

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Миљана С. Тодоровић Дракул

**МОДЕЛОВАЊЕ ЈОНОСФЕРЕ ЗА  
ПОТРЕБЕ ОДРЕЂИВАЊА УТИЦАЈА  
НА ГПС СИГНАЛЕ У МРЕЖНОМ РТК  
ОКРУЖЕЊУ**

Докторска дисертација

Београд, 2016

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Miljana S. Todorovic Drakul

**IONOSPHERE MODELING FOR THE  
PURPOSES OF DETERMINATION OF  
INFLUENCE TO THE GPS SIGNALS  
WITHIN NETWORK RTK ENVIRONMENT**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016

## ИНФОРМАЦИЈЕ О МЕНТОРУ И ЧЛАНОВИМА КОМИСИЈЕ

### **Ментор:**

Проф. др Драган Благојевић, дипл. инж. геод.,  
Грађевински факултет, Универзитет у Београду

### **Чланови комисије:**

Проф. др Иван Алексић, дипл. инж. геод.,  
Грађевински факултет, Универзитет у Београду

В. проф. др Олег Одаловић, дипл. инж. геод.,  
Грађевински факултет, Универзитет у Београду

В. проф. др Ивана Васиљевић, дипл. инж. геол.,  
Рударско-геолошки факултет, Универзитет у Београду

Др Александра Нина, дипл. физ.  
Институт за физику, Универзитет у Београду

Датум одбране: \_\_\_\_\_, Београд.

---

*С дубоким поштовањем се захваљујем свом ментору проф. др Драгану Благојевићу на залагању, саветима, стручној и људској помоћи, коју ми је несебично пружао током израде ове дисертације. Велико хвала на указаном поверењу и датој слободи у истраживачком раду што је од изузетне важности за једног младог човека.*

*Посебну захвалност дугујем в. проф. др. Олегу Одаловићу на помоћи и подршци током израде дисертације, као и на саветима и стручним разговорима који ће ми значити и у наставку каријере.*

*Изузетну захвалност дугујем и др Александри Нина на бројним корисним саветима и руковођењу делом ове дисертације који се односи на моделовање и одређивање утицаја D региона јоносфере на GNSS сигнале.*

*Захвалност дугујем проф. др Ивану Алексићу и в. проф. др. Ивани Васиљевић на разумевању и пажљивом прегледу рада.*

*За помоћ и подршку током израде ове дисертације, посебно за део који се тиче D региона јоносфере, захвалност дугујем проф. др Владимиру Чадежу.*

*Посебно се захваљујем својим драгим пријатељицама и колегиницама др Милеви Самарцић Петровић и др. Сањи Грекуловић на подршци и помоћи при обради експерименталних података и тестирању модела.*

*Најискреније се захваљујем:*

- Републичком геодетском заводу, Сектору за основне геодетске радове на уступљеним подацима GNSS опажања потребним за израду ове дисертације*
- Геомагнетском заводу - Јоносферској опсерваторији и њиховом особљу на неопходним подацима, посебно др Споменку Михајловићу и колегиници Ани Ковач.*
- Проф. др Десанки Шаулић на обезбеђивању експерименталне апаратуре и колегама са Института за физику у Земуну на уступљеним подацима.*

*За исказану подршку и разумевање захвалност дугујем свим члановима моје породице који су од почетка мог школовања били уз мене: теткама Јелени и Гордани, тетку Милораду, ујацима Божидару и Борђу и њиховим породицама.*

*Желела бих да се захвалим својим пријатељима и колегама на њиховој безрезервној подршци и охрабрењу током мојих интелектуалних напора.*

*И на крају, свим срцем се захваљујем супругу Ненаду и кћерки Катарини на љубави, стрпљењу и безграничној подршци.*

Миљана Годоровић Дракул

# МОДЕЛОВАЊЕ ЈОНОСФЕРЕ ЗА ПОТРЕБЕ ОДРЕЂИВАЊА УТИЦАЈА НА ГПС СИГНАЛЕ У МРЕЖНОМ РТК ОКРУЖЕЊУ

## РЕЗИМЕ

Докторска дисертација посвећена је развоју одговарајућег модела за потребе предикције јоносферских корекција задовољавајуће тачности за мрежне РТК (енг. Real Time Kinematic) апликације.

Као први корак ка остварењу овог циља вршено је испитивање краткорочних временских карактеристика јоносфере на регионалном просторном нивоу, како би се квантификовало њено понашање током различитих сезонских и дневних периода. Коришћени су подаци са мреже перманентних станица на територији Републике Србије. Анализа је вршена за четири различита сезонска периода током претходног соларног максимума током 2013. и 2014. године.

Након тога вршено је анализирање промена садржаја електрона у D региону изазваним соларним X-флеровима на основу чега су истраживане временске промене  $TEC_D$  (енг. Total Electron Content in D region) и њихов удео у укупном  $TEC$  (енг. Total Electron Content) односно укупном кашњењу GPS (Global Positioning System) сигнала.

На крају приступљено је дефинисању одговарајућег модела за потребе предикције јоносферских корекција за мрежне РТК примене на територији Србије. Тестиране су две предиктивне шеме базиране на методу линеарне регресије и примени неуронских мрежа.

Показало се да примена неуронских мрежа даје боље резултате и да је у стању да предиктује јоносферско кашњење на нивоу тачности од  $\pm 5\text{cm}$  у просеку од око 9 минута у односу на реалну стопу јоносферских промена. Ови резултати сугеришу да техника моделовања применом неуронских мрежа, може да се примени код мрежа РТК система за предиктовање грешке јоносферског кашњења који ће омогућити позиционирање на центиметарском нивоу тачности.

**Кључне речи:** GPS, јоносфера, јоносферско кашњење, ТЕС, ТЕС<sub>Д</sub>, линеарна регресија, неуронске мреже

Научна област: Геодезија

Ужа научна област: Референтне геодетске мреже, Премер и уређење земљишне територије

УДК број: 528.3/4 (043.3)

# **IONOSPHERE MODELING FOR THE PURPOSES OF DETERMINATION OF INFLUENCE TO THE GPS SIGNALS WITHIN NETWORK RTK ENVIRONMENT**

## **ABSTRACT**

Doctoral dissertation is dedicated to the development an of appropriate model for the purposes of prediction of ionospheric corrections with satisfactory accuracy for network RTK (Real Time Kinematic) applications.

As a first step towards achieving this goal, short-term temporal ionospheric characteristics on regional spatial level were investigated in order to quantify its behaviour during different seasonal and daily periods. Data from permanent network stations on the territory of the Republic of Serbia were used. The analysis was conducted for four different season periods during the previous solar maximum during the years 2013 and 2014.

After that the analysis of the change in the content of electrons in the D region caused by solar X-flares was performed, based upon which the temporal changes  $TEC_D$  (Total Electron Content in D region) and their share in total TEC (Total Electron Content), i.e. the total delay of GPS (Global Positioning System) signals were investigated.

Finally, an appropriate model for the purpose of the prediction of ionospheric corrections for network RTK applications on the territory of the Republic of Serbia is produced. Two predictive schemes based on the linear regression method and on the use of neuron networks were tested.

It has been shown that the use of the neuron networks gives better results and is able to predict ionospheric delay on  $\pm 5$  cm accuracy level in 9 minutes average in regards to the real rate of ionospheric changes. These results suggest that the modelling technique using neuron networks can be applied for predicting the ionospheric delay error in network RTK systems that will enable centimeter level positioning.



**Key words:** GPS, ionosphere, ionospheric delay, TEC,  $TEC_D$ , linear regression, neuron networks

Scientific area: Geodesy

Scientific subarea: Reference geodetic networks, Surveying and land territory management

UDC number: 528.3/4 (043.3)

## Списак скраћеница

---

ACM -	Area Correction Model
AGW -	Atmospheric Gravity Waves
ANN -	Artificial Neural Networks
AWESOME -	Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation Modeling and Education
BPSK -	Binary Phase Shift Keying
CCIR -	Comite Consultatif International des Radiocommunications
CORS -	Continuously Operating Reference Station
COSPAR -	Committee on Space Research
DGNSS -	Differential GNSS
DGPS -	Differential GPS
DOP -	Dilution of Precision
EPN -	European Permanent Network
EUREF -	European Terrestrial Reference Frames
GFZ -	GeoForschungsZentrum
GNSS -	Global Navigation Satellite Systems
GPS -	Global Positioning System
HSSWS -	High Speed Solar Wind Streams
IAGA -	International Association of Geomagnetism and Aeronomy
IGS -	International GPS Service
IMF -	Interplanetary Magnetic Field
IPP -	Ionospheric Pierce Point
IRI -	International Reference Ionosphere
ISGI -	International Service of Geomagnetic Indices
ITRF96 -	International Terrestrial Reference Frames
ITU -R -	International Telecommunication Union

LSTID -	Large Scale TID
LWPC -	Long-Wave Propagation Capability
LWPM -	Long-Wave Propagation Model
MCS -	Master Control Station
MLP -	Multi-Layer Perceptrons
MSAS -	Multi-functional Transport Satellite Satellite-based Augmentation System
GAGAN -	GPS Aided GEO Augmented Navigation
MSTID -	Medium Scale TID
MUF -	Maximum Usable Frequencies
NASA -	National Aeronautics and Space Administration
NOAA -	National Oceanic and Atmospheric Administration
NTIA -	National Telecommunications and Information Administration
PPK -	Post Processed Kinematic
PRN -	Pseudo Random Noise
RBF -	Radial Basis Function
RINEX -	Receiver INdependent EXchange Format
RTCM -	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK -	Real Time Kinematic
SIDC -	Solar Influences Data Analysis Center
SSTID -	Small Scale TID
STEC -	Slant Total Electron Content
TEC -	Total Electron Content
TEC <sub>D</sub> -	Total Electrons Content in the D region
TECU -	Total Electron Content Unit
TID -	Traveling Ionospheric Disturbances
URSI -	International Union of Radio Science
UT -	Universal Time
VLF -	Very Low Frequency (радио таласи врло ниских фреквенција)
VRS -	Virtual Reference Station
VTEC -	Vertical Total Electron Content (Вертикални Укупни Садржај Електрона )

WEKA 3 - Waikato Environment for Knowledge Analysis 3  
АГРОС - Активна геодетска референтна основа Србије  
ГЛОНАСС - Глобална Навигациона Спутникова Система  
ЛН - Линеарна Регресија  
НМ - Неуронске Мреже

## Списак слика

---

Слика 2.1: Структура Сунца.....	7
Слика 2.2: Компоненте геомагнетног поља на северној хемисфери .....	12
Слика 2.3: Једноставан модел Земљиног геомагнетног поља .....	12
Слика 2.4: Могућа шема поделе Земљине атмосфере .....	17
Слика 2.5: Процес фотојонизације у јоносфери.....	20
Слика 2.6: Јоносферски региони .....	27
Слика 2.7: Вертикални профил густине електрона - максимална фреквенције плазме и максимална висина .....	31
Слика 2.8: Подела Земље на геомагнетне регионе. Приказане су паралелне геомагнетне линије у односу на геодетски референтни оквир .....	34
Слика 3.1: Релативно статичко позиционирање .....	54
Слика 3.2: Релативно кинематичко позиционирање.....	55
Слика 4.1: Подаци јоносонде .....	61
Слика 4.2: Савијање таласа при простирању кроз нехомогену средину.....	64
Слика 4.3: Једнослојна апроксимација јоносфере .....	70
Слика 4.4: IRI профил густине електрона .....	76
Слика 5.1 Поједностављен приказ биолошког неурона.....	92
Слика 5.2 Шематски приказ неуронске мреже (а) са функцијом активације (б) .....	94
Слика 6.1: Актуелна дистрибуција тачака, 2015.....	103
Слика 6.2: Соларна активност током периода тестирања за 2013. годину.....	105
Слика 6.3: Соларна активност током периода тестирања за 2014. годину.....	105
Слика 6.4: Дигитална јоносонда KELIPS 42 .....	110
Слика 6.5: Антена.....	110

Слика 6.6: Поређење између GPSVTEC и IVTEC за 11 дана током 2013. године .....	112
Слика 6.7: Поређење између GPSVTEC и IVTEC за 12 дана током 2014. године .....	113
Слика 6.8: Дневне и сезонске варијације VTEC изнад АГРОС станице Гроцка током 24 часа 2013. за Март, Јун, Септембар и Децембар .....	115
Слика 6.9: Дневне и сезонске варијације VTEC изнад АГРОС станице Гроцка током 24 часа 2014. за Март, Јун, Септембар и Децембар. ....	116
Слика 6.10: VTEC вредности изнад Србије 21. марта 2014. године (јединице: TECU).....	118
Слика 6.11: Временска варијабилност разлика јоносферских кашњења током два карактеристична периода појачане и мирне јоносферске активности .....	121
Слика 6.12: Дневне и ноћне разлике јоносферског кашњења 18.02.2014. год. и 19.06.2014. год. ..	124
Слика 6.13: Временске зависности интензитета X-зрачења регистрованог GOES-14 сателитом ..	127
Слика 6.14: Путања VLF сигнала емитованог ДНО предајником лоцираним у Rhauderfehn-у у Немачкој и детектованог пријемником лоцираним у Београду.....	128
Слика 6.15: Површински приказ $\log(N_e^*(t, h))$ у функцији времена $t$ и висине $h$ током посматраног соларног X-флера, где је $N_e^* = N_e / N_e^0$ и $N_e^0 = 1 \text{ m}^{-3}$ .....	132
Слика 6.16: Временска промена $\text{TEC}_D$ (горњи панел) и његов утицај на $\text{TEC}$ (доњи панел) током посматраног соларног X-флера. ....	134
Слика 6.17: Временска промена $\Delta\text{TEC}_D$ у слојевима (дебљине од 2 km) који се налазе на висинама 60 km, 70 km, 80 km и 88 km током посматраног соларног X-флера. ....	134
Слика 6.18: Површински приказ релативних промена $\Delta\text{TEC}_D(t, h)$ у односу на релевантне вредности за непертурбоване услове у функцији времена $t$ и висине $h$ датог једначином (11) у току посматраног соларног X-флера. ....	135
Слика 6.19: Wait-ови параметри у тренутку максималног интензитета зрачења X-флера .....	136
Слика 6.20: Зависност $\text{TEC}_D$ у тренутку максималног интензитета зрачења X-флерова .....	137
Слика 6.21: Дијаграм шеме примене модела линеарне регресије и неуронских мрежа. ....	139
Слика 6.22: Приказ предиктованих јоносферских корекција за четири дана 2014. године у зависности од величине узорка ( $Lag\ 6$ , $Lag\ 12$ , $Lag\ 24$ ) .....	141
Слика 6.23: Дистрибуција кашњења одређена линеарним регресионим моделом користећи $Lag\ 6$ , $Lag\ 12$ и $Lag\ 24$ узорак за сва годишња доба (време изражено у секундама).....	142

Слика 6.24: Приказ предиктованих јоносферских корекција за четири дана 2014. године у зависности од величине узорка ( <i>Lag 6, Lag12, Lag24</i> ) .....	144
Слика 6.25: Дистрибуција кашњења одређена применом неуронских мрежа користећи <i>Lag 6, Lag 12</i> и <i>Lag 24</i> узорак за сва годишња доба (време изражено у секундама).....	146
Слика 6.26: Разлике између стања реалне јоносфере и стања добијеног предикцијом применом линеарне регресије и неуронских мрежа за 21.03.2104.год. ....	148

## Списак табела

---

Табела 2.1: Класификација геомагнетних олуја [NOAA, 2007].....	16
Табела 3.1: Однос фреквенција појединих компоненти сигнала према основној фреквенцији. ....	44
Табела 6.1: Периоди тестирања.....	104
Табела 6.2: Положај геомагнетског завода Гроцка.....	109
Табела 6.3 : Карактеристике јоносонде.....	110
Табела 6.4: Статистички подаци поређења GPSVTEC и IVTEC .....	111
Табела 6.5: Временски интервали тестирања (до 10 минута).....	121
Табела 6.6: Статистички подаци јоносферског кашњења за различите временске интервале за дан 19.06.2013. године. ....	122
Табела 6.7: Статистички подаци јоносферског кашњења за различите временске интервале за дан 21.03.2014. године. ....	122
Табела 6.8: Временски интервали у којима је $\Delta I$ (јоносферско кашњење) испод $\pm 5$ cm (за дневне и ноћне периоде).....	125
Табела 6.9: $TEC_D$ , $TEC$ и $r_D$ током поремећаја D-региона. ....	133
Табела 6.10: Фитовани коефицијенти коришћени у једначинама (12) и (13).....	136
Табела 6.11: Приближни временски интервали у којима је јоносферско кашњење добијено применом линеарног регресионог модела испод $\pm 5$ cm. ....	143
Табела 6.12: Приближни временски интервали у којима је јоносферско кашњење добијено применом неуронских мрежа испод $\pm 5$ cm. ....	145
Табела 6.13: Поређење линеарног регресионог модела и модела неуронских мрежа .....	147



## САДРЖАЈ

---

Списак скраћеница.....	v
Списак слика .....	viii
Списак табела.....	xi
1. УВОД.....	1
2. ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРИЈЕ И ФИЗИКЕ ЗЕМЉИНЕ ЈОНОСФЕРЕ .....	6
2.1 Основне карактеристике и структура Сунца .....	6
2.1.1 Структура Сунца .....	6
2.1.2 Сунчево зрачење .....	9
2.2 Увод у геомагнетизам .....	11
2.2.1 Земљино магнетно поље .....	11
2.2.2 Реално геомагнетно поље .....	13
2.2.3 Геомагнетне олује .....	14
2.2.4 Геомагнетни индекси .....	15
2.3 Земљина атмосфера .....	16
2.4 Основно о Земљиној јоносфери .....	18
2.4.1 Процес настанка јоносфере.....	19
2.4.2 Јоносферска стратификација (раслојавање).....	26
2.4.3 Подела Јоносфере према географској ширини .....	32
2.4.4 Јоносферски поремећаји .....	35
3. NAVSTAR GPS ГЛОБАЛНИ ПОЗИЦИОНИ СИСТЕМ.....	40
3.1 Развој и архитектура NAVSTAR GPS система.....	40
3.2 GPS сигнали и извори грешака.....	43
3.2.1 Структура GPS сигнала.....	43
3.2.2 Основни извори грешака мерења .....	44
3.3 Математички модел GPS мерења.....	45

3.3.1	Функционални и стохастички модел псеудодужина .....	45
3.3.2	Формирање разлика мерених псеудодужина .....	49
3.4	Принципи GPS позиционирања .....	52
3.4.1	Релативно GPS позиционирање.....	52
3.4.2	Мрежни RTK систем .....	56
4.	GNSS И ДРУГЕ МЕТОДЕ СОНДИРАЊА ЈОНОСФЕРЕ .....	59
4.1	Терестричке методе за сондирање јоносфере - Примена јоносонде.....	59
4.2	Сателитске методе за сондирање јоносфере - Примена Navstar GPS система .....	62
4.2.1	Простирање GPS сигнала кроз јоносферу.....	62
4.2.2	Јоносферски Укупни Садржај Електрона- Total Electron Content (TEC) .....	68
4.2.3	Јоносферски ефекти на GPS релативно позиционирање .....	71
4.2.4	Јоносферски модели.....	72
4.3	Сондирање D региона јоносфере.....	79
4.3.1	Дијагностика D региона радио таласима врло ниских фреквенција.....	79
4.3.2	Моделовање концентрације електрона током појаве X-флера.....	82
5.	АНАЛИЗА ВРЕМЕНСКИХ СЕРИЈА.....	85
5.1	Дефиниција и врсте временских серија .....	85
5.2	Циљеви и приступи.....	87
5.3	Методе.....	87
5.3.1	Линеарна регресија .....	87
5.3.2	Вештачке неуронске мреже .....	92
6.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА.....	100
6.1	Тест подручје - опис Активне Геодетске Референтне Основе Србије.....	100
6.2	Избор периода тестирања и соларна активност током тог раздобља .....	103
6.3	Варијабилност јоносфере изнад Србије.....	106
6.3.1	Одређивање VTEC из GPS мерења.....	106
6.3.2	Одређивање VTEC из параметара јоносонде.....	108
6.3.3	Поређење вредности VTEC добијених из GPS мерења и из параметара јоносонде.....	111
6.3.4	Дневне и сезонске варијације јоносфере.....	114
6.3.5	Просторне варијације јоносфере изнад Србије.....	116

6.3.6	Временске промене јоносферског кашњења.....	119
6.4	Одређивање утицаја D региона јоносфере на укупни TЕС током појаве соларног X - флера.....	125
6.4.1	Експериментална поставка и подаци опажања.....	127
6.4.2	Моделовање D региона.....	129
6.4.3	Временске промене TЕС <sub>D</sub> карактеристика.....	130
6.4.4	Карактеристике ΔTЕС <sub>D</sub> при максимуму интензитета X-флера.....	135
6.4.5	Значај добијених резултата.....	137
6.5	Моделовање јоносфере изнад Србије.....	138
6.5.1	Линеарна регресија (ЛН)-резултати.....	140
6.5.2	Неуронске мреже (НМ)-резултати.....	143
6.5.3	Поређење модела.....	146
7.	ЗАКЉУЧАК.....	149
	ЛИТЕРАТУРА.....	158
	ПРИЛОЗИ.....	169

# 1. УВОД

---

Земљина јоносфера представља слој Земљине атмосфере који због својих физичких и хемијских својстава утиче на GNSS сигнале (енг. Global Navigation Satellite Systems - Глобални Навигациони Сателитски Системи). Постојање слободних електрона у јоносфери, делује на простирање радио таласа, што проузрокује кашњење GNSS сигнала и директно утиче на прецизност GNSS позиционирања. Број електрона са којима се сусрећу електромагнетни таласи путујући кроз јоносферу познат је као Укупни Садржај Електрона (енг. Total Electron Content - TEC) и представља интегралну густину електрона дуж путање сигнала између сателита и GNSS пријемника у колони попречног пресека површине  $1\text{m}^2$ . Јоносферско кашњење је готово сразмерно TEC дуж путање сигнала и обрнуто пропорционално квадрату фреквенције. Ова дисперзивна особина јоносфере омогућава двофреквентним GNSS пријемницима да елиминишу грешке јоносферског кашњења и одреде TEC. Измерен TEC дуж путање сигнала, познат као коси TEC (STEC), могуће је конвертовати у вертикални TEC (VTEC) користећи редукциону функцију. Услед хоризонталне варијације у густини електрона у јоносфери ово пресликавање није савршено, али је апроксимација корисна уз претпоставку да су сви слободни електрони концентрисани у једном слоју (једнослојна апроксимација јоносфере).

Јоносфера је изузетно динамична средина и густина електрона може значајно да варира из минута у минут на датој локацији што доводи до временске и просторне варијације TEC. Временска варијација TEC је повезана са дневним и сезонским променама у међусобном положају Земље и Сунца (соларни зенитни угао) и променама у интензитету сунчевог јонизујућег зрачења (сунчев циклус у трајању од 11 година). Дневне варијације TEC на датој локацији више или мање имају понављајући дневни тренд услед ротације Земље, иако постоје значајне разлике из

дана у дан због других ефеката као што је појава путујућих јоносферских сметњи TID (енг. Traveling Ionospheric Disturbances) и јоносферских геомагнетних олуја.

Као што је претходно поменуто, јоносферски ефекат на радио таласе је фреквентно зависан. Стога, двофреквентни GNSS пријемници имају могућност елиминисања јоносферског кашњења формирањем простих линеарних комбинација двофреквентних опажања. Међутим, једнофреквентни пријемник овај проблем може превазићи користећи извесне јоносферске моделе. Током протекле деценије, неколико нумеричких и емпиријских модела за редовне варијације TEC је развијено на регионалном и глобалном нивоу (Klobuchar модел за GPS - Global Positioning System пријемнике; NeQuick модел за будући европски Galileo GNSS).

Како би се смањили различити утицаји, па и јоносферски, који проузрокују грешке позиционирања, апликације центиметарског нивоа тачности користе технику познату као диференцијално позиционирање (DGNSS или DGPS). Диференцијална (DGNSS) техника укључује сукцесивне разлике кодних и фазних података прикупљених истовремено са истих сателита, са два различита пријемника. Постоји неколико DGPS техника, а једна од њих је и техника позиционирања у реалном времену (енг. Real Time Kinematic - RTK). Ова техника подразумева референтни GNSS пријемник (пријемник чија је антена центрисана на тачки са познатим координатама) који резултате опажања GNSS сателита или корекције опажања континуирано шаље до корисничког пријемника путем неке врсте комуникационе везе (н. пр. VHF или UHF радио везе односно путем мреже мобилне телефоније). Обрада података у корисничком пријемнику подразумева решавање неодређености диференцираних фазних GNSS опажања (фазне неодређености) и оцену компоненти базног вектора у односу на референтни GNSS пријемник. Један значајан недостатак оваквог приступа је да максимално растојање између референтног и корисничког пријемника не би требало бити веће од око 10 km како би се неодређености фазних псеудодужина могле решити брзо и поуздано. Брзо и прецизно решавање фазних неодређености у великој мери је ослоњено на корелацију атмосферских грешака рефракције. Ови утицаји се могу категоризовати као дисперзивни (јоносфера) и недисперзивни (тропосфера и

сателитске орбиталне грешке). Јоносферска грешка има већи утицај на решавање неодређености, јер су и јоносферско кашњење и неодређености зависни од фреквенције. Како дужине базних линија пређу 10 km, позициона решења имају тенденцију да деградирају јер јоносферски ефекат рефракције постаје декорелисан, и не може се поништити кроз диференцирање (Chris Rizos 2003). До сада јоносферска декорелација је ограничавала RTK операције на базне линије дужине до 10 km при нормалним јоносферским условима. За дуже базне линије (од 50 до 100 km) јоносферско кашњење мора бити моделирано или одређено коришћењем двофреквентних пријемника. У овом случају, потребно је израчунати *a priori* корекцију високе прецизности (cm ниво тачности), за јоносферско кашњење.

Модерне GNSS апликације, као што је Мрежни - RTK (Real-Time Kinematic) систем, пружају такве прецизне јоносферске корекције. Корисничке корекције се добијају просторном интерполацијом јоносферског кашњења одређеног на GNSS референтним станицама из регионалне перманентне GNSS мреже у околини пријемника корисника (Memarzadeh, Y., 2009). Важно питање код емитовања ових корекција јесте њихово кашњење. Укупно кашњење корекција може бити реда неколико секунди до неколико десетина секунди. Важно је да се корекције емитују довољно често и са довољно малим кашњењем тако да су још увек примењиве, с обзиром на то да јоносфера брзо варира. У прилог промовисању ефикасног преноса података унутар Мрежног-RTK окружења, важно је квантификовати потребну стопу ажурирања јоносферских корекција како би се одржала потребна тачност центиметарског нивоа. Наплаћивање услуга за пренос корекција корисницима се врши према количини података. Стога је важно, да сервис мрежних корекција узме у обзир минималну фреквенцију која је потребна да се обезбеди тражени ниво прецизности.

Када су интерполоване јоносферске корекције довољно прецизне, тренутно решавање фазних неодређености пријемника постаје могуће. Дакле, да би се прецизно и поуздано решиле фазне неодређености пријемника, јоносферски утицај треба да се зна боље од четвртине таласне дужине или  $\pm 5\text{cm}$  (Chris Rizos 2003). У прошлости је развијено неколико метода за предикцију јоносферских

корекција, међутим не постоји никаква метода која је у стању да обезбеди предвиђање јоносферских корекција на прихватљивом нивоу прецизности под свим условима јоносфере. Већина метода добро раде само при мирним јоносферским условима и то до неколико десетина километара удаљености. У циљу постизања јоносферске предикције довољне тачности и повећања поузданости Мрежног-RTK система под готово свим јоносферским условима потребно је имати или густу мрежу референтних станица или метода за предиктовање јоносферског кашњења мора бити побољшана.

Управо из тог разлога циљ овог истраживања јесте развој одговарајућег модела за потребе предикције јоносферских корекција задовољавајуће тачности за мрежне RTK апликације. Модел је развијен и анализиран за територију Србије под максималним соларним условима. Имајући у виду познавање временске природе јоносферског кашњења, требало би да буде могуће дизајнирати поруке мрежних RTK јоносферских корекција које испуњавају високо прецизне GNSS захтеве корисника.

Дисертација је подељена у 8 поглавља где је *Поглавље 1.* уводно.

У *Поглављу 2.* дат је кратак увод у физику Земљине атмосфере односно јоносфере и Сунца. Објашњена је теорија формирања јоносфере Земље на основу *Chapman* функције. Описана су три главна фотохемијска процеса: производња, нестанак и транспорт јона и електрона. Комбинација ова три процеса објашњава временску варијацију електронске густине у јоносфери. Такође, дат је кратак увод у реално магнетно поље Земље, јер магнетно поље има централну улогу у процесу транспорта у јоносфери. Последњи део овог поглавља објашњава појаву јоносферских олуја и путујућих јоносферских поремећаја.

У *Поглављу 3.* дат је опис GPS система тј. његов развој, структура, математички модел и методе позиционирања.

У *Поглављу 4.* описане су методе сондирања јоносфере са акцентом на примени јоносонде и GNSS опажања. У овом поглављу посебно се разматра простирање GPS сигнала кроз јоносферу и њен утицај кроз посматрање Укупног Садржаја

Електрона који игра централну улогу у детектовању промена у јоносфери. Описани су и различити типови јоносферских модела. Посебна пажња је посвећена сондирању D региона јоносфере и дат је приказ начина детектовања и моделовања концентрације електрона D региона током појаве поремећаја, тј. Х-флерова.

*Поглавље 5.* је посвећено опису и анализи метода временских серија које су коришћене у овој дисертацији за производњу модела јоносферских корекција у циљу унапређења Мрежног-RTK система. Описана је техника линеарне регресије и примена неуронских мрежа које спадају у методе машинског учења.

*Поглавље 6.* садржи експериментални део истраживања. Дат је опис АГРОС (Активне Геодетске Референтне Основе Србије) и њеног тренутног оперативног статуса јер је ова мрежа коришћена као тест полигон свих истраживања. Овде је приказана анализа временске и просторне варијације јоносфере изнад Србије кроз одређивање VTEC из GPS мерења и поређењем са подацима јоносонде. Затим је представљено квантификовање временских карактеристика јоносферског кашњења у истом региону. У овом поглављу дата је и анализа утицаја D региона јоносфере на укупан TEC. Истраживање се предузима да би се добио увид у јоносферске услове Србије као претходница за развој јоносферског модела погодног за подршку Мрежном-RTK систему за побољшање АГРОС инфраструктуре. Након тога представљено је моделовање јоносфере у циљу обезбеђивања јоносферских корекција. Тестирана су и истражена два различита приступа моделовања како би се обезбедио предиктивни метод за рачунање јоносферског кашњења. То би омогућило временску интерполацију корекција.

Коначно, у *Поглављу 7.*, дати су закључци и препоруке за будућа истраживања.



## 2. ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРИЈЕ И ФИЗИКЕ ЗЕМЉИНЕ ЈОНОСФЕРЕ

---

За разумевање формирања јоносфере Земље од значаја је познавање карактеристика Сунца, Земљиног магнетног поља и Земљине атмосфере. Пошто су то три компоненте које учествују у формирању јонизујућег региона у атмосфери Земље укратко су објашњења њихова основна својства. Поред тога у овом поглављу сажето је описана је грађа, особине и физика јоносфере. Дато је кратко објашњење интеракције соларног зрачења са горњом Земљином атмосфером које проузрокује настанак наелектрисаних честица. Затим је описана теорија формирања јоносфере на основу плазма једначине континуитета и транспортних процеса у јоносфери. Приказан је преглед формирања јоносферских слојева. Описане су нормалне варијације јоносфере, класичне аномалије, јоносферске олује и путујући јоносферски поремећаји.

### 2.1 Основне карактеристике и структура Сунца

Сунце представља највећи објекат у соларном систему и садржи више од 99,8% укупне масе Сунчевог система. Његов радијус износи приближно 696000 km, а два највише заступљена гаса су водоник и хелијум.

#### 2.1.1 Структура Сунца

Сунце се састоји из два главна дела: унутрашње структуре и соларне атмосфере.

*Унутрашњост* је подељена у три главна слоја: језгро, радијациону и конвективну зону (слика 2.1). У језгру се врше термонуклеарне реакције при чему настају гама зраци, а температура достиже вредност од  $15 \cdot 10^6 K$ . Овај слој се простире до



Слика 2.1: Структура Сунца

приближно трећине соларног радијуса, где почиње зона прелаза која се зове радијациона зона. На врху унутрашње структуре је конвективна зона која се протеже до око 70% соларног полупречника на површини Сунца.

**Соларна атмосфера** је подељена у три слоја: фотосферу, хромосферу (мања соларна атмосфера) и корону (спољашња соларна атмосфера). Најнижи слој који представља површину Сунца видљиву голим оком је фотосфера. Из овог најхладнијег слоја Сунца (око  $6000 \text{ }^{\circ}\text{K}$ ) долази највећи део видљиве светлости (Basu et al., 1988).

Фотосфера је покривена са тамним областима које се називају сунчеве пеге у којима се налазе интензивна и униполарна магнетна поља. Ово су најхладнији региони Сунца, где температура пада до  $4000 \text{ }^{\circ}\text{K}$ . Изнад фотосфере, у хромосфери, температура расте са порастом висине.

Карактеристике хромосфере су соларне протуберанце (енг. *solar prominence* - велике ерупције светлећег гаса водоника који расте хиљаде километара изнад

хромосфере), тамна влакна-филаменти (енг. *dark filaments* - одговарају густим и хладнијим регионима и прате магнетне петље које произилазе из фотосфере) и светли региони (енг. *plage* - обично се налазе у регионима хромосфере у близини сунчевих пега и окружују их). Спољашњи слој соларне атмосфере, корона, протеже се до границе међузвезданог простора. Главне карактеристике короне су короналне петље и короналне рупе. Короналне рупе су велике зоне мање густине и топлоте од просечне температуре короне и емитују зраке у X опсегу, што објашњава појаву "рупа" на X снимцима. Короналне рупе омогућавају појаву брзог соларног ветра дуж отворених магнетних линија поља.

**Сунчеве пеге** први је запазио Теофраст око 325 п.н.е. Године 1610. Галилео Галилеј је користећи телескоп, забележио прва европска опажања сунчевих пега. Континуирана дневна опажања, започета су на Циришкој опсерваторији 1849. године, а ранија опажања су коришћена за реконструкцију података до 1610.године.

Сунчеве пеге су хладни региони на фотосфери које карактеришу соларну активност. Они емитују знатно мање зрачење од својих топлих окружења и зато се појављују као тамне у поређењу са околним регионима (Prolss and Bird, 2004). Појава Сунчевих пега је повезана са компликованим и још увек не баш добро схваћеним интеракцијама са Сунчевим магнетним пољем. Оне могу бити веома велике (до 40000 km у пречнику) и имају тенденцију да се групишу.

У циљу објашњења статистичке појаве пега, користи се релативни број сунчевих пега, који се назива *Wolf* или *Zurich* број:

$$R = k(10g + f), \quad (2.1)$$

где је  $g$  број група пега (група може обухватити једну или више пега),  $f$  је број појединачних пега, а  $k$  је корективни фактор, обично мањи од јединице, што зависи од посматрача и намењен је за корекцију за добијање оригиналне *Wolf* скале (Davies K., 1989).

Тренутно постоје две званичне скале за број сунчевих пега. Прва је дневни *Boulder* број, који се рачуна од стране NOAA (енг. National Oceanic and

Atmospheric Administration). Друга је Међународни број сунчевих пега, који се објављује од стране SIDC (енг. Solar Influences Data Analysis Center) у Белгији. Иста формула се користи за рачунање обе вредности, али објављене вредности из обе локације могу се мало разликовати због чињенице да користе податке из различитих опсерваторија.

Најраспрострањенији индекс је 12-месечни поравнати релативни број сунчевих пега  $R_{12}(n)$  дефинисан као:

$$R_{12}(n) = \left[ \sum_{i=n-5}^{n+5} R_i + 0.5(R_{n+6} + R_{n-6}) \right] / 12 \quad (2.2)$$

где је  $R_i$  средња вредност  $R$  за месец  $i$ .

Величина  $R$  варира између нула и 200. Она показује систематске варијације које пружају корисне информације о стању Сунца, са периодом од око 11 година који представља такозвани циклус сунчевих пега или соларни циклус. У току је соларни циклус број 24. Соларни минимум се односи на период од неколико година, када су бројеви сунчевих пега најнижи, а соларни максимум се односи на године, када су сунчеве пеге најбројније. Током соларног максимума, активности на сунцу и њихови ефекти на нашу земаљску животну средину су високи. На пример, учесталост и интензитет геомагнетних олуја и зрачења у земљиној атмосфери расту током соларног максимума.

### 2.1.2 Сунчево зрачење

Са Сунца се непрекидно ослобађају огромне количине енергије путем електромагнетног зрачења у виду фотона, протона и електрона.

**Фотонско зрачење** Енергија се транспортује од Сунца до Земље путем електромагнетног зрачења у широком опсегу таласних дужина, укључујући X таласе, ултраљубичасте, видљиве, инфрацрвене и радио таласе. Укупна емитована енергија по секунди на свим таласним дужинама је приближно константна. Укупна енергија на врху Земљине атмосфере је  $1370 \text{ W/m}^2$  и зове се соларна константа. Главни утицај енергије је из инфрацрвеног (52%), видљивог (41%), и

ултраљубичастог (<7%) дела спектра. Радио и X-зраци чине само незнатан утицај (<1%) на соларну константу (Schunk and Nagy, 2000; Tascione, 1988).

**Честице зрачења** Сунце, услед непрекидног одлива плазме из короне, сваке друге секунде ослобађа у свемир око милијарду килограма енергетских честица, углавном протона и електрона. На тај начин настаје соларни ветар. Брзина честица је око 300 km/s тако да је потребно око 4 до 5 дана да стигну на Земљу. Један део зрачења се односи на моћне догађаје у Сунчевој атмосфери изнад пега, које се називају соларне бакље тј. соларни флерови (енг. solar flares). О овој појави и њеном утицају биће више речи у поглављу број 4.3.1. Примљена укупна енергија зрачења соларних честица на врху атмосфере Земље је само једна десетина соларне фотонске енергије зрачења из X-зрака и EUV спектралних региона (Ratcliffe, 1972).

**Варијација интензитета зрачења** Како соларна активност варира не само током соларног циклуса, него и из дана у дан, тако и зрачење прати ове варијације. Соларне бакље и соларни ветар су чешћи током соларног максимума, па су тушеви честица соларног зрачења у близини Земље чешћи и интензивнији у периоду соларног максимума. Мањи извори зрачења (радио, екстремни ултраљубичасти и X зраци) показују велике осцилације у зависности од соларне активности. Број сунчевих пега је користан начин да се опише соларна активност у квантитативном смислу и даје приближну меру соларног интензитета зрачења кратко-таласних дужина (X-зраци и UV).

**Индекс соларног зрачења (F10.7)** Соларни флуks на радио таласној дужини од 10.7 cm (2800 MHz) се мери свакодневно још од 1950. године на *Penticton* радио опсерваторији, у близини Отаве. Мерења се врше рефлектором пречника 1.8 m у 17:00 UT, и изражавају се у јединицама соларног флуksа ( $10^{-22} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ ). Радио флуks од 10.7 cm је познат као *F10.7* индекс или *Covington index* (CI) и варира од минимума блиског 65 (одговара броју сунчевих пега једнаких нули код соларног минимума) до максимума од око 200 (одговара броју сунчевих пега од 150 до 160) (Davies, 1989). Због повезаности са X-зрацима, EUV и UV флуksевима, *F10.7* је један од најчешће коришћених показатеља соларне активности.

Индекс  $F_{10.7}$  приказује сличне варијације као и број сунчевих пега. Емпиријску формулу за конверзију изглађеног релативног броја сунчевих пега (једначина 2.2) са месечним просечним  $F_{10.7}$  индексом, обезбеђује радио-комуникацијски сектор Међународне уније за телекомуникације (енг. International Telecommunication Union - ITU-R) (Leitinger et al., 2005):

$$F_{10.7} = 63.7 + (0.728 + 0.00089R_{12})R_{12} \quad (2.3)$$

И обрнуто:

$$R_{12} = (167273 + (F_{10.7} - 63.7)1123.6)^{0.5} - 408.99 \quad (2.4)$$

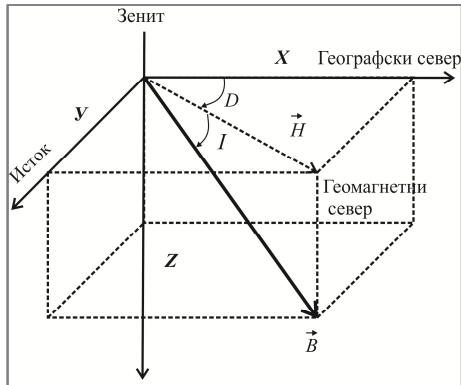
## 2.2 Увод у геомагнетизам

На формирање Земљине јоносфере у великој мери утиче Земљино магнетно поље. Земља је под сталним утицајем тока јонизоване плазме са Сунца. Већи део ове плазме, која се преноси путем соларних ветрова, прати Земљино магнетно поље. Међутим, мањи део проналази свој пут ка јоносфери и горњој атмосфери где јонизација утиче на наелектрисане честице које имају дејство на неутралне гасове. Линије магнетног поља Земље стварају широк појас циркулације јонизоване плазме у и око Земље (Hargreaves, 1992) и (Kelley, 2009).

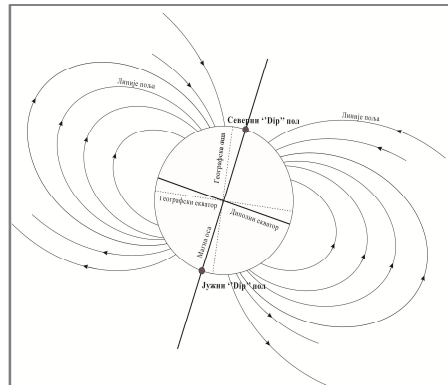
### 2.2.1 Земљино магнетно поље

У језгру Земље електричне струје производе магнетно поље које окружује Земљу. Простор у коме се осећа дејство магнетног поља Земље назива се магнетосфера. Она се простире неколико десетина хиљада километара у свемир.

Земљино магнетно поље, може се једноставно апроксимирати тако да се налази у центру Земље са осом нагнутом око  $\delta = 11.5^\circ$  у односу на осу ротације Земље (Davies ., 1965; Prolss and Bird, 2004). Геоцентрична диполна оса пресеца површину Земље у тачкама северног и јужног геомагнетног пола. Магнетни полови Земље су места на Земљиној површи где су магнетне линије сила управне



Слика 2.2: Компоненте геомагнетног поља на северној хемисфери



Слика 2.3: Једноставан модел Земљиног геомагнетног поља

на површ Земље. Локације магнетних полова нису статичне. Годишње померање може износити и више од 15 km, а прецизне позиције полова се одређују у специјализованим институтима за геомагнетна испитивања. Стога се геомагнетни екватор не подудара са географским екватором, због чега је важно да се за описивање или моделовање јоносфере користе координате геомагнетног поља.

На слици 2.2 су приказани главни елементи магнетног поља Земље. То су *Вектор геомагнетног поља*, или *вектор геомагнетне индукције*  $\vec{B}$ .  $X$ ,  $Y$  су хоризонталне компоненте поља и називају се северни интензитет и источни интензитет, респективно, а  $Z$  је вертикална компонента поља.  $B$  и  $H$  су укупни интензитет и интензитет хоризонталног поља (јединице: *Tesla* =  $Vs/m^2$ ).  $D$  је угао деклинације између географског севера и геомагнетног севера.  $I$  је угао између  $B$  и хоризонталне равни и назива се магнетна инклинација.

Геомагнетна ширина  $\varphi$  дата је једначином:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{1}{2} \tan I\right) \quad (2.5)$$

Јединица, која се у геомагнетизму користи за индукцију магнетног поља, тј. густину линија сила је *Tesla* (T). На површи Земље, интензитет магнетног поља варира од 24 000 nT до 66 000 nT. Јединице које се још користе су *Gaus* (1 *Gaus*=100 000 nT) и *gama* (1 *gama*=1 nT) (Davies K, 1990).

### 2.2.2 Реално геомагнетно поље

Реално геомагнетно поље значајно одступа од геоцентричног магнетног диполног поља. Реално геомагнетно поље је конзервативно поље и може бити написано као негативни градијент скаларног геомагнетног потенцијалног поља:

$$\vec{B}(\varphi, \lambda, r, t) = -\nabla V(\varphi, \lambda, r, t) \quad (2.6)$$

Геомагнетни потенцијал може се претставити развојем у сферне хармонике (Memarzadeh, 2009):

$$V(\varphi, \lambda, r, t) = a \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n [g_n^m(t) \cos(m\varphi) + h_n^m(t) \sin(m\varphi)] \tilde{P}_n^m(\sin(\varphi)) \quad (2.7)$$

где је  $a = 6371.2 \text{ km}$  магнетни референтни стандардни радијус Земље, а  $\varphi$ ,  $\lambda$  и  $r$  су географска ширина, дужина и полупречник у геоцентричном сферном референтном систему,  $\tilde{P}_n^m(\sin(\varphi))$  је нормализована придружена Лагранжова функција, а  $g_n^m(t)$  и  $h_n^m(t)$  су временски зависни Гаусови коефицијенти степена  $n$  и реда  $m$  (претпоставља се да од степена 1 до 8 имају квадратну зависност од времена, од степена 9 до 12 линеарну временску зависност, док се за више степене претпоставља да су Гаусови коефицијенти константни током времена).<sup>1</sup>

**Модификована "dip" латитуда** Круг на површини Земље са нагибом  $0^\circ$  зове се магнетни или диполни екватор. Место где је геомагнетна инклинација једнака нули зове се "dip" екватор, и ту су линије поља хоризонталне у односу на Земљину површину. Позиције на површини Земље где су геомагнетне линије поља вертикалне ( $I=90^\circ$ ) називају се "dip" полови.

---

<sup>1</sup> Сферни хармоници до степена и реда 10, сваких пет година, се постављају од стране IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy), за истраживања геомагнетног поља на основу опажања из сателита, са земље и мора (Macmillan and Finlay 2011). Овај скуп сферних хармоника је познат као Међународно Геомагнетно Референтно Поље (*International Geomagnetic Reference Field (IGRF)*). Користећи *IGRF*, могу се израчунати сви елементи геомагнетног поља на датом локацији и у датом тренутку времена.



Научници користе "*dipol*" или "*dip*" ширину за описивање Земљиног геомагнетног поља. Геомагнетна "*dip*" ширина или "*dip*" латитуда (у ознаци *Dipl*) рачуна се из једначине 2.5 помоћу "*dip*" угла (Matsushita and Campbell, 1967), односно:

$$Dipl = \arctan\left(\frac{1}{2} \tan(Dip)\right) \quad (2.8)$$

где је *Dip* скраћеница за срачунате "*dip*" латитуде из *IGRF*.

Геомагнетна ширина и "*dip*" латитуда дате тачке на Земљи у општем случају нису идентичне. Због тога се користи нови геомагнетни параметар који је близу магнетном "*dip*" углу на малим географским ширинама, али постаје ближи геодетској ширини  $\phi$  како се ширина повећава (Bilitza et al., 1990). Овај нови параметар се зове модификована "*dip*" латитуда или модификовани "*dip*" (означено као *Modip* или  $\mu$ ) и дефинише се на следећи начин:

$$\tan(\mu) = \frac{Dip}{\sqrt{\cos(\phi)}} \quad (2.9)$$

Модификована "*dip*" латитуда се користи за описивање просторне зависности јоносферских параметара.

### 2.2.3 Геомагнетне олује

Геомагнетни елементи поља варирају током времена. Та варијација настаје углавном због електричних струја које теку изнад земљине површине, а које су под утицајем соларног ветра. Дан је геомагнетски миран када се елементи поља на површини Земље мењају постепено и глатко услед свакодневних промена геометријских односа између Земље, Сунца и Месеца. Понекад, због изненадног повећања честица соларног зрачења изнад поларне земљине горње атмосфере, додатна струја циркулише у јоносфери и доводи до нерегуларних и брзих варијација елемената поља. То изазива геомагнетне поремећаје на земљиној површини познате као геомагнетне олује.

#### 2.2.4 Геомагнетни индекси

Глобалну слику геомагнетних активности пружају различити индекси. Најважнија мера геомагнетног нивоа активности, посебно у области јоносферских истраживања је планетарни  $Kp$ -индекс.

$Kp$ -индекс је увео Bartels 1949. године (Bartels, 1949). Он је извео вредности из расположивих података прикупљених раније, тако да је садашња серија података хомогена и континуирана од 1932.  $Kp$ -индекс је признат од стране IAGA (енг. International Association of Geomagnetism and Aeronomy).

Планетарни  $Kp$ -индекс се добија коришћењем просечног интензитета хоризонталног поља  $H$  (или елемента  $D$  ако је више поремећен од  $H$ ) опажаног са мреже коју чини око 12 геомагнетних опсерваторија распоређених између  $48^\circ$  и  $63^\circ$  геомагнетне ширине широм света. Планетарни  $Kp$ -индекс је глобална мера магнетног одступања од редовне дневне варијације током једног тро-часовног периода (Schunk and Nagy, 2000). Планетарни  $Kp$ -индекс дат је полу-логаритамским нумеричким кодом који варира између 0 и 9, са различитим бројевима који одговарају различитим геомагнетним нивоима активности. Табела 2.1 даје класификацију геомагнетних олуја путем  $Kp$ -индекса, где индекси  $Kp=5$  и  $Kp=9$  одговарају малим и екстремним геомагнетним олујама, респективно. Озбиљне и екстремне геомагнетске олује јављају се веома ретко (Menvielle, 2000).

Пошто је  $Kp$ -индекс полу-логаритамска скала, није погодна за проста упросечавања за добијање дневног индекса. У циљу добијања дневне мере геомагнетне активности,  $Kp$ -индекс се прво мора конвертовати у оквирне линеарне скале пре него што се израчуна дневни просек. Ова дневна вредност се назива планетарни  $A_p$ -индекс и користи се као свакодневна глобална мера геомагнетне активности за дати дан.

Табела 2.1: Класификација геомагнетних олуја [NOAA, 2007]

Скала	К <sub>p</sub> -индекс
G5 (екстремна)	9
G4 (гешка)	8
G3 (јака)	7
G2 (умерена)	6
G1 (мала)	5

К<sub>p</sub> и А<sub>p</sub> се тренутно рутински рачунају у GeoForschung Zentrum (GFZ) Postdam, Немачка, која је део међународне службе за геомагнетске индексе (енг. International Service of Geomagnetic Indices - ISGI). Доступни су електронски на GFZ, ISGI и NOAA (енг. National Oceanic and Atmospheric Administration) интернет сајтовима:

- <http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/Niemegk/en/index.html>,
- <http://isgi.latmos.ipsl.fr/> и
- <http://www.swpc.noaa.gov/>.

### 2.3 Земљина атмосфера

Атмосфера се дефинише као регион који обавија Земљу од нивоа мора до нивоа од око 1000 km висине, са различитим физичким и хемијским својствима. С обзиром на то могуће су различите поделе (Seeber, 2003).

Земљина атмосфера се може грубо поделити у неколико концентричних сферичних слојева у зависности од температуре, јонизације и простирања сигнала. На слици 2.4 је приказано могуће раслојавање атмосфере према различитим параметрима.

