (37)$$

$$\Delta \Phi = \frac{1,34 \cdot 10^{-7}}{f} TEC \quad , \quad (38)$$

gdje je  $\Delta t_p$  kašnjenje signala,  $\Delta \Phi$  fazni pomak vala nosioca satelitskog signala,  $c$  brzina prostiranja EM valova u vakuumu,  $f$  frekvencija te  $TEC$  ukupni sadržaj elektrona. Osim grupnog kašnjenja signala i pomaka faze, ionosfera uzrokuje dodatne učinke na prostiranje signala poput malog iznosa Dopplerovog pomaka (Klobuchar, 1983):

$$\Delta f = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{1,34 \cdot 10^{-7}}{f} \frac{d}{dt} TEC \quad . \quad (39)$$

Nadalje, Faradayeva rotacija mijenja polarizacijsku ravninu radiovala, a dolazi i do pojave refrakcije prividnog kuta elevacije satelita te izobličenja pulsne forme vala (Klobuchar, 1983).

Prolaskom satelitskog signala kroz ionosferu, osim refrakcije EM vala i posljedičnog kašnjenja signala za pozicioniranje, na integritet satelitskog signala utječe i pojava ionosferske scintilacije (engl. *scintillation*) (Yeh i Liu 1982; Aarons 1982; Kintner i sur., 2007).

Kombinacija ionosferske elektrodinamike, difrakcije i raspršenja signala, Rayleigh–Taylor nestabilnosti plazme te termodinamičke sprege (Teunissen i Montenbruck, 2017), može stvoriti strukture nalik mjehurima nepravilne plazme reda veličine od nekoliko metara do više stotina kilometara (Abdu 2005; Kelley 2009; Schunk i Nagy 2009; Portillo i sur. 2008). Ovakve ionosferske nepravilnosti su često uzrokom značajnog slabljenja amplitude i faznih pomaka signala koji se prostiru kroz ta područja ionosfere. Takve pojave u degradaciji signala nazivamo amplitudnom i faznom scintilacijom. Posljedično dolazi do slabljenja kvalitete signala u prijarniku i otežanih uvjeta za točan izračun položaja. U ekstremnim uvjetima scintilacija signala može izazvati potpunu nemogućnost određivanja položaja GNSS prijarnikom (Wernik i sur., 2007; Kintner i sur., 2007; Salles i sur., 2021).

Jakost scintilacije ovisi o različitim faktorima, kao što su iznosi gradijenata električnog naboja, debljina slojeva nepravilnosti, frekvencija signala, Sunčeva i magnetska aktivnost, zenitni kut satelita, kut između smjera prostiranja signala i Zemljinog magnetskog polja itd. (Aarons 1982; Wernik i sur. 2007).

Indeks jakosti scintilacije ( $S_4$ ) može se prikazati kao (Teunissen i Montenbruck, 2017):

$$S_4 = \left( \frac{\langle SI^2 \rangle - \langle SI \rangle^2}{\langle SI \rangle^2} \right)^{1/2}, \quad (40)$$

gdje je  $SI$  jakost signala (engl. *Signal Intensity*), dok  $\langle \rangle$  označava srednju vrijednost u 1-minutnom intervalu.  $S_4$  vrijednosti mogu poprimiti iznos od 0 do 1, pri čemu vrijednosti oko 0,2 su slaba, oko 0,5 srednja, te  $> 0,7$  visoka jakost scintilacije.

### 3.14 Utjecaj ukupnog sadržaja elektrona na određivanje korisničkog položaja

Prolaskom satelitskih signala kroz disperzivni medij dolazi do pojave loma vala (15), mijenja se brzina prostiranja (13) te brzina vala nosioca i grupna brzina postaju različite (17).

Iz Fermatovog načela proizlazi da će kašnjenje signala sa satelita iznositi (Subirana i sur., 2013):

$$\Delta = \int_r^s n dl - \int_r^s dl \quad , \quad (41)$$

gdje je  $l$  najkraća geometrijska udaljenost između satelita  $s$  i prijarnika  $r$ , dok  $n$  predstavlja indeks loma na putu signala.

Učinak ioniziranog sloja u uniformnom magnetskom polju na prostiranje EM vala može se prikazati indeksom loma kao (Brčić, 2015; Walker, 1961; Davies, 1965; 1990; Parkinson i Spilker, 1996; Teunissen i Montenbruck, 2017):

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \pm \left[ \frac{Y_T^4}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2 \right]^{1/2}} \quad . \quad (42)$$

Taj izraz se naziva Appleton-Hartreeova jednadžba i pritom vrijedi:

$$X = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_e \omega^2} = \frac{f_N^2}{f^2} \quad , \quad Y_L = \frac{eB_L}{m_e \omega} = \frac{f_H \cos \Theta_m}{f} \quad , \quad Y_T = \frac{eB_T}{m_e \omega} = \frac{f_H \sin \Theta_m}{f} \quad , \quad (43)$$

$$Z = \frac{v}{\omega}$$

gdje su:

$f$  frekvencija radiovala nosioca (Hz),  $e$  naboj elektrona ( $-1,602 \cdot 10^{-19}$  C),  $\epsilon$  dielektrična konstanta vakuuma ( $8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m),  $m_e$  masa elektrona ( $9,107 \cdot 10^{-31}$  kg),  $\Theta_m$  kut upada radiovala u odnosu na Zemljino magnetsko polje,  $v$

frekvencija sudara elektrona i neutralnih čestica ( $\sim 10^4$  Hz),  $f_H$  žirofrekvencija elektrona ( $\sim 1,4 \cdot 10^6$  Hz),  $f_N$  frekvencija plazme ili kritična frekvencija ( $\sim 20 \cdot 10^6$  Hz),  $\omega$  kutna valna frekvencija ( $2\pi f$ ).

Uvrštenjem gornjih uobičajenih vrijednosti, dobija se aproksimacija (Brčić, 2015; Davies, 1990; Parkinson i Spilker, 1996):

$$n = 1 - \frac{X}{2} , \quad (44)$$

pri čemu je

$$X = \frac{40,3}{f^2} \int N dh . \quad (45)$$

Ionosfersko kašnjenje iznosi (Brčić, 2015; Parkinson i Spilker, 1996; Davies, 1965):

$$\Delta t_i = \frac{1}{c} \int (1-n) dh , \quad (46)$$

pa proizlazi

$$\Delta t_i = \frac{40,3}{c \cdot f^2} \int N dh , \quad (47)$$

a kako vrijedi da je  $TEC = \int N dh$ , to zamjenom slijedi

$$\Delta t_i = \frac{40,3}{c \cdot f^2} TEC . \quad (48)$$

Množenjem gornjeg izraza s  $c$  dobija se povećanje izmjerene pseudoudaljenosti:

$$\Delta \rho = \frac{40,3}{f^2} TEC . \quad (49)$$

Iz izraza proizlazi da je ionosfersko kašnjenje proporcionalno ukupnom sadržaju elektrona na putu satelitskog signala, te obrnuto proporcionalno kvadratu frekvencije vala nosioca satelitskog signala za određivanje položaja (Klobuchar, 1987; 1988; Parkinson i Spilker, 1996).

### **3.15 Ispravljanje ionosferskog kašnjenja modeliranjem ionosfere**

Pri korištenju jednofrekvencijskog određivanja položaja, neispravljeni učinci ionosferskog kašnjenja mogu rezultirati pogreškama u izračunu pseudoudaljenosti za više od 30 metara (Klobuchar, 1988; Klobuchar, 1995). Time i odstupanje položaja postaje značajno i za mnoge primjene neprihvatljivo veliko. Primjeri gdje bi takve pogreške predstavljale neprihvatljivo nisku točnost poznavanja položaja uključuju i određene aspekte pomorske navigacije gdje se zahtijeva veća preciznost određivanja položaja. U te primjere spadaju plovidba u neposrednoj blizini obale i drugih navigacijskih opasnosti, automatizirano vođenje broda, obavljanje radova na plovnim putovima itd. (GSA, 2018a). Iz tog proizlazi da je ispravljanje ionosferskih učinaka bitan dio procesa određivanja položaja jednofrekvencijskom metodom.

Ovisno o GNSS sustavu, postupak ispravljanja ionosferskih učinaka može se razlikovati. Temeljne su tri grupe konceptualnog pristupa ispravicima (Klobuchar, 1987; 1988; Kaplan i Hegarty, 2006; Teunissen i Montenbruck, 2017):

1. Izravno mjerenje ionosferskog kašnjenja;
2. Korištenje referentnih stanica i diferencijskih prijamnika;
3. Modeliranje ukupnog sadržaja elektrona.

Konceptualno ispravljanje ionosferskog kašnjenja u aktualnim GNSS sustavima je izvedeno kako slijedi.

GLONASS sustav se pri emisiji satelitskih signala temeljno koristi frekvencijskom raspodjelom za višestruki pristup pojasu (FDMA), pa shodno tome izostaje potreba za modeliranjem ionosferskih učinaka (Petrovski, 2014). Preostala tri sustava, GPS, BeiDou i Galileo koriste matematičke modele ionosfere za procjenu (modeliranje) ionosferskog kašnjenja i primjenu ispravke za isto (Parkinson i Spilker, 1996; Subirana i sur., 2013, Petrovski, 2014). GPS i BeiDou sustavi pritom koriste Klobucharov model ispravke ionosferskog kašnjenja (Klobuchar, 1975; 1987; Parkinson i Spilker, 1996), dok Galileo sustav prvenstveno koristi NeQuick-G model ispravki ionosferskog kašnjenja (Di Giovanni, i Radicella, 1990; Radicella, 2009).

Osim spomenutih modela ionosfere koji se koriste za ispravku ionosferskog kašnjenja signala u aktualnim GNSS sustavima, razvijeni su i drugi modeli ionosfere u cilju predviđanja ukupnog sadržaja elektrona, kao npr. NTCM model te IRI model (Teunissen i Montenbruck, 2017; Klobuchar, 1988), Bentov model ionosfere (iz kojeg je izveden Klobucharov model) (Bent i sur., 1972), te Penn State model (Klobuchar, 1988). U sljedećim poglavljima opisana su osnovna svojstva korištenih modela za ispravljanje ionosferskog kašnjenja u aktualnim GNSS sustavima.

### ***3.15.1 Klobucharov model***

Klobucharov model ispravki ionosferskog kašnjenja satelitskog signala modelira dnevni hod ukupnog sadržaja elektrona iznad korisnika. Koristi se kao ispravka učinaka ionosferskog kašnjenja signala, za korisnike jednofrekvencijskog određivanja položaja u GPS navigacijskom sustavu (Klobuchar, 1975; 1987; Parkinson i Spilker, 1996; Teunissen i Montenbruck, 2017). Osim GPS sustava, i BeiDou sustav također koristi Klobucharov model u modificiranom obliku (Teunissen i Montenbruck, 2017, Pongračić i sur., 2019; CSNO, 2018).

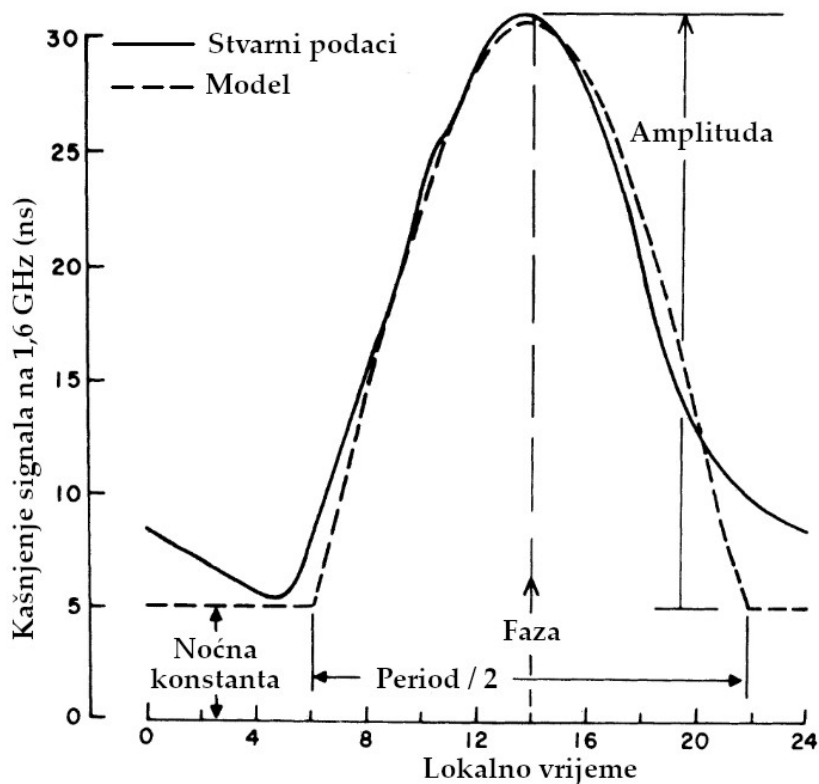


Klobucharov model različito predviđa ionosfersko kašnjenje u dvama dijelovima dana; tijekom noćnih sati ionosfersko kašnjenje se opisuje konstantnom vrijednošću, dok se tijekom dana modelira kosinusnom krivuljom (Klobuchar, 1987; Brčić, 2015, Pongračić i sur., 2019).

Klobucharov model se može predstaviti pomoću četiriju parametra (Klobuchar, 1987):

1. Konstantna vrijednost kašnjenja tijekom noći;
2. Dnevna amplituda polukosinusne funkcije;
3. Faza polukosinusne funkcije;
4. Period polukosinusne funkcije.

Na slici 17 je prikazan primjer stvarnih podataka ionosferskog kašnjenja satelitskog signala frekvencije 1,6 GHz i usporedba s modeliranim vrijednostima. Na ordinati dijagrama je kašnjenje signala u ns, a na apscisi lokalno vrijeme.



Slika 17: Usporedba stvarnih i modeliranih vrijednosti kašnjenja signala na primjeru

Izvor: Priredio autor prema Klobuchar (1987)

Na grafičkom prikazu su naznačeni parametri modela s primjerima vrijednosti; noćna konstantna vrijednost kašnjenja (5 ns), dnevna amplituda polukosinusne funkcije ( $30 - 5 = 25$  ns), faza polukosinusne funkcije (14 h) te poluperiod polukosinusne funkcije (18 h).

U Klobucharovom modelu, noćna konstantna vrijednost od 5 ns i faza polukosinusne funkcije (14 h po lokalnom vremenu) su fiksne vrijednosti. Preostala dva parametra, dnevna amplituda i period su funkcija geomagnetske širine te su u algoritmu modela predstavljeni polinomima trećeg stupnja. Koeficijenti polinoma se odašilju korisnicima sa satelita u navigacijskoj poruci. Koeficijenti se u sustavu ažuriraju najmanje svakih 10 dana, ili češće ako to zahtijevaju znatno promjenjive vrijednosti solarne aktivnosti (Klobuchar, 1987).

Matematički se Klobucharov algoritam može zapisati kao (Klobuchar, 1987; Parkinson i Spilker, 1996; Subirana i sur., 2013; Teunissen i Montenbruck, 2017):

$$t_n, \text{ ako } \left[ \frac{2\pi - (t - t_0)}{P} \right] \geq \frac{\pi}{2} \quad (\text{noć}), \quad (50)$$

$$t_n + A \cdot \cos \left[ \frac{2\pi - (t - t_0)}{P} \right] \quad (\text{dan}), \quad (51)$$

gdje je  $t_n$  noćna konstantna vrijednost ionosferskog kašnjenja signala (5 ns),  $A$  iznos amplitude ionosferskog kašnjenja,  $P$  period polukosinusne funkcije,  $t$  lokalno vrijeme korisnika,  $t_0$  konstantni fazni pomak (14 h po lokalnom vremenu korisnika, kao trenutak pojave vršne vrijednosti kašnjenja signala).

Parametri  $A$  i  $P$  su definirani koeficijentima  $\alpha_n$  i  $\beta_n$  (Klobuchar, 1987; Teunissen i Montenbruck, 2017):

$$A = \sum_{n=0}^3 \alpha_n \phi_n, \quad (52)$$

$$P = \sum_{n=0}^3 \beta_n \phi_n, \quad (53)$$

gdje je  $\phi_n$  geomagnetska širina korisnika. Pritom se koristi funkcija preslikavanja za proračun ionosferskog kašnjenja kad satelit nije u zenitu korisnika. Klobucharov model pretpostavlja da su svi elektroni koncentrirani u tankom sloju na visini 350 km iznad površine Zemlje (Klobuchar, 1987). Primjenom modela ispravki ionosferskog kašnjenja signala prema Klobucharu, eliminira se oko 50 % ionosferske pogreške u određivanju položaja jednofrekvencijskim C/A kodom (Feess i Stephens, 1987; Klobuchar, 1988). Klobuchar (1988) razmatra točnost modela i zaključuje da jednostavan model može eliminirati oko 50 % ionosferskog kašnjenja signala, dok bi za postizanje 70 – 80 % eliminacije kašnjenja trebalo koristiti mnogo složenije modele poput Bentovog ili IRI modela. S obzirom da kompleksnost modela raste eksponencijalno sa zahtjevom za njegovom

sposobnošću eliminacije ionosferskog kašnjenja signala, Klobuchar (1988) predlaže primjenu izravnih mjerenja ionosferskog učinka kašnjenja u primjenama gdje je potrebna veća točnost od one koju pruža Klobucharov model.

Na temelju originalnog Klobucharovog modela razvijene su različite unaprijeđene izvedenice. Ratnam (2018) poboljšava koeficijente modela i modificira noćnu vrijednost korekcije za indijsku regiju. Wang i sur. (2016) predstavljaju noćnu vrijednost kašnjenja funkcijom geomagnetske širine. Brčić (2015) predlaže regionalni model za područje jadranske regije utemeljen na uočenim nespecifičnim pravilnostima u dnevnom hodu ionosferskog kašnjenja signala. Predložen model je izrađen na temelju izmjerenih vrijednosti ionosferskog kašnjenja, a rezultati ispitivanja modela su pokazali da u zadanim uvjetima model pruža točnije ispravke kašnjenja od originalnog Klobucharovog modela. Pongračić i sur. (2019) razvijaju model temeljen na Klobucharovom modelu za srednje geomagnetske širine, u funkciji dana u godini i lokalnog vremena korisnika prilagođenog na lokano solarno vrijeme. Verifikacijom razvijenog modela pokazuju da poboljšanje u iznosu korijena srednje kvadratne pogreške u odnosu na Klobucharov model iznosi 36,24 %.

### ***3.15.2 NeQuick-G model***

Trodimenzionalni model ispravaka ionosferskog kašnjenja satelitskog signala NeQuick-G se koristi u navigacijskom sustavu Galileo za potrebe jednofrekvencijskog određivanja položaja. NeQuick-G je razvijen iz ITU-R NeQuick modela gustoće elektrona u ionosferi (ITU-R, 2013; Hochegger i sur., 2000) temeljenom na originalnoj formulaciji DGR prema Di Giovanni i Radicella (1990).

NeQuick-G modelom se predviđa gustoća elektrona u vertikalnom profilu ionosfere u funkciji položaja i vremena (Radicella, 2009). Pritom su definirani ulazni parametri modela:

1. Procijenjeni položaj korisnika;

2. UTC vrijeme;
3. Solarni fluks.

Temeljem ulaznih parametara definiran je pokazatelj efektivne razine ionizacije (Radicella, 2009; Subirana i sur., 2013):

$$Az = a_0 + a_1\mu + a_2\mu^2 \quad . \quad (54)$$

$Az$  je pokazatelj efektivne razine ionizacije i u funkciji je procijenjenog položaja korisnika te solarnog fluksa.  $\mu$  je tzv. modificirana dipolna širina korisnika (engl. *modified dip latitude*) temeljena na geomagnetskoj širini i magnetskoj inklinaciji.  $a_0$ ,  $a_1$  i  $a_2$  su proračunani ionosferski koeficijenti koji se prijamnicima odašilju u navigacijskoj poruci sa satelita te su ažurirani najmanje jednom dnevno. Pritom vrijedi:

$$\mu = \arctg\left(\frac{I}{\sqrt{\cos \phi}}\right) \quad , \quad (55)$$

gdje je  $\phi$  procijenjena geomagnetska širina korisnika, dok je  $I$  magnetska inklinacija koja na magnetskom ekvatoru iznosi  $0^\circ$ , a na magnetskim polovima  $I = 90^\circ$ .

### 3.16 Metode određivanja ukupnog sadržaja elektrona u ionosferi

Ionosonde i radarski sustavi na HF pojasu radiospektra su uređaji kojima se već duže od 80 godina mjere svojstva ionosfere s površine Zemlje. U novije vrijeme sve intenzivnije se koriste satelitski temeljene metode određivanja gustoće električnog naboja u ionosferi.

Mjerenja sa Zemlje pomoću ionosondne tehnike svoje začetke pronalaze u prvoj polovici 20. stoljeća. Breit i Tuve (1925) predlažu metodu za procjenu visine vodljivog atmosferskog sloja. Metoda se sastojala od emitiranja radiovalova visoke frekvencije prema ionosferi i detekciji reflektiranog signala. Njihova metoda je predstavljala prvo mjerenje ionosferskih svojstava na principu radara.

Mjerenje gustoće elektrona u ionosferi je prema toj metodi temeljeno na principu da se vertikalno šireći EM val reflektira natrag na onoj visini gdje za frekvenciju vala, indeks loma postaje jednak nuli.

Prema teoriji prostiranja EM valova u ioniziranom mediju (Davies, 1965) indeks loma se može pisati kao:

$$n^2 = 1 - \left(\frac{f_N}{f}\right)^2, \quad (56)$$

pri čemu je  $f$  frekvencija upadnog EM vala, a  $f_N$  frekvencija plazme definirana izrazom:

$$f_N = \sqrt{\frac{Nq^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m}}, \quad (57)$$

gdje je  $N$  gustoća elektrona,  $q$  naboj elektrona,  $m$  masa elektrona, te  $\epsilon_0$  dielektrična konstanta u vakuumu.

Iz izraza (56) je vidljivo da će vrijednost indeksa loma  $n$  postati jednaka nuli onda kad frekvencija  $f$  postane jednaka frekvenciji plazme  $f_N$ . Gustoća elektrona  $N$  u izrazu (57) nalazi se u brojniku, pa će stoga s porastom gustoće elektrona rasti granična frekvencija pri kojoj će doći do refleksije radiovala natrag prema tlu.

Ionosferske sonde su uređaji za određivanje gustoće elektrona u ionosferi s tla pomoću radiovalova. Sastoje se od predajnika i antene, sintetizatora frekvencije, prijarnika i antene, analizatora i kontrolnog sustava (Zolesi i Cander, 2013). Ionosferske sonde rade na iznad opisanom teorijskom princpu, pri čemu se s površine Zemlje vertikalno uvis odašilje radiosignal promjenjive frekvencije u

rasponu 0,5 – 25 MHz (Huang i Reinisch, 2001; Hunsucker i Hargreaves, 2003; Zolesi i Cander, 2013). Radiosignal frekvencije  $f$  se odbija od ionosfere na onoj visini gdje je gustoća elektrona takva da vrijedi  $f_N = f$ . Primanjem reflektiranih radiovalova moguće je za svaki sloj po visini odrediti graničnu frekvenciju koja se više ne vraća u prijamnik ionosferske sonde i tako odrediti gustoću elektrona po slojevima (Hunsucker i Hargreaves, 2003; Zolesi i Cander, 2013).

Osim vertikalnog sondiranja moguće je i nakošeno sondiranje pri čemu se predajnik i prijamnik ionosonde nalaze na različitim zemljopisnim lokacijama na površini Zemlje. Udaljenost predajnika i prijarnika je u pravilu značajna i može iznositi više tisuća kilometara. Sondiranje ionosfere osim s površine Zemlje moguće je i satelitskim radiosondama iz LEO orbita (Zolesi i Cander, 2013; Bernhardt i Siefring, 2006).

Ispitivanje gustoće elektrona u ionosferi moguće je, osim ionosferskim sondama i upotrebom koherentnih i nekoherentnih HF radara s raspršenim snopom. Ovi sustavi odašilju EM val znatno više frekvencije od maksimalne frekvencije plazme, a spektralna gustoća primljene jeke povezuje se s osobinama slojeva kao što su gustoća elektrona i temperatura plazme (Lilensten i sur., 2004; Davies; 1990; Belehaki i sur., 2017). Od poznatijih nekoherentnih radarskih postrojenja može se izdvojiti projekt EISCAT (engl. *European Incoherent SCATter*) na sjeveru Europe (Röttger i sur., 1995) te SuperDARN (engl. *Super Dual Auroral Radar Network*) koherentni radarski sustav (Chisham i sur., 2007).

Osnovna razlika između koherentnog i nekoherentnog radarskog sustava je princip raspršenja odaslanog impulsa. Nekoherentni radari detektiraju raspršenje od pojedinačnih elektrona, dok koherentni radari detektiraju raspršenje koje nastaje na gradijentima gustoće elektrona (Häggström, 2021). Električno polje koje nastaje emisijom radarskog impulsa uzokuje oscilacije elektrona u ionosferi, čime oni emitiraju signal gotovo identične frekvencije što je poznato kao Thomsonovo raspršenje (engl. *Thomson scattering*) (npr. Chen i sur., 1998). Jakost povratnog signala proporcionalna je gustoći elektrona. Ovaj princip mjerenja gustoće

elektrona koriste nekoherentni radarski sustavi. Za razliku od njih, koherentni sustavi se oslanjaju na Braggovo raspršenje koje nastaje na nepravilnim strukturama ionosferske plazme koje imaju dimenziju polovicu valne duljine radarskog impulsa (Ashcroft i Mermin, 1987).

Sljedeća metoda za mjerenje ukupnog sadržaja elektrona satelitom je GPS radiookultacija (Wickert i sur., 2001; Jakowski i sur., 2004; Melbourne, 2004; 2009). Za implementaciju ove tehnike potrebni su GNSS prijammnici na satelitima u niskoj orbiti. Pritom se Dopplerovim pomakom signala određuje iznos refrakcije koji se pojavio pri prolasku signala kroz ionosferu.

S obzirom da je kašnjenje signala disperzivne naravi (tj. funkcija je frekvencije), moguće ga je odrediti satelitskim signalima diferenciranjem kašnjenja na dvijema različitim frekvencijama (Garner i sur., 2008). Za ovu metodu koriste se altimetrijski sateliti u niskoj orbiti, koji inače radarskom tehnikom mjere razinu oceana (Fu i sur., 2004; Jee, 2004) te konačno GNSS mreža. Nakon što su ionosferski izvori pogrešaka u GNSS sustavu dugo vremena smatrani isključivo štetnom pojavom, u novije vrijeme njihovim iskorištavanjem u znanstvene svrhe oni postaju izvrstan alat za znanstvena istraživanja ionosfere i atmosferskog elektriciteta te druge znanstvenoistraživačke aktivnosti (Jin i sur., 2013).

GPS sustav trenutačno ima 31 aktivan satelit u 6 orbitalnih ravnina s inklinacijom  $55^\circ$ . S obzirom na to, svaki prijammnik na Zemlji s otvorenim pogledom prema nebu prima istovremeno signale s 8 do 10 satelita. Ophodni period satelita je oko 12 h te svaki satelit ostaje u vidnom polju prijammnika oko 8 h. Tipična učestalost slanja podataka je 33,3 MHz, što znači da će satelit mijenjati kut u odnosu na prijammnik oko  $0,167^\circ$  između dvaju slanja signala. Unutar 15 min, satelit će promijeniti kut za oko  $5^\circ$  u 30 odvojenih mjerenja, uz pretpostavku jednog mjerenja svakih 30 s. Usljed te relativno spore promjene, mjerenja ukupnog sadržaja elektrona pomoću prijammnika na tlu dobro detektiraju promjene u ionosferi u vremenu, ali slabo detektiraju varijacije u horizontalnom smjeru (Garner i sur., 2008).



Za razliku od nepomičnih prijamnika na tlu, sateliti u niskoj orbiti imaju kratke orbitalne periode (tipično manje od 2 h) te se GPS prijamnici koji se nalaze na njima pomiču za više od 3,6 °/min. Zbog toga će GPS mjerenja ukupnog sadržaja elektrona prijamnicima na satelitu u niskoj orbiti biti osjetljiva na horizontalne varijacije, većinom u meridionalnom smjeru, ali ne toliko na promjene u vremenu (Garner i sur., 2008).

Određivanje ukupnog sadržaja elektrona pomoću dvofrekvencijskih opažanja GPS sustavom, kao metoda korištena u disertaciji, detaljno je opisano u poglavlju 5.4.

### 3.17 Numeričke ionosferske mape

Prema Zhao i sur. (2021) postoji 7 operativnih centara (engl. *Ionospheric Associated Analysis Centers* – IAACs) koji izrađuju globalne ionosferske mape (engl. *Global Ionospheric Maps* – GIMs) koristeći različite tehnike (Roma-Dollase i sur., 2018). Globalne ionosferske mape se najčešće interpoliraju iz podataka dvofrekvencijskih mjerenja stotinama GNSS prijamnika i pokazuju vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona nad cijelom Zemljom (Zhao i sur., 2021). Pritom se razlikuju brze mape koje se objavljuju praktično u realnom vremenu, i finalne mape koje su točnije, ali kasne za realnim vremenom 2 – 4 tjedna (Hernández-Pajares i sur., 2009).

Europska svemirska agencija (ESA), Centar za utvrđivanje orbita (engl. *Center for Orbit Determination in Europe*, CODE) te *Canadian Geodetic Survey of Natural Resources Canada* (NRCan) izrađuju globalne ionosferske mape metodologijom sferne harmonične analize (engl. *Spherical Harmonics / MSLM*) (Feltens, 2007; Schaer, 1999; Ghoddousi-Fard, 2014). *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) koristi model trostruke ljuske (engl. *Three-shell Model*) (Mannucci i sur., 1998). Politehničko Sveučilište u Kataloniji (UPC) primjenjuje metodu tomografskog modela (engl. *Tomographic Model*) (Hernández-Pajares i sur., 1999). Kineska akademija znanosti (CAS) koristi metodu sferičnih harmonika i generalizirani trigonometrijski red (engl. *Spherical Harmonics and Generalized Trigonometric Series / SLM*) (Li i sur., 2015), a Sveučilište u Wuhanu (WHU) izrađuje globalne ionosferske mape

metodom sferičnih harmonika i najmanjih kvadrata ograničenih nejednakošću (engl. *Spherical Harmonics and Inequality-constrained Least Squares*, MSLM) (Zhang i sur., 2013).

Za raspodjelu podataka korisnicima, upotrebljava se standardizirani format IONEX (Schaer i sur., 1998).

## 4 Sprega litosfere, atmosfere i ionosfere

Gustoća atmosfere opada eksponencijalno porastom visine. S obzirom na zakon očuvanja kinetičke energije, svi vertikalno šireći akustički i težinski valovi u atmosferi proporcionalno će povećavati svoju amplitudu s porastom visine. Infrazvučni valovi dugih perioda ( $T > 10 - 20$  s) nisu prigušeni atmosferskom viskoznošću te se zato šire konstantnom kinetičkom energijom. Posljedično, njihova amplituda raste eksponencijalno, inverznom vrijednošću drugog korijena iz gustoće medija. Tako primjerice početni valovi relativno male amplitude, kreirani pomakom podloge uslijed potresa magnitude  $M = 7$ , povećat će svoju amplitudu za faktor  $10^5$  do  $10^6$  do dostizanja visine ionosfere. Uslijed prostiranja akustičkih valova tako povećane amplitude kroz ionosferu, dolazi do oscilacija ionosferskih elektrona brzinama nekoliko desetaka m/s što rezultira pomacima od nekoliko stotina metara. Iz tog proizlazi da će takve oscilacije zasigurno rezultirati mjerljivim anomalijama u ukupnom sadržaju elektrona. (Lognonné i sur., 2006).

Time je opisan primjer jednog od mnoštva dinamičkih procesa generiranih u litosferi koji imaju posljedične učinke na ionosferu. Osim detekcije ionosferskih anomalija nakon snažnih potresa, ionosfera reagira i na različite druge podražaje iz tla ili donje atmosfere. Vulkanske erupcije, tsunami, tropski cikloni stvaraju valove u atmosferi koji se prostiru uvis (Sorokin i sur., 2005). Također i težinski valovi u atmosferi koji nastaju uslijed strujanja zraka preko orografske prepreke šire se uvis i povećavaju amplitudu čime stvaraju ionosferske anomalije. Detekcija ionosferskih anomalija od ovakvih pobuda ovisi o amplitudi i valnoj duljini širećih valova kroz atmosferu. Veća amplituda i veća valna duljina omogućuju lakšu detekciju anomalija, za razliku od manjih amplituda i manjih valnih duljina, koje stvaraju anomalije mnogo sličnije uobičajenom stohastičkom šumu.

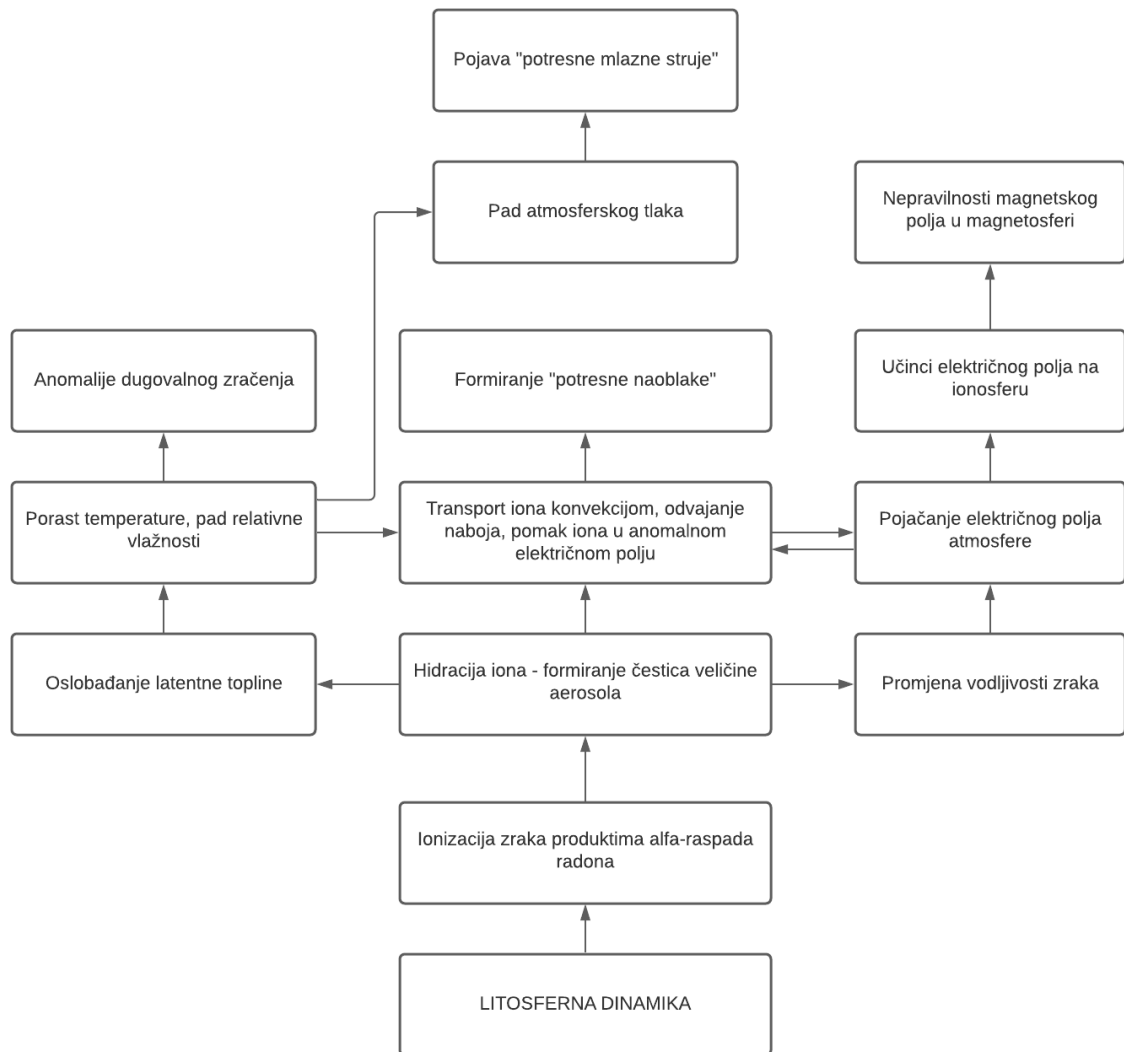
Promjene u električnim svojstvima donjih slojeva atmosfere se također šire uvis različitim mehanizmima. Konvektivni prijenos naboja, ili promjena vertikalnog električnog polja, a time i vertikalnih električnih struja globalnog električnog kruga neki su od primjera međudjelovanja donjih i viših slojeva atmosfere u domeni električnih pojava. Učinci ovih mehanizama na ionosferu očituju se u već spomenutim anomalijama ukupnog sadržaja elektrona, ali i promjenama jakosti električnog polja i struja, ULF/ELF EM oscilacija, ULF geomagnetskim pulsacijama itd. (Sorokin i sur., 2000; 2006).

Detaljniji uvid u interakciju procesa u tlu, na njegovoj površini te u atmosferi daju modeli sprege litosfere, atmosfere i ionosfere (engl. LAIC – *Lithosphere, Atmosphere and Ionosphere Coupling*). Početna istraživanja na ovome području sežu u 20. stoljeće. U početku, postavljaju se idejni temelji u kojima se prikupljaju neki od elemenata kao što su prirodna radioaktivnost, aerosoli i atmosferski elektricitet u nastojanju da se objasne varijacije uočene u ionosferi te ih se poveže sa seizmičkom aktivnošću (Pulinets, 1994). Prvi fizikalni koncept ove povezanosti opisuje penetraciju anomalnog električnog polja iz tla u ionosferu (Pulinets, 1998, 2000). Kasnije se tijekom usvajanja novih znanstvenih spoznaja taj model pretvara u multidisciplinarnu teoriju u kojoj su temeljne hipoteze povezane s ionizacijom zraka utjecajem pojačane emanacije Rn iz tla u atmosferu pod utjecajem tlaka u tlu uzrokovanog litosfernim silama i pomacima u tlu.

Danas, LAIC koncept predstavlja snažnu hipotezu koja tvrdi da je primarni proces EM poremećaja povezanih sa seizmičkim procesima i vulkanima, ionizacija zraka uzrokovana pojačanom emanacijom plinova iz tla (Rn, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, ...) u blizini tektonskih rasjeda, vulkanskih kratera i drugih pukotina u tlu (Surkov, 2015). Pojačana ionizacija donjih slojeva zraka dovodi do povećanja njegove električne vodljivosti. Uslijed ovih ionizacijskih i povezanih EM procesa u zraku, opažaju se različite anomalije: porast temperature zraka, promjene u atmosferskom tlaku, anomalije dugovalnog zračenja, preraspodjela električnog naboja u atmosferi, pojava anomalnih električnih polja te uslijed promjena u globalnom električnom

krugu i posljedične promjene u ionosferi (Krankowski i sur., 2018). Ionosferske anomalije uključuju promjenu električnog polja, promjene koncentracije iona i elektrona te vrijednosti ionosferskog potencijala, varijacije u temperaturi plazme te pojavu EM zračenja i akustičkih težinskih valova (Parrot i sur., 2021; Harrison i sur., 2010). Uključivanjem učinaka magnetosfere u razmatranje sprege, modeli postaju LAIMC (engl. *Litosphere-Atmosphere-Ionosphere-Magnetosphere Coupling*) (Pulinets i sur., 2018b).

Posljedice pojačane ionizacije donjih slojeva zraka uslijed emanacije veće količine  $R_n$  uzrokovane litosfernom dinamikom, prema Pulinetsu imaju cijeli niz manifestacija u atmosferi i ionosferi. Osim već navedenih učinaka, u literaturi su obrađene i pojave poput formiranja "potresne naoblake" uslijed visoke koncentracije hidratiranih iona kao kondenzacijskih jezgri (Pulinets i sur., 2009), promjene atmosferskog tlaka uslijed zagrijavanja zraka oslobađanjem latentne topline (Pulinets i Ouzounov, 2011) te posljedične promjene strujanja u višoj troposferi – pojava mlazne struje iznad tektonskih rasjeda (Wu, 2014). Shematski prikaz koncepta LAIC modela i međudjelovanja pojedinih uzročno-posljedičnih veza u sustavu prikazan je na slici 18.



Slika 18: Koncept LAIC modela

Izvor: Priredio autor prema Pulinets i Ouzounov (2011)

Tijekom posljednjih godina objavljen je veći broj radova koji podržavaju izneseni koncept LAIC modela (npr. Pulinets i Ouzounov, 2011; Pulinets i sur., 2015; Pulinets i sur., 2018b; Pulinets, 2012; Pulinets i Davidenko, 2014). Osim toga, postoje i drugačiji LAIC modeli koji se ne priklanjaju navedenom konceptu (Pulinets i sur., 2018b). Primjerice, Freundov model koji se temelji na

laboratorijskim ispitivanjima stijena pod naprezanjem. Ova teorija postavlja hipotezu pojave pozitivnog električnog naboja na površini stijena pri pojavi jakih sila smicanja u pripremnoj fazi potresa. Posljedično, pozitivan električni naboj na tlu stvara inverzno električno polje u odnosu na uobičajen smjer. Ipak, prema eksperimentalnim mjerenjima jakosti električnog polja (Liu i Chao, 2017), ovaj model daje najmanje jedan red veličine prejako električno polje te se čini da je model koji se temelji na emanaciji Rn i drugih plinova bliži stvarnosti, barem prema slaganju s eksperimentalnim podacima.

Istraživanja sprege litosfere, atmosfere i ionosfere jedno je od područja znanosti koje je trenutačno još u svojim začecima i tek se manji broj znanstvenika bavi njime. Objavljena literatura na tu temu pokazuje da se znatan broj anomalija u ionosferi može detektirati u vremenu prije nastanka potresa (Pulinets i Boyarchuk, 2005). Prema tome, naponi na izučavanju ovih međudjelovanja u konačnici bi mogli dovesti do izrade metoda za predviđanje seizmičkih procesa i vulkanskih erupcija u budućnosti. Ako se pokaže daljnji napredak na ovome području znanosti, sustavi za automatsko praćenje ionosferskih poremećaja bi mogli predstavljati važnu kariku u lancu metoda za predviđanje lokacije i vremena budućih seizmičkih aktivnosti.

## **4.1 Utjecaj potresa na ukupan sadržaj elektrona**

Prema LAIC konceptu, dinamika litosfere se odražava na električna svojstva atmosfere čime je za očekivati i promjene u ukupnom sadržaju elektrona. Doista, literatura posvećena tom fenomenu pokazuje dosta jasne anomalije sadržaja elektrona povezane s aktivacijama rasjeda, preparacijom potresa i samim oslobađanjem kinetičke energije pri pojavi potresa. Tako se generalno može zamijetiti više vrsta ionosferskih anomalija povezanih sa seizmičkom aktivnošću u tlu.

Prva grupa anomalija se javlja prilikom pripremne faze potresa i prema LAIC modelu dolazi od pojačane ionizacije zraka uslijed izraženije emanacije  $R_n$  iz tla. Druga grupa anomalija se javlja izravno nakon potresa, uslijed prostiranja akustičkih valova do ionosfere koji su nastali prijenosom kinetičke energije pomicanja tla na zrak. Kinetička energija potresa se prenosi površinom od epicentra Rayleighovim valovima u tlu (npr. Rolland i sur., 2011) koji imaju brzinu prostiranja 3 – 4 km/s. Ovi valovi dio energije predaju najnižem sloju zraka. Poremećaj se zatim nastavlja prostirati uvis, te se posljedično mogu detektirati ionosferski valovi u TEC anomalijama s periodom oko 4 min, najčešće oko 10 min nakon samog potresa (vrijeme potrebno za prostiranje valova kroz zrak do ionosfere; Hao i sur., 2021; Lognonné i sur., 2006). Treća grupa poremećaja atmosfere nastaje uslijed težinskih valova uzrokovanih tsunamijima na moru, kao posljedica seizmičke aktivnosti na dnu oceana (Occhipinti i sur., 2013; Shrivastava i sur., 2021).

Analiza pretpotresnih i postpotresnih anomalija ionosfere moguća je korištenjem zemaljskih ili satelitskih mjerenja (npr. Afraimovich i sur., 2010; Davidenko i Pulinets, 2019; Hayakawa i Molchanov, 2002; Kiyani i sur., 2020). Prema Dobrovolski (1979), povezuje se približan radijus područja oko epicentra potresa s magnitudom prema izrazu:

$$R = 10^{0,43 M} \text{ km} , \quad (58)$$

a unutar kojega je moguće uočiti različite indikatore koji su posljedica fizikalnih procesa pripreme potresa. Oznaka  $M$  u (58) označava magnitudu potresa. Veći broj istraživanja potvrđuje i pojavu anomalija ukupnog sadržaja elektrona tijekom pripremne faze potresa i nakon potresa unutar tog radijusa.

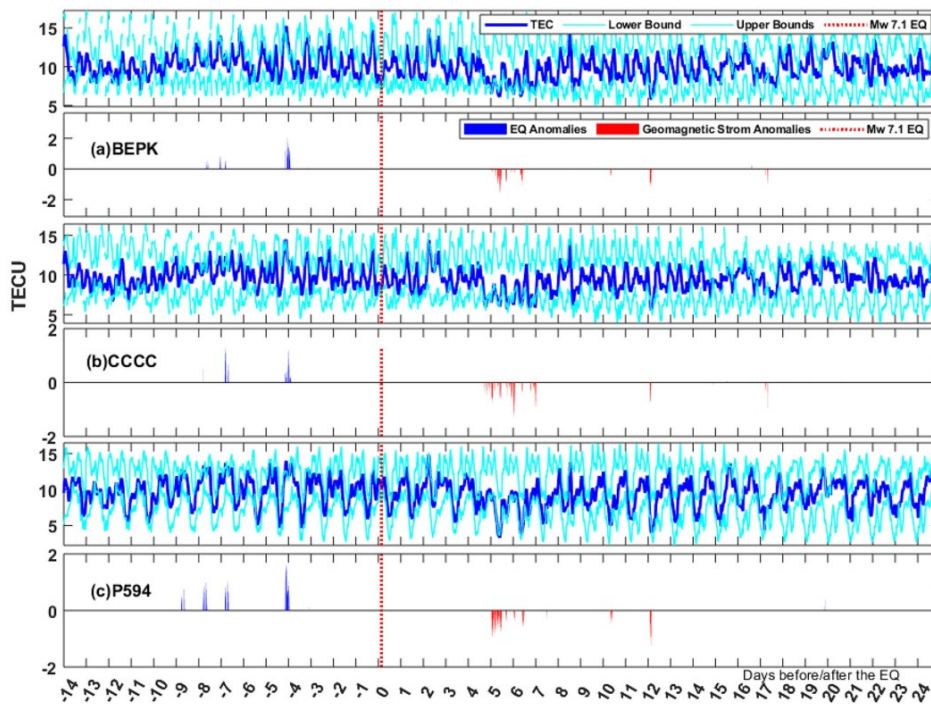


## 4.2 Upotreba GNSS sustava u istraživanjima seizmički generiranih ionosferskih anomalija

U znanstvenoj literaturi bilježi se široka upotreba GNSS sustava za evaluaciju ionosferskih svojstava (npr. Marchetti i sur., 2020; Shah i Jin, 2015; Shah i sur., 2020; Tariq i sur., 2019; Pongračić i sur., 2017, Daneshvar i Freund, 2017; De Santis i sur., 2019; Liu i sur., 2017). GNSS sustavi se mogu koristiti neizravno preko globalnih ionosferskih mapa, ali i izravno dvofrekvencijskom metodom određivanja ukupnog sadržaja elektrona nad nekom od referentnih GNSS stanica.