У зависности од промене температуре с обзиром на висину, Земљина атмосфера је подељена на четири слоја: тропосферу (од нивоа мора до око 10 km), стратосферу (од 10 km до око 50 km), мезосферу (од 50 km до око 80 km) и термосферу (од 80 km до око 400 km). У принципу, са порастом висине температура у тропосфери опада, расте у стратосфери, поново се смањује у мезосфери, а у термосфери се

поново повећава. Изнад термосфере је највиши слој Земљине атмосфере, екосфера, који се постепено спаја у свемир. У том слоју, температура је константна.

У зависности од карактеристика простирања сигнала, атмосфера се може поделити на два слоја, тропосферу (назива се и неутралном атмосфером) и јоносферу. Тропосфера је доњи део Земљине атмосфере који се протеже до висине од око 40 km, где простирање сигнала зависи углавном од садржаја водене паре и од температуре. Дакле, кашњење сигнала не зависи од фреквенције (недисперзивна средина).

Јоносфера је горњи део Земљине атмосфере између 80 и 1000 km висине и представља дисперзивну средину у којој је простирање сигнала под утицајем слободних наелектрисаних честица.



Слика 2.4: Могућа шема поделе Земљине атмосфере (Seeber, 2003, Satellite Geodesy)

Земљина атмосфера је мешавина различитих гасова и честица. Изнад 80 km висине у атмосфери се јављају јонизовани молекули и слободни електрони. Преко 99% ниже атмосфере чине азот (78% запремине) и кисеоник (21% запремине), а 1% су племенити гасови (аргон, неон, хелијум, криптон и ксенон) и тзв. гасови стаклене баште (угљен-диоксид, метан, азот-оксид и водена пара). У атмосфери је такође присутан водоник, који услед светлости већим делом напушта Земљину гравитацију и одлази у свемир. Услед турбуленција атмосферски гасови се испод 85 km добро мешају тако да њихови релативни односи остају константни. На већим висинама турбуленција није заступљена па је свака атмосферска компонента у дифузној равнотежи. Област атмосфере где турбулентно мешање прелази у дифузну равнотежу назива се турбопауза. Испод турбопаузе, где су гасови потпуно помешани, сви атмосферски гасови имају исту висинску варијацију. Изнад турбопаузе, вертикална дистрибуција сваког атмосферског гаса, разматра се на основу сопствене висине, јер у недостатку хемијских реакција, густина сваког атмосферског гаса опада експоненцијално са висином.

#### **2.4 Основно о Земљиној јоносфери**

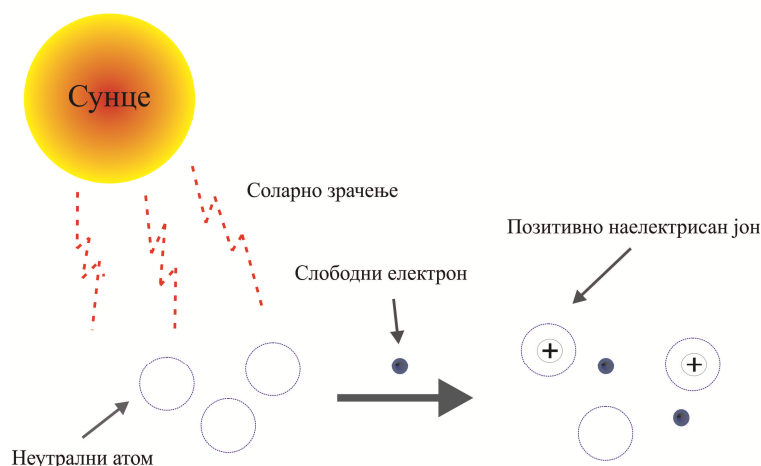
Први који је дошао до закључка о постојању проводног слоја у атмосфери Земље био је Jochann Karl Friedrich Gauss 1839. године. Године 1902. британски физичар, Oliver W. Heaviside и амерички електро-инжењер, Arthur Edwin Kennelly, предвиђају постојање рефлективног атмосферског слоја у којем слободни електрони у Земљиној горњој атмосфери рефлектују радио таласе. Постојање јоносфере је доказано 20 година касније, путем експеримената које предузимају Appleton и Barnett (Appleton and Barnett, 1925b; Appleton and Barnett, 1925a) и Breit и Tuve (Breit and Tuve, 1925; Breit and Tuve, 1926) користећи технике рефлектовања радио таласа. Sir Robert Watson Watt је 1929. године, први употребио термин "јоносфера" за дефинисање јонизованих слојева који окружују Земљу. Током периода 1932-1934. године овај израз је ушао у ширу употребу када га Watson-Watt, Appleton и Ratcliff, и други, користе у бројним часописима и публикацијама.

Појавом првих вештачких сателита дошло се до открића и проучавања структуре јоносфере и њене јаке везе са геомагнетним и соларним окружењем. Касније, развојем навигационих сателитских система, као што је Амерички Глобални Позициони Систем (Global Positioning System - GPS), отвориле су се нове перспективе у проучавању јоносфере. Прецизније, јоносфера остаје главни извор грешке у сателитском позиционирању, тако да разумевање њених просторних и временских варијација игра кључну улогу у прецизним техникама позиционирања (Wautelet, 2013).

#### **2.4.1 Процес настанка јоносфере**

Јоносфера представља један динамичан систем који је под утицајем многих параметара укључујући сунчево електромагнетно зрачење, космичко зрачење и електромагнетно зрачење геомагнетног поља Земље. Главне промене јоносфере на дневном нивоу настају због ефеката сунчевог електромагнетног зрачења (Gao, 2008).

Енергија соларне радијације долази до земљине атмосфере са снагом од  $1350 \text{ W/m}^2$  (соларна константа). Овај извор радијације се расипа преко широког спектра који се креће од радио-фреквентног, инфрацрвеног зрачења и видљиве светлости до X зрака. Соларно зрачење на ултраљубичастом, екстремно ултраљубичастом делу спектра и на краћим таласним дужинама се јонизује тако што се током колизије ослобађају електрони из неутралног атома или молекула гаса. У овом процесу, атом апсорбује део радијације и преноси енергију до електрона, који потом напушта атом и постаје слободан. С друге стране, неутрални атом тиме постаје позитивно наелектрисан и познат је као позитивни јон. Процес у којем фотон одузима електрон од неутралног атома и тако ствара позитивно наелектрисан јон, назива се фотојонизација и илустрована је на слици 2.5. Стопа јонизације директно зависи од густине молекула гаса и интензитета зрачења, што се манифестује у редовним циклусима у концентрацији електрона  $N_e$ . Космичко зрачење и честице соларног ветра такође имају улогу у овом процесу, али је њихов утицај знатно мањи у поређењу са соларним зрачењем. Јонизација настала



**Слика 2.5: Процес фотојонизације у јоносфери**

као последица соларног ветра игра значајнију улогу на поларним географским ширинама.

Поред фотојонизације апсорбција енергије може да доведе до још два важна процеса: фото-дисоцијације и дисоцијативне фото-јонизације (Prolss and Bird, 2004). Ови процеси имају значајан утицај на особине горње атмосфере. Процеси дисоцијације и јонизације различитих гасова, врше се на различитим таласним дужинама па и дубина продирања сунчевог зрачења у атмосферу Земље зависи од таласне дужине.

Иако се јоносфера састоји од мешавине наелектрисаних и ненаелектрисаних атмосферских честица, слободни електрони у јоносфери су довољно бројни да утичу на простирање радио таласа (Davies, 1990; Langley, 1996). Због тога јоносфера има важну улогу у радио комуникацији и сателитским навигационим системима.

У горњим слојевима атмосфере позитивни јони и електрони су обично добро смешани и формирају јоносферску плазму. Плазма садржи једнаке количине позитивних и негативних честица, тако да је електрично неутрална (неутрално наелектрисање). Плазма је четврто стање материје. У многим аспектима, понаша

се као гас, али када су присутне електричне и магнетне силе, она има специфичне особине, за разлику од већине обичних гасова (Dendy, 1995).

**Плазма једначина континуитета** описује временску варијацију јонизоване материје у јединици запремине. Она се састоји од три главна фотохемијска процеса: производња, транспорт и нестанак јона и електрона. Ако претпоставимо да је јонсферска плазма неутрално наелектрисана, једначина континуитета може се писати као (Ivanov-Kholodny and Mikhailov, 1986):

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = q_i - L_i - \text{div}(n_i V_i) \quad (2.10)$$

где су  $q_i$  и  $L_i$  стопе производње и нестанка јона (у јединици запремине и времена),  $n_i$  је концентрација јона, а  $V_i$  је највећа брзина транспорта  $i$ -те јонизоване врсте.  $n_e = \sum n_i$  је густина електрона,  $\text{div}(n_i V_i)$  је промена концентрације јона током транспортног процеса.

### Производња јона

Пошто стопа производње јона у потпуности зависи од апсорпције сунчевог зрачења у горњој атмосфери потребно је одредити његов ниво.

**Шарпан функција** или **Шарпан формула** је једначина којом се одређује стопа производње јона у функцији висине ( $h$ ) и соларног зенитног угла ( $\chi$ ) (Tascione, 1988). Шарпан је био први који је јасно описао теорију формирања јонизованих региона у идеализованој атмосфери.

Нека је  $\eta$  јонизациона ефикасност. Она представља број јонских парова (јон и електрон) произведених по једном апсорбованом фотону.<sup>2</sup> Стопа производње јона представља број јонских парова произведених у јединици запремине, у секунди на висини  $h$  и рачуна се:

---

<sup>2</sup>За атомски гас и за таласне дужине мање од минималне таласне дужине јонизујућег зрачења атома, јонизациона ефикасност је  $\eta \approx 1$ .



$$q(\chi, h) = \eta \underbrace{\frac{\phi_{\infty}^{photon}}{H e \sec(\chi)}}_{q_{max}} \exp \left\{ 1 - \frac{h - h_{max}}{H} - \exp \left\{ -\frac{h - h_{max}}{H} \right\} \right\} \quad (2.11)$$

где је  $e$  база природног логаритма, а  $H$  размера висине.

Висина на којој се јавља максимална стопа производње јона се рачуна као:

$$h_{max} = h_0 + H \ln(\sigma H n(h_0) \sec(\chi)) \quad (2.12)$$

Једначина 2.11 је позната као Шарпан производна функција. Она даје вертикални профил стопе производње јона у идеализованој изотермској атмосфери са планарним раслојавањем. Шарпан производна функција зависи од максималне стопе производње јона  $q_{max}$  и висине максималне стопе производње јона  $h_{max}$ . Максимална стопа производње јона и одговарајућа висина  $h_{max}$  су зависне од соларног зенитног угла. Осим тога,  $q_{max}$  зависи од интензитета сунчевог зрачења на врху атмосфере  $\phi_{\infty}^{photon}$  и јонизационе ефикасности  $\eta$ , док  $h_{max}$  зависи од апсорпције попречног пресека  $\sigma$ , али не и од  $\phi_{\infty}^{photon}$  и  $\eta$ . Практично је да се стопа јонске производње изрази преко  $q_{max}^0$  и  $h_{max}^0$ , који одговарају вредностима  $q_{max}$  и  $h_{max}$  када се сунце налази у зениту  $\chi=0$ .

$$q(\chi, h) = \eta \underbrace{\frac{\phi_{\infty}^{photon}}{H e}}_{q_{max}^0} \exp \left\{ 1 - \frac{h - h_{max}^0}{H} - \sec(\chi) \exp \left\{ -\frac{h - h_{max}^0}{H} \right\} \right\} \quad (2.13)$$

Заменом са  $z=(h-h_{max}^0)/H$  као новим параметром за мерење висине, где је  $H$  јединица размере, са висином  $h_{max}^0$ , добија се:

$$q(\chi, z) = q_{max}^0 \exp \{ 1 - z - \sec(\chi) \exp \{-z\} \} \quad (2.14)$$

Из претходног се види јасна зависност Шарпан производне функције од соларног зенитног угла. Максимална стопа производње јона је мања када расте соларни зенитни угао.

Пошто се при великим соларним зенитним угловима горња атмосфера не може сматрати раванском, Шарпан производна функција мора бити модификована

узимајући у обзир сферна раслојавања у идеализованој атмосфери (Чарман, 1931). То је од већег значаја за горње атмосферске слојеве. Сферни облик атмосферске љуске се може објаснити увођењем тзв. *Chapman grazing* инцидентне функције  $Ch(\chi, h)$  чије је детаљно извођење дато у Bartels, 1949. *Chapman grazing* инцидентна функција је мера дубине атмосфере (или апсорпције јонизујућег зрачења од стране атмосфере) у функцији соларног зенитног угла и висине.

$$Ch(\chi, h) = \sec(\chi) - \int_0^\chi \exp\{r(1 - \sin(\chi) \operatorname{cosec}(\theta))\} \sec(\theta) \tan(\theta) d\theta \quad (2.15)$$

где је  $r = (Re + h)/H$ , а  $Re$  полупречник Земље.  $Ch(\chi, h)$  је бездимензиона функција зависна од висине.

За  $\chi \leq 8^\circ$  ефекат закривљености Земље се може занемарити па је и *Chapman grazing* функција приближно једнака  $\sec(\chi)$  (Davies, 1989). Међутим, за велике зенитне углове, ефекат закривљености Земље је значајан и вредности  $Ch(\chi, h)$  око изласка и заласка сунца веома се разликују од вредности  $\sec(\chi)$ .

Узимајући у обзир сферно раслојавање у идеализованој атмосфери, једначина 2.13 постаје

$$q(\chi, h) = q_{\max}^0 \exp\left\{1 - \frac{h - h_{\max}^0}{H} - Ch(\chi, h) \exp\left\{-\frac{h - h_{\max}^0}{H}\right\}\right\} \quad (2.16)$$

У циљу утврђивања вертикалног профила стопе производње јона у реалној горњој атмосфери, Шарман производна функција мора да се мења. Прво, горња атмосфера се састоји од неколико гасова уместо једног гаса. Осим тога, соларна радијација је полихроматска а не монохроматска, па је неопходно да се саберу различити утицаји појединачних таласних дужина. Сходно томе добија се:

$$q(\chi, h) \approx \sum_{\lambda} \sum_{i=O, N_2, O_2} \eta_i \sigma_i n_i(h) \phi_{\infty}^{photon}(\lambda) \exp\left\{-Ch(\chi, h) \sum_{j=O, N_2, O_2} \eta_j \sigma_j n_j(h) H_j\right\} \quad (2.17)$$

где  $\sum_{\lambda}$  означава сумирање различитих таласних дужина, а  $\sum_{i=O, N_2, O_2}$  и  $\sum_{j=O, N_2, O_2}$  су суме гасних честица горње атмосфере (само најважнији гасови су узети у обзир).

Горња атмосфера није изотермална, али се због једноставности код аналитичких прорачуна сматра таквом (неизотермска стања су превише компликована да се узимају у обзир).

### **Нестанак јона и електрона**

Сваки јон у јоносфери има коначан живот. Он или нестаје услед јонских хемијских реакција или се после одређеног времена комбинује са електроном, враћајући се у неутрално стање. Постоје три главне реакције у којима електрони могу да нестану после извесног времена:

- Радијациона рекомбинација (један електрон се комбинује са једним атомом позитивног јона)
- Дисоцијативна рекомбинација (један електрон се комбинује са молекулом јона)
- Везани процес (један електрон се везује за неутралну честицу и производи негативни јон)

Пошто је радијациона рекомбинација много спорији процес од дисоцијативне рекомбинације, већи део електрона има тенденцију да се рекомбинује са позитивним молекулима јона (Gran, 1965). Везани процес дешава се само у нижим слојевима јоносфере, где је више неутралних честица на располагању за формирање негативних јона (D-регион). Негативни јони су заузврат брзо неутралисани даљим реакцијама, тако да се губитак електрона од везаног процеса може занемарити (Prolss and Bird, 2004; Ratcliffe, 1972).

### **Схарман слој**

У идеализованој атмосфери, једноставан модел за вертикални профил густине електрона, може се добити заменом Шарман производне функције (једначина 2.16) у плазма једначину континуитета 2.10. Ако се занемари транспортни члан и претпостави да је стопа дисоцијативне рекомбинације сразмерна квадрату густине

електрона, временска варијација густине електрона у тренутку  $t$ , може се написати као:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = \frac{\eta \phi_{\infty}^{photon}}{eH} \exp\{1 - z - Ch(\chi) \exp(-z)\} - \alpha n_e^2 \quad (2.18)$$

$$z = \frac{h - h_{\max}^0}{H} \quad (2.19)$$

Решење једначине 2.17 при фотохемијској равнотежи  $\frac{\partial n_e}{\partial t} = 0$  (стопа јонизације једнака стопи рекомбинације,  $q=L$ ) доводи до вертикалног профила густине електрона познатог као *Charman слој* или *Charman модел*:

$$n_e(z, \chi) = n_{\max}^0 \exp\left\{\frac{1}{2}[1 - z - Ch(\chi) \exp(-z)]\right\} \quad (2.20)$$

Величина  $n_{\max}^0$  представља максималну густину електрона када је Сунце у зениту ( $\chi = 0$ ).

$$n_{\max}^0 = \sqrt{\frac{\eta \phi_{\infty}^{photon}}{eH\alpha}} \quad (2.21)$$

Максимална густина електрона за дати соларни зенитни угао, се рачуна:

$$n_{\max} = \sqrt{\frac{\eta \phi_{\infty}^{photon} \cos(\chi)}{eH\alpha}} \quad (2.22)$$

Висина максималне густине електрона се добија једначином 2.12 која је независна од интензитета сунчевог зрачења, али зависи од апсорпције попречног пресека. С обзиром на то да је  $\sec(\chi)$  апроксимација *Charman grazing* инцидентне функције, *Charman* модел може бити поново написан тако што се референтна висина замењује максималном висином густине електрона:

$$n_e(z, \chi) = n_{\max} \exp\left\{\frac{1}{2}[1 - z - \exp(-z)]\right\} \quad (2.23)$$

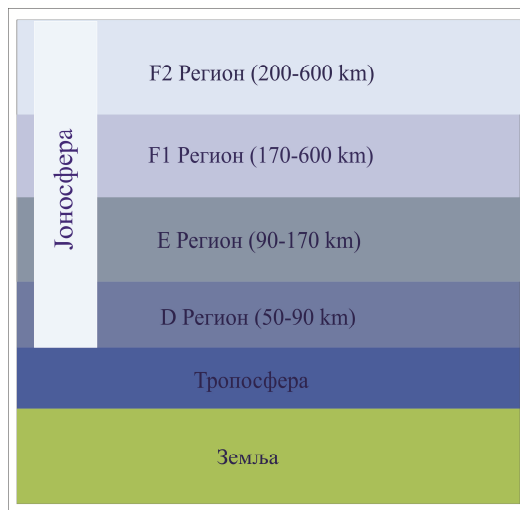
$$z = \frac{h - h_{\max}}{H} \quad (2.24)$$

У пракси, свака јонизована средина у којој је стопа рекомбинације пропорционална квадрату густине електрона, може се моделовати по Чарман моделу (Tascione, 1988).

#### 2.4.2 Јоносферска стратификација (раслојавање)

У атмосфери Земље, изнад турбопаузе, која обично почиње на 80 km, густина сваке атмосферске компоненте се смањује експоненцијално са висином (Banks, 1969). Због зависности атмосферских компоненти од висине и услед апсорпционих карактеристика атмосфере, Земљина јоносфера је хоризонтално раслојена на свим географским ширинама, тако да се формирају различити јоносферски региони (слика 2.6). Како гранични прелази у јоносфери нису изразити, погодније је користити термин региони уместо слојеви. Јоносферски региони се не разликују само по јонском саставу, већ и према механизмима њиховог формирања. Према саставу, јоносфера се може поделити на четири главне регије: D, E, F и горњи регион на већим висинама.

**D-Регион** Ово је регион испод висине од око 90 km и представља најнижи регион јоносфере. Густина електрона у овом региону је релативно мала. Електрони се ослобађају убрзо после изласка сунца и нестају убрзо након његовог заласка. У D региону примарни извор фотојонизације је јако водениково  $Lu\alpha$  зрачење на висинама изнад око 70 km које узрокује јонизацију азот оксида  $NO$ , а испод 70 km јонизацију изазива космичко зрачење. Соларни X-зраци, узрокују јонизацију која постаје значајна током утицаја соларних X флорова. Међутим, вертикални профил електронске густине у D региону нема типичан максимум (Hunsucker and Hargreaves, 2003).



Слика 2.6: Јоносферски региони

Везивање и одвајање електрона дешава се веома брзо, а електрони коначно нестају углавном због рекомбинације са позитивним јонима. Концентрација електрона расте експоненцијално са порастом висине. Током непо ремећеног стања вредности су им реда величине  $10^7 \text{ m}^{-3}$  -  $10^{10} \text{ m}^{-3}$  према Wait-овом моделу јоносфере (Wait, 1964; Sulic and Sreckovic, 2014). Према томе, овај слој у непертурбованом стању има мало или нимало утицаја на GPS сигнале.

***E-Регион*** Овај регион се простире обично између 90 и 170 km. За разлику од D региона, E регион остаје јонизован и током ноћи, али је ниво јонизације знатно умањен.

У E региону фреквенција колизије (судара) наелектрисаних честица расте у односу на њихове угаоне жирофреквенције (Prolss and Bird, 2004) и резултира веома кратким животним веком основних јона (око 10 секунди). Због велике фреквенције колизије, транспорт наелектрисаних честица постаје доста отежан, дакле процес кретања је занемарљив у E региону у поређењу са друга два фотохемијска процеса (Tascione, 1988; Ivanov-Kholodny and Mikhailov, 1986; Schunk and Nagy, 2000; Titheridge, 2000).

Стопа губитка јона је пропорционална квадрату густине електрона  $n_e^2$ . Због тога, под геомагнетно мирним условима, вертикални профил густине електрона у E региону је прилично добро претстављен Чапман моделом. За овај регион се

може рећи да се формира при фотохемијској равнотежи (стопа производње јона је у равнотежи са стопом њиховог нестанка). Проводљивост јоносфере је повећана и достиже максималну вредност на висини од око 100 km. То доводи до стварања електричних струја и формирања централног *динамо слоја* или *проводног плазма слоја*. Типичне вредности густине електрона у подне у региону средње географске ширине износе између  $1.3 \times 10^{11}$  и  $1.7 \times 10^{11}$  електрона/ $m^3$ . Е регион је слабо јонизовани регион у односу на више регионе па према томе има мало утицаја на GPS сигнале (Schunk and Nagy, 2000).

**F-Регион** се налази између 170 km и 600 km. Током дневних часова подељен је на доњи F1 (170-200 km) и горњи F2 (200-600 km) подрегион.

*F1-Регион* је присутан само током дана. У F1 региону спроводи се индиректна дисоцијативна рекомбинација, док се у Е региону, дисоцијативна рекомбинација врши директно. То је разлика између Е и F1 региона. У F1 региону, због релативно високе густине неутралних молекула (молекула кисеоника и азота) стопа губитака је пропорционална квадрату густине електрона  $n_e^2$ . Дакле, профил вертикалне густине електрона овог региона је добро објашњен Чапман моделом. То значи да је механизам формирања F1 региона регулисан фотохемијском равнотежом.

На профилу вертикалне густине електрона, максимална густина електрона у F1 региону појављује се као испупчење испод главног максимума (F2 врх). Тада је висина максимума густине електрона у F1 региону ( $h_{\max, F1}^0$ ) мања од висине транзиције ( $h_t$ ) (Ratcliffe, 1972; Hunsucker and Hargreaves, 2003). Испупчење се зове F1 врх и његов изглед зависи од соларног циклуса и соларног зенитног угла. Пошто  $h_t - h_{\max, F1}^0$  расте за мале соларне зенитне углове, F1 врх је чешћи око поднева и у летњем периоду.

Типичне вредности густине електрона у подне у региону средње географске ширине износе између  $2.3 \times 10^{11}$  до  $3.3 \times 10^{11}$  електрона/ $m^3$ . Овај слој узрокује око 10% кашњења GPS сигнала (Klobuchar, 1996).

*F2-Регион* Од свих региона у овом региону је највећа концентрација електрона. То је област између 200 km и 600 km. F2 регион је најважнији регион за навигацију и свемирску комуникацију. Такође је регион који је највише променљив и непредвидљив.

У овом региону је увећана стопа производње јона. Због мањег броја неутралних честица стопа рекомбинације је пропорционална густини електрона  $n_e$ . Фреквенција колизије наелектрисаних честица у овом региону је мања од њихових угаоних жиро-фреквенција, што резултира њиховим повећаним животним веком. Зато се процес кретања не може занемарити. У F2 региону, сва три фотохемијска процеса истовремено доприносе његовом формирању. Овде се одвија прелаз из фотохемијске равнотеже до дифузне равнотеже .

F2 регион узрокује највећи део кашњења GPS сигнала. Максимална густина (Lai, Robbins, and Wei 1985) електрона налази се између 250-400 km под нормалним условима јоносфере и траје током дана и ноћи, а износи обично  $10^6$  електрона по кубном центиметру, што је отприлике за фактор 10 више од E региона. F2 регионом доминирају јони атомског кисеоника  $O^+$ . Неутрална густина ( $10^8 \text{cm}^{-3}$ ) је још увек за неколико редова величине већа од густине јона. Изнад F2 врха, густина електрона опада експоненцијално са висином. Типичне вредности густине електрона у подне у региону средње географске ширине износе између  $2.8 \times 10^{11}$  и  $5.2 \times 10^{11}$  електрона/ $\text{m}^3$ .

Вредност густине електрона на врху, у подне, у F2 региону обично је већа зими него лети, док Шарман теорија говори супротно. Ово је познато као *сезонска аномалија* F2 региона. Сезонска аномалија је просторно зависна, а њена појава је корелацији са соларним циклусом (Ivanov-Kholodny and Mikhailov, 1986). Главни разлог за постојање сезонске аномалије је што се однос између атомске и молекуларне компоненте на висинама F2 региона мења и резултира променама у стопама производње јона и рекомбинацији електрона. Овај механизам доводи до повећања стопе губитка електрона у летњој хемисфери (Dieminger et al., 1996).

***Горњи регион и протоносфера*** Горњи део јоносфере је област изнад F2 врха проширена око 600 km до 1000 km. Јони атомског кисеоника овде су још увек

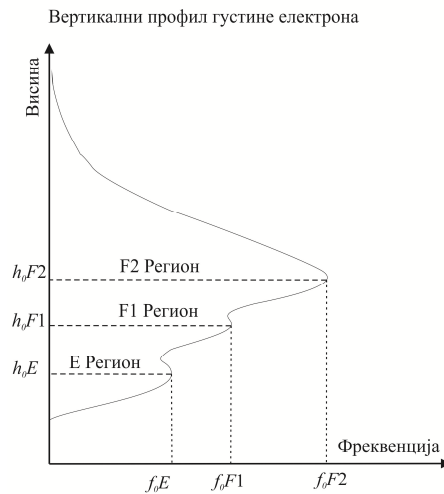


доминантни. Процес транспорта је главни процес, док су процеси јонизације и рекомбинације безначајни у формирању горњег региона. То значи да је овде доминантна дифузна равнотежа. У горњем региону, густина електрона опада експоненцијално са висином.

Изнад горњег региона, постоји област у којој доминирају лакши јони (јон водоника  $H^+$  и јон хелијума  $He^+$ ). Овај регион јоносфере је практично потпуно јонизован и назива се плазмасфера или протонсфера. Граница између горњег дела и протонсфере се дефинише као прелаз од атомског кисеоника до атомског водоника. Ова транзиција дешава се на надморској висини од 600 km до 2000 km. Протонсфера се често сматра као део јоносфере за радио и навигационе апликације. Током дневних часова, процењује се да она узрокује око 10% кашњења GPS сигнала. Међутим, током ноћног периода може да узрокује приближно 50% кашњења (Kelley, 2009).

***Параметри јоносферских региона*** Сваки електромагнетни талас током проласка кроз јоносферу мења свој правац простирања, амплитуду и брзину. Ова особина може да буде корисна за јоносферска истраживања. Интеракција између електромагнетних таласа и јоносфере резултира осцилацијом наелектрисаних честица у јоносфери, без обзира на геомагнетно поље.

Добро је познато да је јоносфера дисперзивна средина и тип интеракције између радио таласа (од  $KHz$  до  $GHz$ ) и јоносфере зависи од фреквенције таласа. Када је фреквенција радио таласа мања од фреквенције плазме, јоносфера се понаша као металик огледало. Ако је фреквенција већа од фреквенције плазме талас продира у јоносферу без рефлексије. Због зависности густине електрона од висине, емитовани радио таласи са земље у вертикалном правцу продиру у јоносферу до висине где локална плазма фреквенција достиже таласну фреквенцију. У том тренутку талас се рефлектује назад на Земљу (слика 2.7). Радио сондирање помоћу јоносонде омогућава мерење максималне фреквенције на којој се талас рефлектује од сваког региона јоносфере. Ова фреквенција је позната као *критична фреквенција* или *плазма фреквенција врха* или *максимална плазма фреквенција* региона. Јоносфера не рефлектује радио таласе на фреквенцијама изнад 30 MHz. Разлог томе је што електрони, на овим високим фреквенцијама, не могу довољно



**Слика 2.7: Вертикални профил густине електрона - максимална фреквенције плазме и максимална висина** (Слика по узору на Y. Memarzadeh, 2009)

брзо да подрже промене електричног поља тих таласа како би их рефлектовали назад на Земљу. Као последица тога, фреквенције изнад 30 MHz обично продиру у јоносферу без рефлексије и веома су корисна основа за комуникације типа Земља-свемир.

По правилу, један јоносферски регион (E, F1 и F2) генерално је описан максималном фреквенцијом плазме ( $foE$ ,  $foF1$  и  $foF2$ ) и висином максимума ( $hmE$ ,

$hmF1$ , и  $hmF2$ ) за које густина електрона опада са надморском висином на обе стране максимума. Максимална густина електрона јоносферских региона, која је пропорционална квадрату максимума плазма фреквенције, означена је са  $NmE$ ,  $NmF1$  и  $NmF2$ .

Други јоносферски карактеристичан параметар, који се обично користи у моделовању јоносфере је фактор простирања дефинисан као  $M(3000)F2 = MUF(3000)/foF2$ .  $MUF(3000)$  је највећа фреквенција која се прелама од јоносфере и која може бити примљена на удаљености од 3000 km од предајника.  $M(3000)F2$  се зове параметар преноса F2 региона и тесно је повезан са

висином максимума F2 региона (Dieminger et al., 1996). Ови параметри, који су познати као параметри јоносонде, су временски и просторно зависни.

### 2.4.3 Подела Јоносфере према географској ширини

Јоносфера показује широк спектар просторних и временских промена у густини електрона. Према томе, параметри јоносонде у јоносферским регионима варирају са висином, геомагнетном ширином и дужином, UT временом, годишњим добом, соларним циклусом, и геомагнетним активностима.

Варијација густине електрона у односу на геомагнетну ширину је углавном повезана са променама соларног зенитног угла и ефектима геомагнетног поља које игра важну улогу у транспортном процесу. Дакле, постоје значајне разлике између јоносферских услова на малим, средњим и великим ширинама. Према томе у зависности од геомагнетне ширине, јоносфера се може поделити на три главна региона који имају прилично различите особине и карактеристике, а то су: екваторијални, средњи и регион велике географске ширине (слика 2.8).

**Екваторијални регион** Овај регион се простире на око 20° са обе стране геомагнетног екватора. Овде је присутна велика варијабилност густине електрона што овај регион чини компликованим за моделовање. У овом региону јављају се највише вредности укупног садржаја електрона – ТЕС (енг. Total Electron Content). То је последица јаког сунчевог зрачења што узрокује појачану јонизацију уз присуство сцинтилационог ефекта који изазива највише поремећене јоносферске услове (Fu et al., 1999) (види одељак 2.4.4).

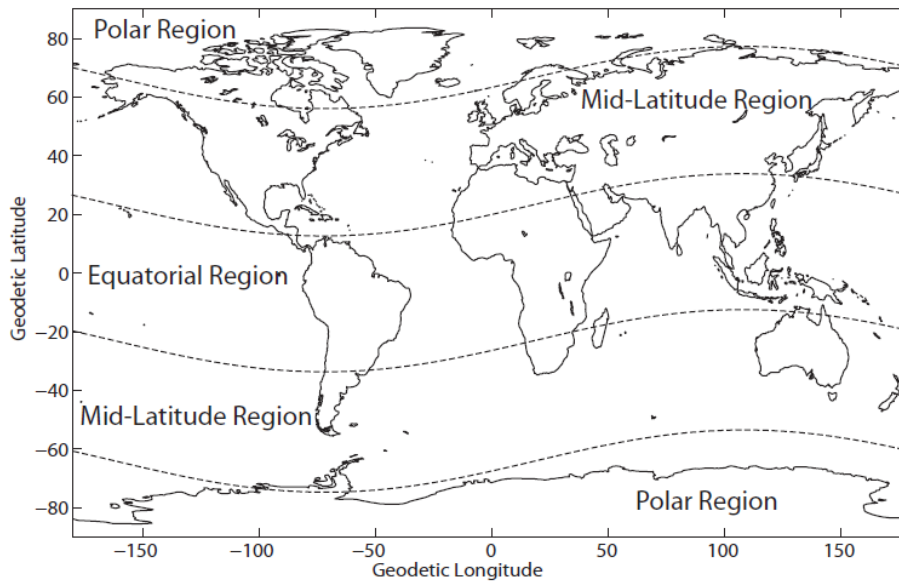
Значајна карактеристика овог региона је *екваторијална* или *Appleton аномалија* (Appleton, 1954). Ову аномалију карактеришу два максимума густине електрона који се налазе на око 10° до 20° степени са обе стране магнетног екватора. То је због зонског електричног поља које настаје на екватору услед глобалних плимских ветрова који путују у правцу исток-запад. Ово изазива подизање екваторијалне плазме изнад уобичајене висине. Ово кретање навише проузроковано је гравитацијом, која вуче плазму дуж линија магнетног поља и депонује је северно и јужно од магнетног екватора. То резултира великим

концентрацијама јонизоване плазме у овим регионима. *Дневна екваторијална аномалија* обично почиње да се развија око 9 часова по локалном времену и достиже свој максимум око 14 или 15 часова. Током периода соларног максимума међутим, овај максимум може доћи око 21 час по локалном времену, јер се сцинтилациони ефекти јављају претежно након заласка сунца у периодима између 20 часова и 2 часа по локалном времену (Basu et al., 1988).

***Регион средње ширине*** Јоносферски регион средње географске ширине, обухвата појас геомагнетне ширине од  $20^\circ$  до  $60^\circ$ . Овај појас је ван директног утицаја удара зрачења па је за процес јонизације одговорно само зрачење соларних фотона. Особине овог региона су најпотпуније истражене од особина свих осталих региона. Свакодневне промене у E, F1 и F2 регионима показују редовне варијације и мале нерегуларне варијације повезане са променама у густини неутралне атмосфере и ветровима. Максимум густине електрона јавља се на висини где су три фотохемијска процеса од упоредивог значаја.

Дневну варијацију TЕС у овом региону карактерише минимум непосредно пре изласка Сунца, а максимум између 14 и 15 часова по локалном времену. Најочљивија карактеристика TЕС је велика дневна флукуација око месечне средње вредности. Ова вредност може да достигне 20% у току дана, а 25% у току ноћи (Klobuchar, 1978).

***Поларни регион*** Поларни регион је подељен на ауроралне зоне (од око  $60^\circ$  до  $70^\circ$  геомагнетне ширине) и поларне капе (поларни делови у ауроралној зони). На великим географским ширинама геомагнетно поље пролази скоро вертикално, и то доводи до постојања јоносфере која је знатно сложенија него на средњим и малим географским ширинама. Та комплексност се јавља због тога што су линије геомагнетног поља на великим ширинама повезане са спољашњим делом магнетосфере који је проузрокован соларним ветром, док је јоносфера на средњим ширинама повезана са унутрашњом магнетосфером, која у суштини ротира са Земљом и тако је мање осетљива на спољне утицаје.



Слика 2.8: Подела Земље на геомагнетне регионе. Приказане су паралелне геомагнетне линије у односу на геодетски референтни оквир (Y. Memarzadeh, 2009).

У регионима средње и мале ширине, примарни извор јонизације је соларна фотонска радијација, а на великим ширинама, соларна радијација протона ствара додатну јонизацију посебно у Е региону. Енергетске честице које емитује Сунце су заробљене унутар Земљиног магнетног поља, и путују ка великим ширинама дуж линија магнетног поља (Nichols et al., 1999). Ове појаве резултирају оптичким и UV зрачењем које је обично познато као Аурора Бореалис/Аустралис (северно и јужно, респективно) и обично су ограничене у уском опсегу од око  $65^{\circ}$  до  $75^{\circ}$  геомагнетне ширине. Њихова појава може бити приметна неколико степени испод или изнад при озбиљно поремећеним јоносферским условима. Јоносферска активност у овом региону може се посматрати као интеракција између магнетосфере, јоносфере и атмосфере. Сцинтилациони ефекти су такође чести у овом региону због неправилности у густинама електрона изазваним локализованим интеракцијама енергетских честица са неутралним гасовима јоносфере. Снага сцинтилација на високим ширинама је у директној корелацији са соларном активношћу (види одељак 2.4.4) и једанаестогодишњим соларним циклусом.

Регион поларних капа лежи на ширинама изнад  $75^\circ$  и ограђен је ауроралним прстеновима. О овом региону јоносфере се не зна много услед недостатка расположивих података. Довољно је рећи да је морфологија јоносфере у овом региону повезана са Земљиним магнетосферним процесима и соларним утицајем. То чини поларну јоносферу у великој мери подложном соларним догађајима. У овом региону ефекат сцинтилација је релативно слабо истражен.

#### **2.4.4 Јоносферски поремећаји**

Поремећаји јоносфере се могу дефинисати као било које одступање јоносфере од њеног уобичајеног или мирног стања. Ове јоносферске сметње могу настати као резултат соларног поремећаја или поремећаја геомагнетног поља. Нагли пораст соларне енергије ветра (соларни поремећај) праћен повећањем соларног фотонског зрачења или повећањем брзине и концентрације зрачења соларних наелектрисаних честица у горњој атмосфери полова, не доводи само до појаве електричне струје већ и загрева поларну горњу атмосферу. Јоносферски поремећаји су повезани директно или индиректно са догађајима на Сунцу. Земљино магнетно поље је такође погођено соларним догађајима, где се геомагнетне линије поља које окружују Земљу компресују, изазивајући геомагнетне поремећаје. Иако су сви јоносферски региони погођени соларним поремећајима, најзначајнији се јављају у F региону (Wyllie, 2007).

**Јоносферске олује** Велике јоносферске олује јављају се релативно ретко. Оне могу бити изазване интензивним соларним ерупцијама које ослобађају енергетске честице у атмосферу. Ове ерупције су познате као соларне бакље. Оне представљају најдиректнији утицај соларне активности на Земљино окружење и имају велики утицај на јоносферске услове тако да могу ометати радио и сателитске комуникације и уништити сателитску електронику. Соларне бакље такође могу да изазову јоносферске олује. Када је соларна бакља довољно велика тако да ослободи велики облак плазме, онда она може да погоди Земљу и озбиљно промени стање јоносфере. Овако измењено стање може да се види у изненадним, непредвидљивим променама у критичној фреквенцији F2 слоја ( $f_oF2$ ). Када облак плазме доспе до Земљине атмосфере, повећање или смањење критичне

фреквенције зависи од локалног времена, сезоне, географске локације (географске ширине) и трајања олује.

Короналне масовне ерупције које изазивају велике брзине соларног ветра High Speed Solar Wind Streams (HSSWS) могу бити још један извор јоносферских поремећаја. Утицај HSSWS на јоносферу није толико изражен као утицај великих соларних бакљи, делимично јер HSSWS не доспевају до Земље тако брзо као облак из соларне бакље.

Соларна влакна (енг. prominences или filaments) могу бити још један окидач за јоносферске олује. То су велики облаци соларне материје који се јављају изнад Сунчеве површине захваљујућу његовом магнетном пољу. Када ове соларна влакна еруптирају, велике количине соларне материје се ослобађају у свемир, слично као соларне бакље, што директно утиче на Земљино геомагнетно поље (Tascione, 1988; Davies, 1990; McNamara, 1991).

Треба напоменути да морфологија и физика јоносферских олуја нису у потпуности схваћени и постоји значајан број отворених питања која се тичу овог феномена.

**Геомагнетне олује** Земљино магнетно поље је такође под утицајем истих соларних феномена који производе јоносферске олује. Геомагнетне олује се обично јављају у тандему са јоносферским олујама и могу бити узроковане соларним бакљама, токовима брзог соларног ветра (коронарне рупе) и изненадних нестајућих филамената. Ниво интензитета геомагнетних олуја може да се мери помоћу  $Kp$  индекса, који је мера нивоа поремећаја у магнетном пољу земље за трочасовни период. Геомагнетне олује се обично повезују са повећањем густине електрона у доњем делу јоносфере и повећањем апсорпције радио таласа. Оне обично почињу са наглим повећањем интензитета Земљиног геомагнетног поља. Овај нагли пораст је познат као почетна или позитивна фаза и траје само неколико сати првог дана олује (Hunsucker and Hargreaves, 2003). Након тога наступа значајно смањење познато као негативна фаза која може трајати неколико дана. На крају јоносфера се постепено враћа у нормалне услове у периоду од једног до неколико дана у фази опоравка.

Геомагнетне олује, посебно се јављају у северним поларним регионима (Hunsucker and Hargreaves, 2003) где наелектрисане честице плове дуж линија геомагнетног поља и ступају у интеракцију са неутралном атмосфером изазивајући обојене приказе (добро познате Ауроре). Око соларног максимума, интензитет и учесталост геомагнетне олује се повећава.

***Јоносферске сцинтилације*** Радио сигнал који пролази кроз јоносферу услед промена густине електрона може имати брзе осцилације у амплитуди, фази и углу пријема сигнала (Wyllie, 2007). Ова колебања сигнала, услед малих неправилности густине јоносфере, називају се јоносферске сцинтилације (Nichols et al., 1999). Оне настају услед ефеката рефракције на електромагнетне таласе приликом њиховог простирања кроз јоносферу. У регионима средње ширине утицај сцинтилација јавља се само током високе соларне активности и током периода изузетно поремећених геомагнетних услова (Doherty et al., 2003). Показано је да сцинтилације варирају у зависности од фреквенције сигнала, географске локације, локалног времена, сезоне, геомагнетне активности и једанаестогодишњег соларног циклуса (Aarons, 1982; Vasu et al, 1988; Aarons, 1993). Фазна сцинтилација се јавља у регионима где су неправилности густине електрона малог обима. Ту може доћи до брзе промене у фази сигнала. Ова појава може да изазове доплерски помак GPS сигнала, који може бити већи од пропусног опсега пријемника. То изазива губитак фазе што је узрок појаве фазних скокова у GPS подацима.

***Атмосферски гравитациони таласи*** (енг. Atmospheric Gravity Waves - AGW) Атмосферски таласи се класификују по обиму и пореклу у три основне групе:

- атмосферске плиме (на глобалном нивоу имају највећи обим (размеру)),
- акустични таласи (таласи најмањег обима који не играју значајну улогу у динамици атмосфере) и
- атмосферски гравитациони таласи - AGW (трећа група атмосферских таласа који су произведени од стране снаге потиска у атмосфери)

AGW имају обично локализовани извор и простиру се вертикално и хоризонтално са ограниченим опсегом таласних дужина. Они могу бити или генерисани на



висинама испод турбопаузе (стратосфера и мезосфера), а затим да пролазе кроз јоносферу или генерисани на нижим висинама јоносфере (D и E региони). Тренутно није јасно како AGW који потичу од извора у нижем делу атмосфере долазе до јоносфере (Rieger and Leitinger, 2002). Познато је неколико извора AGW: испод турбопаузе настају од струјања ваздуха преко планина, од вулкана и земљотреса, а изнад турбопаузе од јоносферских поремећаја углавном услед појаве Ауроре и то у поларном региону (Afraimovich et al., 2002).

На основу периода и таласне дужине AGW се деле у три групе:

- AGW великог обима (имају хоризонталне таласне дужине око 1000 km, са периодом од више од сат времена и хоризонталном брзином од око 250-1000 m/s),
- Средњи AGW (имају хоризонталне таласне дужине од неколико стотина километара, периоде од око 15-70 минута, и хоризонталну брзину од око 90-250 m/s) и
- Мали AGW (имају периоде 2-5 минута са брзином мањом од 300 m/s, а њихове таласне дужине су мање од оних код средњих AGW таласа).

AGW играју важну улогу у динамици горње атмосфере, јер су у интеракцији са јоносферском плазмом. Пролазак AGW кроз горњу атмосферу доводи до промена у јоносферској плазми и изазива флукуације електронске густине (посебно у F2 региону). Ови поремећаји у јоносфери су познати као *путујући јоносферски поремећаји* (Traveling Ionospheric Disturbances - TIDs) (Memarzadeh, 2009).

***Путујући јоносферски поремећаји*** У јоносфери се AGW обично манифестују као путујуће јоносферске сметње које су последица сударних спрега између неутралних и јонизованих честица. TID су обично подељени у три класе (Rieger and Leitinger, 2002; van Velthoven, 1990):

- TIDs велике размере -*Large Scale TIDs* (LSTIDs) су AGW настали у зони ауроре или су настали као последица специфичних геофизичких догађаја као што су геомагнетне суб-олује на висинама од око 100 km, са хоризонталном фазном брзином од 100 до 300 m/s (прекорачење брзине

звука). Хоризонталне таласне дужине веће су од 1000 km, са периодима у распону од 30 минута до 3 сата. LSTIDs се углавном простиру у региону средње ширине у правцу екватора.

- TIDs средње размере - *Medium Scale* TIDs (MSTIDs) су углавном AGW таласи настали у доњем делу атмосфере. Неки MSTIDs на средњим ширинама са простирањем према екватору могу бити AGW иза ауроралних зона. Таласне дужине ових таласа су између 100 до 1000 km, са периодима од око 12 минута до 1 сат и хоризонталном фазном брзином од 100 до 300 m/s.
- TIDs мале размере - *Small Scale* TIDs (SSTIDs) имају своје порекло само у доњој атмосфери. Таласне дужине, брзина и периоди су мањи од оних код MSTIDs и готово увек показују обрасце интерференције.

Појава LSTIDs је релативно ретка и јасна је корелација са геомагнетним активностима, док се MSTIDs редовно појављују у F2 региону током дана како у мирном периоду јоносфере тако и у поремећеном периоду (Kalikhman, 1980). LSTIDs се крећу углавном ка екватору док је кретање MSTIDs, а посебно SSTIDs доста сложеније.

### **3. NAVSTAR GPS ГЛОБАЛНИ ПОЗИЦИОНИ СИСТЕМ**

---

Главни задатак ове дисертације, јесте испитивање краткорочних временских карактеристика јоносфере на регионалном нивоу. Циљ истраживања јесте изнајлажење начина моделовања варијабилности разлика јоносферског кашњења у мрежном GPS RTK окружењу. Према томе тежиште овог поглавља је базирано на упознавању са основним карактеристикама GPS система. Укратко је представљен развој и архитектура GPS система са освртом на структуру GPS сигнала. Дат је преглед најважнијих извора грешака које оптерећују резултате GPS мерења. Такође детаљно је објашњен математички модел GPS мерења тј. изведен је детаљни функционални модел кодних и фазних псеудодужина и приказан је стохастички модел оригиналних псеудодужина. На крају дат је приказ принципа позиционирања са детаљним описом релативног позиционирања.

#### **3.1 Развој и архитектура NAVSTAR GPS система**

Глобални позициони систем (енг. Global Positioning System - GPS) је развијен од стране Министарства одбране SAD под именом NAVSTAR GPS. Први GPS сателити лансирани су 1978. године, а 1995. године систем је проглашен потпуно оперативним.

Предвиђена су два режима коришћења система: стандардно позиционирање за цивилну мирнодопску употребу (SPS), и прецизно позиционирање за овлашћене кориснике америчког Министарства одбране (PPS).

Одређивање дужине применом GPS система врши се одређивањем времена путовања радио сигнала па часовници у сателитима и пријемницима морају бити

синхронизовани са високом тачношћу.<sup>3</sup> Позиционирање применом GPS система је засновано на трилатерационој методи.

Поред GPS постоје и други сателитски радионавигациони системи. Они се једним именом називају Глобалним Навигационим Сателитским Системима (енг. Global Navigation Satellite System - GNSS).

Русија је развила навигациони сателитски систем под називом ГЛОНАСС (рус. Глобалная Навигационная Спутниковая Система) који је такође систем двоструке намене (војна и цивилна) и омогућава и SPS и PPS услуге. GALILEO је Европски глобални навигациони сателитски систем за чије покретање је донета одлука 1999. године. За разлику од GPS -а и ГЛОНАСС-а, GALILEO је под цивилном контролом и међународним учешћем и инвестицијама. Један од циљева је да се обезбеди алтернативни високо прецизни систем позиционирања на који европске нације могу да се ослоне, независно од руског ГЛОНАСС-а и GPS система. Достизање комплетне констелације се очекује до 2019. године. Кинески сателитски навигациони систем који се назива КОМПАС (или BEIDOU Navigation System) је двоструки кориснички систем који ће обезбедити два навигациона сервиса: отворен (комерцијални) сервис за кориснике и ауторизовани позициони, брзински и временски комуникациони сервис (Hein, and Eissfeller, 2007). Очекује се како ће систем BEIDOU до 2020. године имати глобалну покривеност, али још увек нису познати сви детаљи његове дефинитивне архитектуре. Поред ових система постоје још и Јапански Multi-functional Transport Satellite Satellite-based Augmentation System (MSAS) и Индијски GPS и Geo-Augmented Navigation (GAGAN) system.

GPS систем се састоји од три компоненте, космичке компоненте, контролне компоненте и корисничке компоненте.

---

<sup>3</sup> У GPS пријемнике се уграђују кварцни осцилатори које су мање тачности од атомских осцилатора у сателитима. Због тога ће сви временски интервали у тренутку мерења бити оптерећени систематском грешком. То проузрокује да су добијена растојања према свим сателитима подједнако дужа или подједнако краћа од истинитих вредности, па се због тога називају псеудодужинама.

**Космичку компоненту система** чине GPS сателити у орбити Земље полупречника 26560 km. Број и распоред сателита се мењао током времена. Оригинални концепт представљају 24 GPS сателита који се крећу у 6 орбиталних равни, равномерно распоређених у односу на Земљу, које су нагнуте под углом од  $55^\circ$  у односу на екваторијалну раван. У свакој орбиталној равни се крећу по 4 сателита, по орбитама које су скоро кружне, међусобно правилно распоређени по кружници орбите, под углом од  $90^\circ$ .

Сваки од сателита једном обиђе своју орбиту за 12 часова. Овај број и правилан распоред сателита гарантује да се са сваке тачке на Земљи у сваком тренутку изнад хоризонта налазе бар четири сателита. Сателити су опремљени атомским часовницима (по четири часовника на сваком сателиту). Постоји неколико генерација GPS сателита (Block I, Block II и IIA, Block IIR, Block IIF и дугорочни пројекат потпуно нове генерације сателита под називом GPS III).

**Контролну компоненту система** чине станице за праћење сателита, контролне станице и терестричке антене. Станице за праћење сателита се налазе глобално распоређене по лонгитуди на пет места: Ascension Island, Diego Garcia, Kwajalein, Hawaii и Cape Canaveral. Четири станице имају велике терестричке антене и њихова улога је да прате кретање сателита и податке шаљу главној контролној станици (MCS) у ваздухопловној бази Schriever, Colorado Springs. Ту се врше прорачуни и преко терестричких антена које се налазе на Kwajalein острву, Ascension острву и острву Diego Garcia, сателитима се шаљу ажурирани подаци о њиховој тачној позицији и времену. Прогнозиране сателитске ефемериде и коефицијенти часовника упућују се потом из главне контролне станице у једну од терестричких антена која их радио путем прослеђује сателитским меморијама. Ажурирање се врши два пута дневно, чиме се постиже прецизно подешавање система.

**Корисничку компоненту система** чине GPS пријемници на Земљи. Основни делови GPS пријемника су антена подешена на фреквенцију GPS сателита, кристални осцилатор који служи као часовник и микропроцесор који обрађује сигнале.

## 3.2 GPS сигнали и извори грешака

### 3.2.1 Структура GPS сигнала

GPS сателити емитују своје сигнале на две фреквенције L1 и L2 у L -опсегу (L1=1575.42 MHz и L2=1227.6 MHz). GPS носеће фреквенције су изведене из истог осцилатора (атомског) часовника са основном фреквенцијом  $f_0$  од 10.23 MHz. У табели 3.1 је приказан однос фреквенција појединих компоненти према основној. На фреквенцији L1 емитују се два сигнала, од којих је први за цивилно коришћење, а други је намењен овлашћеним корисницима. Сигналу на L2 могу да приступе само овлашћени корисници. Сваки сигнал састоји се од следеће три компоненте: носећих таласа, кодова и навигационих података.

*Носећи таласи* су синусни радио таласи фреквенција  $f_{L1}$  или  $f_{L2}$  чије таласне дужине износе  $\lambda_{L1} = 19.0$  cm и  $\lambda_{L2} = 24.4$  cm.

*Кодови* су јединствени бинарни низови нула и јединица. Помоћу њих GPS пријемници могу тренутно одредити време пута сигнала. Ови низови се називају још и псеудослучајним (енг. Pseudo Random Noise - PRN) кодовима јер распоред појединачних нула и јединица у низовима изгледа насумично. Дакле, носећи таласи су модулисани такозваним PRN кодовима, који су јединствени за сваки сателит. Постоје две врсте PRN кодова: заштићени прецизни (P(Y)) кодови и јавно доступни (C/A) кодови. Сваком GPS сателиту додељен је јединствени C/A код, а од 1994. године не емитују се чисти P кодови већ шифрирани Y кодови (P(Y)).

*Навигациони подаци* су смештени у бинарно кодираној поруци. Она садржи податке о стању исправности сателита, његовим ефемеридима (положајима и брзинама), параметрима часовника и алманаху (приближним ефемеридима свих осталих сателита у констелацији). Подаци који су критични за позиционирање и навигацију понављају се сваких 30 s.

Табела 3.1: Однос фреквенција појединих компоненти сигнала према основној фреквенцији.

Компонента сигнала	Фреквенција [MHz]
Носећи талас L1	$154 \times 10.23 = 1575.42$
Носећи талас L2	$120 \times 10.23 = 1227.60$
С/А код	$10.23 / 10 = 1.023$
Р(У) код	$1 \times 10.23 = 10.23$
Навигациона порука	$10.23 / 204\,600 = 0.00005$

Комбиновањем компоненти у процесима бинарног сабирања и фазне модулације добија се комплетан GPS сигнал. Прво се навигациона порука бинарно комбинује са кодом, па се тако добијена комбинација уграђује у носећи талас модулисањем његове фазе. Овај специфични начин модулације назива се бинарним фазним кодирањем (енг. Binary Phase Shift Keying - BPSK). Модулисање носећег таласа кодовима има за последицу да се снага сигнала, која је пре модулације сконцентрисана у једној фреквенцији, расподељује на знатно шири фреквенцијски опсег. Сигнали оваквих својстава називају се сигнаlima широког спектра, и налазе велику примену у комуникацији и навигацији.

### 3.2.2 Основни извори грешака мерења

GPS мерења су оптерећена различитим грешкама. Оне се у главном деле на грешке сателитског порекла, затим грешке које потичу од средине кроз коју се простира сигнал и грешке чије је порекло у пријемнику и антени тј. њиховој непосредној околини.

#### 1) Грешке сателитског порекла

- грешке због лоше геометрије сателита - DOP (енг. Dilution of precision)
- грешке ефемерида<sup>4</sup> и

---

<sup>4</sup> Постоји неколико цивилних научних организација које се баве одређивањем орбита GPS сателита, независно од контролног GPS сегмента. Једна од њих је Међународна GNSS служба (IGS) са преко 200 перманентних станица равномерно распоређених по читавом свету са којих се врше GPS опажања. IGS одређује неколико категорија такозваних прецизних ефемерида, од којих су неке прогнозиране па су доступне и у реалном времену. Дефинитивне прецизне IGS ефемериде, чија је тачност чак 2.5 cm, могу се слободно преузети са интернета, али су за разлику од емитујућих ефемерида доступне тек за пар недеља ( Blagojević, 2014).

- грешке часовника у сателиту<sup>5</sup>.

## **2) Грешке средине простирања сигнала**

Доминантне грешке које се јављају приликом простирања сигнала кроз атмосферу и то су:

- грешке јоносферског кашњења сигнала и
- грешке тропосферског кашњења сигнала.

Детаљан опис јоносферског кашњења је дат у поглављу 4.

## **3) Грешке пријемника**

- грешка часовника пријемника
- мерни шум пријемника и
- утицај вишеструке рефлексије GPS сигнала од природних или вештачких површина у околини пријемника.

## **4) Остале грешке мерења**

- хардверска кашњења
- варијације фазног центра антене и
- релативистички ефекти.

За више информација о свим изворима грешака погледати Blagojević, 2014.

## **3.3 Математички модел GPS мерења**

### **3.3.1 Функционални и стохастички модел псеудодужина**

Кодне псеудодужине од GPS пријемника до сателита се одређују поређењем примљених кодова са генерисаним кодовима чиме се у ствари мери време пута сигнала. Фазне псеудодужине мере се тако што GPS пријемник упоређује фазу

---

<sup>5</sup> Служба IGS такође одређује одступања сателитских часовника од системског GPS времена. Њихова тачност се креће од 3 ns (~ 1 m) за ултра-брза одступања која су доступна у реалном времену, па све до 0.075 ns (~ 2 cm) за категорију финалних производа. За прецизније примене могуће је користити ове вредности.



примљеног носећег таласа са фазом носећег таласа којег сам генерише, чиме ефективно мери фазну разлику. Функционални модел ових псеудодужина представља уствари функционалну везу између мерених и непознатих величина, које у општем случају представљају координате тачака (Влагојевић, 2014).

**Функционални модел кодних псеудодужина.** Кодна псеудодужина  $P_{A,f}^i(t)$  од станице  $A$  до сателита  $i$ , измерена на фреквенцији  $f$ , може се добити путем израза:

$$P_{A,f}^i(t) = c_0 [t_A(t) - t^i(t - \tau)] \quad (3.1)$$

где је  $c_0$  брзина светлости,  $t_A$  GPS време пријема сигнала у пријемнику у тренутку  $t$ ,  $t^i$  време на сателиту у тренутку  $t - \tau$  када је сигнал емитован,  $\tau$  истинито време пута сигнала од сателита до пријемника (мање од 0.1 s).

Часовници пријемника и сателита одступају од системског времена и њихова читања у тренуцима  $t$  и  $t - \tau$  треба да се коригују за грешке часовника пријемника  $\delta t_A$  и сателита  $\delta t^i$  у одговарајућим тренуцима времена:

$$\begin{aligned} t_A(t) &= t + \delta t_A(t) \\ t^i(t - \tau) &= t - \tau + \delta t^i(t - \tau) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Када се израз (3.2) замени у израз (3.1) добија се:

$$P_{A,f}^i(t) = c_0 \tau + c_0 [\delta t_A(t) - \delta t^i(t - \tau)] \quad (3.3)$$

Укупан пут који је сигнал прешао од сателита до пријемника добија се када се брзина светлости помножи са временом пута ( $c_0 \tau$ ). Пошто сигнал пролази кроз јоносферу и тропосферу, пређени пут је једнак збиру праволинијског (геометријског) растојања  $r$  између сателита и пријемника, тропосферског кашњења  $T$  и јоносферског кашњења  $I$ :

$$c_0 \tau = r_A^i(t, t - \tau) + T_A^i(t) + I_{A,f}^i(t) \quad (3.4)$$

Пошто је јоносфера дисперзивна средина у члану за јоносферско кашњење стоји индекс фреквенције  $f$ .

Геометријско растојање се може написати као:

$$r_A^i = \sqrt{[x_A(t) - x^i(t - \tau)]^2 + [y_A(t) - y^i(t - \tau)]^2 + [z_A(t) - z^i(t - \tau)]^2} \quad (3.5)$$

где су  $x_A(t)$ ,  $y_A(t)$  и  $z_A(t)$  координате тачке  $A$  у тренутку пријема, а  $x^i(t - \tau)$ ,  $y^i(t - \tau)$  и  $z^i(t - \tau)$  координате сателита  $i$  у тренутку емитовања сигнала.

Код одређивања кодних псеудодужина потребно је узети у обзир и додатне грешке које оптерећују мерења. У питању је грешка сателитских ефемерида  $E$ , грешка због вишеструке рефлексије  $M$  и случајна грешка мерења  $\varepsilon$  која се никада не може у потпуности избећи.

Коначни облик функционалног модела с обзиром на претходно, гласи:

$$P_{A,f}^i(t) = r_A^i + E_A^i + c_0 \delta t_A + c_0 \delta t^i + T_A^i + I_{A,f}^i + M_{A,f,P}^i + \varepsilon_{A,f,P}^i \quad (3.6)$$

**Функционални модел фазних псеудодужина.** Фазна псеудодужина  $L_{A,f}^i(t)$  од станице  $A$  до сателита  $i$ , измерена на фреквенцији  $f$  у тренутку  $t$  може се добити путем израза:

$$L_{A,f}^i(t) = \lambda_f [\varphi_{A,f}(t) - \varphi_f^i(t - \tau)] + \lambda_f N_{A,f}^i \quad (3.7)$$

где је  $\lambda$  таласна дужина,  $\varphi_A$  фаза носећег таласа пријемника у тренутку пријема  $t$ , и  $\varphi^i$  фаза носећег таласа сателита у тренутку када је сигнал емитован  $t - \tau$ .  $N$  је фазна неодређеност. До ове појаве долази јер је носећи талас једноставни периодични синусни талас, па пријемник може да мери фазну разлику само у оквиру једне таласне дужине. Све док пријемник непрекидно прати сигнал са конкретног сателита фазна неодређеност остаје константна. Међутим било какав прекид праћења сигнала значи потпуно нову фазну неодређеност. Пошто је фаза једнака производу фреквенције и времена, за фазе носећих таласа пријемника и сателита може се писати:

$$\begin{aligned} \varphi_{A,f}(t) &= f_f t_A(t) = f_f [t + \delta t_A(t)] \\ \varphi_f^i(t - \tau) &= f_f t^i(t - \tau) = f_f [t - \tau + \delta t^i(t - \tau)] \end{aligned} \quad (3.8)$$

Заменом израза (3.7) у израз (3.8), и узмањем у обзир односа  $c_0 = \lambda f$ , добија се:

$$L_{A,f}^i(t) = c_0 \tau + c_0 [\delta t_A(t) - \delta t^i(t - \tau)] + \lambda_f N_{A,f}^i \quad (3.9)$$

Слично као код кодних псеудодужина коначни облик функционалног модела фазних псеудодужина је:

$$L_{A,f}^i(t) = r_A^i + E_A^i + c_0 \delta t_A + c_0 \delta t^i + T_A^i - I_{A,f}^i + M_{A,f,L}^i + \lambda_f N_{A,f}^i + \varepsilon_{A,f,L}^i \quad (3.10)$$

Дакле, фазне псеудодужине представљају веома прецизна али зато неодређена растојања, а кодне псеудодужине потпуна, али непрецизна растојања. Решавањем фазне неодређености тј. одређивањем целог броја таласних дужина  $N$ , фазне псеудодужине постају милиметарски прецизна растојања, преко којих је могуће добити координате тачака милиметарске тачности.

**Дефинисање стохастичког модела GPS мерења** подразумева да се сваком мерењу које учествује у обради додели стандардна девијација  $\sigma$  која карактерише његову тачност, јер се геодетска обрада GPS мерења врши применом методе најмањих квадрата. Циљ је да се статистички оптимално оцене непознате координате тачака.

Псеудодужине измерене са неке станице према свим видљивим GPS сателитима немају исту тачност, јер се мерења под различитим вертикалним угловима  $\alpha$  у односу на хоризонт разликују међусобно у стохастичком смислу. У општем случају, тачност псеудодужине расте (односно смањује јој се стандард  $\sigma$ ) како се повећава њен вертикални угао (односно смањује зенитно одстојање  $z$ ). Ако се стандард псеудодужине која је у правцу зенита ( $\alpha = 90^\circ$  или  $z = 0^\circ$ ) обележи са  $\sigma_0$ , тада се стандард псеудодужине која има вертикални угао  $\alpha$  обично моделира као:

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_0}{\sin \alpha} = \frac{\sigma_0}{\cos z} \quad (3.11)$$

Дакле, стандардна девијација кодних и фазних псеудодужина зависи од зенитног одстојања  $z$ .

### 3.3.2 Формирање разлика мерених псеудодужина

Један од начина елиминације утицаја појединих извора грешака или њиховог свођења на минимум јесте примена линеарних комбинација мерених псеудодужина. У питању су такозване просте (једноструке), двоструке и троструке разлике. У складу с тим, разлике се могу формирати по пријемницима, сателитима и по времену. Формирање разлика је идентично и за фазне и за кодне псеудодужине, па је у наставку дат пример само за фазне псеудодужине.

*Просте разлике* су разлике између истовремено измерених псеудодужина од тачака  $A$  и  $B$  према истом сателиту  $i$ . У питању су разлике интерферометријског типа.

Функционални модели фазних псеудодужина, измерених у истом тренутку времена  $t$ , могу се написати у облику:

$$\begin{aligned} L_{A,f}^i &= r_A^i + E_A^i + c_0 \delta t_A + c_0 \delta t^i + T_A^i - I_{A,f}^i + M_{A,f,L}^i + \lambda_f N_{A,f}^i + \varepsilon_{A,f,L}^i \\ L_{B,f}^i &= r_B^i + E_B^i + c_0 \delta t_B + c_0 \delta t^i + T_B^i - I_{B,f}^i + M_{B,f,L}^i + \lambda_f N_{B,f}^i + \varepsilon_{B,f,L}^i \end{aligned} \quad (3.12)$$

Када се ове две псеудодужине одузму добија се проста разлика чији функционални модел има следећи облик:

$$\begin{aligned} L_{AB,f}^i &= L_{A,f}^i - L_{B,f}^i \\ &= (r_A^i - r_B^i) + (E_A^i - E_B^i) + c_0 (\delta t_A - \delta t_B) + (T_A^i - T_B^i) - (I_{A,f}^i - I_{B,f}^i) + \\ &\quad + (M_{A,f,L}^i - M_{B,f,L}^i) + \lambda_f (N_{A,f}^i - N_{B,f}^i) + (\varepsilon_{A,f,L}^i - \varepsilon_{B,f,L}^i) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Ако се тачке  $A$  и  $B$  налазе на меусобном растојању мањем од 10 km, тропосферски, јоносферски и утицај грешке сателитских ефемерида се могу занемарити. Ако претпоставимо да су у члану  $\varepsilon$  садржани случајни утицаји (вишеструка рефлексија и грешка мерења), функционални модел поприма једноставнији облик:

$$L_{AB,f}^i = r_{AB}^i + c_0 (\delta t_A - \delta t_B) + \lambda_f N_{AB,f}^i + \varepsilon_{AB,f,L}^i \quad (3.14)$$

Обрадом простих разлика одређују се координатне разлике између тачака  $A$  и  $B$ .

**Двоструке разлике** су разлике између просте разлике истовремено измерених псеудодужина од тачака  $A$  и  $B$  према сателиту  $i$ , и просте разлике истовремено измерених псеудодужина од истих тачака  $A$  и  $B$  према другом сателиту  $j$ .

Функционални модел двоструких разлика се формира коришћењем функционалног модела простих разлика (3.13):

$$\begin{aligned} L_{AB,f}^i &= r_{AB}^i + E_{AB}^i + c_0(\delta t_A - \delta t_B) + T_{AB}^i - I_{AB,f}^i + M_{AB,f,L}^i + \lambda_f N_{AB,f}^i + \varepsilon_{AB,f,L}^i \\ L_{AB,f}^j &= r_{AB}^j + E_{AB}^j + c_0(\delta t_A - \delta t_B) + T_{AB}^j - I_{AB,f}^j + M_{AB,f,L}^j + \lambda_f N_{AB,f}^j + \varepsilon_{AB,f,L}^j \end{aligned} \quad (3.15)$$

Када се ове две просте разлике одузму добија се тражена двострука разлика чији је функционални модел:

$$\begin{aligned} L_{AB,f}^{i,j} &= L_{AB,f}^i - L_{AB,f}^j \\ &= (r_{AB}^i - r_{AB}^j) + (E_{AB}^i - E_{AB}^j) + (T_{AB}^i - T_{AB}^j) - (I_{AB,f}^i - I_{AB,f}^j) + \\ &\quad + (M_{AB,f,L}^i - M_{AB,f,L}^j) + \lambda_f (N_{AB,f}^i - N_{AB,f}^j) + (\varepsilon_{AB,f,L}^i - \varepsilon_{AB,f,L}^j) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Код двоструких разлика нису присутне грешке часовника пријемника, па модел садржи укупно седам чланова. И код двоструких разлика када су тачке  $A$  и  $B$  на кратком међусобном растојању, могу да се занемаре тропосферски и јоносферски утицаји и утицај грешке сателитских ефемерида. Модел двоструке разлике тада има следећи облик:

$$L_{AB,f}^{ij} = r_{AB}^{ij} + \lambda_f N_{AB,f}^{ij} + \varepsilon_{AB,f,L}^{ij} \quad (3.17)$$

Код двоструких разлика, поред тога што не садрже грешке часовника пријемника и сателита, много се лакше решавају фазне неодређености. Због тога се користе за обраду GPS мерења код геодетског позиционирања. Међутим, тачност двоструких разлика је нижа од тачности простих разлика јер су двоструке разлике практично линеарне комбинације четири псеудодужине. Такође као код простих разлика обрадом двоструких разлика, долази се до координатних разлика између тачака  $A$  и  $B$ , а не и до њихових координата.

**Троструке разлике** су разлике између двоструке разлике истовремено измерених псеудодужина од тачака  $A$  и  $B$  према сателитима  $i$ , и  $j$  у тренутку времена  $t_1$ , и исте те двоструке разлике у тренутку  $t_2$ .

Двоструке разлике у тренуцима времена  $t_1$  и  $t_2$  могу да се напишу:

$$\begin{aligned} L_{AB,f}^{ij}(t_1) &= r_{AB}^{ij}(t_1) + E_{AB}^{ij}(t_1) + T_{AB}^{ij}(t_1) - I_{AB,f}^{ij}(t_1) + M_{AB,f,L}^{ij}(t_1) + \lambda_f N_{AB,f}^{ij} + \varepsilon_{AB,f,L}^{ij}(t_1) \\ L_{AB,f}^{ij}(t_2) &= r_{AB}^{ij}(t_2) + E_{AB}^{ij}(t_2) + T_{AB}^{ij}(t_2) - I_{AB,f}^{ij}(t_2) + M_{AB,f,L}^{ij}(t_2) + \lambda_f N_{AB,f}^{ij} + \varepsilon_{AB,f,L}^{ij}(t_2) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Када се ове две двоструке разлике одузму добија се тражена трострука разлика чији је функционални модел:

$$\begin{aligned} \delta L_{AB,f}^{ij} &= L_{AB,f}^{ij}(t_1) - L_{AB,f}^{ij}(t_2) \\ &= [r_{AB}^{ij}(t_1) - r_{AB}^{ij}(t_2)] + [E_{AB}^{ij}(t_1) - E_{AB}^{ij}(t_2)] + [T_{AB}^{ij}(t_1) - T_{AB}^{ij}(t_2)] - [I_{AB,f}^{ij}(t_1) - I_{AB,f}^{ij}(t_2)] + \\ &\quad + [M_{AB,f,L}^{ij}(t_1) - M_{AB,f,L}^{ij}(t_2)] + [\varepsilon_{AB,f,L}^{ij}(t_1) - \varepsilon_{AB,f,L}^{ij}(t_2)] \end{aligned} \quad (3.19)$$

Код троструких разлика није присутан члан који се односи на фазне неодређености јер су оне константне величине, па модел садржи укупно шест чланова. Остали чланови по правилу су још мањи у односу на двоструке разлике сем чланова са утицајем вишеструке рефлексије и случајним грешкама мерења. Када су мерења међусобно временски блиска чланови који се односе на тропосферске и јоносферске утицаје и утицај грешке сателитских ефемерида могу се занемарити. Функционални модел тада поприма једноставнији облик:

$$\delta L_{AB,f}^{ij} = \delta r_{AB}^{ij} + \delta \varepsilon_{AB,f,L}^{ij} \quad (3.20)$$

Тачност троструких разлика је много нижа у односу на тачност двоструких разлика. Стога оне нису погодне за геодетско одређивање координатних разлика. Њихова примена је значајна приликом откривање фазних скокова, односно тренутака времена када је током мерења дошло до прекида пријема сигнала.

### 3.4 Принципи GPS позиционирања

Постоји више различитих метода мерења применом GPS-а. Разлике су у самом поступку мерења и тачности добијених резултата.

Разликујемо три режима рада при одређивању координата тачака:

- статички (пријемници су непокретни током опажања)
- кинематички (пријемници се крећу)
- диференцијални GPS (DGPS - користе се и покретни и непокретни пријемници)

Обзиром на принцип мерења разликују се четири основне методе позиционирања применом GPS-а:

- апсолутно или аутономно статичко позиционирање,
- апсолутно или аутономно кинематичко позиционирање,
- релативно статичко позиционирање и
- релативно кинематичко позиционирање

Како је задатак ове тезе првенствено везан за одређивање јоносферских утицаја у Мрежном-RTK сиситему, метод релативног позиционирања ће у наредном поглављу бити детаљније описан.

#### 3.4.1 Релативно GPS позиционирање

Релативно позиционирање захтева истовремена мерења на две или више тачака па су за примену ове методе неопходна најмање два пријемника.

GPS пријемници  $R1$  и  $R2$  на станицама  $T1$  и  $T2$  (видети слику 3.1) врше мерења псеудодужина до свих видљивих сателита у унапред дефинисаним тренуцима времена који се називају епохама опажања. Пошто се базна станица налази на локацији са познатим координатама, пријемник је у стању да за сваку епоху опажања одреди растојање до сателита, оцени грешке измерених псеудодужина и емитује их радио антеном у околни простор. Уместо да рачуна и емитује

корекције, базна станица може директно емитовати своја оригинална опажања заједно са њиховим епохама. Кориснички GPS пријемник  $A$  комбинује примљене псеудодужине са сопственим псеудодужинама измереним у истим епохама, и тако добија:

$$P_{AR,f}^i = P_{A,f}^i - P_{R,f}^i = (r_A^i - r_R^i) + (E_A^i - E_R^i) + c_0(\delta t_A - \delta t_R) + (T_A^i - T_R^i) + (I_{A,f}^i - I_{R,f}^i) + M_{AR,f,P}^i + \varepsilon_{AR,f,P}^i \quad (3.21)$$

Због релативне близине базе и корисничке станице поништавају се утицаји грешака ефемерида и тропосферске и јоносферске рефракције, чиме модел добија једноставнију структуру:

$$P_{AR,f}^i = P_{A,f}^i - P_{R,f}^i = (r_A^i - r_R^i) + c_0(\delta t_A - \delta t_R) + M_{AR,f,P}^i + \varepsilon_{AR,f,P}^i = r_{AR}^i + c_0\delta t_{AR} + M_{AR,f,P}^i + \varepsilon_{AR,f,P}^i \quad (3.22)$$

На овај начин одређује се релативни положај корисника у односу на референтну станицу. Непознате величине су три координатне разлике и грешка несинхронизације часовника, па су за решење неопходне најмање четири измерене кодне псеудодужине. Пошто се уместо координата добијају координатне разлике, метода се назива релативним GPS позиционирањем. Координате корисника се рачунају додавањем координатних разлика на познате координате референтне станице.

Када референтна станица емитује фазне псеудодужине одговарајући функционални модел комбинације коју формира кориснички пријемник гласи у том случају:

$$L_{AR,f}^i = (r_A^i - r_R^i) + c_0(\delta t_A - \delta t_R) + \lambda_f(N_{A,f}^i - N_{R,f}^i) + M_{AR,f,L}^i + \varepsilon_{AR,f,L}^i = r_{AR}^i + c_0\delta t_{AR} + \lambda_f N_{AR,f}^i + M_{AR,f,L}^i + \varepsilon_{AR,f,L}^i \quad (3.23)$$

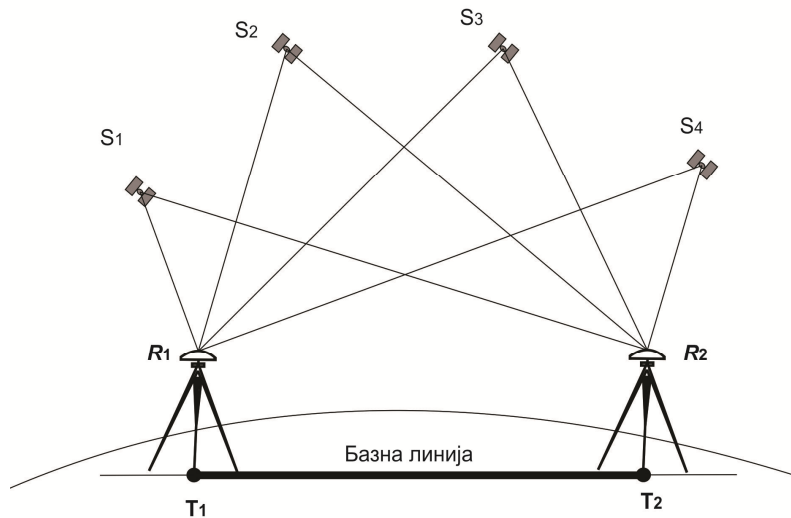
што је идентично моделу кодних псеудодужина, са додатком члана који се односи на фазну неодређеност. Код фазних псеудодужина комбиновани утицај вишеструке рефлексije и грешака мерења вишеструко је мањи у поређењу са



кодним псеудодужинама. Модели кодних и фазних комбинација (3.22) и (3.23) представљају уствари познати случај простих разлика интерферометријског типа.

Као што смо већ поменули разликујемо статичко и кинематичко релативно позиционирање.

**Релативно статичко позиционирање** се заснива на одређивању просторног вектора између два стационарна пријемника  $R1$  и  $R2$  постављена на две станице  $T1$  и  $T2$ , где сваки од пријемника симултано прима сигнале са сателита  $S_i$ ,  $i=1, \dots, 4$ . Овај метод се често назива и тродимензионално мерење дужина, тј. вектора између две станице (слика 3.1). Дакле, на основу координатних разлика, између две станице, одређује се вектор у простору који се обично назива "базна линија" или "страна". Приликом формирања координатних разлика елиминишу се систематски утицаји који су присутни на обе станице. С обзиром на то ова метода пружа тачност мерења која задовољава критеријуме геодетских радова. Применом релативног статичког позиционирања могу се користити кодна и фазна мерења, али се за геодетске потребе користе искључиво фазна мерења тј. комбинације у виду простих, двоструких и троструких разлика.



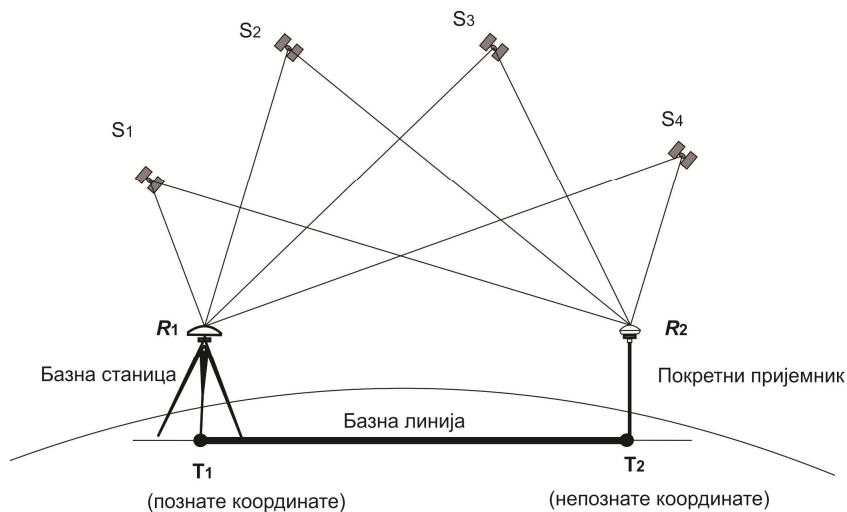
Слика 3.1: Релативно статичко позиционирање

**Релативним кинематичким позиционирањем** одређује се просторни вектор између стационарног и покретног пријемника (слика 3.2). Стационарни пријемник се поставља на тачку чије су координате познате и представља базни пријемник или базну станицу. Други покретни пријемник се поставља на тачку чије се координате одређују и он има улогу ровера.

Коришћењем Р кода постиже се тачност од око 0.5 m, док употреба фазних мерења обезбеђује тачност од 5 mm. Процес решавања фазних неодређености познат је као иницијализација. Уколико из било ког разлога дође до прекида сигнала неопходна је поновна иницијализација.

У принципу, постоје два основна режима рада када је у питању релативно GPS позиционирање:

Релативно кинематичко позиционирање са накнадном обрадом (Post Processed Kinematic - PPK). Главна карактеристика метода релативног кинематичког позиционирања са накнадном обрадом је да се подаци прикупљени на терену након завршетка мерења преносе у рачунар, а затим обрађују специјализованим софтверима. Предност ове методе је што није потребна радио веза између пријемника, што поједностављује поступак мерења. Недостатак је у поузданости



Слика 3.2: Релативно кинематичко позиционирање

јер се евентуалне грешке и неправилности уочавају тек приликом обраде, што у неким случајевима захтева понављање мерења.

Релативно кинематичко позиционирање у реалном времену (Real Time Kinematic - RTK). Релативним кинематичким позиционирањем у реалном времену добијају се координате тачака у тренутку опажања. Тренутни резултати се могу добити на основу једне епохе опажања, али због повећања тачности и поузданости позиционирања користе се мерења у више епоха. Овом методом постиже се тачност блиска тачности добијеној статичком методом на основу фазних мерења, а предност RTK је што се подаци добијају у реалном времену тј. непосредно на терену. Стандардна опрема за примену RTK методе подразумева пријемник на базној станици и један или више покретних пријемника. Пријемници могу бити једнофреквентни (L1) или најчешће двофреквентни (L1, L2). Да би се омогућило позиционирање у реалном времену неопходан је радио модем или радио станица са антенном на базној станици и радио антена на покретном пријемнику. Модем прима податке са базног пријемника и преко антене емитује корекције путем радио сигнала које прима покретни пријемник.

### **3.4.2 Мрежни RTK систем**

Последњих неколико деценија постигнут је значајан напредак у позиционирању применом RTK система (Rizos, 2003). Постоје, међутим, ограничења повезана са применом RTK технике са једном базном станицом. Ту је од утицаја растојање између базне станице и ровера јер орбитални, јоносферски и тропосферски утицаји деградирају оствариву тачност како се дужина базне линије повећава. Управо због тих утицаја развијен је концепт Мрежног-RTK система. Он има за циљ да пружи центиметарски ниво позиционе тачности дуж базних линија чија дужина износи неколико десетина километара. Употреба више референтних станица које се простиру на широком географском подручју омогућава емпиријско моделовање грешака мерења зависних од растојања. Тиме се добијају корекције које се испоручују кориснику на терену. Ове корекције омогућавају прецизно решавање фазних неодређености, дуж базних линија (Rizos, 2009).

Обрада података за Мрежно-RTK позиционирање укључује три корака.

Први корак је брзо и поуздано решавање фазних неодређености између свих статичких станица у мрежи (Rizos and Han, 2003). Ово захтева густу мрежу довољну за моделовање грешака са тачношћу која ће омогућити да се њихови утицаји могу занемарити (Rizos, 2003). Потребно је обрадити податке двоструких разлика дуж базних линија дужине од 50 до 100 km, у реалном времену. Како би се омогућило правовремено и правилно решавање фазних неодређености дуж дугачких базних линија, треба користити све релевантне а-приори информације које могу да смање грешке опажања (IGS сателитске ефемериде, јоносферске и тропосферске корекције изведене из претходне обраде мреже, корекције вишеструког одбијања сигнала и корекције за фазни центар антене из претходно спроведене калибрације).

Други корак је одређивање коефицијената корекција модела, када су фазне неодређености фиксиране у оквиру мреже. У мрежном окружењу, јоносферске и орбиталне грешке се морају моделовати на бази сателит-сателит, док се тропосферски утицај може одредити на свакој референтној станици. Како јоносферски утицај показује много већу временску варијацију у односу на недисперзивну тропосферску и орбиталну грешку (често се називају "геометријским" грешкама), потребно га је чешће ажурирати (Zebhauser et al., 2002).

Трећи корак подразумева пренос корекција корисницима, довољне тачности (Rizos, 2003). Мрежни-RTK систем мора бити у стању да управља подацима и обезбеди начин комуникације између различитих референтних станица које прикупљају податке и главних контролних станица (MCS), где се генеришу све корекције. Ове корекције онда треба да се емитују из MCS до корисника.

Главни ограничавајући фактор повезан са RTK системом са једном базном станицом, је удаљеност између базне станице и покретног пријемника због грешака које зависе од растојања, као што је утицај јоносфере, која отежава успешно решавање фазне неодређености. Када се користи RTK техника позиционирања са једном базном станицом, могуће је елиминисати утицај

јоносфере код базних линија мањих од 10 km или мање. Ово је познато као јоносферски фиксни модел. Све док је јоносферски утицај мањи од неколико центиметара, јоносферски фиксни модел са високом стопом успешности релативно брзо постиже решавање фазних неодређености (Teunissen, 2003). Међутим, како дужина базних линија расте, јоносферски утицај постаје декорелисан, чиме се повећава јоносферска грешка и омета прецизно одређивање фазних неодређености у реалном времену. Тада постаје неопходно укључити и те грешке у модел као непознате параметре које треба одредити. Овај модел се назива *ionospheric-float* модел.

У циљу повећања дужине базне линије у RTK апликацијама и постизања тачност као у случају дужина базних линија испод 10 km, опажања покретног пријемника треба да буду коригована за јоносферски утицај, како би се омогућило успешно одређивање фазних неодређености и координата. Мрежни RTK GPS систем нуди средства за пружање ових емпиријских корекција. Да би се правилно решиле фазне неодређености, код једнофреквентног случаја, јоносферски утицај треба да се предвиди са максималним дозвољеним грешкама изведеним из једначине:

$$b_{\text{single}} = \tau [2\lambda_1] \quad (3.24)$$

где је  $b$  дозвољена јоносферска грешка,  $\tau = \frac{40.3}{c^2} 10^{16} \text{TECU}$ ,  $\lambda_1$  је једнака L1 оперативној фреквенцији. Постављањем да је  $b$  једнако половини циклуса, показује да јоносферски утицај треба да буде мањи од четвртине циклуса или  $\lambda_1 = 4.8$  cm за поуздану фазну неодређеност. Међутим, један од главних проблема везаних за одређивање јоносферског утицаја је да изведена мрежна процена јоносферских корекција не може бити довољно прецизна, посебно током поремећених јоносферских услова, и прелази границу од  $\pm 5$ cm (Odijk, 2002).

## 4. GNSS И ДРУГЕ МЕТОДЕ СОНДИРАЊА ЈОНОСФЕРЕ

---

У овом поглављу су описане две различите технике сондирања високе јоносфере, У питању је терестричка техника која подразумева употребу јоносонде и сателитска техника која се базира на примени Navstar GPS система. Посебно је описана техника сондирања ниске јоносфере, односно њеног D региона. Дакле, објашњен је принцип рада јоносонде и коришћење података прикупљених на овај начин. Такође, описано је простирање GPS сигнала кроз јоносферу, односно приказани су геометријски ефекти на јоносферско преламање, и јоносферска грешка GPS сигнала која се апроксимира као збир компонената првог и вишег реда и ефеката савијања сигнала. Описани су Klobuchar и IRI јоносферски модели који се користе за одређивање укупног садржаја електрона –TEC. На крају је представљена дијагностика D региона радио таласима врло ниских фреквенција (енг. very low frequency - VLF) и моделовање густине електрона у овом региону при поремећеним условима јоносфере (појава X-флера).

### 4.1 Терестричке методе за сондирање јоносфере - Примена јоносонде

Техника сондирања јоносфере применом јоносонде подразумева утврђивање висине појединих јоносферских региона. Пренос радио-фреквентног импулса вертикално навише, и мерење времена потребног да се импулс врати назад, једна је од најстаријих али и најважнијих метода истраживања јоносфере. Као средство утврђивања висине различитих слојева јоносфере користи се јоносферска критична фреквенција и принцип преламања таласа у јоносфери.

Вертикално сондирање пружио је највећи део знања у погледу садржаја електрона у Земљиној атмосфери. На тај начин добијени су профили варијације садржаја електрона, како у временском (функција дневне, сезонске и

једанаестогодишње варијације) тако и у просторном смислу (с обзиром на висину и латитуду).

*Јоносонда* је посебан радар за испитивање јоносфере чију су основну технологију изумели 1925. године Gregory Breit и Merle A. Tuve. Даљи развој уређаја је настављен крајем 1920. захваљујући једном броју истакнутих физичара, укључујући Edward Victor Appleton. Данас су у употреби углавном дигиталне јоносонде које емитују радио таласе високе фреквенције у циљу сондирања јоносфере, и омогућавају добијање повратних сигнала из различитих јоносферских слојева у широком опсегу радних фреквенција. Уређаји се користе за емитовање радио таласа од нижих до виших фреквенција како би се измерила виртуелна висина јоносферских региона рачунањем времена путовања рефлектујућег таласа.

Јоносонда се састоји из:

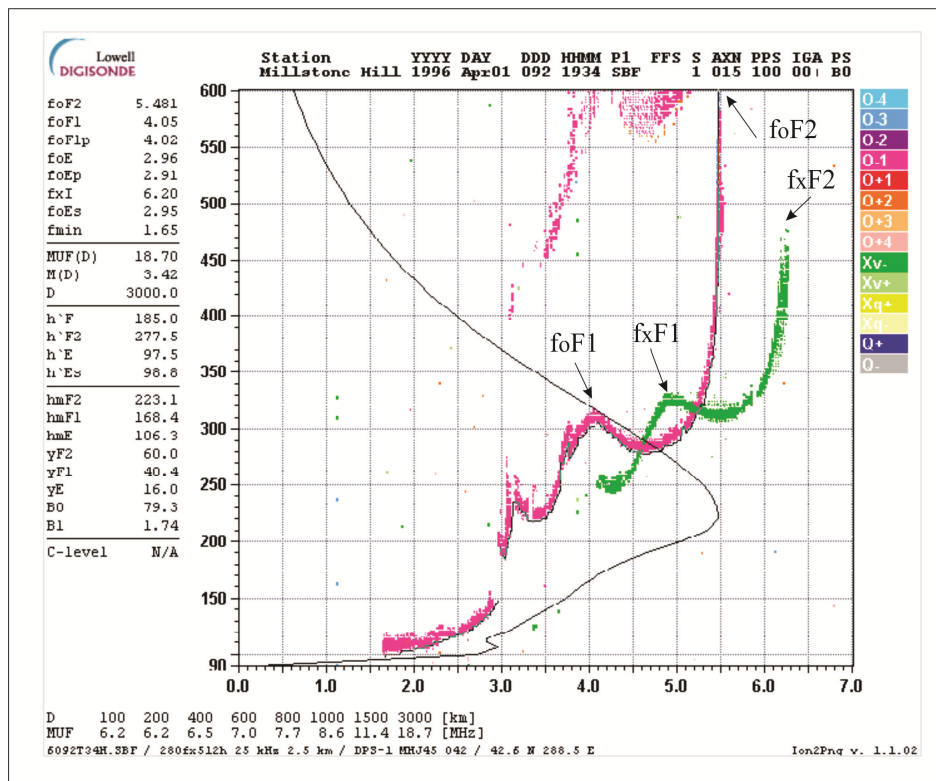
- Предајника високе фреквенције аутоматски подесивог у широком опсегу (типична фреквенцијска покривеност је 0.5–23 MHz или 1–40 MHz, мада су одбојници обично ограничени на око 1.6-12 MHz.),
- Пријемника за праћење који може аутоматски пратити фреквенцију предајника,
- Антене која сигнал преноси вертикално навише и ефикасна је над целим фреквентним опсегом који се користи и
- Кола за дигиталну контролу и анализу података.

Предајник осваја сав или део фреквенцијског опсега, преносећи кратке импулсе. Ови импулси се рефлектују од разних слојева јоносфере, на висинама од 100-600 km, и враћају до пријемника и анализирају од стране контролног система.

Како емитовани радио таласи путују у јоносферу, густина електрона се повећава због чега индекс преламања постаје мањи. Радио талас се рефлектује од јоносферског региона за који је плазма фреквенција једнака фреквенцији таласа. Пошто се јоносфера састоји из различитих региона, сваки регион има сопствену критичну фреквенцију, на којој је талас у стању да прође кроз тај регион (видети

поглавље 2.4.2). Ове фреквенције су познате као  $foE$ ,  $foF1$  и  $foF2$  фреквенције. Како се фреквенција коју емитује јоносонда повећава, временски интервал или повратно време путовања за вертикални упадни радио талас се повећава све док се не достигне критична фреквенција региона. У овој фази, радио талас продире у регион. Пошто се фреквенција опет повећава, повратно време путовања ће се донекле смањити, пошто је радио таласима лакше продрети у претходни слој (Wyllie, 2007). Виртуелна висина у односу на фреквенцију се евидентира путем јонограма (слика 4.1) који се добија из ових података.

Јонограм представља графикон виртуелне висине јоносфере у зависности од фреквенције. Јонограм се често конвертује у профил густине електрона и подаци са јонограма могу да се користе за одређивање промена у Земљиној јоносфери. На слици 4.1 се могу јасно видети две одвојене криве. Када се узме у обзир ефекат Земљиног геомагнетног поља могуће је добити две вредности за индекс преламања. То подразумева да се радио таласи могу простирати различитим брзинама. Ова два различита таласа се зову обични и ванредни таласи и добијају



Слика 4.1: Подаци јоносонде



се узимањем позитивног и негативног знака с обзиром на њихов индекс преламања. Криве са већом критичном фреквенцијом  $f_x F1$  и  $f_x F2$  су ванредни таласи. Појава позната као двострука рефлексација може се посматрати на слици 4.1. Ово се дешава када се радио талас два пута рефлектује од различитих јоносферских региона као резултат рефлексације од тла. Позадинска интерференција је такође идентификована и окарактерисана кривом на дну слике (Garriott and Rishbeth, 1969).

Максимална корисна фреквенција (MUF) за радио таласе емитоване под ниским углом у односу на хоризонт се приближно 3 пута више рефлектује од оне код радио таласа емитованих директно на горе. Дакле, у узорку јонограма приказаном горе, за  $f_x I$  је измерено 6.2 MHz, а за MUF за јоносферску рефлексацију на подручју јоносонде је добијено 18.7 MHz за удаљеност од 3000 km. Скуп података, који представља обичан талас, показује рефлексацију од приближно 3 MHz (E-слој) и 5.5 MHz (F-слој).

## **4.2 Сателитске методе за сондирање јоносфере - Примена Navstar GPS система**

Сателитске методе за сондирање јоносфере су комплементарне са терестричким методама. Терестричке методе су у стању да континуирано мере само са једног места, док је сателит у могућности да покрије читав низ локација на различитим географским ширинама и све локације на свим географским дужинама, око два пута дневно. Стога, терестрички приступ пружа најбољу временску покривеност на одређеној локацији, док сателитски приступ даје најбољу географску покривеност. Сателитске технике омогућавају мерење TЕС до висине сателита, који се може налазити на орбити унутар јоносфере или изнад ње.

### **4.2.1 Простирање GPS сигнала кроз јоносферу**

С обзиром на то да се ова теза бави првенствено утицајем јоносфере на GPS сигнале у овом делу ће бити описане неке особине јоносфере које су од интереса за разумевање тог процеса.

**Индекс преламања** Брзина простирања електромагнетног таласа у вакууму једнака је брзини светлости. Међутим, када се талас простира кроз неку другу средину, услед интеракције са честицама присутним у тој средини његова брзина се мења. Ово је познато као таласна рефракција, а износ преламања се описује средњим специфичним индексом преламања.

Средњи индекс преламања  $n$  се дефинише као однос брзине светлости у вакууму  $c$  и брзине таласа у средини  $v$ :

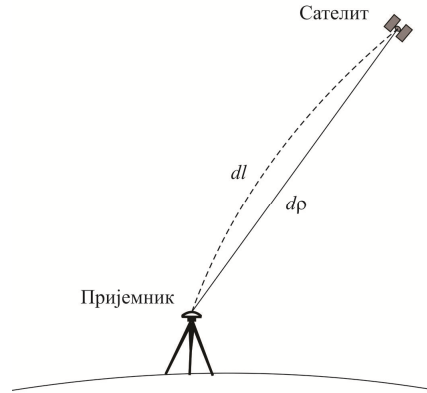
$$n = c/v \quad (4.1)$$

Пошто је индекс преламања однос две брзине, он је бездимензиона величина. У вакууму индекс преламања једнак је 1. Када је индекс преламања мањи од 1 кажемо да талас напредује, а када је већи од 1 да талас касни. Јоносферски индекс преламања није константан. То је зато што је јоносфера нехомогена, анизотропна и дисперзивна средина.

**Нехомогеност јонофере** Када је садржај средине исти у њеним различитим тачкама, средина је позната као хомогена или униформна за тај садржај. Средина је нехомогена када се њен садржај мења у различитим тачкама. Средина може бити хомогена за један садржај и нехомогена за други. Како се густина електрона унутар јонофере разликује на различитим локацијама, јоносфера је нехомогена средина. Као последица тога, јоносферски индекс преламања значајно варира у просторном домену. Промена јоносферског индекса преламања дуж пута простирања сигнала изазива савијање путање. То савијање пут чини дужим од геометријске праве линије  $\rho$  (слика 4.2).

**Ефекти геометријске рефракције** Међу свим могућим путањама које талас може да има у нехомогеној средини, потребан је пут који захтева најкраће време (Memarzadeh, 2009). На слици 4.2, дужина пута између предајника и пријемника  $l$ , се рачуна на следећи начин:

$$l = c \int dt = c \int \frac{dl}{v} = \int n dl = \underbrace{\rho}_{i} + \underbrace{\left( \int n dl - \int n d\rho \right)}_k \quad (4.2)$$



Слика 4.2: Савијање таласа при простирању кроз нехомогену средину

где  $\rho$  означава геометријско растојање између предајника и пријемника. Дужина пута услед преламања састоји се од два ефекта: ефекат простирања, означен као  $l$ , и ефекат савијања, означен као  $k$ . Дакле, јоносферско кашњење између GPS сателита  $s$  и пријемника  $r$  може бити написано као

$$I_r^s = l_r^s + k_r^s \quad (4.3)$$

**Дисперзивност јоносфере** Ако индекс преламања неке средине зависи од фреквенције таласа, за ту средину се каже да је дисперзивна. Да би се описало простирање једног модулисаног електромагнетног таласа кроз дисперзивну средину, треба разликовати фазну брзину, у ознаци  $v_\phi$ , и групну брзину сигнала у ознаци  $v_g$ . Дакле, групни и фазни индекс рефракције се разликују и износе:

$$n_\phi = \frac{c}{v_\phi}, \quad n_g = \frac{c}{v_g} \quad (4.4)$$

при чему је  $v_g \leq v_\phi$ . Однос између брзина  $v_g$  и  $v_\phi$  дат је једначином:

$$v_g = v_\phi + f \frac{\partial v_\phi}{\partial f} \quad (4.5)$$

где је  $f$  фреквенција носећег таласа. Користећи ову једначину, групни и фазни индекси рефракције су повезани на следећи начин

$$n_g = n_\phi + f \frac{\partial n_\phi}{\partial f} \quad (4.6)$$

За електромагнетне таласе у L-опсегу (део електромагнетног спектра у распону од отприлике једног до два GHz), јоносфера је дисперзивна (али тропосфера није). Као што смо већ поменули, групни и фазни индекси рефракције су различити. Пошто је  $v_g \leq v_\phi$ , време кода, означено као  $\tau_{r,j,g}^s$  је веће од одговарајућег времена путовања фазе, означеног као  $\tau_{r,j,\phi}^s$ , где  $j$  представља фреквенцију. Овај феномен се назива фазно кодна дивергенција (Misra and Enge, 2006).

Дакле јоносферско кашњење за GPS фазна и кодна опажања на фреквенцији  $j$ , између сателита  $s$  и пријемника  $r$  пише се као:

$$\begin{aligned} I_{r,j,\phi}^s &= t_{r,j,\phi}^s + k_{r,j}^s \\ I_{r,j,g}^s &= t_{r,j,g}^s + k_{r,j}^s \end{aligned} \quad (4.7)$$

Ефекти савијања за фазна и кодна опажања су исти.

**Анизотропија јоносфере** За средину се каже да је изотропна ако је фазни индекс преламања (или фазна брзина) таласа независан од правца. Пошто је Земљина јоносфера у спрези са геомагнетним пољем, јоносферски индекс преламања зависи од правца простирања таласа у односу на геомагнетно поље ( $\vec{B}$ ). Дакле, јоносфера није изотропни медиј за електромагнетне таласе. Зато су GPS таласи кружно поларизовани. Са линеарном поларизацијом, слободни електрони у јоносфери би ступили у интеракцију са таласом и изазвали његову поларизацију да ротира што је познато као Фарадејева ротација, а то би изазвало флукуације сигнала. Међутим, Фарадејева ротација не утиче или једва утиче на интензитет примљеног сигнала, када су таласи кружно поларизовани (Hall et al., 1996).

Ту је још један ефекат. Под утицајем геомагнетног поља GPS талас је подељен на два паралелна таласна фронта, од којих сваки има супротну (кружну) поларизацију. Један талас, обичан талас, има десну поларизацију, а други, ванредни талас има леву поларизацију. Оба таласа показују малу разлику у брзини простирања, а самим тим и у индексу преламања. Овај ефекат је познат као

двоструко преламање или разлика индекса преламања. Упркос овом двоструком преламању само обичан талас треба размотрити у случају GPS-а, јер ванредни талас садржи мање од 0,35% снаге (за L1) (Bassiri and Hajj, 1993).