Spomenut će se neka od novijih istraživanja u kojima su se ionosferske anomalije ukupnog sadržaja elektrona dovele u vezu sa seizmičkim događajima. Primjerice, Parrot i sur. (2021) koriste globalne ionosferske mape za evaluaciju ionosferske gustoće te identificiraju anomalije prije potresa ( $M = 8,6$ ,  $M = 8,5$  i  $M = 7,9$ ) te ih objašnjavaju LAIC konceptom. Oikonomou i sur. (2020) detektiraju ionosferske anomalije različitih trajanja par sati do par dana prije seizmičkih događaja za tri potresa u Meksiku ( $6,6 \leq M \leq 8,2$ ). Sunardi i sur. (2018) su detektirali TEC anomalije na dan potresa, u dva od tri analizirana potresa ( $M = 6,1$  do  $6,2$ ) koristeći globalne ionosferske mape.

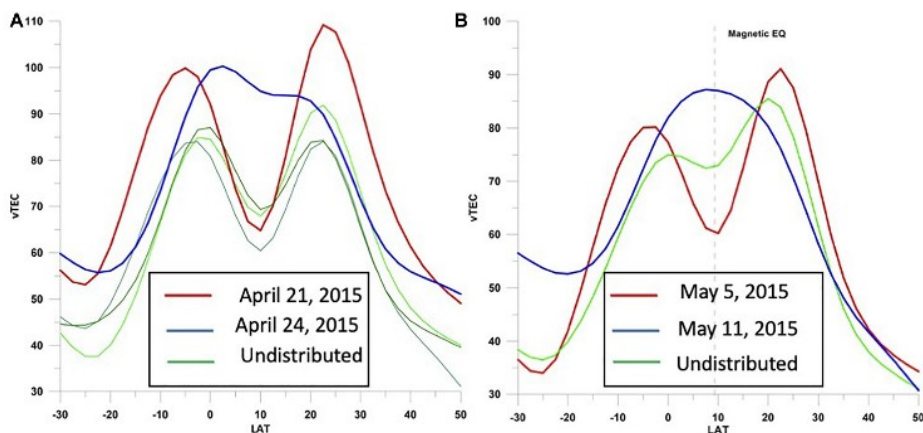
Mehdi i sur. (2021), analiziraju TEC oko potresa  $M = 7,1$  u Kaliforniji (srpanj 2019.) pomoću GNSS sustava i pronalaze ionosferske anomalije u periodu od 5 do 10 dana prije glavnog udara te varijacije TEC uzrokovane geomagnetskom olujom ( $Kp > 3$ ) nakon potresa. Na slici 19 prikazane su uočene anomalije u ukupnom sadržaju elektrona detektirane GNSS stanicama (BEPK, CCCC, P594) tijekom pripremne faze  $M = 7,1$  potresa (plavi stupići) te uslijed geomagnetske oluje iza potresa (crveni stupići) (Mehdi i sur., 2021).



Slika 19: TEC anomalije tijekom pripremne faze potresa  $M=7.1$

Izvor: Mehdi i sur. (2021)

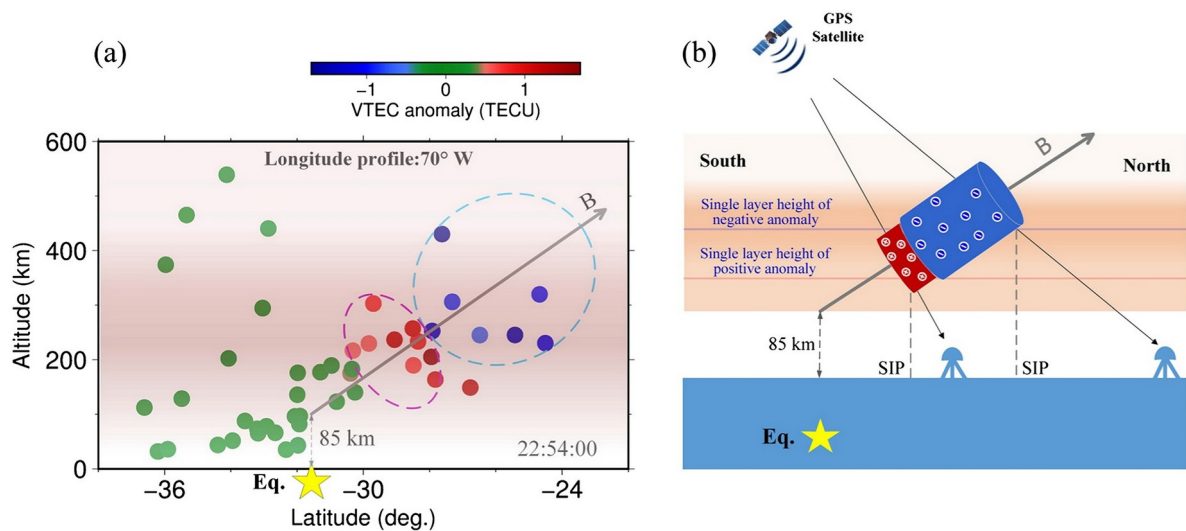
Ouzounov i sur. (2021) analiziraju ukupan sadržaj elektrona GNSS prijammnicima u regiji Gorkha-Nepal pri potresima  $M = 7,8$ ; 25. 4. 2015. i  $M = 7,3$ ; 12. 5. 2015. te pronalaze izražene anomalije tijekom triju dana prije oba potresa. Rezultati analize su prikazani na slici 20.



Slika 20: Anomalije u ukupnom sadržaju elektrona prije potresa magnituda 7,8 i 7,3  
 Izvor: Ouzounov i sur. (2021)

Shah i sur. (2020) pokazuju na opsežnoj statističkoj analizi 1182 potresa magnituda  $M > 5,0$  između 1998. i 2019., da se ionosferske anomalije ukupnog sadržaja elektrona detektirane GNSS TEC opservacijama, javljaju većinom unutar 5 dana prije i nakon glavnog udara potresa. Cornely (2016) analizira povećanje pa zatim naglo smanjenje ukupnog sadržaja elektrona za otprilike 30 TECU unutar 15 min, te fluktuacije oko 50 TECU unutar 45 min, na dan potresa.

He i Heki (2016) detektiraju pojavu pozitivnih i negativnih TEC anomalija u vremenu oko 20 – 40 min prije potresa, koristeći GPS mrežu za tri potresa magnituda  $M > 8.0$  u Čileu. Pozitivne anomalije su detektirane sjeverno od epicentara na visinama 150 – 250 km, dok su negativne anomalije locirane još dalje od epicentra prema sjeveru i na većoj visini (200 – 500 km). Takav prostorni raspored epicentra te pozitivne i negativne anomalije TEC je u skladu s teorijom LAIC modela koja predviđa poravnanje linije centara anomalija s geomagnetskim poljem, pri čemu je uzrok pojava anomalija pozitivan električni naboj pri tlu (Kuo i sur., 2014). Rezultati uz shematski prikaz prostornog rasporeda anomalija prikazani su na slici 21.



Slika 21: Prostorni raspored TEC anomalija prije potresa

Izvor: He i Heki (2016)

Pritom lijevi dio slike (a) prikazuje longitudinalni profil TEC anomalija na  $70^\circ\text{W}$  prije potresa (crvene točke = pozitivna TEC anomalija, plave točke = negativna TEC anomalija). Desni dio slike (b) donosi shematski prikaz raspodjele pozitivnih i negativnih anomalija TEC. Smjer magnetskog polja prikazan je vektorom B.

Izučavanje ionosferskih anomalija koje se pripisuju sprezi litosferne dinamike pretpotresnih aktivnosti i elektricitetu atmosfere, u prvom je redu motivirano traženjem odgovora na pitanja o mogućnostima kratkoročnog predviđanja potresa (Pulinets i sur., 2018a). Znanost na tom polju još ne daje jasne odgovore, a tome svjedoče i oprečni radovi u kojima autori tvrde da takve ionosferske anomalije ne predstavljaju predznake potresa. Na primjer, Eisenbeis i Occhipinti (2021) kritiziraju radove koji pokazuju pretpotresno povećanje ukupnog sadržaja elektrona, te uočene anomalije pripisuju subjektivističkom analiziranju.

Osim učinaka na ukupan sadržaj elektrona uslijed povećanih vrijednosti stope emanacije  $R_n$  u uvjetima pripreme faze potresa te prostiranjem akustičkih valova do ionosfere kao posljedice oslobađanja mehaničke energije u tlu tijekom samog potresa, dio autora je analizirao i učinke seizmičke aktivnosti na ionosferske anomalije kao posljedicu prostiranja tsunamija površinom oceana nakon potresa

(Shrivastava, Maurya i Gonzalez, 2021; Galvan i sur., 2011). Occhipinti i sur. (2011) modeliraju težinske valove u atmosferi nastale uslijed tsunamija te zaključuju da je praćenjem atmosferskih i ionosferskih poremećaja moguće detektirati i pojavu tsunamija. Budući da se valovi u atmosferi šire većom brzinom nego sam tsunami, izvjesna je detekcija anomalija u ionosferi prije nego tsunami dođe do obale. Na temelju triju slučajeva pojave tsunamija nakon potresa ( $M = 7,8 - 9,1$ ), Rakoto i sur. (2018) modeliranjem procjenjuju visinu vala tsunamija temeljem podataka iz GPS mreže. Hébert i sur. (2020) zaključuju da je korištenje GNSS mreže za praćenje varijacija ukupnog sadržaja elektrona obećavajuća metoda za detektiranje pojave tsunamija i njegovog napredovanja površinom oceana. GNSS mreža se osim za analizu ukupnog sadržaja elektrona, u seizmici intenzivno koristi i za mjerenje pomaka tla. Ravanelli i sur. (2021) kombiniraju oba pristupa u cilju kreiranja sustava za upozorenje na pojavu tsunamija.

### **4.3 Dosadašnja istraživanja učinaka vulkanske aktivnosti na atmosferski elektricitet i ionosferu**

Broj objavljenih znanstvenih radova na temu utjecaja potresa na atmosferski elektricitet i ionosferske anomalije je značajno veći nego broj radova koji se odnose na povezanost vulkana i atmosferskog elektriciteta te ionosferskih anomalija. Veća pozornost izučavanju sprege potresa s ionosferom, posljedica je napora za razvijanje sustava predviđanja potresa za koje postoji očekivanje da bi se dijelom mogli temeljiti na praćenju i analizi ionosferskih pokazatelja kao pretpotresnih predznaka (Pulinets i Boyarchuk, 2005; Pulinets i Davidenko, 2014; Pulinets i sur., 2018a).

Općenito, dosadašnja istraživanja utjecaja vulkanskih erupcija na atmosferski elektricitet i ionosferu se orijentiraju većinom na anomalije u ukupnom sadržaju elektrona koje se pripisuju težinskim i akustičkim valovima nastalim širenjem od vulkana prema ionosferi. Pri dostizanju visine ionosfere dolazi do značajnih valnih

oscilacija u položaju elektrona u prostoru što se u pravilu može detektirati koristeći mjerenja pomoću GNSS mreže, satelitskih mjerenja količine iona i drugih visokoosjetljivih metoda za određivanje ionosferskog elektriciteta.

Tramutoli i sur. (2019) analiziraju anomalije u ionosferi i povezuju ih s aktivnošću Etne u razdoblju pred kraj 2006. godine, koristeći podatke satelitske mreže DEMETER te pronalaze povećanje gustoće iona, posebno pozitivnih iona kisika u području iznad Etne. Istu satelitsku mrežu koristili su Zlotnicki i sur. (2010; 2013) koji su pronašli 269 anomalija u atmosferi povezanih s 89 erupcija. Li i sur. (2016) također pronalaze anomalije u ukupnom sadržaju elektrona u ionosferi i uspijevaju ih uočiti u 67 % analiziranih erupcija. Od tog broja, 80 % anomalija detektiraju 6 do 17 dana prije erupcije. Cahyadi i sur. (2020) GNSS opservacijama detektiraju ionosferske kvaziperiodične oscilacije ukupnog sadržaja elektrona, frekvencije 4 mHz. Slične rezonantne oscilacije ukupnog sadržaja elektrona, frekvencija 4,7, 4,8 i 6,7 mHz, detektiraju i Nakashima i sur. (2016).

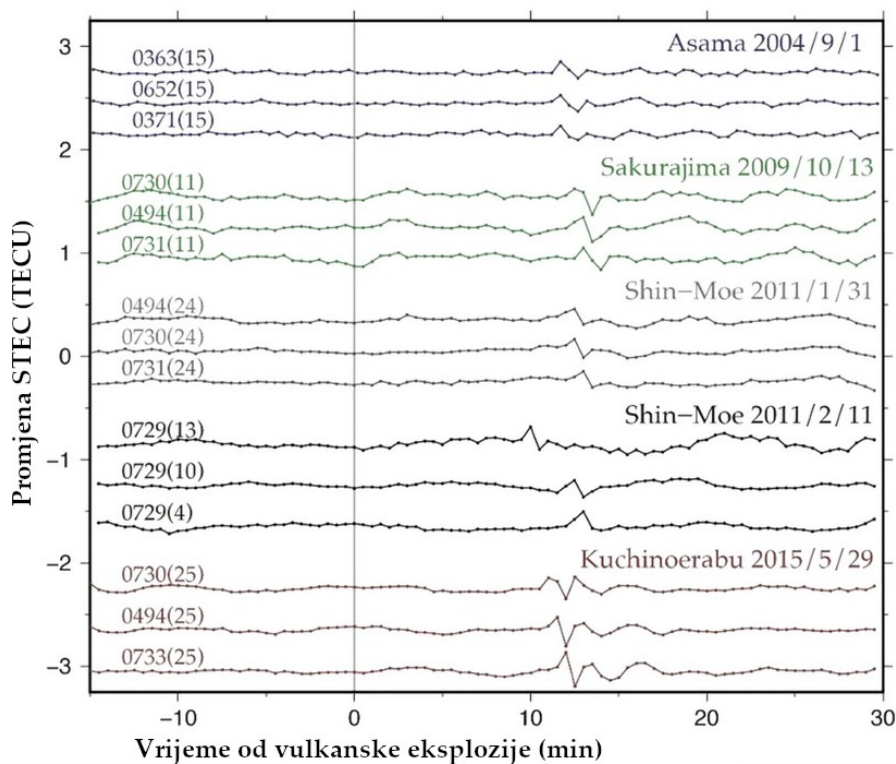
Shults i sur. (2016) analiziraju promjene ukupnog sadržaja elektrona u dvama slučajima erupcije vulkana Calbuco i detektiraju varijacije amplitude 0,45 TECU za prvu i 0,16 TECU za drugu erupciju te da su amplitude povezane s intenzitetom erupcija. Pritom, detektirane anomalije pripisuju prijenosu energije akustičkim valovima do ionosfere. Konačno, pokazuju da je moguće približno procijeniti geografski položaj eruptirajućeg vulkana koristeći 30-sekundne ionosferske podatke iz GPS mreže.

Pandara i sur. (2021) analiziraju ionosferske poremećaje u ukupnom sadržaju elektrona, uzrokovane erupcijom vulkana Lokon koristeći GPS mrežu. U rezultatima pokazuju da se anomalija u ukupnom sadržaju elektrona pojavila tri dana prije erupcije vulkana i učinak pripisuju pojačanoj emanaciji Rn potaknutoj nadirućom magmom, te zaključuju da je povećana koncentracija Rn u zraku uzrokom porasta ionizacije i vodljivosti zraka. Također, u periodu kratko nakon erupcije detektirane su nove anomalije koje se objašnjavaju prostiranjem težinskih i akustičkih valova uvis koji su posljedica izravnih eruptivnih procesa vulkana.



Mehmood i sur. (2021) promatraju učinke islandskog vulkana Eyjafjallajökull tijekom erupcije u 2010. na GPS sustav iznad regije Jadranskog mora. Istraživanje se usredotočilo na učinke čestica vulkanskog pepela. Rezultati pokazuju povećanje pogreške položaja određenog jednofrekvencijskim GPS prijamnicima, kao i povećanje vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona u regiji. Autori te rezultate dovode u vezu s prijenosom vulkanskog pepela prema regiji Jadranskog mora.

Cahyadi i sur. (2021) pokazuju različite obrasce ionosferskih anomalija ovisno o karakteru vulkanske aktivnosti. Pri dugotrajnim erupcijama ionosferske anomalije ukupnog sadržaja elektrona imaju općenito dugi i blagi oscilatorni obrazac, dok se pri vulkanskim eksplozijama primjećuju kratke i oštre anomalije ukupnog sadržaja elektrona. Na slici 22 su prikazane oscilacije u STEC vrijednostima izmjerjenima podacima GNSS sustava nakon 5 analiziranih vulkanskih eksplozija.



Slika 22: Promjena STEC vrijednosti nakon vulkanskih eksplozija

Izvor: Priredio autor prema Cahyadi i sur. (2021)

Iz slike je vidljivo da do kratkih i oštih oscilacija ukupnog sadržaja elektrona dolazi oko 12 min nakon eksplozije, što je uobičajeno vrijeme potrebno da se akustički val proširi od vulkana do ionosfere.

Dosadašnja istraživanja sprege vulkanske aktivnosti i ionosferskih učinaka većinom se mogu sažeti na tri temeljna zapažanja:

1. Uočavaju se ionosferski poremećaji u danima koji prethode vulkanskim erupcijama i oni se objašnjavaju pojačanom emanacijom  $R_n$  iz tla kao posljedicom dinamičkih procesa gibanja magme i povećanog tlaka unutar litosfere tijekom pripremnih procesa vulkanskih erupcija.
2. Uočavaju se oštre rezonantne oscilacije u kratkom vremenskom razdoblju nakon eksplozivnih erupcija. Ove pojave se objašnjavaju prostiranjem težinskih i akustičkih valova kroz atmosferu od tla do ionosfere.
3. U duljem vremenskom posteruptivnom razdoblju uočavaju se učinci smanjenja vodljivosti atmosfere i elektriciteta uslijed djelovanja vulkanskog aerosola koji omogućuje bržu rekombinaciju slobodnog naboja u neutralne molekule plinova i čestica u zraku.

#### **4.4 Pregled vlastitih istraživanja**

Tijekom 2018. istraživana je dugoročan utjecaj Sunčevih ciklusa na točnost jednofrekvencijskog određivanja položaja GPS sustavom u jadranskoj regiji (Toman i sur., 2018). Kao pokazatelji Sunčeve aktivnosti korišteni su broj Sunčevih pjega i radiofluks na valnoj duljini 10,7 cm. Pokazan je visok koeficijent korelacije između 10,7 cm radiofluksa i prostornog odstupanja položaja određenog jednofrekvencijskim GPS prijamnicima. Izrađen je prognostički regresijski model, koji je kao ulazne podatke koristio broj Sunčevih pjega i solarni fluks na 10,7 cm, a predviđao je prostorno odstupanje položaja u regiji s uspješnošću  $R^2 = 0,61$  za isključen Klobucharov model korekcije, te  $R^2 = 0,38$  za uključen. Ovo istraživanje je bitno za tematiku disertacije jer pokazuje značajan utjecaj Sunčevih ciklusa na



odstupanje položaja dobivenog GPS sustavom. Takav učinak Sunčeve varijabilnosti iskazuje se u nužnoj potrebi za njegovim ispravljanjem prilikom izolacije vulkanske aktivnosti na položajnu točnost GPS sustava. Ta ispravka je uvrštena u metodologiju istraživanja u poglavlju 5.5.1.

U 2021. su prikazani rezultati istraživanja utjecaja Etne na ukupni sadržaj elektrona u regiji vulkana (Toman i sur., 2021). Praćena je aktivnost Etne u razdoblju dugom 19 godina, pri čemu je kao mjera aktivnosti uzeta vulkanska snaga zračenja (engl. *Volcanic Radiative Power* – VRP) (W). VRP je određena za svaki dan s raspoloživim mjerenjima prema automatskom sustavu MIROVA (Coppola i sur., 2020), koji koristi podatke satelitske misije MODIS (detaljniji opis MODIS satelita i podataka koje prikupljaju donosi poglavlje 5.2.3).

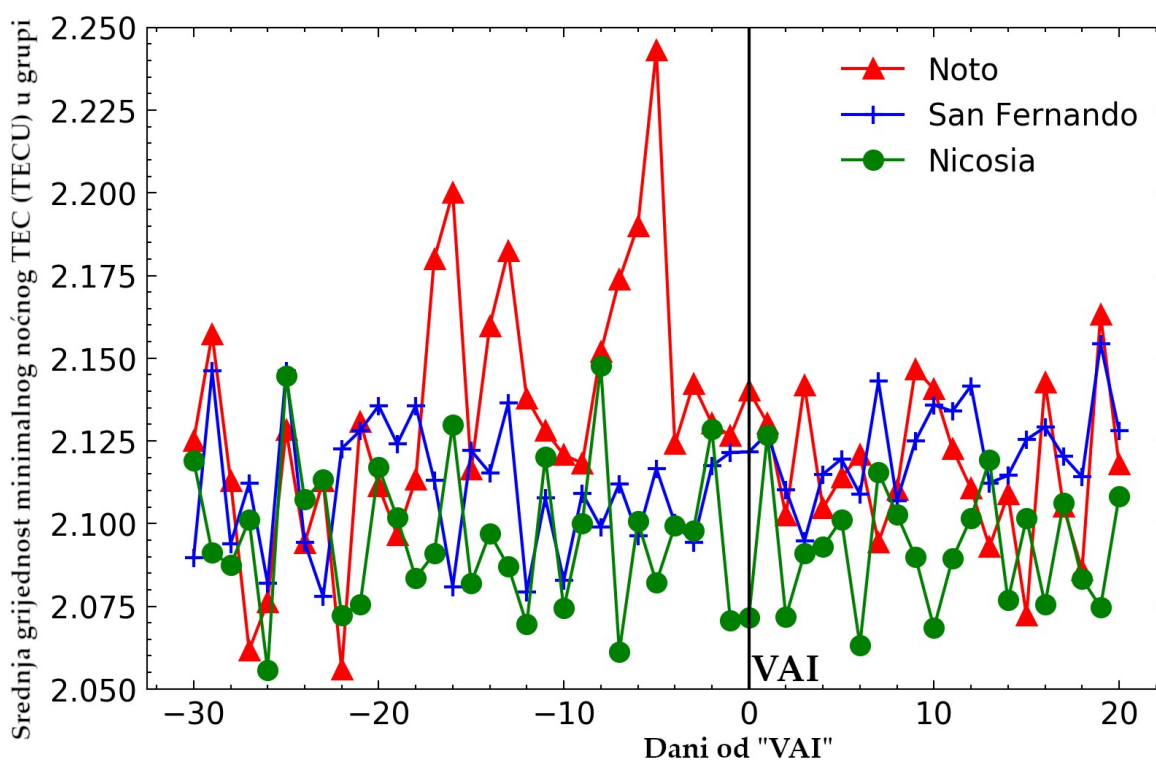
Aktivnost Etne u istraživanju je grupirana prema dvama kriterijima:

1. apsolutni iznos vulkanske snage zračenja
2. relativni dnevni porast vulkanske snage zračenja.

Temeljem tih kriterija podijeljeni su dostupni dani s VRP podacima u dvije grupe. Prva grupa se sastojala od dana u kojima je relativni dnevni porast vulkanske snage zračenja prelazio 25 %, dok je apsolutni iznos dijeljen u tri podgrupe prema donjoj granici kriterija uvrštavanja. Druga grupa je predstavljala sve dane vulkanske snage zračenja manje od određenog kriterija uvrštavanja, bez obzira na iznos relativne dnevne promjene.

Kao metoda umanjenja utjecaja Sunčeve aktivnosti, koristio se podatak o minimalnoj noćnoj vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona kroz pojedina 24-satna razdoblja. Ukupan sadržaj elektrona proračunavan je koristeći podatke GPS mreže, prikupljene opažanjima na IGS referentnim stanicama, a za proračun koristeći dvofrekvencijsku metodu (poglavlje 5.4). Proračunana je srednja vrijednost najnižih noćnih vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona, za 30 dana prije te 20 dana nakon datuma s povećanjem vulkanske aktivnosti prema odabranim kriterijima za uvrštenje u grupe.

Rezultati analize su pokazali da se 5 dana prije povećanja aktivnosti Etne na obližnjoj referentnoj stanici (Noto, Sicilija) uočava porast ukupnog sadržaja elektrona u odnosu na prosjek vrijednosti u promatranom nizu  $\{-30\dots+20\}$  dana u odnosu na datum povećanja aktivnosti. Za podgrupu koju tvore dani s najvećim apsolutnim iznosom vulkanske snage zračenja, vršna vrijednost minimalnog noćnog TEC, 5-og dana prije dana povećanja aktivnosti, porasla je za više od 3 standardne devijacije u odnosu na prosjek (Slika 23).



Slika 23: Usporedba srednjeg TEC u periodu  $\{-30\dots+20\}$  dana oko "VAI" za tri analizirane referentne stanice  
Izvor: Toman i sur. (2021)

Na slici 23 je prikazana usporedba ukupnog sadržaja elektrona 30 dana prije i 20 dana nakon dana povećanja vulkanske snage zračenja za  $> 25\%$ , za najvišu kategoriju po apsolutnom iznosu snage zračenja, po IGS stanicama Noto, San Fernando i Nicosia.

Usporedba srednjih vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona po identičnim danima s podacima udaljenim stanicama (San Fernando i Nicosia) pokazuje da se identificiran porast između 17. i 5. dana na obližnjoj stanici Noto (prema slici 23 – crvena linija), ne uočava na udaljenim stanicama (plava i zelena linija) što nedvosmisleno ukazuje da je učinak povećanja ukupnog sadržaja elektrona specifičan za stanicu Noto i prema tome lokalna, što se može pripisati utjecaju vulkana Etna.

Dobiveni rezultati su općenito u skladu s drugim istraživanjima sprege litosfere, ionosfere i atmosfere (posebno radu novog datuma od Pandara i sur., 2021) gdje se povećanje ukupnog sadržaja elektrona u danima pred povećanje vulkanske aktivnosti može pripisati hipotezi koja postavlja pojačanu emanaciju Rn u prederuptivnim procesima, pri čemu je Rn nositelj mehanizma sprege.

Za detekciju fluktuacija ukupnog sadržaja elektrona uslijed prostiranja težinskih i akustičkih valova kakve su često prikazane u literaturi i povezane s vulkanskim erupcijama, potrebno je analizirati vrlo kratku vremensku skalu i promatrati pojedinačne eruptivne događaje. Takva analiza nije u skladu s metodologijom provedenog istraživanja (Toman i sur., 2021) u kojem su promatrane samo minimalne noćne vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona i statistički su obrađivane stotine događaja u cilju određivanja prosječne ionosferske reakcije po danima na forsiranje aktivnošću Etne.

Prema ohrabrujućim rezultatima i zaključcima dosadašnjeg vlastitog znanstvenoistraživačkog rada, koji su pokazali jasnu vremensku i prostornu korelaciju ionosferskih anomalija povezanih s vulkanskom aktivnošću, predložena je hipoteza o postojanju učinka vulkanske aktivnosti na položajnu točnost određenu jednofrekvencijskim GPS prijamnicima i posljedični utjecaj na pomorski promet. S obzirom da utjecaj vulkana na točnost položaja određenog GPS sustavom nije sustavno izučavan u dosad objavljenoj literaturi, ta tema je izabrana

za istraživanje u doktorskoj disertaciji. U sljedećem poglavlju prikazana je metodologija znanstvenoistraživačkog rada u disertaciji s pregledom rezultata analize.

## **5 Strukturna analiza utjecaja vulkanske aktivnosti na raspršenje GPS položaja i ukupan sadržaj elektrona**

U ovom poglavlju opisan je metodološki pristup u znanstvenoistraživačkom radu provedenom u disertaciji. Prvi dio donosi odgovor na pitanje što se istraživalo, koji vulkani su odabrani, po kojim kriterijima prema zemljopisnom području i drugim osobinama, te u kojem razdoblju. Donosi se pregled podataka korištenih u analizi te njihovih izvora. Opisuju se procesi mjerenja, prikupljanja i obrade podataka te generiranja konačnih produkata koji su korišteni u analizi.

Slijede matematički prikazi korištenih metoda. Pritom su opisane znanstvene metode koje uključuju kreiranje i obradu podataka korištenih u disertaciji, od kojih se mogu kao ključne izdvojiti:

1. Proračun položaja pomoću jednofrekvencijskih mjerenja GPS sustavom;
2. Proračun odstupanja izračunanog položaja od referentne točke;
3. Proračun ukupnog sadržaja elektrona;
4. Statistička analiza odstupanja položaja i ukupnog sadržaja elektrona u ovisnosti o vulkanskoj aktivnosti;
5. Proračun metodoloških ispravaka za globalne utjecaje;
6. Analiza prostornog utjecaja vulkanske aktivnosti na odstupanje položaja.

Iza prikaza metoda donosi se pregled dobivenih rezultata provedenih analiza. Slijedi razmatranje rezultata, zaključivanje uočenih pravilnosti i postavljanje hipoteza u cilju objašnjenja uočenih pravilnosti u rezultatima i donesenih zaključaka.

Na kraju poglavlja se razmatraju mogućnosti statističkog modeliranja sprege vulkanske aktivnosti i položajne točnosti u GPS sustavu. Donosi se procjena pogodnosti korištenja specifičnih statističkih modela te se matematički formira odabrani model. Slijedi proračun koeficijenata modela i koeficijenata korelacije te prikaz rezultata s razmatranjima.

## **5.1 Područje istraživanja, odabrani vulkani i razdoblje za analizu**

Istraživanje provedeno u disertaciji temelji se na analizi ponašanja sprege litosfere, atmosfere i ionosfere u kontekstu utjecaja općenite vulkanske aktivnosti na raspršenje položaja u GNSS sustavu. Od aktualnih GNSS sustava, analiza je ograničena na GPS sustav i to isključivo jednofrekvencijsko određivanje položaja. U analizi povezanosti promatranih aspekata analizirano je ukupno šest vulkana, raspoređenih po područjima svijeta bitno različitih geografskih obilježja. Pri izboru vulkana vodilo se računa o ostvarivanju heterogenosti u smislu položaja prema zemljopisnoj širini, Zemljinoj polutci, maritimnosti kraja te o općem stupnju aktivnosti vulkana.

Svaki od analiziranih vulkana promatran je u smislu lokalnog utjecaja na učinke u ionosferi i položajno raspršenje pogreške izračuna položaja u području u kojem se prema dosadašnjim znanstvenim spoznajama, očekivao mjerljiv učinak njegove aktivnosti utjecajem na GPS sustav u jednofrekvencijskom načinu određivanja položaja.

Osim heterogenosti geografskih obilježja, vulkani koji su uzeti u obzir za istraživanje su izabrani prema kriterijima dovoljne aktivnosti i dovoljno kvalitetnih položajnih podataka s dostupnih referentnih GNSS stanica u njihovoj blizini.

Kriterij najmanje aktivnosti vulkana određen je prema sljedećim stavkama:

1. Dostupan broj dana s podacima u sustavu MODVOLC veći od 500, datuma kraja perioda ne starijim od 1. 1. 2020.;

2. Zabilježena vršna vrijednost spektralne radijancije u barem jednom danu od najmanje  $100 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ;
3. Udaljenost najbliže referentne stanice od vulkana manja od 200 km.

Kriterij dovoljno kvalitetnih položajnih podataka s GNSS stanica, određen je prema sljedećim stavkama:

1. Dostupni položajni podaci referentne stanice duži od 10 godina;
2. Najmanje 2000 dostupnih dana u RINEX formatu.

Konačan izbor vulkana za analizu prikazan je u tablici 1.

Tablica 1: Izabrani vulkani za analizu s osnovnim podacima

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Etna	37,734	15,004	3260	28. 2. 2000.	26. 5. 2021.	7758	1494 (19%)	19,3	303
Nyiragongo	-1,520	29,250	3190	12. 2. 2001.	27. 6. 2021.	7740	3491 (45%)	19,6	115
Kilauea	19,421	-155,287	1030	26. 2. 2000.	24. 10. 2021.	7911	5349 (68%)	21,1	623
Fournaise	-21,244	55,708	2460	24. 2. 2000.	17. 4. 2021.	7723	691 (9%)	26,1	387
Karymsky	54,049	159,443	1500	27. 2. 2000.	29. 4. 2021.	7732	2329 (30%)	2,9	144
Nishinoshima	27,247	140,874	30	23. 11. 2013.	1. 10. 2020.	2504	741 (30%)	6,8	104

Kolone u tablici imaju značenje kako slijedi:

A = ime vulkana

B = zemljopisna širina vulkana (°)

C = zemljopisna dužina vulkana (°)

D = nadmorska visina vulkana (m)

E = početni datum dostupnih podataka u MODVOLC sustavu

F = zadnji datum dostupnih podataka u trenutku preuzimanja

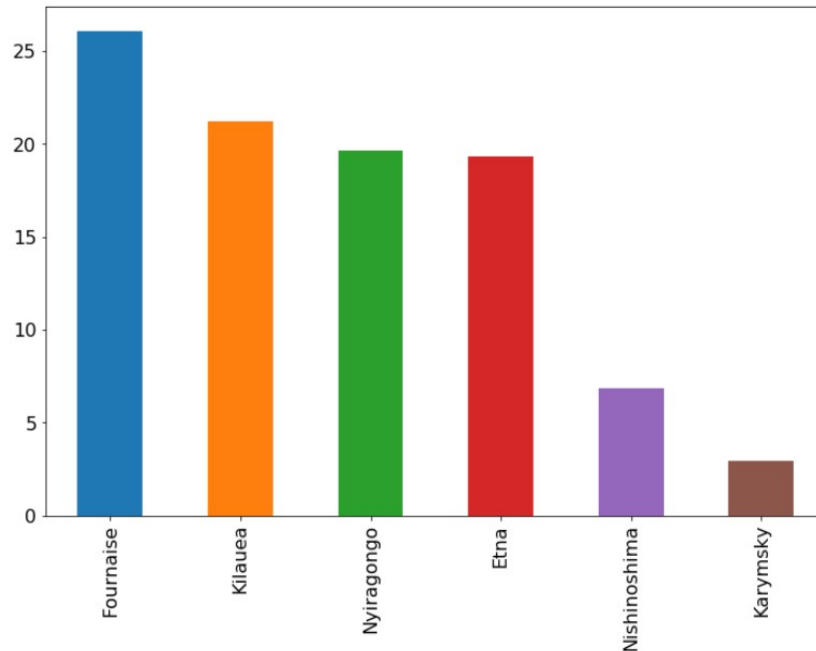
G = duljina analiziranog perioda (dani);  $G = F - E$

H = broj i postotak dana s podacima spektralne radijancije (dani, % od G)

I= srednja vrijednost spektralne radijancije ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ )

J= maksimalna vrijednost spektralne radijancije ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ).

Srednja vrijednost spektralne radijancije u analiziranom periodu svakog od vulkana, prema tablici 1 (kolona I), prikazana je na slici 24 za svaki analizirani vulkan. Vulkanu su poredani u padajućem redoslijedu prema plotiranoj vrijednosti.



Slika 24: Srednja vrijednost spektralne radijancije odabranih vulkana ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ )

Prema srednjoj spektralnoj radijanciji promatrani vulkani se ugrubo mogu podijeliti u dvije grupe. Pritom u grupu s izraženijim vrijednostima srednje aktivnosti ulaze Fournaise, Kilauea, Nyiragongo i Etna, dok Nishinoshima i Karymsky pokazuju osjetno niže srednje vrijednosti spektralne radijancije u usporedbi s aktivnijom grupom. U sljedećem poglavlju predstavljene su izvori informacija i podataka koji su korišteni u disertaciji.



## 5.2 Izvori informacija i podataka korištenih u analizi

U ovom poglavlju su prikazane metode mjerenja vulkanske aktivnosti s naglaskom na satelitsko mjerenje sustavom MODVOLC, podaci kojeg su korišteni u disertaciji. Također je pokazan detaljan postupak proračuna položaja referentne stanice u GPS sustavu jednofrekvencijskim kodnim mjerenjima pseudodudaljenosti. Na kraju poglavlja su opisani postupci koji su primijenjeni u obradi podataka u cilju filtriranja neispravnih vrijednosti.

### ***5.2.1 Fizikalni koncept daljinskih motrenja i mjerenja aktivnosti vulkana***

Korištenjem uređaja za daljinska motrenja i mjerenja moguće je pratiti aktivnost vulkana koje bi inače bilo nepraktično ili potpuno nemoguće mjeriti metodama izravnog kontakta. Počevši od jednostavnih video kamera pa do kompleksnih senzora, aktivnost vulkana je moguće pratiti daljinski u vidljivom dijelu EM spektra, ali također i u drugim dijelovima spektra, uključujući infracrveni dio valnih duljina.

Temeljna fizikalna zakonitost koja omogućuje daljinsko mjerenje vulkanske aktivnosti nalaže da svako tijelo emitira EM zračenje čija raspodjela spektra po valnim duljinama ovisi o temperaturi tijela, pa je tako i aktivnost vulkana moguće kvantificirati mjerenjem EM spektra zračenja iz njegovog kratera, izbačene lave ili vrućih plinova (npr. Oppenheimer, 1998).

Prema Stefan-Boltzmannovom zakonu (Stefan, 1879; Boltzmann, 1884), gustoća toka izračene energije je proporcionalna četvrtoj potenciji temperature površine tijela.

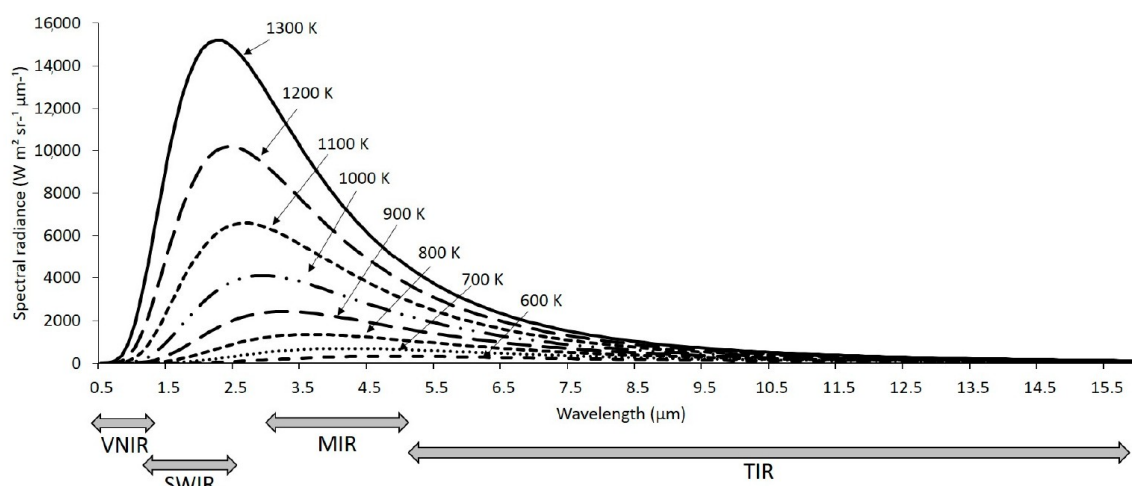
$$j = \sigma T^4 \quad , \quad (59)$$

gdje je  $j$  ukupna količina energije po jedinici površine i u jedinici vremena, koju zrači crno tijelo temperature  $T$ , pri čemu Stefan-Boltzmannova konstanta  $\sigma$  iznosi  $5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ .

Prema Wienovom zakonu (Wien, 1896), vršna vrijednost valne duljine zračenja je obrnuto proporcionalna s temperaturom površine tijela.

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad , \quad (60)$$

gdje je  $b$  Wienova konstanta pomaka te iznosi  $2,897768551 \cdot 10^{-3}$  mK.



Slika 25: Odnos valnih duljina EM zračenja i temperature tijela

Izvor: Blackett (2017)

Na slici 25 je prikazan spektar valnih duljina koje zrači crno tijelo u ovisnosti o njegovoj temperaturi. Ovaj odnos definiraju Planckova funkcija i Stefan-Boltzmannov zakon. Na apscisi je prikazana valna duljina zračenja ( $\mu\text{m}$ ), a na ordinati iznos spektralne radijancije ( $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ) za pojedinu krivulju. Svaka krivulja je definirana temperaturom tijela (K). Pritom kratice za pojedine dijelove prikazanog spektra znače (Blackett, 2017):

VNIR = Vidljivo i blisko infracrveno područje (engl. *Visual and Near InfraRed*)

SWIR = Kratkovalno infracrveno područje (engl. *Short-Wave InfraRed*)

MIR = Srednje infracrveno područje (engl. *Mid-InfraRed*)

TIR = Termalno infracrveno područje (engl. *Thermal InfraRed*).

Iz slike 25 je vidljivo da povećanjem temperature tijela, iznos ukupne spektralne radijancije po svim valnim duljinama raste (veća površina ispod krivulje), a istovremeno, maksimalni iznos spektralne radijancije pada na sve nižu vrijednost valnih duljina spektra. Prema tome, iz poznate je temperature površine tijela moguće odrediti njegov spektar EM zračenja. Također, inverznim pristupom problematici, iz poznatog spektra EM zračenja je moguće odrediti temperaturu površine tijela. Upravo na toj zakonitosti se temelji daljinsko mjerenje temperature površine objekata, uključujući u ovome slučaju temperaturu kratera vulkana, izbačene lave i drugih produkata vulkanske aktivnosti.

Max Planck je izveo formulu koja je jedna od fundamentalnih matematičkih relacija na kojima se temelji kvantna fizika. Planckov zakon povezuje temperaturu crnog tijela i intenzitet njegovog EM zračenja, ali također definira i ovisnost intenziteta zračenja na različitim valnim duljinama o temperaturi tijela. Iz Planckovog zakona, izvođenjem inverzne funkcije, moguće je iz poznatog intenziteta zračenja na različitim valnim duljinama odrediti temperaturu površine tijela (Planck, 1901).

Povezanost temperature tijela koje zrači energiju i izračene spektralne radijancije opisuje Planckova funkcija. Inverzna Planckova funkcija kojom se dobiva temperatura iz poznate spektralne radijancije, u matematičkom obliku glasi:

$$t(\lambda, L) = \frac{c_2}{\lambda \ln \frac{c_1}{\lambda^5 L + 1}}, \quad (61)$$

gdje je  $t$  = temperatura crnog tijela (K),  $L$  = spektralna radijancija ( $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ),  $c_1 = 1,191042 \cdot 10^8 \text{ W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-4}$ ,  $c_2 = 1,4387752 \cdot 10^4 \text{ K } \mu\text{m}$ ,  $\lambda$  = valna duljina ( $\mu\text{m}$ ) (npr. Blackett, 2017).

Aktivnost vulkana se iz praktičnih razloga u pravilu prati metodama termalne daljinske detekcije. Ove metode mogu se koristiti različitim platformama i algoritmima, kao što su satelitska ili zrakoplovna mjerenja s visine, ali također i korištenje zemaljskih senzora. Mjerenjem toplinskog zračenja pomoću satelita

postiže se širok prostorni obuhvat snimanja, dok su osnovni nedostaci metode općenito ograničena vremenska rezolucija mjerenja te značajan utjecaj atmosfere i meteoroloških uvjeta na raspoloživost snimanja i točnost izmjerenih podataka. Zrakoplovnim mjerenjima obuhvaća se manji prostor u odnosu na satelitska, ali još uvijek značajno veći u odnosu na zemaljska mjerenja. Nedostatak ove platforme je visoka cijena, a često i nepravilna pokrivenost te nestandardizirani produkti mjerenja. Zemaljskim mjerenjima, korištenjem terestričkih senzora, moguće je eliminirati problem niske vremenske razlučivosti satelitskih mjerenja te izbjeći potrebu korigiranja zbog atmosferskih utjecaja, ali dobavlјivost takvih podataka za potrebe praćenja vulkanske aktivnosti ovisi o raspoloživosti mjerenja te standardizaciji izmjerenih podataka (Duplančić-Leder, 2016).

### ***5.2.2 Satelitsko praćenje i mjerenje aktivnosti vulkana***

Prvi sateliti u Zemljinoj orbiti koji su nosili instrumente — radiometre sposobne mjeriti u infracrvenom spektru, bili su namijenjeni vojnoj uporabi i kao takvi, tajni. Prva operativna misija s javno dostupnim podacima je bila NOAA TIROS (engl. *Television InfraRed Operational Satellite*) od 1968. godine (Jensen, 2000; Harris, 2013).

Začeci satelitskog praćenja aktivnosti vulkana sežu do rada od Gawarecki i sur. (1965) koji su temeljem mjerenja Nimbus 1 satelitom, instrumentom HRIR (engl. *High Resolution Infrared Radiometer*), pokazali razlike u termalnoj emisiji vulkana Kilauea i Mauna Loa. Ekspanzija uporabe satelitskog mjerenja vulkanske aktivnosti u znanstvene svrhe događa se lansiranjem misije NOAA AVHRR (engl. *Advanced Very-High-Resolution Radiometer*), 1978. godine, te su uskoro objavlјeni prvi znanstvenoistraživački radovi korištenjem podataka s tih satelita (Wiesnet i sur., 1982; Bonneville i sur., 1985). AVHRR podaci se i danas koriste za praćenje vulkana unatoč dostupnosti novijih i boljih senzora. AVHRR podaci imaju značajnu prednost pred novijim setovima podataka zbog vrlo dugog perioda koji

pokrivaju. Ovaj senzor mjeri 4 ili 5 kanala EM spektra (ovisno o modelu uređaja), i to u vidljivom, bliskom infracrvenom (NIR) i termalnom infracrvenom (TIR) dijelu spektra zračenja (Kidwell, 1995).

Daljnji napredak na ovom polju postigli su Francis i McAllister (1986), Francis i Rothery (1987), Rothery i sur. (1988), Flynn i Mougini-Mark (1991), Flynn i sur. (2000; 2001) i drugi, uporabom podataka s NASA misije *Landsat Thematic Mapper*. Landsat termalni senzor je znatno napredniji od AVHRR glede mogućnosti mjerenja u TIR dijelu spektra, posebno Landsat-7 i Landsat-8 senzor s prostornom razlučivošću podataka reda veličine 100 m (točna razlučivost je ovisna o kanalu mjerenja) (Blackett, 2014). Zadnji Landsat senzor, verzije 9, lansiran je 27. rujna 2021. i zamijenit će Landsat 7 senzor. Ipak, relativno slaba vremenska razlučivost ovih podataka (16 dana) onemogućuje analizu događaja kratkog trajanja.

Za potrebe analiziranja vulkanske aktivnosti u znanstvenoistraživačkom radu ponekad su korišteni i geostacionarni sateliti, posebno NASA GOES i Meteosat. Njihova glavna prednost je visoka vremenska razlučivost (15 min), ali budući da se nalaze na vrlo velikoj visini prostorna razlučivost je niska (GOES 4 km, Meteosat 5 km). Primjerice, Harris i sur. (1997; 2001) su objavili nekoliko radova analizirajući vulkan Kilauea koristeći podatke GOES satelita. Termalni instrument SEVERI na satelitu Meteosat druge generacije, uspješno je korišten zajedno s podacima MODIS satelita u sustavu HOTSAT koji omogućuje promptnu detekciju promjene aktivnosti praćenih vulkana (Ganci i sur., 2011; 2016).

Korištenjem satelitskih termalnih podataka osim detekcije same aktivnosti vulkana u smislu detekcije lave i drugih zagrijanih produkata koji izlaze iz kratera pri erupcijama, također se je pratilo i kretanje lave niz padine (npr. Oppenheimer, 1991), analiziralo polja fumarola (otvora kroz koje izlaze vrući plinovi) (Harris i Stevenson, 1997) itd. Analiza termalnih podataka sa satelita je tako postala alat širokog spektra izučavanja ponašanja vulkana.