**Јоносферски индекс преламања** Фазни индекс преламања за електрично неутралну јоносферу, са униформним магнетним пољем и при занемаривању ефекта позитивних јона на талас, изражава се преко сложене *Appleton-Hartree* (или *Appleton-Lassen*) формуле. Игнорисањем апсорпционих ефектата због судара између електрона, формула гласи (Giraud and Petit, 2012):

$$n_{j,\phi\pm} = \sqrt{1 - \frac{X_j}{1 - \frac{Y_{T,j}^2}{2(1 - X_j)} \pm \sqrt{\frac{Y_{T,j}^4}{4(1 - X_j)^2} + Y_{L,j}^2}}} \quad (4.8)$$

где је  $X_j = f_p^2 / f_j^2$ , а  $Y_{T,j}$  и  $Y_{L,j}$  су попречне односно уздужне компоненте  $Y_j = f_p / f_j$ . Дакле  $Y_{T,j} = Y_j |\sin \theta|$  и  $Y_{L,j} = Y_j |\cos \theta|$ , где је  $\theta$  угао између  $Y_{L,j}$  и  $Y_j$ .

Фреквенција  $f_p$  је фреквенција електронске плазме, која се рачуна као  $f_p = \sqrt{An_e}$ , где је  $A \approx 80.6 \text{ m}^3/\text{s}^2$ , а  $n_e$  је густина електронске плазме у  $\text{m}^{-3}$ . Фреквенција  $f_g$  је позната као електронска жиро-фреквенција, која се рачуна као  $f_g = \omega / 2\pi = (e / 2\pi m_e) B$ , где је  $e = 1.60218 \cdot 10^{-19}$  наелектрисање у кулонима и  $m_e = 9.10939 \cdot 10^{-31}$  је маса електрона у kg.

У *Appleton-Hartree* формули су присутне нехомогене, анизотропне и дисперзивне особине јоносфере. Нехомогеност јоносфере се огледа у слободној густини електрона  $n_e$ , која није константна, али је у функцији места и времена. Дисперзивна јоносфера се може препознати у зависности од фреквенције таласа. Анизотропна јоносфера се изражава у зависности од  $B$ . Двострука рефракција се огледа у знаку  $\pm$ , што значи да се може користити плус или минус знак, у зависности од поларизације таласа ("+" одговара лево кружно поларизованом таласу, а "-" десном кружно поларизованом таласу (обичан талас)). За GPS је само обичан талас од значаја па се за предзнак индекса преламања користи минус.

Користећи нека поједностављења за *Appleton-Hartree* формулу, апроксимација јоносферског фазног индекса преламања GPS сигнала, може се писати као (Hartmann and Leitinger 1984):

$$n_{j,\phi} = 1 - \frac{1}{2} \frac{f_p^2}{f_j^2} - \frac{1}{2} \frac{f_p^2 f_g |\cos \theta|}{f_j^3} - \frac{1}{8} \frac{f_p^4}{f_j^4} \quad (4.9)$$

и користећи једначину 4.6, јоносферски групни индекс преламања гласи

$$n_{j,g} = 1 + \frac{1}{2} \frac{f_p^2}{f_j^2} + \frac{f_p^2 f_g |\cos \theta|}{f_j^3} + \frac{3}{8} \frac{f_p^4}{f_j^4} \quad (4.10)$$

Види се да је фазни индекс преламања увек мањи од 1, док је групни индекс преламања већи од 1. То указује да у јоносфери, фаза таласа напредује, док у исто време његова група касни.

**Јоносферски ефекти првог и вишег реда и ефекти савијања** Заменом јоносферског индекса преламања из једначина 4.10 и 4.9 у једначину 4.2, добијају се фазни и групни ефекти простирања, респективно

$$\begin{aligned} \iota_{j,\phi} &= -\frac{1}{2f_j^2} \int f_p^2 d\rho - \frac{1}{2f_j^3} \int f_p^2 f_g |\cos \theta| d\rho - \frac{1}{8f_j^4} \int f_p^4 d\rho \\ \iota_{j,g} &= \frac{1}{2f_j^2} \int f_p^2 d\rho + \frac{1}{f_j^3} \int f_p^2 f_g |\cos \theta| d\rho + \frac{3}{8f_j^4} \int f_p^4 d\rho \end{aligned} \quad (4.11)$$

Фреквенција електронске плазме и електронска жиро фреквенција нису константне дуж путање и стога остају унутар интеграла. Једначина 4.11 показује да и јоносферска напредна фаза и групно кашњење могу бити проширени у функцији иста три ефекта. Ова три ефекта су позната као јоносферски ефекти кашњења првог, другог и трећег реда, означени као  $\iota_{j,g}^{(1)}$ ,  $\iota_{j,g}^{(2)}$ ,  $\iota_{j,g}^{(3)}$ , респективно.

Заменом  $f_p = \sqrt{An_e}$  и  $f_g = (e/2\pi m_e)B$  у једначину 4.11, добија се

$$\begin{aligned}
\iota_{j,g}^{(1)} &\doteq \frac{1}{2f_j^2} \int f_p^2 d\rho = \frac{A}{2f_j^2} \int n_e d\rho \\
\iota_{j,g}^{(2)} &\doteq \frac{1}{f_j^3} \int f_p^2 f_g |\cos\theta| d\rho = \frac{eA}{f_j^3 2\pi m_e} \int B |\cos\theta| n_e d\rho \\
\iota_{j,g}^{(3)} &\doteq \frac{3}{8f_j^4} \int f_p^4 d\rho = \frac{3A^2}{8f_j^4} \int n_e d\rho
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Кашњења другог и трећег реда често називају јоносферским кашњењем вишег реда. Додавање ефеката савијања сигнала, јоносферско фазно напредовање, означено као  $I_{j,\phi}$ , и јоносферско групно кашњење, означено као  $I_{j,g}$ , може се написати као

$$\begin{aligned}
I_{j,\phi} &= -\iota_{j,g}^{(1)} - \frac{1}{2} \iota_{j,g}^{(2)} - \frac{1}{3} \iota_{j,g}^{(3)} + k_j \\
I_{j,g} &= \iota_{j,g}^{(1)} + \iota_{j,g}^{(2)} + \iota_{j,g}^{(3)} + k_j
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Из ових израза се види да је фазни ефекат првог реда једнак, али супротног знака од групног ефекта првог реда. Фазни ефекти другог и трећег реда су такође супротног знака својим одговарајућим паровима у групама, али немају исте величине. Фазни ефекат другог реда је половина групног ефекта другог реда, док је фазни ефекат трећег реда једна трећина од групног ефекта трећег реда (Memarzadeh, 2009).

#### 4.2.2 Јоносферски Укупни Садржај Електрона- Total Electron Content (TEC)

Јоносферско кашњење првог реда је функција интеграла густине електрона  $\int n_e d\rho$  у једначини 4.12, у јединици запремине дуж путање сигнала између сателита и GPS пријемника. Овај израз је познат као Укупни Садржај Електрона (енг. Total Electron Content - TEC) и представља број електрона са којима се сусрећу електро магнетни таласи путујући кроз јоносферу. Изражава се у *TECU* јединицама где један *TECU* одговара  $10^{16}$  електрона по  $m^2$ . Према томе, кашњење првог реда може се записати као:

$$I_{j,g}^{(1)} = \frac{A}{2f_j^2} \text{TEC} \quad (4.14)$$

где је  $A \approx 80.6 \text{ m}^3/\text{s}^2$ . TEC је веома променљива у времену и у простору, због променљиве густине електрона у јоносфери. Штавише, TEC у великој мери зависи од елевационог угла сателита (геометрија пријемник-сателит). Пошто дужина путање сигнала кроз јоносферу варира са положајем сателита на небу, на нижој висини, дужина пута сигнала постаје дужа и резултира већим TEC.

**Једнослојна апроксимација јоносфере** се врши за потребе једноставног моделирања јоносфере. У том случају јоносфера се посматра као један танак слој који окружује Земљу на фиксној висини. Претпоставља се да су сви слободни електрони у јоносфери концентрисани у овом једном слоју (слика 4.3). Ако се претпостави да нема бочних или хоризонталних нагиба густине електрона, вертикални TEC се може једноставно пресликати у коси TEC (и обрнуто):

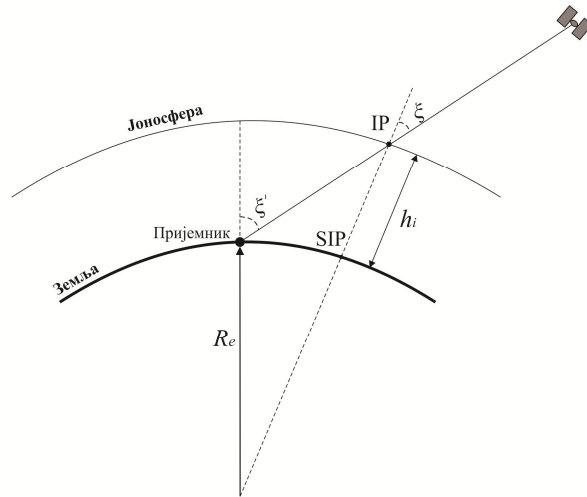
$$\text{TEC} = \frac{1}{\cos \xi} \text{VTEC} \quad (4.15)$$

где је  $\xi$  сателитски зенитни угао у тачки пресека путање са сферном једнослојном јоносфером, а VTEC означава вертикално TEC. Ова тачка се односи на јоносферску тачку продора, у ознаци IP, а члан  $1/\cos \xi$  се назива фактор укошености. Вертикална пројекција IP на терену се назива суб-јоносферском тачком и означава као SIP на слици 4.3. Геометријски, однос између сателитских зенитних углова на локацији пријемника  $\xi'$  и на јоносферској тачки продора  $\xi$  је

$$\sin \xi = \frac{R_e}{R_e + h_i} \sin \xi' \quad (4.16)$$

где  $h_i$  представља висину једнослојне јоносфере. Како ова висина није тачно позната, узима се обично да износи 350 km. Косинусна функција пресликавања зависи од висине једнослојне јоносфере. Само код великих зенитних углова (око  $\xi > 70^\circ$ ) функција пресликавања је осетљива на  $h_i$  и TEC може да достигне највише три пута вредност VTEC (Van der Marel, 1993). Такође, за велике сателитске зенитне углове суб-јоносферска тачка може бити далеко од локације пријемника





Слика 4.3: Једнослојна апроксимација јионосфере

неколико хиљада километара па коришћење једноставне косинусне функције пресликавања за конвертовање косог ТЕС у вертикални ТЕС, може довести до значајних грешака (Nava et al., 2007).

ТЕС вредности могу да варирају од 1 до неколико стотина *TECU* дуж путање сигнала у зависности од елевационог угла, времена и простора. У ствари, варијације ТЕС у времену и простору се јављају због временских и просторних варијација густине електрона у јионосфери. За проучавање дневног, сезонског и соларног циклуса ТЕС, уобичајено је користити једнослојну апроксимацију јионосфере и изражавати коси ТЕС као еквивалент вертикалном ТЕС употребом једначине 4.15. Вертикални садржај електрона (VTEC) може лакше да се упореди или моделира од косог ТЕС на различитим елевационим угловима.

Из једначине 4.12 коришћењем једнослојне апроксимације јионосфере могу се извести изрази за јионоферско групно кашњење другог и трећег реда и ефекат савијања ( Memarzadeh, 2009). Међутим, показало се да док ефекат првог реда чак и на фреквенцији L1 достиже неколико десетина метара, ефекти савијања и ефекти другог реда не могу да пређу неколико центиметра, а ефекат трећег реда је на нивоу од неколико милиметра. Осим тога, јионоферско кашњење првог реда је од већег значаја за релативно GPS позиционирање него вишег реда и ефекат савијања па се ефекти вишег реда могу занемарити у случају позиционирања са пријемницима на међусобним раздаљинама до 400 km (Odijk, 2002). Пошто је

јоносферско кашњење првог реда обрнуто пропорционално квадрату фреквенције сигнала, могуће је измерити јоносферске ефекте првог реда помоћу GPS опажања на различитим фреквенцијама и према томе одредити TEC тј. VTEC из GPS података.

#### **4.2.3 Јоносферски ефекти на GPS релативно позиционирање**

Када је у питању релативно GPS позиционирање, од примарног интереса су промене у јоносфери тј. разлика у кашњењу сигнала која се јавља на оба краја базне линије (Georgiadou and Kleusberg, 1988a). Двофреквентни GPS пријемници могу искористити дисперзиону природу јоносфере и формирањем линеарних комбинација (види одељак 3.3.3) од оригиналних L1 и L2 фазних опажања, уклонити последице јоносферског кашњења дуж базне линије. Овај метод обезбеђује најефикасније средство елиминисања јоносферског утицаја, посебно при поремећеним јоносферским условима. Једнофреквентна опажања, дуж кратких базних линија, могу да обезбеде добре резултате када се користе локални јоносферски модели. Док је тачност једнофреквентних пријемника упоредива са тачношћу двофреквентних пријемника на базним линијама до 10 km (Henson and Collier, 1986), на већим раздаљинама јоносферски ефекат на једном крају базне линије може бити значајно другачији у односу на други крај. Стога, једнофреквентни пријемници, који користе осам параметара емитованих за јоносферски модел, нису погодни за геодетске апликације дуж дугих базних линија, где се захтева висока тачност (Kleusberg, 1986; Lachapelle and Cannon, 1986).

Промена у јоносферском кашњењу између две GPS станице, користећи једнофреквентна опажања, има ефекат скраћивања вектора базне линије. Износ скраћивања базне линије условљен је разликом у геометрији сателита уз промену TEC изнад области опажања (Janes N., 1991). Различита геометрија сателита значи да су сигнали примљени на две станице прошли кроз јоносферу под мало другачијим вертикалним угловима, па је TEC дуж сваке путање другачије, па чак и ако је вертикални јоносферски профил исти на обе станице. Ово скраћивање

може се у релативном смислу израчунати помоћу следеће формуле (Beutler et al., 1987):

$$\frac{\Delta I_{ion}}{l} = -\frac{C_x}{2} \cdot \frac{TEC_{AV}}{R \cos z_{max}} \cdot \frac{1}{f^2} \quad (4.17)$$

где је:

$\Delta I_{ion}$  - грешка растојања изазвана релативном јоносфером,

$l$  - дужина базног вектора,

$\frac{C_x}{2}$  - фактор пропорционалности  $\approx 40.3 \cdot 10^{16} ms^{-2} TECU^{-1}$ ,

$TEC_{AV}$  - средња вредност вертикалног ТЕС изнад базне линије,

$R$  - средњи Земљин полупречник,

$z_{max}$  - је максимални сателитски зенитни угао (користи се најнижи сателитски елевациони угао) и

$f$  - фреквенција GPS сигнала.

При умереним и хомогеним јоносферским условима, приликом обраде података малих мрежних GPS базних линија, јоносферски ТЕС модели изведени из једног или више двофреквентних GPS пријемника који се налазе у близини, могу уклонити или знатно смањити ефекат јоносфере. Овај приступ често може дати боље резултате од двофреквентних података дуж кратких базних линија (Rocken et al., 2000).

#### 4.2.4 Јоносферски модели

Због компликоване природе јоносфере, било је бројних приступа за моделовање јоносфере. У настојању да се постигне једноставност, неки од модела су ограничени на одређене висине или области географских ширина, док су други били ограничени на одређене јоносферске параметре, као што су  $NmF2$ ,  $M(3000)F2$  и  $VTEC$ . Ови модели описују карактеристичне јоносферске параметре и њихове варијације у зависности од времена, сезоне, соларних циклуса и геомагнетне активности која је представљена  $Kp$  -индексом или  $Ap$ -индексом. За

GPS кориснике су на располагању бројни јоносферски модели за корекцију јоносферског кашњења сигнала, тамо где двофреквентни пријемници нису доступни. Они се користе и за решавање фазних неодређености код прецизног геодетског позиционирања (Memarzadeh, 2009). Различите врсте јоносферских модела могу се категоризовати на следећи начин:

- **Емпиријски модели** су базирани на јоносферским мерењима. По правилу, подаци се прикупљају током дужег временског периода, а затим моделују једноставним аналитичким и емпиријским функцијама. Klobuchar модел је једноставан модел који даје вертикално јоносферско кашњење на датом месту и тренутку времена, за GPS једнофреквентне кориснике у реалном времену. Други пример је NeQuick модел који је предложен за коришћење као модел за јоносферске корекције у будућем европском Галилео систему позиционирања. International Reference Ionosphere (IRI) је емпиријски стандардни модел јоносфере, који за дату локацију, време и датум, описује густину, температуру и садржај електрона, као и температуру и састав јона на висини од око 50 km до око 2000 km.
- **Нумеричке мапе**, кроз мрежу, на глобалном и регионалном нивоу, пружају вредности једног параметра јоносфере. Као пример, могу се навести Global Ionospheric Maps (GIMs) произведене од стране CODE (Centre of Orbit Determination in Europe) (Schaer, 1999).
- **Аналитички модели** су базирани на ортогоналној функцији уклапања са излазним подацима добијеним из нумеричких модела. Као пример, карте  $foF2$  и  $M(3000)F2$  параметара су представљене преко CCIR (Comite Consultatif International des Radiocommunications) карата, коришћењем ортонормалних и сферних Legendre функција.
- **Физички модели** су развијени на основу типичног решења једначине континуитета или импулсне и енергетске једначине за електроне и јоне. Решења једначина дају на пример густину електрона у функцији висине или у функцији дужине линија геомагнетног поља (видети Memarzadeh Y, 2009).

Не постоји модел који је савршен, а његов избор зависи од врсте информација које су потребне кориснику, доступних рачунарских средстава и врсте јоносферских улазних параметара који су на располагању.

Модели описани у наставку су Клобучар (Klobuchar) и IRI. Они припадају глобалним емпиријским јоносферским моделима и одређују апсолутно јоносферско кашњење са различитим степеном тачности који зависи од великог броја различитих фактора.

### **Klobuchar модел**

Клобучар (Klobuchar, 1986) модел је један од најчешће коришћених модела због своје једноставности. Састоји се из једноставне косинусне функције чија половина представља дневне вертикалне TЕС вредности, тако да представља средње дневно понашање јоносфере, док су ноћне вредности TЕС константне и износе 5 наносекунди (или 1.5 метара). Његов дневни максимум је у 14:00 часова по локалном времену у јоносферској тачки продора. Период и амплитуда модела представљени су полиномом трећег степена по локалном времену и на геомагнетној ширини јоносферске тачке продора. Вертикално јоносферско кашњење се рачуна на следећи начин:

$$I_{v,r}^s(t_i) = \begin{cases} c[5 \cdot 10^{-9} + (\sum_{l=0}^3 \alpha_l [\varphi_{m,r}^s(t_i)' / \pi]) \cos x_r^s(t_i)], & |x_r^s(t_i)| < \frac{\pi}{2} \\ c \cdot 5 \cdot 10^{-9} \approx 1.5m, & |x_r^s(t_i)| > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4.18)$$

$$\text{са} \quad x_r^s(t_i) = \frac{2\pi(t_r^s(i)' - 14 \cdot 60^2)}{\sum_{l=0}^3 \beta_l [\varphi_{m,r}^s(i)' / \pi]} \quad (4.19)$$

и где је:

$I_{v,r}^s(t_i)$	вертикално јоносферско кашњење [m]
c	брзина светлости [m/s]
$\varphi_{m,r}^s(t_i)'$	геомагнетна ширина јоносферске тачке продора

$t_r^s(t_i)$	локално време у јоносферској тачки продора [s]
$\alpha_l(l = 0, \dots, 3)$	Klobuchar коефицијенти за амплитуду
$\beta_l(l = 0, \dots, 3)$	Klobuchar коефицијенти за период

Локално време тачке јоносферског продора се рачуна из светског времена (UT) као:

$$t_r^s(t_i) = t_{UT} + \frac{24 \cdot 60^2}{2\pi} \lambda_r^s(t_i) \quad (4.20)$$

где је  $t_{UT}$  светско време у секундама, а  $\lambda_r^s(t_i)$  лонгитуда јоносферске тачке продора. Осам Klobuchar коефицијената се преносе GPS навигационом поруком и ажурирају свакодневно. За конвертовање вертикалног кашњења у косо кашњење, користи се следећа редуциона функција (SIS-ICD, 2006):

$$F(e) = 1 + 16 \times (0.53 - e)^3 \quad (4.21)$$

где је  $e$  елевациони угао сателита. Модел представља идеалну глатку јоносферу, па значајније осцилације није могуће правилно моделирати. Тачност модела је 50 ~ 60% од укупног ефекта (Klobuchar, 1986) и при великим јоносферским активностима на ниским висинама, распон грешке може бити веома велики, и до 50 метара.

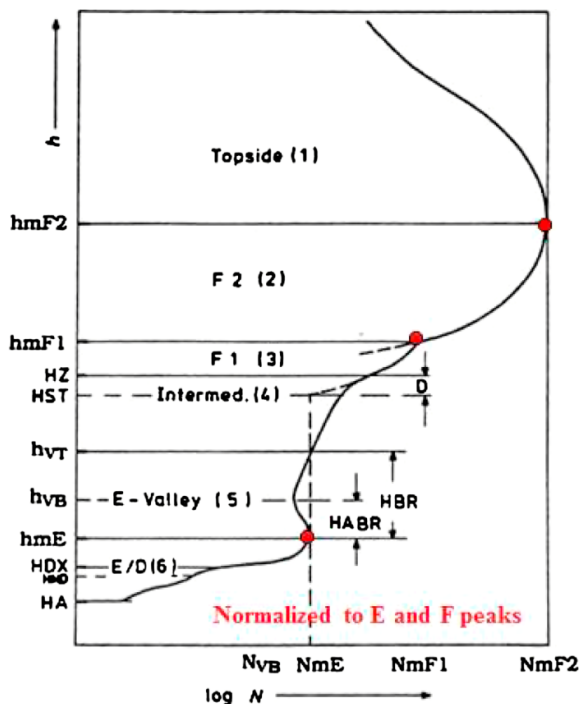
### **International Reference Ionosphere (IRI) модел**

International Reference Ionosphere (IRI) је међународни пројекат под покровитељством Одбора за истраживање свемира (енг. Committee on Space Research - COSPAR) и Међународне уније радио наука (енг. International Union of Radio Science - URSI) (Bilitza, 2001). Од 1978. године (Rawer et al., 1978) када је модел реализован, изашло је неколико унапређених верзија. Крајем 1960-их година, формирана је радна група са циљем успостављања глобалног емпиријског модела, на основу свих расположивих извора података у то време (Bilitza, 1992).

Сваке године, на годишњим састанцима IRI радне групе разматрају се недостаци модела, пореде се тренутне перформансе IRI модела у односу на друге моделе и предлажу се побољшања.

Постоји велики број извештаја, у којима се могу наћи опширнији описи модела (Rawer et al., 1978; Rawer et al., 1981; Bilitza et al., 1990). Ови извештаји садрже базе података, алгоритме, формуле и компјутерске програме. Модел објављен у јуну 2001. године, има велики број значајних побољшања и допуна у односу на претходне верзије (Bilitza, 2001). Такође модели из 2007. и 2012. године имају значајна побољшања. Њихови Фортран изворни кодови су доступни на IRI интернет страници (<http://irimodel.org/>), заједно са описом модела.

IRI се састоји од глобалних модела за D, E, F1 и F2 регионе јоносфере (види одељак 2.4.2). Потпун профил густине електрона се добија коришћењем математичке функције и спајањем алгоритма за различите регионе. На Слици 4.4 се може видети конструкција профила густине електрона (Bilitza et al., 1990). Границе између одељака у профилу су обележене са неколико карактеристичних тачака укључујући врхове F2, F1 и E региона.



Слика 4.4: IRI профил густине електрона (Bilitza et al., 2014)

Уз одређене модификације, CCIR модели се користе за рачунање густине врхова F2, F1 и E региона. CCIR сетови коефицијената се препоручују за континенталне области, док се за подручје океана препоручује URSI-88 модел. Висина F2 врха,  $h_{\max, F2}$ , се рачуна из M(3000)F2 користећи емпиријску формулу (Bilitza and Eyfrig, 1979):

$$h_{\max, F2} = \frac{1490}{M(3000)F2 + DM} - 176 \quad (4.22)$$

где се фактор корекције рачуна као:

$$DM = \frac{f_1 \cdot f_2}{\left( \frac{f_0 F2}{f_0 E - f_3} \right) + f_4} \quad (4.23)$$

са соларном функцијом активности:

$$f_1 = 0.00232R_{12} + 0.222 \quad (4.24)$$

$$f_2 = \frac{1 - R_{12}}{150 \exp\left(-\left(\frac{\psi}{40}\right)^2\right)} \quad (4.25)$$

$$f_3 = 1.2 - 0.0116 \exp\left(\frac{R_{12}}{41.84}\right) \quad (4.26)$$

$$f_4 = \frac{0.096(R_{12} - 25)}{150} \quad (4.27)$$

где је  $R_{12}$  је средњи годишњи соларни број сунчевих пега, а  $\psi$  је магнетна *dip* латитуда.

IRI је заснован на два различита координатна система. Геодетске координате се користе за описивање малих висина и магнетног система на већим висинама. Ово је због јаке везе са неутралним гасом (висока фреквенција судара) у доњој јоносфери и спајањем са линијама магнетног поља у средњој и горњој јоносфери. CCIR  $f_0F2$  модел је модификован да буде заснован на магнетној латитуди, уместо



да има географску оријентацију, а F1 слој је ограничен само на не зимске месеце. Максимална густина електрона у E региону је описана комбинацијом дневних SSIR коефицијената модела, а ноћни модел је заснован на некохерентним радарским мерењима (Rawer and Bilitza, 1990). IRI препоручује константну висину од 110 km за врх густине E региона. Ова вредност је потврђена анализом у односу на некохерентна радарска мерења (Pandey et al., 2000) и на податке јоносонде (Mosert et al., 2000).

Доњи F2 профил, је описан параметром дебљине  $B_0$  и облика  $B_1$  (Ramakrishnan and Rawer, 1972):

$$\frac{n(h)}{n_{\max, F2}} = \frac{\exp(-\chi^{B_1})}{\cosh(\chi)} \quad (4.28)$$

где је

$$\chi = \frac{h_{\max, F2} - h}{B_0} \quad (4.29)$$

Горњи F2 профил је аналитички приказ *Bent* (Bent et al., 1975; Llewellyn and Bent, 1973) модела, заснован на Epstein функцијама. Параметри који се користе за карактеризацију овог региона су: F2 максимална плазма фреквенција, латитуда и вредности месечног соларног флуksа 10.7 cm. IRI модел такође користи ове варијабле да опише варијације висине у горњем слоју, који су изведени из Bent модела (Bilitza et al., 1990). Bent модел пружа графички приказ параметара профила у односу на соларну активност за различите опсеге  $f_oF2$  вредности и различите латитудиналне секторе. Примећено је да Bent модел приказује неправилне активности и дисконтинуитет на границама класе. Да би се то избегло, IRI модел примењује аналитичке функције које користе претходно наведене варијабле. Овај начин дефинисања параметара даје бољи опис густине електрона. IRI модел обезбеђује добру процену TЕС на средњим и већим географским ширинама (McNamara and Wilkinson, 1983; McNamara, 1984; McNamara, 1985), али у екваторијалном региону резултати су лошији. Током високе соларне активности, у екваторијалном региону, добијају се процене TЕС готово за фактор 2 испод стварних мерења. У покушају да се побољша тренутни IRI горњи модел користи се велика база података за густину електрона горњег

слоја добијена од Alouette и ISIS сателита током периода од 1965. до 1980. године. Ови подаци покривају дужи период соларне активности од оригиналног Vent модела.

### **4.3 Сондирање D региона јонофере**

За посматрање ниске јонофере најчешће се примењују технике које се заснивају на ракетним мерењима и мерењима са Земље. Ракетна мерења могу бити базирана на простирању радио таласа између интрумената смештених у ракетама и на Земљи и директним мерењима Langmuir-овим сондама. Мерења са Земље се заснивају на посматрањима електромагнетних таласа. Обично су у питању некохерентно расејани и радио сигнали емитовани предајницима и регистровани удаљеним пријемницима након рефлексије од доњих слојева јонофере (Nina, 2014).

Дијагностика јоноферског D региона у овој дисертацији је заснована на простирању радио сигнала врло ниских фреквенција од 3 kHz до 30 kHz (VLF од енг. very low frequency).

#### **4.3.1 Дијагностика D региона радио таласима врло ниских фреквенција (енг. very low frequency - VLF)**

VLF сигнали из предајника се емитују просторно и у зависности од угла емитовања разликујемо површинске и небеске VLF таласе (после рефлексије на висинама ниске јонофере се враћају на површину Земље од које се поново рефлектују).

На простирање сигнала највише утичу варијације састава и стања плазме у ниској јонофери, па тако промене пре свега концентрације електрона, мењају проводност јонофере и утичу на слабљење и рефлексивност (кофицијент и висину рефлексије) VLF сигнала. На тај начин мења се интензитет и геометрија простирања таласа, па се јављају временске варијације амплитуде и фазе сигнала регистрованих VLF пријемницима што омогућава примену ове методе у

дијагностичке сврхе. Поређењем регистрованих промена са варијацијама које се добијају моделирањем јоносфере нумеричким моделима за симулацију простирања таласа, могуће је моделирати ниску јоносферу (Nina, 2014).

Плазма D региона јоносфере је генерално слабо јонизована. Међутим услед периодичних промена (дневне и сезонске промене и промене током Сунчевог циклуса) и неперидичних утицаја, процентуални удео честица које сачињавају плазму варира. На тај начин се мења брзина јонизације, температура и локални састав плазме што утиче на динамику хемијских процеса у овој области. Поред тога варијације зависе и од промене висине и географске локације (географске дужине и ширине) посматране области. Сви ови утицаји могу изазвати разлике вредности и од неколико редова величине.

Као што је већ објашњено, у циљу истраживања D региона јоносфере могуће је анализирати карактеристике VLF сигнала (амплитуду и фазу), забележене на VLF пријемницима. Широм света налазе се, многобројни предајници VLF сигнала, као и многобројни VLF пријемници повезани у неколико међународних мрежа. То значајно утиче на широку доступност података. На Институту за физику у Београду се од 2004. налази AbsPAL (енг. Absolute Phase and Amplitude Logger), а од 2008. године и AWESOME (енг. Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation Modeling and Education) VLF пријемни систем чији је детаљан опис дат у Nina, 2014. Изучавање ниске јоносфере овом методом има две врло битне карактеристике. Једна карактеристика је да је емитовање и примање сигнала континуирано у времену. То омогућава праћење и непредвидивих и краткотрајних утицаја различитих појава на овај део јоносфере. Друга карактеристика је релативно добра просторна покривеност и бројност предајника и пријемника па је могуће регистровати локалне поремећаје и вршити поређења утицаја јачих пертурбација у различитим деловима посматране атмосферске области.

За моделовање простирања VLF сигнала у овој дисертацији коришћен је LWPC (енг. Long-Wave Propagation Capability) модел. Овај модел се састоји из четири повезана програма који се односе на модел простирања дугих таласа (LongWave Propagation Model - LWPM):

- опис граничних карактеристика таласовода Земља-јоносфера (модел простирања дугих таласа),
- географски модел (описивање тј. апроксимација граница таласовода-површине Земље и јоносфере),
- моделирање атмосферског шума (коришћен NTIA - National Telecommunications and Information Administration модел (CCIR, 1986)) и
- програма за цртање.

Као што је већ споменуто, плазма D региона не представља изолован систем. Она је под сталним утицајем појава из свемира и других делова атмосфере, као и процеса који се дешавају у литосфери. Према локацији одакле долазе ове појаве се могу поделити на оне са изворима у свемиру са посебним освртом на Сунчево зрачење (доминантно у мирним условима) и на оне који долазе из других делова атмосфере.

Најзначајнији утицај на D регион, генерално, имају процеси везани за Сунчево зрачење. У питању су варијације у самом зрачењу као и промене његовог утицаја на локални простор настале пре свега услед ротације и револуције Земље. Саме варијације могу имати, с једне стране, периодичн карактер узрокован Сунчевим 11-годишњим циклусом, променом годишњих доба и дневним променама и, с друге стране, непериодичан, пролазан карактер узрокован наглим појачањем електромагнетног (флерови) и честичног (избацивање короналне масе) зрачења (Nina, 2014). С обзиром на то да је у овој тези посматран утицај сунчевог X-флера на електромагнетни сигнал, у наставку ће укратко бити описана њихова појава.

**Сунчеви флерови** се дефинишу као изненадне, брзе и интензивне варијације у осветљености. Настају ослобађањем магнетне енергије у Сунчевој атмосфери. Емитовано зрачење обухвата радио таласе, оптичку емисију и зраке у UV, X и  $\gamma$  области. Интензивирање јонизационих процеса у D региону је последица дејства пре свега линија емитованих током флерова у области X-зрака. Они су последица закочног зрачења и мноштва линија вишеструко јонизованих тешких јона у плазми Сунчеве короне. Класификација ових флерова се даје на основу интегралног флукса на таласним дужинама између 0.1 и 0.8 nm. Интегрални

флукс се региструје GOES сателитом и класификује се у неколико редова према пику флукса:

- А класа - мање од  $10^{-7} \text{ W/m}^2$  у пику,
- В класа - од  $10^{-7}$  до  $10^{-6} \text{ W/m}^2$  у пику,
- С класа - између  $10^{-6}$  и  $10^{-5} \text{ W/m}^2$  у пику,
- М класа - од  $10^{-5}$  до  $10^{-4} \text{ W/m}^2$  у пику,
- Х класа - веће од  $10^{-4} \text{ W/m}^2$  у пику.

X-флорови велике јачине могу изазвати значајне проблеме у телекомуникацијама и узроковати дуготрајније појачање зрачења у трајању неколико сати. Истраживање утицаја X-флорова на плазму јоносферског D региона је тема многобројних студија (нпр. McRae and Thomson, 2004; Kolarski et al., 2011; Nina et al., 2011; Nina and Čadež, 2014). Нагло појачање интензитета  $Ly_{\alpha}$  линије (121.6 nm) током флера настаје у области горње хромосфере. Анализе података добијених посматрањем D региона током симултаног појачања ове линије са појачањем X-зрачења (Nina et al., 2011; Raulin et al., 2013) показују да оно нема значајан утицај у поремећају нискојоносферске плазме.

#### 4.3.2 Моделовање концентрације електрона током појаве X-флера

Основе процедуре за одређивање електронске концентрације у неком тренутку током флера на одређеној висини дате су у (Grubor et al., 2008) и заснивају се на упоређивању експериментално забележених промена амплитуде  $A_{exp}$  и фазе  $P_{exp}$  у датом тренутку у односу на релевантне вредности током непоремећеног периода,  $A_{exp0}$  и  $P_{exp0}$ , са одговарајућим променама које предвиђа LWPC модел за симулацију простирања VLF таласа,  $\Delta A_{LWPC}$  и  $\Delta P_{LWPC}$ , респективно:

$$\begin{aligned}\Delta A_{LWPC} &= \Delta A_{exp} \\ \Delta P_{LWPC} &= \Delta P_{exp}\end{aligned}\tag{4.30}$$

где је  $\Delta A_{exp} = A_{exp} - A_{exp0}$ ,  $\Delta P_{exp} = P_{exp} - P_{exp0}$ ,  $\Delta A_{LWPC} = A_{LWPC} - A_{LWPC0}$ ,  $\Delta P_{LWPC} = P_{LWPC} - P_{LWPC0}$

Вредности  $A_{exp0}$  и  $P_{exp0}$  се узимају јединствене за одређивање промена у сваком тренутку током флером изазваних варијација сигналних карактеристика и представљају забележене вредности у неком тренутку унутар временског периода непоремећене јоносфере. Симулиране вредности амплитуде и фазе се добијају моделирањем јоносфере варијацијама независних параметара "оштрине"  $\beta$  и висине рефлексије VLF сигнала  $H'$  који карактеришу Wait-ов модел јоносфере (Wait and Spies, 1964). На овом месту треба нагласити да су за параметре  $\beta$  и  $H'$ , релевантне за мирну јоносферу узете вредности  $0.3 \text{ km}^{-1}$  и  $74 \text{ km}$  (Nina, 2014). То су апроксимативне вредности коришћене као базичне у LWPC моделу и у многим студијама укључујући и Grubor et al. (2008). Одређиване су промене амплитуда и фаза у зависности од свих очекиваних вредности параметара  $\beta$  и  $H'$  и примењена је процедура за одређивање комбинације ових параметара која даје најбоље слагање симулираних и регистрованих промена сигнала (Nina, 2014). На тај начин омогућено је брзо и аутоматско праћење еволуције електронске густине у D региону током целог флера.

Применом описаног поступка на вредности током флера са произвољно изабраном резолуцијом добијају се временске зависности  $\beta(t)$  и  $H'(t)$  током реакције плазме D региона на X-флер, одакле се помоћу формуле (Thomson, 1993):

$$N_e(h, t) = 1.43 \cdot 10^{13} e^{-\beta(t)H'(t)} e^{(\beta(t)-0.15)h} \quad (4.31)$$

добија временска еволуција електронске концентрације на висинама  $h$  унутар D региона. У овом изразу параметар  $\beta$  се уноси у јединицама  $\text{km}^{-1}$ , параметар  $H'$  и висина  $h$  у  $\text{km}$ , а концентрација електрона се добија у  $\text{m}^{-3}$ . Вредности које даје ова теорија се добро слажу са ракетно измереним вредностима и то пре свега на висинама блиским висини рефлексије  $H'$ .

На основу вредности  $N(t, h)$  може се добити и промена електронске концентрације у времену  $dN(h, t)/dt$ . При томе је неопходно фитовати добијене вредности  $N(t, h)$  са глатком кривом. На тај начин се, од вредности које неправилно одступају од фитоване криве и дају врло хаотичан извод по времену, добија глобална тенденција електронске концентрације из које се одређује временски извод

применљив у прорачунима. Овде треба напоменути да се уместо фитовања вредности  $N(t, h)$  потпуно равноправно може извршити фитовање  $\beta(t)$  и  $H'(t)$  након чега се применом једначине 4.31 добија иста крива као у првој варијанти.

Описани поступак за добијање концентрације електрона у D региону током трајања X-флера је примењен у поглављу 6.4 ове дисертације.

## 5. АНАЛИЗА ВРЕМЕНСКИХ СЕРИЈА

---

Помоћу временских серија прате се појаве које се током времена више или мање мењају и оне представљају низове података посматране појаве у сукцесивним временским интервалима. Предвиђање временских серија (енг. time series forecasting) је употреба модела за предвиђање будућих вредности заснованих на претходно посматраним вредностима и нашла је широку употребу у различитим областима. У овом поглављу дат је опис временских серија и метода за њихову анализу и предвиђање које су коришћене у овој дисертацији за моделовање јоносферског кашњења. Описана је техника линеарне регресије и примена неуронских мрежа које спадају у методе машинског учења.

### 5.1 Дефиниција и врсте временских серија

Анализа временских серија представља једну од статистичких дисциплина и њен основни циљ је проналажење модела којим ће се описати законитости у понашању посматраног динамичког система и предвиђање његовог будућег стања на основу познатих стања у садашњости и прошлости. Данас постоје различити теоријски приступи анализи временских серија. Подстицај за њихов развој били су реални проблеми везани за анализу емпиријских података, а примена може бити у било ком домену примењене науке и инжењерства који укључује временска мерења.

Временска серија је уређени низ опажања  $x_t$ , где се уређивање врши с обзиром на време у једнаким временским интервалима:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_t\}, \text{ где је } t > 0 \quad (5.1)$$



Предвиђање временских серија је употреба математичког модела, за предвиђање будућих вредности на основу претходно опажаних вредности. Претпоставља се да је вредност временске серије у тренутку  $t$  реализација случајне променљиве па је временска серија реализација фамилије случајних променљивих која се зове стохастички процес.

Приликом усвајања стохастичког гледишта, посматрана временска серија се схвата као низ реализација стохастичког процеса, односно низа општезависних случајних променљивих. У овом контексту израз "тренд" је математички дефинисан као не-случајна функција:

$$\mu(t) = E[X(t)], \quad (5.2)$$

где је  $E[ \ ]$  оператор очекиване вредности.

У анализи временских серија од интереса је посебна класа стохастичких процеса, а то су линеари стационарни процеси.

**Класификација временских серија** Временске серије можемо класификовати коришћењем различитих критеријума, па разликујемо (Kovacic, 1995):

- *непрекидне* (опажања можемо регистровати у ма ком временском тренутку) и *прекидне* (опажања бележимо у истим временским интервалима дневно, месечно, квартално или годишње)
- *стационарне* (ниво серије се не мења се током времена) и *нестационарне* (ниво серије повећава се током времена)
- *цикличне* (период понављања сличног тока серије дужи од годину дана) и *сезонске* (осцилације се понављају у периодима до годину дана, месечно, квартално или полугодишње) и
- према промени *структуре* серије могу бити *степенасте*, у облику *подигнуте рампе* и са једним *нестандардним опажањем*.

## 5.2 Циљеви и приступи

Циљ анализе временских серија је заправо описивање изучаване појаве и разлога зашто и како је она настала, а затим предвиђање њеног даљег кретања. У ту сврху развијени су различити модели за анализу временских серија.

Главне етапе код анализе временских серија су: *опис, објашњење, прогнозирање и контрола.*

Основна подела различитих метода анализе временских серија везана је за домен анализе па разликујемо методе анализе временских серија код којих се анализа обавља у:

- *временском домену* (заснована је на посматрању опажања временске серије као функције времена) и у
- *фреквентном домену* (опажања временске серије приказана као функције фреквенција).

## 5.3 Методе

Како је анализа временских серија предмет изучавања различитих научних дисциплина, тако су и методе које се примењују у анализи временских серија многобројне и немогуће је дати њихов свеобухватан приказ. Према томе, овде ће бити описане две методе које су коришћене у моделирању у поглављу 6.5 ове тезе. У питању су Линеарна регресија и Вештачке неуронске мреже (енг. Artificial Neural Networks - ANN) које садрже читав спектар метода анализе података временских серија.

### 5.3.1 Линеарна регресија

У статистици, линеарна регресија се односи на моделовање односа између једне или више варијабли означене са  $Y$ , и једне или више варијабли означене са  $X$ , тако да је модел линеарно зависан од непознатих параметара срачунатих из

података. Најчешће се линеарна регресија односи на модел у којем је условна средња вредност од  $Y$ , афина функција од  $X$  ( $X$  је дата вредност).

Много ређе, линеарна регресија се може односити на модел у којем се медијана, или неки други квантил условне расподеле  $Y$ , за дато  $X$ , изражава као линеарна функција од  $X$ . Као и сви други облици регресијске анализе, линеарна регресија се фокусира на расподелу условне вероватноће  $Y$  за дато  $X$ .

Линеарна регресија има много практичних примена. Већина апликација линеарне регресије спада у једну од следеће две широке категорије:

- Ако је циљ предвиђање или прогноза, линеарна регресија се може користити за подешавање предиктивног модела према посматраном скупу података  $Y$  и  $X$ . Након развоја оваквог модела, ако је дата вредност за  $X$  без припадајуће вредности  $Y$ , подешени модел се може користити за предвиђање вредности  $Y$ .
- Ако имамо варијаблу  $Y$  и већи број варијабли  $X_1, \dots, X_p$  које могу бити повезане са  $Y$ , можемо користити линеарну регресијску анализу за квантификовање јачине релације између  $Y$  и  $X_j$ , за процену који је  $X_j$  уопште везан за  $Y$ , те да би идентификовали који подскупови од  $X_j$  садрже редундантне информације о  $Y$ , тако да, кад је један од њих познат, остали више не дају корисне информације.

Линеарни регресиони модели се често подешавају уз помоћ методе најмањих квадрата, иако се могу користити и други начини (нпр. минимизирање "недостатка подешења" - енг. lack of fit).

Уз задати скуп података  $\{y_i, x_{i1}, \dots, x_{ip}\}_{i=1}^n$  од  $n$  статистичких јединица, модел линеарне регресије претпоставља да се релација између зависне варијабле  $y_i$  и  $p$  вектора регресора  $x_i$  може апроксимативно узети као линеарна. "Апроксимативно" се овде односи на "сметње"  $\varepsilon_i$  — непроматрану случајну варијаблу која додаје шум у линеарну релацију између зависне варијабле и регресора. Стога, модел има облик

$$y_i = \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i = x_i' \beta + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (5.3)$$

где је  $x_i' \beta$  унутрашњи продукт између вектора  $x_i$  и  $\beta$ .

Често се ове једначине изражавају у векторском облику:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (5.4)$$

где је

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} x_1' \\ x_2' \\ \vdots \\ x_n' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1p} \\ x_{21} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & \dots & z_{np} \end{pmatrix}, \quad \beta = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{pmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_p \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

$y_i$  се назива зависном променљивом или регресендом,

$x_{i1}, \dots, x_{ip}$  су тзв. регресори, узрочне варијабле или предикторске варијабле,

$\beta$  је  $p$ -димензионални вектор параметара,

$\varepsilon_i$  је грешка, поремећај или шум.

### Оцена непознатих параметара применом методе најмањих квадрата

Велики број процедура је развијено за одређивање параметара линеарне регресије. Ове методе се разликују по једноставности алоритма рачунања као и теоријским претпоставкама потребним да се потврде пожељне статистичке особине као што су конзистентност и асимптотске ефикасности. Једна од најчешће коришћених техника за одређивање параметара линеарне регресије јесте метод најмањих квадрата.

Уобичајена техника најмањих квадрата (енг. Ordinary Least Squares - OLS) је најједноставнији и најчешће коришћен приступ рачунања. OLS метода минимизира суму квадрата одступања и доводи до коначних вредности непознатих параметара  $\beta$ :

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y = (\sum x_i x_i^T)^{-1} (\sum x_i y_i) \quad (5.6)$$

Проценитељ је неоптерећен систематским грешкама и конзистентан ако грешке имају коначну варијансу и ако су некорелисане са регресорима (Lai and Wei, 1985).

$$E[x_i \varepsilon_i] = 0 \quad (5.7)$$

Претпоставка да грешке имају коначну варијансу и да су хомоскедастичне значи да  $E[\varepsilon_i^2 | x_i]$  не зависи од  $i$ . Услов да су грешке некорелисане са регресорима биће генерално задовољен у експерименту, али у случају података реалних опажања, тешко је искључити могућност једног пропуштања коваријанса  $z$  која се односи и на опажану коваријансу и на одговарајућу променљиву. Постојање овакве коваријансе генерално доводи до корелације између регресора и одговарајуће варијабле, и тиме до неконзистентног проценитеља  $\beta$ . Услов хомоскедастичности може да не успе било са експерименталним или са опажачким подацима. У случају да је циљ предиктивно моделовање, перформансе OLS проценитеља могу бити лоше ако је присутна мултиколинearност, сем у случају када је величина узорка велика.

Код прости линеарне регресије, где постоји само један регресор (константан), OLS коефицијенти процене имају једноставну форму која је уско повезана са коефицијентом корелације између коваријансе и одговора.

*Генерализовани метод најмањих квадрата* (Generalized least squares - GLS) је проширени OLS метод, који омогућава ефикасну процену  $\beta$  када су било хетероскедастичност, или корелација, или обоје присутни међу условним грешкама модела, све док је облик хетероскедастичности и корелације познат независно од података. За управљањем са хетероскедастичности када су условне грешке у међусобној корелацији, GLS смањује тежине аналогно збиру квадрата остатака из OLS регресије, где је тежина у  $i$ -тог случаја обрнуто пропорционална  $\text{var}(\varepsilon_i)$ . Овај посебан случај GLS назива се "пондерисани метод најмањих квадрата". Решење GLS решење проблема процене је:

$$\hat{\beta} = (X^T \Omega^{-1} X)^{-1} X^T \Omega^{-1} y \quad (5.8)$$

где је  $\Omega$  је коваријациона матрица грешака. GLS може да се посматра као примена линеарне трансформације на податке, тако да су претпоставке OLS испуњене за трансформисане податке. За примену GLS, структура коваријансе грешака мора бити позната све до мултипликативне константе.

*Процентни метод најмањих квадрата* фокусира се на смањење процентних грешака, што је корисно у области предвиђања или анализе временских серија. Такође је корисно у ситуацијама где зависна варијабла има широк спектар без константне варијансе. Када су проценат или релативна грешка нормално дистрибуирани, регресија применом процентног метода најмањих квадрата даје максималне процене вероватноћа. Процентна регресија је повезана са мултипликативним моделом грешке, док је OLS повезана са моделима који садрже адитивне моделе грешака (Tofallis, 2009).

*Итеративни репондерисани метод најмањих квадрата* (Iteratively reweighted least squares- IRLS) се користи када су хетероскедастичност, или корелација, или обоје присутни међу грешкама модела, али где се мало зна о структури коваријансе грешака независно од података (Del Pino, 1989). У првом понављању, OLS или GLS врше се са привременом структуром коваријансе, а резидуали се добијају фитовањем. На основу резидуала, обично се може добити побољшана процена структуре коваријансе грешака. Каснија GLS понављања се онда врше помоћу ове одређене структуре грешака да би се дефинисале тежине. Процес може да се понавља до конвергенције, али у многим случајевима, само једна итерација је довољна да се постигне ефикасно решење за  $\beta$  (Carroll, 1982; Cohen et al., 2010).

*Инструментална варијабле регресија* (Instrumental variables regression – IV) може се добити када су регресори у корелацији са грешкама. У том случају потребно је постојање помоћних инструменталних варијабли  $z_i$ , тако да је  $E[z_i \varepsilon_i] = 0$ . Ако је  $Z$  матрица инструмената, онда се проценитељ може претставити у затвореном облику као:

$$\hat{\beta} = (X^T Z (Z^T Z)^{-1} Z^T X)^{-1} X^T Z (Z^T Z)^{-1} Z^T y \quad (5.9)$$

Оптимална инструмент регресија (Optimal instruments regression) је проширење класичне IV регресије у ситуацији када је  $E[\varepsilon_i | z_i] = 0$ .

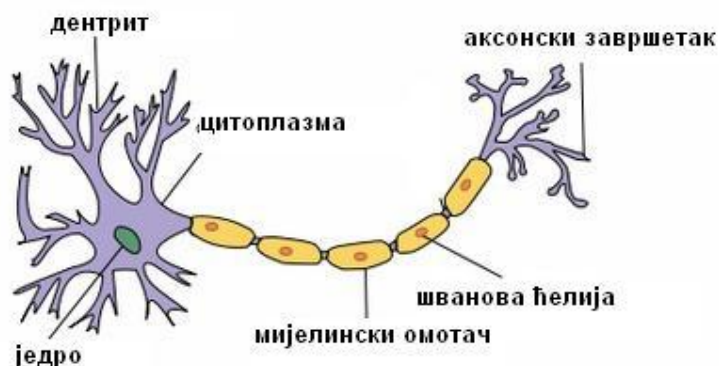
Коначни метод најмањих квадрата (Total least squares - TLS) [17] је приступ најмањих квадрата за процену модела линеарне регресије који, у односу на OLS, третира коваријабиле и променљиве више у геометријском симетричном смислу. То је један приступ рјешавању проблема "грешака у варијаблима", а понекад се користи чак и када се претпоставља да су коваријабиле без грешака.

За више информација о линеарној регресији погледати (Freedman, 2009; Yan, 2009)

### 5.3.2 Вештачке неуронске мреже

Вештачке неуронске мреже (енг. artificial neural networks - ANN) су предложене као алтернативне технике за предвиђање временских серија и стекле су огромну популарност у последњих неколико година.

Идеја вештачких неуронских мрежа или једноставније неуронских мрежа (neural networks - NN), датира још од 1943. године (McCulloch and Pitts, 1943) када је први пут предложен математички модел за биолошки неурон. Данас постоји велики број различитих типова мрежа које се могу посматрати (иако инспирисани аналогним биолошким процесима), као скуп математичких алата за сложене *data*



Слика 5.1 Поједностављен приказ биолошког неурона

*mining* задатке као што су препознавање облика, кластер анализе и класификације, као и нелинеарне регресије и предвиђања. За разлику од физички zasnovanih модела, ANN представљају тзв. *data-driven* моделе, који захтевају значајне функције (класификација) или улазно-излазне односе (регресија) које треба дефинисати у оквиру расположивог сета података.

**ANN структура** Појединачни елементи мреже се називају неурони, а у употреби су термини јединице, ћелије или чворови. Сигнали се преносе између неурона путем повезаних линкова, а свака карика везе (линк) има одговарајућу тежину која представља јачину те везе. Сваки неурон обично примењује нелинеарну трансформацију позивајући функцију активирања на свој нето улаз да би одредио свој излазни сигнал.

Појединачни неурони су распоређени у слојевима, који су сами хијерархијски поређани. Број неурона у улазном и излазном слоју је одређен одговарајућим бројем улазних и излазних варијабли.

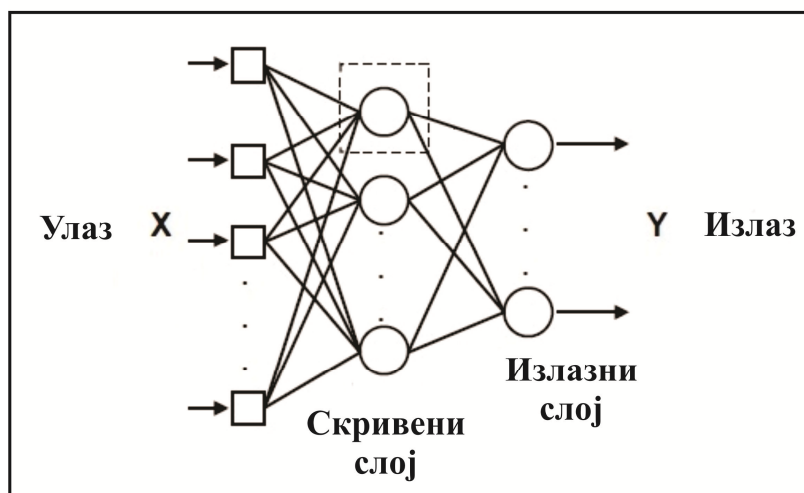
Математичка операција се обично спроводи тако што се за индивидуални неурон  $k$  рачуна његов излаз  $y_k$  као пондерисана (тежине  $w_{ik}$ ) сума улазних сигнала  $x_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) из свих његових  $n$  прикључних веза, а касније се примењује функција активације  $\varphi(\cdot)$ :

$$y_k = \varphi \left( x_{0k} + \sum_i w_{ik} \cdot x_i \right) \quad (5.10)$$

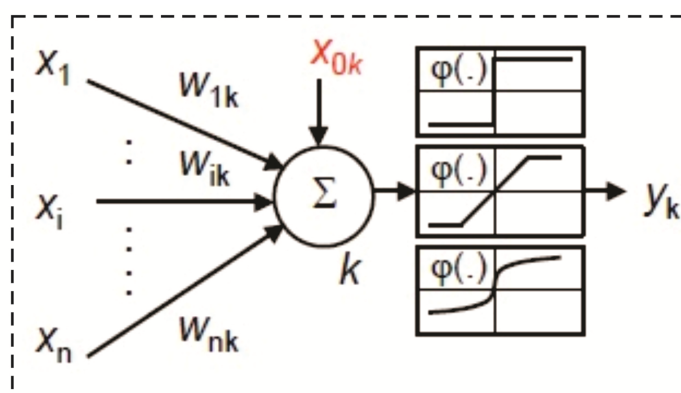
где је  $x_{0k}$  изабрани константни улаз.

**ANN архитектура** Према протоку информација у мрежи разликују се два типа ANN мрежа: *Feed-forward* ANN (нерекурзивне, нерекурентне или неповратне) и *Feedback* ANN (рекурзивне, рекурентне или повратне) мреже. У тзв. *Feed-forward* типу мрежа, информација се преноси из улазног слоја, кроз скривене слојеве до излазног слоја, без позадинске петље до претходних слојева или размене између неурона у једном слоју.





(а)



(б)

Слика 5.2 Шематски приказ неуронске мреже (а) са функцијом активације (б)

Вероватно највише примењиване feed-forward мреже и класичне ANN јесу multi-layer perceptrons (MLPs), које имају најмање један скривени слој неурона и користе нелинеарну, сигмоидалну функцију активације као логистичку  $\varphi_l$  или хиперболичну тангентну функцију  $\varphi_{\tanh}$ :

$$\text{а) } \varphi_l = \frac{1}{1 + e^{-x}}; \quad \text{б) } \varphi_{\tanh} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}; \quad (5.11)$$

Други тип *feed-forward* мрежа јесу radial basis functions (RBF) које користе Гаусове основне функције  $\varphi_G$  у скривеном слоју (обично у само једном скривеном слоју) и линеарна функција активације у излазном слоју (Dawson and Wilby, 2001):

$$\varphi_G = \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.12)$$

где  $\sigma_2$  је сфера утицаја или ширина основне функције Стога, основна разлика у односу на MLP је баратање са нелинеарностима.

У *Feedback* типу мрежа постоје конекцијски линкови који формирају петље уназад до улазног слоја, тако да они обезбеђују повратне информације. Постоје три начина да се уведе "меморија" у статички ANN (према растућем редоследу сложености и могућностима):

1. избор кашњења линије модела: прошли улази су експлицитно доступни за ANN како би ANN дали одговор у датом тренутку.
2. контекст или делимични рекурентни модели: претходни излази (скривених или излазних неурона) се уводе у ANN заједно са садашњим улазима.
3. потпуно рекурентни модели: потпуне повратне информације и повезаност између свих чворова.

Рекурентне ANN обезбеђују предност динамичког моделирања, који се користи код реалног временског предвиђања. Тачније, ток података може довести до рекурентне ANN омогућавајући прогнозе засноване на најновијим информацијама. Још једна предност рекурентне ANN је претпоставка да дају добре резултате и у присуству шума. Међутим, уклапање рекурентних ANN модела захтева знатно више времена и не укључује сложеније алгоритме од уклапања статичких *feed-forward* ANN модела. Ипак, поређењем рекурентне ANN са MLP добило се да су се перформансе оба типа ANN разликовала према дужини записа података који се користе за уклапање (Chiang et al., 2004). У случају адекватних дужина записа, перформансе MLP су нешто боље у односу на излазне грешке података теста, међутим, у случају кратких дужина записа података, рекурентне ANN су се показале знатно боље него *feed-forward* ANN.

**Стварање неуронске мреже** Стварање вештачке неуронске мреже одвија се у две фазе: прво се обавља фаза учења или тренирања, а затим се научена мрежа тестира. Према томе процес дизајнирања мреже можемо представити кроз следеће кораке:

1. дефинисање модела (избор улазних и излазних променљивих),
2. избор алгоритма (нпр. adline, ширење уназад),
3. дефинисање броја слојева и броја неурона у скривеним слојевима,
4. одређивање типа веза између слојева и избор функција преноса у слојевима,
5. избор правила учења и почетних вредности за тежине и утицаје у свим слојевима мреже,
6. избор критеријума за тестирање и верификацију мреже,
7. поступак учења,
8. поступак тестирања и
9. верификација мреже.

ANN учење Учење је поступак мењања тежина у мрежи у зависности од улазних и излазних података, а у неким случајевима само од улазних података. Пре самог учења потребно је прикупити податке (улазне и излазне) на којима ће се обавити тренирање и тестирање мреже, као и дефинисање архитектуре мреже. Прикупљени подаци се деле на два подузорка: узорак за тренирање и узорак за тестирање. Сама фаза учења је процес подешавања тежина у мрежи који се одвија у више итерација кроз мрежу. Једна итерација представља учитавање једног улазног и излазног вектора. У свакој итерацији рачунају се нове тежине. На основу израчунатих грешака врши се рачунање нових тежина у мрежи. Обично се мрежа тренира у неколико хиљада итерација. Постоји неколико типова ANN учења. Главна подела је на учење са надзором и без надзора. За задатке класификације и регресије користи се учење са надзором, где се скуп података који је на располагању састоји од одговарајућих улазних и излазних вредности представљених карактеристичним обрасцем или основним функционалним понашањем. Овај скуп података је тзв. тренинг скуп. Прилагођавање тежина врши се помоћу алгоритма оптимизације. Код учења без надзора сет улазних података се користи без одговарајућег излазног сета. Специјализоване врсте ANN које се

користе код учења без надзора употребљавају се за (непараметарско) одређивање густине расподеле основног сета података или за пројектовање образаца из високо димензионалног на ниско димензионални простор (Govindaraju, 2000).

ANN тестирање У фази тестирања тежине и утицаји су фиксни, користе се вредности добијене из задње итерације учења. Тестирање се обавља на узорку који није коришћен за учење мреже. Тестирање је поступак оцењивања квалитета мреже. Оцењивање мреже се обавља на основу грешке која се добија по формули

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^{mer} - y_i)^2} \quad (5.13)$$

где је:  $y_i^{mer}$  - мерени (жељени) излазни сигнал,  $y_i$  - моделовани излазни сигнал и  $n$ - број неурона у излазном слоју. Добијена грешка је мера успешности предвиђања будућих података. Такође, као мера квалитета предикције може се користити и коефицијент корелације.

ANN валидација модела Као што је већ поменуто ANN су *data driven* модели (модели вођени подацима), који обављају задатак класификације или регресије без познавања основних физичких процеса. Размотрићемо ANN регресиони задатак и MLP архитектуру ради једноставности (методе валидације нису специфичне за MLP, а ни за ANN у целини).

Нека је  $X$  скуп података који садржи  $N$  вектор улазно-излазних података са елементима  $\langle \mathbf{x}_i, y_i \rangle = \chi_i \in X$  (такође се означава као  $X^{(N)}$  како би обухватио величину скупа). Претпоставља се да је  $X$  резултат генерације  $\chi_i$  која је идентично и самостално дистрибуирана у  $d$ -димензионом простору података  $D$ , према непознатој вероватноћи расподеле  $Z$ . Овде се користи скраћена конвенција  $L(A,B)$  која означава неку врсту грешке функције  $L$  (нпр. MSE) на скупу  $A$  алгоритма учења тренираног на скупу  $B$ . Права грешка  $Err$  (или генерализација грешке) за фиксни тренинг скуп  $X^{(n)}$  се онда може написати као:

$$E_{rr}(X^{(n)}, Z) = \int_D L(x, X^{(n)})Z(x)dx \quad (5.14)$$

Пошто је  $Z$  непознато, непознато је и  $Err$ . Међутим, сврха метода валидације је да пронађу добре процене за  $Err$ , што се заузврат користи за процену различитих MLP топологија. Најједноставније одређивање  $Err$  би било да се израчуна грешка на истом скупу на којем је MLP трниран, на пример,  $X$ . Добијена тзв. грешка тренирања (такође се назива емпиријском или ресубститутивном грешком) може бити произвољно мала за велики број скривених неурона. Ипак, то би дало превише оптимистичан проценитељ за  $Err$ . За тренинг грешку се такође може рећи да је пристрасна наниже. У наставку су дате неке побољшане методе валидације.

1. *Split-sample валидација* У split-sample валидацији (или "hold out" валидацији) врши се подела скупа  $X$  на тренинг скуп  $X^{(n)}$  и скуп валидације  $X^{(m)}$  (где је  $X^{(n)} \cap X^{(m)}_{val} = \emptyset$ , где  $\emptyset$  означава празан скуп). На основу тренинг скупа података  $X^{(n)}$  и за дату MLP топологију тежински параметри везе овог MLP модела се успостављају минимизирањем неке мере грешке MLP. То се ради предвиђањем излаза  $f_{\alpha}(x_i) = P_i$ , (где  $\alpha \in \Lambda$ , а  $\Lambda$  представља скуп могућих вредности тежина) с обзиром на трениране податке  $y_i$ . На пример, грешка тренирања за MLP базирана на MSE грешци мерења се тада израчунава на следећи начин (где SE означава квадратну грешку):

$$SE(x^{(n)}, x^{(n)}) = \sum_{i=1}^n (P_i - y_i)' (P_i - y_i) \quad (5.15)$$

$$MSE(x^{(n)}, x^{(n)}) = \frac{1}{n} SE(x^{(n)}, x^{(n)}) \quad (5.16)$$

Како се минимизирањем тренинг грешке добија грешка валидације, овде се прати  $MSE(X^{(m)}_{val}, X^{(n)})$ , на MLP. Када грешка валидације почиње да указује на промену тренда (од смањења ка повећању) ово се узима као знак почетка преуклапања и оптимизација се зауставља. Уколико се тренирање спроводи за неколико MLPs са различитим топологијама, сума валидације и тренинг грешке након заустављања минимизирања може да се користи за проналажење модела којим се врши најбоља генерализација.

Лако је видети да је овај поступак захтеван с обзиром на количину доступних података на првом месту. Сходно томе, валидација *split-sample*, да би се достигла оптимална генерализација, захтева велику количину података и недостатак се јавља код редукције података за тренирање и/ или код избора оптималног тренинг скупа.

2. *Cross валидација* Захтев за препознавање података и проблема оптималног тренинг скупа код машинског учења доводи до преласка на алтернативне технике за одређивање  $E_{\text{т}}$  одређеног алгоритма учења на датом скупу података. Познато решење је тзв. *leave-one-out cross* валидација. У скорије време, генерализација *leave-one-out* је теоријски истражена и позната је као тзв. *k-fold cross* валидација. Овде је скуп података  $X$  подељен на  $k$  међусобно искључујућих подгрупа  $S_j$ ,  $j = 1, \dots, k$ . За сваку  $S_j$  један MLP ван  $k$  MLPs са истом фиксном топологијом је трениран у свим подгрупама осим за  $S_j$ . Настала истинита грешка се затим рачуна као средња грешка  $k$  тренинга MLPs:

$$Err_{k\text{-fold}} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k L(S_j, X / S_j) \quad (5.17)$$

где  $X / S_j$  означава разлику сета  $X$  и  $S_j$ . За  $k=n$   $Err_{k\text{-fold}}$  добија се *leave-one-out* процена грешке  $E_{\text{т}}$ .

Предност *k-fold cross* валидације је, да је MLP трениран на свим подацима, тако да не постоји оптималан тренинг скуп који мора да буде изабран.

3. *Bootstrapping* Други приступ који захтева мање података, али повећано време рачунања јесте *bootstrapping resampling* техника. Ова техника избегава потенцијално високу варијансу грешке рачунања *cross валидације* у случају малих скупова података. Основна идеја *bootstrapping*-а је да се поново узоркује оригинални сет података заменом и да се користи *resampling* сет за одређивање генерализације грешке  $Err$ . Међутим, одређивање грешке овом техником најчешће изазива постојање већих систематских помака. Међутим постоје напредни *bootstrapping* калкуланти (тзв. б32+ калкулант) са ниским варијансама који готово да немају систематску грешку (Efron and Tibshirani, 1997).

## 6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА

---

### 6.1 Тест подручје - опис Активне Геодетске Референтне Основе Србије

Активна геодетска референтна основа Србије (АГРОС) представља скуп релативно правилно распоређених референтних станица са прецизно одређеним координатама у конвенционалном терестричком референтном систему. На овим перманентним станицама врше се континуирана GNSS опажања која се прослеђују у један или више контролних центара. У контролним центрима подаци се обрађују и креирају се одговарајући сервиси позиционирања, за различите класе корисника. Према томе, активна геодетска референтна основа подразумева три основна сегмента: перманентне GNSS станице, комуникациони сегмент и центар за обраду података.

АГРОС је успостављена је у периоду од 2003. до 2005. године. Од тренутка успостављања систем је непрекидно био у употреби али је такође непрекидно мењана организација рада система као и распоред станица. Тренутно АГРОС се састоји од 30 перманентних GNSS станица при чему су на 29 станица Trimble пријемници, а на једној пријемник типа Leica (слика 6.1).

Координате АГРОС станица одређене су ослањањем на 6 EUREF тачака чије су координате одређене у референтном оквиру ITRF96 (International Terrestrial Reference Frames). Међугим координате се непрекидно прате и свакодневно одређују у оквиру дневних изравнања. Обезбеђено је аутоматско изравнање података које прикупља АГРОС ослањањем на низ EPN<sup>6</sup> станица: Букурешт, Грац, Истанбул, Матеа, Падова, Пенц и Софија. Такође у циљу провере квалитета рада АГРОС разрађене су адекватне процедуре и софтверски пакети за релативну

---

<sup>6</sup> European Permanent Network

и апсолутну оријентацију антена као и изравнања са променом елевационе маске (Odalovic et al., 2011).

Тренутна конфигурација АГРОС референтних станица покрива државну територију на просечном растојању од око 70 km.

Активна геодетска референтна основа Србије корисницима обезбеђује три основна сервиса GNSS позиционирања:

1. АГРОС RTK омогућује позиционирање у реалном времену применом кинематичког GNSS позиционирања са тачношћу 0.02 – 0.03 m. Примена овог сервиса огледа се у непосредном позиционирању тачака детаља премера непокретности као и позиционирању тачака пасивне геодетске основе за снимање детаља.
2. АГРОС DGPS омогућује позиционирање терестричких тачака у реалном времену применом диференцијалног GNSS позиционирања са тачношћу 0.5 – 3.0 m.
3. АГРОС PP намењен је за прецизно позиционирање тачака пасивне геодетске основе (референтних тачака) или за позиционирање контролних тачака при пројектовању и реализацији инжењерских објеката.

Сервис АГРОС RTK могућ је у три режима рада:

1. RTK позиционирање у односу на најближу перманентну станицу АГРОС са којом кориснички пријемник директно комуницира и преузима податке неопходне за стандардно позиционирање у реалном времену у RTCM формату;
2. Преузимање мрежних корекција најмање шест најближих перманентних станица (сервис RTCM3Net) при чему се интерполација и израчунавање VRS опажања врши корисничким пријемником;
3. Преузимање VRS опажања за приближни положај корисничког пријемника.

Тачност GNSS позиционирања применом сервиса АГРОС RTK у границама је од 2 cm до 3 cm при чему треба рећи да, код стандардног RTK позиционирања у



односу на најближу перманентну станицу, она зависи од растојања између перманентне станице и корисничког пријемника. На међународном плану, већина успостављених CORS (енг. Continuously Operating Reference Station) мрежа које нуде Мрежне-RTK услуге са тачношћу центиметарског нивоа, имају референтне станице на размаку највише неколико десетина километара. Пошто није економски исплативо прогустити мрежу до те мере, питање како повећати дужину базне линије у оквиру мрежног RTK система без жртвовања тачности и поузданости је у првом плану међународних истраживања (Millner et al., 2006; Zhang et al., 2006). Дужина базне линије унутар GNSS мреже може се повећати првенствено кроз побољшање метода моделовања атмосферских утицаја. Током последњих деценија, многа истраживања су вршена у том смеру (Retscher, 2002; Rizos, 2009; Dai et al., 2003; Grejner-Brzezinska et al., 2005; Grejner-Brzezinska et al., 2007). На тај начин дошло се до техника моделовања атмосферских утицаја које су у стању да продуже дужине базних линија од 70 km или више у регионима средње географске ширине (Rizos and Han, 2003). Комерцијално међутим, VRS систем је у стању да постигне хоризонталну тачност позиционирања од  $\pm 5$  cm, само за базне линије дужине до 35 km (Higgins, 2002; Retscher, 2002).

Основни циљ ове докторске дисертације је формулисање одговарајућег модела за потребе предикције јоносферских корекција задовољавајуће тачности у циљу унапређења АГРОС- RTK режима рада. Подаци коришћени за обављање свих анализа описаних у наставку произилазе из података АГРОС мреже. У питању су датотеке са резултатима опажања који су прикупљени са станица мреже, за одговарајуће периоде тестирања.



Слика 6.1: Актуелна дистрибуција тачака, 2015

## 6.2 Избор периода тестирања и соларна активност током тог раздобља

Најзначајнији утицај на промене у јоносфери, генерално, имају процеси везани за Сунчево зрачење. У питању су како варијације у самом зрачењу тако и утицај

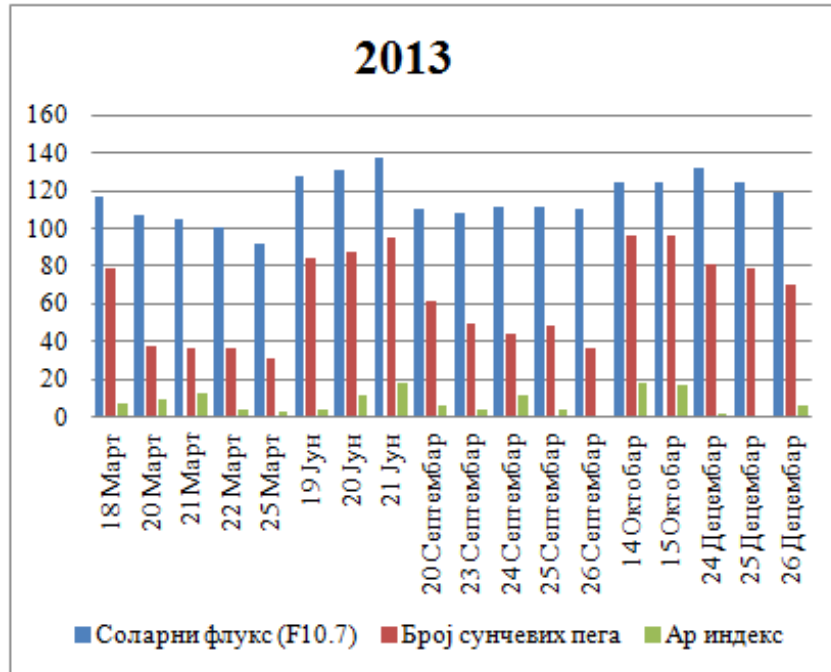
зрачења тј. његових промена на атмосферу услед ротације и револуције Земље. Саме варијације могу имати, с једне стране, периодичан карактер узрокован Сунчевим 11-годишњим циклусом, променом годишњих доба и дневним променама. С друге стране јављају се непериодичне промене, пролазног карактера узроковане наглим појачањем електромагнетног зрачења (флерови) и честичног зрачења (избацивање короналне масе) (Gorney, 1990).

С обзиром на претходно, што се тиче годишњих односно сезонских промена Сунчевог зрачења, највећа колебања се очекују у периодима зимског и летњег солстиција, тј. пролећног и јесењег еквиноција. С обзиром на претходно, период тестирања у овом истраживању одабран је тако да су подаци преузети за датуме који се поклапају са летњом и зимском дугодневницом и краткодневницом, и пролећном и јесењом равнодневницом током 2013. и 2014. године, као и за дане за које је примећена појачана јоносферска активност (табела 6.1). Такође, ови периоди припадају соларном циклусу број 24. и периоду повишене соларне активности.

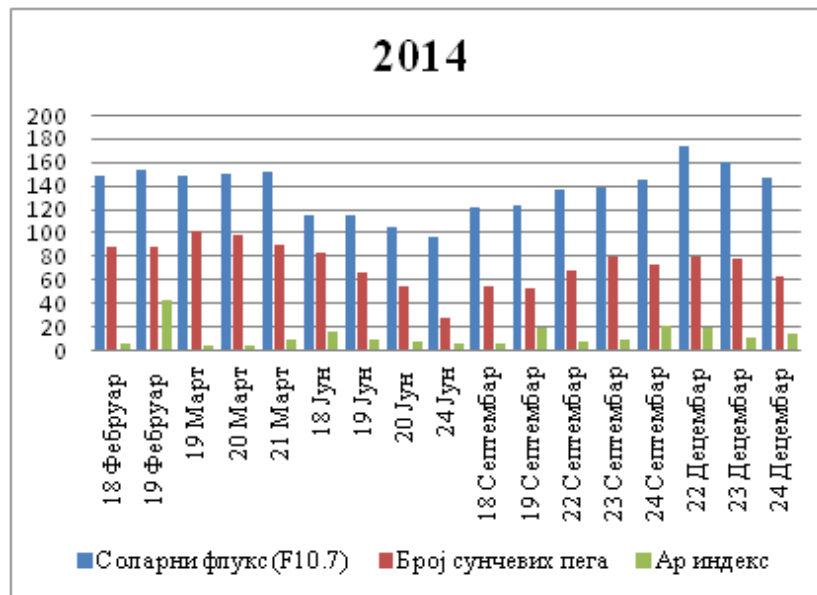
Соларна активност током периода тестирања дата је на Сликама 6.2. и 6.3. Са слике 6.2 може се видети да је март 2013. године период умерене соларне активности. У јуну 2013. године јавља се нешто појачана геомагнетна активност (Ap index достиже 18, број сунчевих пега 95 и соларни флуks 137.6). За период септембра 2013. евидентно је поновно опадање броја сунчевих пега и соларног флуksа. У децембру 2013. приметна је мала геомагнетна активност и повећан број сунчевих пега и соларног флуksа. 2014. година је нешто бурнија у односу на 2013. где се издваја март и децембар 2014. (Ap index достиже 19, број сунчевих пега 80 и соларни флуks 173.4).

Табела 6.1: Периоди тестирања

Година	Фебруар	Март	Јун	Септембар	Октобар	Децембар
<b>2013</b>		18., 20., 21. 22., 23.	19., 20., 21.	20., 23., 24. 25., 26.	14., 15.	23., 24., 25.
<b>2014</b>	18., 19.	19., 20., 21.	18., 19., 20., 24.	18. 19. 22. 23. 24.		22., 23., 24.



Слика 6.2: Соларна активност током периода тестирања за 2013. годину (преузето са <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>)



Слика 6.3: Соларна активност током периода тестирања за 2014. годину.

### **6.3 Варијабилност јоносфере изнад Србије**

Примарни циљ овог поглавља је да се испита временска варијација јоносферског кашњења на територији Србије, што би послужило као претходница развоју једног јоносферског модела, који би био у стању да обезбеди довољно прецизне корекције у Мрежном-RTK окружењу. У првом делу је дата прелиминарна анализа апсолутног VTEC изнад територије Србије, како би се квантификовале његове дневне, сезонске и просторне варијације. Ова прелиминарна студија омогућила је увид у целокупну стабилност јоносфере изнад Србије. Након тога, анализирана је временска варијабилност разлика јоносферског кашњења из једне епохе у наредну, да би се установило колико брзо се мењају током времена.

Да би разумели опште карактеристике јоносфере изнад Србије, извршена је анализа временских варијација јоносферског VTEC изнад региона. Ово истраживање је фокусирано на дневним и сезонским варијацијама јоносфере, заснованим на серијама VTEC срачунатим из GPS мерења и упоређеним са VTEC подацима добијених из мерења јоносондом. Ова анализа омогућава карактеризацију природе и фине структуре јоносфере изнад Србије и у локалном и регионалном смислу. На овај начин добиће се увид у најприкладније стратегије моделовања, како би се побољшала прецизност јоносферских корекција за позиционирање у реалном времену.

#### **6.3.1 Одређивање VTEC из GPS мерења**

Користећи двофреквентна GPS мерења могуће је параметризовати вертикално TEC (VTEC) (Kleusberg, 1986), односно могуће је одредити интегрисани садржај електрона између сателита и пријемника, као и ефекте сцинтилација на L опсеги фреквенција. Двофреквентни GPS пријемници користе две фреквенције, L1 (1575.42 MHz) и L2 (1227.60 MHz), за компензацију јоносферског кашњења. На тај начин се уклањају ови ефекти, користећи дисперзивну природу јоносфере, где је индекс преламања функција фреквенције.

Кашњење ( $\Delta t = t_2 - t_1$ ) мерено између L1 и L2 фреквенција се користи за рачунање ТЕС дуж путање сигнала:

$$\Delta t = \left( \frac{40.3}{c} \right) \cdot \frac{TEC}{\left( \frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right)} \quad (6.1)$$

где је  $c$  брзина светлости у вакууму. Рачунање ТЕС користећи само податке псеудодужина, може да произведе резултат оптерећен шумом, док фазне разлике дају прецизну меру релативних ТЕС варијација. Апсолутно ТЕС се може добити само ако се користе и псеудодужине.

Дакле, употреба псеудодужина даје апсолутне ТЕС док употреба фазних разлика повећава тачност. Према томе, GPS подаци обезбеђују ефикасан начин да се процене ТЕС вредности са већом просторно и временском покривеношћу (Davies and Hartmann 1997; Igarashi et al., 2001). Будући да су фреквенције које користи GPS систем довољно високе, сигнали су минимално погођени јоносферском апсорпцијом и Земљиним магнетним пољем, како у краткорочним, тако и у дугорочним променама у структури јоносфере.

Овде су вредности косог ТЕС добијене као збир реалних косих ТЕС, хардверског кашњења сателита  $b_s$  и хардверског кашњења пријемника  $b_R$ . Стога, вертикално ТЕС се може изразити као

$$VTEC = \frac{(STEC + b_s + b_R)}{S(e)} \quad (6.2)$$

где је  $STEC$  косо ТЕС,  $e$  је елевациони угао сателита у степенима,  $S(e)$  је редуциона функција са зенитним углом  $z$  у тачки јоносферског пробоја (енг. Ionospheric Pierce Point - IPP) и  $VTEC$  је вертикално ТЕС у тачки IPP. Редуциона функција  $S(e)$  се дефинише као (Langley et al., 2002):

$$S(e) = \frac{1}{\cos(z)} = \left( 1 - \frac{R_e \times \cos(e)}{R_e + h_i} \right)^{-0.5} \quad (6.3)$$

где је  $Re$  средњи Земљин полупречник у km, а  $hi$  је висина (ефективна) јоносфере изнад Земљине површине. Овако одређено вертикално TEC (VTEC) је коришћено у овом раду. Резултати су приказани у наредним поглављима.

Скуп од 30 АГРОС станица које се налазе широм државе су коришћене као тест полигон за ову анализу (слика 6.1). Двофреквентна GPS опажања су прикупљена са сваке станице за тест период описан у претходном одељку. Прикупљени подаци садрже 72- часовна опажања из марта, јуна, септембра и децембра 2013. и 2014. године као и опажања за дане за које је примећена повећана јоносферска активност.

Временске серије TEC мерења добијене су путем једначине (6.1). Подаци су преузети за сваку базну станицу из архива, у облику 30 секундних RINEX (енг. Receiver Independent Exchange Format) фајлова, који су коришћени као улази. За обраду је коришћен софтвер "GPS TEC analysis" развијен на универзитету у Бостону (Seemala, 2014). Коришћене су фазне и кодне вредности на обе фреквенције за елиминисање грешке часовника и тропосферских ефеката како би се срачунале релативне вредности косог TEC (Sardón and Zarraoa, 1997). Потом су апсолутне вредности TEC добијене уклањањем хардверских кашњења тј. диференцијалних кодних одступања сателита (произведене од стране Data Centre of the Bern University, Switzerland) и пријемника (добијене минимизирањем TEC варијабилности између 14:00 и 18:00 часова по локалном времену) (Seemala and Valladares, 2011). Тригонометријска једнослојна функција пресликавања (једначина 4.16 односно 6.3) је коришћена за конвертовање TEC у VTEC на GPS станицама и на тачки IP (слика 4.3). Елевациони угао је ограничен на вредност од  $20^\circ$  како би се смањио потенцијални ефекат вишеструке рефлексije сигнала током ових тестова. Подаци су узорковани на 30 секунди, а резултати добијени на основу ових података приказани су у поглављима 6.3.4 и 6.3.5.

### **6.3.2 Одређивање VTEC из параметара јоносоиде**

На брду изнад Гроцке, у селу Брестовик, на око 36 km од Београда налази се Геомагнетски завод. Завод је основан 1957. године и представља једну од

најстаријих геофизичких установа на овим просторима. Такође, то је једина геомагнетска опсерваторија на простору бивше Југославије. Положај опсерваторије је дат у табели 6.2. Рад Геомагнетског Завода заснива се на опсерваторијским мерењима промена магнетског, електричног и електромагнетског поља Земље, у времену и на простору целе државе, на посматрању и праћењу појава и процеса у магнетосфери и јоносфери Земље и њихове повезаности са променама соларно-геомагнетске активности.

Јоносферска опсерваторија Гроцка једна је од четири опсерваторије, које су у саставу Геомагнетског завода.<sup>7</sup> Њен основни задатак јесте вертикално сондирање средње и високе јоносфере применом јоносонде, према устаљеној методологији и режиму рада. При том се обављају послови и задаци праћења и проучавања стања и просторно-временских варијација параметара јоносфере. Дакле, врши се систематско опсерваторијско бележење и праћење варијација јоносферских параметара за средњу и високу јоносферу у дигиталној форми, интерпретација и редукција јонограма у складу са међународним нормативима, израда месечног билтена јоносферских података, краткорочне и дугорочне прогнозе услова простирања високо фреквентних (HF) радио-таласа и редовна калибрација и контрола пријемно-региструјућих уређаја.

Као основни и најбитнији резултати мерења који се добијају јесу  $f_oF_2$ , критична фреквенција F2 слоја и MUF-максимално употребљива фреквенција. То су параметри који нам говоре о условима који владају у јоносфери, а битни су за пропацију високофреквентних радио-таласа.

Табела 6.2: Положај геомагнетског завода Гроцка

<b>Географске координате</b>	44° 38' N, 20° 46' E
<b>Геомагнетске координате</b>	43.33° N, 1.55° E
<b>Магнетска инклинација</b>	61
<b>Време</b>	LT 15E (UT+1h)

<sup>7</sup> Остале три су Геомагнетска, Геоелектрична и Магнетосферска.



Јоносонда која се користи је дигитална јоносонда KELIPS 42 (слике 6.4 и 6.5), а њене основне карактеристике су приказане у табели 6.3.

Табела 6.3 : Карактеристике јоносонде

Уређај	KELIPS 42
Фреквентни опсег	1-22.6 MHz
Време скалирања	12 s
Приближна снага у пику	5 kw
Ширина импулса	41.67 $\mu$ s
Интервал импулса	5.33 ms
Број канала	576
Тип антене	Вертикална делта
Опсег висине	50-800 km
Интервал висине	100 km
Скала висине	линеарна
Скала фреквенције	логаритамска



Слика 6.4: Дигитална јоносонда KELIPS 42



Слика 6.5: Антена

Јоносонда како је описано у поглављу 4.1 пружа одређене информације о јоносферским регионима на основу којих је могуће, путем јонограма доћи до садржаја електрона, тј. до података о VTEC (Huang and Reinisch, 2001). Јонограм пружа информације за директно рачунање профила вертикалне густине електрона

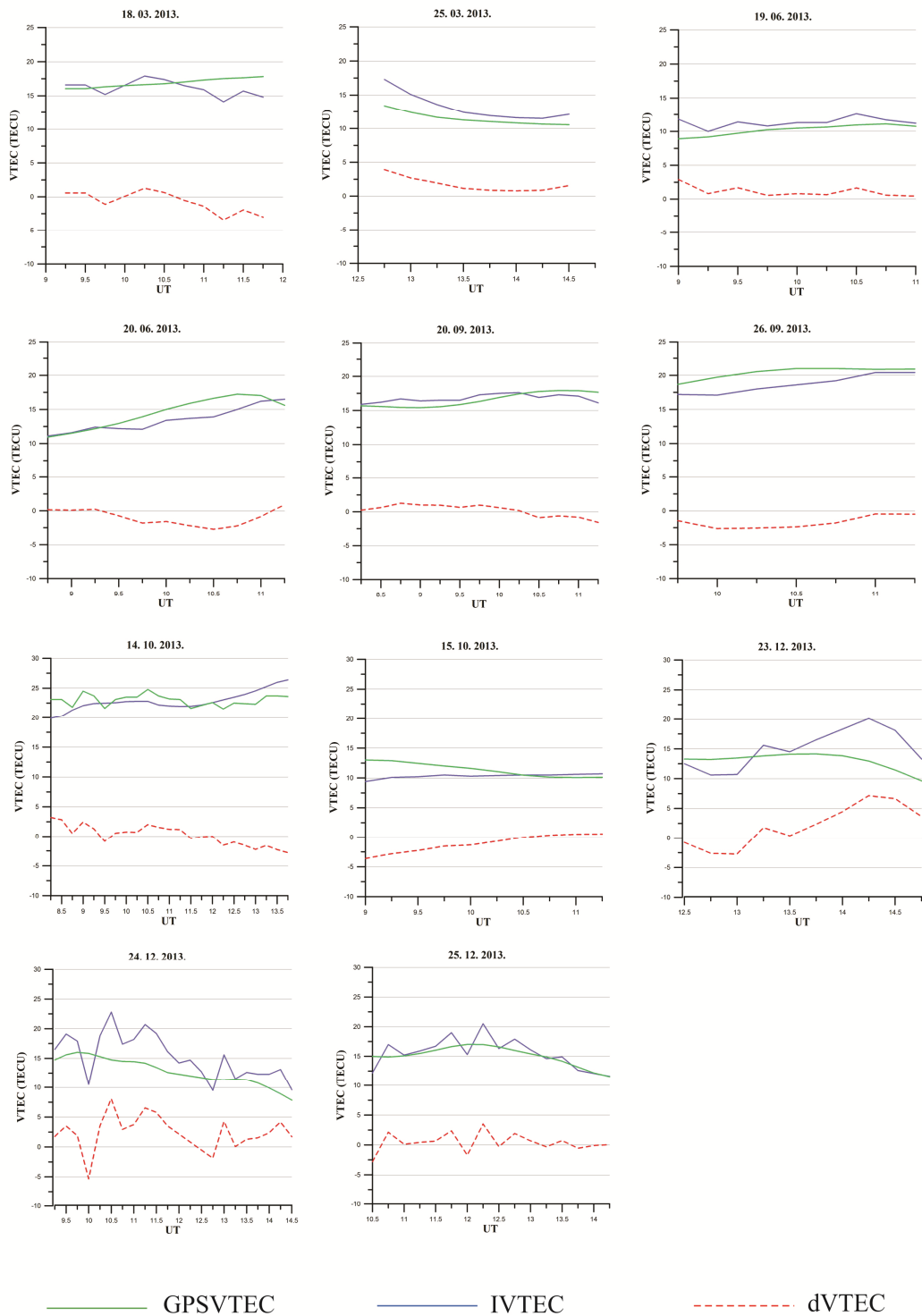
до врха F2 региона. Профил изнад максимума се апроксимира  $\alpha$ -Чарпан функцијом са висином која се изводи из облика профила на F2 максимуму. TEC се тада рачуна као интеграл од 0 до 1000 km преко целог профила. У овом раду за одређивање VTEC из параметара јоносонде коришћен је модел *Iri\_2012*. Вредности су срачунате за 11 дана 2013. и 12 дана 2014. Услед техничких ограничења у раду јоносонде, дневна мерења су редукована на неколико преподневних часова (између 8 и 14 часова) са једносекундним узорковањем и приказом у интервалима од 15 минута.

### 6.3.3 Поређење вредности VTEC добијених из GPS мерења и из параметара јоносонде

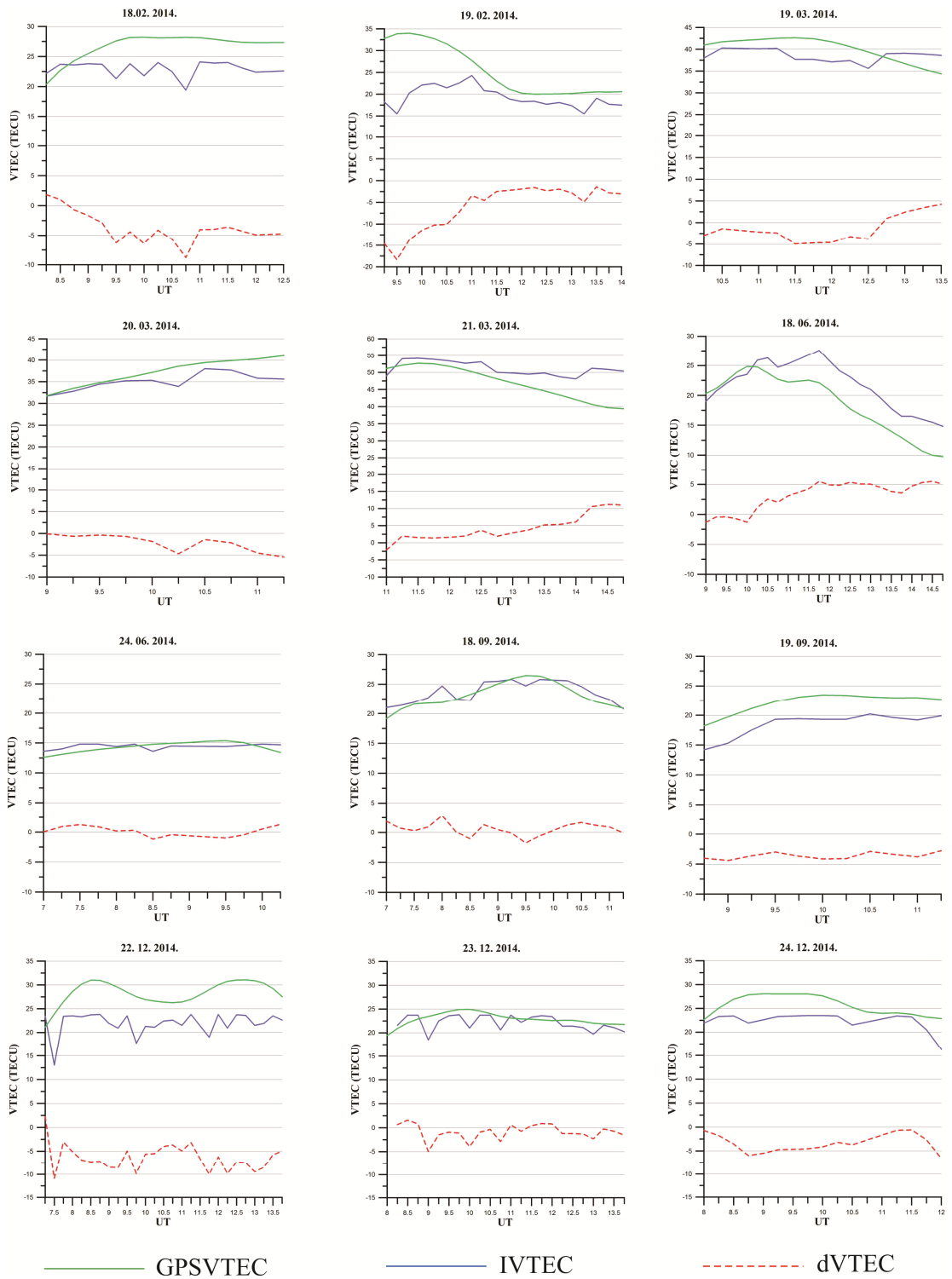
У циљу валидације GPS јоносферских информација тј. резултата VTEC добијених из GPS мерења (GPSVTEC) вршено је њихово поређење са VTEC подацима срачунатим из параметара јоносонде (IVTEC). На сликама 6.6. и 6.7. приказане су вредности GPSVTEC и IVTEC као и вредности њихових разлика  $\Delta VTEC = GPSVTEC - IVTEC$ . У табели 6.4. су представљени статистички подаци ових разлика добијени након одбацивања грубих грешака тј. података чије је одступање било три пута веће од вредности стандардне девијације над целокупним узорком једне године. Може се видети да резултати за изабрани узорак мерења показују сагласност и да је средња вредност и стандардна девијација 0.48 TECU и 2.25 TECU, односно 1.67 TECU и 4.31 TECU. Према добијеним резултатима потврђују се налази сличних истраживања (Belehaki et al., 2003, McKinnell et al., 2007), и може се сматрати оправданим коришћење GPSVTEC за анализу варијација јоносфере.

Табела 6.4: Статистички подаци поређења GPSVTEC и IVTEC

Параметар	2013	2014
Број података	136	202
Минимална вредност	-5.33 TECU	-11.44 TECU
Максимална вредност	8.07 TECU	11.21 TECU
Средња вредност	0.48 TECU	-1.46 TECU
Стандардна девијација	2.25 TECU	3.98 TECU



Слика 6.6: Поређење између GPSVTEC и IVTEC за 11 дана током 2013. године



Слика 6.7: Поређење између GPSVTEC и IVTEC за 12 дана током 2014. године

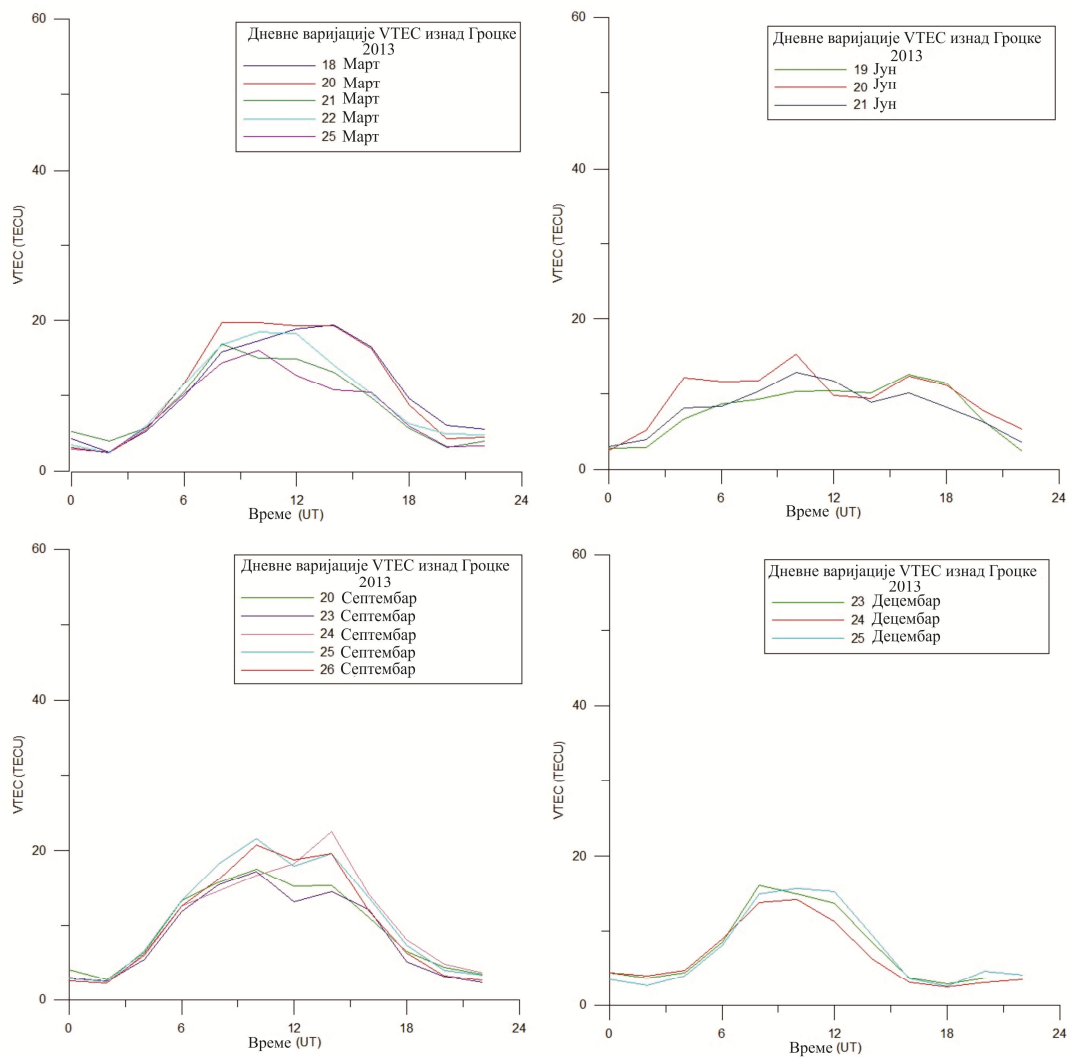
#### 6.3.4 Дневне и сезонске варијације јоносфере

За одређивање VTEC изнад Србије коришћени су подаци са референтне станице Гроцка, а рачунање је вршено у софтверу "*GPS TEC analysis*" (Seemala and Valladares, 2011). Сlike 6.8 и 6.9 приказују дневне и сезонске варијације јоносфере изнад станице Гроцка током карактеристичних периода. Свака од слика приказује 24-часовне VTEC податке за све видљиве сателите изнад станице Гроцка за четири сезоне током 2013. и 2014. године. X-оса представља универзално време (UT), а Y-оса VTEC вредности. Минималан елевациони угао за све сателите је 20 степени.

Ради ове анализе се предпоставља да је у Србији, по локалном времену од 4:00 - 9:00 јутро, од 9:00 - 17:00 часова дан, од 17:00 - 21:00 сумрак и од 21:00 - 4:00 ноћ, респективно.

Са слика је могуће уочити да се највеће VTEC вредности јављају приближно око 11:00 UT односно 12:00 до 14:00 по локалном времену, а минималне VTEC вредности се јављају приближно око 20:00 UT или 21:00 по локалном времену до 4:00 UT или 5:00 по локалном времену. Дакле, евидентно је да су VTEC вредности добијене током дана значајно веће од оних током ноћи. Међутим, појава максималних и минималних јоносферских вредности варира са сезоном. Такође, очигледно је да постоји значајна промена у вредности VTEC из дана у дан у оквиру сваке сезоне, чак и у периоду јуна 2014. када је традиционално мирна и стабилна јоносфера. Ове промене настају услед утицаја магнетног поља Земље, због варијација у активностима Сунца и интензитету долазног зрачења као и услед промена зенитног угла под којим зрачење продире земљину атмосферу (Rao et al., 2006).