Izmjerene temperature svježe izbačene lave kreću se  $\geq O(10^3 \text{ K})$  (Fink, 2008; Oppenheimer, 2002) pa valne duljine s maksimumom spektralne radijancije za takve produkte vulkana padaju do vrijednosti oko  $2,5 \mu\text{m}$ , dok hladnijim produktima s temperaturom  $O(\sim 500 \text{ K})$ , maksimum spektralne radijancije iznosi malo iznad  $5 \mu\text{m}$  (Slika 25). Mnoge satelitske misije nose instrumente koji mogu mjeriti EM zračenje s površine Zemlje na tim valnim duljinama, premda su originalne namjene takvih satelita u pravilu nevezane za praćenje vulkanske aktivnosti (najčešće su to meteorološki i klimatološki sateliti).

Blackett (2017) daje pregled 15 glavnih satelitskih instrumenata i njihovih karakteristika koji su u mogućnosti mjeriti toplinsko zračenje s površine Zemlje u infracrvenom spektru i na taj način se potencijalno koristiti kao alat za detekciju i mjerenje vulkanske aktivnosti.

Do danas, razvijeno je dvadesetak globalnih sustava za praćenje vulkanske aktivnosti, temeljenih na satelitskim podacima različitih misija. Coppola (2020) daje pregled u tom trenutku svih aktivnih sustava s osnovnim karakteristikama pojedine implementacije. Većina se koristi mjerenjem toplinskog zračenja u MIR i TIR spektru te imaju razvijene automatske algoritme za obradu sirovih podataka sa satelita u cilju detekcije anomalija vulkanske aktivnosti i izbjegavanja pojava lažnih alarma (Ramsey i Harris, 2020).

### ***5.2.3 Satelitski termalni senzori MODIS***

MODIS (engl. *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) misija seže u 1986. godinu kad NASA objavljuje planove za izgradnju sustava EOS (engl. *Earth Observation System*), koristeći satelitsko praćenje iz niske orbite (Blackett, 2017; NASA – EOS, 2021). U EOS sustavu lansiranom od 1999., ukupno su četiri senzora koji imaju mogućnost mjerenja infracrvene emisije s površine Zemlje. To su ASTER (na Terra satelitu) i MODIS (jedan na Terra i jedan na Aqua satelitu) te dvama sensorima na EO-1 satelitu – ALI i Hyperion.

Od ova četiri senzora, ASTER je originalno imao najbolje karakteristike za analizu vulkanske aktivnosti. Nažalost, uslijed tehničkih problema podaci u SWIR spektru s ASTER senzora, od 2008. nadalje nisu upotrebljivi. Zbog vrlo male širine zahvata (60 km), rezultirajuća izvrsna prostorna i frekvencijska rezolucija ASTER senzora (6 SWIR kanala na 30 m i 5 TIR kanala na 90 m) obećavala je iznimno detaljna mjerenja, ali zbog toga je vremenska rezolucija kompromisno ostala i dalje vrlo mala (16 dana – identično kao Landsat) (Blackett 2017).

MODIS senzori postavljeni su na Terra i Aqua satelite i oba su međusobno identičnih karakteristika. Širina zahvata MODIS senzora koja je mnogo veća nego ASTER senzora (2330 km), uz visinu orbite od 705 km omogućuje prolazak svakih 12 h preko određenog područja na Zemlji. Orbite su sinkronizirane sa Suncem, tako da Terra prolazi preko ekvatora iz pravca sjevera u jutarnjim satima, dok Aqua prolazi preko ekvatora iz pravca juga u večernjim satima. Takve orbite omogućuju ovim satelitima snimanje cijele površinu Zemlje svakih jedan do dva dana, mjereći toplinsko zračenje s površine u 36 različitih spektralnih kanala, od čega 16 u infracrvenom dijelu spektra (NASA – MODIS specifications, 2021). MODIS senzori su i danas u ispravnoj funkciji, pa tako omogućuju dostupne podatke za analizu vulkanske aktivnosti, niza duljeg od 20 godina.

Prostorna razlučivost MODIS podataka od 1 km nije idealna za detaljnu prostornu analizu vulkanske aktivnosti, kao što je primjerice precizno praćenje kretanja lave niz padine vulkana. Ipak, vrlo dug niz neprekinutih podataka i prilično dobra vremenska razlučivost, čine danas MODIS jednim od najrelevantnijih satelitskih senzora za potrebe pouzdanog praćenja aktivnosti vulkana iz Zemljine orbite (npr. Wright i sur., 2002; 2004; 2015).

Postoji veći broj satelitskih misija koje nose termalne senzore i sposobne su mjeriti različite produkte toplinskog zračenja s površine Zemlje. Osnovne karakteristike nekih od satelitskih senzora koji se koriste za mjerenje toplinskog zračenja površine tla su prikazane u tablici 2. Iscrpniji pregled donosi Blackett (2017).

Tablica 2: Prostorna i vremenska razlučivost nekih od satelitskih senzora s mogućnošću mjerenja toplinskog zračenja s tla

Izvor: Blackett (2017)

Misija/senzor	Prostorna razlučivost	Vremenska razlučivost
GOES (geostacionarni)	4 km	15 min
AVHRR	1,1 km	2 prolaza dnevno
MODIS	1 km	1 do 2 dana
Landsat	120 ili 60 m	16 (8 na z. širini 45°) dana
ASTER	90 m	16 dana

Iz priložene tablice osnovnih karakteristika pojedinih satelitskih senzora je moguće uočiti da GOES satelit daje izvrsnu vremensku razlučivost, ali je prostorna rezolucija izmjerenih podataka najniža od svih navedenih misija. Slaba prostorna razlučivost ne daje dovoljno kvalitetan uvid u aktivnost samog kratera vulkana koji u slučaju najmanjih vulkana ima promjer od  $O(\sim 100 \text{ m})$ , dok je vremenska razlučivost od 15 min za GOES misiju, za veći dio znanstvenoistraživačkih analiza, nepotrebno visoka u kontekstu potreba praćenja vulkanske aktivnosti. Zbog toga, takva misija najčešće nije optimalan izbor za izradu algoritama namijenjenih praćenju vulkanske aktivnosti.

S druge strane, ASTER i Landsat imaju izvrsnu prostornu razlučivost, ali je vremenska razlučivost mala. To je zato što se satelit misije nađe nad područjem istraživanja svakih nekoliko dana, a ako u tom trenutku nad područjem vladaju nepovoljni meteorološki uvjeti (npr. oblačno vrijeme), dostupnost pouzdanih podataka bit će dobivena s još manjom učestalošću, nedovoljnom za dovoljno kvalitetno određivanje početka, trajanja te intenziteta vulkanske aktivnosti (Wright i sur., 2004).



U pravilu, prostorna i vremenska razlučivost podataka su međusobno inverzne. Za potrebe praćenja vulkanske aktivnosti, kao dobar kompromisni balans prostorne i vremenske rezolucije pokazuju se karakteristike misija AVHRR i MODIS, gdje je prosječno dobavljiv jedan podatak dnevno s prostornom razlučivosti mreže piksela (slikovnih elemenata) od  $O(\sim 1 \text{ km})$  (Oppenheimer, 1998; Blackett, 2017).

#### ***5.2.4 Sustav za automatizirano praćenje vulkanske aktivnosti***

##### ***MODVOLC***

MODVOLC je algoritam za detekciju vulkanske aktivnosti koji se temelji na mjerenjima EM zračenja satelitskim instrumentom MODIS, razvijen s ciljem visoke efikasnosti korištenja računalnih resursa.

Spektralni pojasi (kanali) koje snima instrument MODIS, a korišteni u sustavu MODVOLC su 21; 22; 6; 31 i 32, s centralnim valnim duljinama 3,959; 3,959; 1,64; 11,03 i 12,02  $\mu\text{m}$ . Pojasi 21 i 22 imaju istu valnu duljinu ali različit dinamički opseg. Pojas 22 je osjetljiv na temperature piksela do  $\sim 330 \text{ K}$ , dok je pojas 21 osjetljiv do temperature  $\sim 500 \text{ K}$  i zato je od veće važnosti u uvjetima povećane vulkanske aktivnosti. Podaci mjerenja u pojasu 22 korisniji su u mirnijim uvjetima vulkana, dok se pri jačoj aktivnosti senzor pojasa 22 često prezasiti (Wright i sur., 2002; 2004).

Konačni produkt sustava MODVOLC, preuzet i u ovom radu korišten za evaluaciju vulkanske aktivnosti je spektralna radijancija (emitirana energija u jedinici vremena s jedinice površine na jedinicu valne duljine). Spektralna radijancija je jedna od mjera radiometrije, a predstavlja radijanciju površine po jedinici frekvencije ili valne duljine i mjera je za emisiju EM zračenja; u slučaju izražavanja spektralne radijancije u infracrvenom spektru valnih duljina, predstavlja mjeru za emisiju toplinskog zračenja površine nekog tijela te je proporcionalna temperaturi tijela.

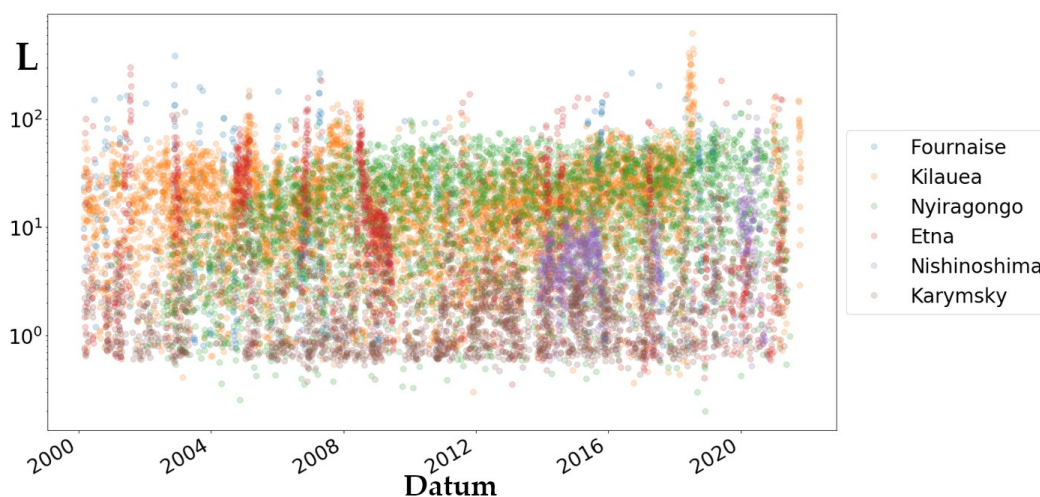
Spektralna radijancija na nekoj valnoj duljini definirana je Planckovim zakonom i povezana s temperaturom površine zračećeg tijela. Spektralna egzitancija definirana je izrazom:

$$M_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} , \quad (62)$$

u mjernim jedinicama  $W m^{-2} \mu m^{-1}$ , gdje je  $T$  temperatura crnog tijela (K),  $\lambda$  valna duljina ( $\mu m$ ), te konstante  $c_1 = 3,74151 \cdot 10^8 W m^{-2} \mu m^4$  i  $c_2 = 1,43879 \cdot 10^4 \mu m K$ . Dijeljenjem spektralne egzitancije s  $\pi$ , dobiva se spektralna radijancija,  $L_\lambda$ , a mjerna jedinica je pritom  $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$  (Wright i sur., 2015).

Općenito, vremenska razlučivost podataka spektralne radijancije odgovara ugrubo razlučivosti podataka MODIS instrumenta (1 – 2 dana), ali su podaci u sustavu MODVOLC filtrirani, stoga podaci dobiveni u prolascima satelita s nepovoljnim uvjetima snimanja nisu uključeni u vremenske nizove. Posljedično tome, stvarna vremenska razlučivost podataka je promjenjiva, ovisna o uvjetima snimanja.

Spektralne radijancije izabranih vulkana tijekom analiziranog razdoblja, zajednički su prikazane na slici 26.



Slika 26: Spektralna radijancija odabranih vulkana ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ )

Na slici 26 os ordinata je prikazana u logaritamskom mjerilu i predstavlja vrijednost spektralne radijancije za svaku točku na raspršnom grafu.

### **5.2.5 Međunarodna GNSS služba**

Međunarodna GNSS služba (engl. *International GNSS Service* – IGS) je servis Međunarodnog udruženja geodezije (engl. *International Association of Geodesy* – IAG) kojemu je osnovni cilj pružanje podrške znanstvenicima koji koriste GNSS tehnologije kao jedan od sustava za svoja istraživanja (Dow i sur., 2009). IGS omogućuje pristup podacima dobivenima iz preko stotinu država svijeta, s položajnih stanica za praćenje stanja GNSS sustava (IGS, 2018). Referentne stanice u sustavu slijede nužne smjernice kvalitete (Kouba, 2009) u cilju osiguranja što pouzdanijih podataka u okviru predodređenih standarda.

IGS mreža referentnih GNSS stanica jedna je od brojnih organizacija koje pružaju slične usluge. Od sličnih srodnih mreža treba izdvojiti EUREF (Bruyninx, Legrand, Fabian i Pottiaux, 2019). U Hrvatskoj je ustrojena Državna mreža referentnih stanica Republike Hrvatske, CROPOS, koja trenutačno broji 33 referentne GNSS stanice (CROPOS, 2022).

U IGS, obrađeni položajni podaci svake od stanica dobiveni GNSS sustavom, poslužuju se na mrežnim poslužiteljima u standardiziranom formatu (engl. *Reader INdependent EXchange format* – RINEX) (Gurtner i Estey, 2009; IGS RINEX, 2013). Vremenska razlučivost podataka u RINEX datotekama IGS stanica iznosi 30 s. Položaj stanice u GNSS sustavu iz RINEX formata računa se pomoću softvera RTKLIB, korištenjem metode jednofrekvencijskog određivanja položaja u jednoj točki koja je opisana u sljedećem poglavlju.

### ***5.2.6 Jednofrekvencijski proračun položaja referentne stanice u GPS sustavu***

Konceptualni princip određivanja položaja GNSS prijavnika prikazan je u poglavlju 2.1.2. Dodatno je naglašeno da pritom postoji veći broj različitih metoda razvijenih prvenstveno u cilju poboljšanja točnosti i pouzdanosti određivanja položaja. S obzirom na činjenicu da je u radu analiziran utjecaj vulkanske aktivnosti na jednofrekvencijsko određivanje položaja, složenije i naprednije metode su samo kratko spomenute u disertaciji. Suprotno tome, metodu određivanja položaja jednom frekvencijom, bez podrške diferencijalnih usluga za poboljšanje točnosti potrebno je obrazložiti detaljno i tome je posvećeno ovo poglavlje. U radu su analizirani učinci na GPS sustav, stoga je detaljan prikaz metode ograničen na taj GNSS sustav.

Programski paket koji je u pripremi podataka disertacije korišten za procesiranje preuzetih RINEX datoteka je RTKLIB (Takasu, 2018). U ostatku poglavlja donosi se prikaz metodologije izračuna položaja iz RINEX datoteka koji je izveden za pripremu položajnih datoteka referentnih stanica navedenim programom.

Za potrebe analize raspršenja položaja s kakvim se susreću korisnici jednofrekvencijskih GPS prijavnika, korišten je modus standardnog izračuna položaja referentne stanice u jednoj točki (engl. *Single-Point Positioning* – SPP). Ovaj modus računa samo pseudoudaljenost na L1 frekvenciji koristeći kodne razlike GNSS signala. Za pokretanje izračuna potrebna je priprema dviju vrsta arhiviranih RINEX datoteka za pojedini datum koji se analizira, tzv. opservacijske datoteke ekstenzije .o (nekomprimirane) ili .d (komprimirane) te navigacijske datoteke ekstenzije .n (za GPS sustav). Iz tih datoteka, programom RTKLIB kreiraju se položajne datoteke u tekstualnom formatu koje među ostalim sadrže podatke o zemljopisnoj širini, dužini i nadmorskoj visini referentne stanice – podatke izračunane jednofrekvencijskom metodom iz GPS mjerenja. Za proračun položaja

u standardnom izračunu položaja u jednoj točki, koristi se iterirajuća metoda smanjenja pogrešaka funkcijom najmanjih kvadrata (Takasu, 2018). Slijedi opis metode.

Prijamnik mjeri vrijeme prostiranja signala poslanog sa satelita (prema konceptu prikazanom u poglavlju 2.1.5). Izmjereno vrijeme, pomnoženo s brzinom svjetlosti, daje pseudoudaljenost satelita  $s$  i prijamnika  $r$  :

$$y = c \cdot (t_r - t_s) \quad , \quad (63)$$

gdje je  $c$  brzina svjetlosti,  $t_r$  vrijeme prijamnika u trenutku primanja signala a  $t_s$  vrijeme satelita, kodirano u poruci koja je primljena.

Vektor modeliranih pseudoudaljenosti satelita i prijamnika  $y$ , dobivenih mjerenjem vremena prostiranja signala od satelita 1, 2, ... , n do prijamnika, može se zapisati:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad . \quad (64)$$

Položaj prijamnika i satelita u ECEF koordinatnom sustavu, označavamo vektorima:

$$\mathbf{r}_r = \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{r}_s = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \quad , \quad (65)$$

pri čemu  $s = 1, 2, \dots, n$ .

Za SPP izračun se koristi linearizacija, tj. proračun se vrši po iteracijama. Kod prve iteracije uzima se procijenjena vrijednost vremena prostiranja satelitskog signala.

U odnosu na satelit, položaj prijamnika opisan je nepoznatim vektorom, pri čemu simbol  $^T$  označava transponiran vektor:

$$\mathbf{x} = (x_r, y_r, z_r, c \cdot dt_r)^T, \quad (66)$$

a za pseudoudaljenost satelita i prijavnika tad vrijedi:

$$c \cdot (t_r - t_s) = y = \sqrt{(x_r - x_s)^2 + (y_r - y_s)^2 + (z_r - z_s)^2} + c \cdot dt_r + v_s, \quad s = 1, 2, \dots, n \quad (67)$$

gdje  $v_s$  označava slučajne pogreške u mjerenjima. Zapisano u općenitom vektorskom obliku:

$$\mathbf{y} = h(\mathbf{x}) + \mathbf{v}, \quad (68)$$

gdje je  $\mathbf{v}_s$  vektor slučajnih pogreški mjerenja, a  $h(\mathbf{x})$  linearna vektorska funkcija mjerenja pseudoudaljenosti koju aproksimiramo Taylorovim razvojem po inicijalnom parametru vektora  $\mathbf{x}_0$  koji predstavlja početni procijenjen položaj prijavnika:

$$h(\mathbf{x}) = h(\mathbf{x}_0) + H(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \dots \quad (69)$$

Jednadžba mjerenja za izračun položaja se tad formira kao matrica:

$$h(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \rho_r^1 + cdt_r - cdT^1 + I_r^1 + T_r^1 \\ \rho_r^2 + cdt_r - cdT^2 + I_r^2 + T_r^2 \\ \rho_r^3 + cdt_r - cdT^3 + I_r^3 + T_r^3 \\ \vdots \\ \rho_r^n + cdt_r - cdT^n + I_r^n + T_r^n \end{pmatrix}, \quad (70)$$

gdje su  $\rho_r^s$  geometrijska udaljenost satelita i prijavnika.  $c$  je brzina svjetlosti,  $dt_r$  označava odstupanje sata prijavnika,  $dT^s$  je odstupanje sata satelita,  $I_r^s$  je ionosfersko kašnjenje signala a  $T_r^s$  je troposfersko kašnjenje signala. Svaki redak matrice predstavlja jednadžbu za pojedini satelit od kojeg prijavnik prima signal.

Parcijalnim derivacijama 1. reda kreiramo matricu  $H$  :

$$H = \left. \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} . \quad (71)$$

Iz (67) proizlazi položajna matrica nakon deriviranja:

$$H = \begin{pmatrix} -e_r^{1T} & 1 \\ -e_r^{2T} & 1 \\ -e_r^{3T} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -e_r^{mT} & 1 \end{pmatrix} , \quad (72)$$

gdje je  $e_r^s$  pravocrtni vektor između položaja satelita i prijarnika.

Iz (68) i (69) slijedi:

$$\mathbf{y} = h(\mathbf{x}_0) + H(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \mathbf{v} . \quad (73)$$

U svrhu minimiziranja pogrešaka  $\mathbf{v}$ , primjenjuje se metoda najmanjih kvadrata. Funkcija cilja najmanjih kvadrata je definirana kao zbroj kvadrata pogrešaka mjerenja:

$$J_{LS} = v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_m^2 = \mathbf{v}^T \mathbf{v} . \quad (74)$$

Iz prethodnog proizlazi da je funkcija cilja:

$$J_{LS} = (\mathbf{y} - H\mathbf{x})^T (\mathbf{y} - H\mathbf{x}) = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \mathbf{y}^T H\mathbf{x} - \mathbf{x}^T H^T \mathbf{y} + \mathbf{x}^T H^T H\mathbf{x} . \quad (75)$$

U cilju minimiziranja funkcije cilja, gradijent od  $J_{LS}$  treba biti = 0. Prema tome,

$$\frac{\partial J_{LS}}{\partial \mathbf{x}} = 0 - \mathbf{y}^T H - (H^T \mathbf{y})^T + (H^T H\mathbf{x})^T + \mathbf{x}^T H^T H , \quad (76)$$

tj.

$$\frac{\partial J_{LS}}{\partial \mathbf{x}} = -2\mathbf{y}^T H + 2\mathbf{x}^T H^T H = 0 . \quad (77)$$

Ovo daje:

$$H^T H \mathbf{x} = H^T \mathbf{y} \quad (78)$$

Za rješenje gornje jednačbe, uzima se vektor aproksimativnog položaja prijavnika  $\hat{\mathbf{x}}$ . Aproksimacijom najmanjih kvadrata slijedi:

$$\hat{\mathbf{x}} = (H^T H)^{-1} H^T \mathbf{y} \quad (79)$$

Za ponderirana mjerenja, funkcija cilja može se napisati pomoću matrice pondera  $W$ :

$$J_{WLS} = \mathbf{v}^T W \mathbf{v} \quad (80)$$

U cilju minimiziranja funkcije cilja  $J_{WLS}$ , uzima se ponovo vektor  $\hat{\mathbf{x}}$ , te aproksimacijom najmanjih kvadrata slično kao ranije:

$$\hat{\mathbf{x}} = (H^T W H)^{-1} H^T W \mathbf{y} \quad (81)$$

Ponderirana matrica  $W$  za ponderiranu aproksimaciju najmanjih kvadrata se obično prikazuje kao:

$$W = \text{diag}(\sigma_1^{-2}, \sigma_2^{-2}, \dots, \sigma_m^{-2}) \quad (82)$$

gdje je  $\sigma_i$  standardna devijacija  $i$ -te pogreške mjerenja.

U praksi se primjenjuje ponderiranje pogrešaka matricom  $W$ , tako da jednačba postaje:

$$H^T W H (\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_0) = H^T W (\mathbf{y} - h(\mathbf{x}_0)) \quad (83)$$

Rješenje vektora  $\mathbf{x}$ , tj. korekcije aproksimativnog položaja prijavnika su:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_0 + (H^T W H)^{-1} H^T W (\mathbf{y} - h(\mathbf{x}_0)) \quad (84)$$

gdje je  $\mathbf{x}_0$  inicijalna aproksimacija vektora položaja ili vrijednost iz prethodnog iterativnog koraka.



Iterativna metoda koristi kriterij konvergencije. Ako početni procijenjen položaj nije previše udaljen od pravog položaja i ako su pseudoudaljenosti u prihvatljivim granicama (nema velikih pogrešaka, svemirsko vrijeme je stabilno), iterativna metoda po kriteriju konvergencije daje rješenje u najvećem broju slučajeva u manje od 10 iteracija.

U slučaju da inicijalni parametri  $\mathbf{x}_0$  nisu zadovoljavajuće blizu stvarnih vrijednosti, dalje iterativno se poboljšava procijenjene parametre do tražene točnosti:

$$\hat{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{x}_0 \quad , \quad (85)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{i+1} = \hat{\mathbf{x}}_i + (H^T W H)^{-1} H^T W (\mathbf{y} - h(\hat{\mathbf{x}}_i)) \quad . \quad (86)$$

Za konvergirajuće iteracije, finalni parametri (korekcije) se dobiju kao:

$$\hat{\mathbf{x}} = \lim_{i \rightarrow \infty} \hat{\mathbf{x}}_i \quad . \quad (87)$$

Geometrija satelita u određenom promatranom trenutku je fiksna kovarijacijska matrica. Uz pretpostavku da je komponenta od DOP identična i jednako raspodijeljena za sve satelite koji ulaze u izračun korisničkog položaja i uz pretpostavku da je varijanca jednaka drugom korijenu od UERE, navedena kovarijacijska matrica dozvoljava prebacivanje pogrešaka pseudoudaljenosti u kovarijancu položajnih pogrešaka sustava.

### ***5.2.7 Korištene referentne stanice za proračun položaja***

Korištene referentne IGS stanice za svaki pripadajući vulkan prikazane su u tablici 3 s osnovnim podacima. Koordinate i nadmorska visina u tablici su preuzete iz RINEX datoteka.

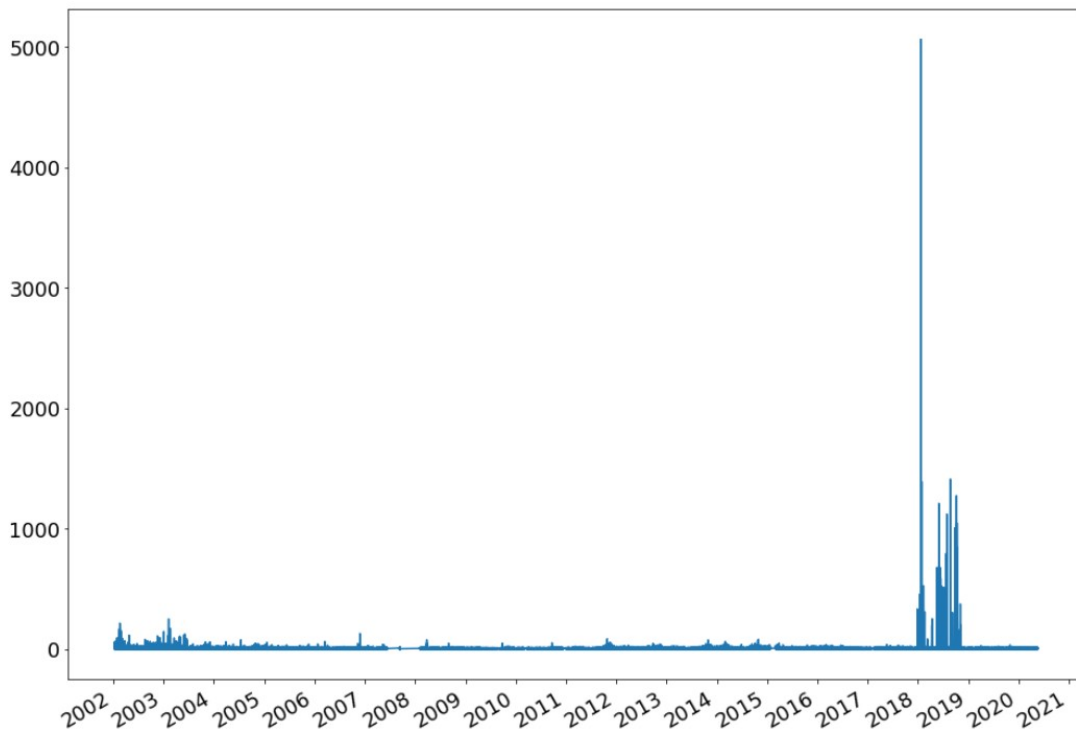
Tablica 3: Referentne stanice korištene za proračun položaja

Ime referentne stanice	Oznaka ref. stanice	Ime vulkana	Zemlj. dužina stanice (°)	Zemlj. širina stanice (°)	Nadmorska visina (m)	Udaljenost stanice i vulkana (km)	Ukupan broj dostupnih dana u RINEXu
Noto	not1	Etna	36,8758	14,9898	126,34	95	6874
Mbarara	mbar	Nyiragongo	-0,6015	30,7379	1337,533	194	4877
Mauna Kea	mkea	Kilauea	19,8014	-155,4563	3754,661	46	7104
Le Tampon	reun	Fournaise	-21,2082	55,5717	1558,397	15	5533
Petropavlovsk	pets	Karymsky	53,0233	158,6501	100,636	125	5451
Ogasawara	ccj2	Nishinoshima	27,0675	142,1950	104,226	132	2840

Iz položajnih zapisa u RINEX formatu dobivenih GPS opažanjima, SPP metodom su izračunani položajni zapisi stanice za svaki vremenski korak od 30 s. Time su dobiveni vremenski nizovi položaja po zemljopisnoj širini, zemljopisnoj dužini i nadmorskoj visini stanica tijekom analiziranog razdoblja.

### ***5.2.8 Filtriranje neispravnih podataka s referentnih stanica***

Proračun odstupanja položaja od stvarnih koordinata stanice pokazao je da u podacima distribuiranim u RINEX formatu postoje neprirodno pogrešni podaci. Analizom podataka je otkriveno da se kroz cijelu 2018. godinu bilježe neprirodno velika odstupanja na značajnom broju stanica u svijetu. Na primjer, na sljedećem grafu je prikazano prostorno odstupanje izračunanog položaja IGS referentne stanice Brasilia (Brazil) od 2002. do sredine 2020. Ta stanica je jedna od korištenih za ispravke učinaka globalnih čimbenika na pogreške GPS sustava u poglavlju 5.5.1.



Slika 27: Prostorno odstupanje položaja IGS stanice Brasilia u metrima, u odnosu na referentni položaj

Navedeni problem položaja izračunanih SPP metodom u 2018. godini nije lokaliziran već se različitom magnitudom može primijetiti na velikom broju stanica diljem planete. Naknadnom analizom ove anomalije zaključeno je da je uzrok tehničke naravi u IGS podacima. Zbog toga je iz daljnje analize izbačen cijeli period s neprirodnim vrijednostima odstupanja i to počevši od 20. 12. 2017. pa završno do 31. 12. 2018. Također, na nekim stanicama je primijećeno postojanje pogreški položaja neprirodno velike amplitude i kraćeg trajanja od opisanog problema, ali u drugim datumima. Zato su za eliminaciju istih primijenjeni i automatski filtri podataka prema kriterijima:

- Izbačeni su svi podaci gdje izračunana zemljopisna širina odstupa od srednje vrijednosti više od  $0,01^\circ$  (oko 1111 m);
- Izbačeni su svi podaci gdje izračunana zemljopisna dužina odstupa od srednje vrijednosti više od  $0,01^\circ$  (na  $45^\circ$  širine, oko 785 m);

- Izbačeni su svi podaci gdje izračunana nadmorska visina odstupa od srednje vrijednosti više od 100 m.

Eliminacijom tako definiranih podataka iz položajnih vremenskih nizova, također su eliminirani isti termini i iz vremenskih nizova ukupnog sadržaja elektrona. Pri filtriranju podataka se je vodilo premisom da je bolje eliminirati više podataka nego manje, odnosno, da je bolje izbaciti i neki ispravan podatak nego ostaviti neispravan i s takvim nastaviti analizu. Naime, izbacivanjem ispravnog podatka postiže se identičan učinak kao da takav nije niti postojao inicijalno, (primjerice, kao da je postaja bila u tom periodu *offline*), dok bi s druge strane korištenje neispravnih podataka bez sumnje kompromitiralo ispravnost dobivenih statističkih rezultata i onemogućilo pravilno tumačenje provedene analize.

### 5.3 Metodologija proračuna odstupanja položaja u GPS sustavu

Horizontalno odstupanje položaja za svaki 30-sekundni vremenski korak, izračunano je kao horizontalna udaljenost položaja dobivenih GNSS sustavom i referentnog položaja stanice. Za referentni položaj svake stanice uzeta je vrijednost aritmetičke sredine zemljopisne širine, dužine i nadmorske visine u cijelom analiziranom vremenskom nizu.

Pritom je za izračun horizontalne udaljenosti korištena metoda izračuna udaljenosti dviju točaka na površini sfere (*haversine* jednadžba) (npr. Whittlesey, 2020; Toman i sur., 2018):

$$h_{err} = 2r \arcsin \sqrt{\sin^2\left(\frac{lat_c}{lat_t}\right) + \cos(lat_c) \sin^2\left(\frac{lon_t - lon_c}{2}\right)}, \quad (88)$$

pri čemu je  $h_{err}$  iznos horizontalnog odstupanja položaja,  $lat_c$  i  $lon_c$  su geografska širina i dužina stanice izračunana GNSS sustavom,  $lat_t$  i  $lon_t$  su stvarna geografska širina i dužina stanice, dok  $r$  predstavlja polumjer Zemlje i za izračun je uzeta vrijednost od  $6367 \cdot 10^3$  m.

Usljed relativno malih iznosa odstupanja, zakrivljenost površine Zemlje u odnosu na ravninu ne predstavlja značajan čimbenik, pa bi se odstupanje s dovoljnom točnošću moglo aproksimativno računati i primjenom računa euklidske geometrije u ravnini. U slučaju izračuna većih udaljenosti nužno je koristiti metode sferne trigonometrije za izračune sfernih udaljenosti (88).

Odstupanje u vertikalnom smjeru je izračunano kao razlika nadmorske visine stanice dobivene GNSS sustavom i stvarne visine stanice:

$$v_{err} = hgt_c - hgt_t, \quad (89)$$

gdje je  $v_{err}$  vertikalno odstupanje,  $hgt_c$  izračunana nadmorska visina, a  $hgt_t$  stvarna nadmorska visina referentne stanice.

Konačno, prostorno odstupanje je izračunano iz horizontalnog (88) i vertikalnog odstupanja (89) kao duljina hipotenuze pravokutnog trokuta, u kojem vrijednosti horizontalnog i vertikalnog odstupanja predstavljaju duljine kateta:

$$err = \sqrt{h_{err}^2 + v_{err}^2}. \quad (90)$$

Tako je za svaku referentnu stanicu kreiran vremenski niz s podacima o prostornom odstupanju GPS položaja izračunanog SPP metodom u odnosu na referentni položaj stanice, u 30-sekundnim intervalima.

## 5.4 Metodologija proračuna ukupnog sadržaja elektrona

Ukupan sadržaj elektrona jedna je od temeljnih fizikalnih veličina koje opisuju EM svojstva ionosfere. U disertaciji, ukupan sadržaj elektrona je analiziran u svojstvu eksplanatornog fizikalnog parametra za uočeno raspršenje položaja u kontekstu analize sprege s vulkanskom aktivnosti.

Metoda proračuna ukupnog sadržaja elektrona se temelji na opažanjima kodnih i faznih pseudoudaljenosti na L1 i L2 frekvencijama. Diferenciranjem pseudoudaljenosti i faze vala nosioca na dvijema različitim frekvencijama (L1 i L2 ili L1 i L5) moguće je izolirati disperzivne komponente kašnjenja od kojih je ionosfersko kašnjenje najveće (Brunner i Gu, 1991; Garner i sur., 2008).

S obzirom da je ionosfera za GNSS signale disperzivni medij, ionosferska refrakcija zavisit će od frekvencije signala. Magnituda kašnjenja signala uzrokovanog ionosferskom refrakcijom inverzno je proporcionalna (99,9%) kvadratu frekvencije signala (Subirana i sur, 2013):

$$\Delta_{ph,f}^{iono} = -\frac{40.3}{f^2} \int N_e(h) dh \quad , \quad (91)$$

$$\Delta_{gr,f}^{iono} = -\frac{40.3}{f^2} \int N_e(h) dh \quad , \quad (92)$$

gdje su  $\Delta_{ph,f}^{iono}$  i  $\Delta_{gr,f}^{iono}$  fazna i kodna ionosferska refrakcija, dok integral u izrazima odgovara ukupnom sadržaju elektrona na stazi prijama signala od satelita do prijarnika, te je pritom definiran izrazom (35).

Jednadžbe faznih (  $L$  ) i kodnih (  $P$  ) GPS opservacija mogu se izraziti kao (Jin i sur., 2013):

$$L_{k,r}^s = \lambda_k \phi_{k,r}^s = \rho_{0,r}^s - d_{ion,k,r}^s + d_{trop,r}^s + c(\tau^s - \tau_r) - \lambda_k(b_{k,r}^s + N_{k,r}^s) \quad (93)$$

$$P_{k,r}^s = \rho_{0,r}^s + d_{ion,k,r}^s + d_{trop,r}^s + c(\tau^s - \tau_r) + d_{q,k}^s + d_{q,k,r} + \epsilon_r^s \quad , \quad (94)$$

gdje su:

$k$  = indeks frekvencije L pojasa (  $k=1,2$  )

$s$  = satelit

$r$  = prijamnik

$\rho_0$  = geometrijska udaljenost satelita i prijamnika

$d_{ion}$  = ionosfersko kašnjenje signala

$d_{trop}$  = troposfersko kašnjenje signala

$c$  = brzina svjetlosti u vakuumu

$\tau$  = odstupanje sata u satelitu ili prijamniku

$b$  = fazno kašnjenje uzrokovano sklopovskom opremom satelita i prijamnika

$d_q$  = kodno kašnjenje uzrokovano sklopovskom opremom satelita i prijamnika

$\lambda$  = valna duljina vala nosioca

$\phi$  = ukupna faza vala nosioca između satelita i prijamnika

$N$  = neodređenost faze vala nosioca

$\epsilon$  = ostali reziduali pogreški kao npr. sklopovski šum.

Iz gornjih jednadžbi proizlazi (Jin i sur., 2013):

$$P_4 = P_{1,r}^s - P_{2,r}^s = (d_{ion,1,r}^s - d_{ion,2,r}^s) + DCB^s + DCB_r \quad (95)$$

$$L_4 = L_{1,r}^s - L_{2,r}^s = -(d_{ion,1,r}^s - d_{ion,2,r}^s) - \lambda(b_{1,r}^s - b_{2,r}^s) - \lambda(N_{1,r}^s - N_{2,r}^s) \quad (96)$$

gdje su DCB diferencijalna kodna odstupanja (engl. *Differential Code Biases*) satelita i prijamnika i za njih vrijedi:

$$DCB^s = d_1^s - d_2^s \quad , \quad DCB_r = d_{1,r} - d_{2,r} \quad (97)$$

Budući da kodna mjerenja pseudoudaljenosti ( $P_4$ ) imaju veći šum u odnosu na fazna mjerenja ( $L_4$ ), pristupa se izgladivanju kodnih mjerenja pomoću faznih.

Zamjenom jednadžbe (49) u (95) te nakon izgladivanja kodnih mjerenja faznima, dobije se (Jin i sur., 2013):

$$P_{4,sm} = 40,3 \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) TEC + DCB^s + DCB_r \quad (98)$$

$$STEC = -\frac{f_1^2 f_2^2}{40,3 (f_1^2 - f_2^2)} (P_{4,sm} - cDCB_r - cDCB^s) \quad (99)$$

pri čemu je DCB izraženo u jedinici vremena, a rezultirajuća vrijednost ukupnog sadržaja elektrona se odnosi na stazu signala između satelita i prijamnika (STEC). Vertikalna vrijednost ukupnog sadržaja elektrona (VTEC) može se dobiti upotrebom funkcije preslikavanja prema izrazu (36).

Ukupan sadržaj elektrona je iznad opisanom metodom proračunan iz RINEX datoteka za referentnu stanicu najbližu vulkanu (Tablica 3). Proračunane su TEC vrijednosti za svaki 30-sekundni vremenski korak, identičan kao i za proračun odstupanja položaja referentne stanice.

## 5.5 Statistička analiza odstupanja položaja i ukupnog sadržaja elektrona u ovisnosti o vulkanskoj aktivnosti

Kako je dosad pokazano prema metodama definiranim u poglavljima 5.2.4, 5.2.6 i 5.3 i 5.4, osigurana su tri vremenska niza podataka za šest lokacija:

1. Aktivnost vulkana prema spektralnoj radijanciji iz MODVOLC sustava;
2. Odstupanje položaja određenog jednofrekvencijskom GPS metodom;
3. Ukupan sadržaj elektrona određen dvofrekvencijskom GPS metodom.

Ti vremenski nizovi su zatim statistički analizirani u cilju provjere dijela osnovne znanstvene hipoteze, tj. definiranja međusobne povezanosti odstupanja položaja i vulkanske aktivnosti. Pritom je analiziran i statistički odnos ukupnog sadržaja elektrona s preostalim dvama vremenskim nizovima u cilju provjere pomoćne hipoteze koja pretpostavlja utjecaj vulkanske aktivnosti na ukupan sadržaj elektrona i posljedično utječe na ionosfersko kašnjenje satelitskih signala.



U ovom poglavlju je pokazana metodologija provedene statističke analize. U prvim potpoglavljima je proračunan iznos globalne vrijednosti odstupanja položaja jednofrekvencijskom metodom u GPS sustavu. Taj je proračun upotrijebljen kao korektivni faktor za globalne učinke na ionosferu (ponajprije Sunčevu aktivnost). Zatim se daje pregled metode i kriterija grupiranja dana s kategoriziranim stupnjevima vulkanske aktivnosti te se opisuje metodologija statističke obrade i usporedbe svojstava tako kreiranih grupa.

### ***5.5.1 Proračun i ispravka globalnih čimbenika koji utječu na odstupanje položaja***

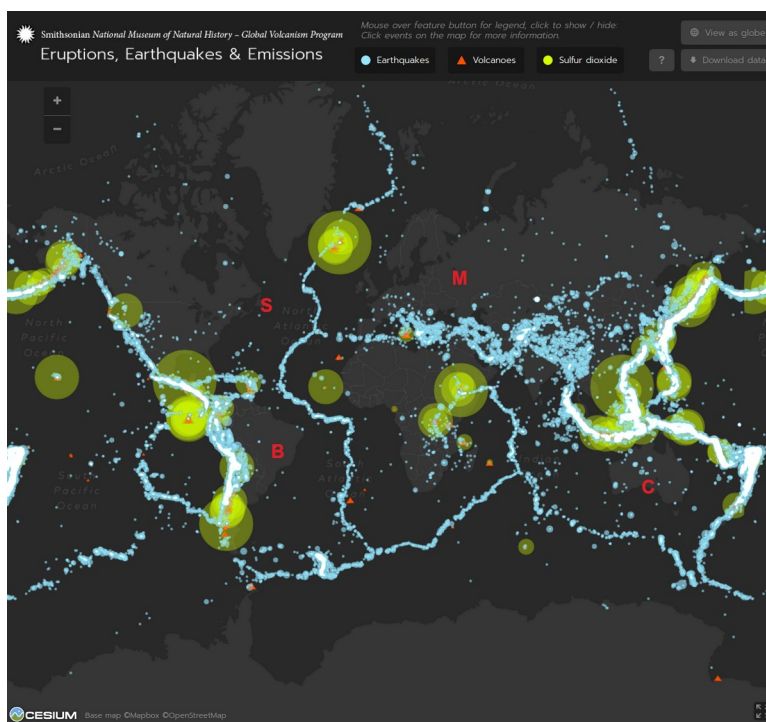
Na električna svojstva atmosfere i posljedično ionosfersko kašnjenje satelitskih navigacijskih signala te pogrešku u izračunu položaja utječu brojni čimbenici od kojih je aktivnost Sunca najznačajniji modifikator (poglavlja 3.11 i 3.12). Promatrano u kontekstu prostornog djelovanja, čimbenici mogu biti globalnog ili lokalnog učinka. Sunčev utjecaj na ionosferska svojstva je u tom smislu globalan budući da se njegovi učinci mogu zamijetiti bilo gdje na planeti. Zbog toga se u radu polazi od hipoteze da je globalne utjecaje moguće umanjiti mjerenjem njihovog učinka na više lokacija na planeti i usrednjavanjem tako dobivenih rezultata.

U cilju izolacije utjecaja vulkanske aktivnosti na raspršenje položaja, određeno je globalno odstupanje položaja dobivenog jednofrekvencijskom metodom GPS sustava, za svaki pojedini dan tijekom promatranog razdoblja. Tako dobiven vremenski niz globalnog odstupanja korišten je za usporedbu s vremenskim nizom odstupanja pojedinih stanica pridruženih promatranim vulkanima. Globalno odstupanje položaja u metodologiji korištenoj u radu je izračunano kao iznos medijana od srednjih dnevnih odstupanja četiri reprezentativne referentne stanice, koje su izabrane prema sljedećim principima:

1. Dostupan period u RINEX formatu na IGS poslužiteljima koji pokriva cijelo razdoblje analize, od 2002. do 2021. godine;

2. Lokacija stanice je prostorno udaljena od tektonski aktivnih područja u svijetu;
3. Dvije stanice s južne i dvije sa sjeverne polutke; pokrivenost tropskih, umjerenih i nešto viših zemljopisnih širina.

Geografski položaj tako odabrane četiri referentne stanice IGS mreže, prikazan je na slici 28.



*Slika 28: Položaji odabranih IGS referentnih stanica za izračun globalnog odstupanja položaja GPS sustava*

*Izvor: <https://volcano.si.axismaps.io/>*

Lokacije odabranih referentnih stanica su na slici naznačene crvenim slovima, kako slijedi: S – St. John's, Kanada; M – Mendeleev, Rusija; B – Brasilia, Brazil; C – Ceduna, Australija. Na slici su za usporedbu položaja stanica u kontekstu područja intenzivne litosferne dinamike, prikazana potresno i vulkanski aktivna područja na Zemlji u periodu 1960. – 2017.

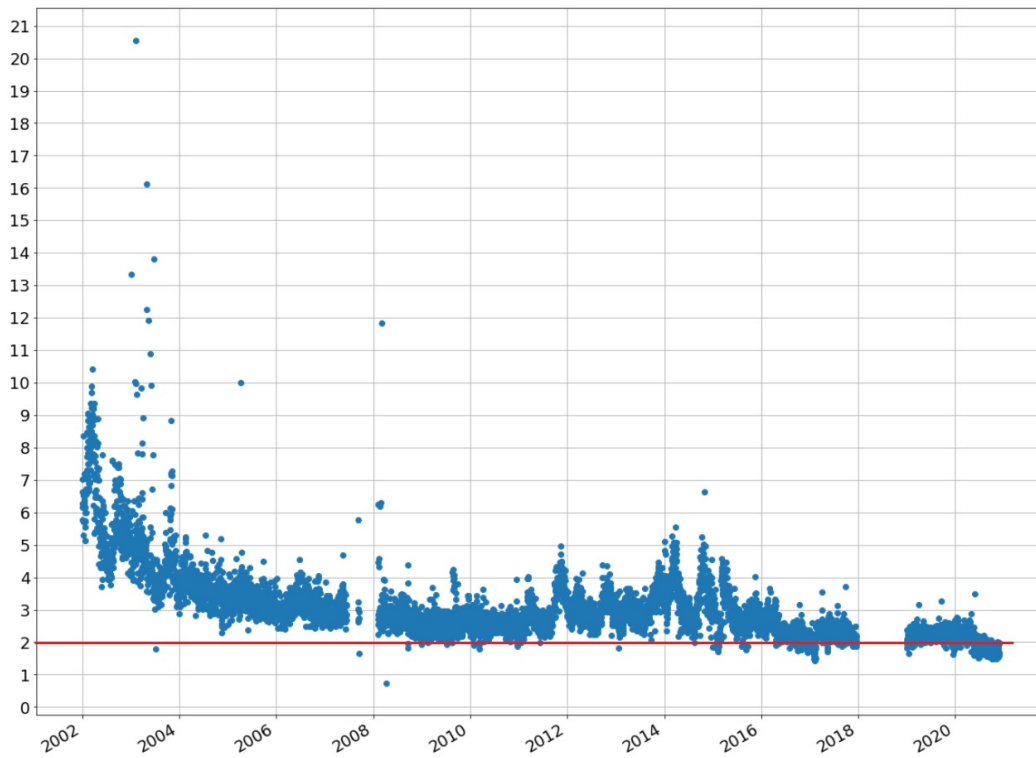
Stanice su izabrane uz nastojanje da se minimizira svaka vulkanska aktivnost na odstupanje njihovog položaja prema GPS sustavu. Izračunani medijan položajnog odstupanja s tih stanica predstavlja prosječan zbir svih globalnih utjecaja na sustav. To je ponajprije ionosfersko kašnjenje uslijed ionizacije Sunčevim zračenjem. Pritom su mogući lokalni utjecaji na četirima izabranim stanicama minimizirani izborom izračuna medijana odstupanja umjesto aritmetičke sredine za svaki pojedini dan promatranog vremenskog niza.

Korištenjem tako dobivenog vremenskog niza kao korektivnog faktora, stvoren je uvjet za postavljanje premise, da nakon eliminacije globalnog odstupanja položaja u sustavu iz vremenskog niza pojedine vulkanske stanice, reziduali koji ostanu, predstavljaju isključivo specifične učinke lokalnih utjecaja. Svakako, tako dobiveni reziduali nisu potpuno definirani vulkanskom aktivnošću, ali eliminacija globalnih utjecaja na odstupanje položaja predstavlja bitan korak prema što boljoj izolaciji učinaka vulkanske aktivnosti korištenjem ostalih statističkih metoda.

Za svaki dan u promatranom vremenskom nizu, izračunan je koeficijent globalnog odstupanja položaja u sustavu ( $K_{go}$ ), kao:

$$K_{go} = \frac{\overline{err}}{T_{go}} \quad , \quad (100)$$

gdje je  $\overline{err}$  medijan srednjih dnevnih odstupanja položaja od 4 stanice, a  $T_{go}$  je temeljno srednje odstupanje položaja s 4 stanice.



Slika 29: Medijan srednjih dnevnih odstupanja položaja od 4 odabrane referentne stanice

Prema plotiranim rezultatima na dijagramu slike 29, kao vrijednost temeljnog sustavnog odstupanja procijenjena je vrijednost od 2 m (Slika 29, crvena horizontalna linija). Tada koeficijent  $K_{go}$  pokazuje koliko na određen dan odstupa 4-stanični medijan pogreške u odnosu na tako procijenjenu temeljnu vrijednost odstupanja.

Vremenski nizovi odstupanja svake pojedine referentne stanice pridružene pojedinom vulkanu, korigirani su za globalne utjecaje tako što je apsolutni dnevni iznos prostornog odstupanja položaja za svaku stanicu, podijeljen s koeficijentom globalnog odstupanja položaja  $K_{go}$  za odgovarajući dan:

$$rez = \frac{err}{K_{go}} \quad , \quad (101)$$

gdje je  $err$  srednje dnevno prostorno odstupanje za određenu referentnu stanicu.

Tako korigiran vremenski niz predstavlja odstupanje položaja stanice iz kojeg je maksimalno eliminiran iznos pogreške koja nastaje uslijed općih, globalnih učinaka, pa tako predstavlja pretežito specifične, lokalne učinke koji dovode do odstupanja, odnosno raspršenja položaja izračunanog GPS sustavom. U tekstu se nadalje na ovako dobiven vremenski niz referira nazivom *reziduali prostornog odstupanja položaja*.

### ***5.5.2 Ujednačavanje frekvencije podataka i korišteni statistički pokazatelji***

Pojedini analizirani vremenski nizovi dobiveni dosad opisanim metodama imaju različite vremenske razlučivosti. Podaci o spektralnoj radijanciji iz MODVOLC sustava su raspoloživi u vremenskim koracima od jedan dan, pa su zato svi ostali izračunani vremenski nizovi koji po svojim izvornim karakteristikama imaju veću vremensku razlučivost, svedeni na isti vremenski korak kako bi se mogli međusobno statistički analizirati (engl. *resample* funkcija). Prostorna odstupanja su svedena na vremenski korak od jednog dana izračunom aritmetičke sredine iznosa reziduala kroz 24-satne periode kako je već definirano u prethodnim poglavljima. Podaci o ukupnom sadržaju elektrona za svaki dan su također svedeni na srednje dnevne vrijednosti izračunom aritmetičke sredine od svih 30-sekundnih iznosa tijekom 24-satnog razdoblja.

Osim tih vremenskih nizova, dodatno su izračunane i standardne devijacije od 30-sekundnih podataka za svako 24-satno razdoblje i to za rezidualne prostornog odstupanja i ukupan sadržaj elektrona te srednja kvadratna pogreška reziduala prostornog odstupanja.

Time je dobiveno sljedećih 5 vremenskih nizova, tj. promatranih statističkih pokazatelja, s vremenskim korakom od 1 dan:

1. Aritmetička sredina reziduala prostornog odstupanja položaja;
2. Aritmetička sredina ukupnog sadržaja elektrona;

3. Standardna devijacija reziduala prostornog odstupanja položaja;
4. Standardna devijacija ukupnog sadržaja elektrona;
5. Srednja kvadratna pogreška reziduala prostornog odstupanja položaja.

Aritmetičke sredine reziduala prostornog odstupanja položaja i ukupnog sadržaja elektrona (točke 1 i 2), osim za 24-satne periode, dodatno su izračunane odvojeno za noćne i za dnevne periode.

### ***5.5.3 Grupiranje aktivnih i neaktivnih dana i izračun srednjih vrijednosti u grupama***

Vulkanska aktivnost, promatrana kroz iznos spektralne radijancije za svaki analizirani vulkan, grupirana je u dvije grupe dana s dijametralno suprotnih krajeva spektra:

1. **Aktivna grupa** predstavlja dane najveće aktivnosti pojedinog vulkana unutar cijelog promatranog vremenskog niza (najveće spektralne radijancije);
2. **Neaktivna grupa** predstavlja dane najmanje aktivnosti (najmanje spektralne radijancije).

Za broj dana u svakoj grupi, uzeto je po **100** dana.

Za svaki dan u tako formiranim grupama, definirano je kontinuirano razdoblje koje se sastoji od 40 prethodnih i 40 sljedećih dana, ukupno 81 dan u nizu. Taj niz dana su zbog jasnoće referiranja kroz tekst, nazvani ***indeks-dani***. Četrdeset prethodećih dana izabrano je zbog razmatrane hipoteze koja pretpostavlja da tijekom pripremnih prederuptivnih procesa dolazi do povećanja tlaka u Zemljinoj kori (uslijed nadiranja magme), te posljedičnog povećanja stope emanacije  $R_n$  i

drugih plinova iz tla i vulkanskog kratera. Zbog toga je potrebno analizom obuhvatiti i prederuptivno razdoblje. Postderuptivnih 40 dana je analizirano prvenstveno zbog učinaka izbačenih vulkanskih čestica i plinova.

Definiranjem razdoblja prije i nakon svakog od dana u grupama, u objema grupama je dobiveno po 100 razdoblja duljine 81 indeks-dan. Zatim je za svaki indeks-dan  $\{-40, \dots, 40\}$  izračunana aritmetička sredina promatranih statističkih pokazatelja od pojedinačnih vrijednosti 100 članova grupe. Opisani koncept je zbog jasnoće vizualiziran tablicom 4.

Tablica 4: Konceptualni prikaz usrednjavanja podataka u grupama

	indeks-dani										
	-40	-39	...	-2	-1	0	1	2	...	39	40
1	$X_{1,-40}$	$X_{1,-39}$	...	$X_{1,-2}$	$X_{1,-1}$	$X_{1,0}$	$X_{1,1}$	$X_{1,2}$	...	$X_{1,39}$	$X_{1,40}$
2	$X_{2,-40}$	$X_{2,-39}$	...	$X_{2,-2}$	$X_{2,-1}$	$X_{2,0}$	$X_{2,1}$	$X_{2,2}$	...	$X_{2,39}$	$X_{2,40}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
99	$X_{99,-40}$	$X_{99,-39}$	...	$X_{99,-2}$	$X_{99,-1}$	$X_{99,0}$	$X_{99,1}$	$X_{99,2}$	...	$X_{99,39}$	$X_{99,40}$
100	$X_{100,-40}$	$X_{100,-39}$	...	$X_{100,-2}$	$X_{100,-1}$	$X_{100,0}$	$X_{100,1}$	$X_{100,2}$	...	$X_{100,39}$	$X_{100,40}$
$\bar{X}_i$	$\bar{X}_{-40}$	$\bar{X}_{-39}$	...	$\bar{X}_{-2}$	$\bar{X}_{-1}$	$\bar{X}_0$	$\bar{X}_1$	$\bar{X}_2$	...	$\bar{X}_{39}$	$\bar{X}_{40}$

U redovima tablice 4 su prikazani članovi aktivne ili neaktivne grupe;  $j = \{1, \dots, 100\}$ . U stupcima su poredani indeks-dani;  $i = \{-40, \dots, 40\}$ . Zadnji red tablice predstavlja srednju vrijednost promatranog parametra  $x$  po stupcima.

Pisano matematički,

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^{100} x^j}{100} \quad (102)$$

gdje  $x$  predstavlja po jedan od pet promatranih statističkih pokazatelja, definiranih popisom 1 – 5 u poglavlju 5.5.2.

Rezultati tako provedene analize prikazani su grafički i tablično u sljedećim poglavljima.

## 5.6 Rezultati analize odstupanja položaja i ukupnog sadržaja elektrona u ovisnosti o vulkanskoj aktivnosti

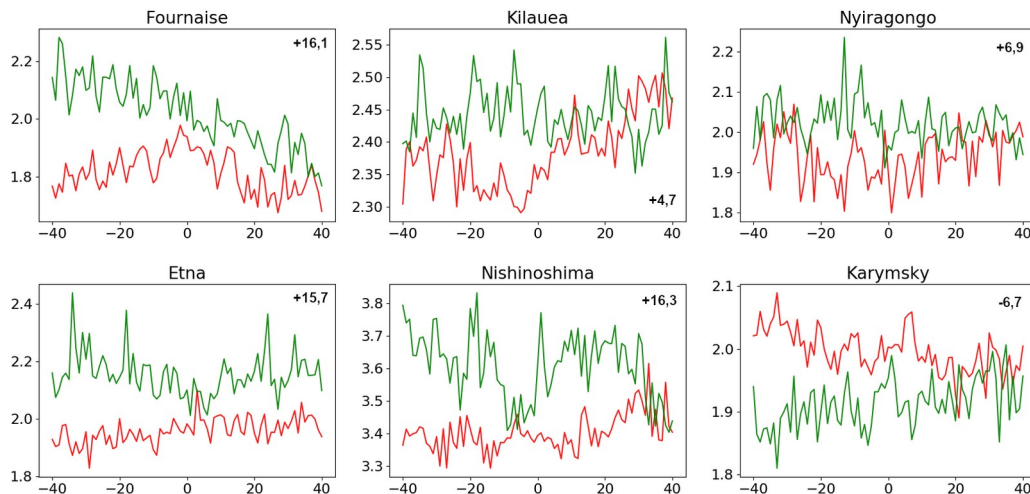
Na dijagramima prezentiranim u ovom poglavlju, prikazani su rezultati statističke analize reziduala odstupanja položaja i srednjih TEC vrijednosti prema opisanoj metodologiji u prethodnim poglavljima. Promatrano u kontekstu visokog stupnja stohastičnosti položajne točnosti, prikazani dijagrami predstavljaju statističku ravnotežu korisničkog položaja u funkciji utjecaja vulkanske aktivnosti. Na svim dijagramima koji prikazuju usrednjene rezultate u dvjema grupama, vrijedi:

- *zelene krivulje* predstavljaju podatke koji se odnose na periode najmanje vulkanske aktivnosti (neaktivna grupa)
- *crvene krivulje* predstavljaju podatke koji se odnose na periode najveće vulkanske aktivnosti (aktivna grupa).

### A) Reziduali odstupanja položaja (aritmetička sredina)

Rezultati izračuna reziduala prostornog odstupanja položaja po aritmetičkoj sredini 24-satnih perioda, prema indeks-danima za aktivnu i neaktivnu grupu prikazani su na slici 30. Prikazani su rezultati za svih 6 analiziranih vulkana.





Slika 30: Reziduali prostornog odstupanja (24-satna aritmetička sredina)

Na osi apscisa su indeks-dani, a na osi ordinata metri; Zeleno: neaktivna grupa, crveno: aktivna grupa

Na ordinati se nalaze reziduali prostornog odstupanja položaja stanice pridružene pojedinom vulkanu, za izračun položaja jednofrekvencijskom metodom. Broj na grafu svakog vulkana predstavlja razliku površina ispod krivulja (*zelena minus crvena*; detaljnije objašnjenje metode izračuna te upotrijebljenih mjernih jedinica za površinu je prezentirano niže, u poglavlju 5.6.2). Pozitivna vrijednost broja znači da je površina ispod krivulje neaktivnih dana veća od površine ispod krivulje aktivnih dana. Odnosno, pozitivan broj predstavlja situaciju kad su reziduali prostornog odstupanja položaja u neaktivnim periodima općenito većih iznosa nego reziduali odstupanja u aktivnim periodima.

Metoda izračuna površine ispod krivulja, prikazana je u poglavlju 5.6.2.

## B) Reziduali odstupanja položaja (srednja kvadratna pogreška)

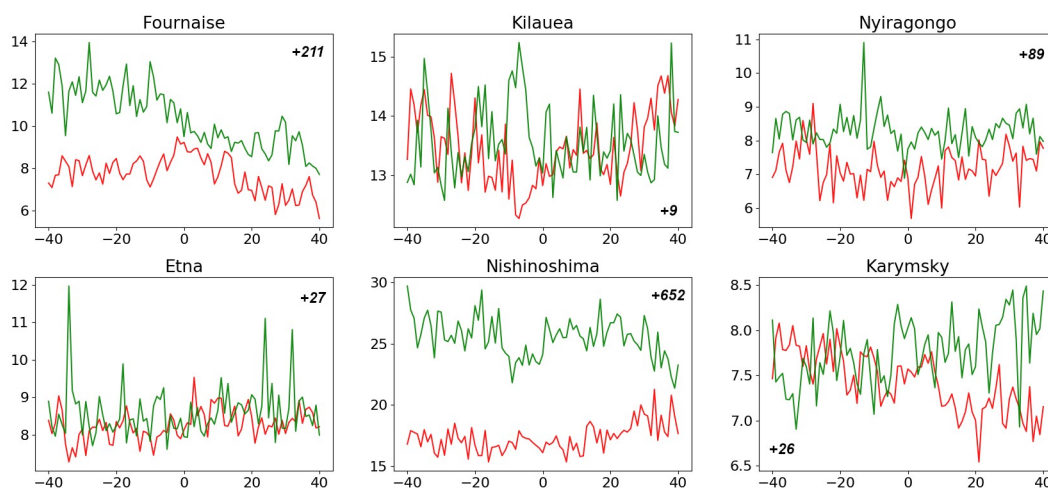
Reziduali prostornog odstupanja položaja su u radu osim aritmetičkom sredinom unutar 24-satnih razdoblja, predstavljeni i srednjom kvadratnom pogreškom (engl. *mean squared error*). Ovaj statistički pokazatelj je uključen u razmatranje u cilju penalizacije većih vrijednosti odstupanja položaja. Srednja kvadratna pogreška će

imati velik iznos kad tijekom 24-satnih razdoblja postoje izraženije vrijednosti pojedinačnih odstupanja položaja od referentnog. Srednja kvadratna pogreška za svako 24-satno razdoblje izračunana je prema izrazu:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (err_i)^2, \quad (103)$$

gdje je  $n$  broj mjerenja položaja unutar 24 sata ( $n = (60 \cdot 60 \cdot 24) / 30 = 2880$  za korištene 30-sekundne intervale u RINEX datotekama), dok  $err_i$  predstavlja pojedinačne iznose prostornog odstupanja GPS od stvarnog položaja.

Rezultati tako provedene analize srednje kvadratne pogreške reziduala odstupanja, usrednjene po indeks-danima su prikazani na slici 31.



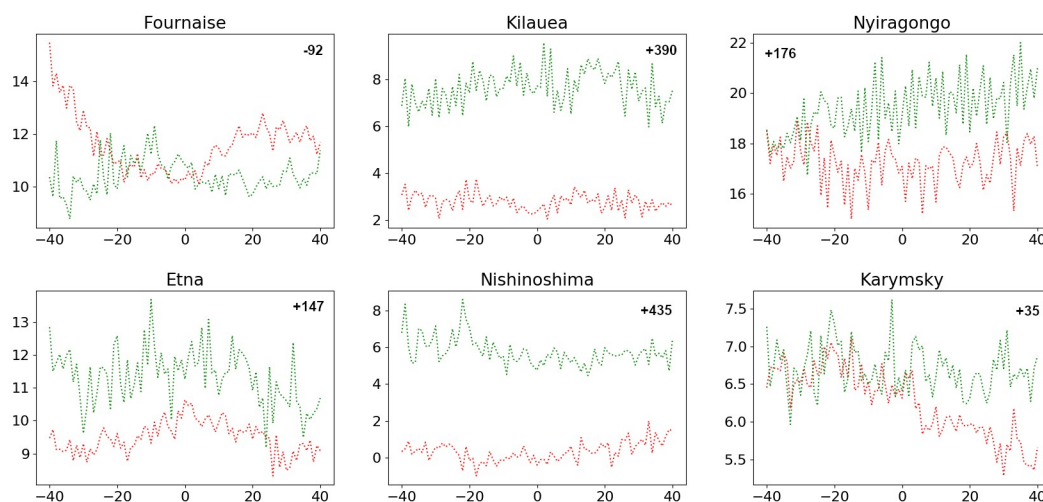
Slika 31: Reziduali prostornog odstupanja (24-satna srednja kvadratna pogreška)

Izračun srednje kvadratne pogreške reziduala odstupanja u usporedbi s identičnim pokazateljem temeljenim na aritmetičkoj sredini pokazuje općenito slične obrasce. Pri izračunu srednje kvadratne pogreške do većeg izražaja dolaze ekstremi odstupanja, jasno uočljivi na grafu primjerice Etne (zelena linija).

Za reziduale prostornog odstupanja položaja, osim aritmetičke sredine i srednje kvadratne pogreške za 24-satna razdoblja od 30-sekundnih podataka, izračunana je i standardna devijacija prostornog odstupanja. U cilju zadržavanja rada preglednim, dijagrami standardne devijacije zasebno po vulkanima nisu prikazani jer sami za sebe ne bi pružili dodatnu vrijednost radu. Identično tome, dijagrami standardne devijacije ukupnog sadržaja elektrona također nisu prezentirani zasebno po vulkanima. Umjesto grafičkim prikazima, rezultati analize standardne devijacije oba parametra prema površinama ispod krivulja su dani samo tablično (Tablica 7), te prezentirani na zbirnim dijagramima (Slika 39).

### C) Ukupni sadržaj elektrona (aritmetička sredina)

Izračuni ukupnog sadržaja elektrona po aritmetičkoj sredini 24-satnih perioda, prema indeks-danima za aktivnu i neaktivnu grupu dana prikazani su na slici 32. Kao i položajna točnost, i ukupan sadržaj elektrona pokazuje svojstvo visoke stohastičnosti te ga je potrebno promatrati u tom kontekstu.



Slika 32: Ukupan sadržaj elektrona (24-satna aritmetička sredina)  
Na osi apscisa su indeks-dani, a na osi ordinata TECU

Na osi ordinata se nalaze vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona izračunanog dvofrekvencijskim opažanjima s referentne stanice pridružene pojedinom vulkanu. Kao i na prethodnoj slici, broj na dijagramu svakog vulkana predstavlja razliku površina ispod krivulja. U ovome slučaju, pozitivna vrijednost broja predstavlja situaciju kad su mjerenja ukupnog sadržaja elektrona u neaktivnim periodima općenito većih vrijednosti u odnosu na aktivne periode.

### ***5.6.1 Odvojene analize odstupanja položaja i ukupnog sadržaja elektrona za noćne i dnevne periode***

Tijekom analiziranja razlika između aktivne i neaktivne grupe, pretpostavljeno je da bi se mogli uočiti bitno drugačiji obrasci u ponašanju odstupanja položaja i/ili ukupnog sadržaja elektrona u dnevnim, u odnosu na noćne periode. Ta se pretpostavka temeljila na hipotetskoj mogućnosti da vulkanska aktivnost ima bitno drugačije učinke na atmosferski elektricitet onda kad su vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona forsirane Sunčevim zračenjem znatno drugačije (dan/noć). Zbog toga je proračun reziduala odstupanja i ukupnog sadržaja elektrona, dodatno izrađen zasebno za noćne i za dnevne periode. Za potrebe tog proračuna, 30-sekundni vremenski nizovi odstupanja položaja i ukupnog sadržaja elektrona su filtrirani prema lokalnom vremenu zemljopisne dužine stanice/vulkana, s ciljem odvojenog izračuna odstupanja za noćne i dnevne periode.

Za period noćnih sati, primijenjen je vremenski filter koji uzima u proračun 30-sekundne termine koji se nalaze između ponoći i 3 h ujutro prema lokalnom vremenu vulkana/referentne stanice. Taj period je odabran s ciljem zahvaćanja onog dijela 24-satnog razdoblja u kojem su ionosferski procesi najmirniji u kontekstu dnevnog hoda vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona forsiranog Sunčevim zračenjem.

Za period dnevnih sati, primijenjen je vremenski filter koji uzima u proračun 30-sekundne termine koji se nalaze između podne i 15 h po lokalnom vremenu vulkana/referentne stanice. Dnevni period je odabran s ciljem zahvaćanja dijela 24-

satnog razdoblja u kojem je ionosfera značajno pobuđena djelovanjem Sunčevog zračenja, te su 24-satne vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona općenito na maksimumu.

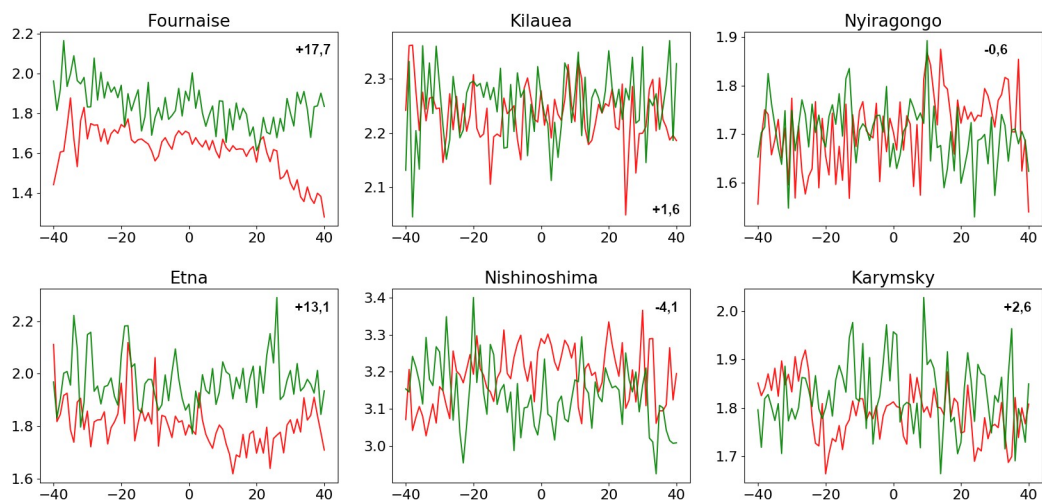
Tako odabrani periodi lokalnog vremena, proračunani u UTC vrijeme, po vulkanima su dani u tablici 5.

*Tablica 5: UTC razdoblja korištena za vremenske filtre dnevnih i noćnih perioda.*

Vulkan	Noćni period (UTC)	Dnevni period (UTC)
Etna	23:00 – 02:00	11:00 – 14:00
Nyiragongo	22:00 – 01:00	10:00 – 13:00
Kilauea	09:00 – 12:00	21:00 – 00:00
Fournaise	21:00 – 00:00	09:00 – 12:00
Karymsky	13:00 – 16:00	01:00 – 04:00
Nishinoshima	14:00 – 17:00	02:00 – 05:00

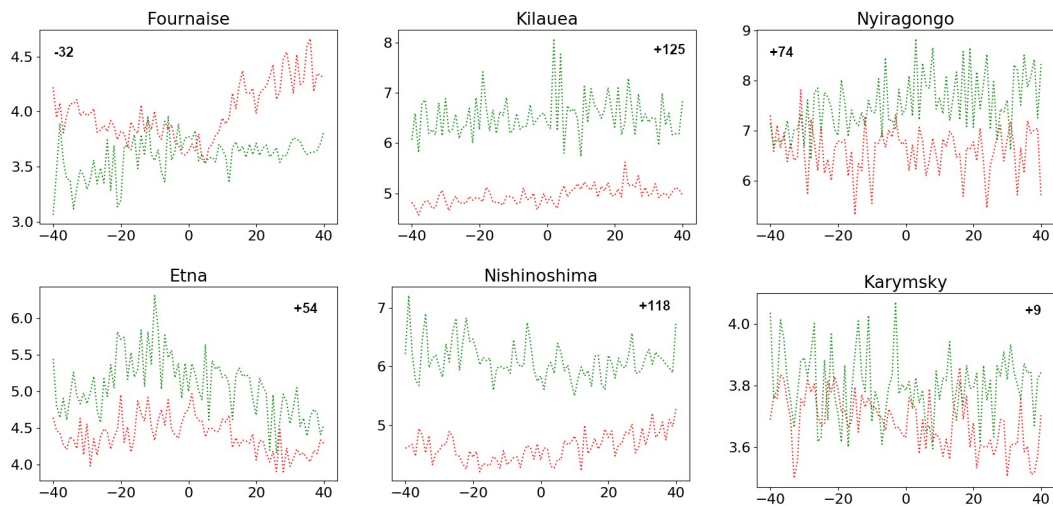
S tako postavljenim vremenskim filtrima, proveden je opisan postupak izračuna aritmetičke sredine vrijednosti prostornog odstupanja i ukupnog sadržaja elektrona te standardne devijacije podataka. Rezultati za izračunana noćna i dnevna odstupanja i ukupan sadržaj elektrona prikazani su na sljedećim slikama.

#### **A) Reziduali odstupanja položaja (aritmetička sredina) – noćni period**



Slika 33: Reziduali noćnog prostornog odstupanja (24-satna aritmetička sredina)  
 Apscisa: indeks-dani, ordinata: metri

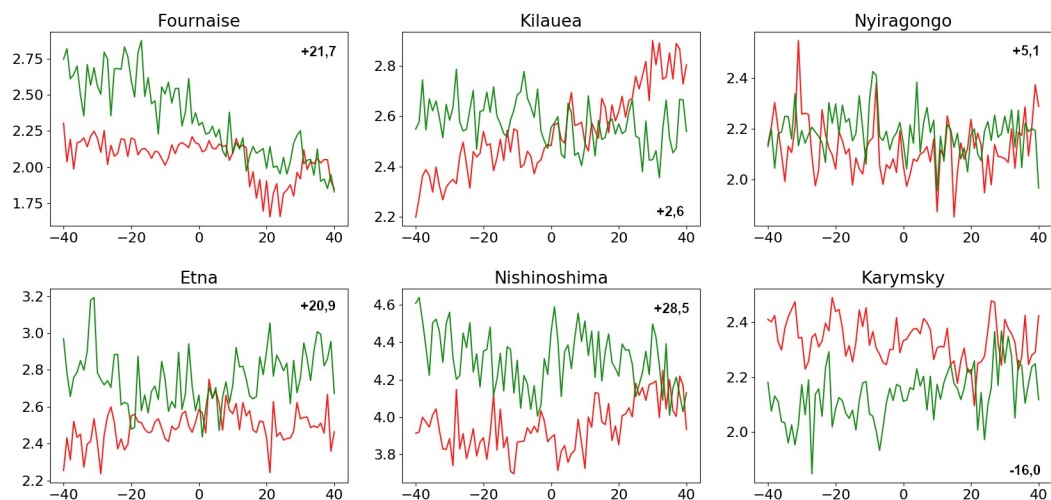
### B) Ukupni sadržaj elektrona (aritmetička sredina) — noćni period



Slika 34: Noćni ukupni sadržaj elektrona (24-satna aritmetička sredina)  
 Apscisa: indeks-dani, ordinata: TECU

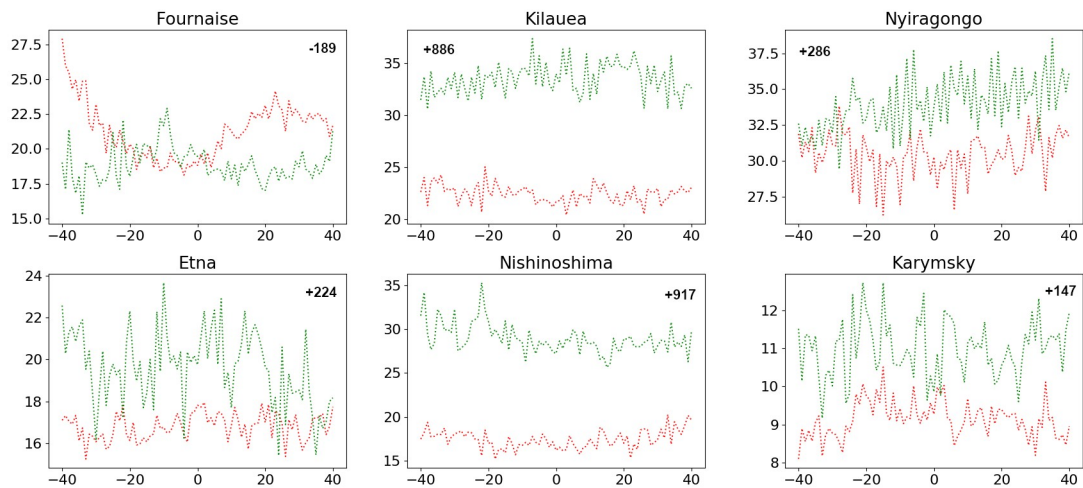
### A) Reziduali odstupanja položaja (aritmetička sredina) — dnevni period





Slika 35: Reziduali dnevnog prostornog odstupanja (24-satna aritmetička sredina)  
 Apscisa: indeks-dani, ordinata: metri.

### B) Ukupni sadržaj elektrona (aritmetička sredina) — dnevni period



Slika 36: Dnevni ukupni sadržaj elektrona (24-satna aritmetička sredina)  
 Apscisa: indeks-dani, ordinata: TECU

Sistematizaciju prikazanih rezultata za dnevna i noćna razdoblja donosi poglavlje 5.6.3 gdje se tablično i na zajedničkim dijagramima prezentiraju međusobne usporedbe površina ispod krivulja za odstupanje položaja i ukupan sadržaj elektrona. Razmatranja rezultata nalaze se u poglavlju 5.8.

### **5.6.2 Izračun površina između krivulja za aktivne i neaktivne dane**

U prethodnim poglavljima na grafičkim prikazima su naznačene brojke koje predstavljaju razliku između površina ispod zelene i crvene linije. U ovom poglavlju je prikazana metodologija izračuna tih površina. Površine su računane s ciljem kvantificiranja razlika u izračunanim prostornim odstupanjima položaja te ukupnog sadržaja elektrona, između grupa aktivnih i neaktivnih dana.

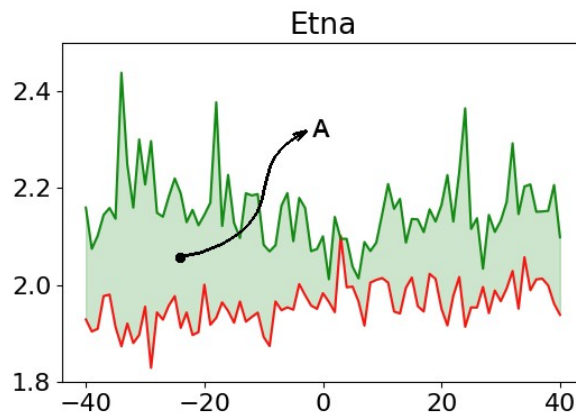
Površina između krivulja grupa neaktivnih i aktivnih dana, izračunana je kao razlika između površina ispod tih dviju krivulja:

$$A = \int_{-40}^{40} \int_{rez_{mean, a}}^{rez_{mean, s}} dx dt \quad , \quad (104)$$

gdje je  $dx$  diferencijal reziduala u metrima, a  $dt$  diferencijal dana.

Koncept izračuna površine vizualno je prikazan sljedećom slikom.





Slika 37: Konceptualni prikaz definicije površine između krivulja  
 Apscisa: indeks-dani, ordinata: metri

Prema slici 37, površina  $A$  je definirana kao površina između krivulja grupe neaktivnih i grupe aktivnih dana. Budući da zelena linija predstavlja neaktivnu grupu, a crvena aktivnu, proizlazi da je rezultirajuća površina  $A$  pozitivna onda kad je površina ispod krivulje grupe neaktivnih dana  $A_n$  veća nego površina ispod krivulje grupe aktivnih dana  $A_a$ .

Važno je napomenuti da u geometrijskom smislu površina ne može imati negativnu vrijednost. Svejedno, u radu je često korišten izraz "negativne površine" ili "površine negativnog predznaka", pri čemu se referira na vrijednost matematičkog izračuna kad je površina ispod krivulje grupe neaktivnih dana ( $A_n$ ) manja od površine krivulje grupe aktivnih dana ( $A_a$ ).

Za potrebe strojnog izračunavanja površina, korišteno je pravilo trapezoida (npr. Hazewinkel, 2001), pa su tako  $A_n$  i  $A_a$  izračunane kao:

$$A_n = \frac{\Delta x}{2} [rez_{mean, -40, n} + 2 \cdot rez_{mean, -39, n} + 2 \cdot rez_{mean, -38, n} + \dots + 2 \cdot rez_{mean, 39, n} + rez_{mean, 40, n}] \quad (105)$$

$$A_a = \frac{\Delta x}{2} [rez_{mean,-40,a} + 2 \cdot rez_{mean,-39,a} + 2 \cdot rez_{mean,-38,a} + \dots + 2 \cdot rez_{mean,39,a} + rez_{mean,40,a}] \quad (106)$$

gdje je  $\Delta x$  vremenska razlika između dvaju susjednih indeks-dana, odnosno = 1 (dan). Identičan proračun površine između krivulja kao za rezidualne odstupanja, proveden je i za ukupan sadržaj elektrona.

Budući da su na apscisi indeks-dani, a na ordinati metri za rezidualne odstupanja, odnosno TECU za ukupan sadržaj elektrona, kao mjerne jedinice za površine između krivulja proizlazi:

- metar-indeks-dan (upotrijebljena oznaka: mid) za površinu između krivulja grupa reziduala prostornog odstupanja položaja
- TECU-indeks-dan (upotrijebljena oznaka: Tid) za površinu između krivulja grupa ukupnog sadržaja elektrona.

U sljedećem poglavlju su prikazani zbirni rezultati izračuna površina između krivulja za svih 5 analiziranih statističkih pokazatelja.

### ***5.6.3 Rezultati izračuna površina između krivulja aktivne i neaktivne grupe***

Rezultati izračuna površine  $A$  za pojedini vulkan, prikazani su tablično. S ciljem lakše usporedbe, u istoj tablici je prikazan rezultat izračuna reziduala prostornog odstupanja položaja kao i ukupnog sadržaja elektrona. Rezultati izračuna reziduala odstupanja prikazani su za obje metode 24-satne statističke analize (aritmetička sredina – regularni font i srednja kvadratna pogreška – podebljani font), Tablica 6.

Tablica 6: Površine (  $\bar{A}$  ) između krivulja reziduala prostornog odstupanja položaja i ukupnog sadržaja elektrona po indeks-danima

		Fournaise	Kilauea	Nyiragongo	Etna	Nishinoshima	Karymsky
Reziduali odstupanja (mid)	24 h	+16,1 / <b>+211</b>	+4,7 / <b>+9</b>	+6,9 / <b>+89</b>	+15,7 / <b>+27</b>	+16,3 / <b>+652</b>	<b>-6,7 / +26</b>
	dan	+21,7	+2,6	+5,1	+20,9	+28,5	<b>-16,0</b>
	noć	+17,7	+1,6	<b>-0,6</b>	+13,1	<b>-4,1</b>	+2,6
TEC (Tid)	24 h	<b>-92</b>	+390	+176	+147	+435	+35
	dan	<b>-189</b>	+886	+286	+224	+917	+147
	noć	<b>-32</b>	+125	+74	+54	+118	+9

U tablici su crvenom bojom označene vrijednosti gdje je površina ispod krivulje za aktivne dane veća nego površina za neaktivne dane. Podebljanim fontom (bold) su označene vrijednosti reziduala prostornog odstupanja položaja dobivene izračunom srednje kvadratne pogreške.

Identičan izračun površina između krivulja reziduala prostornog odstupanja i ukupnog sadržaja elektrona, proveden je i za vrijednosti standardne devijacije podataka za svaki dan. Rezultati su dani tablično.

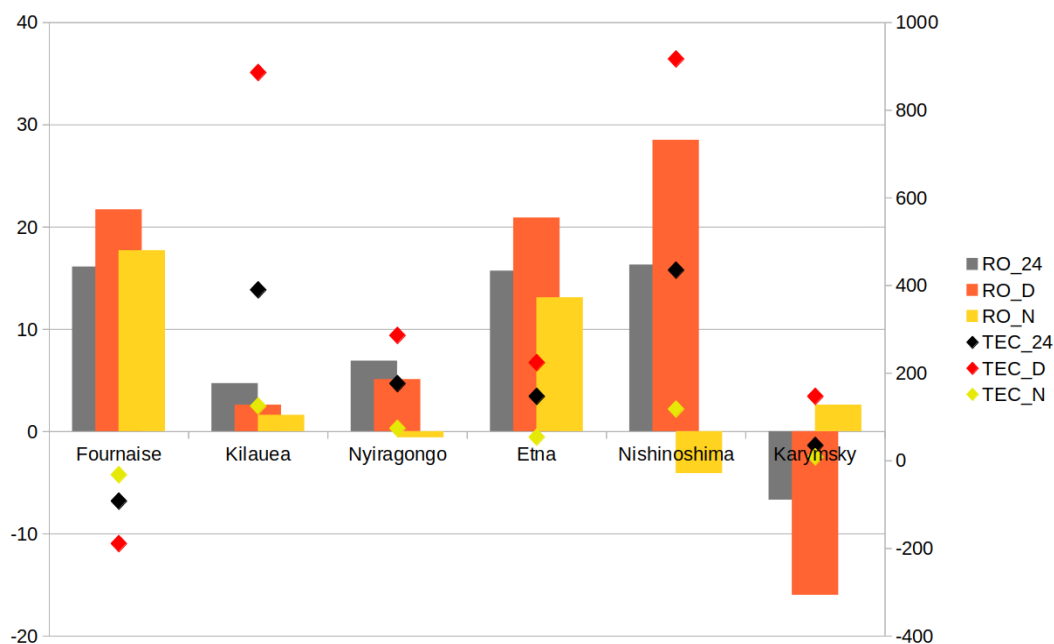
Tablica 7: Površine (  $A$  ) između krivulja standardnih devijacija reziduala prostornog odstupanja položaja i ukupnog sadržaja elektrona po indeks-danima

		Fournaise	Kilauea	Nyiragongo	Etna	Nishinoshima	Karymsky
Reziduali odstupanja (mid)	24 h	+6,6	+2,8	+8,4	+11,6	+48,0	+5,5
	dan	+23,2	-1,1	+3,3	+2,4	+30,6	-1,7
	noć	-0,9	+1,4	+2,4	+14,1	+16,4	+12,0
TEC (Tid)	24 h	-77	+340	+107	+103	+332	+62
	dan	-42	+170	+26	+18	+109	+20
	noć	-4	+60	+47	+24	+49	-3

Kao i u prethodnoj tablici, crvena boja označava podatke gdje vrijednosti kvalitativno odstupaju od općenitog obrasca.

Podaci iz tablica 6 i 7 također su prikazani grafički kako slijedi.

Na sljedećem dijagramu je prikazana usporedba rezultata izračuna površina između krivulja iz tablica 6 i 7.



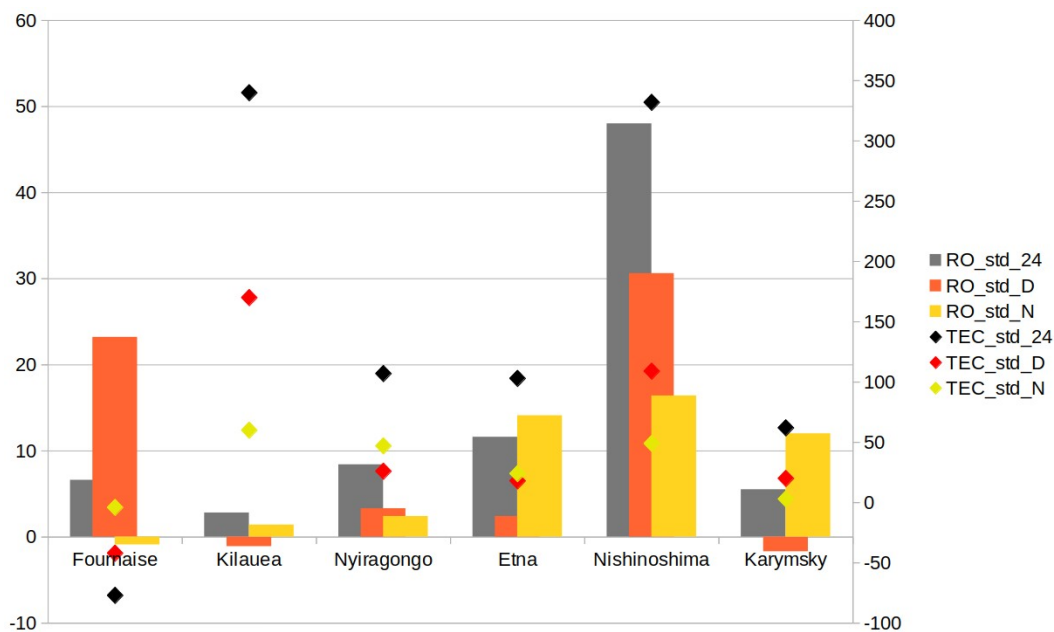
Slika 38: Usporedba površina ( $A$ ) između krivulja aktivnih i neaktivnih perioda, po rezidualima odstupanja i ukupnom sadržaju elektrona  
 Statistički pokazatelj: aritmetička sredina

Na slici 38 lijeva ordinata predstavlja površine između linija reziduala prostornog odstupanja položaja u mjernim jedinicama metar-indeks-dani. Desna ordinata predstavlja površine između linija ukupnog sadržaja elektrona u mjernim jedinicama TECU-indeks-dani. Pritom su oznake u legendi:

- RO = reziduali odstupanja (stupići)
- TEC = ukupan sadržaj elektrona (rombovi)
- 24 = 24-satni period
- D = dnevni period (lokalno vrijeme 12 – 15 h)
- N = noćni period (lokalno vrijeme 0 – 3 h).

Za rezidualne odstupanja, pozitivna vrijednost na dijagramu predstavlja veća odstupanja položaja u neaktivnim periodima i obratno. Za ukupni sadržaj elektrona, pozitivna vrijednost predstavlja veći ukupni sadržaj elektrona u neaktivnim periodima i obratno.

Slično, usporedba površina ispod krivulja za standardne devijacije podataka, prikazana je na sljedećem dijagramu.



Slika 39: Usporedba površina ( $A$ ) između krivulja aktivnih i neaktivnih perioda, po rezidualima odstupanja i ukupnom sadržaju elektrona  
 Statistički pokazatelj: standardna devijacija

Osi dijagrama i mjerne jedinice su identične kao na slici 38. Pozitivne vrijednosti predstavljaju veće standardne devijacije reziduala prostornog odstupanja položaja, te veće standardne devijacije ukupnog sadržaja elektrona, u neaktivnim periodima u odnosu na aktivne periode.

#### 5.6.4 Osjetljivost odstupanja položaja s obzirom na intenzitet aktivnosti vulkana

U dosadašnjem dijelu izlaganja razmatrana je analiza grupiranja dana iz vremenskih nizova s krajeva spektra vulkanske aktivnosti. Tako je neaktivnu grupu predstavljalo 100 dana s najnižim vrijednostima spektralne radijancije vulkana, a aktivnu grupu 100 dana s najvišim vrijednostima. Takvo dizajniranje

istraživanja je imalo za cilj izračun statističkih pokazatelja u što je moguće različitim uvjetima na skali vulkanske aktivnosti, kako bi se što bolje izolirao signal vulkanskog utjecaja u odnosu na sve ostale čimbenike koji predstavljaju šum.

S ciljem određivanja finije gradacije u povezanosti intenziteta aktivnosti vulkana i raspršenja položaja dobivenog jednofrekvencijskim GPS mjerenjima, izračunane su površine između krivulja reziduala prostornog odstupanja položaja ( $A$ ) za različite stupnjeve intenziteta aktivnosti, prema podacima svih 6 vulkana. Podaci vulkana su grupirani u najviše 10 grupa za svaki vulkan.

Grupe za ovaj dio analize su formirane na način da je za svaki stupanj intenziteta uzeto po 100 sekvencijalnih dana iz niza podataka silazno sortiranog po iznosu spektralne radijancije. Svaki niži stupanj po iznosu spektralne radijancije sadrži sljedećih 100 dana niza. Time je formirano do 10 grupa dana koje predstavljaju aktivne periode različitog stupnja intenziteta. Vulkan koji imaju manje od 1000 dana u rezultirajućem setu podataka koji sadrži oba podatka (spektralna radijancija i odstupanje) nisu u mogućnosti stvoriti svih 10 grupa (to su vulkani Fournaise i Nishinoshima) pa je za njih broj grupa ograničen na maksimalno moguć, prema količini raspoloživih podataka.

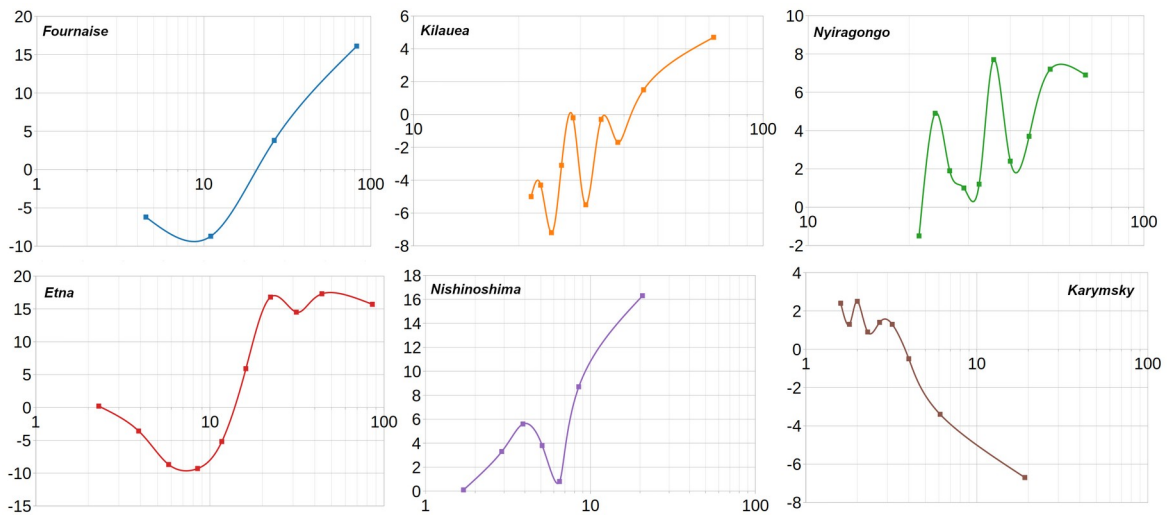
Za svaku aktivnu grupu intenziteta izračunana je površina  $A$  između krivulje specifične grupe aktivnih dana i krivulje neaktivnih dana, identičnom metodom kao u prethodnim izračunima. Za razliku od aktivnih grupa, neaktivna grupa uvijek sadrži identične dane (100 dana s najnižom vrijednošću spektralne radijancije). Srednja vrijednost spektralne radijancije ( $L$ ) za svaku 100-dnevnu grupu aktivnosti uz pripadajuće rezultate površine  $A$  dani su u tablici 8 te na slici 40.