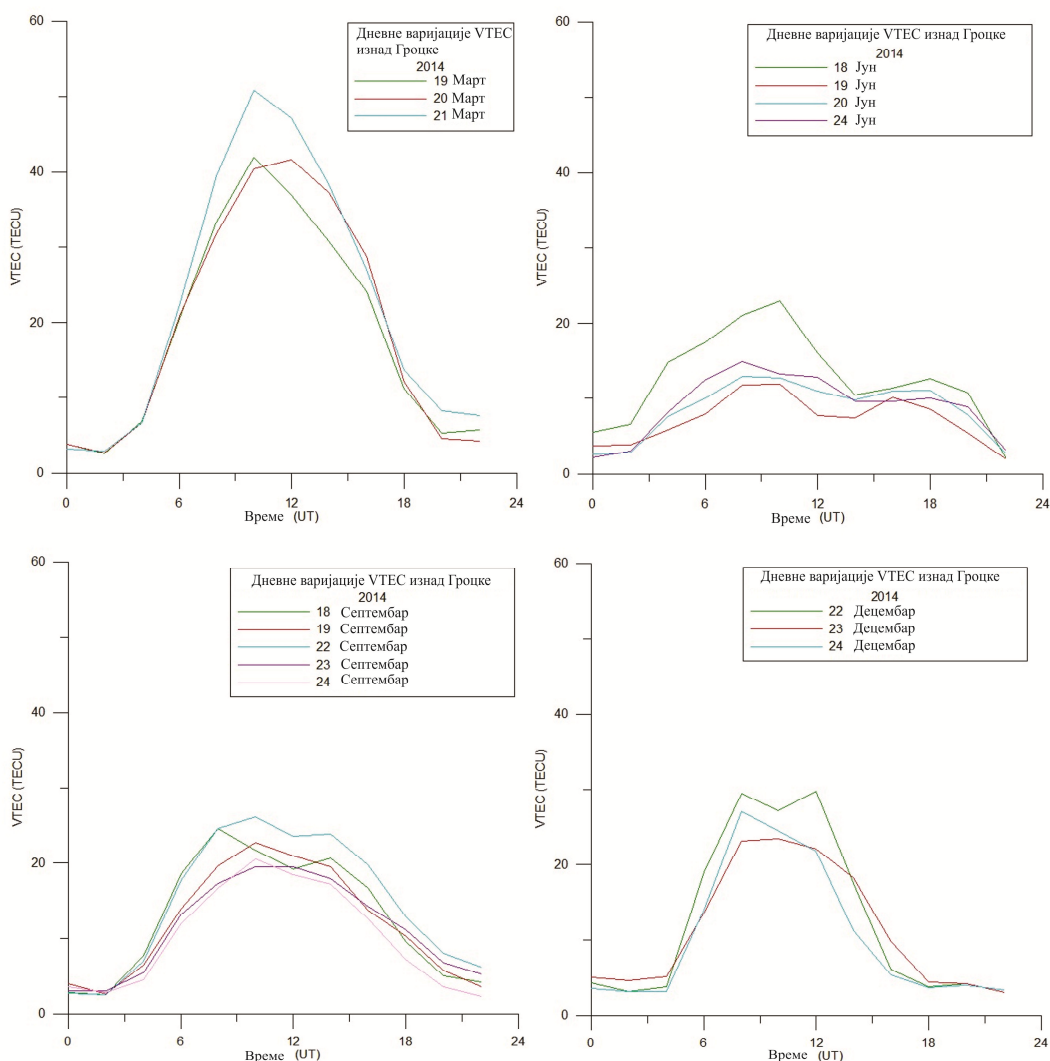
Када се упореде вредности на сликама могу се приметити значајне разлике у вредностима VTEC за различите сезоне током 2013. и 2014. године. Највеће вредности се јављају током периода марта и децембра 2014., а најмање су добијене у периоду јуна за обе године. Може се видети да су дневне VTEC вредности добијене у септембру (јесен) и марту (пролеће) генерално веће од оних добијених током децембра (зима) и јуна (лето).



**Слика 6.8: Дневне и сезонске варијације VTEC изнад АГРОС станице Гроцка током 24 часа 2013. за Март, Јун, Септембар и Децембар**

Међутим, током периода децембра 2014. године вредности VTEC су на вишем нивоу што се може приписати појачаној соларној и геомагнетној активности (видети слике 6.2 и 6.3).

На основу ових резултата, постоји мало доказа о доследности у опажањима из сезоне у сезону. Док је општи тренд у оквиру сваког сезонског периода сличан, моделовани коефицијенти изведени из једнодневних података нису довољно прецизни да опишу јоносферу из дана у дан за потребе центиметарског нивоа тачности за мрежне RTK примене.



Слика 6.9: Дневне и сезонске варијације VTEC изнад АГРОС станице Гроцка током 24 часа 2014. за Март, Јун, Септембар и Децембар.

Ово указује на чињеницу да у циљу адекватног описивања јоносферских услова у оквиру Мрежног-РТК окружења, јоносферске корекције морају бити изведене из периода који се поклапа или је јако близак периоду корекција, због константне варијабилности јоносфере.

### 6.3.5 Просторне варијације јоносфере изнад Србије

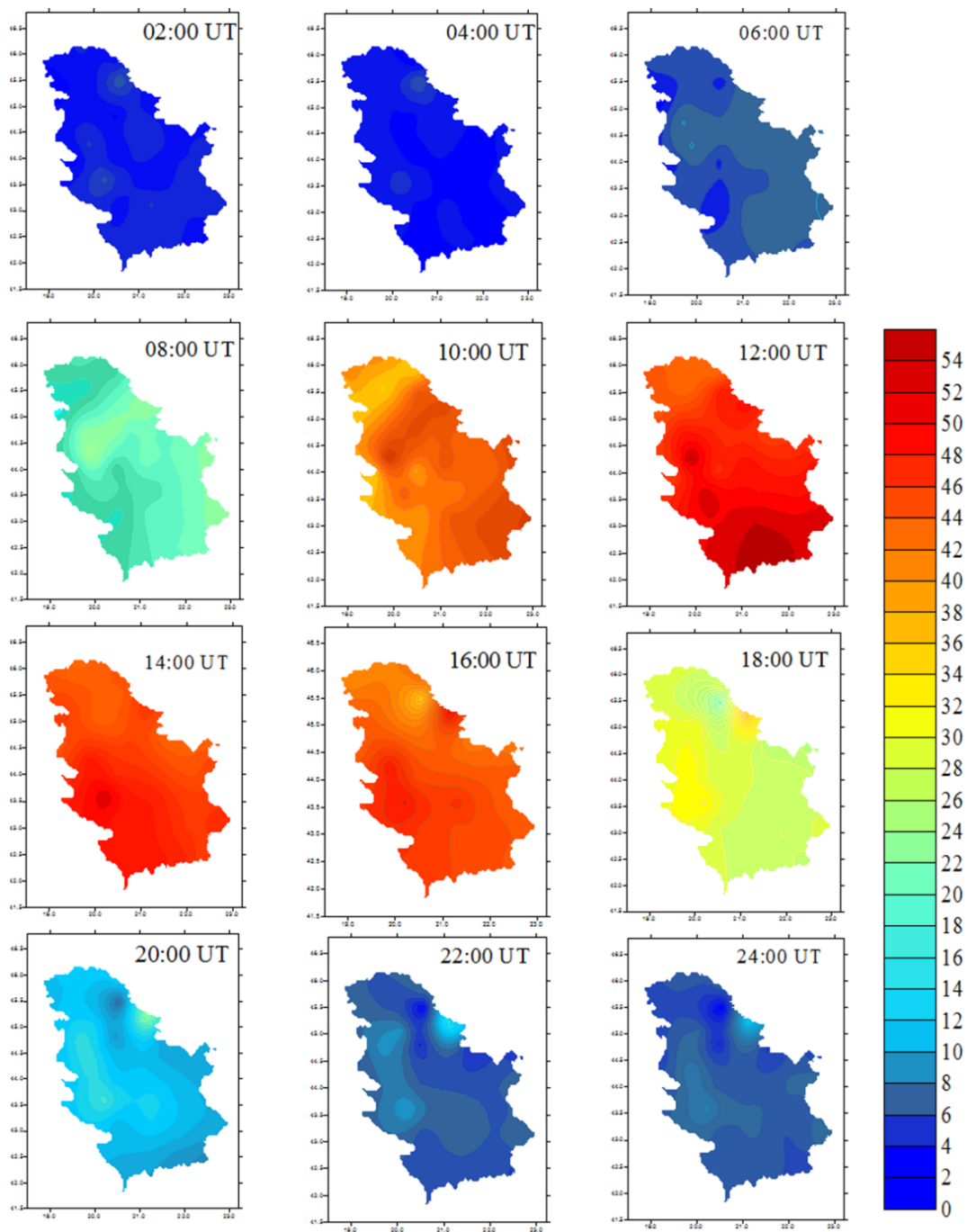
У овом одељку спроведена је широка регионална анализа јоносфере. Тридесет АГРОС станица распоређених по територији Србије су коришћене за одређивање

VTEC вредности, користећи претходно описан поступак. На основу добијених резултата срачунат је временски низ састављен од 12 двочасовних приказа VTEC над Србијом за четири сезоне током 2013. и 2014. године. Резултати су и приказани на слици 6.10. и представљају вредности за 21. Март 2014. године, као дан за који је примећена највећа соларна активност. X-оса и Y-оса означавају лонгитудинални и латитудинални правац респективно. Резултати за остале тестиране дане могу се видети у Прилогу 1.

Према слици 6.10. највеће VTEC вредности су забележене од 12:00 UT до 14:00 од чак 55 TECU током дана, а најниже од 4 TECU током ноћи у Марту 2014. То је једнако кашњењу од приближно 8.8 m у вертикалном правцу током максималних дневних услова и кашњењу од 0.6 m током минималних ноћних услова. Као опште правило, фактор укошености од 3 се примењује за ниске елевационе углове сателита. Овај однос описује фактор са којим се јоносферско кашњење повећава у односу на кашњење у зениту, као производ јоносферских услова и елевационог угла сателита. То би значило да би током максималних дневних услова у марту 2014. године, сателити са ниским елевационим углом имали јоносферско кашњење реда 26.4 m.

Са слике 6.10, може се видети да, осим чињенице да VTEC вредности изнад региона варирају током дана, оне су у просторној корелацији. Ове карактеристике просторне корелације омогућавају моделовање јоносфере изнад целе области Србије. Међутим, са слике 6.10 се такође примећује да се највеће промене вредности VTEC, на појединим панелима јављају од југозапада ка североистоку, на другим у супротном правцу, а на неким од њих промене не показују савршено хомоген нагиб. Ово може довести до тешкоћа у успостављању правилног математичког модела за VTEC, на територији Србије, посебно за потребе веће прецизности као што је позиционирање у реалном времену. Такође, може се приметити да се VTEC вредности двочасовних епоха значајно разликују. Током дневних временских периода, представљени графикони показују да се најзначајније повећање VTEC између двочасовних приказа јавља током јутарњег периода, и расте за око 50% у свим сезонским периодима, због брзог загревања јоносфере услед првог излагања Сунцу.





Слика 6.10: VTEC вредности изнад Србије 21. марта 2014. године (јединице: TECU)

Током максималног дневног периода између 12 и 16 часова по локалном времену, постепен раст за око 10% се јавља између сваког приказа пре достизања максимума. У касним поподневним сатима и раним вечерњим, ТЕС вредности се

смањују за прилично једнак износ од 10-15% између 17 часова и 20 часова по локалном времену. Ноћни период је показао прилично стабилне графике са мало варијација.

У Мрежном-RTK окружењу прецизно позиционирање зависи пре свега од познавања промена у јоносфери са околних базних станица мреже. За потребе квантификовања понашања тренутне јоносфере, у наредном одељку приказана је стопа анализа промене разлика јоносферског кашњења у кратким периодима. На тај начин биће омогућен увид у стабилност јоносфере током времена.

### **6.3.6 Временске промене јоносферског кашњења**

Јоносфера представља дисперзивну, нехомогену и нестабилну средину подложну брзим варијацијама (видети поглавља 6.3.4 и 6.3.5) што директно утиче на тачност техника прецизног позиционирања у реалном времену применом GNSS тј. GPS мерења.

Иако је последњих година знатно унапређен RTK мрежни систем у Србији једно од главних ограничења која се односе на конфигурацију АГРОС мреже јесу дуге базне линије између референтних станица и промене утицаја јоносфере дуж њих. Превазилажење овог потенцијалног проблема и постизање центиметарске тачности позиционирањем у реалном времену на целокупној територији, оствариво је кроз прецизно моделовање јоносфере Србије. Стога је неопходно испитати промену јоносферског кашњења из епохе у епоху изнад Србије, и квантификовати њихово понашање у различитим сезонским периодима. Анализирани су сви трендови у сировом подацима опажања што је омогућило адекватније предвиђање јоносферског кашњења. На овај начин обезбеђене су претходне информације за предвиђање временске варијабилности јоносфере. Информације добијене из ове анализе значајно су допринеле развоју одговарајућих временских јоносферских предиктивних модела који се могу користити у мрежном RTK окружењу. Основна сврха ових модела јесте прецизно одређивање позиције корисника у реалном времену.

## Временска варијабилност јоносферског кашњења

Подаци за истраживање краткорочних варијација јоносферских кашњења ( $I$ ) на територији Србије су преузети са АГРОС базне станице ГРОЦКА (слика 6.2). Вредности  $I$  су срачунате из података VTEC (једначина 4.14) добијених применом "GPS TEC analysis" софтвера и обезбеђују средство за испитивање варијабилности јоносфере, јер дају промену у јоносфери са високим степеном тачности. При рачунању изузети су сателити са елевационим углом мањим од 20 степени.

Пошто је временска промена у јоносфери примарни фокус, подаци су обрађени користећи временски интервал у трајању од 30 секунди. Овај приступ обезбеђује скуп података који је у стању да покупи неке краткорочне варијације у јоносфери и тако да тачан приказ онога што се стварно дешава на АГРОС референтној станици.

У циљу испитивања стварне временске варијабилности јоносфере изнад Србије, подаци су анализирани како би се квантификовало понашање јоносфере током другачијих сезонских периода. Да би смањили количину података који се анализирају изабран је дан када је примећена појачана јоносферска активност и дан са релативно мирном и стабилном јоносфером.

Варијабилност јоносфере је тестирана одузимањем сирових јоносферских кашњења ( $I$ ) у различитим временским интервалима. Како би се испитала могућност предикције  $I$  вредности, разлике су испитиване на следећи начин. Изабран је почетни узорак, а потом су  $I$  вредности за процесирану епоху, поређене са узорком. Да би се узео у обзир цео скуп података, временски узорак је померан унапред за 30 секунди (табела 6.5). На тај начин добиле су се вредности  $\Delta I$ .

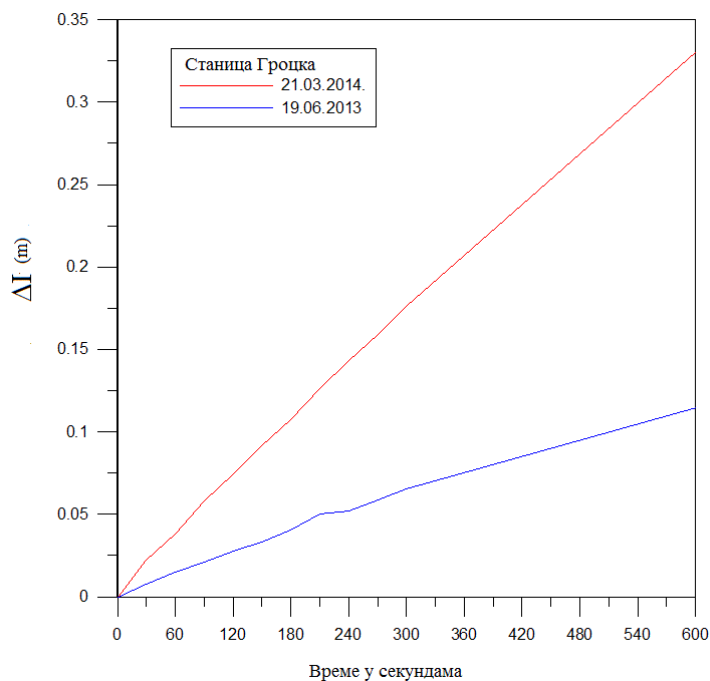
Могло би се очекивати да ће мањи временски интервали произвести  $\Delta I$  вредности које се добро слажу. Слика 6.11 представља декорелацију  $\Delta I$  током два периода, где је X-оса временски интервал у секундама, а Y-оса јоносферско кашњење у метрима.

Табела 6.5: Временски интервали тестирања (до 10 минута)

Померај у секундама											
Интервал	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s	210 s	240 s	270 s	300 s	600 s

Оба тестирана периода приказана на слици 6.11 показују веома сличан тренд декорелације, са постепеним повећањем разлика  $\Delta I$  када се повећава временски интервал. Међутим евидентно је да се у периоду појачане јоносферске активности (21.03.2014.год.) разлике  $\Delta I$  брже повећавају, што је и очекивано.

За даљу анализу трендова декорелације  $\Delta I$  преко Србије, низ хистограма је нацртан и приказан у Прилогу 2. Ови хистограми су представљени за сваку временску разлику. Хистограми претстављени у Прилогу 2, показују да подаци немају потпуно нормалну расподелу већ су померени у односу на средњу вредност. За дан 21.04.2014. године разлике су груписане углавном на два места. То се може објаснити утицајем поремећених јоносферских услова на скуп података, јер је у питању дан са појачаном јоносферском активношћу. Резултати из ових хистограма су бројчано представљени у табелама 6.6. и 6.7.



Слика 6.11: Временска варијабилност разлика јоносферских кашњења током два карактеристична периода појачане и мирне јоносферске активности

Табела 6.6: Статистички подаци јоносферског кашњења за различите временске интервале за дан 19.06.2013. године.

Параметар	n	Min	Max	Средња вредност	Стандардна девијација	Skew	Kurtosis
30s	2791	-0.010	0.008	0.000	0.003	-0.336	0.289
60s	2715	-0.018	0.015	0.000	0.005	-0.431	0.411
90s	2651	-0.026	0.021	0.000	0.008	-0.468	0.466
120s	2597	-0.035	0.028	0.001	0.010	-0.481	0.450
150s	2538	-0.043	0.033	0.001	0.013	-0.498	0.486
180s	2476	-0.051	0.040	0.001	0.015	-0.517	0.528
210s	2428	-0.059	0.055	0.001	0.018	-0.478	0.586
240s	2383	-0.068	0.052	0.001	0.020	-0.547	0.518
270s	2354	-0.076	0.059	0.001	0.023	-0.535	0.494
300s	2341	-0.084	0.065	0.001	0.025	-0.549	0.507
600s	2443	-0.154	0.115	0.002	0.049	-0.594	0.409

Табела 6.7: Статистички подаци јоносферског кашњења за различите временске интервале за дан 21.03.2014. године.

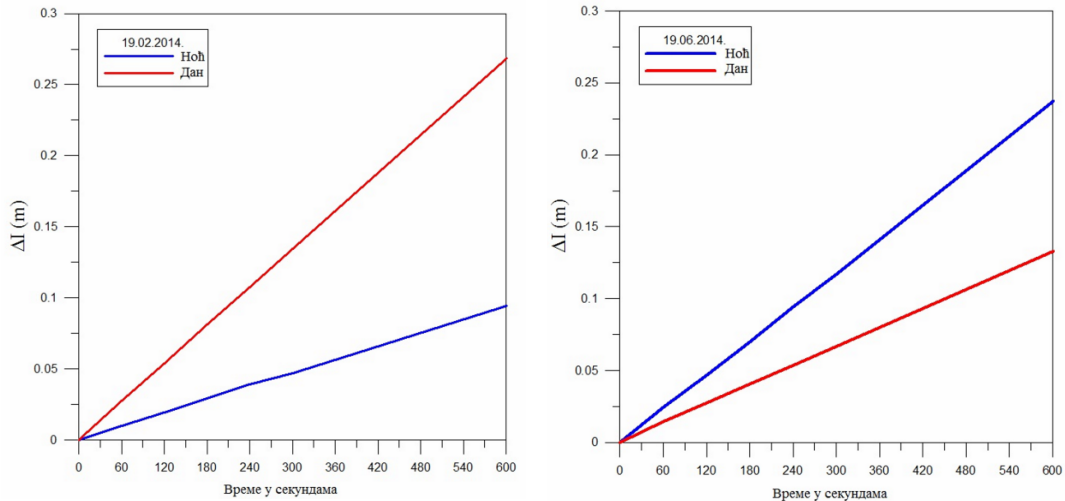
Параметар	n	Min	Max	Средња вредност	Стандардна девијација	Skew	Kurtosis
30s	2766	-0.019	0.022	0.001	0.008	0.416	-0.496
60s	2706	-0.036	0.038	0.001	0.016	0.416	-0.526
90s	2670	-0.061	0.058	0.002	0.024	0.401	-0.520
120s	2630	-0.070	0.075	0.002	0.031	0.412	-0.488
150s	2588	-0.081	0.092	0.003	0.039	0.427	-0.468
180s	2542	-0.095	0.107	0.003	0.046	0.428	-0.444
210s	2530	-0.109	0.126	0.004	0.053	0.412	-0.444
240s	2501	-0.123	0.143	0.004	0.061	0.415	-0.424
270s	2471	-0.157	0.159	0.004	0.067	0.397	-0.376
300s	2448	-0.151	0.176	0.005	0.074	0.386	-0.377
600s	2407	-0.319	0.330	0.003	0.140	0.261	-0.154

У Табелама 6.6 и 6.7 издвојени су временски интервали за које  $\Delta I$  резидуали достижу праг од  $\pm 5$  cm. Евидентно је да јоносфера достиже праг од  $\pm 5$ cm у опсегу од 90 секунди за период појачаних јоносферских активности, док се за мирне јоносферске услове праг од  $\pm 5$ cm достиже у интервалу од 180 до 210 секунди, тј. у просеку од 195 секунди.

## Поређење дневне и ноћне јоносфере

У уводном делу дисертације циљ је испитати да ли постоје било какве разлике у стабилности јоносфере током дневних часова у односу на ноћне часове. С обзиром да јоносфера обично има јаке варијације (поглавља 6.3.4 и 6.3.5) са мирнијим ноћним и активнијим дневним периодима, анализирана су два скупа података у трајању од 5 часова за неколико карактеристичних дана из 2013. и 2014. године. Први скуп података представља разлике јоносферских кашњења одређене за све сателите (изузимајући оне чији је елевациони угао мањи од 20 степени) у периоду од 22 UT до 3 UT . Други скуп података је изабран тако да представља период највеће дневне активности од 10 UT до 15 UT часова. Након тога вршено је поређење ових података.

Исход ове анализе даје неке неочекиване резултате. Периоди јуна 2013. и 2014. године показују већу активност јоносфере током ноћи док остали тестирани периоди дају очекивану појачану активност током дана и мирнију јоносферу током ноћи. Овај феномен је примећен и од стране других аутора који су се бавили овом тематиком (Wyllie, 2007). Као објашњење описане појаве нађена је корелација са трочасовним  $Kp$  индексом геомагнетне активности. Међутим, за податке истраживане у овој дисертацији поменута корелација није доказана. Наиме, из вредности  $Kp$  индекса, срачунатих за све тестиране дане на трочасовном нивоу, не виде се никаква значајна одступања која би могла изазвати дате инверзије у активности дневне и ноћне јоносфере. Овај проблем је потребно додатно истражити са повећаним узорком података, проширеним на скуп који би обухватио више узастопних година тако да се узму у обзир и максимални и минимални соларни услови. Такође, потребно је потражити везу са евентуалним нередовним варијацијама јоносфере односно са појавом изненадних јоносферских поремећаја (енг. Sudden Ionospheric Disturbances – SID) као што је појава и утицај соларних X - флорова. На слици. 6.12 могу се видети разлике примећене током дневних и ноћних часова за два карактеристична дана за станицу Гроцка. Остали истраживани периоди су приказани на сликама у Прилогу 3.



Слика 6.12: Дневне и ноћне разлике јоносферског кашњења 18.02.2014. год. и 19.06.2014. год.

У наставку истраживања вршена је анализа брзине декорелисања разлика јоносферског кашњења током дана и током ноћи. У табели 6.8 дат је приказ брзине достизања прага од  $\pm 5\text{cm}$  за јоносферско кашњење током дана и током ноћи. У јуну 2013. и 2014. године за два дана, разлике јоносферског кашњења током ноћи достижу праг од  $\pm 5\text{cm}$  у просеку за 180 тј. 150 секунди респективно, а током дана у просеку за 210 секунди за обе године. Дакле обрнуто од очекиваних вредности. За остале тестиране дане у јуну вредност од  $\pm 5\text{cm}$  достиже се од 210 до 600 секунди током ноћи и од 120 до 330 секунди током дана.

Током марта дужина интервала испод прага од  $\pm 5\text{cm}$  је у просеку 380 секунди током ноћи и 210 секунди током дана. Током септембра резултати показују дужину интервала испод прага од  $\pm 5\text{cm}$  у трајању у просеку од 600 секунди у току ноћи и 270 секунди током дана. Током децембра дужина интервала испод прага од  $\pm 5\text{cm}$  је у просеку 560 секунди током ноћи и 220 секунди током дана.

Подаци добијени из ове анализе резултата указују на непредвидиву природу јоносфере и да је изазов адекватно је моделовати. Ефекат сунчеве активности је појачан у периоду марта и децембра где је активност ноћне и дневне јоносфере очекивана. Поред тога, за период јуна, током два дана активност ноћне и дневне јоносфере је обрнута.

Табела 6.8: Временски интервали у којима је  $\Delta I$  (јоносферско кашњење) испод  $\pm 5\text{cm}$  (за дневне и ноћне периоде)

Датум	Ноћ (s)	Дан (s)
22. Март 2013	360	300
20. Јун 2013	210	120
21. Јун 2013	180	210
24. Септембар 2013	600	270
25. Септембар 2013	> 600	210
26. Септембар 2013	> 600	270
15. Октобар 2013	540	150
24. Децембар 2013	600	270
25. Децембар 2013	600	270
19. Фебруар 2014	330	90
20. Март 2014	300	180
21. Март 2014	480	150
19. Јун 2014	120	210
20. Јун 2014	600	330
19. Септембар 2014	570	210
23. Септембар 2014	600	420
24. Септембар 2014	360	270
23. Децембар 2014	450	240
24. Децембар 2014	> 600	120

#### 6.4 Одређивање утицаја D региона јоносфере на укупни TEC током појаве соларног X - флера

Као што је раније споменуто, F2 регион јоносфере као регион са високом густином електрона узрокује највећи део кашњења GPS сигнала и даје највећи удео у укупном TEC. Међутим, D регион као најнижи део јоносфере и регион са релативно ниском густином електрона, често се сматра занемарљивим узроком кашњења сигнала. Међутим, нагли интензивни процеси јонизације попут оних изазвани соларним X-флеровима могу изазвати релативно повећање густине електрона који су значајно већи у D региону него у регионима на већим висинама.



Из тог разлога, није исправно *a priori* искључити најнижи део јоносфере у периоду дејства X-флера и овај део дисертације се бави управо проучавањем ове проблематике која у литератури није довољно третирана.

Наиме, закључци у бројним истраживањима показују да мање интензивни X-флерови не узрокују практично никакве промене TEC (описан пре свега плазмом F-региона), док, истовремено, повећање густине електрона на висинама D региона може бити узрок повећања електронске концентрације за више од једног реда величине (Nina et al., 2011, Singh et al., 2014). Такође, током веома интензивног пораста X-зрачења висина максимума густине електрона може да се спусти на E - регион (Xiong et al., 2011).

Главни циљ овог истраживања је био да се испита да ли укупан садржај електрона у D региону ( $TEC_D$ ), може имати утицај на TEC, тако да се не може игнорисати у прорачунима у случају када је јоносфера погођена соларним X-флеровима. Дакле, овде је фокус на анализи варијације садржаја електрона у D региону и на његовом уделу у укупном TEC током соларног X-флера. Представљено истраживање се односи на дневну јоносферу када је утицај соларног X-флера јасно уочљив. Током ноћних услова нема видљивих реакција сигнала на X-флер догађај.

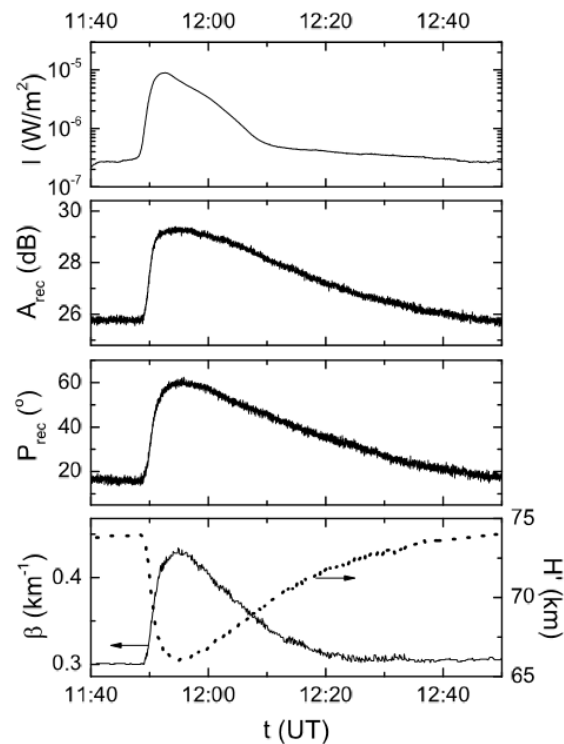
Истраживање је конципирано кроз две целине. Прво, проучавана је временска еволуција  $TEC_D$  и његов удео у укупном TEC за одређени догађај. Имајући у виду да X-флерови индукују сличне јоносферске промене у простору и времену, и да је циљ ове студије да прикаже поступак за прорачун, посматран је један типичан флер класе C8.8 који је примећен 5. маја, 2010 и детектован од стране GOES-14 сателита. За мониторинг D региона и рачунање  $TEC_D$  коришћена је техника базирана на простирању VLF сигнала релевантног за овај регион. Анализиран је DHO VLF сигнал емитован у Немачкој и примљен у Србији, док су TEC подаци преузети са сајта <http://www.bath.ac.uk/eleceng/invert/iono/rti.html>. Други део рада садржи статистичку анализу зависности  $TEC_D$  у тренутку максимума X-зрачења током соларног X-флера од њиховог максималног интензитета.

Резултати ове студије су публиковани у раду Todorovic Drakul et al., 2016.

### 6.4.1 Експериментална поставка и подаци опажања

Прорачуни су извршени на основу података прикупљених за три експерименталне поставке предвиђене за праћење соларног X-зрачења и јоносфере.

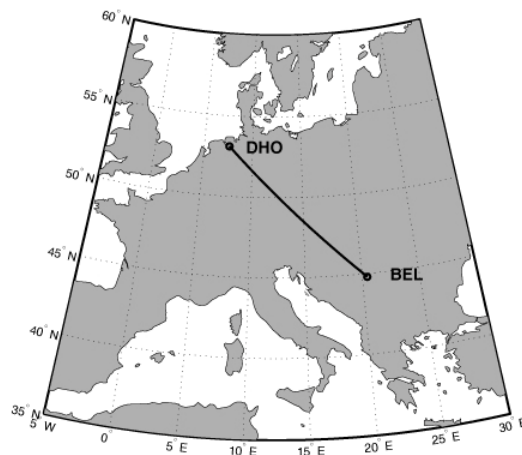
Прво, посматрани временски период је изабран на основу података флукса фотона евидентираног од стране National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) satellite GOES-14 ([http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new\\_full/2010/05/goes14/csv/g14\\_xrs\\_2s\\_20100505\\_20100505.csv](http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_full/2010/05/goes14/csv/g14_xrs_2s_20100505_20100505.csv)). Детаљно истраживање промена у уделу D региона у укупном ТЕС-у усмерено је на јоносферске поремећаје изазване соларним X-флером између 11:37 UT и 11:58 UT, 5. маја 2010. (Nina and Čadež, 2014 and Nina et al., 2015). Овај поремећај је евидентиран кроз повећање сунчевог зрачења у распону таласне дужине од 0.1 nm до 0.8 nm који је приказан на слици 6.13, у горњем панелу.



Слика 6.13: Временске зависности интензитета X-зрачења регистрованог GOES-14 сателитом у домену таласних дужина између 0.1 nm сам 0.8 nm (горњи панели), амплитуде и фазе (средњи панели) сигнала емитованог предајником DHO (Немачка) и регистрованог AWESOME VLF пријемником у Београду током Сунчевог X-флера који се десио 5. маја 2010.год. На доњем панелу су приказани моделовани Wait-ови параметри  $\beta$  (пуна линија, лева у оса) и  $H'$  (тачкасталинија, десна оса)

Друго, подаци за опажање D региона су добијени коришћењем VLF сигнала на фреквенцији од 23.4 kHz који емитује DHO предајник смештен у месту Rhauderfehn (Немачка), а детектује пријемник постављен на Институту за физику у Београду (Србија) (слика 6.14). Јоносферске пертурбације су откривене као амплитудне  $A_{\text{rec}}$  и фазне  $P_{\text{rec}}$  варијације посматраног VLF сигнала детектованог од стране AWESOME (енг. Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation Modelling and Education) VLF пријемника (Cohen et al., 2010) (слика 6.13, два средња панела). DHO предајник је изабран јер обезбеђује најјачи сигнал који се може детектовати пријемником у Београду. Овај сигнал се простире дуж релативно кратког пута (1300 km изнад Европе), што нам омогућава да претпоставимо независност параметара D региона на истој висини од географске локације у току периода опажања, што је важно за примењено моделовање.

Треће, израчунато је средње вертикално TEC које се односи на посматрану област. Подаци су преузети са сајта: <http://www.bath.ac.uk/elec-eng/invert/iono/rti.html> и одређени су на основу GNSS мерења применом MIDAS (енг. MultiInstrument Data Analysis System) томографског алгоритма (Mitchell and Spencer, 2003). Радни опсег покрива простор од северозапада који обухвата Rhauderfehn (Немачка) до југоистока, укључујући и подручје Београда (Србија).



Слика 6.14 Путања VLF сигнала емитованог DHO предајником лоцираним у Rhauderfehn-у у Немачкој и детектованог пријемником лоцираним у Београду.

#### 6.4.2 Моделовање D региона

За моделовање простирања сигнала кроз јоносферу потребно је познавати просторно-временску зависност густине електрона. У овом раду, густина електрона током X-флера се одређује поступком који је дат у Grubor et al., 2008., и користи се у многим другим радовима (види на пример Žigman et al., 2007, Kolarski et al., 2011, Nina et al., 2011). Овај поступак се заснива на поклапању промена уочених података VLF сигнала, амплитуде  $\Delta A_{rec}$  и фазе  $\Delta P_{rec}$ , са одговарајућим резултатима симулација  $\Delta A_{sim}$  и  $\Delta P_{sim}$  простирања VLF сигнала користећи LWPC нумерички модел (Ferguson, 1998) (видети поглавље 4.3). Регистроване промене амплитуде  $\Delta A_{rec}$  и фазе  $\Delta P_{rec}$  одређене су у односу на одговарајуће вредности у непоремећеним условима. У нашем случају промене износе 25.6 dB и 16.2°, респективно као што се види на слици 6.13, два средња панела. Што се тиче симулираних вредности амплитуде и фазе, оне се добијају користећи Wait-ов модел који је примењен на хоризонтално раслојену јоносферу (Wait and Spies, 1964) и који је уграђен у LWPC нумерички модел за простирање VLF/LF сигнала. Њега карактеришу два независна параметра: "оштрина"  $\beta$  и висина рефлексије сигнала  $H'$ . Ови параметри су улази за LWPC програм који затим одређује  $A_{sim}(\beta, H')$  и  $P_{sim}(\beta, H')$ , односно њихове одговарајуће промене  $\Delta A_{sim}(\beta, H')$  и  $\Delta P_{sim}(\beta, H')$  као излазне вредности. Коначно, параметри  $\beta$  и  $H'$  су одређени из стања најбољег фитовања експерименталних података са својим нумеричким пандамима:

$$\begin{aligned}\Delta A_{sim}(\beta, H') &\approx \Delta A_{rec}(t) \\ \Delta P_{sim}(\beta, H') &\approx \Delta P_{rec}(t)\end{aligned}\tag{6.4}$$

Према горњем односу (6.4), добијени парови Wait-ових параметара су временски зависни  $\beta = \beta(t)$  и  $H' = H'(t)$  као што је приказано на слици 6.13 (доњи панел) за разматрани случај. Густина електрона сада следи из Wait-ове једначине:

$$N_e(h, t) = 1.43 \cdot 10^{13} e^{-\beta(t)H'(t)} e^{(\beta(t) - \beta_0)h}\tag{6.5}$$

где је  $N_e$  у  $m^{-3}$ ,  $H'(t)$  и  $h$  у km,  $\beta$  у  $km^{-1}$  и  $\beta_0 = 0.15 km^{-1}$ .

Општи израз за  $TEC_D$  :

$$TEC_D(t) = \int_{h_b}^{h_t} N_e(h, t) dh \quad (6.6)$$

има следећи дводимензионални облик ( $y \text{ m}^{-2}$ ) ако се једначина (6.5) узиме у обзир:

$$TEC_D(t) = 1.43 \cdot 10^{16} e^{-\beta(t)H'(t)} \int_{h_b}^{h_t} e^{(\beta(t)-\beta_0)h} dh = 1000 \frac{N_e(h_t, t) - N_e(h_b, t)}{\beta(t) - \beta_0} \quad (6.7)$$

где су  $h_b = 60 \text{ km}$  и  $h_t = 90 \text{ km}$  горња и доња граница D региона, респективно.

Релативни удео  $TEC_D(t)$  у  $TEC(t)$  сада може бити дефинисан као:

$$r_D(t) = \frac{TEC_D(t)}{TEC(t)} \quad (6.8)$$

На крају, за анализу делимичног удела појединих подслојева D региона у промени  $TEC_D$  рачунамо  $\Delta TEC_{Di}$  за  $i$ -ти подслој и добијамо аналогно једначини (6.7):

$$\Delta TEC_{Di}(t) = 1000 \frac{N_e(h_{i+1}, t) - N_e(h_i, t)}{\beta(t) - \beta_0} \quad (6.9)$$

где је:

$$h_i = h_b + (i-1)\delta h, \quad i=1, \dots, i_{\max} \quad (6.10)$$

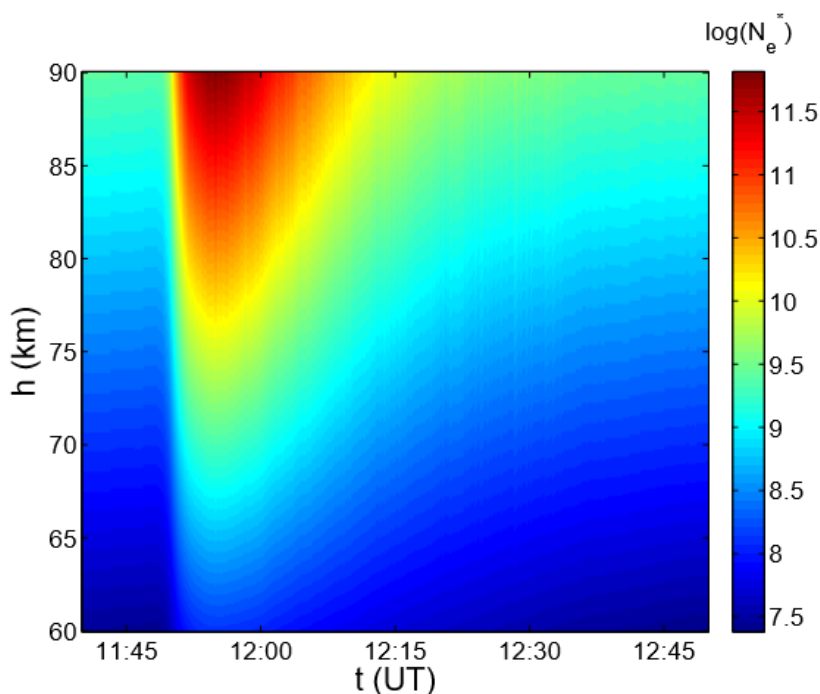
висина доње границе  $i$ -тог подслоја,  $i_{\max} = 15$  је укупан број разматраних подслојева узетих са истом дебљином  $\delta h = 2 \text{ km}$  тако да је  $h_t = h_b + i_{\max} \delta h$ .

### 6.4.3 Временске промене $TEC_D$ карактеристика

Тежиште овог дела студије је анализа временске еволуције карактеристика  $TEC_D$  током соларног X-флера који погађа Земљину атмосферу и максимални интензитет X-флера који утиче на  $TEC_D$  (Todorovic Drakul et al., 2016).

За истраживање временске еволуције  $TEC_D$  коришћени су подаци издвојени из DHO VLF сигнала регистрованог AWESOME системом пријемника у Београду у време утицаја соларног X-флера на јоносферу који се десио 5. маја 2010. године, а за рачунање одговарајућих параметара примењене су процедуре објашњене у претходном одељку. Овај догађај представља случај јасног одговора D региона на разматрану пертурбацију јер нису видљиви интензивни утицаји других извора пертурбације сигнала (види реакције сигнала на слици. 6.13). Из тог разлога овај догађај је такође третиран у ранијим радовима (Nina and Čadež, 2014, Nina et al., 2015). Поред тога, овај X-флер није превише интензиван (класа C8.8) и, као што ће бити приказано у анализи представљеној у другом делу овог истраживања, он може да произведе мање промене у  $TEC_D$  него догађаји већег интензитета. Дакле, ова анализа се такође односи на испитивање потребе за инклузију ниске јоносфере у моделовању малих промена  $TEC$ . Ово је важно за практичну примену, јер X-флери класе C (X-зраци таласних дужина 0.1 nm - 0.8 nm са максималним интензитетом од  $10^{-6} \text{ W/m}^2$  -  $10^{-5} \text{ W/m}^2$ ) су чешћи од оних класа M и X (X -зраци таласних дужина 0.1 nm - 0.8 nm са максималним интензитетом од  $10^{-5} \text{ W/m}^2$  -  $10^{-4} \text{ W/m}^2$  и изнад  $10^{-4} \text{ W/m}^2$ , респективно). Ово је видљиво током целог периода сунчевог циклуса. На пример, GOES сателит бележи 28 и 0 X-флери C и M класе, респективно, у 2009. години (минимум соларног циклуса), док је тај број био 1797 и 207 током 2014. године (максимум соларног циклуса).

Као што се види из једначине (6.6) одређивање  $TEC_D$  захтева познавање расподеле густине електрона према висини. Дакле, прво се примењује једначина (6.5) са сетом Wait-ових параметара  $\beta$  и  $H'$  (слика 6.13, доњи панел) срачунатих по утврђеној методологији описаној у претходним поглављима. Висина и временска зависност добијене моделоване густине електрона  $N_e(h,t)$  приказана је на слици 6.15. Овде се може видети да најизраженија варијација густине електрона у зависности од висине настаје у тренутку максималне густине електрона око 11:54 UT. Такође, види се да је максимални пораст у односу на почетну вредност добијен на 90 km (за фактор од преко 250). Ове особине густине електрона доприносе у садржају  $TEC_D$  тако да време еволуције и њена унутрашња вертикална структура произилазе из појединих хоризонталних слојева као што је приказано на сликама 6.16 и 6.17.



Слика 6.15: Површински приказ  $\log(N_e^*(t, h))$  у функцији времена  $t$  и висине  $h$  током посматраног соларног X-флера, где је  $N_e^* = N_e / N_e^0$  и  $N_e^0 = 1 \text{ m}^{-3}$ .

Временска промена  $\text{TEC}_D$  добијена из једначине (6.7) и приказана на слици 6.13 (горњи панел) показује да се  $\text{TEC}_D$  повећава од 0.0017 TECU до 0.2302 TECU (1 TECU =  $10^{16} \text{ m}^{-2}$ ) растући за фактор 136. Истовремено, одговарајући подаци за  $\text{TEC}$  добијени са сајта ([uk/elec-eng/invert/iono/rti.html](http://uk/elec-eng/invert/iono/rti.html)) показују повећање од 5.74245 у 11:45 UT (пре појаве флера) до 6.04857 у 12:00 UT (неколико минута после појаве максималних пертурбација у D региону).

Иако је прилично груба временска резолуција од 15 min која се користи у прикупљању  $\text{TEC}$  података, очигледно је да се  $\text{TEC}$  повећава процентуално значајно мање од  $\text{TEC}_D$  (табела 6.9), што је јасно видљиво на слици 6.15 где је приказан удео  $\text{TEC}_D$  у укупном  $\text{TEC}$  дат као  $r_D = \text{TEC}_D / \text{TEC}$  који се повећава од 0.03% до максималних не мање од 1.5% (овако добијени резултати су срачунати за временски интервал узорковања  $\text{TEC}$  података које је много грубљи него у случају  $\text{TEC}_D$ ).

За анализу  $\text{TEC}_D$  услед утицаја који долазе из различитих висина D региона, нпр. да би се испитао утицај посматраног соларног X-флера на различите делове D

региона, извршена је његова подела на хоризонталне слојеве једнаке дебљине  $\Delta h = 2 \text{ km}$  и рачунате су повезане временске зависности за парцијално  $\Delta \text{TEC}_{Di}(t)$  за  $0 \text{ km} < h < 90 \text{ km}$ . Слика 6.17. показује да су промене најинтензивније на врху D региона што је у складу са сликом 6.15. где је приказана зависност густине електрона.

Међутим, варијације пертурбација у зависности од надморске висине се јасније виде гледајући релативно повећање  $\Delta \text{TEC}_{Di}(t)$  у односу на за непо ремећене услове  $\Delta \text{TEC}_{Di0}$ :

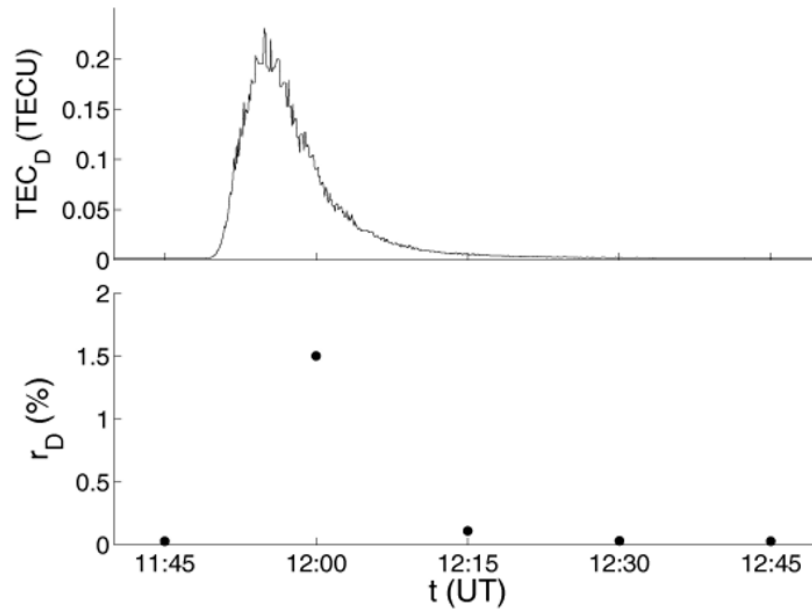
$$r_i^{\Delta}(t) = \frac{\Delta \text{TEC}_{Di}(t) - \Delta \text{TEC}_{Di0}}{\Delta \text{TEC}_{Di0}} \quad (6.11)$$

где је  $\Delta \text{TEC}_{Di0}$  добијено из једначине (6.7) коришћењем карактеристика Wait-ових параметара за непетурбовану јоносферу, према Grubor et al. 2008. Слика 6.18 показује да  $r(t)$  значајно варира у зависности од висине  $h$  само у периоду најснажнијих плазма поремећаја D региона (достигу два реда величине).

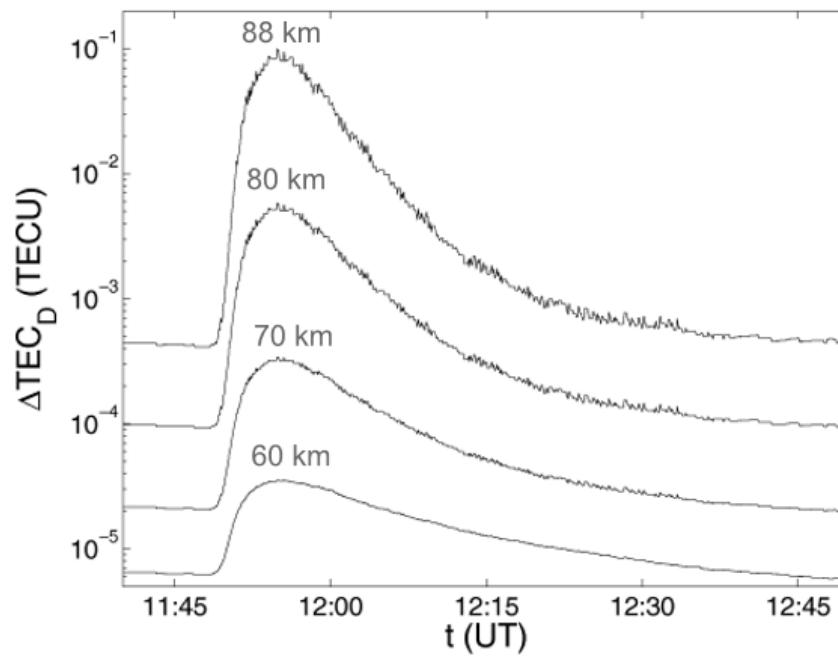
Табела 6.9:  $\text{TEC}_D$ ,  $\text{TEC}$  и  $r_D$  током поремећаја D-региона.

$t$ (UT)	$\text{TEC}_D$ (TECU)	$\text{TEC}$ (TECU)	$r_D$
11:45	0.00165	5.74245	0.02868
12:00	0.09191	6.04857	1.51959
12:15	0.00612	5.51302	0.11107
12:30	0.00221	6.98893	0.03157
13:45	0.0018	6.21602	0.029

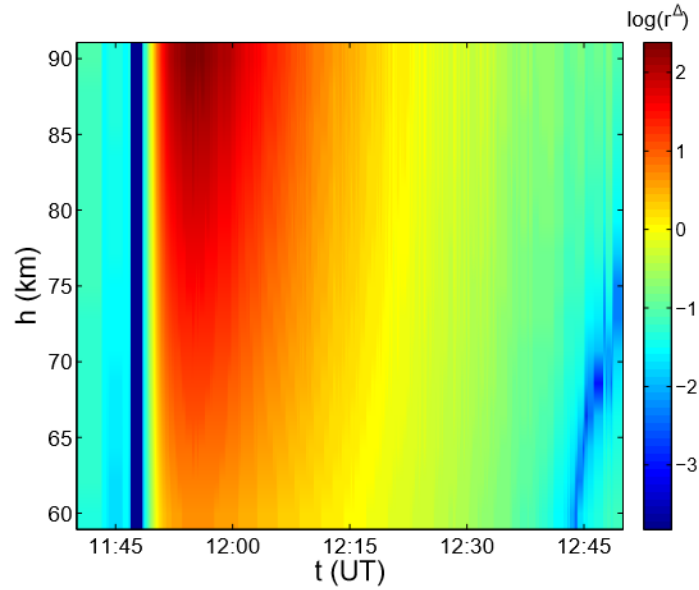




Слика 6.16: Временска промена  $TEC_D$  (горњи панел) и његов утицај на  $TEC$  (доњи панел) током посматраног соларног X-флера.



Слика 6.17: Временска промена  $\Delta TEC_D$  у слојевима (дебљине од 2 km) који се налазе на висинама 60 km, 70 km, 80 km и 88 km током посматраног соларног X-флера.



Слика 6.18: Површински приказ релативних промена  $\Delta\text{TEC}_{\text{D}_i}(t, h)$  у односу на релевантне вредности за непертурбоване услове у функцији времена  $t$  и висине  $h$  датог једначином (11) у току посматраног соларног X-флера.

#### 6.4.4 Карактеристике $\Delta\text{TEC}_{\text{D}}$ при максимуму интензитета X-флера

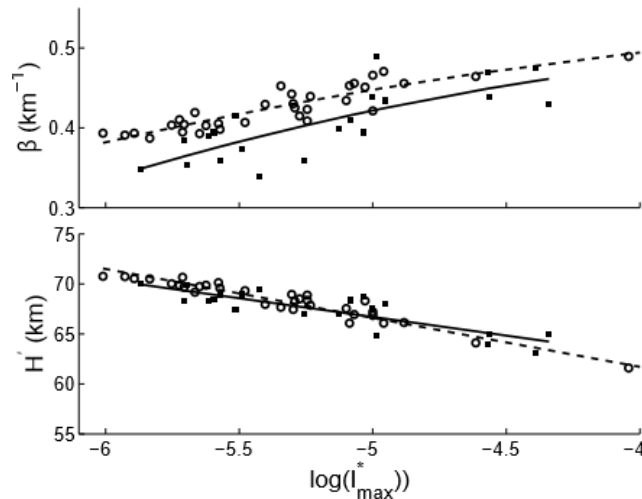
У истраживањима зависности  $\text{TEC}_{\text{D}}$  од максималног интензитета зрачења X-флера  $I_{\text{max}}$  коришћене су статистичке анализе за различите флере из Thomson et al., 2005 and Grubor et al., 2008. Рачунање  $\text{TEC}_{\text{D}}$  за максимални интензитет X-флера је извршено на основу Wait-ових параметара  $\beta$  и  $H'$  за анализиране догађаје. Прво је извршено фитовање параметара изразима:

$$\beta(I_{\text{max}}) = C_1 + C_2 \log(I_{\text{max}}^*) + C_3 \log(I_{\text{max}}^*)^2 \quad (6.12)$$

$$H'(I_{\text{max}}) = D_1 + D_2 \log(I_{\text{max}}^*) \quad (6.13)$$

(како је приказано на слици 6.19) где су  $I_{\text{max}}^* = I_{\text{max}} / I_0$ ,  $I_0 = 1 \text{ W/m}^2$ , а коефицијенти  $C_1, C_2, C_3, D_1, D_2$  су дати у табели 6.10. Ово фитовање се затим користи у одређивању  $N_e$  и  $\text{TEC}_{\text{D}}$  пратећи претходно описан поступак. Добијене зависности  $\text{TEC}_{\text{D}}$  од  $I_{\text{max}}$  за флере класе C и M на слици 6.20 показују повећање  $\text{TEC}_{\text{D}}$  са повећањем  $I_{\text{max}}$ . Имајући у виду да су ове вредности значајно веће од оних за стабилну јоносферу, оне су коришћене за промене  $\text{TEC}_{\text{D}}$  изазване соларним X-флером на његовом максимуму интензитета зрачења. За C класе

флерова  $TEC_D$  се креће се од око 0.01 TECU до 0.1 TECU за посматране тренутке времена, и достиже неколико TECU за M класе флерова који утичу на простирање електромагнетних таласа и постају важни за практичну употребу GNSS сигнала у различитим применама. На овој слици може се уочити да подаци из Thomson et al., 2005. дају веће  $TEC_D$  од података из Grubor et al. 2008. Овакве разлике су очекиване, јер се први подаци односе на ниже географске ширине D региона где је локално јонизујуће сунчево зрачење јаче што за последицу има веће локалне  $TEC_D$  у поређењу са средњим географским ширинама D региона где је локално зрачење слабије. Релевантне фитоване криве изражене једначинама (6.12) и (6.13) приказане су пуном и испрекиданом линијом за први и други улазни сет података, респективно.

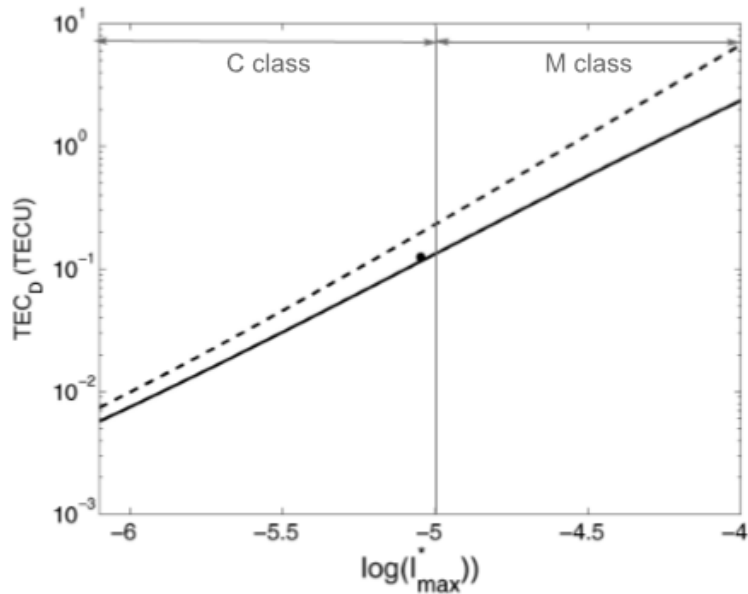


Слика 6.19: Wait-ови параметри у тренутку максималног интензитета зрачења X-флера дати у Grubor et al. 2008. (црни квадрати) и Thomson et al. 2005. (крugови) у функцији,  $I_{\max}^* = I_{\max} / I_0$  где је

$$I_0 = 1 \text{ W/m}^2 .$$

Табела 6.10: Фитовани коефицијенти коришћени у једначинама (12) и (13).

Извор података	Grubor et al. 2008.	Thompson et al. 2005.
C1	0.3872	0.4916
C2	-0.0841	-0.0385
C3	-0.0154	-0.0095
D1	48.02	42.12
D2	-3.7381	-4.8976



Слика 6.20: Зависност  $TEC_D$  у тренутку максималног интензитета зрачења X-флера класе C и M срачуната из података датих у Grubor et al. 2008. (пуна линија) и Thomson et al. 2005. (испрекидана

линија) у функцији  $I_{\max}^* = I_{\max} / I_0$ , где је  $I_0 = 1 \text{ W} / \text{m}^2$ .

#### 6.4.5 Значај добијених резултата

На основу свега претходног, добијени резултати показују:

- $TEC_D$  се може повећати за више од два реда величине (у посматраном случају интензивног флера расте од 0.0017 TECU до 0.2302 TECU што је еквивалентно повећању са фактором 136).
- Релативно повећање  $\Delta TEC_D$  према његовим почетним вредностима је најизраженије у тренутку максималних пертурбација плазме у D региону када достиже два реда величине у посматраном случају.
- Удео  $TEC_D$  варијација у укупном TEC је значајно већи током максималних поремећаја у односу на непоремећено стање. У посматраном случају, оне се повећавају са 0.03% на више од 1.5% неколико минута након максимума пертурбација.
- Значајно повећање  $TEC_D$  у односу на  $I_{\max}$  се види у време максималног интензитета X-зрачења. Вредности добијене применом LWPC нумеричког модела за пропацију VLF/LF радио сигнала на основу Wait-овог модела

јоносфере указују на то да  $TEC_D$  узима вредности од 0.01 TECU до 0.1 TECU за класе C флерова у одговарајуће време, па све до неколико TECU у случају класа M флерова.

Из ових закључака можемо видети да промене јонизације у D региону изазване соларним X-флеровима јесу важне приликом моделовања простирања GNSS сигнала и његове практичне примене у мерењима током трајања флера. Утицај флерова се значајно повећава са порастом  $I_{max}$  и не може се занемарити поготово у прецизним мерењима попут оних у области геодезије.

На крају, треба истаћи да представљена студија отвара бројна питања везана за утицај D региона на јоносферске ефекте и простирање GNSS сигнала током интензивних поремећаја изазваних соларним X-флеровима.

## **6.5 Моделовање јоносфере изнад Србије**

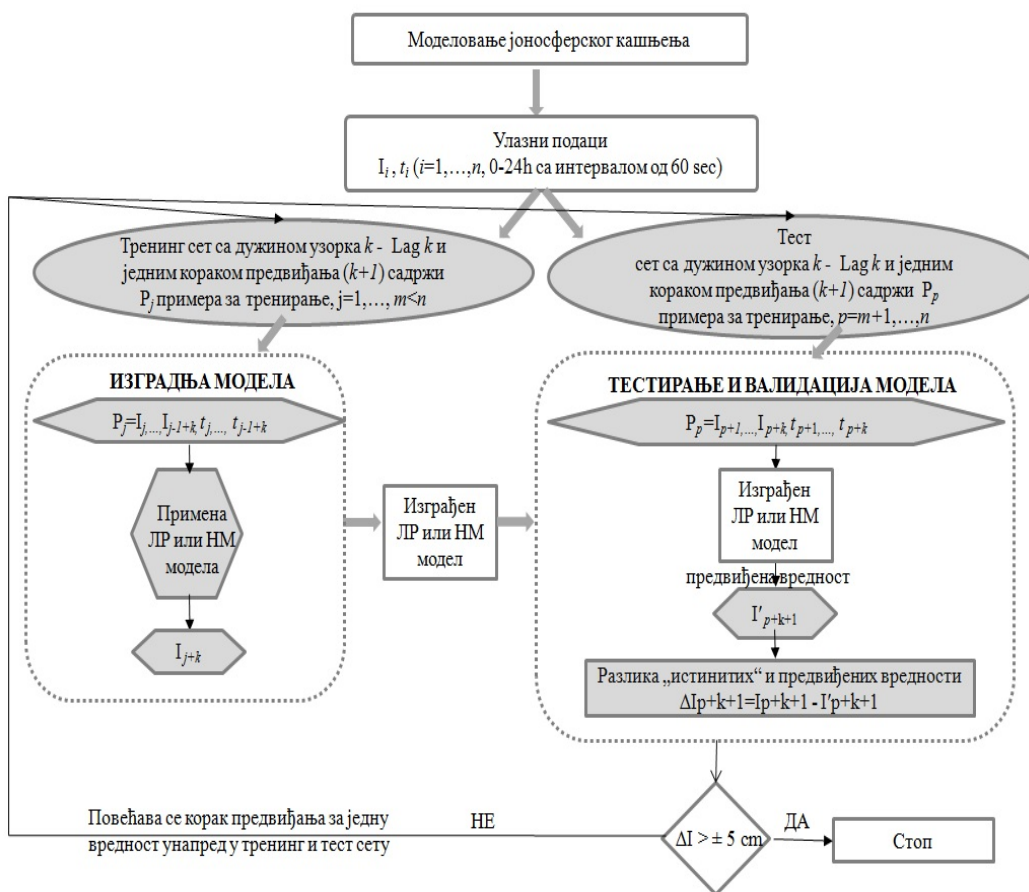
Ово поглавље је посвећено изради одговарајућег модела за потребе предикције јоносферских корекција задовољавајуће тачности погодног за мрежне RTK примене на територији Србије.

Истраживање се спроводи у циљу израде новог модела јоносфере погодног за услове Србије који би имали директне и индиректне апликације у процесу надоградње тренутне АПРОС инфраструктуре. Предвиђено је да овај модел може померити Србију корак ближе остварењу широког државног мрежног RTK система који би био у стању да обезбеди центиметарску тачност са минималним инфраструктурним захтевима. Подаци за тестирање модела, су исти као они који су коришћени у поглављу 6.3.6.

Пошто позиционирање у реалном времену у мрежном RTK окружењу захтева емитовање тачних јоносферских корекција корисницима на терену, грешке због утицаја јоносфере треба знати унапред. Ово захтева прецизну предикцију јоносфере користећи утврђене технике моделовања.

Технике моделовања презентоване у доњем делу текста, могу се применити на било који јоносферски сценарио, међутим, овде представљени резултати важе за специфични сет јоносферских услова.

Предиктивни модел који је примењен заснива се на коришћењу претходно одређених јоносферских резидуала једне референтне станице. Коришћене су две методе моделовања за предвиђање разлика јоносферских резидуала изнад Србије: линеарна регресија (ЛР) и метод неуронских мрежа (НМ) (видети поглавље 5). На дијаграму приказаном на слици 6.21 може се видети шема примене ових модела.



Слика 6.21: Дијаграм шеме примене модела линеарне регресије и неуронских мрежа.

### 6.5.1 Линеарна регресија (ЛН)-резултати

Користећи методу описану у поглављу 5.3.1 вршена је предикција јоносферских кашњења. Овај приступ покушава да моделује однос између две варијабле постављањем регресионе линије која најбоље одговара подацима. У овом случају две варијабле су време (или кашњење) и јоносферски резидуали. Метод најмањих квадрата је коришћен за одређивање најбољег уклапања узорка података минимизирањем суме квадрата вертикалних одступања од сваког података у односу на линију.

Линеарни регресиони модел (ЛР) је употребљен за екстраполацију података унапред из стационарног узорка фиксне величине. Разлике између предвиђених и "истинитих" јоносферских резидуала су израчунате на основу интервала узорака од 60 секунди. Након што су ове вредности израчунате величина узорка је повећавана за 60 секунди и поступак је понављан до краја сваког периода опажања. За потребе креирања тренинг сета и тест сета података коришћен је софтвер Weka3 (енг. Waikato Environment for Knowledge Analysis) (Hall et al., 2009). Поређени су узорци различите величине (тзв. *Lag*) и тестирани су у циљу сазнања који узорак даје боље резултате као и да се утврди која величина узорка је оптимална. Коришћене су следеће величине узорака:

- *Lag 6* – одговара узоруку дужине 6 минута, односно један узорак је на сваких 60 секунди
- *Lag 12* – одговара узоруку дужине 12 минута
- *Lag 24* – одговара узоруку дужине 24 минута

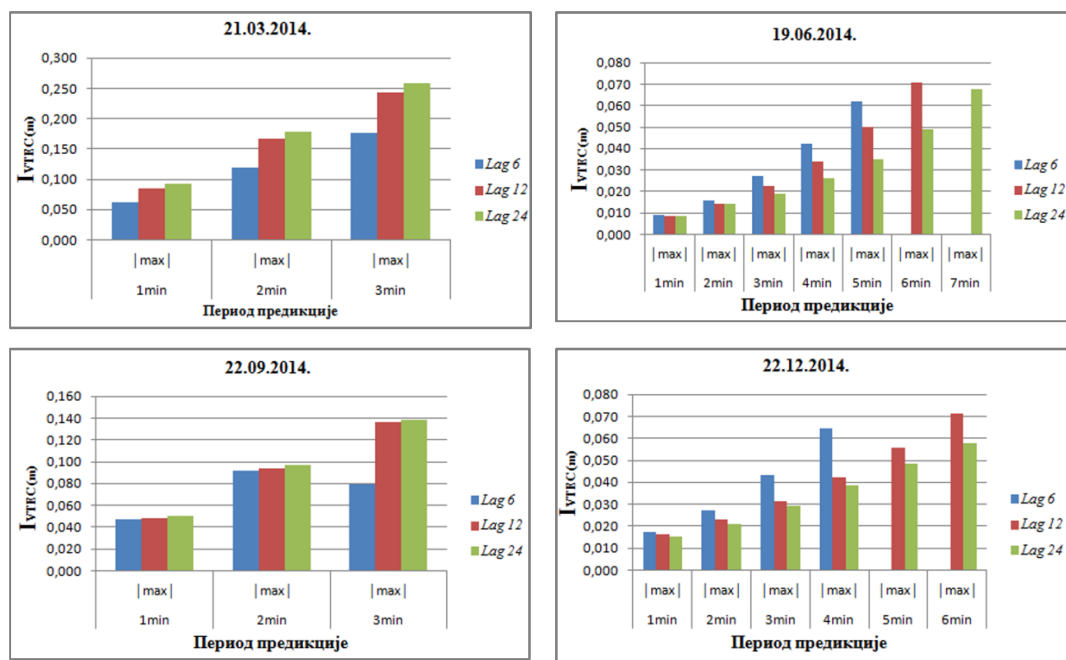
Са тестирањем је прекидано када је достиган праг кашњења од  $\pm 5$  cm.

У овој анализи обухваћена су четири дана 2014. године. Избор је био такав да се обухвати свако годишње доба (узорак за сваку сезону) и да се изврши анализа и за дане када је јоносфера мирна и када је поремећена.

Када се упореде резултати добијени из сетова података различитих величина (*Lag 6*, *Lag 12* и *Lag 24*) може се рећи да за ЛР модел има ограничене могућности које су у корелацији са стањем јоносфере. За 21. Март као дан са најјачом јоносферском активношћу, модел није у стању да предиктује корекције испод

прага од  $\pm 5$  cm за тестиране узорке (Слика 6.22). За 19. Јун као дан са релативно мирнијом јоносфером, модел најбољу предикцију врши за најдужи узорак, тј. *Lag 24* и у стању је да предиктује корекције испод  $\pm 5$  cm за 6 минута унапред. Слична ситуација је и за 22. Септембар, с тим да је период задовољавајуће предикције 3 минута. То се може објаснити нешто узбурканијом јоносфером у односу на Јун. За 22. Децембар најбољу предикцију обезбеђује узорак средње дужине, тј. *Lag 12* који је у стању да коректно изврши предикцију кашњења за 5 минута унапред. У Прилогу 4, могу се видети грешке између реалних и предиктованих вредности за све величине узорака за два дана (21. Март и 19. септембар). Ова два дана су изабрана као репрезент могућности модела за предиктовање корекција током максималних и минималних услова јоносфере. Може се приметити да се за вредности око поноћи јављају нагли скокови и да модел овде има најлошија решења.

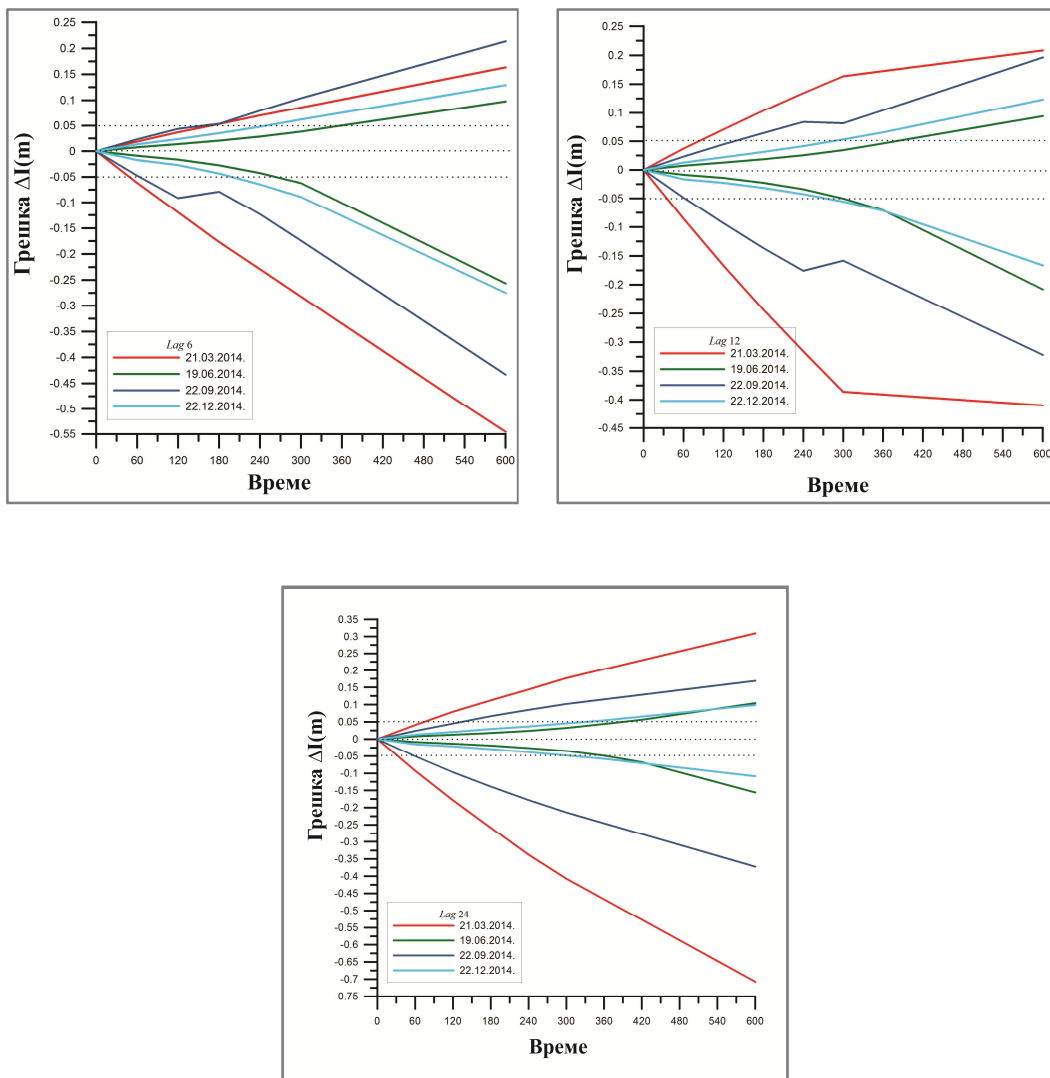
Могућности ЛР модела за предвиђање јоносферског кашњења за сва годишња доба током 2014. године приказане су на слици 6.23. Резултати показују да је дистрибуција кашњења за јоносферски мирне дане на сличном нивоу, док је за Март изван перформанси у односу на остала три дана.



Слика 6.22.: Приказ предиктованих јоносферских корекција за четири дана 2014. године у зависности од величине узорака (*Lag 6*, *Lag 12*, *Lag 24*) .



Ово је такође приказано у Табели 6.11 где је евидентно да Март има мањи период предикције кашњења. Сви графици приказују линеарну временску декорелацију кашњења, међутим за максималне јоносферске услове (21. Март) модел није у стању да предиктује кашњење испод нивоа од  $\pm 5$  cm дуже од 50 секунди. Треба напоменути да се сви посматрани резултати односе на целодневни скуп података, узимајући у обзир и нагле скокове око поноћи.



Слика 6.23: Дистрибуција кашњења одређена линеарним регресионим моделом користећи *Lag 6*, *Lag 12* и *Lag 24* узорак за сва годишња доба (време изражено у секундама).

Табела 6.11: Приближни временски интервали у којима је јоносферско кашњење добијено применом линеарног регресионог модела испод  $\pm 5$  cm.

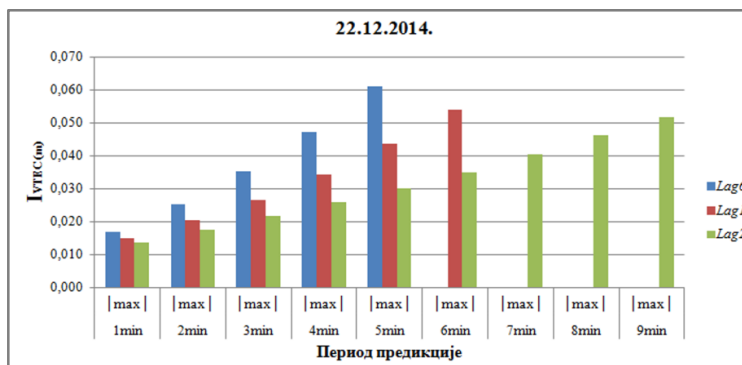
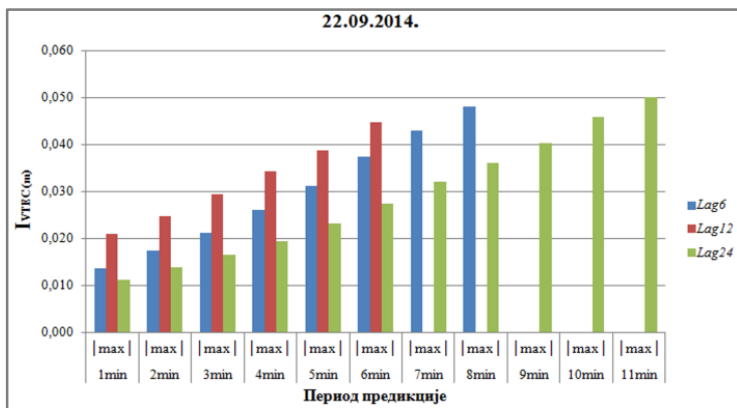
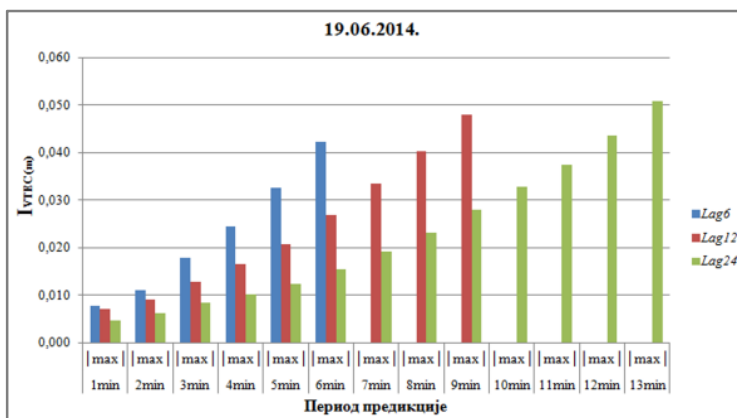
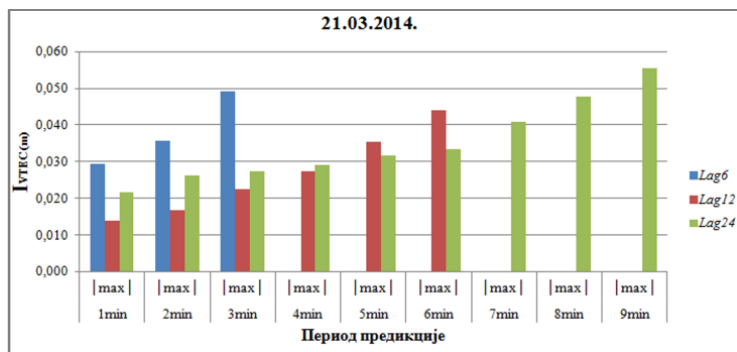
	<i>Lag 6</i>	<i>Lag 12</i>	<i>Lag 24</i>
<b>21. Март</b>	50 s	40 s	< 40 s
<b>19. Јун</b>	240 s	300 s	360 s
<b>22. Септембар</b>	60 s	60 s	60 s
<b>22. Децембар</b>	180 s	240 s	300 s

Модел је дакле у стању да много боље предиктује вредности кашњења, ако се посматра узорак изузимајући поноћ (предикција за 120 секунди у границама испод  $\pm 5$  cm), што је значајно, јер је већина геодетских радова ограничена на дневне часове. Посматрајући податке у Табели 6.11, може се закључити да је за услове мирне јоносфере применљив ЛР модел уз оптималну употребу узорка података дужине 24 минута (*Lag 24*). За дане појачане јоносферске активности, могуће је користити модел са краћим узорком (*Lag 6*) података, али за предикцију дневних корекција, што у принципу и јесте задатак.

### 6.5.2 Неуронске мреже (НМ)-резултати

У овом делу истраживања испитиване су могућности техника неуронских мрежа (НМ) за предикцију јоносферских корекција (видети поглавље 5.3.2). Тестирање је вршено у софтверу Weka3 и примењен је исти поступак као код линеарне регресије описане у претходном одељку. Такође, коришћени су исти сетови података као и исти интервали узорака, како би резултати два модела били упоредиви.

Код тестирања применом неуронских мрежа употребљена је *Multi-Layer Perceptron* (MLP) функција са *softplus* функцијом активације. Да би користили те алгоритме на одговарајући начин било је неопходно наћи оптималну комбинацију броја неурона у скривеном слоју. За сваку дужину узорка добијена је комбинација неурона која одговара том сету података. Па је тако за *Lag 6* број скривених неурона 6, за *Lag 12* број је 12 и за *Lag 24* број неурона је 24.



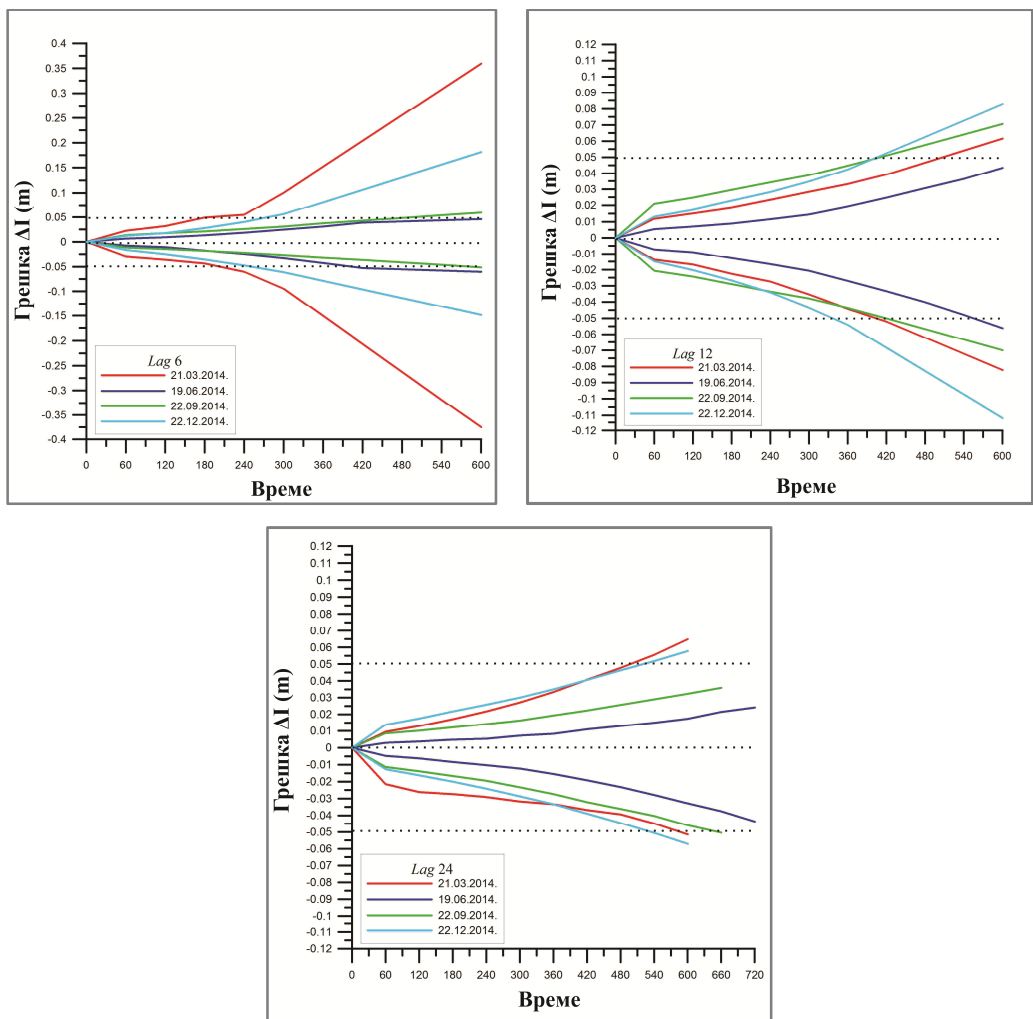
Слика 6.24: Приказ предиктованих јоносферских корекција за четири дана 2014. године у зависности од величине узорка (*Lag 6, Lag12, Lag24*) .

Грешке између реалних и предиктованих вредности за све величине узорака за два дана (21. Март и 19. септембар) приказане су у Прилогу 5. На основу резултата представљених у Прилогу 5 и на слици 6.24 може се закључити да је НМ модел за 21. Март као дан са најјачом јоносферском активношћу, у стању да предиктује корекције испод прага од  $\pm 5$  cm за све тестиране дужине узорака. За *Lag 6* модел даје задовољавајуће резултате предикције за 3 минута унапред. За *Lag 12* предикција је испод нивоа  $\pm 5$  cm за 6 минута. Најбољи резултати се добијају за *Lag 24* и износе 8 минута. Што се тиче перформанси модела за дан 19. Јун (мирна јоносфера), модел најбољу предикцију врши за најдужи узорак, тј. за *Lag 24* и у стању је да предиктује корекције испод  $\pm 5$  cm чак за 12 минута унапред. За 22. Септембар, период задовољавајуће предикције је 10 минута. Међутим, овде се може уочити да је средња дужина узорка (*Lag 12*) најлошији предиктор. Најбоља предикција за 22. Децембар обезбеђује такође узорак највеће дужине, тј. *Lag 24* који је у стању да коректно изврши предикцију кашњења за 8 минута унапред (табела 6.12).

На слици 6.25 приказане су могућности примене неуронских мрежа за предвиђање јоносферског кашњења за сва годишња доба током 2014. године. Сви графици приказују да је применом овог модела могуће предиктовати јоносферско кашњење у свим случајевима испод 0.40 m са кашњењем од 10 минута. Међутим за узорак дужине 12 минута, тј. за *Lag 12* тачност предиктовања је испод 0.12 m, док је за узорак дужине 24 минута тј. за *Lag 24* тачност чак испод 0.07 m.

**Табела 6.12: Приближни временски интервали у којима је јоносферско кашњење добијено применом неуронских мрежа испод  $\pm 5$  cm.**

	<i>Lag 6</i>	<i>Lag 12</i>	<i>Lag 24</i>
<b>21. Март</b>	180 s	360 s	480 s
<b>19. Јун</b>	360 s	540 s	720 s
<b>22. Септембар</b>	480 s	360 s	600 s
<b>22. Децембар</b>	240 s	300 s	480 s



Слика 6.25: Дистрибуција кашњења одређена применом неуронских мрежа користећи *Lag 6*, *Lag 12* и *Lag 24* узорак за сва годишња доба (време изражено у секундама).

Из резултата приказаних у табели 6.12 евидентно је да је за предиктовање јоносферског кашњења, оптимално користити дужи узорак података односно *Lag 24* за све услове јоносфере и да се у најгорем случају добија јоносферско кашњење испод 7 cm са временским кашњењем од 10 минута.

### 6.5.3 Поређење модела

На основу анализе резултата добијених из испитивања предиктивних модела линеарне регресије и неуронских мрежа у претходним поглављима, добијене су

вредности приказане у Табели 6.13 где је представљено директно поређење могућности модела.

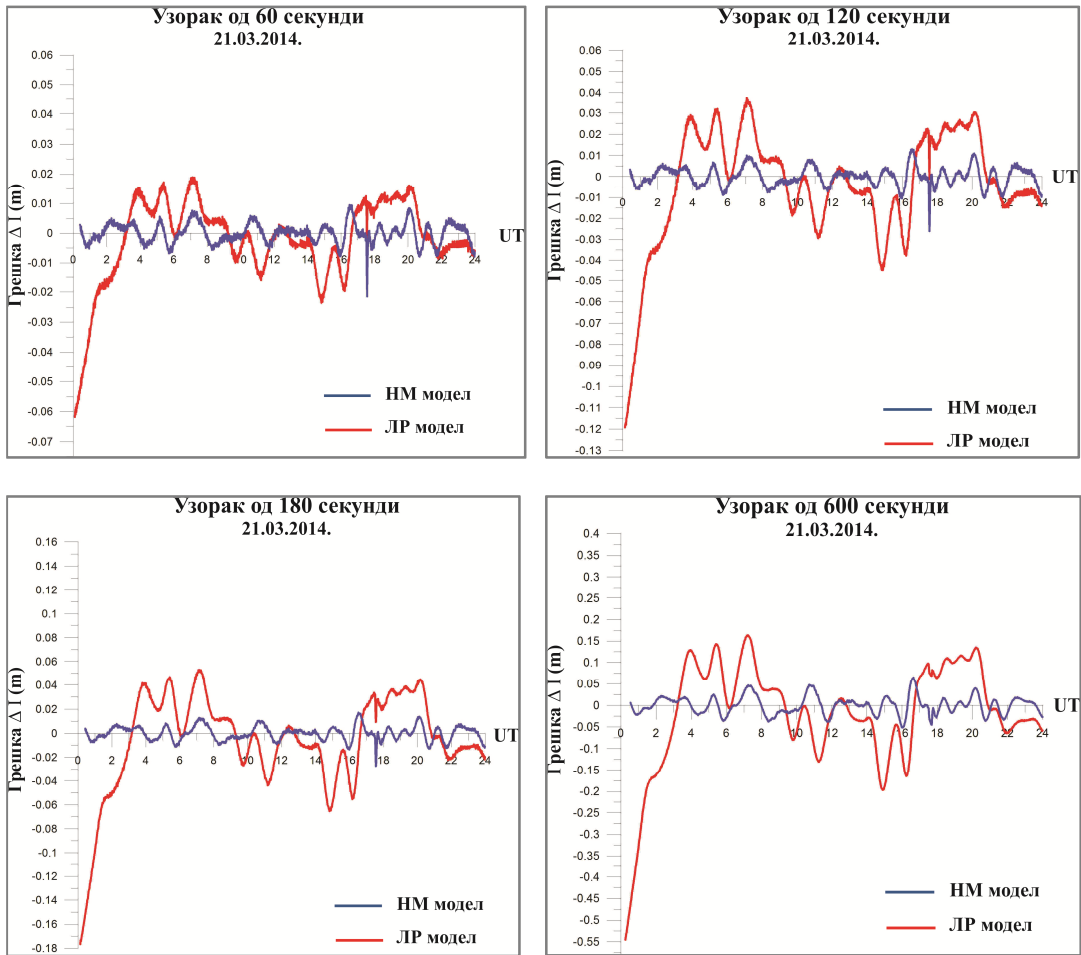
Резултати приказани у Табели 6.13 показују да оба модела, за мирне јоносферске дане, могу да репродукују корекције кашњења које су у складу са степеном декорелације јоносфере. Међутим за дане када је јоносферска активност појачана, ЛР модел не даје добре резултате. С друге стране, НМ шема моделирања је у стању да се прилагоди различитим сезонским условима и обезбеђује резултате који су одраз онога што се стварно дешава у јоносфери.

Табела 6.13: Поређење линеарног регресионог модела и модела неуронских мрежа

Датум	Јоносфера	ЛР	НМ
21. Март 2014.	60 s	50 s	480 s
19. Јун 2014.	180 s	360 s	720 s
22. Септембар 2014.	150 s	60 s	600 s
22. Децембар 2014.	90 s	300 s	480 s

Даље, при поређењу НМ и ЛР приступа моделовања, може се запазити да је ЛР модел више подложен утицају краткорочних кретања у подацима изазваним шумом, вишеструком рефлексijом и краткорочним јоносферским варијацијама. То се нарочито види када су у питању грешке предикције око поноћи на које су рецимо НМ далеко мање осетљиве. На слици 6.26 се могу видети разлике између ЛР и НМ приступа моделовања, које су илустроване за предикције кашњења за 21.03.2014. године. ЛР приступ моделовања је изведен из узорка у трајању од 6 минута, односно коришћен је *Lag 6*, а предиктовање применом НМ модела засновано је на узорку од 24 минуте, тј. на *Lag 24*. Може се видети да за све интервале предиктовања, најбоље резултате даје НМ модел.

На основу ових резултата, може се констатовати да је НМ приступ моделовања био веома успешан. Овај модел је у стању да генерише коефицијенте јоносферског кашњења са тачношћу која одговара стварној стопи промене јоносфере.



Слика 6.26: Разлике између стања реалне јоносфере и стања добијеног предикцијом применом линеарне регресије и неуронских мрежа за 21.03.2104.год.

## 7. ЗАКЉУЧАК

---

Циљ ове дисертације је да се развије високо прецизни временски модел јоносферског кашњења за Мрежне-RTK апликације. Модел је развијен и анализиран за подручје Републике Србије током соларних максималних услова. С обзиром на познавање природе временске варијабилности јоносферских грешака кашњења задатак је био дизајнирати Мрежне-RTK јоносферске корекције које испуњавају високо прецизне захтеве GNSS корисника. Да би се то постигло следећи циљеви истраживања су постављени:

- Квантификовати просторно-временски тренд варијација јоносфере у периоду сунчевог максимума, за подручје Републике Србије,
- Одредити утицај D региона јоносфере на укупан TEC током поремећаја јоносфере услед дејства соларног X-флера,
- Моделовати јоносферске корекције у Мрежном-RTK окружењу, тестирањем великог броја различитих техника предикције, заједно са различитим брзинама узорковања података,
- Развити временске јоносферске моделе корекција, користећи АГРОС као тест мрежу.

Концепт Мрежног-RTK је развијен током неколико последњих деценија како би се обезбедила центиметарска тачност позиционирања дуж базних линија дужина неколико десетина километара. Овај концепт се заснива на референтним станицама равномерно распоређеним, тако да обухватају широку територију. То омогућава емпиријско моделовање просторно зависних грешака мерења (тропосфера, јоносфера, орбиталне грешке) и емитовање корекција које су доступне корисницима у оквиру мреже. Међутим, за ефикасну имплементацију Мрежног-RTK система поред питања везаног за густину саме мреже, односно



међусобног растојања између станица, важан фактор јесте обим и ажурирање преноса корекција до корисника.

У Мрежном-RTK окружењу стање јоносфере је потребно познавати унапред, јер позиционирање у реалном времену подразумева испоруку корекција опажања па и јоносферских, како би се обезбедило тренутно позиционирање. Испорука ових корекција подразумева кашњења реда од неколико секунди до неколико десетина секунди. Међутим, важно је да се корекције испоручују довољно често са довољно малим кашњењем, тако да су још увек примењиве, с обзиром да се јоносфера брзо мења. Стога, је важно да се одреди потребна брзина ажурирања јоносферских корекција у циљу одржавања тачности центиметарског нивоа, што омогућава прецизно позиционирање унутар мреже. Дакле, важно је узети у обзир минималну фреквенцију довољну да са постигне тражени ниво прецизности.

Као прелиминарни корак ка разумевању варијабилност јоносфере изнад Србије и стицању увида за избор најподесније стратегије моделовања како би се побољшала прецизност јоносферских корекција за RTK мрежне примене у Србији, истраживане су дневне и сезонске варијације јоносферског VTEC изнад региона, за две године током четири различита сезонска периода. Циљ ове анализе је био да се карактерише природа и структура јоносфере Србије на локалном и регионалном нивоу. Скуп од 30 АГРОС станица лоцираних широм државе је коришћен као тест полигон за ову анализу. Двофреквентна GPS опажања су прикупљена из сваке станице. Период тестирања је обухватио дане равнодневица, краткодневица и дугодневица за 2013. и 2014. годину, као и дане када је примећена појачана соларна активност. Ове две године су одабране јер припадају максимуму 11-годишњег соларног циклуса (број актуелног Сунчевог циклуса је 24.). Временске серије ТЕС мерења које су коришћене за квантификовање јоносфере Србије добијене су поступком описаним у поглављу 6.

Истраживање је обављено у четири корака:

(1) Изнад свих 30 базних станица АГРОС мреже израчунате су косе вредности ТЕС из двофреквентних GPS опажања и претворене су у вертикалне VTEC вредности примењујући одређену функцију пресликавања. Коришћени су 30

секундни интервали опажања прикупљени током две године за неколико дана сваке сезоне.

(2) Добијене вредности VTEC из двофреквентних GPS опажања (GPSVTEC) су поређене са вредностима VTEC добијеним јоносондом (IVTEC) која је смештена у Гроцкој у просторијама Геомагнетског завода. За одређивање IVTEC коришћен је јоносферски модел *Iri\_2012*.

(5) GPSVTEC подаци су употребљени за приказивање дневних варијација јоносфере изнад АГРОС станице Гроцка за сваку сезону током 2013. и 2014. године.

(6) За приказ просторно-временских варијација јоносфере изнад Србије коришћене су GPSVTEC вредности из свих АГРОС референтних станица. Направљене су двочасовне карте VTEC које описују јоносферу током четири сезонска периода током 24 сата.

На основу анализе дневних варијација VTEC података изнад станице Гроцка, за различите сезоне, могу се формулисати следећи закључци:

- резултати показују варијабилност јоносфере и на дневном и на сезонском нивоу,
- постоји значајна промена вредности VTEC између узастопних дана током сваке сезоне, с тим што су промене у јуну најмање јер је то месец са најмирнијом и најстабилнијом јоносфером,
- највеће VTEC вредности забележене су током марта 2014. године, са вредностима које достижу чак 55 TECU током дана, а најниже вредности од 2 TECU забележене су током ноћи у јуну, 2013. То је једнако кашњењу од приближно 8.8 m у вертикалном правцу током максималних дневних услова и кашњењу од 0.6 m током минималних ноћних услова. То значи да би сателити са ниским елевационом углом у марту 2014. године имали јоносферско кашњење реда 26.4 m,

- VTEC вредности које се јављају током дана су веће од оних ноћу. Међутим, време појаве максималних и минималних вредности варира у зависности од сезоне,
- На основу ових резултата, постоји мало доказа о доследности у сезонским подацима. Генерални тренд за све сезоне је сличан, али је веома тешко моделовати тренд на дневном нивоу који би описао јоносферу наредног дана са тачношћу која задовољава потребе мрежног RTK система.

На основу анализе просторно-временских варијација јоносфере изнад Србије и добијених двочасовних VTEC карата може се закључити следеће:

- може се видети да VTEC вредности Србије варирају с обзиром на време током дана и да се просторна варијација VTEC вредности мења пратећи двосатне епохе. Подаци су показали брзе варијације током јутрњих периода, са сталним повећањем VTEC током дана до максимума који се јавља око поднева, а затим сталан пад између сваке епохе до поподневних и вечерњих сати,
- како је ова анализа вршена за исти период као анализа дневних промена на станици Гроцка добијени су слични резултати. Висок степен варијација је примећен током Марта 2014. од око 55 TECU, а низак степен варијације је био у Јуну 2013. од око 2 TECU током ноћи,
- на основу ове временске и просторне анализе јоносфере Србије, резултати показују да су временске и просторне варијације VTEC комплексне природе. То значи да било који модел за предиктовање апсолутног јоносферског VTEC на основу положаја, доба дана, времена, месеца и сезоне, не би могао адекватно представити природу јоносфере до нивоа који би у реалном времену могао произвести јоносферске корекције тачности довољне за RTK примене.

Као први корак у правцу дефинисања приступа регионалном јоносферском моделовању који би био довољно прецизан за Мрежне-RTK апликације, приступљено је истраживању краткорочних варијација у променама јоносферског кашњења за периоде тестирања из претходних истраживања. Посматрани су сирови подаци јоносферског кашњења добијени из VTEC на станици Гроцка. На

основу критеријума да јоносферско кашњење  $I$  буде испод нивоа тачности од  $\pm 5\text{cm}$ , анализирано је колико брзо вредности  $I$  достижу тај праг. Утврђено је да:

- временске промене јоносферског кашњења у Србији остају испод нивоа тачности од  $\pm 5\text{cm}$  у просеку за 135 секунди у оквиру 99% нивоа поузданости,
- током мирних јоносферских периода јоносферско кашњење остаје испод прага од  $\pm 5\text{cm}$  у току 3 минута, док током активних периода овај праг се достиже за мање од 90 секунди,
- традиционална претпоставка дневне и ноћне јоносферске активности по којој је већа промена током дана, а током ноћи мања, није потпуно потврђена овим истраживањем. За месец Јун, за обе истраживане године добијени су обрнути резултати по којима је брзина промене јоносферског кашњења већа током ноћних периода.

Такође у овом делу истраживања анализиране су промене садржаја електрона у D региону изазване соларним X-флеровима. Прво, анализиране су временске промене  $\text{TEC}_D$  и његов удео у укупном  $\text{TEC}$ , као и удео делова различитих хоризонталних слојева D региона током поремећаја изазваних изабраним X-флером. Метод истраживања базиран је на основу података добијених од DHO VLF сигнала емитованог у Немачкој и евидентираног од стране VLF пријемника који се налази у Србији. За  $\text{TEC}$  су коришћени подаци дати на сајту <http://www.bath.ac.uk/elec-eng/invert/iono/rti.html>. Друго, анализирани су ефекти максималног интензитета X-флера на промене у  $\text{TEC}_D$ . На основу истраживања може се закључити следеће:

- $\text{TEC}_D$  се може повећати за више од два реда величине (у посматраном случају интензивног флера расте од 0.0017 TECU до 0.2302 TECU што је еквивалентно повећању са фактором 136).
- Релативно повећање  $\Delta\text{TEC}_D$  према његовим почетним вредностима је најизраженије у тренутку максималних пертурбација плазме у D региону када достиже два реда величине у посматраном случају.

- Удео  $TEC_D$  варијација у укупном  $TEC$  је значајно већи током максималних поремећаја у односу на непо ремећено стање. У посматраном случају, оне се повећавају са 0.03% на више од 1.5% неколико минута након максимума пертурбација.
- Значајно повећање  $TEC_D$  је уочено са повећањем максималног интензитета  $X$ -зрачења анализом соларних  $X$ -флорова. Вредности добијене применом LWPC нумеричког модела за пропацију VLF/LF радио сигнала на основу Wait-овог модела јоносфере указују на то да  $TEC_D$  узима вредности од 0.01 TECU до 0.1 TECU за класе  $C$  флорова у одговарајуће време, па све до неколико TECU у случају класа  $M$  флорова.

Из ових закључака можемо видети да промене јонизације у  $D$  региону изазване соларним  $X$ -флеровима јесу важне приликом моделовања пропације GNSS сигнала и његове практичне примене у мерењима током трајања флера. Утицај флорова се значајно повећава са порастом  $I_{max}$  и не може се занемарити поготово у прецизним мерењима попут оних у области геодезије. На крају, треба истаћи да представљена студија отвара бројна питања везана за утицај  $D$  региона на јоносферске ефекте и простирање GNSS сигнала током интензивних поремећаја изазваних соларним  $X$ -флеровима.

На крају приступљено је производњи одговарајућег модела за потребе предикције јоносферских корекција задовољавајуће тачности погодног за мрежне RTK примене на територији Србије. Тестиране су две предиктивне шеме базиране на методу линеарне регресије и примени неуронских мрежа. Прва техника моделовања (LP) обезбеђује једноставан приступ за предиктовање тренда у веома сложеној јоносфери. Други метод (NM), омогућује нешто дубљу анализу јоносфере, како би се утврдило да ли сложенији начин обезбеђује боље предиктивне резултате. Као средство за процену учинка сваког модела коришћен је критеријуми тачности од  $\pm 5\text{cm}$ . Поређени су узорци података различитих величина (*Lag 6*, *Lag 12* и *Lag 24*) и тестирани су у циљу сазнања који узорак даје најбоље резултате као и да се утврди која величина узорка је оптимална. Подаци коришћени за ову анализу су исти као за периоде тестирања из претходних истраживања, с тим да је због обима података сет ограничен само на 2014. годину

као годину са нешто појачаном јоносферском активношћу у поређењу са 2013. Из спроведених тестова, изведени су следећи закључци:

- ЛР модел није у могућности да достигне тачност предикције јоносферског кашњења испод нивоа од  $\pm 5$  cm дуже од 50 секунди, за дане када је појачана јоносферска активност. Када се упореди са реалном стопом јоносферског кашњења може се закључити да овај модел није добро решење када је јоносфера узнемирена. За мирније јоносферске активности модел је у стању да предиктује задовољавајуће корекције у трајању од 5 минута са дужином узорка података од 24 минута (*Lag 24*). Међутим, за дане појачане јоносферске активности, могуће је користити модел са краћим узорком (*Lag 6*) података, али за предикцију дневних корекција, што у принципу и јесте задатак,
- НМ модел је за дан са најјачом јоносферском активношћу, у стању да предиктује корекције испод прага од  $\pm 5$  cm за све тестиране дужине узорака. Најбољи резултати се добијају за *Lag 24* и износе 8 минута. Што се тиче перформанси модела за дане мирне јоносфере, модел најбољу предикцију врши за најдужи узорак, тј. за *Lag 24* и у стању је да предиктује корекције испод  $\pm 5$  cm чак за 12 минута унапред. Може се закључити да је оптимално користити дужи узорак података односно *Lag 24* за све услове јоносфере и да се у најгорем случају добија јоносферско кашњење испод 7 cm са временским кашњењем од 10 минута,
- С обзиром на претходно, приступ моделовања применом неуронских мрежа НМ је далеко супериорнији од приступа линеарне регресије ЛР,
- На основу ових резултата, НМ приступ је у стању да адекватно опише услове јоносфере Србије током четири сезонска периода са тачношћу већом од реалне стопе јоносферског кашњења. Јоносферске корекције је потребно слати сваких 8 минута да би се постигла тачност од  $\pm 5$  cm јоносферских резидуала. Кашњење корекција ипак ће зависити од тренутне јоносферске активности. Па, током стабилнијих периода, као што је забележено током јуна и септембра, кашњење корекција се може продужити до 600 секунди између преноса, а да се и даље постиже иста тачност на терену.