Tablica 8: Srednja vrijednost spektralne radijancije  $L$  i iznos površine  $A$   
 Statistički pokazatelj: aritmetička sredina

Grupa	Fournaise		Kilauea		Nyiragongo		Etna		Nishinoshima		Karymsky	
	L	A	L	A	L	A	L	A	L	A	L	A
0-100	82,3	16,1	72,2	4,7	67,0	6,9	85,8	15,7	20,7	16,3	19,1	-6,7
100-200	26,4	3,8	45,5	1,5	52,6	7,2	44,0	17,3	8,5	8,7	6,1	-3,4
200-300	11,0	-8,7	38,4	-1,7	45,5	3,7	31,4	14,5	6,5	0,8	4,0	-0,5
300-400	4,5	-6,2	34,4	-0,3	40,0	2,4	22,3	16,8	5,1	3,8	3,2	1,3
400-500			31,1	-5,5	35,7	7,7	16,1	5,9	3,9	5,6	2,7	1,4
500-600			28,6	-0,2	32,3	1,2	11,7	-5,2	2,9	3,3	2,3	0,9
700-800			26,5	-3,1	29,1	1,0	8,5	-9,3	1,7	0,1	2,0	2,5
800-900			24,8	-7,2	26,4	1,9	5,8	-8,7			1,8	1,3
900-1000			23,1	-4,3	23,9	4,9	3,9	-3,6			1,6	2,4
1000-1100			21,7	-5,0	21,4	-1,5	2,3	0,2				

Grafički prikaz ovisnosti površine između krivulja reziduala prostornog odstupanja s obzirom na stupanj aktivnosti vulkana donosi Slika 40.





Slika 40: Površina između krivulja reziduala prostornog odstupanja položaja u ovisnosti o stupnju aktivnosti vulkana

Statistički pokazatelj: aritmetička sredina

Na slici 40, apscise (u logaritamskoj skali) prikazuju srednju vrijednost spektralne radijancije za svaku grupu od 100 dana ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ). Na ordinatama je prikazana pripadajuća površina  $A$  za odnosnu 100-dnevnu grupu (metar-indeks-dana). Pozitivne vrijednosti na grafovima pokazuju stanje kad su odstupanja položaja veća u neaktivnoj grupi u odnosu na aktivnu grupu i obratno. Rastući smjer grafova ukazuje na *pad* odstupanja položaja (porast točnosti!) s porastom intenziteta aktivnosti vulkana i obratno.

Sljedeće poglavlje donosi analizu prostornog utjecaja vulkanske aktivnosti na odstupanje položaja izračunanog jednofrekvencijskom GPS metodom.

## 5.7 Analiza prostornog utjecaja vulkanske aktivnosti na odstupanje položaja

Do sada je analizirano raspršenje položaja određenog jednofrekvencijskom metodom u GPS sustavu na način da je svakom vulkanu pridružena po jedna IGS stanica, njemu zemljopisno najbliža. Raspon udaljenosti stanica od pripadajućih

vulkana iznosio je od najmanjih 15 km za vulkan Fournaise pa do 194 km za Nyiragongo i analizom izračunane vrijednosti odstupanja položaja odnose se na tu jednu geografsku točku u relativnoj blizini vulkana. U ovom poglavlju se analizira odstupanje položaja na više stanica, za isti vulkan. Cilj ove analize je pronaći prostornu međuovisnost utjecaja vulkanske aktivnosti i položajne točnosti izračuna jednofrekvencijskom metodom u GPS sustavu.

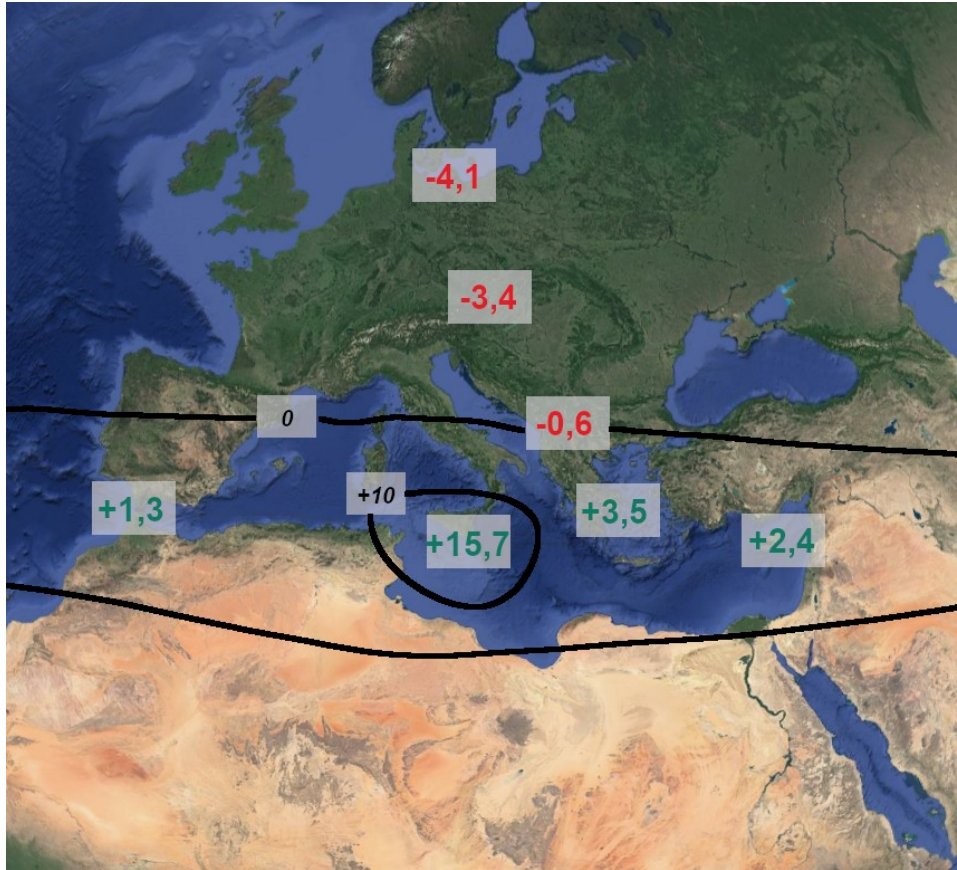
S ciljem ispitivanja prostornog utjecaja vulkanske aktivnosti na raspršenje položaja dobivenog jednofrekvencijskim mjerenjem u GPS sustavu, analizirano je prostorno odstupanje položaja na više IGS stanica u području Sredozemlja i Europe u kontekstu aktivnosti vulkana Etna. Svi proračuni odstupanja položaja su rađeni identičnom metodologijom kao u poglavlju broj 5.3. Etna je izabrana za ovakvu vrstu proračuna zbog raspoloživosti većeg broja referentnih stanica u regiji, a što općenito nije slučaj s ostalih pet vulkana.

U poglavlju 5.6.3 izračunana vrijednost površine između krivulja reziduala prostornog odstupanja ( $A$ ) za aktivnu i neaktivnu grupu dana, za referentnu stanicu Noto iznosila je 15,7 metar-indeks-dana. U cilju određivanja prostornih razlika, identičan izračun napravljen je još za 6 dodatnih stanica u široj regiji. Analizirane su sve sredozemne IGS stanice koje na mrežnom poslužitelju imaju raspoloživ niz podataka dulji od 10 godina. Osim sredozemnih stanica, za analizu su preuzeti podaci i bliskih kontinentalnih stanica na Balkanskom poluotoku te dviju udaljenijih stanica u središnjoj Europi. Osnovni podaci izabranih referentnih stanica i rezultat analize za površine između krivulja prikazani su u tablici 9. Statistički parametar za rezidualne prostornog odstupanja položaja je aritmetička sredina.

Tablica 9: Osnovni podaci referentnih stanica i izračunane vrijednosti površine  $A$  za analizu prostornog utjecaja vulkanske aktivnosti

Stanica	Zemlj. širina (°)	Zemlj. dužina (°)	Nadmorska visina (m)	Udaljenost od vulkana (km)	Azimut stanice od vulkana (°)	Površina $A$ (mid)
Noto	36,8758	14,9898	126,34	95	177 (S)	15,7
San Fernando	36,4643	-6,2056	84,84	1886	272 (W)	1,3
Nicosia	35,1409	33,3964	188,50	1678	94 (E)	2,4
Graz	47,0671	15,4934	539,07	1033	2 (N)	-3,4
Rostock-Warnemuende	54,1698	12,1014	49,64	1850	354 (N)	-4,1
Dionysos	38,0785	23,9324	511,09	784	84 (E)	3,5
Ohrid	41,1273	20,7940	771,65	620	51 (NE)	-0,6

Iz tablice je uočljivo da je površina između krivulja aktivnih i neaktivnih dana ( $A$ ) daleko najveća za vulkanu najbližu stanicu Noto ( $A = 15,7$  mid). Sve druge analizirane stanice imaju značajno manje razilaženje krivulja aktivnih i neaktivnih dana, pa je stoga i površina između njih bitno manja. Također je uočljivo da se u zonalnom smjeru pozitivna vrijednost površine  $A$  održava na većoj udaljenosti nego u meridionalnom smjeru. Površina  $A$  ostaje pozitivnog predznaka do oba kraja Sredozemnog mora (2,4 mid na Cipru te 1,3 mid u Gibraltarskom tjesnacu), nakon što je u grčkom arhipelagu iznosila 3,5 mid. U meridionalnom smjeru površina postaje značajno negativnog predznaka već na postaji Graz ( $A = -3,4$  mid), a udaljavanjem dalje prema sjeveru do stanice na njemačkoj obali Baltika doseže -4,1 mid. U smjeru sjeveroistoka od Etne, na stanici kontinentalnog dijela Balkanskog poluotoka, vrijednost već opada ispod nule ( $A = -0,6$  mid).



Slika 41: Vrijednosti površine  $A$  za analizirane referentne stanice u regiji i procijenjena prostorna interpolacija

Rezultati analize prikazani su na kartografskom prikazu (Slika 41), pri čemu je crnim linijama prikazana gruba interpolacija dobivenih rezultata. Položaj izolinija je *procijenjen* na temelju izračunanih vrijednosti površina  $A$ .

## 5.8 Razmatranja prezentiranih rezultata analize

Iz pregleda dosad objavljenih znanstvenih radova na temu sprege litosfere, atmosfere i ionosfere, te poznatih učinaka tektonike i vulkanskih erupcija na električna svojstva atmosfere i globalni električni krug, proizlaze tri temeljna forsirajuća mehanizma na električna svojstva atmosfere, a povezana s vulkanskom aktivnošću:

1. Utjecaj povećane stope emanacije  $R_n$  uslijed porasta tlaka u litosferi, čiji učinak se očituje prvenstveno u periodu prije erupcije;
2. Utjecaj akustičkih valova koji se prostiru kroz atmosferu do ionosfere, čiji učinak se očituje u minutama nakon erupcije, posebno eksplozivnih događaja;
3. Utjecaj izbačenih vulkanskih čestica i aerosola, čiji učinak se očituje u duljem periodu nakon erupcije.

U kontekstu tih poznatih mehanizama treba promatrati i rezultate provedene statističke analize u radu. Prema slici 38, analiza na pet od šest vulkana pokazuje općenito manje rezidualne prostornog odstupanja položaja izračunanog jednofrekvencijskom GPS metodom, u neaktivnim periodima u odnosu na aktivne periode.

Izbacivanjem vulkanskog aerosola u atmosferu, ubrzava se rekombinacija slobodnih elektrona i pozitivnih iona. Time vulkanski aerosol stvara gušći učinak na promjene atmosferskog elektriciteta, umanjujući dnevnu amplitudu i standardnu devijaciju ukupnog sadržaja elektrona. Zato se može postaviti hipoteza da u takvim uvjetima, uslijed manje fluktuacije ukupnog sadržaja elektrona oko modelirane vrijednosti pomoću modela Klobuchara, algoritam ispravljanja kašnjenja radi bolje u odnosu na uvjete atmosfere bez vulkanskog aerosola i time daje točnije ispravke. Toj tvrdnji daje težinu rezultat standardne devijacije ukupnog sadržaja elektrona (Slika 39) iz koje je vidljivo da je standardna devijacija ukupnog sadržaja elektrona u periodima najaktivnijih dana značajno manja nego u periodima najmanje aktivnih dana, za sve analizirane vulkane osim marginalno za Fournaise.

Prisilnom emanacijom  $R_n$  iz tla uslijed povećanja tlaka u litosferi uzrokovanog izbijanjem magme prema površini, povećava se koncentracija  $R_n$  u donjim slojevima atmosfere. To stanje uzrokuje dodatnu ionizaciju zraka u odnosu na normalne stope, što djeluje na povećanje ukupnog sadržaja elektrona. Takva se

situacija održava tijekom sljedećih nekoliko dana dok se ne raspadne veći dio ovog plina (vrijeme poluraspada = 3,8 dana) ili ne bude značajnije prenesen iz promatranog područja u slučaju prisutnih jakih vjetrova u donjem sloju troposfere.

S obzirom da vulkanski aerosol omogućuje bržu rekombinaciju slobodnih elektrona i iona, taj učinak se očituje kao općenito smanjenje ukupnog sadržaja elektrona i posebno njegovih vršnih dnevnih vrijednosti, stoga su utjecaj vulkanskog aerosola i intenziviranja emanacije  $R_n$  međusobno suprotnih predznaka.

Vulkan za koji su analize pokazale pretežno suprotan rezultat ostalima je Karymsky, na poluotoku Kamčatki. Prema tablici 1, vulkan Karymsky ima najmanji iznos spektralne radijancije od svih šest analiziranih vulkana. S obzirom na to, moguće je pretpostaviti da je općenito manja aktivnost vulkana uzrokom drugačijeg rezultata u odnosu na preostalih pet vulkana izraženije aktivnosti. Ipak, s obzirom da su reziduali prostornog odstupanja položaja suprotnog predznaka u odnosu na ostalih pet vulkana, moguće je da je uzrok takvom rezultatu nepoznat proces koji dovodi do takvih kvalitativnih razlika. Pritom razlozi za kvalitativno drugačije rezultate za vulkan Karymsky moguće je tražiti u omjeru magnitude učinka vulkanskog aerosola i učinka prisilne emanacije  $R_n$  iz tla.

Iz dosad provedenih razmatranja, proizlazi da u slučaju kad vulkan svojom aktivnošću generira značajniji učinak smanjenja amplitude i standardne devijacije ukupnog sadržaja elektrona uslijed povećanja koncentracije vulkanskog aerosola, u odnosu na učinak povećanja amplitude uslijed pojačane emanacije  $R_n$ , doći će do ukupnog učinka koji će se manifestirati kao smanjenje prostornog odstupanja položaja.

Suprotno tome, u situacijama kad emanacija  $R_n$  nosi primarni učinak na promjene ukupnog sadržaja elektrona, tj. kad je učinak vulkanskog aerosola sekundaran, ukupan učinak će se očitovati kao povećanje odstupanja položaja tijekom takve vulkanske aktivnosti. Vulkan Karymsky bi mogao biti jedan od takvih vulkana.

Dalje, čak i u slučaju da je ta hipoteza ispravna, nije potpuno jasno koji su razlozi da baš vulkan Karymsky odstupa od ostalih. Iznose se neke od mogućih teza koje bi mogle objasniti drugačije kvalitativne rezultate za ovaj vulkan:

1. Manja aktivnost u odnosu na preostale vulkane. S obzirom na manju aktivnost koja se očituje u nižim vrijednostima spektralne radijancije, postoji mogućnost da statistička analiza nema dovoljnu snagu razlučivanja te da prema tome rezultate primarno određuju slučajne statističke pogreške, a tek sporedno sam utjecaj aktivnosti vulkana.
2. Moguće razlike u omjeru količine izbačene vulkanskog aerosola i emaniranog Rn iz tla, u odnosu na preostalih pet vulkana. Ova teza bi mogla biti potvrđena ili odbačena ako bi bili dostupni podaci o količini izbačenog aerosola i raspoloživoj količini Rn u tlu po svim analiziranim vulkanima, što bi mogao biti predmet budućih istraživanja na temu.
3. Položaj vulkana na  $54^\circ$  sjeverne zemljopisne širine, što ga stavlja u područje značajnijeg utjecaja polarne mlazne struje (npr. Gelo, 2000) u usporedbi s preostalim vulkanima ( $38^\circ\text{N}$ ,  $27^\circ\text{N}$ ,  $19^\circ\text{N}$ ,  $2^\circ\text{S}$ ,  $21^\circ\text{S}$ ). Utjecaj Rn ograničen je na niži sloj troposfere (zbog kratkog vremena poluraspada, praktično sav u donjih 3 km zraka). Iz navedenog se može zaključiti da prijenos Rn zračnim strujama visoke troposfere, na veću udaljenost od vulkanskog područja, neće biti značajno. Suprotno tome, vulkanski aerosol koji lako konvekcijom dopijeva u više slojeve troposfere, izravno je zahvaćen mlaznom strujom (nadmorske visine iznad 5 km) i brzo prenesen na veću udaljenost. Posljedično tome, utjecaj Rn na električna svojstva zraka bi u slučaju vulkana Karymsky mogao biti izraženiji nego utjecaj vulkanskog aerosola.
4. Osim iznesenog u točki 2, slabije vulkanske erupcije dostižu manju visinu izbačaja aerosola (npr. Carboni i sur., 2016). Zbog toga je moguće pretpostaviti da će najveći postotak izbačenog aerosola za vulkan Karymsky ostati u troposferi za razliku od ostalih pet vulkana većeg stupnja aktivnosti



koji će ostvarivati veće visine izbačaja i time otpremati značajniji postotak aerosola u stratosferu gdje je ionizacija sloja izraženija. Iz tog proizlazi da će izbačeni aerosoli slabijih erupcija djelovati isključivo na nižim visinama gdje je ionizacija ionako slabija, stoga će i učinak na umanjenje ionizacije u zračnom stupcu time biti manji.

Kako je već naglašeno, prema većini analiziranih parametara vulkan Karymsky je pokazao suprotan učinak na odstupanje GPS položaja. Međutim, prema izračunu srednje kvadratne pogreške odstupanja položaja, rezultat za Karymsky kvalitativno se priklonio svim ostalim promatranim vulkanima. Odstupanja prema metodi srednje kvadratne pogreške su za svih 6 vulkana općenito manja u aktivnim nego u mirnim periodima. Činjenica da Karymsky pokazuje suprotno kvalitativno svojstvo učinka na odstupanje položaja pri upotrebi metode srednje kvadratne pogreške, ukazuje na izostanak velikih vrijednosti odstupanja tokom 24-satnih razdoblja unutar kojih je određivana srednja kvadratna pogreška u aktivnim periodima. To je zato što srednja kvadratna pogreška uslijed kvadriranja vrijednosti pojedinačnih iznosa pogreški, penalizira mnogo više veća odstupanja mjerenja položaja.

Ukupan sadržaj elektrona se kvalitativno općenito podudara s odstupanjima položaja, ali povezanost nije jednoznačna te pogotovo ne postoji dobro kvantitativno podudaranje. Iz tog proizlazi da ukupan sadržaj elektrona ne objašnjava u potpunosti rezultate reziduala odstupanja položaja i ne može predstavljati idealan eksplanatorni parametar za uočene pojave. Promatrajući standardnu devijaciju ukupnog sadržaja elektrona u usporedbi sa standardnom devijacijom reziduala odstupanja, primjećuje se nešto veće podudaranje. Kvalitativno, za pet od šest vulkana standardna devijacija reziduala odstupanja i ukupnog sadržaja elektrona su istoznačne (u aktivnim periodima, manja standardna devijacija reziduala odstupanja i manja standardna devijacija ukupnog



sadržaja elektrona), dok je na jednom vulkanu odnos obratan (Fournaise – manja standardna devijacija reziduala odstupanja, ali veća standardna devijacija ukupnog sadržaja elektrona).

Općenito smanjena standardna devijacija reziduala odstupanja i ukupnog sadržaja elektrona tijekom aktivnih perioda, sugerira da povećana koncentracija vulkanskog aerosola u atmosferi umanjuje varijacije atmosferskog elektriciteta, tj. prigušuje vršne dnevne vrijednosti i amplitude ukupnog sadržaja elektrona.

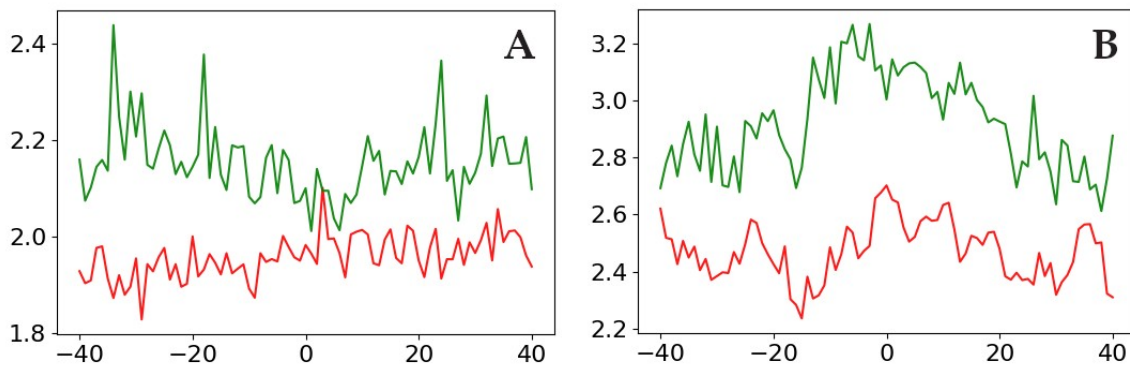
Rezultati odvojene dnevne i noćne analize pokazuju izraženije smanjenje reziduala odstupanja za dnevne u odnosu na noćne periode za pet vulkana (Fournaise, Kilauea, Nyiragongo, Etna i Nishinoshima), dok je za Karymsky suprotno. Ovo je moguća indikacija učinka gušenja vulkanskog aerosola na formiranje dnevnih, nižih slojeva ionosfere. Dodatnu težinu takvoj hipotezi daje izračun ukupnog sadržaja elektrona koji pokazuje njegovo izraženije smanjenje za dnevne periode u odnosu na smanjenje u noćnim periodima, što vrijedi za pet vulkana (Kilauea, Nyiragongo, Etna, Nishinoshima i Karymsky).

S obzirom na temperaturni profil stratosfere i posljedičnu visokostabilnu narav sloja, vertikalna zračna strujanja u njoj su znatno prigušena. Uslijed toga vulkanski aerosol koji erupcijom prisilno dospije u stratosferu ima tendenciju dugog zadržavanja na tim visinama. Na visini stratosfere prvenstveni učinak na ionizaciju imaju galaktičko kozmičko zračenje i Sunčev vjetar. S obzirom na nepostojanje egzaktnih modela korekcije u GPS sustavu za ispravak učinaka ionizacije stratosferskog sloja, postavlja se hipoteza da ubacivanje vulkanskog aerosola u stratosferu utječe na brže uklanjanje naboja s te visine, te tako može predstavljati objašnjenje rezultata koji pokazuju općenito manje raspršenje položaja izračunanog jednofrekvencijskom metodom u GPS sustavu, pri jačoj aktivnosti vulkana.

U razmatranjima rezultata treba naglasiti da su svi izračuni odstupanja položaja izračunani s uključenim ispravkama ionosferskog kašnjenja pomoću modela Klobuchara. Korištenje ispravke ionosferskog učinka izabrano je iz dvaju temeljnih razloga. U prvom redu, satelitski navigacijski prijamnici koji se koriste u

pomorstvu, u jednofrekvencijskim izvedbama standardno koriste Klobucharov model za ispravljanje ionosferskog kašnjenja bez mogućnosti njegovog isključivanja. Osim toga, uključivanjem modeliranja ispravki kašnjenja dodatno se metodološki utječe na minimizaciju učinaka Sunčeve aktivnosti na izračun. Analiza odstupanja bez uključene ispravke ionosferskog kašnjenja u teoriji bi bila značajnije opterećena promjenama stanja ionosfere koje su posljedica Sunčeve aktivnosti, stoga bi izolacija učinaka vulkanske aktivnosti bila manje efikasna.

Međutim, u cilju provjere utjecaja vulkanske aktivnosti i na pogreške u izračunu položaja koje su dobivene bez upotrebe ionosferske korekcije Klobucharovim modelom, provedeni su i takvi izračuni. Takav proračun se postiže isključivanjem postavke za ionosfersku ispravku u RTKLIB programu pri kreiranju položajnih datoteka iz RINEX formata. Rezultati neispravljenih izračuna položaja pokazuju vrlo slične kvalitativne i kvantitativne značajke kao i prikazani rezultati s uključenim ispravkama, uz općenito veće vrijednosti apsolutnog odstupanja. U cilju zadržavanja rada preglednim, ti dijagrami nisu prikazani među rezultatima analize, budući da ne bi doprinijeli njegovoj kvaliteti s novim informacijama. Ipak, ovdje je prikazan primjer usporedbe rezultata za rezidualne prostornog odstupanja položaja za Etnu pri uključenom (graf A) i isključenom (graf B) modelu Klobuchara (Slika 42), prema dnevnoj aritmetičkoj sredini podataka. Veličine površina između krivulja iznose 15,7 mid za uključenu ispravku po Klobucharu, te 36 mid bez Klobucharovog modela.



Slika 42: Usporedba reziduala prostornog odstupanja položaja za Etnu pri uključenom (A) i isključenom (B) ispravljanju ionosferskog kašnjenja Klobucharovim modelom  
 Statistički pokazatelj: aritmetička sredina. Apscisa: indeks-dani, ordinata: metri.

Veći iznos površine za izračune bez ionosferske korekcije može biti posljedica općenito većih apsolutnih iznosa položajnih pogreški. Pearsonov koeficijent korelacije između krivulja aktivnih dana za uključen i isključen Klobucharov model iznosi 0,26, dok istovjetni izračun za neaktivne dane daje koeficijent -0,37. S dijagrama su vidljivi ponešto različiti nagibi krivulja, ali općenit odnos krivulja grupa aktivnih i neaktivnih dana je ostao nepromijenjen. Pritom krivulje koje su dobivene bez ispravke ionosferskog kašnjenja (graf B) pokazuju veće vrijednosti uslijed jače izraženog Sunčevog utjecaja na ionosferu, stoga se može zaključiti da imaju slabije izoliran vulkanski utjecaj na položajnu točnost i kao takve su manje kvalitetan pokazatelj analizirane sprege u odnosu na ispravljene proračune (graf A).

U razmatranjima rezultata treba spomenuti bitna ograničenja u metodologiji istraživanja koja se javljaju za vulkane Etna i Kilaeva. Ta dva vulkana se nalaze u blizini drugih (npr. Etna je smještena geografski relativno blizu vulkana Stromboli i Vezuv), pa shodno tome treba očekivati djelomično preklapanje utjecaja bliskih vulkana, a time i učinak na rezultate. Ipak, kako su ova dva vulkana najaktivnija u odnosu na susjedne vulkane, pretpostavka je da je njihov učinak na rezultate najveći.

S obzirom na rezultate analize promatrane u kontekstu iznesenih radova koji razmatraju učinke vulkanskog aerosola i njegovo djelovanje na atmosferski naboj, nameću se zaključci:

1. Vulkanske erupcije koje su u stanju injektirati značajnu količinu aerosola u stratosferu umanjuju ionizaciju zraka u tom sloju i time umanjuju pogreške položaja;
2. Erupcije manjeg intenziteta koje nemaju dovoljnu energiju izbaciti aerosol iznad visine tropopauze imaju osjetno manji učinak na ionizaciju iz više razloga:
  - Općenito manja količina aerosola ima manji utjecaj na atmosferski elektricitet;
  - Manja visina izbačaja aerosola zadržava utjecaj istoga u troposferi gdje je ionizacija inače najslabija;
  - U troposferi aerosol se zadržava kraće jer se eliminira vlažnom depozicijom kroz naoblaku i oborine.

Dosad provedena istraživanja iz znanstvene literature koja razmatraju utjecaj vulkanske aktivnosti na ionosferu su dokazala povezanost seizmičkih i vulkanskih procesa s ionosferskim anomalijama. Radovi koji se temelje na analizi ionosfere koristeći GNSS sustave pokazuju nedvojbenu utjecaj vulkanske aktivnosti na satelitske signale preko ionosferskih anomalija. Najveći dio istraženih i dokumentiranih anomalija se objašnjava akustičkim valovima koji se šire od vulkana prema ionosferi ili na anomalnoj ionizaciji zraka uslijed Rn. Te pojave su u pravilu kratkotrajne i događaju se u vremenu oko samih erupcija vulkana. Međutim, utjecaj vulkanske aktivnosti na duljoj vremenskoj skali, posebno na raspršenje položajne točnosti GNSS sustava dosad nije izučavan u literaturi.

Istraživanje provedeno u ovoj disertaciji pokazuje da vulkanska aktivnost ima mjerljive učinke na raspršenje položaja određenog jednofrekvencijskom metodom u GPS sustavu, u duljem periodu. Iz toga proizlazi hipoteza da najveći dugoročan utjecaj na sustav stvara vulkanski aerosol ubačen u stratosferu, koji u značajnoj mjeri utječe na stupanj ionizacije tog sloja, što je u skladu s dosad objavljenim radovima u znanstvenoj literaturi i teorijskom podlogom.

Proračun osjetljivosti odstupanja položaja, s obzirom na intenzitet aktivnosti vulkana, također pokazuje sličan obrazac za 5 od 6 vulkana. Pretežno uzlazni smjer grafova na slici 40 ukazuje na već dosad razmotrene pozitivne učinke vulkanskog aerosola na položajnu točnost pri višim stupnjevima vulkanske aktivnosti te na negativne učinke na točnost izračuna položaja pri slabije aktivnim periodima kad u atmosferu ne dospijeva značajna koncentracija aerosola, a aktivnost  $R_n$  je svejedno povećana.

Grafovi površina  $A$  s obzirom na kategoriju intenziteta aktivnosti nisu monotono uzlazni što ukazuje na značajnu količinu šuma u podacima i na potrebu da se rezultati tumače oprezno, bez postavljanja pretjerano čvrstih zaključaka. Ipak iz grafova proizlazi da Fournaise, Kilauea, Nyiragongo i Etna prelaze iz negativnog u pozitivan učinak na položajnu točnost pri nižim intenzitetima (na grafovima, iz negativne u pozitivnu vrijednost). Graf Nishinoshime također ima pretežno uzlazan smjer, iako kroz cijeli raspon zadržava pozitivnu vrijednost. Karymsky je i u ovoj analizi pokazao suprotna svojstva ostalim vulkanima te ima silazan smjer i bez daljnje analize ostaje relativna nepoznanica zbog čega se podaci za taj vulkan ponašaju općenito suprotno ostalim analiziranim.

Za 4 vulkana koji s povećanjem aktivnosti prelaze iz negativnog u pozitivan učinak na točnost jednofrekvencijskog GPS pozicioniranja, može se s grafova očitati približna vrijednost spektralne radijancije pri kojoj vrijednost na grafu mijenja predznak. Te vrijednosti su dane u tablici 10.

Tablica 10: Iznos granične aktivnosti vulkana za prelazak iz negativnog u pozitivan učinak na položajnu točnost

Vulkan	Granična spektralna radijancija ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ )	Udaljenost ref. stanice i vulkana (km)
Fournaise	20	15
Kilauea	40	46
Nyiragongo	12	194
Etna	13	95

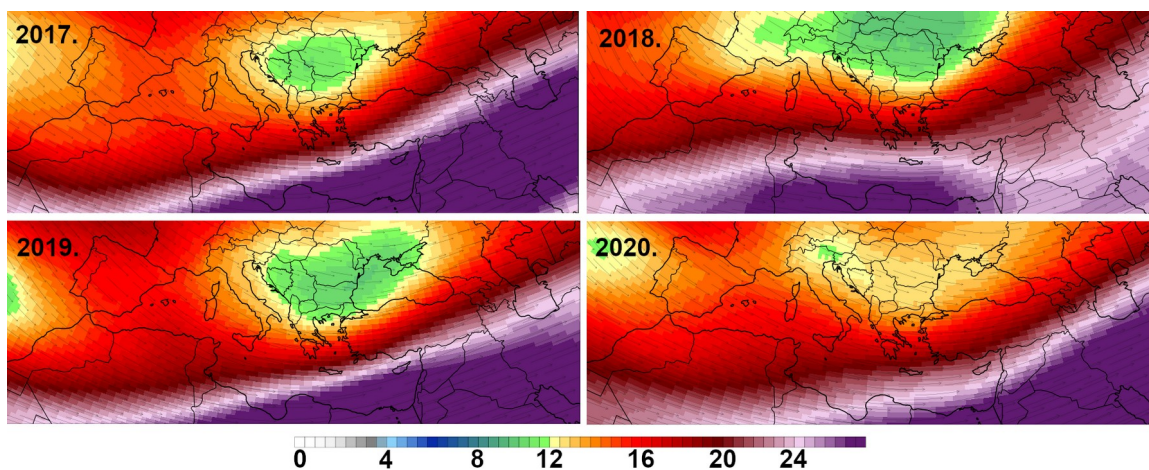
Prema podacima iz tablice 10 proizlazi da bi se granična vrijednost spektralne radijancije pri kojoj učinak na točnost jednofrekvencijskog određivanja položaja u GPS sutavu, prelazi iz negativnog u pozitivan, mogla ugrubo nalaziti u području između 10 i 40  $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$  za prijamnik koji se nalazi u relativnoj blizini eruptirajućeg vulkana (do ~ 200 km udaljenosti).

### Razmatranja rezultata analize prostornog utjecaja

Iz rezultata analize prostornog učinka za vulkan Etnu proizlazi da je u zonalnom smjeru smanjena prosječna pogreška položaja izračunanog jednofrekvencijskom GPS metodom, pri povećanoj aktivnosti vulkana, do barem 1700 – 1800 km u smjeru istoka ili zapada. Suprotno tome, u meridionalnom smjeru se uočava brzi pad razlika između aktivnih i neaktivnih dana te je već na oko 500-tinjak km od vulkana ta razlika minimalna, a daljnjim udaljavanjem u smjeru sjevera rezultati postaju obratni. Prema tome, u meridionalnom smjeru tijekom povećanog stupnja aktivnosti vulkana položajno odstupanje postaje veće nego pri neaktivnim danima na znatno manjoj udaljenosti nego u zonalnom smjeru. U smjeru juga nema na raspolaganju referentnih postaja te analiza nije provedena, no za očekivati je također slično ponašanje kao u smjeru sjevera, što proizlazi iz teorijskih razmatranja kojima se postavlja hipoteza o uzrocima ovakvih obrazaca.

Pod pretpostavkom da je smanjenje odstupanja tijekom povećane vulkanske aktivnosti uzrokovano povećanom koncentracijom aerosola u atmosferi, dalje se razvija hipoteza kako će pretežiti smjer razvlačenja zone pozitivnog utjecaja vulkanske aktivnosti na položajnu točnost, ovisiti o prevladavajućim atmosferskim strujanjima koja prenose vulkanski aerosol. Prema tome, potrebno je analizirati prevladavajući smjer zračnih strujanja nad širom regijom Etne.

U troposferi, općenito najizraženija horizontalna strujanja zraka se nalaze u njezinoj gornjoj polovici, iznad izobarne plohe od 500 hPa. Posebno se izdvajaju visine na kojima se nalazi subtropska mlazna struja kao najjače troposfersko strujanje u zemljopisnim širinama Sredozemlja, oko visine izobarne plohe 250 hPa ili 10-ak km. Na toj visini strujanje ima prevladavajući zapadni smjer (npr. Ahrens i Henson, 2019). Za potvrdu prevladavajućeg strujanja određena je srednja vrijednost brzine i smjera horizontalnog vjetra za 2017. – 2020. po godinama, prema ERA5 reanalizi (Hersbach i sur., 2020).



Slika 43: Srednja brzina (m/s) i smjer vjetra nad Sredozemljem na plohi 250 hPa, prema ERA5

Izvor: Climate Reanalyzer, Climate Change Institute, University of Maine, USA.

<https://climatereanalyzer.org>

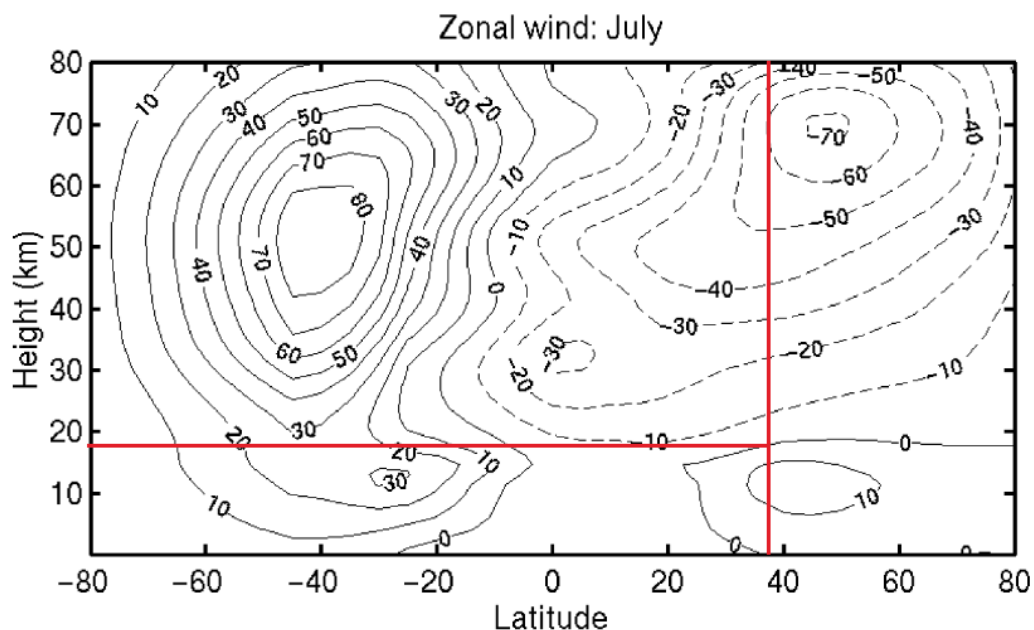
Iz priložene slike 43 je vidljivo da je smjer strujanja na plohi 250 hPa nad Sredozemljem pretežno zapadnog smjera, te u području Etne prosječna brzina iznosi oko 20 m/s. Srednji položaj osi subtropske mlazne struje se općenito nalazi



nešto južnije, nad sjevernom obalom Afrike te je njezin utjecaj nad Sredozemljem, osobito istočnim značajan. Iz tog proizlazi da će aerosol izbačen iz vulkana Etna pod utjecajem strujanja na visinama iznad 10 km u području Sredozemlja biti prenesen prema istočnom Sredozemlju, te će protekom vremena udaljavajući se od izvora postupno njegova koncentracija opadati uslijed učinaka turbulencije, raspršenja, difuzije i depozicije.

Međutim, još je potrebno objasniti poboljšanje položajne točnosti porastom intenziteta aktivnosti Etne, koje se uočava i na referentnoj stanici u zapadnom Sredozemlju. Objašnjenje prijenosa aerosola zapadnim strujanjem takav učinak ne podržava. Zato je razmotreno i strujanje u stratosferi. Literatura pokazuje da vulkanski aerosol pri intenzivnijim erupcijama lako dostiže visinu stratosfere, gdje formira tzv. Jungeov sloj sulfata (Carboni i sur., 2016; Gringel i sur., 1986; Rycroft i sur., 2000). U stratosferi, strujanje je općenito zapadnog smjera na zimskoj hemisferi i istočnog na ljetnoj hemisferi. (Holton i Alexander, 2000; Holton i Hakim, 2013), kako prikazuje Slika 44.





Slika 44: Srednji zonalni vjetar u srpnju

Izvor: Priredio autor, prema Holton i Hakim (2013)

Na slici 44 prikazan je srednji zonalni vjetar u srpnju prema Holton i Hakim (2013). Na apscisi je prikazana zemljopisna širina, a na ordinati nadmorska visina. Vertikalnom crvenom linijom je naznačena zemljopisna širina Etne, a horizontalnom nadmorska visina gdje na toj zemljopisnoj širini zonalni vjetar prelazi iz zapadnog (pozitivne vrijednosti, u troposferi) u istočni smjer (negativne vrijednosti, u stratosferi).

Iz slike 44 je vidljivo da je primjerice u srpnju srednje zonalno strujanje na zemljopisnoj širini Etne u troposferi zapadno, dok od visine oko 18 km na više postaje istočnog smjera. Takva raspodjela zonalnog strujanja je snažan indikator da se aerosol koji pri jačim erupcijama prolazi kroz troposferu prenosi prema istočnom Sredozemlju, ali čestice koje dostignu visinu od 20-ak km (npr. Rietmeijer, 1993; Zhu, Toon i Jensen, 2020) će biti prenesene prema zapadnom Sredozemlju. Hipoteza o zonalnom širenju aerosola iz Etne u oba smjera time dobiva i teorijsku podlogu koja ju može objasniti.

Prema iznesenom, iz rezultata prostorne analize odstupanja za Etnu (poglavlje 5.7) i postavljenih hipoteza mehanističkih čimbenika sprege, proizlazi da treba očekivati potrebu postojanja sve većeg intenziteta vulkana za postizanje pozitivnog učinka na točnost izračuna položaja kako udaljenost od vulkana raste. Također, u tom kontekstu iznimnu važnost na učinak vulkana na položajnu točnost imaju atmosferska strujanja, i to u troposferi (pri svim erupcijama) te u stratosferi (pri jačim erupcijama), koja određuju konačnu geografsku raspodjelu koncentracije vulkanskog aerosola, a time i geografsku raspodjelu učinka na točnost izračunanog položaja. Promatrajući pojedinačne slučajeve erupcija, učinak na položajnu točnost značajno će ovisiti o atmosferskoj cirkulaciji u širem području vulkana i koncentraciji vulkanskog aerosola uslijed regionalnog prijenosa.

## **5.9 Moguće promjene utjecaja vulkanske aktivnosti na odstupanje položaja s obzirom na očekivane klimatske promjene**

Znatan broj istraživačkih radova objavljen je na temu utjecaja vulkanskih erupcija na klimatski sustav Zemlje (npr. Hegerl i sur., 2003; Sigl i sur., 2015; Santer i sur., 2015; Hansen i sur., 1978; Rampino i Self; 1982). S druge strane, vrlo mali broj autora bavio se obratnim pitanjem – kakav je utjecaj očekivanih klimatskih promjena u budućnosti na učinke vulkanskih erupcija. Rad novijeg datuma na tu temu (Aubry i sur., 2021) bavi se simuliranjem stratosferskog aerosola u budućoj toplijoj klimi prema IPCC SSP5-8.5 scenariju za razdoblje 2090. – 2100. (O'Neill i sur., 2016), koristeći globalni klimatski model s interaktivnim modulom stratosferskog aerosola UKESM1 (Stellar i sur., 2019, Archibald i sur., 2020).

Rezultati simulacije za srednje intenzivne erupcije pokazuju relativno smanjenje stratosferskog vulkanskog aerosola (SO<sub>2</sub>) u odnosu na sadašnju klimu. Autori to smanjenje objašnjavaju povećanjem visine tropopauze u toplijoj klimi, što će dovesti do težeg dostizanja visine stratosfere izbačenim vulkanskim aerosolom. Zadržavanje većeg postotka aerosola ispod visine stratosfere imat će za posljedicu

njegovo brže uklanjanje naoblakom, oborinama i depozicijom na tlo zbog sile teže. S druge strane, za najjače erupcije ne treba očekivati takvu promjenu, budući da je visina ubacivanja aerosola za njih dovoljno velika (preko 20 km). Zato povećanje visine tropopauze vjerojatno neće imati značajan učinak na raspodjelu aerosola u odnosu na slojeve atmosfere različitih fizikalnih karakteristika.

Iz navedenog proizlazi da će za erupcije uobičajene snage utjecaj stratosferskog aerosola na smanjenje ionizacije sloja biti manji, a time je prema rezultatima analize iz ove disertacije moguće očekivati manje izražene učinke vulkanske aktivnosti na promjene raspršenja položaja dobivenih metodologijom jednofrekvencijskog određivanja položaja. Te rezultate svakako treba promatrati i u skladu s očekivanim napretkom tehnologije satelitskog određivanja položaja do kraja stoljeća, pa su razmatranja o učincima buduće toplije klime na točnost određivanja položaja vjerojatno ograničena samo na strogo teorijska razmatranja vezana za aktualno raspoloživu tehnologiju.

Promjene uslijed lokalnih učinaka ponajviše će biti određene drugačijom prostornom raspodjelom atmosferskih strujanja zraka. To se ponajprije odnosi na promjene položaja osi mlaznih struja i njihovih brzina kao i na promjene stratosferskih strujanja.

## **5.10 Statističko modeliranje sprege vulkanske aktivnosti i položajne točnosti**

Rezultati statističke analize pokazali su značajan stupanj stohastičnosti i kvantitativne nekonzistentnosti između pojedinih vulkana u smislu utjecaja njihove aktivnosti na raspršenje položajne točnosti dobivene metodom jednofrekvencijskog određivanja položaja. Različitost rezultata se lako može tumačiti drugačijim intenzitetom aktivnosti pojedinog vulkana, vrstom vulkana, zemljopisnom širinom, položajem u kontekstu kontinent/ocean, vrstom tla/raspoloživom količinom  $R_n$ , nadmorskom visinom, položajem u odnosu na

prevladavajući smjer i brzinu atmosferskih strujanja, blizinom drugih vulkana, prevladavajućim sastavom vulkanskih čestica izbačenih tijekom erupcija te drugim značajkama litosfere i atmosfere u području pojedinog analiziranog vulkana.

S obzirom na uočene značajne razlike, proizlazi da opći statistički model koji bi vrijedio za sve vulkane, ne bi imao mogućnost uspješnog opisivanja kvalitativnih i kvantitativnih osobina pojedinog vulkana. Zbog toga je izabrana izrada zasebnog statističkog modela za svaki pojedini vulkan.

Vodeći se malim razlikama u općim iznosima reziduala odstupanja u odnosu na spektralnu radijanciju, izabran je linearni regresijski model, budući da je pretpostavka da bi složeniji model višeg reda bio podložniji utjecaju šuma u podacima. S druge strane, jednostavan linearni model ima najbolju predispoziciju za iskazati temeljnu narav međuovisnosti ovih dviju varijabli.

Korelacija između spektralne radijancije i reziduala prostornog odstupanja položaja te ukupnog sadržaja elektrona utvrđena je za svaki analizirani vulkan. Korišten je Pearsonov koeficijent korelacije ( $r$ ) (npr. Weaver i sur., 2017). Koeficijent korelacije izračunan je prema formuli:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2}} , \quad (107)$$

gdje  $x$  predstavlja iznos spektralne radijancije za pojedini dan vremenskog niza  $i$ , dok je  $y$  iznos aritmetičke sredine reziduala prostornog odstupanja položaja ili ukupnog sadržaja elektrona za taj dan.

Za svaki vulkan izračunan je linearni regresijski model između varijabli te je provedena regresijska analiza u cilju procjene reprezentativnosti modela.

$$y = ax + b , \quad (108)$$

pri čemu je  $y$  zavisna varijabla (reziduali odstupanja, odnosno ukupan sadržaj elektrona), dok je  $x$  nezavisna varijabla (spektralna radijancija). Koeficijenti regresije  $a$  i  $b$  određeni su metodom najmanjih kvadrata, koja daje najmanju ukupnu vrijednost kvadrata udaljenosti između pojedinih stvarnih vrijednosti promatrane zavisne varijable i regresijske krivulje (pravca):

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2}, \quad (109)$$

$$b = \frac{\bar{y} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2}, \quad (110)$$

gdje  $x$  predstavlja iznos spektralne radijancije za pojedini dan vremenskog niza  $i$ , dok je  $y$  iznos aritmetičke sredine reziduala prostornog odstupanja položaja, odnosno ukupnog sadržaja elektrona za promatrani dan.

Prije izračuna regresije, podaci su filtrirani kako je opisano u poglavlju 5.2.8 u cilju eliminacije neispravnih podataka odstupanja položaja. Također, primijenjena je metoda izračuna reziduala prostornog odstupanja položaja koji su dobiveni nakon odbijanja srednjeg globalnog odstupanja položaja, prema poglavlju 5.5.1.

Reprezentativnost linearnog modela (108) procijenjena je kroz pokazatelje koeficijenta determinacije,  $p$ -vrijednosti te standardnih pogrešaka regresije.

Koeficijent determinacije  $R^2$  izračunan je kao:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (111)$$

gdje brojnik predstavlja raspršenost reziduala prostornog odstupanja položaja ili ukupnog sadržaja elektrona oko modelirane vrijednosti  $\hat{y}$ , a nazivnik raspršenost podataka oko srednje vrijednosti  $\bar{y}$ .

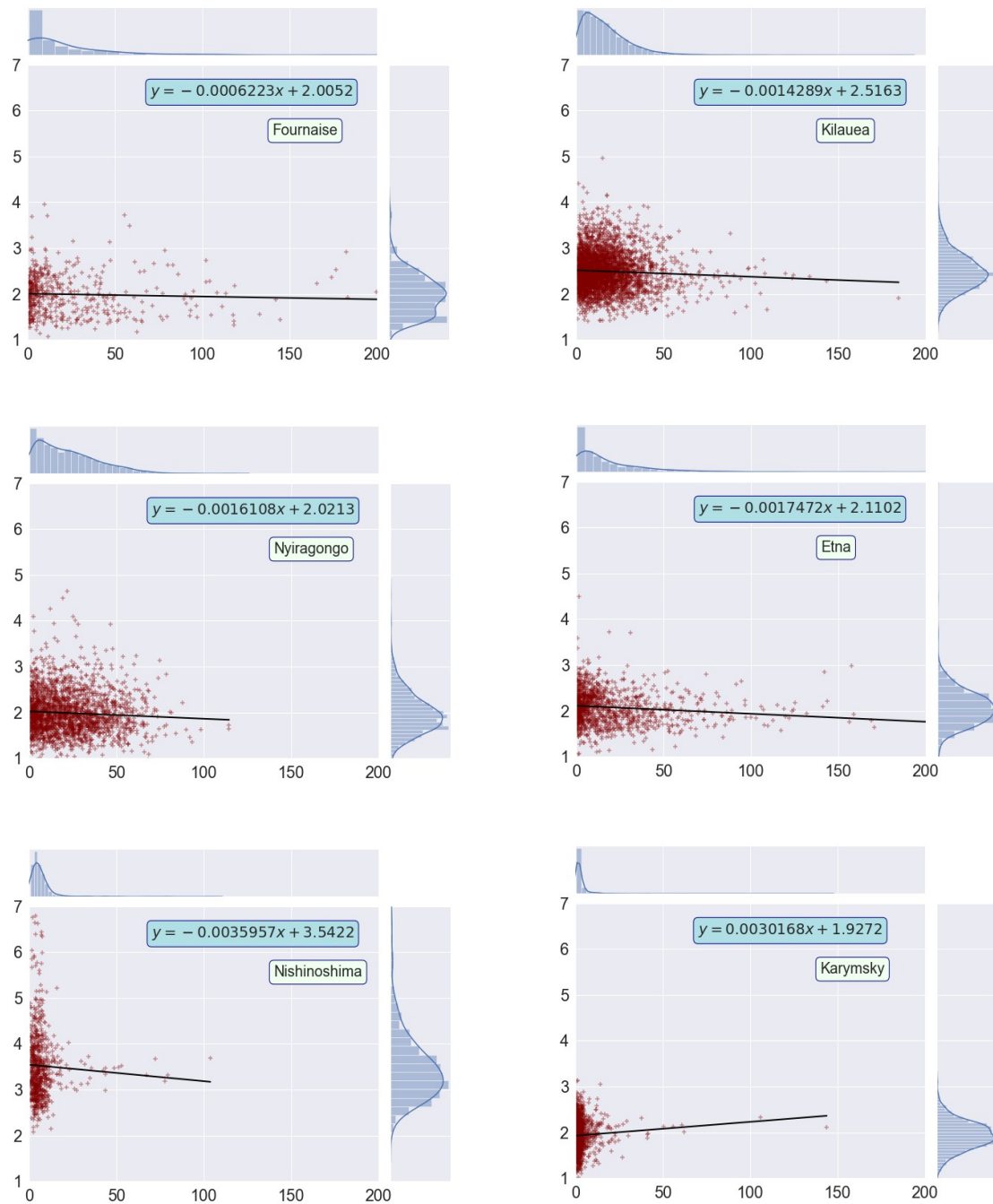
Standardna pogreška regresije je dobivena izrazom:

$$\sigma^2 = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2} . \quad (112)$$

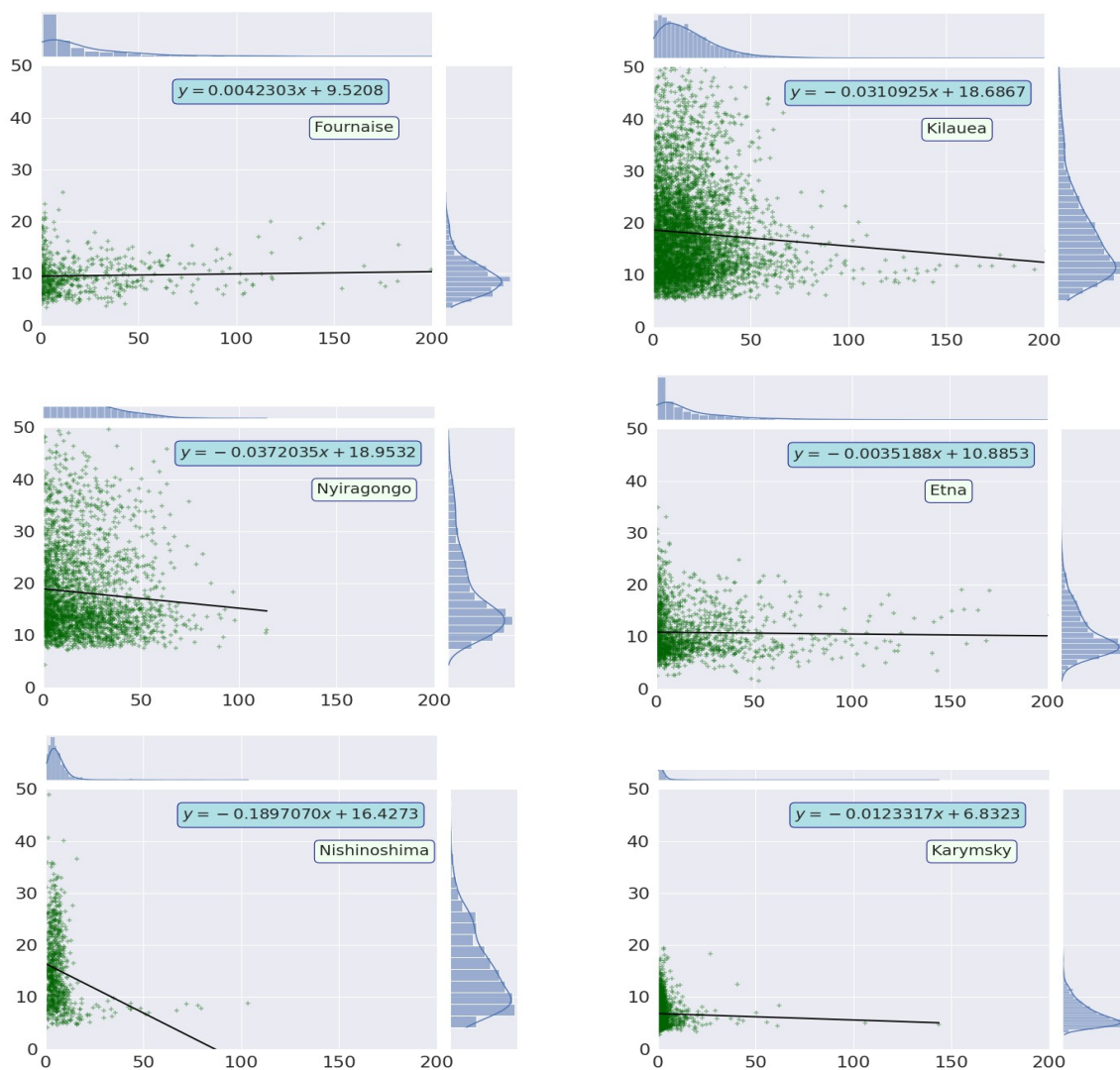
### 5.11 Rezultati izračuna korelacije i linearne regresije

Za svaki analizirani vulkan izrađen je grafički prikaz raspršenog dijagrama sa spektralnom radijancijom na apscisi i rezidualima odstupanja položaja te ukupnog sadržaja elektrona na ordinati. Takvim grafičkim prikazom vizualiziran je odnos promatrane nezavisne varijable i vulkanske aktivnosti.

Rezultati izračuna koeficijenta regresije prema (109) i (110), prikazani su uz grafičke prikaze za pojedine vulkane na slici 45 i slici 46. Na svim dijagramima su postavljene fiksne minimalne i maksimalne vrijednosti skale apscise i ordinate, u svrhu lakše vizualne usporedbe vulkana međusobno.



Slika 45: Grafovi odnosa spektralne radijancije i reziduala odstupanja za analizirane vulkane



Slika 46: Grafovi odnosa spektralne radijancije i ukupnog sadržaja elektrona za analizirane vulkane

Na slici 45, os apscisa prikazuje spektralnu radijanciju na fiksnoj skali 0 – 200  $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ , dok su na ordinatu nanenesi reziduali odstupanja, na fiksnoj skali 1 – 7 m. Svakom raspršnom dijagramu pridružen je pravac koji odgovara linearnoj regresiji podataka i koeficijenti regresije su dani za jednadžbu pravca prema izrazu (108). Dodatno je svakom dijagramu pridružen i histogram razdiobe podataka po spektralnoj radijanciji i vrijednosti reziduala odstupanja položaja.



Na slici 46, apscisa prikazuje spektralnu radijanciju ( $0 - 200 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ), dok ordinata prikazuje ukupan sadržaj elektrona ( $0 - 50 \text{ TECU}$ ). Kao i na slici 45, prikazani su pravci linearne regresije s koeficijentima te histogrami razdiobe podataka po osima.

Izračuni koeficijenta modela linearne regresije, koeficijenta determinacije, p-vrijednosti i standardne pogreške regresije prikazani su tablično, za rezidualne odstupanja položaja u tablici 11, te za ukupan sadržaj elektrona u tablici 12.

*Tablica 11: Pearsonov koeficijent korelacije te koeficijenti i pokazatelji reprezentativnosti linearne regresije, za rezidualne odstupanja položaja u ovisnosti o spektralnoj radijanciji*

Vulkan	$r$	$a$	$b$	$R^2$	$p$	$\sigma^2$
Fournaise	-0,052	-0,000622	2,0052	0,00612	0,08030	0,00055
Kilauea	-0,053	-0,001429	2,5163	0,00129	0,03658	0,00051
Nyiragongo	-0,063	-0,001611	2,0213	0,00429	0,00263	0,00059
Etna	-0,107	-0,001747	2,1102	0,01103	0,00037	0,00053
Nishinoshima	-0,039	-0,003596	3,5422	0,00134	0,32498	0,00405
Karymsky	0,062	0,003017	1,9272	0,00556	0,00188	0,00123

Od 6 analiziranih vulkana, 5 vulkana ima negativan koeficijent  $a$  linearne regresije, što znači da u njihovim podacima, povećanjem spektralne radijancije, vrijednost reziduala prostornog odstupanja položaja ima tendenciju smanjivanja tj. prisutna je negativna korelacija između tih dviju varijabli. Vulkan Karymsky ima pozitivan koeficijent  $a$ , iz čega proizlazi da je odnos aktivnosti tog vulkana i reziduala odstupanja obratan ostalim vulkanima, odnosno pozitivno koreliran.

Za razliku od provedene temeljne statističke analize u ovom radu koja je u proračun uključila dvije ekstremne grupe podataka (100 najaktivnijih i 100 najmanje aktivnih dana), u izračun modela linearne regresije uzeti su svi podaci. Općenita kvalitativna usklađenost rezultata obiju analiza, pojačava njihovu pouzdanost i znanstvenu valjanost.

Najveći iznos negativnog nagiba regresijske krivulje ima Nishinoshima, dvostruko veći od sljedećeg (Etna). S obzirom na činjenicu da je Nishinoshima izoliran vulkanski otočić u Pacifiku (površine svega 2,9 km<sup>2</sup>) za zaključiti je da u tom području nema mnogo Rn na raspolaganju za pojačano ioniziranje zraka pri vulkanskim procesima kao što je to slučaj na kopnu. To može predstavljati hipotezu koja bi objasnila najveći negativan regresijski nagib za taj vulkan.

Već opisane hipoteze koje objašnjavaju obratne rezultate analize za vulkan Karymsky u odnosu na ostale vulkane, vrijede i kao objašnjenje za obratan predznak regresijskog modela u slučaju ovoga vulkana.

Rezultati izračuna koeficijenata korelacije između spektralne radijancije vulkana i reziduala odstupanja položaja pokazuju da je korelacija vrlo slaba za sve vulkane, i za 5 od 6 vulkana je negativna, osim za Karymsky. Negativna korelacija pokazuje da porastom intenziteta vulkanske aktivnosti izraženog u spektralnoj radijanciji, iznosi odstupanja položaja općenito postaju manji.

Od analiziranih vulkana, Etna ima najveću apsolutnu vrijednost Pearsonovog koeficijenta korelacije ( $r = -0,107$ ). Općenito vrlo niski koeficijenti korelacije kao i vrijednosti koeficijenta determinacije upućuju na tek marginalan učinak vulkanske aktivnosti na odstupanja položaja dobivenih jednofrekvencijskom metodom u GPS sustavu, promatrano na srednjoj dnevnoj vrijednosti odstupanja i pokazuju kako su drugi učinci na odstupanja položaja mnogo značajniji. To se primarno odnosi na Sunčev utjecaj na položajnu točnost GPS sustava koja je primarni forsirajući čimbenik ionosferskog kašnjenja. Utjecaj vulkanske aktivnosti može se smatrati samo jednim od sekundarnih forsirajućih čimbenika.

Niski koeficijenti korelacije i determinacije te vizualni uvid u grafove spektralne radijacije i reziduala prostornog odstupanja položaja, pokazuju da je signal učinka vulkanske aktivnosti gotovo potpuno maskiran u šumu kojeg stvaraju ostali učinci, promatrajući kontekst srednjih vrijednosti odstupanja položaja kroz 24-satna razdoblja. Za pojedinačna mjerenja položaja se može pretpostaviti još niža korelacija sa stupnjem vulkanske aktivnosti.

Tablica 12: Pearsonov koeficijent korelacije te koeficijenti i pokazatelji reprezentativnosti linearne regresije, za ukupan sadržaj elektrona u ovisnosti o spektralnoj radijanciji

Vulkan	$r$	$a$	$b$	$R^2$	$p$	$\sigma^2$
Fournaise	0,0446	0,00423	9,52075	0,00199	0,29520	0,00403
Kilauea	-0,0875	-0,03109	18,6867	0,00767	$1,115 \cdot 10^{-9}$	0,00509
Nyiragongo	-0,0759	-0,03720	18,9532	0,00577	0,00019	0,00994
Etna	-0,0217	-0,00352	10,8853	0,00047	0,43257	0,00448
Nishinoshima	-0,2293	-0,18970	16,4273	0,05259	$3,737 \cdot 10^{-10}$	0,02986
Karymsky	-0,0308	-0,01233	6,83234	0,00095	0,18553	0,00931

Osim značajnih individualnih razlika između pojedinih vulkana, analiza položajne točnosti i korelacije s vulkanskom aktivnošću pokazuje vrlo visok stupanj stohastičnosti. Shodno tome proizlazi da je pristup tumačenju rezultata modeliranja potrebno promatrati kroz statističku vjerojatnost. U tom kontekstu je moguće zaključiti da za svako pojedinačno mjerenje položaja jednofrekvencijskim GPS sustavom u području pod utjecajem vulkanske aktivnosti, postoji mala, ali konačna vjerojatnost da će njegova točnost biti određena stupnjem vulkanske aktivnosti.

Rezultati proračuna linearne regresije ovisnosti ukupnog sadržaja elektrona o spektralnoj radijanciji pokazuju slične kvalitativne osobine kao opisani rezultati linearne regresije za rezidualne prostornog odstupanja. Vrlo niski koeficijenti

korelacije i determinacije ukazuju na značajnu stohastičnost i slabu uzročno-posljedičnu vezu između promatranih varijabli (Tablica 12). Nishinoshima je jedini analizirani vulkan koji je pokazao nešto značajniju korelaciju spektralne radijancije i ukupnog sadržaja elektrona (-0,2293) te koeficijent determinacije (0,05259), dok svi ostali analizirani vulkani pokazuju za barem red veličine niže vrijednosti. Promatrajući tako slabe vrijednosti korelacije, ipak valja spomenuti da je pri 5 od 6 vulkana izračun pokazao negativnu korelaciju spektralne radijancije i ukupnog sadržaja elektrona, što ponešto pojačava statističku snagu cjelokupnog istraživanja i upućuje na postojanje malog, ali mjerljivog učinka vulkanske aktivnosti na ukupan sadržaj elektrona u ionosferskoj regiji iznad aktivnih vulkana.

## 6 Završna razmatranja rezultata istraživanja

U disertaciji su provedene analize povezanosti vulkanske aktivnosti i položajnog odstupanja za jednofrekvencijsku metodu u GPS sustavu. Za vulkan Etnu, analiziran je i utjecaj prostorne udaljenosti od vulkana na učinke sprege. Dodatno je izračunana i međuovisnost utjecaja na položajnu točnost i stupnja aktivnosti vulkana.

Nakon detaljne analize svih dobivenih rezultata, u ovom poglavlju se donose završna razmatranja, prezentiraju se ograničenja i uspješnost provedbe istraživanja te se razmatraju rezultati u kontekstu mogućnosti njihove praktične primjene.

### 6.1 Uspješnost provedbe istraživanja

Dobiveni rezultati pokazuju slične obrasce ponašanja odstupanja položaja s promjenom vulkanske aktivnosti za većinu analiziranih vulkana. Glavni dio istraživanja koji za svaki analizirani vulkan podrazumijeva analizu odstupanja položaja u uvjetima vulkanske aktivnosti obaju krajeva spektra intenziteta, pokazuje značajne sličnosti u slučaju 5 od ukupno 6 analiziranih vulkana. Odstupanja položaja promatrana kroz statistički pokazatelj srednje kvadratne pogreške su kvalitativno u skladu za svih 6 vulkana i pokazuju jasnu tendenciju umanjenja položajne pogreške u zoni pod djelovanjem aktivnog vulkana. Konzistentnost dobivenih rezultata upućuje na visoku vjerojatnost da dobiveni obrasci povezanosti promatranih parametara nisu produkt slučajnosti, već se temelje na stvarnom učinku međusobne sprege. Pokazano je da su dobiveni rezultati u skladu s dosad objavljenom znanstvenom literaturom i mogu se objasniti teorijskim načelima iz radova drugih autora.

Unatoč visokom stupnju konzistentnosti izračuna, dio dobivenih rezultata nije moguće objasniti jednoznačnom hipotezom pa je u tom slučaju ponuđeno više različitih objašnjenja. To se u prvom redu odnosi na rezultate vulkana Karymsky koji odstupaju u većini pokazatelja gotovo dijametralno suprotno od rezultata ostalih 5 vulkana.

## 6.2 Ograničenja provedenog istraživanja

Uočene su značajne kvantitativne razlike između rezultata pojedinih vulkana koji kvalitativno pokazuju slične obrasce sprege aktivnosti i položajne točnosti. Nemonotono rastući grafovi u dijelu istraživanja koje pokazuje povezanost intenziteta vulkanske aktivnosti i položajne točnosti ukazuju na značajnu količinu šuma unutar uočljivih signala. Mali koeficijenti korelacije između varijabli izrađenog statističkog modela pokazuju da je vulkanska aktivnost tek mali modifikator položajne točnosti jednofrekvencijskih GPS sustava, stoga se može smatrati tek sekundarnim čimbenikom koji utječe na točnost izračuna položaja. Primarni čimbenici poput utjecaja Sunčevog zračenja na položajnu točnost stvaraju mnogo veći učinak od vulkanske aktivnosti.

Iz razlika između rezultata za pojedine vulkane proizlazi da generalizacija zaključaka na sve vulkane ne bi bila znanstveno valjana, već je nužno svaki vulkan promatrati pojedinačno. Različite osobine vulkana i geografskog područja, kao i općenito različite osobine ionosfere i atmosferskog elektriciteta područja iznad pojedinog vulkana su bitni čimbenici koji utječu na individualne rezultate za svaki vulkan.

Bitna ograničenja u provedenom istraživanju proizlaze i iz korištenih metoda i podataka. Glavni korišteni setovi podataka se odnose na intenzitet vulkanske aktivnosti te na izračun položaja jednofrekvencijskim GPS prijarnikom. Podaci o vulkanskoj aktivnosti su vremenski mnogo manje razlučivosti od podataka za izračun položaja. Općenito, podaci spektralne radijancije za vulkane nisu dostupni uvijek, već samo onda kad se vulkan nalazi u zahvatu satelitskog senzora i ako

meteorološke prilike dopuštaju mjerenje toplinskog zračenja s tla. Ta činjenica dovodi do ograničenog vremenskog pokrivanja podacima za svaki satelit. U teoriji je moguće da se pojavi podatkovna pogreška uslijed eventualno neravnomjernog pokrivanja mjerenjima faza mirnog i aktivnog razdoblja vulkana.

Potpuno pokrivanje opservacijskim podacima cijelog perioda nemaju ni analizirane referentne GPS stanice. Neke stanice pokazuju značajnu količinu nevažćih podataka i njih je prije analize bilo nužno eliminirati iz nizova podataka. Sve analizirane referentne stanice tijekom većeg dijela 2018. godine, uslijed tehničkih poteškoća imaju izuzetno velike pogreške položaja. Zbog navedenog, iz podataka je prije daljnje obrade eliminirana cijela 2018. godina. U teoriji je moguće da i zbog takve eliminacije dođe do određenih odstupanja u rezultatima analize, primjerice ako je neki analizirani vulkan baš u tom razdoblju imao značajan period aktivnosti.

Ograničenje istraživanja je i činjenica da su neki od promatranih vulkana smješteni prostorno blizu drugih aktivnih vulkana. Npr. Etna ima u svojoj blizini aktivne vulkane Vezuv i Stromboli, dok Kilauea na Havajima ima također niz slabijih vulkana koji se nalaze na tom vulkanskom otočju. Aktivnost drugih bliskih vulkana svakako utječe na ionosferske poremećaje i položaj određen GPS sustavom u promatranom području, stoga rezultate treba promatrati u tom kontekstu. Ipak ostaje činjenica da su korištene referentne stanice najbliže promatranim vulkanima te da oni imaju najveći stupanj aktivnosti u svojoj grupi vulkana. Zbog toga se može smatrati da izračunani učinci dolaze u najvećoj mjeri od promatranih vulkana, a tek manji dio rezultata može biti poremećen aktivnošću zemljopisno bliskih aktivnih vulkana.

### **6.3 Uspješnost izolacije utjecaja vulkanske aktivnosti**

Kad bi vulkanska aktivnost bila jedini fizikalni uzročnik kašnjenja satelitskog signala, rezultati analize bi se mogli u potpunosti pripisati analiziranoj spregi. Međutim, kako je već naglašeno, vulkanska aktivnost predstavlja tek sekundarne modifikatore okolišnih uvjeta koji određuju iznos kašnjenja satelitskih signala i na

taj način utječu na položajnu točnost određenu jednofrekvencijskim prijamnicima u GPS sustavu. Izolacija takvih sekundarnih utjecaja u statističkoj analizi predstavlja značajan izazov. Potpuna eliminacija primarnih utjecaja definitivno nije moguća, te je njihovo umanjeno moguće samo do određene, konačne mjere. Dio primarnih čimbenika ostat će nekorigiran u analizi i predstavljat će šum u rezultatima koji će u određenoj mjeri otežati njihovo tumačenje i onemogućiti izračun elemenata sprege velikom preciznošću.

Sunčev utjecaj na ionosferu i položajnu pogrešku nije moguće u potpunosti eliminirati. Znanstvenoistraživački radovi na temu utjecaja litosferne dinamike na ionosferu, koji se temelje na analizama pojedinačnih događaja, u pravilu sadrže kontrolu svemirskog vremena u svojoj metodologiji. Pritom se nastoji provjeriti postoji li mogućnost da su uočene ionosferske anomalije u vremenima oko potresa ili erupcija uzrokovane poremećajima pokazatelja svemirskog vremena. Uobičajeni pokazatelji koji se koriste za procjenu stanja svemirskog vremena su Kp, Dst, solarni radiofluks, Sunčeve pjege itd. (npr. Pandara i sur., 2021; Mehmood, Saleem, i Filjar 2021; itd.).

Ako se pokaže da se uočene anomalije ne mogu objasniti svemirskim vremenom, tad se zaključuje da su one posljedica učinaka dinamičkih procesa u litosferi.

Međutim, pri zbirnoj statističkoj analizi velikog broja događaja kakva je provedena u disertaciji, jednostavna kontrola svemirskog vremena nije metoda koja može polučiti prihvatljiv rezultat, već je učinak svemirskog vremena nužno što izravnije korigirati. U cilju što većeg umanjeno utjecaja Sunčevih periodičkih varijacija i kraćih perioda promjene aktivnosti, za svaki dan tijekom analiziranog razdoblja izračunana je globalna pogreška sustava, kao medijan pogreške od četiri referentne stanice koje su značajno udaljene od vulkanskih i tektonskih zona. Tako izračunanom globalnom pogreškom korigirane su lokalne pogreške referentnih stanica na kojima je analiziran lokalni utjecaj vulkana.



Dodatno i bitno ublažavanje utjecaja Sunčeve aktivnosti, putujućih ionosferskih poremećaja i drugih pojava koje nisu vezane za lokalni vulkanski učinak, proizlazi iz usrednjavanja izračunanih vrijednosti, po vremenskoj skali slučajno poredanih dana uključenih u analizu. Naime, uz pretpostavku da se vulkanska aktivnost tijekom vremena pojavljuje u slučajnim terminima (vremenski nekoreliranim s nelokalnim utjecajima), onda je i izabranih 100 najmirnijih i 100 najaktivnijih dana za usporedbu također slučajno poredano na vremenskoj skali. Ova osobina metodološke analize predstavlja dodatno jamstvo minimiziranja nelokalnih utjecaja koji dolaze od Sunca i drugih za vulkane nevezanih čimbenika.

Dodatnu statističku snagu u eliminaciji učinaka svemirskog vremena daje činjenica da je promatran veći broj vulkana te da su dobiveni rezultati kvalitativno prilično konzistentni. Iz činjenice da su vulkani raspoređeni diljem planete normalno neovisni jedan od drugoga po datumima eruptiranja i intenzitetu aktivnosti, proizlazi dodatan element slučajnosti u odnosu na svojstva svemirskog vremena i statističke disperzije njegovog učinka.

## **6.4 Rezultati istraživanja u kontekstu potreba pomorstva**

Međunarodna pomorska organizacija propisuje standarde zahtijevane točnosti određivanja položaja za pojedine aktivnosti u pomorskom prometu i srodnim djelatnostima. U uvjetima plovidbe u područjima gdje postoji povećan rizik od havarije zbog blizine navigacijskih opasnosti, nužno je poznavanje položaja broda s visokim stupnjem točnosti. Primjeri za takve situacije u praksi su prilazi lukama i manevriranje u lučkim bazenima, uključujući vez i odvez broda; prolasci kanalima i unutarnjim plovnim putovima i slične operacije. Još viši stupanj točnosti određivanja položaja zahtijeva se u specifičnim aktivnostima pomorskog inženjerstva, kontrole prometa obalnim službama, eksploatacije podmorja, hidrografskih mjerenja itd.

Promatrano kroz kontekst takvih aktivnosti koje zahtijevaju više stupnjeve točnosti poznavanja položaja, u cilju dostizanja zahtjeva, u pravilu je potrebno korištenje diferencijskih usluga za poboljšanje točnosti ili višefrekvencijsko određivanje položaja. Međutim, uz dostupnu isključivo jednofrekvencijsku GPS korisničku opremu, u kontekstu provedenih analiza i dobivenih rezultata, moguće je donijeti sljedeće zaključke:

1. Statistička analiza vulkanske aktivnosti i odstupanja položaja pokazuje da je u slučaju slabijih intenziteta vulkanske aktivnosti odstupanje položaja u blizini vulkana veće u odnosu na potpuno mirne periode;
2. Odstupanje položaja bit će veće i u slučaju većeg intenziteta vulkanske aktivnosti, ako je korisnik udaljen od vulkana na veću udaljenost ( $O \sim 1000$  km);
3. U slučaju određivanja položaja prijarnika na lokaciji bliže aktivnom vulkanu koji pritom izbacuje mnogo aerosola u troposferu i stratosferu, može se očekivati manja pogreška u odnosu na mirne periode. Takvo stanje će potrajati tako dugo dok u atmosferi postoji značajna koncentracija vulkanskog aerosola;
4. Bez obzira na prve tri točke, iz izračunanih statističkih modela po vulkanima te odnosne vrlo slabe korelacije podataka, proizlazi da će za svako pojedinačno mjerenje položaja GPS sustavom postojati tek iznimno mala vjerojatnost da će se moći uočiti jasna razlika u položajnoj točnosti pri erupcijama, u odnosu na mirni period vulkana;
5. Korelacije položajne točnosti i glavnih forsirajućih čimbenika (npr. solarnog fluksa) su neusporedivo veće u odnosu na korelaciju vulkanske aktivnosti, iz čega proizlazi da za praktične primjene i dalje treba ostati primarni fokus na eliminaciji učinaka tih čimbenika (npr. bolje modeliranje ionosfere s obzirom na svemirsko vrijeme).

Utvrđeno postojanje dinamike raspršenja položaja u blizini vulkana, povezane s razinom vulkanske aktivnosti potrebno je uzeti u obzir u kontekstu razmatranja postavljenih zahtjeva za visokom razinom točnosti, dostupnosti i integriteta određivanja položaja satelitskim navigacijskim sustavima. S obzirom na pretpostavljeno korištenje točnijih metoda određivanja položaja pri takvim pomorskim aktivnostima, potrebno je u budućnosti proširiti istraživanje utjecaja vulkanske aktivnosti i na raspršenje položaja određenog tim metodama.

## 7 Zaključci i prijedlozi za daljnja istraživanja

Litosferna dinamika ima širokoobuhvatne posljedice na naš planet. Dinamički procesi u Zemljinoj unutrašnjosti kroz povijest planete definirali su reljef površine kontinenta kao i njihov raspored te geografske osobine svjetskih mora i oceana. Ti se procesi odvijaju i danas, a na kraćoj vremenskoj skali litosferna dinamika ima snažan utjecaj ne samo na tlo već i Zemljinu atmosferu. Znanstvenoistraživački radovi zadnjih desetljeća potvrdili su različite aspekte sprege litosfere, atmosfere i ionosfere, koji se očituju u pojavi brojnih mjerljivih anomalija i poremećaja.

GNSS sustavi su se istakli kao važan znanstvenoistraživački alat za detekciju i daljinsko mjerenje i istraživanje električnih svojstava atmosfere. Ova disertacija stavlja težište na ispitivanje postojanja mjerljive sprege vulkanske aktivnosti i točnosti jednofrekvencijskog određivanja položaja GPS sustavom. Rezultati analize nedvojbeno ukazuju na jasan i mjerljiv učinak vulkanske aktivnosti na položajnu točnost.

U multidisciplinarnom znanstvenoistraživačkom radu prezentiranom u disertaciji, odabrani GNSS sustav je korišten dvojako za ispitivanje sprege vulkanske aktivnosti i ionosfere:

1. Istraživan je izravan učinak vulkanske aktivnosti na točnost određivanja položaja jednofrekvencijskim GPS prijamnicima i
2. Posredno, korištenjem GPS sustava određivan je ukupan sadržaj elektrona u atmosferi s ciljem kvalitativnog i kvantitativnog razumijevanja utjecaja vulkanske aktivnosti na položajnu točnost iz točke 1.

Statističkom analizom vremenskih nizova vulkanske aktivnosti i položajnih zapisa referentnih GNSS stanica te obradom rezultata, nedvojbeno je dokazano postojanje učinka vulkanske aktivnosti na položajnu točnost jednofrekvencijskog određivanja

položaja GPS sustavom. Pritom je utvrđen kvalitativni i kvantitativni učinak vulkanske aktivnosti na položajnu točnost, koji pokazuje općenitu promjenu kroz spektar intenziteta vulkanske aktivnosti te prema udaljenosti položaja od vulkana kao izvora atmosferskog aerosola, čime je utvrđena statistička ravnoteža u funkciji vulkanske aktivnosti i pripadajućih TEC vrijednosti iznad vulkanski aktivnog područja.

U disertaciji su postavljene hipoteze kojima se nastoje objasniti uočene pravilnosti u rezultatima analize. Uvidom u znanstvenoistraživačku literaturu, provjerena je usklađenost postavljenih hipoteza s aktualnim znanstvenim dostignućima na području. Dokazano je da učinci aktivnosti vulkana na položajnu točnost imaju određenu kvalitativnu korelaciju s promjenama ukupnog sadržaja elektrona, međutim, promjene tog pokazatelja ionosferskih svojstava ne mogu u potpunosti objasniti promjene položajne točnosti.

Provedenim istraživanjem testirana je postavljena znanstvena hipoteza disertacije. S obzirom na sve rezultate i razmatranja, pokazuje se da se osnovna znanstvena hipoteza istraživanja potvrđuje samo djelomice. Iako je povezanost aktivnosti vulkana i raspršenja položaja dobivenih GPS sustavom kao jednim od GNSS sustava nedvojbeno dokazana, dio postavljene hipoteze koji se odnosi na mogućnost predviđanja magnitude raspršenja položaja u ovisnosti o vulkanskoj aktivnosti se odbacuje. Nužnost odbacivanja tog dijela hipoteze proizlazi iz pokazane visokostohastičke naravi položajne točnosti. Zbog toga je pri tumačenju dobivenih rezultata moguće definirati samo statističku raspodjelu položajne točnosti u funkciji vulkanske aktivnosti, dok egzaktno predviđanje položajne pogreške pojedinih mjerenja nije moguće. Za razliku od osnovne znanstvene hipoteze, sve postavljene pomoćne hipoteze disertacije su potvrđene provedenim istraživanjem.

Istraživanjem je također pokazano da su učinci vulkanske aktivnosti na položajnu točnost sekundarne naravi promatrano u kontekstu svih forsirajućih mehanizama koji određuju ukupno ionosfersko kašnjenje satelitskih signala. U praksi, za

potrebe opće pomorske navigacije, promjene položajne točnosti koje nastaju uslijed vulkanske aktivnosti ne predstavljaju kritične događaje koji bi mogli ugroziti sigurnost broda. Štoviše, pokazuje se da u slučajevima veće količine aerosola u atmosferi statistički položajna točnost postaje bolja, što predstavlja značaj za sigurnost pomorske navigacije. U onim pomorskim operacijama koje zahtijevaju visok stupanj točnosti, a u uvjetima kad bi vulkanska aktivnost koja statistički umanjuje položajnu točnost mogla postati otežavajući čimbenik za sigurno provođenje operacija, zahtijevana točnost se ionako ne može postići jednofrekvencijskom metodom bez korištenja diferencijskih usluga. Zbog toga je potrebno novim istraživanjima ispitati, predstavlja li vulkanska aktivnost značajan utjecajni čimbenik na performanse satelitskih navigacijskih metoda veće položajne točnosti, koje su u standardnoj upotrebi u aplikacijama gdje je njihova primjena nužna.

Statističko modeliranje učinka vulkanske aktivnosti je moguće, no zbog velike količine šuma koji stvaraju drugi, primarni i jači izvori ionosferskog kašnjenja signala, narav položajne pogreške u funkciji vulkanske aktivnosti je visokostohastičke naravi. Zbog toga, egzaktno predviđanje položajne točnosti kao funkcije stupnja vulkanske aktivnosti nije moguće.

Daljnje napore u analiziranju i predviđanju utjecaja vulkanske aktivnosti na položajnu točnost, predlaže se usmjeravati prema izučavanju učinaka na preciznije metode kao što su korištenje diferencijskih usluga (DGNSS; DGPS), višefrekvencijsko određivanje položaja te PPP i RTK metode određivanja položaja. Korištenje tih metoda je nužno onda kad postoji potreba za vrlo točnim poznavanjem položaja, a postojanje utjecaja vulkanske aktivnosti pri upotrebi tih metoda nije obuhvaćeno ovim istraživanjem, stoga i dalje ostaje nepoznanica.

U disertaciji je analiziran utjecaj vulkanske aktivnosti na GPS sustav. S obzirom na različite tehničke značajke drugih GNSS sustava, prvenstveno u svezi s načinom ispravljanja ionosferskog kašnjenja signala, ne treba očekivati identične rezultate vulkanske aktivnosti na GNSS sustave koji nisu obuhvaćeni analizom u ovoj

disertaciji. Ipak, identična metodologija koja je predstavljena u disertaciji može se provesti za svaki preostali GNSS sustav. U tom kontekstu ova disertacija predstavlja metodološki obrazac za nastavak istraživanja učinaka vulkanske aktivnosti na položajnu točnost i drugih GNSS sustava.

Za daljnja istraživanja na temu sprege vulkanske aktivnosti i raspršenja položaja određenog satelitskim navigacijskim sustavima, predlaže se:

1. Dodatno istraživanje u cilju jasnije definicije uloge ukupnog sadržaja elektrona kao pokazatelja i/ili potencijalnog nosioca učinka sprege vulkanske aktivnosti i odstupanja položaja;
2. Istraživanje učinaka vulkanske aktivnosti na preostale GNSS sustave te druge modove određivanja položaja GNSS sustavima (višefrekvencijsko, višekonstalacijsko, diferencijalno, PPP, RTK, ...);
3. Detaljnija analiza razloga zbog kojih neki vulkani pokazuju bitno drugačiji učinak na položajnu točnost od većine analiziranih (kao npr. istraživanjem obuhvaćen vulkan Karymsky);
4. Istraživanje učinaka vulkanske aktivnosti na raspršenje položaja na kraćoj vremenskoj skali pri pojedinačnim erupcijama. Iako u literaturi istraživanja ovih učinaka donekle ima, ona većinom pokrivaju detekciju učinaka akustičkih valova u ionosferi. Ciljana istraživanja kratkoročnih učinaka vulkanskih erupcija preko emanacije  $R_n$  uz dostupnost kvalitetnih izmjerenih podataka, te prostorne raspodjele posljedične ionizacije ciljano postavljenim ionosondama nisu dosad provedena;
5. Strukturna analiza položajnih GNSS korisničkih odstupanja po koordinatnim osima  $x$ ,  $y$  i  $z$ , odnosno u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini prostora, kako bi se ustanovila posljedična odstupanja vrijednosti koordinata u funkciji vulkanske aktivnosti i promjene TEC vrijednosti kod aktivnih i neaktivnih dana.

Znanstveni doprinos ove disertacije je usmjeren na teorijski aspekt primjene. Rezultati i zaključci kao i postavljene hipoteze utvrđuju temelje provođenju novih znanstvenoistraživačkih radova iz odabrane tematike. Dosad nepoznati učinci vulkanske aktivnosti na položajnu točnost jednofrekvencijskog određivanja položaja GPS sustavom su kvalitativno i kvantitativno opisani, iz čega se daljnjim naporima u istraživanju tematike mogu postaviti i riješiti problemi koji će imati praktičnu primjenu.



## Literatura

1. Aarons J. (1982) Global morphology of ionospheric scintillations. *IEEE Proceedings* 70, str. 360–378.
2. Abdu, M.A. (2005) Equatorial ionosphere thermosphere system: Electrodynamics and irregularities. *Advances in Space Research* 35, str. 771–787.
3. Afraimovich, E. (2000) The GPS global detection of the ionospheric response to solar flares. *Radio Sci.* 35, str. 1417–1424.
4. Afraimovich, E., Altynsev, A., Grenchev, V. i Leonovich, L. (2001) Ionospheric effects of the solar flares as deduced from global GPS network data. *Adv. Space Res.* 27, str. 1333–1338.
5. Afraimovich, E. L., Ding, F., Kiryushkin, V. V., Astafyeva, E. I., Jin, S. i Sankov, V. A. (2010) TEC response to the 2008 Wenchuan earthquake in comparison with other strong earthquakes. *International Journal of Remote Sensing*, 31, str. 3601–3613.
6. Afraimovich, E. i sur. (2013) A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena. *J. Space Weather Space Clim.* 3, 27.
7. Ahrens, C. i Henson, R. (2019) *Meteorology today: An introduction to weather, climate and the environment* (12th ed.). CENGAGE Learning Custom Publishing.
8. Alexander, M. J., 2010: Chapter 5. Gravity Waves in the Stratosphere, in "The Stratosphere: Dynamics, Chemistry, and Transport", L. M. Polvani, A. Sobel, and D. W. Waugh (ur)., *Geophys. Monogr. Ser.*
9. Aplin, K. L. i Harrison, R. G. (2013) Lord Kelvin's atmospheric electricity measurements. In *History of Geo- and Space Sciences*, 4 (2), str. 83–95.
10. Archibald, A. T. i sur. (2020) Description and evaluation of the UKCA stratosphere–troposphere chemistry scheme (StratTrop vn 1.0) implemented in UKESM1. *Geosci. Model Dev.* 13, str. 1223–1266.
11. Ashby, N. (2003) Relativity in the Global Positioning System. *Living reviews in relativity*, 6(1), 1.
12. Ashcroft, N. W. i Mermin, N. D. (1987) *Solid State Physics*. Harcourt, Orlando.
13. Aubry, T.J., Staunton-Sykes, J., Marshall, L.R. i sur. (2021) Climate change modulates the stratospheric volcanic sulfate aerosol lifecycle and radiative forcing from tropical eruptions. *Nat Commun* 12, str. 4708.
14. Baker, D.N., Mason, G.M., Mazur, J.E. (2012) A small spacecraft mission with large accomplishments. *Eos* 93, str. 325–326.

15. Barta, V., Satori, G., Berenyi, K. A., Kis, A. i Williams, E. (2019) Effectc of solar flares on the ionosphere as shown by the dynamics of ionograms recorded in europe and south africa. *Annal. Geophys.* 37, str. 747–761.
16. Başıçiftçi, F., Inal, C., Yildirim, O. i Bulbul, S. (2018) Comparison Of Regional And Global Tec Values: Turkey Model. *International Journal of Engineering and Geosciences*.
17. Baumgaertner, A. J., Lehto, E., Neely, R. R., English, J. M., Zhu, Y., Lucas, G. i Thayer, J. P. (2013a) Model simulations of strong atmospheric conductivity disturbances and induced responses of the Global Electric Circuit, American Geophysical Union, Fall Meeting 2013, San Francisco, California.
18. Baumgaertner, A. J. G., Thayer, J. P., Neely, R. R, i Lucas, G. (2013b) Toward a comprehensive global electric circuit model: Atmospheric conductivity and its variability in CESM1(WACCM) model simulations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, str. 9221-9232
19. Bazilevskaya, G. A., Usoskin, I. G., Flückiger, E., Harrison, R., Desorgher, L., Bütikofer, B., Krainev, M., Makhmutov, V., Stozhkov, Y., Svirzhevskaya, A. Svirzhevsky, N. i Kovaltsov, G. (2008) Cosmic ray induced ion production in the atmosphere, *Space Science Reviews* 137, str. 149–173.
20. Beard, K.V. K. i Ochs, H.T., (1986) Charging Mechanisms in Clouds and Thunderstorms, in *Studies in Geophysics: The Earth's Electrical Environment*, str. 114–130.
21. Beiser, A., (2002) *Concepts of Modern Physics*, McGraw-Hill, New York, str. 432-436.
22. Belehaki, A., Hapgood, M. i Watermann, J. (2017) The ESPAS e-infrastructure: Access to data from near-Earth space. *EDP Sciences*.
23. Bellotti, E., Brogini, C., Carlo, G., Laubenstein, M, i Menegazzo, R. (2015) Precise measurement of the  $^{222}\text{Rn}$  half-life: A probe to monitor the stability of radioactivity. *Physics Letters B.* 743.
24. Bent, R.B. i sur. (1972) Description and evaluation of the Bent ionospheric model. DBA Systems, Melbourne, Florida, F04701-72-C-0380, Space & Missile Systems Organization, Los Angeles, California.
25. Bergwitz, K. (1910) Hab. Paper. Braunschweig.
26. Bernhardt, P. A. i Siefiring, C. L. (2006) New satellite-based systems for ionospheric tomography and scintillation region imaging. *Radio Science* 41 (5).
27. Bingen, C., Fussen, D. i Vanhellemont, F. (2004) A global climatology of stratospheric aerosol size distribution parameters derived from SAGE II data over the period 1984–2000: Methodology and climatological observations, *J. Geophys. Res.*, 109, 6, str. 201.
28. Bisnath, S., Aggrey, J., Seepersad, G. i Gill, M. (2018) Innovation: Examining precise point positioning now and in the future. *GPS World*. Dostupno online na <https://tinyurl.com/2kvr5z99>. Učitano 27.12.2021.

29. Bisnath, S. i Gao, Y. (2009) Current state of precise point positioning and future prospects and limitations. *Observing Our Changing Earth*, (ur.) Sideris, M.G. Springer, Berlin, str. 615–623.
30. Blackett, M. (2014) Early analysis of Landsat-8 thermal infrared sensor imagery of volcanic activity. *Remote Sens.*, 6, str. 2282–2295
31. Blackett, M. (2017) An Overview of Infrared Remote Sensing of Volcanic Activity. *J. Imaging*, 3, 13.
32. Blagojevic, D. i sur. (2016) Variations of total electron content over Serbia during the increased solar activity period in 2013 and 2014. *Geodetski Vestnik* 60, str. 734–744.
33. Boltzmann, L. (1884) Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie. *Ann. Phys. Chem.* 1884, 22, str. 291–294.
34. Bonneville, A., Vasseur, G. i Kerr, Y. (1985) Satellite Thermal Infrared Observations of Mt. Etna after the 17th March 1981 Eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 24, str. 293–313.
35. Bothmer, V. i Daglis, I. (2007) *Space weather physics and effects: Physics and effects*. Praxis Publishing.
36. Brčić, D. (2015) Model nespecifičnoga dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja. Doktorski rad. Sveučilište u Rijeci, Rijeka.
37. Breit, G. i Tuve, M. A. (1925) A Radio Method of Estimating the Height of the Conducting Layer. *Nature* 116 (2914), str. 357–357.
38. Brooks, D. H. i Yardley, S. L. (2021) The source of the major solar energetic particle events from super active region 11944. *Science advances*, 7(10).
39. Brunner, F. K., i Gu, M. (1991) An Improved Model for the Dual Frequency Ionospheric Correction of GPS Observations, *Manuscripta Geodaetica*, 16, str. 280-289.
40. Bruyninx, C., Legrand, J., Fabian, A. i Pottiaux, E. (2019). GNSS metadata and data validation in the EUREF Permanent Network. *GPS Solutions*, 23(4).
41. Buzulukova, N. (2017) *Extreme Events in Geospace : Origins, Predictability, and Consequences*. Elsevier Science Publishing Co Inc. Str. 727-744.
42. Cahyadi, M. N., Rahayu, R. W., Heki, K. i Nakashima, Y. (2020) Harmonic ionospheric oscillation by the 2010 eruption of the Merapi volcano, Indonesia, and the relevance of its amplitude to the mass eruption rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 405, str. 107047.
43. Cahyadi, M. N., Handoko, E. Y., Rahayu, R. W. i Heki, K. (2021) Comparison of volcanic explosions in Japan using impulsive ionospheric disturbances. *Earth, Planets and Space* 73(1).
44. Camacho-Lara, S. (2013) Current and Future GNSS and Their Augmentation Systems. *Handbook of Satellite Applications*. Springer New York. Str. 617–654.

45. Cane, H. (2000) Coronal mass ejections and forrush decreases. *Space Sci. Rev.* 93, str. 55–77.
46. Carboni, E., Grainger, R. G., Mather, T. A., Pyle, D. M., Thomas, G. E., Siddans, R., Smith, A. J. A., Dudhia, A., Koukoulis, M. E. i Balis, D. (2016) The vertical distribution of volcanic SO<sub>2</sub> plumes measured by IASI. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(7), str. 4343–4367.
47. Carn, S. A., Clarisse, L. i Prata, A. J. (2016) Multi-decadal satellite measurements of global volcanic degassing. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 311, str. 99–134.
48. Civilna zaštita RH (2021) O radonu. Dostupno online na <https://bit.ly/3rdEfRc>. Učitano 19.10.2021.
49. Chandrashekara, M. S., Sannappa, J. i Paramesh, L. (2006). Studies on atmospheric electrical conductivity related to radon and its progeny concentrations in the lower atmosphere at Mysore. *Atmospheric Environment*. 40. str. 87-95.
50. Chapman, S. (1931) The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating Earth. *Proceedings of the Physical Society* 43, str. 26-45.
51. Chen, S., Maksimchuk, A. i Umstadter, D. (1998) Experimental observation of relativistic nonlinear Thomson scattering. *Nature* 396 (6712), str. 653–655.
52. Chisham, G., Lester, M., Milan, S. E., Freeman, M. P., Bristow, W. A., Grocott, A., McWilliams, K. A., Ruohoniemi, J. M., Yeoman, T. K., Dyson, P. L., Greenwald, R. A., Kikuchi, T., Pinnock, M., Rash, J. P. S., Sato, N., Sofko, G. J., Villain, J.-P. i Walker, A. D. M. (2007) A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): scientific achievements, new techniques and future directions. *Surveys in Geophysics* 28 (1), str. 33–109.
53. Choy, S., Kuckartz, J., Dempster, A. G., Rizos, C. i Higgins, M. (2016) GNSS satellite-based augmentation systems for Australia. *GPS Solutions* 21 (3), str. 835–848.
54. Cleveland, C. i Morris, C. (2014) *Handbook of energy*. Waltham, MA: Elsevier.
55. Cleveland, R.F. jr. i Ulcek, J.L. (1999) *Questions and Answers about Biological Effects and Potential Hazards of Radiofrequency Electromagnetic Fields* (4th ed.). Washington, D.C.: OET. Federal Communications Commission, Bulletin No. 56.
56. Cobb, W. E., i Wells, H. J. (1970) The Electrical Conductivity of Oceanic Air and Its Correlation to Global Atmospheric Pollution. *Journal of the Atmospheric Sciences* 27 (5), str. 814–819.
57. Corazza, G. C. (1998) Marconi's history. *Proceedings of the IEEE*, 86 (7), str. 1307–1311.
58. Coppola, D., Laiolo, M., Cigolini, C., Massimetti, F., Donne, D.D., Ripepe, M., Arias, H., Barsotti, S., Parra, C.B., Centeno, R.G., i sur. (2020) Thermal Remote Sensing for Global Volcano Monitoring: Experiences from the MIROVA system. *Front. Earth Sci.*, 7, str. 1–21.
59. Cornely, P.R. (2016) Total Electron Content (TEC) Variations and Correlation with Seismic Activity over Japan. *Journal of Young Investigators*, 31(4), str. 13-16.
60. Coulomb, C. A. (1785a) *Premiere Memoire sur l'electricite et le Magnetisme*, *Histoire de l'Academie Royale des Sciences*, str. 569-577.

61. Coulomb, C. A. (1785b) *Seconde Memoire sur l'electricite et le Magnetisme*, Histoire de l'Academie Royale des Sciences, str. 578-611.
62. Coulomb, C. A. (1785c) *Quatrieme Memoire sur l'electricite et le Magnetisme*, Histoire de l'Academie Royale des Sciences, str. 67-77.
63. CROPOS (2022) Državna mreža referentnih stanica Republike Hrvatske. Državna geodetska uprava. Dostupno online: <https://www.cropos.hr>. Posjećeno 20.1.2022.
64. CSNO (2018) BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document—open service signal B3I (Version 1.0). China Satellite Navigation Office, Beijing.
65. Danchik, R.J. (1984) The Navy Navigation Satellite System (TRANSIT). Johns Hopkins APL Technical Digest, 5(4), str. 323-329.
66. Daneshvar, M. R. M. i Freund, F. T. (2017) Remote sensing of atmospheric and ionospheric signals prior to the Mw 8.3 Illapel earthquake, Chile 2015, in: *The Chile-2015 (Illapel) Earthquake and Tsunami*. Springer, str. 157–191.
67. Davies, K. (1965) *Ionospheric Radio Propagation*. Washington, DC: National Bureau of Standards.
68. Davies, K. (1990) *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus Ltd.
69. Davoudifar, P., Tabari, K.R., Shafigh, A.A.E. i sur. (2021) Development of a local empirical model of ionospheric total electron content (TEC) and its application for studying solar-ionospheric effects. *Sci Rep* 11, 15070.
70. De Santis, A., Marchetti, D., Spogli, L., Cianchini, G., Pavón-Carrasco, F. J., Franceschi, G. D., i sur. (2019) Magnetic field and electron density data analysis from swarm satellites searching for ionospheric effects by great earthquakes: 12 Case studies from 2014 to 2016. *Atmosphere (Basel)*, 10, str. 371.
71. Davidenko, D. V., i Pulinets, S. A. (2019) Deterministic variability of the ionosphere on the eve of strong ( $M \geq 6$ ) earthquakes in the regions of Greece and Italy according to long-term measurements data. *Geomagnetizm i Aeronomiya*, 59, str. 493–508.
72. Denisenko, V.V. i Zamay, S.S. (1992) Electric field in the equatorial ionosphere. *Planet Space Sci* 40(7), str. 941–952.
73. Denisenko, V.V., Rycroft, M.J. i Harrison, R.G. (2019) Mathematical Simulation of the Ionospheric Electric Field as a Part of the Global Electric Circuit. *Surv Geophys* 40, str. 1–35.
74. Dentener, F., J. Feichter i Jueken, A. (1999) Simulation of the transport of Rn-222 using on-line and off-line global models at different horizontal resolutions: A detailed comparison with measurements, *Tellus, Ser. B*, 51, str. 573–602.
75. Deshler, T., Johnson, B. J. i Rozier, W. R. (1993) Balloon-borne measurements of Pinatubo aerosol during 1991 and 1992 at 41°N: Vertical profiles, size distribution, and volatility, *Geophys. Res. Lett.*, 20(14), str. 1435–1438.

76. Deshpande, C. G., i Kamra, A. K. (2002) Atmospheric electric conductivity measurements over the Indian Ocean during the Indian Antarctic Expedition in 1996–1997, *J. Geophys. Res.*, 107(D21), 4598.
77. Desideri, D., Roselli, C., Feduzi, L., i Meli, A.M (2006) Monitoring the atmospheric stability by using radon concentration measurements: A study in a Central Italy site, *J. Radioanal. Nucl. Ch.*, 270, str. 523–530.
78. Di Giovanni, G. i Radicella, S. M. (1990) An analytical model of the electron density profile in the ionosphere. *Advances in Space Research*. 10 (11), str. 27-30.
79. Diggelen, F. (2009) *A-GPS: assisted GPS, GNSS, and SBAS*. Boston: Artech House.
80. Dyrud, L. i sur. (2008) Ionospheric measurement with GPS: Receiver techniques and methods. *Radio Science*, 43 (6), str. 1-11.
81. Dyson, F. J. (1990) Feynman's proof of the Maxwell equations. *American Journal of Physics* 58 (3), str. 209–211.
82. Duplančić Leder, T., Leder, N. i Hećimović, Ž. (2016). Određivanje površinske temperature tla područja Splita metodom daljinske detekcije. *Građevinar*, 68 (11.), str. 895-905.
83. Earth Observing System. Data and information system. Volume 2A: Report of the EOS Data Panel Dostupno online: <https://go.nasa.gov/341411b>. Učitano 18.10.2021.
84. Einstein, A. (1905) "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt". *Annalen der Physik*. 17 (6), str. 132–148.
85. Einstein, A. i Lawson, R. W. (1921) *Relativity: The special and general theory*. New York: Holt.
86. Eisenbeis, J. i Occhipinti, G. (2021) The TEC enhancement before seismic events is an artifact. *Journal of Geophysical Research*. *Space Physics*, 126(4).
87. Encyclopaedia Britannica (2022) Mechanisms of ionization. Dostupno online na <https://bit.ly/3L2AK88>. Učitano 25.11.2021.
88. Enge, P. K., Kalafus, R. M. i Ruane, M. F. (1988) Differential operation of the Global Positioning System. *IEEE Communications Magazine* 26 (7), str. 48–60.
89. English, J. M., Toon, O. B. I Mills, M. J. (2013) Microphysical simulations of large volcanic eruptions: Pinatubo and Toba, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, str. 1880–1895.
90. European Space Agency (2011) *SBAS Fundamentals*. Navipedia. Dostupno online: <https://tinyurl.com/2p9fk447>. Učitano 16.1.2022.
91. Fabian, P. i Dameris, M. (2014) *Ozone in the atmosphere: basic principles, natural and human impacts*. Heidelberg New York: Springer.
92. Fedorenko, Y. P., Tyrnov, O. F., Fedorenko, V. N. i Dorohov, V. L. (2013) Model of travelling ionospheric disturbances. *J. Space Weather Space Climate* 3, A30.
93. Feess, W. A., i Stephens, S. G. (1987) Evaluation of GPS Ionospheric Time-Delay Model. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems: AES-23* (3), str. 332–338.

94. Feltens, J. (2007) Development of a new three-dimensional mathematical ionosphere model at European Space Agency/European Space Operations Centre. *Space Weather* 5(12) , str. 1–17.
95. Ferraro V. C. A. (1945) Diffusion of ions in the ionosphere, *Terr. Magn. Atmos. Elect*, 50, str. 215–222.
96. Feynman, R. P., Leighton R. B. i Sands, M. (2011) *The Feynman Lectures on Physics*. Basic Books, New York.
97. Filjar, R. (2011) GNSS: What can go wrong and what are the risks? Risk Management In GNSS Malfunctioning Consultation meeting '11. Rome: International Institute for the Unification of Private Law (UNIDROIT).
98. Fink, J.H., Srivastava, A., Sylvester, D. i Blaauw, D. (2008) *Lava Flows and Domes: Emplacement Mechanisms and Hazard Implications*; Springer: Berlin, Germany.
99. Flannery M. (2006) Electron-Ion and Ion-Ion Recombination. Drake G. (ur) *Springer Handbook of Atomic, Molecular, and Optical Physics*. Springer Handbooks. Springer, New York, NY.
100. Flynn, L.P., Mougini-Mark, P.J. and Horton, K.A. (1994) Distribution of thermal areas on an active lava flow field: Landsat observations of Kilauea, Hawaii, July 1991. *Bull. Volcanol.*, 56, str. 284–296.
101. Flynn, L.P., Harris, A.J.L., Rothery, D.A., i Oppenheimer, C. (2000) High-spatial-resolution thermal remote sensing of active volcanic features using Landsat and hyperspectral data. *Remote Sensing of Active Volcanism*; Wiley-Blackwell: Hoboken, NJ, USA, str. 161–177.
102. Flynn, L.P., Harris, A.J.L. i Wright, R. (2001) Improved identification of volcanic features using Landsat 7 ETM+. *Remote Sens. Environ*, 78, str. 180–193.
103. Francis, P.W. i McAllister, R., (1986) Volcanology from space; using Landsat Thematic Mapper data in the Central Andes. *EOS, Transactions-American Geophysical Union* 67, str. 170 – 171.
104. Francis, P.W. i Rothery, D.A. (1987) Using the Landsat Thematic Mapper to detect and monitor active volcanoes: an example from Lascar volcano, Northern Chile. *Geology* 15, str. 614 – 617.
105. Franklin, B. (1752) A letter of Benjamin Franklin, Esq; to Mr. Peter Collinson, F. R. S. concerning an electrical kite. *Phil. Trans. R. Soc.* 47565–567.
106. Frenzel, L. E., Jr. (2018) Radio/Wireless. *Electronics Explained*, str. 159–194.
107. Friedlander, M. (2012). A century of cosmic rays. *Nature*, 483 (7390), str. 400–401.
108. Fromhold, A. T. (1991) *Quantum Mechanics for Applied Physics and Engineering*. Courier Dover Publications. Str. 5–6.
109. Fu, L.-L., Christensen, E. J., Yamarone, C. A., Jr., Lefebvre, M., Ménard, Y., Dorrer, M. i Escudier, P. (1994) TOPEX/POSEIDON mission overview. *Journal of Geophysical Research* 99 (C12), 24369.



110. Galeriu, D., Melintescu, A., Stochioiu, A. Nicolae, D. i Balin, I. (2011) Radon, as a tracer for mixing height dynamics – an overview and RADO perspectives. *Romanian Reports in Physics*. 63. str. 115-127.
111. Galvan, D. A. i sur. (2011) The 2009 Samoa and 2010 Chile tsunamis as observed in the ionosphere using GPS total electron content. *J. Geophys. Res.* 116(6), str. 1–21.
112. Ganci, G., Vicari, A., Fortuna, L. i Del Negro, C. (2011) The HOTSAT volcano monitoring system based on combined use of SEVIRI and MODIS multispectral data. *Ann. Geophys.*, 54.
113. Ganci, G., Bilotta, G., Cappello, A., Herault, A. i Negro, C.D. (2016) HOTSAT. In *Detecting, Modelling and Responding to Effusive Eruptions*; Geological Society of London: London, UK, str. 207–221.
114. Garcia, R. R. i W. J. Randel (2008) Acceleration of the Brewer–Dobson circulation due to increases in greenhouse gases. *J. Atmos. Sci.*, 65(8), str. 2731– 2739.
115. Garner, T. W., Gaussiran II, T. L., Tolman, B. W., Harris, R. B., Calfas, R. S. i Gallagher, H. (2008) Total electron content measurements in ionospheric physics. *Advances in Space Research* 42 (4), str. 720–726.
116. Garratt, J.R. (1994) *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge Atmospheric and Space Science Series, Cambridge University Press.
117. Gawarecki, S.J., Lyon, R.J.P. i Nordberg, W. (1965) Infrared spectral returns and imagery of the Earth from space and their application to geological problems: scientific experiments for manned orbital flight. *American Astronautical Society, Science and Technology Series 4*, str. 13 – 133.
118. Geiger, H. Nuttall, J.M. (1911) *Philos. Mag.* 22, str. 613.
119. Gelo, B. (2000) *Opća i prometna meteorologija*. Zagreb, Hinus.
120. Ghoddousi-Fard, R. (2014) GPS ionospheric mapping at Natural Resources Canada, IGS workshop, Pasadena, California.
121. Godin, O. A., Zobotin, N. A. i Zobotina, L. (2020) Atmospheric resonances and their coupling to vibrations of the ground and waves in the ocean. In *Earth, Planets and Space*, 72 (1).
122. Goodman, J. M. (2005) *Space Weather and Telecommunications*. Springer Science and Business Media, New York.
123. Golubenko, K., Rozanov, E., Mironova, I., Karagodin, A. i Usoskin, I. (2020) Natural Sources of Ionization and Their Impact on Atmospheric Electricity. *Geophys. Res. Lett.*, 47(20).
124. Gordon, W. E. (1987). *The Propagation of Radio Waves: The Theory of Radio Waves of Low Power in the Ionosphere and Magnetosphere*. In *Eos, Transactions American Geophysical Union* 68 (12), str. 164. American Geophysical Union (AGU).



125. GPS Directorate (2013) Navstar GPS Space Segment/Navigation User Segment Interfaces, Interface Specification, IS-GPS-200H. Los Angeles Air Force Base, El Segundo 2013. Dostupno online: <https://tinyurl.com/mr3csf47>. Učitano 17.1.2022.
126. Grebowsky, J. M. i Aikin, A. C. (2009) Planetary ionospheres – sources and dynamic drivers. Proceedings IAU Symposium No. 257. Cambridge: Cambridge University Press, str. 499-509.
127. Grieder, P.K.F. (2001) Cosmic Rays at Earth. Elsevier, Amsterdam.
128. Griffiths, H. (2018) Oliver Heaviside and the Heaviside layer. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 376(2134).
129. Grigoriev, G.I. (1999) Acoustic-gravity waves in the earth's atmosphere (Review). Radiophys. Quantum Electron., 42, str. 1–21.
130. Gringel, W., Rosen, J.M. i Hofmann, D.J. (1986) Electrical Structure from 0 to 30 Kilometers. Studies in Geophysics: The Earth's Electrical Environment, National Academy Press, Washington, D.C., str. 766-182.
131. GSA – European GNSS Agency. (2018a) Report on Maritime and Inland Waterways User Needs and Requirements. Dostupno online: <https://tinyurl.com/mpvwustx>. Učitano 16.1.2022.
132. GSA (2018b). European GNSS Agency. GNSS User Technology Report, 2. Dostupno online: <https://tinyurl.com/45cjfs7p>. Učitano 16.1.2022.
133. Gurtner, W. i Estey, L. (2009) RINEX: The Receiver Independent Exchange Format. V3.01. Pasadena: IGS Central Bureau.
134. Häggström, I. (2021) Incoherent and coherent scatter radars. The ESPAS e-infrastructure: Access to data from near-Earth space, Les Ulis: EDP Sciences, str. 117-126.
135. Hall, G. W. (1996) USCG Differential GPS Navigation Service. USCG NAVCEN Web Site. Dostupno online: <https://tinyurl.com/bdee55wu>. Učitano 16.1.2022.
136. Han, M. Y. (1999) Quarks and gluons: a century of particle charges. Singapore River Edge, NJ: World Scientific.
137. Hansen, J. E., Wang, W. C. i Lacis, A. A. (1978) Mount Agung eruption provides test of a global climatic perturbation. Science 199, str. 1065–1068.
138. Hao, Y. Q., Xiao, Z. i Zhang, D. H. (2012) Multi-Instrument Observation on Co-Seismic Ionospheric Effects after Great Tohoku Earthquake Journal of Geophysical Research, 117.
139. Hargreaves, J.K. (1979) The upper atmosphere and solar–terrestrial relations. Van Nostrand Reinold Co Ltd, New York.
140. Hargreaves, J.K. (1995) The solar-terrestrial environment. Cambridge: Cambridge University Press.

141. Harris, A. (2013) *Thermal Remote Sensing of Active Volcanoes: A User's Manual*; Cambridge University Press: Cambridge, UK.
142. Harris, A.J.L., Keszthelyi, L., Flynn, L.P., Mouginiis-Mark, P.J., Thornber, C., Kauahikaua, J., Sherrod, D., Trusdell, F., Sawyer, M.W. i Flament, P. (1997) Chronology of the episode 54 eruption at Kilauea volcano, Hawaii, from GOES-9 satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, 24, str. 3281–3284.
143. Harris, A.J.L., Pilger, E., Flynn, L.P., Garbeil, H., Mouginiis-Mark, P.J., Kauahikaua, J.; Thornber, C. (2001) Automated, high temporal resolution, thermal analysis of Kilauea volcano, Hawai'i, using GOES satellite data. *Int. J. Remote Sens.*, 22, str. 945–967.
144. Harris, A.J.L. i Stevenson, D.S. (1997) Thermal observations of open degassing conduits and fumaroles at Stromboli and Vulcano using remotely sensed data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 76, str. 175 – 198.
145. Harrison, R. G., Aplin, K. L. i Rycroft, M. J. (2010) Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere. In *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72 (5–6), str. 376–381).
146. Harrison, R.G. (2013) The Carnegie Curve. *Surv Geophys* 34, str. 209–232.
147. Hathaway, D. H. (2015) The Solar Cycle. *Living Rev. Sol. Phys.* 12(4).
148. Hayakawa, M. i Molchanov, O. A. (2002) *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Terra Scientific Publishing Co., Tokyo, 477.
149. Hazewinkel, H. (ur.) *Encyclopedia of Mathematics*. Springer, Berlin (2001)
150. He, L. i Heki, K. (2016), Three-dimensional distribution of ionospheric anomalies prior to three large earthquakes in Chile, *Geophys. Res. Lett.*, 43, str. 7287– 7293.
151. Hébert, H., Occhipinti, G., Schindelé, F. i sur. (2020) Contributions of Space Missions to Better Tsunami Science: Observations, Models and Warnings. *Surv Geophys* 41, str. 1535–1581.
152. Hegerl, G. C., Crowley, T. J., Baum, S. K., Kim, K.Y. i Hyde, W. T. (2003) Detection of volcanic, solar and greenhouse gas signals in paleo-reconstructions of Northern Hemispheric temperature, *Geophys. Res. Lett.* 30, str. 1242.
153. Hernández-Pajares, M., Juan, J., Sanz, J. (1999) New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data. *J Atmos Solar Terr Phys* 61(16), str. 1237–1247.
154. Hernández-Pajares, M., Juan, J., Sanz, J., Orus, R., Garcia-Rigo, A., Feltens, J., Komjathy, A., Schaer, S. i Krankowski, A. (2009) The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. *J Geodesy* 83(3–4), str. 263–275.

155. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., Thépaut, J. i sur. (2020) The ERA5 global reanalysis. In *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146, (730), str. 1999–2049.
  156. Hess, V. (1912) On the Observations of the Penetrating Radiation during Seven Balloon Flights. Division of Geophysics, Meteorology and Geomagnetism.
  157. Hines, C. O. (1960) Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys.* 38, str. 1441–1481.
  158. Hirsikko, A., Nieminen, T., Gagné, S., Lehtipalo, K., Manninen, H. E., Ehn, M., Hörrak, U., Kerminen, V.-M., Laakso, L., McMurry, P. H., Mirme, A., Mirme, S., Petäjä, T., Tammet, H., Vakkari, V., Vana, M. i Kulmala, M. (2011) Atmospheric ions and nucleation: a review of observations. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11 (2), str. 767–798.
  159. Hochegger, G., Nava, B. Radicella, S. i Leitinger, R. (2000). A family of ionospheric models for different uses. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science* 25.4, str. 307–310.
  160. Holton, J. R. i Alexander, M. J. (2000) The role of waves in the transport circulation of the middle atmosphere, *Geophys. Monogr.*, 123, xtr. 21–35.
  161. Holton, J. i Hakim, G. (2013) *An introduction to dynamic meteorology*. Amsterdam Boston: Academic Press.
  162. Holweck, F. i Wertenstein, L. (1930) Ionisation Potential of Radon. *Nature* 126, 433.
  163. Hopfield, H. (1969) Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *J Geophys Res* 74(18), str. 4487–4499.
  164. Hoppel, W. A., Andersen, R. V. i Willet, J. C. (1986) Atmospheric electricity in the planetary boundary layer, in *Studies in Geophysics: The Earth's Electrical Environment*, str. 159–165
  165. Hoque, M. M., i Jakowski, N. (2008). Estimate of higher order ionospheric errors in GNSS positioning. *Radio Science* 43 (5).
  166. Howard, T. (2011) *Coronal mass ejections: an introduction*. New York: Springer.
  167. Hsu, A., Larson, R. E. i Bressan, D. J. (1980) Diurnal Variations of Radon and Mixing Heights Along a Coast: A Case Study, *J. Geophys. Res.*, 85, str. 4107–4110.
  168. Huang, X. i Reinisch, B. W. (2001) Vertical electron content from ionograms in real time. *Radio Science* 36 (2), str. 335–342.
  169. Hunsucker, R. D. i Hargreaves, J. K. (ur.) (2003) *The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation*. Cambridge: Cambridge University Press.
  170. IALA. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities. (2015). *Performance and Monitoring of DGNSS Services in the Frequency Band 283.5-325kHz*.
-

171. IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2003) IEEE Standard for Letter Designations for Radar-Frequency Bands. IEEE Std 521-2002. New York: IEEE Aerospace & Electronic Systems Society.
172. IGS. International GNS Service. (2013) RINEX: The Receiver Independent Exchange Format. V3.02. IGS RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Service Special Committee 104 (RTCM-SC 104). Pasadena: IGS Central Bureau.
173. Immel, T. J., Mende, S. B., Hagan, M. E., Kintner, P. M., i England, S. L. (2009) Evidence of Tropospheric Effects on the Ionosphere. In Eos, Transactions American Geophysical Union, 90 (9), str. 69. American Geophysical Union (AGU).
174. IMO. International Maritime Organization. (1997) Resolution A.860(20): Maritime policy for a future Global Navigation Satellite Systems (GNSS). London: IMO.
175. IMO. International Maritime Organization. (1998) Resolution MSC.74(69): Adoption of new and amended performance standards. London: IMO.
176. IMO International Maritime Organization. (2001) Resolution A.915 (22): Revised Maritime Policy and Requirements for a Future Global Navigation Satellite System (GNSS). International Maritime Organization: London, UK.
177. IMO. International Maritime Organization. (2002) Resolution MSC.917(22): Guidelines for onboard operational use of shipborne Automatic Identification Systems (AIS). London: IMO.
178. IMO. International Maritime Organization. (2006) Resolution MSC.232(82): Adoption of the revised performance standards for Electronic Chart Display and Information Systems (ECDIS). London: IMO.
179. IMO. International Maritime Organization. (2011) Resolution A.1046 (27): Worldwide Radionavigation System. International Maritime Organization: London, UK.
180. Israel, H. (1970) Atmospheric Electricity, Vol.1, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, str. 1-317.
181. ITU-R (2013). Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems. Recommendation ITU-R, str. 531-12.
182. Jacob, D. (1999) Introduction to atmospheric chemistry. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
183. Jakowski, N., Leitinger, R. i Angling, M. (2004) Radio occultation techniques for probing the ionosphere. Annals of Geophysics. 47 (2-3), str. 1049-1066.
184. Jee, G. (2004). Analysis of TEC data from the TOPEX/Poseidon mission. Journal of Geophysical Research 109, (A1).
185. Jensen, J.R. (2000) Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective, 2nd ed.; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA.

186. Jin, S., Cardellach, E. i Xie, F. (2013) GNSS remote sensing: theory, methods and applications. Dordrecht: Springer.
187. Kamide, Y. i Chian A. C. L. (ur.) (2007) Handbook of the Solar-Terrestrial Environment. New York: Springer Science and Business Media.
188. Kamra, A. K., i Deshpande, C. G. (1995) Possible secular change and land-to-ocean extension of air pollution from measurements of atmospheric electrical conductivity over the Bay of Bengal, *J. Geophys. Res.*, 100, str. 7105–7110.
189. Kamsali, N., Prasad, B.S.N., i Datta, J. (2009). Atmospheric electrical conductivity measurements and modeling for application to air pollution studies. *Advances in Space Research*. 44. str. 1067-1078.
190. Kamsali, N., Prasad, B.S.N. i Datta, J. (2011) The Electrical Conductivity as an Index of Air Pollution in the Atmosphere. Farhad N (ur.), *Advanced Air Pollution*, IntechOpen.
191. Kaplan, E. D. i Hegarty, C.J. (ur.) (2006) *Understanding GPS: Principles and Application*. Second edition. Boston: Artech House.
192. Kee, C. i Parkinson, B. W. (1996) Wide area differential GPS (WADGPS): future navigation system. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 32 (2), str. 795–808.
193. Kelley, M. (2009) *The earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics*. Amsterdam Boston: Academic Press.
194. Kennelly, A.E. (1902) On the Elevation of the Electrically-Conducting Strata of the Earth's Atmosphere. *Elee. TWorld and Engr.*, 39, str. 473.
195. Kidwell, Katherine B., comp. and ed., (1995) NOAA Polar Orbiter Data (TIROS-N, NOAA-6, NOAA-7, NOAA-8, NOAA-9, NOAA-10, NOAA-11, NOAA-12, and NOAA-14, NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17, NOAA-18, NOAA-19) Users Guide : Washington, D.C., NOAA/NESDIS.
196. Kintner, P.M., Ledvina, B.M., de Paula, E.R. (2007) GPS and ionospheric scintillations. *Space Weather* 5, 09003.
197. Kiyani, A., Shah, M., Ahmed, A., Shah, H. H., Hameed, S., Adil, M. A. i Naqvi, N. A. (2020) Seismo ionospheric anomalies possibly associated with the 2018 Mw 8.2 Fiji earthquake detected with GNSS TEC. *Journal of Geodynamics*, 140, 101782.
198. Klobuchar, J. A. (1975) A First-Order, Worldwide, Ionospheric, Time-Delay Algorithm. IPL Project No. 4643. Hanscom: Air Force Cambridge Research Laboratory.
199. Klobuchar, J. A. (1983) Ionospheric Effects on Earth-Space Propagation. Environmental research paper No. 866. Hanscom: Air Force Geophysics Laboratory.
200. Klobuchar, J. A. (1987) Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 23 (3), str. 325–331.

201. Klobuchar, J. A. (1988) Ionospheric corrections for timing applications. Proceedings of the 20th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Application and Planning Meeting, str. 193-204.
202. Klobuchar i sur. (1995) Potential Ionospheric Limitations to GPS Wide-Area Augmentation System (WAAS). *Journal of the Institute of Navigation*. 42 (2), str. 353–370.
203. Komadina, P., Brčić, D. i Frančić, V. (2013) VTMISS služba u funkciji unaprjeđenja sigurnosti pomorskog prometa i zaštite okoliša na Jadranu. *Pomorski zbornik*, 47-48 (1), str. 27-40.
204. Kos, S., Pongračić, B. i Brčić, D. (2018) A study on multi-constellation GNSS positioning performance in terms of maritime requirements. 12<sup>th</sup> Annual Baška GNSS Conference. Baška, Croatia.
205. Kouba, J. (2004) Improved relativistic transformations in GPS. *GPS Solutions*, 8(3), str. 170–180.
206. Kouba, J. (2009) A guide to using International GNSS Service (IGS) products. Pasadena: IGS Central Bureau.
207. Krankowski, A., Pulinet, S., Davidenko, D., Pajares, M., Cherniak, I.V., Zakharenkova, I. i Rothkaehl, H. (2018) Global Electric Circuit as engine of seismo-ionospheric coupling. Concept validation within the framework of INSPIRE project.
208. Kremser, S. i sur. (2016) Stratospheric aerosol—Observations, processes, and impact on climate. *Rev. Geophys.* 54, str. 278–335.
209. Krishna, S.G. (2017) GPS-TEC Analysis Software Version 2.9. Dostupno online na: <http://seemala.blogspot.in/>
210. Kulmala, M., Maso, M. D., Mäkelä, J. M., Pirjola, L., Väkevä, M., Aalto, P., Miikkulainen, P., Hämeri, K. i O’Dowd, C. D. (2001) On the formation, growth and composition of nucleation mode particles. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 53 (4), str. 479–490.
211. Kumar, P., Srivastava, P. K., Tiwari, P. i Mall, R. K. (2021) Application of GPS and GNSS technology in geosciences. *GPS and GNSS Technology in Geosciences* str. 415–427.
212. Kuo, C. L., Lee, L. C. i Huba, J. D. (2014), An improved coupling model for the lithosphere-atmosphere-ionosphere system, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, str. 3189– 3205.
213. Lanyi, G. E. i Roth, T. (1988) A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations. *Radio science*, 23 (4), str. 483-492.
214. Laštovička, J. (2009) Lower ionosphere response to external forcing: A brief review. In *Advances in Space Research* 43 (1), str. 1–14.
215. Lau, L. (2021) GNSS multipath errors and mitigation techniques. Petropoulos, G. P. i Srivastava, P. K. (ur.) *GPS and GNSS Technology in Geosciences*, str. 77–98.
216. Lay, E. (2008) Investigating lightning-to-ionosphere energy coupling based on VLF lightning propagation characterization. Doktorska disertacija. University of Washington.

217. Leamon, R. J., McIntosh, S. W., i Marsh, D. R. (2021) Termination of Solar Cycles and Correlated Tropospheric Variability. *Earth and Space Science* 8 (4).
218. Lee, K. i Lucas, D. D. (2007) A Study of Small Ions and Aerosol Nucleation in the Troposphere. American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, abstract id. A13A-0874.
219. Lee, J.S. i Miller, L.E. (1998) *CDMA Systems Engineering Handbook*. Artech House, Inc., Boston and London.
220. Lemonnier LG. (1752) Observations sur l'électricité de air. *Mem Acad Sci* 2, str. 233
221. Lenard, P. (1892) Über die Elektrizität der Wasserfälle. *Ann. Phys., Lpz.* 46. str. 584–636.
222. Levin, M. L. i Miller, M. A. (1981) Maxwell a treatise on electricity and magnetism. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 135(3), str. 425-440.
223. Li, K. J., Kong, D. F., Liang, H. F. i Feng, W. (2014) What do the solar activity indices represent? *Astronomical Notes*. 335(3), str. 371–377.
224. Li, W., Guo, J., Yue, J., Shen, Y. i Yang, Y. (2016) Total electron content anomalies associated with global VEI4+ volcanic eruptions during 2002–2015. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 325, str. 98–109.
225. Li, Z., Yuan, Y., Wang, N., Hernandez-Pajares, M. i Huo, X. (2015) SHPTS: towards a new method for generating precise global ionospheric TEC map based on spherical harmonic and generalized trigonometric series functions. *J Geodesy* 89(4), str. 331–345.
226. Lilensten, J., Pibaret, B. i Lemieux-Dudon, B. (2004) A morphological study of the Integrated Total Electron Content and F region parameters using EISCAT in the frame of Space Weather. EISCAT Technical Report 04/54. Kiruna: EISCAT Scientific Association.
227. Liu, J.-Y., i Chao, C.-K. (2017) An observing system simulation experiment for FORMOSAT-5/AIP detecting seismo-ionospheric precursors. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. 28 (2), str. 117–127.
228. Liu, X., Zhang, Q., Shah, M., i Hong, Z. (2017) Atmospheric-ionospheric disturbances following the April 2015 Calbuco volcano from GPS and OMI observations. *Advances in Space Research*, 60, str. 2836–2846.
229. Lockwood, M. i sur. (1999) Predicting Solar Disturbance Effects on Navigation Systems. *Journal of Navigation*. 52 (2), str. 203–216.
230. Lognonné P., Artru J., Garcia R., Crespon F., Ducic V., Jeansou E., Occhipinti G., Helbert J., Moreaux G. i Godet P. E. (2006) Groundbased GPS imaging of ionospheric postseismic signal. *Planetary and Space Science* 54, str. 528-540.
231. Lognonné, P., Garcia, R., Crespon, F., Occhipinti, G., Kherani, A. i Artru-Lambin, J. (2006) Seismic waves in the ionosphere. *Europhysics News* 37 (4), str. 11–15.
232. Lopez-Martinez, M., Álvarez, J.-M., Lorenzo, J.-M. i Daroca, C. G. (2020) SBAS/EGNOS for Maritime. *Journal of Marine Science and Engineering* 8 (10), 764.



233. Lorentz, H.A. (1895) Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern.
234. MacColl, L. A. (1932) Note on the Transmission and Reflection of Wave Packets by Potential Barriers. *Physical Review*, 40 (4), str. 621-626.
235. MacDougall, J. i sur. (2009) On the production of traveling ionospheric disturbances by atmospheric gravity waves. *J. Atmospheric Solar Terrest. Phys.* 71, str. 2013–2016.
236. Mach, D.M., Blakeslee, R.J., Bateman, M.G. i Bailey, J.C. (2009) Electric fields, conductivity, and estimated currents from aircraft overflights of electrified clouds, *J. Geophys. Res.*, 114(10).
237. Mach, D.M., Blakeslee, R.J., Bateman, M.G. i Bailey, J.C. (2010) Comparisons of total currents based on storm location, polarity, and flash rates derived from high-altitude aircraft overflights, *J. Geophys. Res.*, 115(3).
238. Mach, D.M., Blakeslee, R.J. i Bateman, M.G. (2011) Global electric circuit implications of combined aircraft storm electric current measurements and satellite-based diurnal lightning statistics, *J. Geophys. Res.*, 116(5).
239. Mackintosh, R., Ai-Khalili, J., Jonson, B. i Pena, T. (2001) *Nucleus: A trip into the heart of matter*. Baltimore, MD: The Johns Hopkins University Press. Pogl. 6.
240. Mai, T. (2012) *Global Positioning System History*. NASA. Dostupno online na <https://tinyurl.com/4rhpbvze>. Učitano 20.12.2021.
241. Manes A. (1976) *Particulate Air Pollution Trends Deduced from Atmospheric Electrical Conductivity Measurements at Bet-Dagan (Israel)*. Dolezalek H., Reiter R., Landsberg H.E. (ur.) *Electrical Processes in Atmospheres*. Steinkopff.
242. Manucci, A.J. i sur. (1998) A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio Science*. 33 (3). str. 565-582.
243. Manucci, A.J. i sur. (1999) *GPS and Ionosphere*. Revised Submission to URSI Reviews of Radio Science. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory.
244. Marchetti, D., De Santis, A., Shen, X., Campuzano, S. A., Perrone, L., Piscini, A., Di Giovambattista, R., Jin, S., Ippolito, A. i Cianchini, G. (2020) Possible lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling effects prior to the 2018 Mw=7.5 Indonesia earthquake from seismic, atmospheric and ionospheric data. *Journal of Asian Earth Sciences*, 188, 104097.
245. Matosevic, M., Salcic, Z. i Berber, S. (2006) A Comparison of Accuracy Using a GPS and a Low-Cost DGPS. In *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 55(5), str. 1677–1683.
246. McAdie, A. (1925) The Kennelly-Heaviside Layer. *Science*, 61 (1586), str. 540–540. American Association for the Advancement of Science (AAAS).



247. Medić, D., Gudelj, A. i Kavran, N. (2019) Overview of the Development of the Maritime Search and Rescue System in Croatia. *Promet – Traffic&Transportation*, 31 (2), str. 205-212.
248. Medina-Castro, P., Caraveo-Mena, C., Barboza-Tello, N. A., i Loredó-Medina, R. (2020) A brief description of the GPS architecture. In *ECORFAN Journal-Democratic Republic of Congo*, str. 12–16.
249. Mehdi S., Shah M. i Naqvi N.A. (2021) Lithosphere atmosphere ionosphere coupling associated with the 2019 Mw 7.1 California earthquake using GNSS and multiple satellites. *Environ Monit Assess.* 22, 193 (8), str. 501.
250. Mehmood, M., Saleem, S. i Filjar, R. (2021) Eyjafjallajökull Volcanic Ash 2010 Effects on GPS Positioning Performance in the Adriatic Sea Region. *Atmosphere* 13 (1), 47.
251. Melbourne, W. G. (2004) *Radio Occultations Using Earth Satellites: A Wave Theory Treatment*. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory.
252. Memarzadeh, Y. (2009) *Ionospheric modeling for precise GNSS applications*. Doktorski rad, Delft University of Technology, Netherlands.
253. Mendillo, M. (2006) Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Reviews of Geophysics*. 44 (4).
254. Meyer-Vernet, N (2007) *Basics of the Solar Wind*. Cambridge University Press.
255. Miessler, G. L. i Tarr, D. A. (1999). *Inorganic Chemistry* (2nd ed.). Prentice Hall. str. 41.
256. Mironova, I., Aplin, K., Arnold, F., Bazilevskaya, G., Harrison, R., Krivolutsky A., Nicoll, K., Rozanov, E., Turunen, E., i Usoskin, I. (2015) Energetic particle influence on the Earth's atmosphere, *Space Science Reviews*, 96.
257. Mishev, A. (2013) Short- and Medium-Term Induced Ionization in the Earth Atmosphere by Galactic and Solar Cosmic Rays. *International Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, str. 1–9.
258. Misra, P. i Enge, P. (2004) *Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance*. Lincoln: Ganga-Jamuna Press.
259. Mittal, V. K., Verma, R. C. i Gupta, S. C. (2018) *Introduction to Nuclear and Particle Physics*, PHI Learning, New Delhi.
260. Mohammed, D. (2018) *Advanced Unmanned Aerial Systems Report*. Dostupno online na <https://tinyurl.com/2bna9k5t>. Učitano 12.12.2021.
261. Montenbruck, O. (2003) Kinematic GPS Positioning of LEO Satellites using Ionosphere-Free Single Frequency Measurements, *Aerospace Science and Technology*, 7, str. 396–405.
262. Mohović, Đ. (2003) *Algoritamski pristup planiranju pomorske plovidbe*. Magistarski rad. Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, Hrvatska.
263. Monteiro, L. S., Moore, T. i Hill, C. (2005) What is the accuracy of DGPS? *Journal of Navigation* 58(2), str. 207–225.

264. Morozov, V.N. i Kupovykh, G.V. (2017) Global Electric Circuit and Near-Ground Layer Electricity, Federal Service of Hydrometeorology and Environment Monitoring; Voieikov Main Geophysical Observatory, ASTERION Publ.: Sankt-Petersburg, Russia, str. 306.
265. Nakashima, Y., Heki, K., Takeo, A., Cahyadi, M. N., Aditiya, A. i Yoshizawa, K. (2016) Atmospheric resonant oscillations by the 2014 eruption of the Kelud volcano, Indonesia, observed with the ionospheric total electron contents and seismic signals. *Earth and Planetary Science Letters* 434, str. 112–116.
266. Nappo, C. (2013). An introduction to atmospheric gravity waves. Academic Press. Amsterdam, Netherlands.
267. NASA – MODIS specifications (2001). Dostupno online na: <https://go.nasa.gov/3KYPjcf>. Učitano 18.10.2021.
268. Norris, A. (2010) ECDIS and Positioning. London: The Nautical Institute.
269. Oberheide, J., Lehmacher, G. A., Offermann, D., Grossmann, K. U., Manson, A. H., Meek, C. E., Schmidlin, F. J., Singer, W., Hoffmann, P., i Vincent, R. A. (2002) Geostrophic wind fields in the stratosphere and mesosphere from satellite data, *J. Geophys. Res.*, 107(D23), 8175.
270. Occhipinti, G. i sur. (2011) Three-dimensional numerical modeling of tsunami-related internal gravity waves in the Hawaiian atmosphere. *Earth Planets Space* 63(7), str. 847–851.
271. Occhipinti, G. i sur. (2013) From Sumatra 2004 to Tohoku-Oki 2011: The systematic GPS detection of the ionospheric signature induced by tsunamigenic earthquakes. *J. Geophys. Res.* 118(6), str. 3626–3636.
272. Oerter, R. (2006) The theory of almost everything: the Standard Model, the unsung triumph of modern physics. New York: Pi Press.
273. Oikonomou, C., Haralambous, H., Pulinets, S., Khadka, A., Paudel, S. R., Barta, V., Muslim, B., Kourtidis, K., Karagiorgas, A., i Inyurt, S. (2020) Investigation of Pre-Earthquake Ionospheric and Atmospheric Disturbances for Three Large Earthquakes in Mexico. In *Geosciences* 11, (1), str. 16. MDPI AG.
274. Oppenheimer, C. (1991) Lava flow cooling estimated from Landsat Thematic Mapper infrared data: the Lonquimay eruption (Chile, 1989). *Journal of Geophysical Research* 96, str. 21865 – 21878.
275. Oppenheimer, C. (1998) Review article: Volcanological applications of meteorological satellites, *International Journal of Remote Sensing*, 19:15, str. 2829-2864
276. Oppenheimer, C. i Yirgu, G. (2002) Thermal imaging of an active lava lake: Erta 'ale volcano, Ethiopia. *Int. J. Remote Sens.* 2002, 23, str. 4777–4782.
277. Ouzounov, D., Pulinets, S., Davidenko, D., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Dwivedi, B., Rybin, A., Kafatos, M., i Taylor, P. (2021) Transient Effects in Atmosphere and Ionosphere Preceding the 2015 M7.8 and M7.3 Gorkha-Nepal Earthquakes. *Frontiers of Earth Science*, 9.

278. Owens, M. J., McCracken, K. G., Lockwood, M. i Barnard, L. (2015) The heliospheric Hale cycle over the last 300 years and its implications for a “lost” late 18<sup>th</sup> century solar cycle. *Journal of Space Weather and Space Climate* 5 (A30).
279. O’Neill, B. C. i sur. (2016) The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geosci. Model Dev.* 9, str. 3461–3482.
280. Quack, M., Kallenrode, M.-B., Koenig, M. von, Kuenzi, K., Burrows, J., Heber, B. i Wolff, E. (2001) Ground level events and consequences for stratospheric chemistry, in *International Cosmic Ray Conference*, 10, str. 4023
281. Pandara, D. P., Muslim, B., Sunardi, B., Ferdy, Pasau, G., Mananohas, M. i Ango, C. (2021) Analysis of Ionosphere disturbance caused by the Lokon Volcano Eruption using GPS TEC data. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1115 (1), 012062.
282. Parkinson, W.C i Torrenson, O.W. (1931) The diurnal variation of the electrical potential of the atmosphere over the oceans, *Compt. Rend. De l’Assemblee de Stockholm, IUGG, Terres. Magn. Electr. Bull.* 8, str. 340-345.
283. Parkinson, B.W. i Spilker Jr., J. J. (ur.) (1996) *Global Positioning System: Theory and Applications. Volume I.* Washington, DC: AIAA.
284. Parrot, M., Tramutoli, V., Liu, T. J. Y., Pulinets, S., Ouzounov, D., Genzano, N., Lisi, M., Hattori, K., & Namgaladze, A. (2021) Atmospheric and ionospheric coupling phenomena associated with large earthquakes. In *The European Physical Journal Special Topics*, 230 (1), str. 197–225.
285. Petit, G. i Luzum, B. (ur.) (2010) *IERS Conventions 2010.* IERS Technical Note No. 36. Frankfurt am Main: International Earth Rotation and Reference Systems Service.
286. Petrovski, I. (2014) *GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou for Mobile Devices.* Cambridge: Cambridge University Press.
287. Petrovski, I. i Tsujii, T. (2012) *Digital Satellite Navigation and Geophysics: A Practical Guide with GNSS Signal Simulator and Receiver Laboratory.* Cambridge: Cambridge University Press.
288. Pirsiavash, A., Broumandan, A., Lachapelle, G. i O’Keefe, K. (2018) GNSS Code Multipath Mitigation by Cascading Measurement Monitoring Techniques. *Sensors*, 18 (6), str. 1967.
289. Planck, M. (1901) On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum, *Annalen der Physik*, 4, str. 553.
290. Pongračić, B., Wu, F. i Sikder, M. (2017) Detection of TEC Anomalies Preceding Earthquake over L’Aquila Region Using Ground-Based GNSS Measurements. *11<sup>th</sup> Annual Baška GNSS Conference*At: Baška, Croatia.
291. Pongračić, B., Wu, F., Fathollahi, L. i Brčić, D. (2019). Midlatitude Klobuchar correction model based on the k-means clustering of ionospheric daily variations. *GPS Solutions* 23 (3).

292. Portillo, A., Herraiz, M., Radicella, S.M., Ciralo, L. (2008) Equatorial plasma bubbles studied using African slant total electron content observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 70, str. 907–917.
293. Pulinets, S. (2009) Physical mechanism of the vertical electric field generation over active tectonic faults. *Adv. Space Res.* 44, str. 767–773.
294. Pulinets, S. (2012) Low-Latitude Atmosphere-Ionosphere Effects Initiated by Strong Earthquakes Preparation Process. In *International Journal of Geophysics*, 2012, str. 1–14.
295. Pulinets, S.A., Boyarchuk, K.A., Hegai, V.V., Kim, V.P. i Lomonosov, A.M. (2000) Quasielectrostatic model of atmosphere–thermosphere–ionosphere coupling. *Advances in Space Research* 26, str. 1209–1218.
296. Pulinets, S. i Boyarchuk, K. (2005) *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Springer-Verlag, Berlin.
297. Pulinets, S. i Davidenko, D. (2014) Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit. *Advances in Space Research*, 53(5), str. 709–723.
298. Pulinets, S.A. i Davidenko, D.V. (2018) The Nocturnal Positive Ionospheric Anomaly of Electron Density as a Short-Term Earthquake Precursor and the Possible Physical Mechanism of Its Formation. *Geomagn. Aeron.* 58, str. 559–570.
299. Pulinets, S.A., Khachikyan, G.Y. (2020) Unitary Variation in the Seismic Regime of the Earth: Carnegie-Curve Matching. *Geomagn. Aeron.* 60, str. 787–792.
300. Pulinets, S., Khachikyan G. (2021) The Global Electric Circuit and Global Seismicity. *Geosciences*. 11(12), str. 491.
301. Pulinets, S.A., Khegai, V.V., Boyarchuk, K.A. i Lomonosov, A.M. (1998) Atmospheric electric field as a source of ionospheric variability. *Physics-Uspekhi* 41, str. 515–522.
302. Pulinets, S.A., Legen'ka, A.D. i Alekseev, V.A. (1994) *Pre-earthquakes effects and their possible mechanisms, Dusty and Dirty Plasmas, Noise and Chaos in Space and in the Laboratory*. Plenum Publishing, New York, str. 545–557
303. Pulinets, S., i Ouzounov, D. (2011) Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation. In *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(4–5), str. 371–382.
304. Pulinets, S.A., Ouzounov, D.P., Karelin, A.V., i Davidenko, D.V. (2015) Physical bases of the generation of shortterm earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere–atmosphere–ionosphere–magnetosphere system, *Geomagn. Aeron.*, 55 (4), str. 521–538.
305. Pulinets, S., Ouzounov, D., Karelin, A., Davidenko, D. (2018a) *Pre-earthquake processes: a multi-disciplinary approach to earthquake prediction studies*. Geophysical Monograph Series, ur. D. Ouzounov, S. Pulinets, K. Hattori, P. Taylor, (AGU and John Wiley & Sons Inc.), 234(79).

306. Pulinets, S., Ouzounov, D., Karelin, A. i Davidenko, D. (2018b) Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere–Magnetosphere Coupling — A Concept for Pre-Earthquake Signals Generation. John Wiley & Sons, Inc., Washington, D.C., USA.
307. Pulinets, S. A., Romanov, A. A., Urlichich, Yu. M., Romanov, A. A., Jr., Doda, L. N. i Ouzounov, D. (2009) The first results of the pilot project on complex diagnosing earthquake precursors on Sakhalin. In *Geomagnetism and Aeronomy*, 49(1), str. 115–123.
308. Rabbany, A. (2006) *Introduction to GPS: the Global Positioning System*. Norwood, Mass: Artech House. Boston, USA.
309. Radicella, S. M. (2009) The NeQuick model genesis, uses and evolution. *Annals of Geophysics*, 52 (3-4), str. 417-422.
310. Ragini, N, Shashikumar, T.S., Chandrashekara, M.S., Sannappa, J. i Paramesh, L. (2008). Temporal and vertical variations of atmospheric electrical conductivity related to radon and its progeny concentrations at Mysore. *Indian Journal of Radio and Space Physics*. 37. str. 264-271.
311. Ragini, N., Chandrashekara, M.S., Nagaiah, N. i Paramesh, L (2009) Study of atmospheric electrical conductivity, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, aerosols SPM (>10 μ) and RSPM (<10 μ) in Mysore city, India, *Toxicological & Environmental Chemistry*, 91 (4), str. 605-609.
312. Rakoto, V. i sur. (2018) Tsunami wave height estimation from GPS-derived ionospheric data. *J. Geophys. Res.* 123(5), str. 4329–4348.
313. Rampino, M. R. i Self, S. (1982) Historic eruptions of Tambora (1815), Krakatau (1883), and Agung (1963), their stratospheric aerosols, and climatic impact. *Quat. Res.* 18, str. 127–143.
314. Ramsey, M.S. i Harris, A.J.L. (2013) Volcanology 2020: How will thermal remote sensing of volcanic surface activity evolve over the next decade? *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 249, str. 217–233.
315. Ratnam, D. V., Dabbakuti, J. R. K. K. i Lakshmi, N. V. V. N. J. S. (2018). Improvement of Indian-Regional Klobuchar Ionospheric Model Parameters for Single-Frequency GNSS Users. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 15 (7), str. 971–975.
316. Ravanelli, M., Occhipinti, G., Savastano, G. i sur. (2021) GNSS total variometric approach: first demonstration of a tool for real-time tsunami genesis estimation. *Sci Rep* 11, str. 3114.
317. Rietdorf, A., Daub, C. i Loef, P. (2006) Precise positioning in real-time using navigation satellites and telecommunication. In *Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'06)*, Hannover, Germany, str. 209–218.
318. Rietmeijer F.J.M. (1993) Volcanic dust in the stratosphere between 34 and 36 km altitude during May, 1985. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 55, str. 69–83
319. Ren, X., Zhang, X., Weiliang, X., Zhang, K., Yuan, Y. i Li, X. (2016) Global Ionospheric Modelling using Multi-GNSS: BeiDou, Galileo, GLONASS and GPS. *Scientific reports*. 6. str. 33499.

320. Retalis, D., Pitta, A. i Psallidas, P. (1991) The conductivity of the air and other electrical parameters in relation to meteorological elements and air pollution in Athens. *Meteorol. Atmos. Phys.* 46, str. 197–204.
321. Reynolds, S. E., Brook, M., i Gourley, M. F. (1957) Thunderstorm Charge Separation, *Journal of Atmospheric Sciences*, 14(5), str. 426-436.
322. Richmond, A.D. (1986) Upper-Atmosphere Electric-Field Sources. *Studies in Geophysics: The Earth's Electrical Environment*, Natl. Acad., Washington D. C., str. 195–205.
323. Rishbeth, H. (1975) On the Theory of Diffusion in the Ionosphere, *Geophysical Journal International*, 41 (3), str. 311–317.
324. Rishbeth, H. (1988) Basic physics of the ionosphere: a tutorial review. *Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers*. 58 (6). str. S207–S223.
325. Rizos, C. i Han, S. (2003) Reference station network based RTK systems–concepts & progress. *Proceedings of 4th International Symposium on GPS/GNSS*, Wuhan, P. R. China.
326. Roble, R.G. i Hays, P.B. (1979) A quasi-static model of global atmospheric electricity. 2. Electric coupling between the upper and lower atmosphere. *J Geophys Res* 84(A12) str. 7247–7256.
327. Roble, R.G. i Tzur, I. (1986) The global atmospheric-electrical circuit. *The Earth's Electrical Environment*, *Studies in Geophysics*, str. 206-231.
328. Robock, A. (2000). Volcanic eruptions and climate. *Rev. Geophys.* 38, str. 191–219.
329. Rolland, L. M., Lognonné, P. i Munekane, H. (2011) Detection and modeling of Rayleigh wave induced patterns in the ionosphere. *J. Geophys. Res.* 116(5).
330. Roma-Dollase, D., Hernández-Pajares, M., Krankowski, A., Kotulak, K., Ghoddousi-Fard, R., Yuan, Y., Li, Z., Zhang, H., Shi, C. i Wang, C. (2018) Consistency of seven different GNSS global ionospheric mapping techniques during one solar cycle. *J Geodesy* 92(6), str. 691–706.
331. Rosario, A.S. i Wichmann, H.-E. (2006) Environmental Pollutants | Radon, (ur) Geoffrey J. Laurent, Steven D. Shapiro, *Encyclopedia of Respiratory Medicine*, Academic Press, str. 120-125.
332. Rosen, J. M., i Hofmann, D. J. (1981) Balloon-borne measurements of electrical conductivity, mobility, and the recombination coefficient, *J. Geophys. Res.*, 86, str. 7406–7410.
333. Rosen, J. M., i Hofmann, D. J. (1988) A search for large ions in the stratosphere, *J. Geophys. Res.*, 93, str. 8415–8422.
334. Rothery, D.A., Francis, P.W. i Wood, C.A., (1988) Volcano monitoring using short wavelength infrared data from satellites. *Journal of Geophysical Research* 93, str. 7993 – 8008.



335. Röttger, J., Wannberg, U. G. i van Eyken, A. P. (1995) The EISCAT Scientific Association and the EISCAT Svalbard Radar Project. *Journal of geomagnetism and geoelectricity* 47 (8), str. 669–679.
336. Ruzmaikin, A. (2001) Origin of Sunspots. *Space Science Reviews* 95, 43–53.
337. Rycroft, M. J., Israelsson, S. i Price, C. (2000) The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 62 (17–18), str. 1563–1576.
338. Saastamoinen, J. (1972) Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. The use of artificial satellites for geodesy, *Geophysical monograph series 15*. American Geophysical Union, Washington, str. 247–251.
339. Saha, K. (2008) *The Earth's atmosphere: its physics and dynamics*. Springer. Berlin, Germany.
340. Salles, L.A., Vani, B.C., Moraes, A. i sur. (2021) Investigating Ionospheric Scintillation Effects on Multifrequency GPS Signals. *Surv Geophys* 42, str. 999–1025.
341. Santer, B. D. i sur. (2015) Observed multivariable signals of late 20th and early 21st century volcanic activity. *Geophys. Res. Lett.* 42, str. 500–509.
342. Schaer, S. (1999). *Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System*. Geodatisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz.
343. Schaer, S., Gurtner, W. i Feltens, J. (1998) IONEX: The IONosphere Map Exchange Format Version 1. International GNSS Service. Dostupno online na: <https://files.igs.org/pub/data/format/ionex1.pdf>. Učitano 29.12.2021.
344. Schunk, R. i Nagy, A. (2009) *Ionospheres: Physics, Plasma Physics and Chemistry*. 2nd edition. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
345. Sellar, A. A. i sur. (2019) UKESM1: description and evaluation of the UK Earth System Model. *J. Adv. Modeling Earth Syst.* 11, str. 4513–4558.
346. Sesana, L., Caprioli, E. i Marcazzan, G. M. (2003) Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere, *J. Environ. Radioactiv.*, 65, str. 147–160.
347. Shah, M. i Jin, S. (2015) Statistical characteristics of seismo-ionospheric GPS TEC disturbances prior to global  $M_w \geq 5.0$  earthquakes (1998–2014). *Journal of Geodynamics*, 92, str. 42–49.
348. Shah, M., Ahmed, A., Ehsan, M., Khan, M., Tariq, M. A., Calabria, A., i Rahman, Z. (2020) Total electron content anomalies associated with earthquakes occurred during 1998–2019. *Acta Astronaut* 175.
349. Sheftel, V. M., Chernyshev, A. K., i Chernysheva, S. P. (1994) Air conductivity and atmospheric electric field as an indicator of anthropogenic atmospheric pollution, *J. Geophys. Res.*, 99 (D5), str. 10793– 10795.

350. Shrivastava, M.N., Maurya, A.K., Gonzalez, G. i sur. (2021) Tsunami detection by GPS-derived ionospheric total electron content. *Sci Rep* 11, str. 12978.
351. Shults, K., Astafyeva, E. i Adourian, S. (2016) Ionospheric detection and localization of volcano eruptions on the example of the April 2015 Calbuco events. *J. Geophys. Res.* 121(10), str. 10–303.
352. Sigl, M. i sur. (2015) Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. *Nature* 523, str. 543–549.
353. Siingh, D., Pant, V. i Kamra, A. K. (2007) Measurements of positive ions and air Earth current density at Maitri, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 112 (D13).
354. Simpson, G. C. (1927) The mechanism of a thunderstorm. *Proc. Roy. Soc. London A.* 114. str. 376–401.
355. Someda, C. (2006). *Electromagnetic waves*. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis.
356. Sorokin, V. M., Isaev, N. V., Yaschenko, A. K, Chmyrev, V. M., o Hayakawa, M. (2005) Strong DC electric field formation in the low latitude ionosphere over typhoons, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 67(14).
357. Sorokin, V. i Yaschenko, A. (2000) Electric field disturbance in the Earth — ionosphere layer, *Adv. Space Res.*, 26, str. 1219–1223.
358. Sorokin, V., Yaschenko, A. Chmyrev, V. i Hayakawa, M. (2006) DC electric field amplification in the mid-latitude ionosphere over seismically active faults. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C.* 31. str. 447-453.
359. Stansell, T.A. Jr. (1971) Transit, The Navy Navigation Satellite System, *Navigation, Journal of The Institute of Navigation*, 18 (1), str. 93-109.
360. Stefan, J. (1879) Über die Beziehung Zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur; *Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften: Wien, Austria*, str. 391–428.
361. Stolzenburg, W.D. Rust, M. i Marshall, T.C. (1988) Electrical structure in thunderstorms convective regions: 3, *Synthesis. J. Geophys. Res.*, 103. str. 14097–14108.
362. Stuewer R.H. (1986) Gamow's Theory of Alpha-Decay. In: Ullmann-Margalit E. (ur) *The Kaleidoscope of Science. Boston Studies in the Philosophy of Science*, 94. Springer, Dordrecht, Netherlands.
363. Subirana, J.S., Zornoza J.M.J., Hernandez-Pajares, M. (2011) Reference Frames in GNSS. *ESA Navipedia*. Dostupno online: <https://tinyurl.com/2ctm6ra6>. Učitano 15.1.2022.
364. Subirana, J.S., Zornoza J.M.J., Hernandez-Pajares, M. (2013) *GNSS Data processing, Volume I: Fundamentals and algorithms*; ESA Communications: Noordwijk, The Netherlands.



365. Sun, YY., Liu, H., Miyoshi, Y. i sur. (2019) El Niño–Southern Oscillation effect on ionospheric tidal/SPW amplitude in 2007–2015 FORMOSAT-3/COSMIC observations. *Earth Planets Space* 71(35).
366. Surkov, V.V. (2015) Pre-seismic variations of atmospheric radon activity as a possible reason for abnormal atmospheric effects. In *Annals of Geophysics*, 58 (5).
367. Takasu, T. (2018) RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning. Dostupno online na: <http://www.rtklib.com>
368. Talaat, E. i Zhu, X. (2016) Spatial and temporal variation of total electron content as revealed by principal component analysis. *Annal. Geophys.* 34, str. 1109–1117.
369. Tariq, M. A., Shah, M., Hernández-Pajares, M., & Iqbal, T. (2019) Pre-earthquake ionospheric anomalies before three major earthquakes by GPS-TEC and GIM-TEC data during 2015–2017. *Advances in Space Research*, 63, str. 2088–2099.
370. Teunissen, P. J. G. (1991) Differential GPS: Concepts and quality control. Proc. NIN Workshop Glob. Position. Syst., Amsterdam (Netherlands Institute of Navigation, Delft 1991) str. 1–46.
371. Teunissen, P. J. G., i Montenbruck, O. (ur.). (2017) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer International Publishing. Basel, Switzerland.
372. Thomas, M. i sur. (2011) Global Navigation Space Systems: Reliance and Vulnerabilities. London: The Royal Academy of Engineering.
373. Tinsley, B. A. i Zhou, L. (2006) Initial results of a global circuit model with variable stratospheric and tropospheric aerosols, *J. Geophys. Res.*, 111, D16205.
374. Toman, I., Kos, S. i Brčić, D. (2018) On long-term solar activity impact on GPS single-frequency 3D positioning accuracy in the Adriatic Region. Proceedings of 12<sup>th</sup> Annual Baška GNSS Conference. Baška, Hrvatska.
375. Toman, I., Kos, S. i Brčić, D. (2021) Contribution to the Research of the Effects of Etna Volcano Activity on the Features of the Ionospheric Total Electron Content Behaviour. *Remote Sens.* 13, 1006.
376. Toon, O. B., Turco, R. P., Westphal, D., Malone, R. i Liu, M. S. (1988) A multidimensional model for aerosols — Description of computational analogs, *J. Atmos. Sci.*, 45, str. 2123–2143.
377. Tramutoli, V. i sur. (2019) Tropospheric and Ionospheric Anomalies Induced by Volcanic and Saharan Dust Events as Part of Geosphere Interaction Phenomena. *Geosciences*, 9, str. 177.
378. Tsurutani, B. i Gonzalez, W. (1993) On the solar interplanetary causes of geomagnetic storms. *Phys. Fluids B Plasma Phys.* (1989–1993) 5, str. 2623.

379. United Nations, Office For Outer Space Affairs (2010) Current and planned global and regional navigation satellite systems and satellite-based augmentation systems. Dostupno online: <https://tinyurl.com/ye22fvtx>. Učitano 15.1.2022.
380. US DOD. USA Department of Defense. (2007) Global Positioning System precise positioning service performance standard. Washington, DC: US DOD.
381. US DOD. USA Department of Defense. (2008) Global Positioning System standard positioning service performance standard. Washington, DC: US DOD.
382. Usoskin, I. G. , Desorgher, L. , Velinov, P., Storini, M., Flückiger, E. , Bütikofer, R. i Kovaltsov, G. (2009) Ionization of the Earth's atmosphere by solar and galactic cosmic rays, *Acta Geophysica* 57 (1), str. 88–101.
383. Vadas, S. L., i Liu, H. (2009) Generation of large-scale gravity waves and neutral winds in the thermosphere from the dissipation of convectively generated gravity waves. In *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 114 (A10). American Geophysical Union (AGU).
384. Van Rossum, G. i Drake Jr, F. L. (1995) Python reference manual. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam.
385. Velinov, P.I.Y., Asenovski, S., Kudela, K., Lastovicka, J., Mateev, L., Mishev, A. i Tonev, P. (2013) Impact of cosmic rays and solar energetic particles on the Earth's ionosphere and atmosphere. *J. Space Weather Space Clim.* 3(26), A14.
386. Viggiano, A.A. i Arnold, F. (1995) Ion Chemistry and Composition. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, Vol. 1. CRC Press. Boca Raton, Florida.
387. Viher, M. (2011) Utjecaj troposferskih dinamičkih procesa na pojave nestandardne refrakcije radio valova. Doktorski rad. Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet. Zagreb, Hrvatska.
388. Vincent, R. A. (2009) Gravity wave coupling from below: A review. *Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES): Selected Papers from the 2007 Kyoto Symposium*, Tsuda, T., Fujii, R., Shibata, K. i Geller, M. A. (ur.). , Tokyo: TERRAPUB. Str. 279–293.
389. Vlasov, A., Kauristie, K., van de Kamp, M., Luntama, J. P. i Pogoreltsev, A. (2011) A study of traveling ionospheric disturbances and atmospheric gravity waves using EISCAT svalbrad radar IPY-data. *Annal. Geophys.* 29, str. 2101–2116.
390. Volarić, B. (2004) Električna svojstva atmosfere. *Hrvatski Meteorološki Časopis* 83-102.
391. Waldock, J.A., Jones, T.B. (1986) HF Doppler observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances at mid-latitudes. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 48 (3), str. 245–360.
392. Walker, A. D. M. (1961) The Quasi-Longitudinal Approximation to the Appleton-Hartree Equation. *Nature* 189, (4766), str. 742–742.

393. Wang, N., Yuan, Y., Li, Z. i Huo, X. (2016) Improvement of Klobuchar model for GNSS single-frequency ionospheric delay corrections. *Advances in Space Research* 57 (7), str. 1555–1569.
394. Weaver, K. F., Morales, V., Dunn, S. L., Godde, K., Weaver, P. F. Pearson's and Spearman's Correlation. (2017) In *An Introduction to Statistical Analysis in Research* str. 435–471.
395. Weintrit, A. (1999) *The Electronic Chart Display and Information System (ECDIS): an operational handbook*. Boca Raton Fla. London: CRC Press.
396. Weintrit, A. (2017) *Marine navigation: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav 2017)*, Gdynia, Poland. London: CRC Press.
397. Welling, D. T., Love, J. J., Rigler, E. J., Oliveira, D. M., Komar, C. M. i Morley, S. K. (2021) Numerical Simulations of the Geospace Response to the Arrival of an Idealized Perfect Interplanetary Coronal Mass Ejection. *Space Weather*, 19 (2). American Geophysical Union (AGU).
398. Wernik, A.W., Alfonsi, L., Materassi, M. (2007) Scintillation modeling using in situ data, *Radio Science*, 42, RS1002.
399. Whipple, F.J.W. (1929) On the association of the diurnal variation of the electric potential gradient in fine weather with the distribution of thunderstorms over the globe. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 55, str. 351–361.
400. Whipple, F.J.W. i Scrase, F.J. (1936) Point discharge in the electric field of the Earth, *Geophys. Memoirs (London)* VIII(68), 20.
401. Whittlesey, Marshall A. (2020) *Spherical geometry and its applications*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.
402. Wickert, J., Reigber, C., Beyerle, G., König, R., Marquardt, C., Schmidt, T., Grunwaldt, L., Galas, R., Meehan, T. K., Melbourne, W. G. i Hocke, K. (2001) Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP. *Geophysical Research Letters* 28 (17), str. 3263–3266.
403. Wien, W. (1896) *Über die Energieverteilung in Emissionsspektrum eines schwarzen Körpers*. *Ann. Phys. Chem.* 58, str. 662–669.
404. Wiesnet, D.R. i D'Aguzzo, J. (1982) Thermal imagery of Mount Erebus from the NOAA-6 satellite. *Antarct. J. U. S.* 17, str. 32–34.
405. Wilkening, M.H., Kawano, M. i Lane, C. (1966) Radon-daughterions and their relation to some electrical properties of the atmosphere. *Tellus* 18, str. 679–684.
406. Wilkening, M.H. (1977) Influence of the electric fields of thunderstorms on radon-222 daughter ion concentrations. *Electrical Processes in Atmospheres*. Steinkopff, Darmstadt, str. 54–59.
407. Wilkening, M. (1990) *Radon in the environment*. Elsevier, Amsterdam, str. 1–137.

408. Williams, E.R. (2009) The global electrical circuit: A review. *Atmos. Res.* 91, str. 140-152.
409. Williams, E. i Mareev, E. (2014) Recent progress on the global electrical circuit. *Atmos. Res.*, str. 135–136, 208–227.
410. Williams, J. E. S., Tournay, R. C., Tseng, H. R., Emmons, D. J., i Nava, O. A. (2021) Impact of Hurricane Michael (2018) on local vertical total electron content. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 219, 105647.
411. Wilson, C.T.R. (1916) On some determinations of the sign and magnitude of electric discharges in lightning flashes. *Proc. Roy. Soc.* A92, str. 555–574
412. Wilson, C.T.R. (1921) Investigations on lightning discharges and the electric field of thunderstorms. *Philos. Trans. A.* 221, str. 73–115.
413. Wright, R., Flynn, L., Garbeil, H., Harris, A. i Pilger, E. (2002) Automated volcanic eruption detection using MODIS. *Remote Sens. Environ.* 82, str. 135–155.
414. Wright, R., Flynn, L., Garbeil, H., Harris, A. i Pilger, E. (2004). MODVOLC: Near-real-time thermal monitoring of global volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 135. str. 29-49.
415. Wright, R. i Flynn, L.P. (2004) Space-based estimate of the volcanic heat flux into the atmosphere during 2001 and 2002. *Geology*, 32, 189.
416. Wright, R., Blackett, M. i Hill-Butler, C. (2015) Some observations regarding the thermal flux from Earth's erupting volcanoes for the period of 2000 to 2014. *Geophys. Res. Lett.*, 42, str. 282–289.
417. Wu, H.C. i Tikhonov, I. N. (2014) Jet streams anomalies as possible short-term precursors of earthquakes with  $M > 6.0$ , *Research in geophysics*, 4(1).
418. Yeh, K.C., Liu, C-H. (1982) Radio wave scintillations in the ionosphere. *IEEE Proceedings* 70, str. 324–360.
419. Yu, S., Liu, Z. (2021) The ionospheric condition and GPS positioning performance during the 2013 tropical cyclone Usagi event in the Hong Kong region. *Earth Planets Space* 73, 66.
420. Zhang, H., Xu, P., Han, W., Ge, M. i Shi, C. (2013) Eliminating negative VTEC in global ionosphere maps using inequality-constrained least squares. *Adv Space Res* 51(6), str. 988–1000.
421. Zhang, Y., Wu, F., Kubo, N. i Yasuda, A. (2003) TEC Measurement By Single Dual-frequency GPS Receiver. *Proceedings of 2003 International Symposium on GPS/GNSS At: Tokyo, Japan*
422. Zhao, J., Hernández-Pajares, M., Li, Z. i sur. (2021) Integrity investigation of global ionospheric TEC maps for high-precision positioning. *J Geod* 95, 35.
423. Zhu, Y., Toon, O.B., Jensen, E.J. i sur. (2020) Persisting volcanic ash particles impact stratospheric SO<sub>2</sub> lifetime and aerosol optical properties. *Nat Commun* 11, str. 4526.

424. Zlotnicki, J., Li, F. i Parrot, M. (2010) Signals recorded by DEMETER satellite over active volcanoes during the period 2004 August-2007 December. *Geophysical Journal International* 183, str. 1332-1347.
425. Zlotnicki, J., Li, F. i Parrot, M. (2013) Ionospheric Disturbances Recorded by DEMETER Satellite over Active Volcanoes: From August 2004 to December 2010. *International Journal of Geophysics*, 2013.
426. Zolesi, B. i Cander, L. (2013) *Ionospheric prediction and forecasting*. Springer. Heidelberg, Germany.
427. Zou, H., i Hastie, T. (2005) Regularization and variable selection via the elastic net. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B, Statistical Methodology*, 67(2), str. 301–320.
428. Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., Webb, F.H. (1997) Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.* 102, str. 5005–501.

## Popis kratica, naziva, oznaka i simbola

### *Kratice i nazivi*

AIS – *Automatic Identification System*  
ASECNA/AFI – *The Agency for Air Navigation Safety in Africa and Madagascar; African-Indian ocean*  
ASTER – *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*  
AVHRR – *Advanced Very-High-Resolution Radiometer*  
BDC – *BeiDou Coordinate*  
C/A – *Coarse/Acquisition*  
CDMA – *Code Division Multiple Access*  
CME – *Coronal Mass Ejection*  
CODE – *Center for Orbit Determination in Europe*  
CROPOS – *CROatian POSitioning system* – Hrvatski pozicijski sustav  
DCB – *Differential Code Biases*  
DEMETER – *Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions*  
DGNSS – *Differential GNSS*  
DGPS – *Differential Global Positioning System*  
DOP – *Dilution Of Precision*  
DS-CDMA – *Direct Sequence Code Division Multiple Access*  
ECEF – *Earth Centered, Earth Fixed coordinate system*  
ECHAM4 – *ECmwf/HAMBurg* (Globalni klimatski model)  
EGNOS – *European Geostationary Navigation Overlay Service*  
EISCAT – *European Incoherent SCATter*  
ELF – *Extremely Low Frequency*  
EOS – *Earth Observation System*  
ESA – *European Space Agency*  
EUREF – *EUropean REference Permanent Network*  
EUV – *Extreme UltraViolet*  
FDMA – *Frequency Divison Multiple Access*  
GAGAN – *GPS Aided Geo Augmented Navigation*  
GEC – *Global Electric Circuit*  
GDOP – *Geometric Dilution Of Precision*  
GIMs – *Global Ionospheric Maps*  
GLONASS – *Global'naja Navigacionnaja Sistema* (rus.)

---

GNSS – *Global Navigational Satellite Systems*  
GOES – *Geostationary Operational Environmental Satellites*  
GPS – *Global Positioning System*  
GSA – *European GNSS Agency*  
GTRF – *Galileo Terrestrial Reference Frame*  
HF – *High Frequency*  
HOTSAT – Sustav za identifikaciju i praćenje vulkanske aktivnosti (jedan od)  
HRIR – *High Resolution Infrared Radiometer*  
ENSO – *El Niño Southern Oscillation*  
ERA5 – *Ecmwf Reanalysis 5th generation*  
IAACs – *Ionospheric Associated Analysis Centers*  
IGS – *International GNSS Service*  
IMO – *International Maritime Organization*  
IONEX – *IONosphere EXchange* (format)  
IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*  
IRNSS-NAVIC – *Indian Regional Navigation Satellite System – Navigation with Indian Constellation*  
JPL – *Jet Propulsion Laboratory*  
KAAS – *Korea Augmentation Satellite System*  
LAIC – *Lithosphere, Atmosphere and Ionosphere Coupling*  
LAIMC – *Lithosphere, Atmosphere, Ionosphere and Magnetosphere Coupling*  
MA – *Multiple Access*  
MEO – *Medium Earth Orbit*  
MF – *Medium Frequency*  
MIR – *Mid-InfraRed*  
MIROVA – Sustav za identifikaciju i praćenje vulkanske aktivnosti (jedan od)  
MODIS – *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*  
MODVOLC – Sustav za identifikaciju i praćenje vulkanske aktivnosti (jedan od)  
MSAS – *Multi – functional Satellite Augmentation System*  
NASA – *The National Aeronautics and Space Administration*  
NAVSTAR – *Navigation System with Timing and Ranging*  
NRCan – *Canadian Geodetic Survey of Natural Resources Canada*  
QZSS – *Quasi-Zenith Satellite System*  
PNT – *Positioning, Navigation and Timing*  
PPP – *Precise Point Positioning*  
PPS – *Precise Positioning Service*  
P(Y) – *Precision code* (Y = enkriptiran)  
PZ-90 – *Parametry Zemli 1990 goda* (rus.)

---

RINEX – *Receiver Independent Exchange Format*  
RTK – *Real Time Kinematics*  
RTKLIB – *Real Time Kinematics LIBraries*  
SA – *Selective Availability*  
SACCSA – *Solución de Aumentación para Caribe, Centro y Sudamérica (španj.)*  
SBAS – *Satellite-Based Augmentation Systems*  
SDCM – *System for Differential Corrections and Monitoring*  
SISRE – *Signal-In-Space Range Error*  
SNAS – *Satellite Navigation Augmentation System*  
SPAN – *Southern Positioning Augmentation Network*  
SPE – *Solar Proton Events*  
SPP – *Single Point Positioning*  
SPS – *Standard Positioning Service*  
ST – *System Time*  
STEC – *Slant Total Electron Content*  
SuperDARN – *Super Dual Auroral Radar Network*  
SWIR – *Short-Wave InfraRed*  
TDMA – *Time Division Multiple Access*  
TEC – *Total Electron Content*  
TECU – *TEC Unit*  
TID – *Travelling Ionospheric Disturbances*  
TIR – *Thermal InfraRed*  
TIROS – *Television InfraRed Operational Satellite*  
UEE – *User Equipment Error*  
UERE – *User Equivalent Range Error*  
ULF – *Ultra Low Frequency*  
UTC – *Universal Time Coordinated*  
VNIR – *Visual and Near InfraRed*  
VRP – *Volcanic Radiative Power*  
VTMIS – *Vessel Traffic Management and Information System*  
VTEC – *Vertical Total Electron Content*  
VTS – *Vessel Traffic Service*  
WAAS – *Wide Area Augmentation System*  
WGS-84 – *World Geodetic System – 1984*



## Oznake i simboli

- $\alpha^{2+}$  – Alfa čestica  
 $\alpha_n, \beta_n$  – Koeficijenti Klobucharovog modela  
 $\beta^-$  – Beta-negativni raspad (emitiranje elektrona)  
 $\beta^+$  – Beta-pozitivni raspad (emitiranje pozitrona)  
 $\Delta t_p$  – Iznos kašnjenja satelitskog signala  
 $\Delta \Phi$  – Fazni pomak vala nosioca  
 $\Delta_{ph,f}^{iono}, \Delta_{gr,f}^{iono}$  – Fazna i kodna ionsferska refrakcija  
 $\epsilon$  – Električna permitivnost  
 $\Theta_i$  – Kut prostiranja elektromagnetskog vala u vakuumu  
 $\Theta_m$  – Kut upada radiovala u odnosu na Zemljino magnetsko polje  
 $\Theta_r$  – Kut prostiranja elektromagnetskog vala u mediju  
 $\lambda$  – Valna duljina; vodljivost atmosfere; konstanta raspadanja  
 $\mu$  – Magnetska permeabilnost; modificirana dipolna širina korisnika  
 $\nu$  – Frekvencija elektromagnetskog zračenja, učestalost "sudara" alfa-čestice s energetskom barijerom jake nuklearne sile; frekvencija sudara elektrona i neutralnih čestica  
 $\rho_r^s$  – Geometrijska udaljenost satelita i prijavnika  
 $\sigma_T$  – Ukupna pogreška izračunanog položaja  
 $\tau_r^s$  – Vrijeme prostiranja signala od satelita do prijavnika  
 $\phi_{IF}$  – Linearna kombinacija faznih mjerenja (*Ionospheric Free*)  
 $\phi_n$  – Geomagnetska širina korisnika  
 $\chi$  – Zenitni kut upada Sunčevog zračenja  
 $\Psi$  – Valna funkcija  
 $\omega$  – Kutna valna frekvencija  
 $\nabla^2$  – Vektorski Laplaceov operator  
 $\nabla(N\nu)$  – Gubitak naboja uslijed prijenosa  
 $a_0, a_1, a_2$  – Koeficijenti NeQuick-G modela  
 $A$  – Amplituda ionsferskog kašnjenja; površina između krivulja neaktivne i aktivne grupe dana  
 $A_a$  – Površina ispod krivulje grupe aktivnih dana  
 $A_n$  – Površina ispod krivulje grupe neaktivnih dana  
 $Az$  – Efektivna razina ionizacije  
 $c$  – Brzina elektromagnetskog vala u vakuumu  
 $dt_r$  – Odstupanje korisničkog sata od satelitskih satova  
 $dt_s$  – Odstupanje satelitskog sata od vremena sustava

$E$  — Jakost električnog polja; ukupna kinetička energija novonastalog elementa i alfa-čestice nakon alfa-raspada  
 $e$  — Elementarni električni naboj  
 $e^+$  — Elementarni pozitivni električni naboj  
 $e^-$  — Elementarni negativni električni naboj  
 $e_r^s$  — Pravocrtni vektor između položaja satelita i prijarnika; Nespecificirani čimbenici pogreške  
 $f_c$  — Frekvencija vala nosioca  
 $f_H$  — Žirofrekvencija elektrona  
 $f_N$  — Frekvencija plazme  
 $h$  — Visina iznad površine Zemlje; Planckova konstanta  
 $h_0$  — Visina vršne vrijednosti gustoće elektrona  
 $h(\mathbf{x})$  — Linearna vektorska funkcija mjerenja pseudoudaljenosti  
 $h_{err}$  — Horizontalno odstupanje položaja  
 $H$  — Atmosferska skala visine  
 $\mathbf{H}$  — Jakost magnetskog polja  
 $H_2O$  — Voda  
 $H_2SO_4$  — Sumporna kiselina  
 $He^{2+}$  — Jezgra helija (alfa-čestica)  
 $hgt_c$  — Izračunana nadmorska visina stanice  
 $hgt_t$  — Stvarna nadmorska visina stanice  
 $I$  — Jakost električne struje; magnetska inklinacija  
 $I_r^s$  — Ionosfersko kašnjenje signala  
 $K_{go}$  — Koeficijent globalnog odstupanja položaja u sustavu  
 $k_i$  — Pokretljivost iona  
 $L$  — Brzina rekombinacije; spektralna radijancija  
 $lat_c, lon_c$  — Geografska širina i dužina stanice izračunana GNSS sustavom  
 $lat_t, lon_t$  — Stvarna geografska širina i dužina stanice  
 $m_e$  — Masa elektrona  
 $M$  — Magnituda potresa  
 $n$  — Indeks loma  
 $n_e$  — Gustoća elektrona  
 $n_i$  — Broj iona i-te vrste u jedinici volumena  
 $N_0$  — Vršna vrijednost gustoće elektrona u sloju  
 $N_2$  — Molekula dušika  
 $NO$  — Dušikov oksid

$O$  – Atom kisika  
 $O_2$  – Molekula kisika  
 $O_3$  – Molekula ozona; ozon  
 $p_r^s$  – Pseudoudaljenost prijavnika i satelita  
 $P$  – Period polukosinusne funkcije  
 $^{206}\text{Pb}$  – Olovo  
 $^{218}\text{Po}$  – Polonij  
 $q$  – Brzina ionizacije  
 $R_0$  – Radijus jezgre atoma  
 $^{226}\text{Ra}$  – Radij  
 $\text{Rn}, ^{222}\text{Rn}$  – Radon  
 $r$  – Polumjer Zemlje  
 $rr$  – Vektor položaja prijavnika  
 $rs$  – Vektor položaja satelita  
 $S_4$  – Indeks jakosti scintilacije  
 $SI$  – Jakost signala  
 $\text{SO}_2$  – Sumporov dioksid  
 $\text{Th}$  – Torij  
 $t$  – Vrijeme; lokalno vrijeme korisnika  
 $t_0$  – Konstantni fazni pomak  
 $t_n$  – Noćna konstantna vrijednost ionosferskog kašnjenja signala  
 $t_r$  – Vrijeme prijavnika u trenutku primanja signala  
 $t_s$  – Vrijeme satelita  
 $T$  – Vjerojatnost tuneliranja čestice kroz barijeru; temperatura crnog tijela  
 $T_r^s$  – Troposfersko kašnjenje signala  
 $^{238}\text{U}$  – Uranij  
 $v$  – Brzina elektromagnetskog vala u mediju; brzina alfa-čestice nakon napuštanja jezgre  
 $v_{err}$  – Vertikalno odstupanje položaja  
 $\hat{x}$  – Vektor aproksimativnog položaja prijavnika  
 $\mathbf{x}_0$  – Inicijalna aproksimacija vektora položaja prijavnika  
 $xr$  – x koordinata položaja prijavnika  
 $xs$  – x koordinata položaja satelita  
 $yr$  – y koordinata položaja prijavnika  
 $ys$  – y koordinata položaja satelita  
 $Z$  – Atomska broj radioaktivnog kemijskog elementa  
 $zr$  – z koordinata položaja prijavnika  
 $zs$  – z koordinata položaja satelita

## Popis slika

Slika 1: Određivanje položaja presijecanjem sfera nastalih mjerenjem pseudoudaljenosti (A), te ispravak položaja za odstupanje sata korisničkog uređaja (B), crtkane linije.....	22
Slika 2: Arhitektura DGNSS sustava.....	28
Slika 3: Pokrivenost aktualnih SBAS sustava.....	30
Slika 4: Princip određivanja vremenske odgode primanja signala.....	35
Slika 5: Zakon refrakcije.....	39
Slika 6: Tipičan vertikalni profil gustoće elektrona u ionosferi srednjih zemljopisnih širina za vrijeme niske (lijevo) i visoke (desno) Sunčeve aktivnosti.....	50
Slika 7: Srednje dnevne promjene električnog polja prema mjerenjima s brodova Carnegie i Maud.....	53
Slika 8: Vertikalni profil vodljivosti atmosfere.....	55
Slika 9: Vertikalna raspodjela stupnja ionizacije.....	57
Slika 10: Ionosferske zone prema geomagnetskoj širini.....	58
Slika 11: Raspodjela spektralne iradijancije Sunčevog zračenja po valnim duljinama na gornjoj granici atmosfere.....	66
Slika 12: Koncept $\alpha$ -čestice.....	73
Slika 13: Srednja zonalna vrijednost omjera miješanja $R_n$ ( $\cdot 10^{21}$ ).....	78
Slika 14: Prostorna raspodjela stope ionizacije radonom u srpnju (gore) i prosincu (dolje).....	79
Slika 15: Modelirani gubitak električne vodljivosti zraka u troposferi uslijed naoblake i aerosola... ..	85
Slika 16: Oscilacija u količini elektrona u F2 sloju uslijed putujućih ionosferskih poremaćaja.....	91
Slika 17: Usporedba stvarnih i modeliranih vrijednosti kašnjenja signala na primjeru.....	99
Slika 18: Koncept LAIC modela.....	111
Slika 19: TEC anomalije tijekom pripreme faze potresa $M=7.1$ .....	115

Slika 20: Anomalije u ukupnom sadržaju elektrona prije potresa magnituda 7,8 i 7,3.....	116
Slika 21: Prostorni raspored TEC anomalija prije potresa.....	117
Slika 22: Promjena STEC vrijednosti nakon vulkanskih eksplozija.....	120
Slika 23: Usporedba srednjeg TEC u periodu {-30...+20} dana oko "VAI" za tri analizirane referentne stanice.....	123
Slika 24: Srednja vrijednost spektralne radijancije odabranih vulkana ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ).....	129
Slika 25: Odnos valnih duljina EM zračenja i temperature tijela.....	131
Slika 26: Spektralna radijancija odabranih vulkana ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ).....	139
Slika 27: Prostorno odstupanje položaja IGS stanice Brasilia u metrima, u odnosu na referentni položaj.....	148
Slika 28: Položaji odabranih IGS referentnih stanica za izračun globalnog odstupanja položaja GPS sustava.....	155
Slika 29: Medijan srednjih dnevnih odstupanja položaja od 4 odabrane referentne stanice.....	157
Slika 30: Reziduali prostornog odstupanja (24-satna aritmetička sredina).....	162
Slika 31: Reziduali prostornog odstupanja (24-satna srednja kvadratna pogreška).....	163
Slika 32: Ukupan sadržaj elektrona (24-satna aritmetička sredina).....	164
Slika 33: Reziduali noćnog prostornog odstupanja (24-satna aritmetička sredina).....	167
Slika 34: Noćni ukupni sadržaj elektrona (24-satna aritmetička sredina).....	167
Slika 35: Reziduali dnevnog prostornog odstupanja (24-satna aritmetička sredina).....	168
Slika 36: Dnevni ukupni sadržaj elektrona (24-satna aritmetička sredina).....	168
Slika 37: Konceptualni prikaz definicije površine između krivulja.....	170
Slika 38: Usporedba površina () između krivulja aktivnih i neaktivnih perioda, po rezidualima odstupanja i ukupnom sadržaju elektrona.....	174

Slika 39: Usporedba površina ( $\sigma_p$ ) između krivulja aktivnih i neaktivnih perioda, po rezidualima odstupanja i ukupnom sadržaju elektrona.....	175
Slika 40: Površina između krivulja reziduala prostornog odstupanja položaja u ovisnosti o stupnju aktivnosti vulkana.....	178
Slika 41: Vrijednosti površine za analizirane referentne stanice u regiji i procijenjena prostorna interpolacija.....	181
Slika 42: Usporedba reziduala prostornog odstupanja položaja za Etnu pri uključenom (A) i isključenom (B) ispravljanju ionosferskog kašnjenja Klobucharovim modelom.....	188
Slika 43: Srednja brzina (m/s) i smjer vjetra nad Sredozemljem na plohi 250 hPa, prema ERA5.....	192
Slika 44: Srednji zonalni vjetar u srpnju.....	194
Slika 45: Grafovi odnosa spektralne radijancije i reziduala odstupanja za analizirane vulkane.....	200
Slika 46: Grafovi odnosa spektralne radijancije i ukupnog sadržaja elektrona za analizirane vulkane .....	201

## Popis tablica

Tablica 1: Izabrani vulkani za analizu s osnovnim podacima.....	128
Tablica 2: Prostorna i vremenska razlučivost nekih od satelitskih senzora s mogućnošću mjerenja toplinskog zračenja s tla.....	137
Tablica 3: Referentne stanice korištene za proračun položaja.....	147
Tablica 4: Konceptualni prikaz usrednjavanja podataka u grupama.....	160
Tablica 5: UTC razdoblja korištena za vremenske filtre dnevnih i noćnih perioda.....	166
Tablica 6: Površine ( $\sigma$ ) između krivulja reziduala prostornog odstupanja položaja i ukupnog sadržaja elektrona po indeks-danima.....	172
Tablica 7: Površine ( $\sigma$ ) između krivulja standardnih devijacija reziduala prostornog odstupanja položaja i ukupnog sadržaja elektrona po indeks-danima.....	173
Tablica 8: Srednja vrijednost spektralne radijancije i iznos površine.....	177
Tablica 9: Osnovni podaci referentnih stanica i izračunane vrijednosti površine za analizu prostornog utjecaja vulkanske aktivnosti.....	180
Tablica 10: Iznos granične aktivnosti vulkana za prelazak iz negativnog u pozitivan učinak na položajnu točnost.....	191
Tablica 11: Pearsonov koeficijent korelacije te koeficijenti i pokazatelji reprezentativnosti linearne regresije, za rezidualne odstupanja položaja u ovisnosti o spektralnoj radijanciji.....	202
Tablica 12: Pearsonov koeficijent korelacije te koeficijenti i pokazatelji reprezentativnosti linearne regresije, za ukupan sadržaj elektrona u ovisnosti o spektralnoj radijanciji.....	204

## Životopis

Ivan Toman je rođen 24. svibnja 1978. godine u Zadru, gdje je završio osnovnu školu kada sudjeluje i na državnom natjecanju iz fizike. Pohađa srednju Pomorsku školu nautičkog smjera (1992 – 1996). 1996. upisuje Pomorski fakultet u Rijeci, nautički smjer i diplomira u studenom 2000. godine s temom "Ustroj VTS službi u područjima gustog prometa", čime stječe zvanje diplomiranoga inženjera pomorskoga prometa, nautičkoga smjera.

Plovi na brodovima Tankerske plovidbe (brodovi za prijevoz suhih i tekućih rasutih tereta) od 2001. do 2003. godine kao vježbenik i 3. časnik palube.

Zapošljava se kao nastavnik nautičke grupe predmeta u Pomorskoj školi u Zadru, gdje radi od 2004. do 2016. godine. U Prometno-tehničkoj školi u Šibeniku u istom svojstvu radi od 2005. do 2007. godine. Posjeduje položen stručni ispit te dopunsko pedagoško-psihološko obrazovanje, kao i ECDL tečaj. Redovito pohađa stručne seminare i druga stručna usavršavanja.

Pri Visokoj pomorskoj školi Rijeka te kasnije Pomorskom odjelu Sveučilišta u Zadru, kao vanjski suradnik drži vježbe iz predmeta elektronička navigacija, održavanje broda, pomorske komunikacije i primjena računala (2004 – 2005; 2010 – 2015). Predaje na raznim tečajevima za pomorce, uključujući rad na engleskom jeziku za inozemne polaznike. Osposobljava se za rad na nautičkim simulatorima Transas i Poseidon. Drži praktičnu nastavu na brodovima Kraljica mora, Naše more i putničkim brodovima Jadrolinije. Posjeduje niz STCW ovlaštenja.

Od 2016. godine zaposlen na Pomorskom odjelu Sveučilišta u Zadru u svojstvu asistenta. Iste godine upisuje doktorski studij Pomorstvo, smjer Nautičke znanosti na Pomorskom fakultetu u Rijeci. Koautor je 8 objavljenih znanstvenih radova, od čega 6 kao prvi autor. Sudionik je međunarodnih konferencija, te istraživačkog projekta Uniri-tehnic-18-66 pri Sveučilištu u Rijeci.



Aktivno programira u nizu programskih jezika, od kojih najbolje poznaje Python. Aktivnim programiranjem doprinosi poboljšanju službenog koda WRF (Weather Research and Forecast) modela koji poznaje na ekspertnoj razini. Autor je portala MeteoAdriatic, kolumnist je Zadarskog lista (2005 – 2016) te portala eZadar (2007 – 2018). Drži niz stručnih i znanstvenih predavanja (Institut Ruđer Bošković, Astronomski centar Rijeka, Croatia Boat Show, Festival znanosti, ...). Suosnivač je i prvi predsjednik zadarske udruge ZDWireless.