### *Предлог будућих истраживања*

Предлог за будућа истраживања се може конципирати кроз три одвојене целине.

Прво, приликом истраживања брзине промена јоносферског кашњења током дневних и ноћних часова, примећени су неки неочекивани резултати. Јавиле су се инверзије за месец Јун, где се показало да јоносфера има већи степен промене током ноћи. Овом питање је потребно додатно истражити са повећаним узорком података, проширеним на скуп који би обухватио више узастопних година тако да се узму у обзир и максимални и минимални соларни услови. Такође, потребно је потражити везу са евентуалним нередовним варијацијама јоносфере односно са појавом изненадних јоносферских поремећаја (енг. Sudden Ionospheric Disturbances – SID) као што је појава и утицај соларних X - флерова.

Друго, с обзиром да јоносфера представља један комплексан систем, поред детаљне анализе временских варијација јоносферског кашњења, потребно је коришћењем свих базних станица које су присутне у тренутној конфигурацији АГРОС мреже извршити детаљну анализу просторне корелације јоносферског кашњења. У прошлости је развијено неколико метода за просторну јоносферску интерполацију које методе користе или неку врсту линеарне интерполације или приступ уклапања површи нижег реда. Не постоји метода која је у стању да обезбеди предвиђање јоносферских корекција на прихватљивом нивоу прецизности под свим условима јоносфере. Па према томе, акценат је на могућностима стварања модела који би обезбедио просторно-временску предикцију јоносферског кашњења на нивоу који би задовољио потребе прецизног позиционирања.

Треће, у овој дисертацији је откривено да промене јонизације у D региону изазване соларним X-флеровима јесу важне приликом моделовања пропагације GNSS сигнала и његове практичне примене у мерењима током трајања флера. Овај податак отвара бројна питања везана за утицај D региона на јоносферске ефекте и простирање GNSS сигнала током интензивних поремећаја изазваних соларним X-флеровима. Сходно томе потребно је даља истраживања усмерити ка

бољем разумевању овог ефекта кроз једну свеобухватну анализу проширену на већи узорак података и различите класе флерова.



## ЛИТЕРАТУРА

---

- Aarons, Jules. 1982. "Global Morphology of Ionospheric Scintillations." *Proceedings of the IEEE* 70 (4): 360–78.
- Aarons, Jules. 1993. "The Longitudinal Morphology of Equatorial F-Layer Irregularities Relevant to Their Occurrence." *Space Science Reviews* 63 (3-4): 209–43.
- Afraimovich, ÉL, VV Vodyannikov, SV Voyeikov, NP Perevalova, and AF Yakovets. 2002. "Dynamical Characteristics of Traveling Wave Packets of Total Electron Content Disturbances." *Radiophysics and Quantum Electronics* 45 (10): 741–57.
- Appleton, Edward V. 1954. "The Anomalous Equatorial Belt in the F2-Layer." *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 5 (1-6): 348–51.
- Appleton, Edward V, and MAF Barnett. 1925a. "On Some Direct Evidence for Downward Atmospheric Reflection of Electric Rays." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* 109 (752): 621–41.
- Appleton, Edward V, and Miles AF Barnett. 1925b. "Local Reflection of Wireless Waves from the Upper Atmosphere." *Nature* 115: 333–34.
- Banks, Peter M. 1969. "The Thermal Structure of the Ionosphere." *Proceedings of the IEEE* 57 (3): 258–81.
- Bartels, J. 1949. "The Standardized Index, Ks, and the Planetary Index, Kp." *IATME Bull. 12b 97.*, Int. Union of Geod. and Geophys., Paris.
- Bassiri, Sassan, and George A Hajj. 1993. "Higher-Order Ionospheric Effects on the Global Positioning System Observables and Means of Modeling Them." *Manuscripta Geodaetica* 18 (5): 280–280.
- Basu, Santimay, E MacKenzie, and Sunanda Basa. 1988. "Ionospheric Constraints on VHF/UHF communications Links during Solar Maximum and Minimum Periods." *Radio Science* 23 (3): 363-378.
- Belehaki, Anna, Norbert Jakowski, and Bodo W. Reinisch. 2003. "Comparison of Ionospheric Ionization Measurements over Athens Using Ground Ionosonde and GPS-derived TEC Values." *Radio Science* 38 (6).

- Bent, Rodney B, Sigrid K Llewellyn, George Nesterczuk, and PE Schmid. 1975. "The Development of a Highly-Successful Worldwide Empirical Ionospheric Model and Its Use in Certain Aspects of Space Communications and Worldwide Total Electron Content Investigations." In *Effect of the ionosphere on space systems and communications*, 1:13-28, Naval Research Laboratory.
- Beutler, G, I Bauersima, S Botton, W Gurtner, M Rothacher, and T Schildknecht. 1987. "Accuracy and Biases in the Geodetic Application of the Global Positioning System." *Mitt. Satell.-Beobachtungsstn. Zimmerwald, Nr. 22, 18 Pp. 22.*
- Bilitza, D, and R Eyfrig. 1979. "A Global Model for the Height of the F2-Peak Using M3000 Values from the CCIR Numerical Map." *ITU Telecommunication Journal*, 46: 549-553.
- Bilitza, Dieter. 1992. "Solar-Terrestrial Models and Application Software." *Planetary and Space Science* 40 (4): 541–544.
- Bilitza, Dieter. 2001. "International Reference Ionosphere 2000." *Radio Science* 36 (2): 261–75.
- Bilitza, Dieter, David Altadill, Yongliang Zhang, Chris Mertens, Vladimir Truhlik, Phil Richards, Lee-Anne McKinnell, and Bodo Reinisch. 2014. "The International Reference Ionosphere 2012—a Model of International Collaboration." *Journal of Space Weather and Space Climate* 4 (12): A07.
- Bilitza, Dieter, K Rawer, L Bossy, I Kutiev, K-I Oyama, R Leitinger, and E Kazimirovsky. 1990. "International Reference Ionosphere 1990."
- Blagojević Dragan. 2014. Uvod U Satelitsku Geodeziju. Beograd: Građevinski fakultet.
- Breit, Gregory, and Merle A Tuve. 1925. "A Radio Method of Estimating the Height of the Conducting Layer." *Nature* 116: 357.
- Breit, Gregory, and Merle A Tuve. 1926. "A Test of the Existence of the Conducting Layer." *Physical Review* 28 (3): 554.
- Carroll, Raymond J. 1982. "Adapting for Heteroscedasticity in Linear Models." *The Annals of Statistics* 10: 1224–1233.
- Chapman, Sydney. 1931. "The Absorption and Dissociative or Ionizing Effect of Monochromatic Radiation in an Atmosphere on a Rotating Earth." *Proceedings of the Physical Society* 43 (1): 26.
- Chiang, Leo H, Mark E Kotanchek, and Arthur K Kordon. 2004. "Fault Diagnosis Based on Fisher Discriminant Analysis and Support Vector Machines." *Computers & Chemical Engineering* 28 (8): 1389–1401.
- Cohen, Morris B., Umrans S. Inan, and Evans W. Paschal. 2010. "Sensitive Broadband ELF/VLF Radio Reception with the AWESOME Instrument." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48 (1): 3–17.

- Dai, Liwen, Shaowei Han, Jinling Wang, and Chris Rizos. 2003. "Comparison of Interpolation Algorithms in Network-based GPS Techniques." *Navigation* 50 (4): 277–93.
- Davies, K. 1965. "Ionospheric Radio Propagation, NBS Monograph 80." *US Government Printing Office, Washington, DC.*
- Davies, K. 1989. "Ionospheric Radio". *Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.*
- Davies, Kenneth. 1990. "Ionospheric Radio". Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, London.
- Davies, K, and GK Hartmann. 1997. "Studying the Ionosphere with the Global Positioning System." *Radio Science* 32 (4): 1695–1703.
- Dawson, CW, and RL Wilby. 2001. "Hydrological Modelling Using Artificial Neural Networks." *Progress in Physical Geography* 25 (1): 80–108.
- Del Pino, Guido. 1989. "The Unifying Role of Iterative Generalized Least Squares in Statistical Algorithms." *Statistical Science* 4(4): 394–403.
- Dendy, Richard O. 1995. *Plasma Physics: An Introductory Course. Cambridge University Press, pp 531.*
- Dieminger, Walter, Gerd K Hartmann, and Reinhart Leitinger. 1996. *The Upper Atmosphere: Data Analysis and Interpretation. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp 1031.*
- Doherty, Patricia H, Susan H Delay, Cesar E Valladares, and John A Klobuchar. 2003. "Ionospheric Scintillation Effects on GPS in the Equatorial and Auroral Regions." *Navigation* 50 (4): 235–45.
- Efron, Bradley, and Robert Tibshirani. 1997. "Improvements on Cross-Validation: The 632+ Bootstrap Method." *Journal of the American Statistical Association* 92 (438): 548–60.
- Ferguson, J. A. 1998. "Computer Programs for Assessment of Long-Wavelength Radio Communications, Version 2.0: User's Guide and Source Files." No. TD-3030. SPACE AND NAVAL WARFARE SYSTEMS CENTER SAN DIEGO CA.
- Freedman, David A. 2009. *Statistical Models: Theory and Practice. Cambridge university press, pp 458.*
- Fu, Wanxuan, Shaowei Han, Chris Rizos, Mark Knight, and Anthony Finn. 1999. "Real-Time Ionospheric Scintillation Monitoring." In *Proc. 12th Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the US Inst. of Navigation GPS ION*, 99:14–17.

- Gao, Shan. 2008. "Monitoring and Modelling Hong Kong Ionosphere Using Regional GPS Networks." PhD diss., The Hong Kong Polytechnic University.
- Garriott, Owen K, and Henry Rishbeth. 1969. "Introduction to Ionospheric Physics." *IEEE Transactions on Image Processing* 1.
- Georgiadou, Yola, and Alfred Kleusberg. 1988. "On the Effect of Ionospheric Delay on Geodetic Relative GPS Positioning." *Manuscripta Geodaetica* 13 (1): 1–8.
- Giraud, Alain, and Michel Petit. 2012. Ionospheric Techniques and Phenomena. *Springer Science & Business Media* 13: 265.
- Gorney, D. J. 1990. "Solar Cycle Effects on the near-Earth Space Environment." *Reviews of Geophysics* 28 (3): 315–36.
- Govindaraju, Rao S. 2000. "Artificial Neural Networks in Hydrology. I: Preliminary Concepts." *Journal of Hydrologic Engineering* 5 (2): 115–23.
- Gran, A. A. 1965. "Solar Ionizing Flux as Determined from Sunrise Measurements of Electron Content." Scientific report no. 240. The Pennsylvania state university.
- Grejner-Brzezinska, Dorota A, Israel Kashani, and Pawel Wielgosz. 2005. "On Accuracy and Reliability of Instantaneous Network RTK as a Function of Network Geometry, Station Separation, and Data Processing Strategy." *GPS Solutions* 9 (3): 212–225.
- Grejner-Brzezinska, Dorota A, Israel Kashani, Pawel Wielgosz, Dru A Smith, Paul SJ Spencer, Douglas S Robertson, and Gerald L Mader. 2007. "Efficiency and Reliability of Ambiguity Resolution in Network-Based Real-Time Kinematic GPS." *Journal of Surveying Engineering* 133 (2): 56–65.
- Grubor, DP, DM Šulić, and Vida Žigman. 2008. "Classification of X-Ray Solar Flares Regarding Their Effects on the Lower Ionosphere Electron Density Profile." *Annales Geophysicae* 26:1731–1740. Copernicus GmbH.
- Hall, M. P. M., Barclay, L. W., and Hewitt, M. T. 1996. "Propagation of Radio Waves." In *Propagation of Radiowaves*, vol. 1. London: Institution of Electrical Engineers.
- Hargreaves, John K. 1992. *The Solar-Terrestrial Environment*. Cambridge Press.
- Hartmann, GK, and R Leitinger. 1984. "Range Errors due to Ionospheric and Tropospheric Effects for Signal Frequencies above 100 MHz." *Bulletin Géodésique* 58 (2): 109–36.
- Hein, G.W., Rodriguez, J.A., Wallner, S., Eissfeller, B., Pany, T. and Hartl, P., 2007. Envisioning a Future GNSS System of Systems Part 1. *Inside GNSS*, 2(2): 64-72.

- Henson, Dennis J, and EANN Collier. 1986. "Effects of the Ionosphere on GPS Relative Geodesy." In *PLANS'86-Position Location and Navigation Symposium*, 1: 230–237.
- Higgins, MB. 2002. "Australia's Changing Surveying Infrastructure from Marks in the Ground to Virtual Reference Stations." In *FIG XXII International Congress, Washington*, pp. 19-26.
- Huang, Xueqin, and Bodo W Reinisch. 2001. "Vertical Electron Content from Ionograms in Real Time." *Radio Science* 36 (2): 335–342.
- Hunsucker, Robert D, and John Keith Hargreaves. 2003. *The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagation. Cambridge University Press, pp 640.*
- Igarashi, K, M Nakamura, P Wilkinson, J Wu, A Pavelyev, and J Wickert. 2001. "Global Sounding of Sporadic E Layers by the GPS/MET Radio Occultation Experiment." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 63 (18): 1973–1980.
- Ivanov-Kholodny, Gor Semenovich, and Andrei Valer'evich Mikhailov. 1986. *The Prediction of Ionospheric Conditions*. Institute of applied geophysics, geocohydromet, Moscow, U.S.S.R.
- Janes, H. 1991. "An Error Budget for GPS Relative Positioning," *Surveying and land information systems* 51(3): 133-137.
- Kalikhman, AD. 1980. "Medium-Scale Travelling Ionospheric Disturbances and Thermospheric Winds in the F-Region." *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 42 (8): 697–703.
- Kelley, Michael C. 2009. *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics & Electrodynamics*. Vol. 96. Second Edition, Academic press (Elsevier).
- Kleusberg, A. 1986. "Ionospheric Propagation Effects in Geodetic Relative GPS Positioning." *Manuscripta Geodaetica* 11: 256–261.
- Klobuchar, JA. 1978. "Ionospheric Effects on Satellite Navigation and Air Traffic Control Systems." In *AGARD Recent Advan. in Radio and Opt. Propagation for Mod. Commun., Navigation and Detection Systems 11 p (SEE N78-23318 14-32)*,. Vol. 1.
- Klobuchar, John. 1996. "Ionospheric Effects on GPS." *Global Positioning System: Theory and Applications*. 1: 485–515.
- Klobuchar, John A. 1986. "Design and Characteristics of the GPS Ionospheric Time Delay Algorithm for Single Frequency Users." In *PLANS'86-Position Location and Navigation Symposium*, pp. 280-286.

- Kolarski, Aleksandra, Davorka Grubor, and Desanka Sulic. 2011. "Diagnostics Of The Solar X-Flare Impact On Lower Ionosphere Through The Vlf-Naa Signal Recordings." *Baltic Astronomy* 20: 591–595.
- Kovacic, Zl. 1995. "Analiza Vremenskih Serija." *Ekonomski Fakultet Beograd, Beograd*.
- Lachapelle, G, and E Cannon. 1986. "Single and Dual Frequency GPS Results for Baselines of 10 to 500 Km." *Canadian Surveyor* 40 (2): 173–183.
- Lai, Tze Leung, Herbert Robbins, and Ching Zong Wei. 1985. "Strong Consistency of Least Squares Estimates in Multiple Regression." In *Herbert Robbins Selected Papers*, 510–512. Springer.
- Langley, R, M Fedrizzi, E Paula, M Santos, and A Komjathy. 2002. "Mapping the Low Latitude Ionosphere with GPS." *GPS World* 13 (2): 41–46.
- Langley, Richard B. 1996. "Propagation of the GPS Signals." In *GPS for Geodesy*, pp 103–140. Springer Berlin Heidelberg.
- Leitinger, Reinhart, Man-Lian Zhang, and Sandro M Radicella. 2005. "An Improved Bottomside for the Ionospheric Electron Density Model NeQuick." *Annals of Geophysics* 48(3).
- Llewellyn, Sigrid K, and Rodney B Bent. 1973. "Documentation and Description of the Bent Ionospheric Model." ATLANTIC SCIENCE CORP INDIAN HARBOUR BEACH FL.
- Macmillan, Susan, and Christopher Finlay. 2011. "The International Geomagnetic Reference Field." In *Geomagnetic Observations and Models* 5: 265–276. Springer.
- Matsushita, Sadami, and Wallace H Campbell. 1967. "Physics of Geomagnetic Phenomena, Volume 1." *Elsevier*.
- McCulloch, Warren S, and Walter Pitts. 1943. "A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity." *The Bulletin of Mathematical Biophysics* 5 (4): 115–133.
- McKinnell, Lee-Anne, Ben Opperman, and Pierre J. Cilliers. 2007. "GPS TEC and Ionosonde TEC over Grahamstown, South Africa: First Comparisons." *Advances in Space Research* 39 (5): 816–820.
- McNamara, Leo F. 1991. *The Ionosphere: Communications, Surveillance, and Direction Finding*. Krieger publishing company.
- McNamara, LF. 1984. "Prediction of Total Electron Content Using the International Reference Ionosphere." *Advances in Space Research* 4 (1): 25–50.

- McNamara, LF. 1985. "The Use of Total Electron Content Measurements to Validate Empirical Models of the Ionosphere." *Advances in Space Research* 5 (7): 81–90.
- McNamara, LF, and PJ Wilkinson. 1983. "Prediction of Total Electron Content Using the International Reference Ionosphere." *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 45 (2-3): 169–74.
- McRae, Wayne M, and Neil R Thomson. 2004. "Solar Flare Induced Ionospheric D-Region Enhancements from VLF Phase and Amplitude Observations." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 66 (1): 77–87.
- Memarzadeh, Yahya. 2009. Ionospheric Modeling for Precise GNSS Applications. PhD Thesis, TU Delft, Delft University of Technology.
- Michel Menvielle. 2000. "Geomagnetic Data 1994: IAGA Indices Aa, Am, Kp, Dst, AE : Rapid Variations." Issue 32 of IAGA bulletin. ISGI Publications Office.
- Millner, JC, HA Asmussen, and R Andreola. 2006. "Delivery of Networked GPS Corrections for Machinery Guidance." In *Proceedings of the Controlled Traffic Farming Conference*, pp. 86-98.
- Misra, Pratap, and Per Enge. 2006. Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance Second Edition. Lincoln, MA: *Ganga-Jamuna Press*.
- Mitchell, Cathryn N., and Paul SJ Spencer. 2003. "A Three-Dimensional Time-Dependent Algorithm for Ionospheric Imaging Using GPS." *Annals of Geophysics* 46 (4): 687–696.
- Mosert, M, R Ezquer, and C Jadur. 2000. "On the Critical Frequency and Height of the E Layer Peak at Noon." *Advances in Space Research* 25 (1): 69–72.
- Nava, B, SM Radicella, R Leitinger, and P Coisson. 2007. "Use of Total Electron Content Data to Analyze Ionosphere Electron Density Gradients." *Advances in Space Research* 39 (8): 1292–1297.
- Nichols, Jonathan, Andrew Hansen, Todd Walter, and Per Enge. 1999. "Observations of Equatorial Scintillation Using GPS Receivers." In *ION GPS-99*, pp. 1451-1460.
- Nina, A, V Cadez, VA Sreckovic, and D Sulic. 2011. "The Influence of Solar Spectral Lines on Electron Concentration in Terrestrial Ionosphere." *Baltic Astronomy* 20 : 609-612.
- Nina, Aleksandra, and Vladimir M Čadež. 2014. "Electron Production by Solar Ly- $\alpha$  Line Radiation in the Ionospheric D-Region." *Advances in Space Research* 54 (7): 1276–84.
- Nina M. Aleksandra. 2014. "Dijagnostika plazme jonosferske D oblasti elektromagnetnim VLF talasima." Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Fizički fakultet.

- Nina, A., V. M. Cadez, and J. Bajcetic. 2015. "Contribution of solar hydrogen Ly $\alpha$  line emission in total ionization rate in ionospheric D- region during the maximum of solar X-flare *Serbian Astronomical Journal* 191: 51-57.
- Odalovic O., Popovic J., Grekulovic S, Todorovic M., and Aleksic I., 2011. "Geodetic Infrastructure of Serbia." Proceedings of International Scientific Conference Professional Practice and Education in Geodesy And Related Fields, 24th-26th Jun 2011, Kladovo, Serbia. pp 192-201.
- Odijk, Dennis. 2002. "Fast Precise GPS Positioning in the Presence of Ionospheric Delays." PhD Thesis, TU Delft, Delft University of Technology.
- Pandey, VK, NK Sethi, and KK Mahajan. 2000. "Comparing IRI E-Region Peak Height (hmE) with Incoherent Scatter Data." *Advances in Space Research* 25 (1): 65–68.
- Prolss, Gerd W, and Michael Keith Bird. 2004. *Physics of the Earth's Space Environment: An Introduction*. Springer.
- Ramakrishnan, S, and K Rawer. 1972. "Model Electron Density Profiles Obtained by Empirical procedures(Ionospheric Bottom Side Electron Density Profiles from Measured Monthly Median Values, Using CCIR and ITS Computer Programs for Critical Frequencies)." *Space Research XII*: 1253–1259.
- Rao, PVS Rama, S Gopi Krishna, K Niranjana, and DSVVD Prasad. 2006. "Temporal and Spatial Variations in TEC Using Simultaneous Measurements from the Indian GPS Network of Receivers during the Low Solar Activity Period of 2004-2005." In *Annales Geophysicae* 24(12): 3279–3292.
- Ratcliffe, John Ashworth. 1972. "Introduction to the Ionosphere and Magnetosphere." *London: Cambridge University Press*, 1.
- Raulin, Jean-Pierre, Gérard Trottet, Matthieu Kretzschmar, Edith L Macotela, Alessandra Pacini, Fernando CP Bertoni, and Ingolf E Dammasch. 2013. "Response of the Low Ionosphere to X-ray and Lyman- $\alpha$  Solar Flare Emissions." *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 118 (1): 570–575.
- Rawer, K, and D Bilitza. 1990. "International Reference Ionosphere—plasma Densities: Status 1988." *Advances in Space Research* 10 (8): 5–14.
- Rawer, K., Lincoln, J. V., and Conkright, R. O. 1981. "International Reference Ionosphere IRI-79." Report UAG-82. Colorado: World Data Center for Solar-Terrestrial Physics, Boulder.
- Rawer, K., Ramakrishnan, S., and Bilitza, D. 1978. "International Reference Ionosphere 1978." Special Report,. Belgium: International Union of Radio Science, Brussels.
- Retscher, Günther. 2002. "Accuracy Performance of Virtual Reference Station (VRS) Networks." *Journal of Global Positioning Systems* 1(1): 40-47.



- Rieger, M, and R Leitinger. 2002. "Assessment of TID Activity from GPS Phase Data Collected in a Dense Network of GPS Receivers." *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 37 (2-3): 327–341.
- Rizos, C, and S Han. 2003. "Reference Station Network Based RTK Systems-Concepts and Progress." *Wuhan University Journal of Natural Sciences* 8 (2): 566–574.
- Rizos, Chris. 2003. "Trends in GPS Technology & Applications." In *2nd International LBS Workshop*. 2003. .
- Rizos, Chris. 2009. "Network RTK Research and Implementation-A Geodetic Perspective." *Journal of Global Positioning Systems*, 1(2): 144-150.
- Rocken, Christian, James M Johnson, John J Braun, Hiroshi Kawawa, Yuki Hatanaka, and Tetsuro Imakiire. 2000. "Improving GPS Surveying with Modeled Ionospheric Corrections." *Geophysical Research Letters* 27 (23): 3821–3824.
- Sardón, Esther, and Néstor Zarraoa. 1997. "Estimation of Total Electron Content Using GPS Data: How Stable Are the Differential Satellite and Receiver Instrumental Biases?" *Radio Science* 32 (5): 1899–1910.
- Schaer, Stefan. 1999. "Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System." Ph.D. Thesis, University of Bern, Switzerland.
- Schunk, RW, and AF Nagy. 2000. "Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry, Cambridge Atmos." *Space Sci. Ser* 59: 554.
- Seeber, Günter. 2003. *Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications*. Walter de Gruyter.
- Seemala, G. K. 2014. "GPS-TEC Analysis Application." Institute for Scientific Research, Boston College, USA.
- Seemala, GK, and CE Valladares. 2011. "Statistics of Total Electron Content Depletions Observed over the South American Continent for the Year 2008." *Radio Science* 46 (5).
- Singh, Ashutosh K., Ashutosh K. Singh, Rajesh Singh, and R. P. Singh. 2014. "Solar Flare Induced D-Region Ionospheric Perturbations Evaluated from VLF Measurements." *Astrophysics and Space Science* 350 (1): 1–9.
- SIS-ICD, Galileo Joint. 2006. "Galileo Open Service, Signal in Space Interface Control Document (OS SIS ICD)." *Draft 0, 19th May*.
- Sulic, DM, and VA Sreckovic. 2014. "A Comparative Study of Measured Amplitude and Phase Perturbations of VLF and LF Radio Signals Induced by Solar Flares." *Serbian Astronomical Journal* 188: 45-54.
- Tascione, Thomas F. 1988. "Introduction to the Space Environment." *Introduction to the Space Environment.. TF Tascione. Orbit Book Co. Inc. and Krieger*

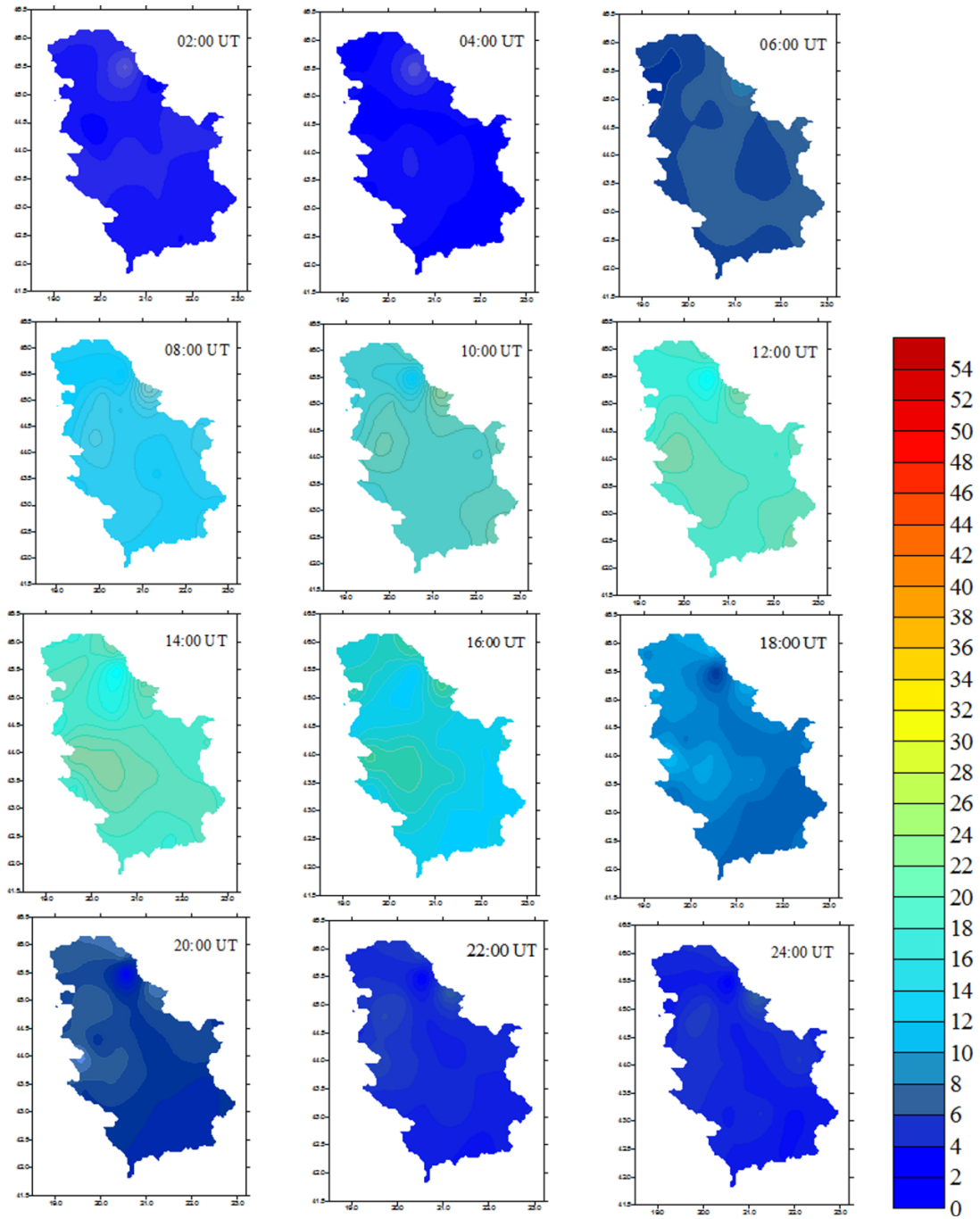
Publishing Co., Melbourne, Box 9542, FL 32902, USA. 116 Pp. Price US 34.50 Cloth, US 22.50 Paper (1988). ISBN 0-89464-009-7 Cloth, ISBN 0-89464-020-8 Paper. 1.

- Teunissen, PJG. 2003. "Theory of Carrier Phase Ambiguity Resolution." *Wuhan University Journal of Natural Sciences* 8 (2): 471–84.
- Thomson, Neil R., Craig J. Rodger, and Mark A. Clilverd. 2005. "Large Solar Flares and Their Ionospheric D Region Enhancements." *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 110 (A6): 2156-2202.
- Titheridge, JE. 2000. "Modelling the Peak of the Ionospheric E-Layer." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 62 (2): 93–114.
- Todorovic Drakul M., Cadez V. M., Bajcetic J., Popovic L.C., Blagojevic D, Nina A., (2016), "Behaviour of electron content in the ionospheric D-region during solar X-ray flares", *Serbian Astronomical Journal*, UDC 523.985.3: 523.31-853, DOI number:10.2298/SAJ160404006T.
- Tofallis, Chris. 2009. "Least Squares Percentage Regression." *Journal of Modern Applied Statistical Methods* 7(2): 526-534.
- Van der Marel, H. 1993. "Modelling of GPS Ionospheric Delays for Geodetic Applications." In URSI commissie Gmeeting, March 12, Eindhoven, The Netherlands.
- van Velthoven, Petrus Franciscus Johannes. 1990. "Medium Scale Irregularities in the Ionospheric Electron Content." *Research Supported by NWO. Eindhoven, Netherlands, Eindhoven University of Technology, 1990, 252 P. 1.*
- Wait, James R, and Kenneth P Spies. 1964. *Characteristics of the Earth-Ionosphere Waveguide for VLF Radio Waves*. US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards: for sale by the Supt. of Doc., US Govt. Print. Off.
- Wautelet, Gilles. 2013. "Characterization of Ionospheric Irregularities and Their Influence on High-Accuracy Positioning with GPS over Mid-Latitudes." Doctoral dissertation, Université de Liège, Liège, Belgique.
- Wyllie, S. 2007. "Modelling the Temporal Variation of the Ionosphere in a Network-RTK Environment." PhD Thesis, School of Mathematical and Geospatial Sciences, RMIT University, Melbourne, Victoria, Australia.
- Xiong, Bo, Weixing Wan, Libo Liu, Paul Withers, Biqiang Zhao, Baiqi Ning, Yong Wei, Huijun Le, Zhipeng Ren, and Yiding Chen. 2011. "Ionospheric Response to the X-class Solar Flare on 7 September 2005." *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 116 (A11): 2156-2202.
- Yan, Xin. 2009. *Linear Regression Analysis: Theory and Computing*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd

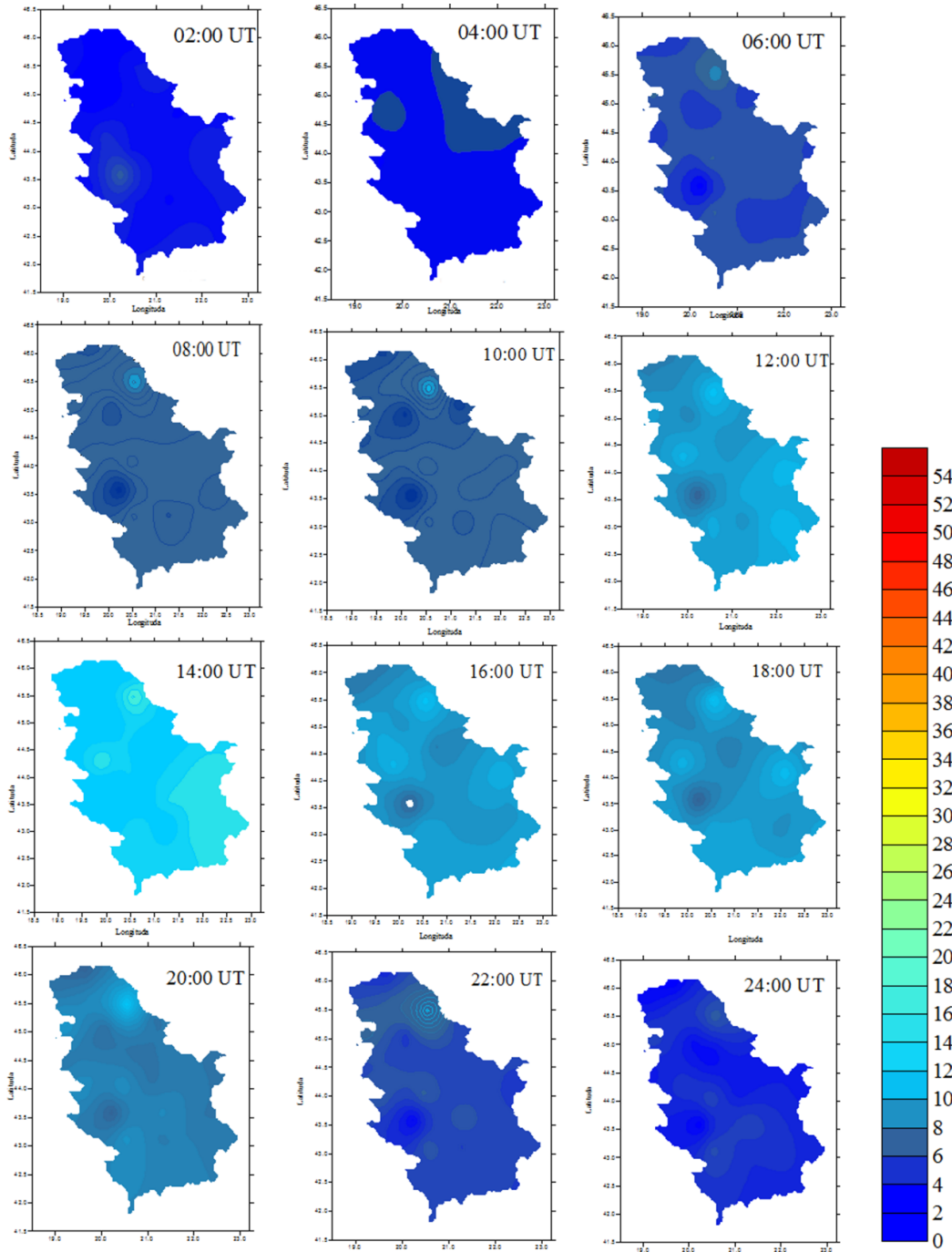
- Zebhauser, BE, HJ Euler, CR Keenan, and G Wübbena. 2002. "A Novel Approach for the Use of Information from Reference Station Networks Conforming to RTCM V2. 3 and Future V3. 0." *Proceedings of the International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS-2002, San Diego, CA, USA, Jan, 28–30 pp.* 320-327.
- Zhang, K, F Wu, S Wu, C Rizos, C Roberts, L Ge, T Yan, C Gordini, A Kealy, and M Hale. 2006. "Sparse or Dense: Challenges of Australian Network RTK." *Proceedings of IGNSS 2006, July 18-21, 2006, Queensland, Australia.*
- Žigman, Vida, Davorka Grubor, and Desanka Šulić. 2007. "D-Region Electron Density Evaluated from VLF Amplitude Time Delay during X-Ray Solar Flares." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 69 (7): 775–792.



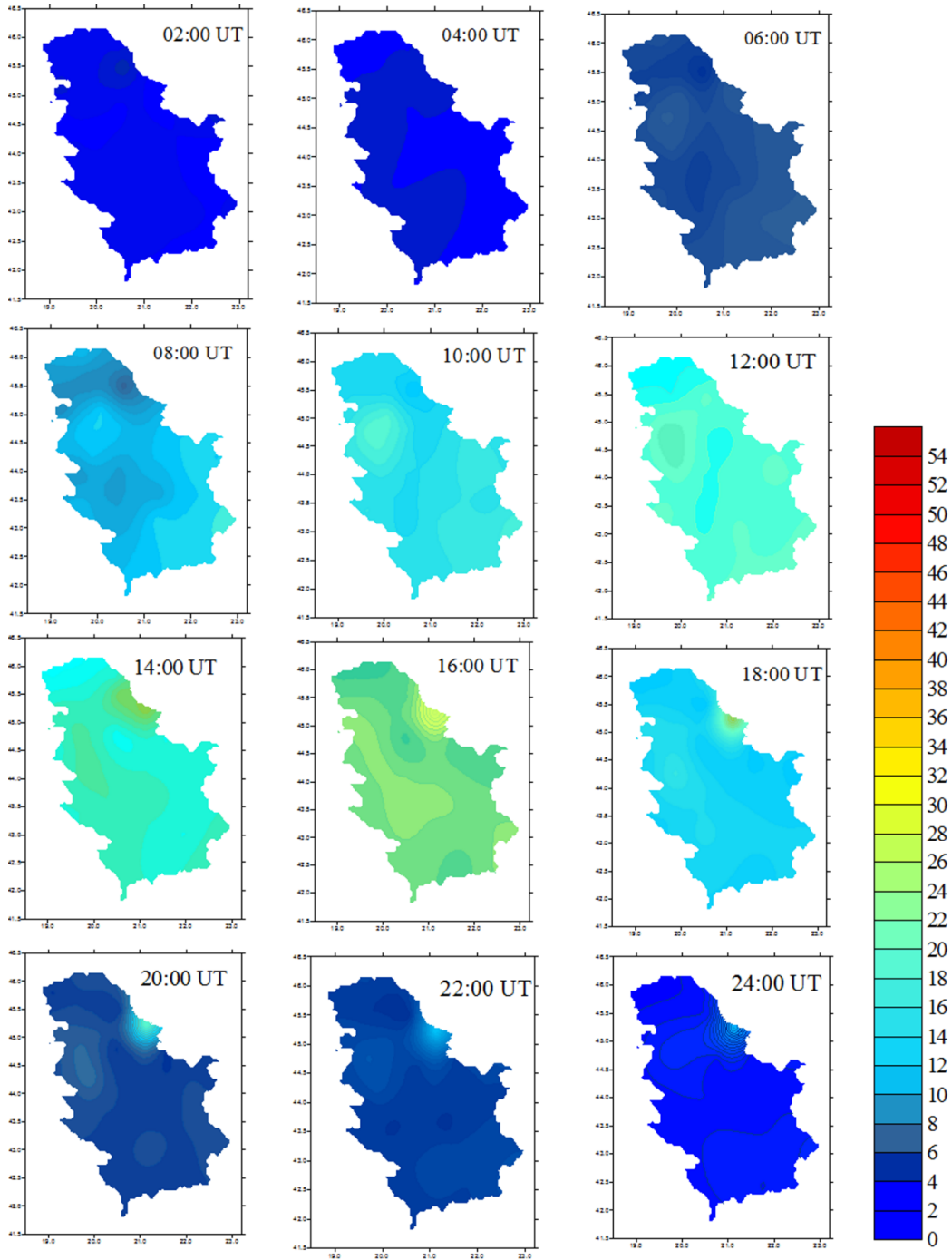
ВТЕС вредности изнад Србије дана 22.03.2013. год.



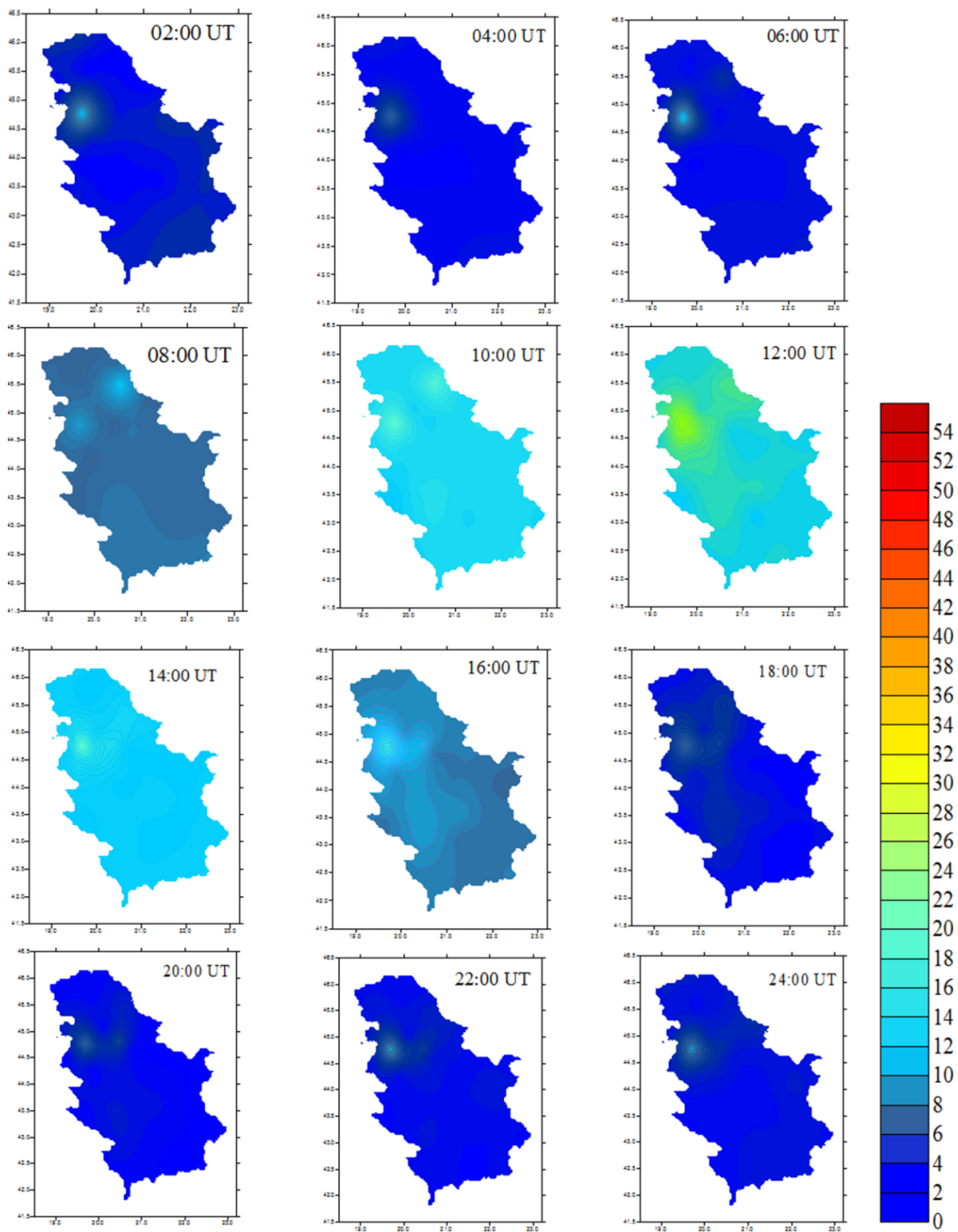
VTEC вредности изнад Србије дана 21.06.2013. год.



VTEC вредности изнад Србије дана 24.09.2013. год.

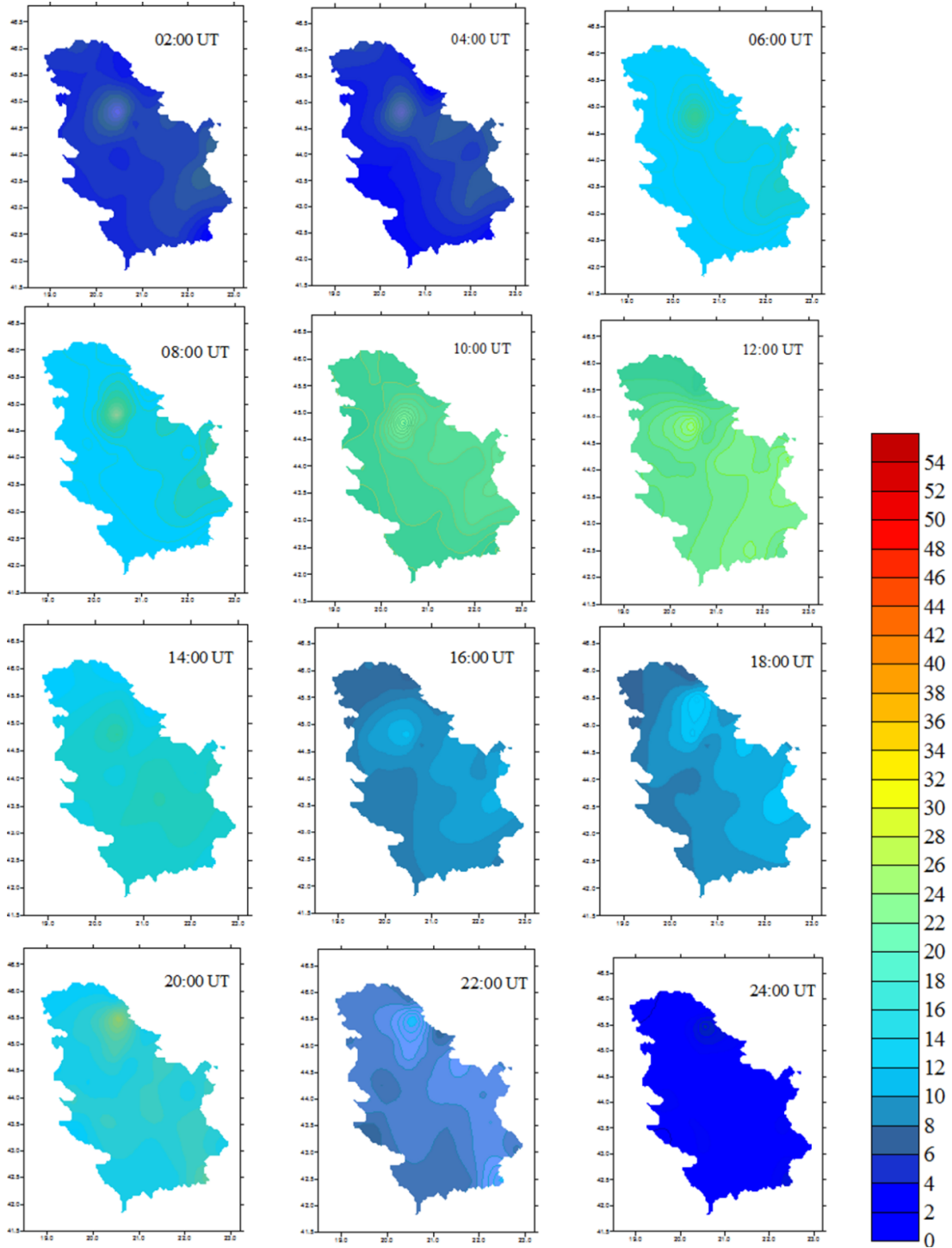


VTES вредности изнад Србије дана 25.12.2013. год.

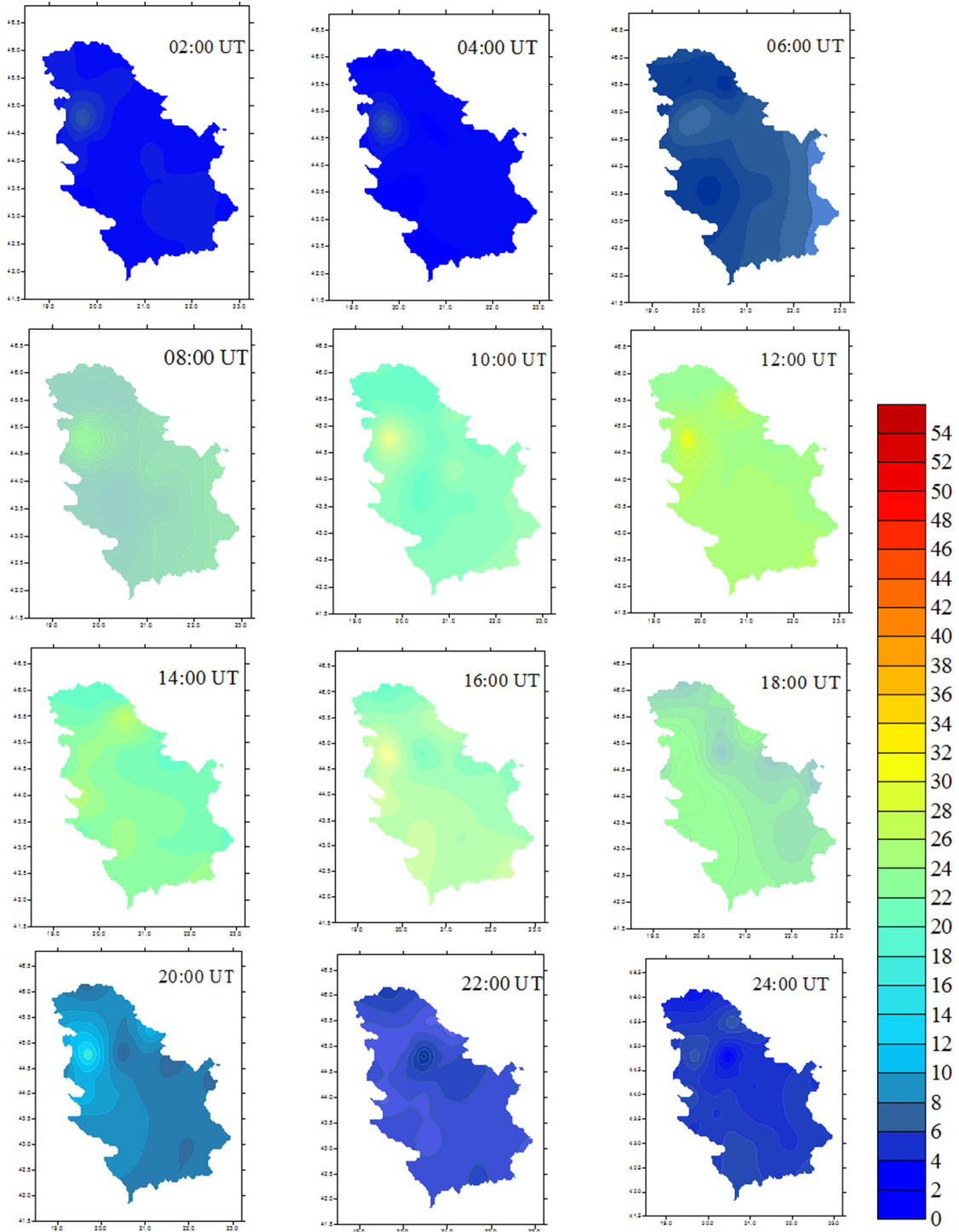




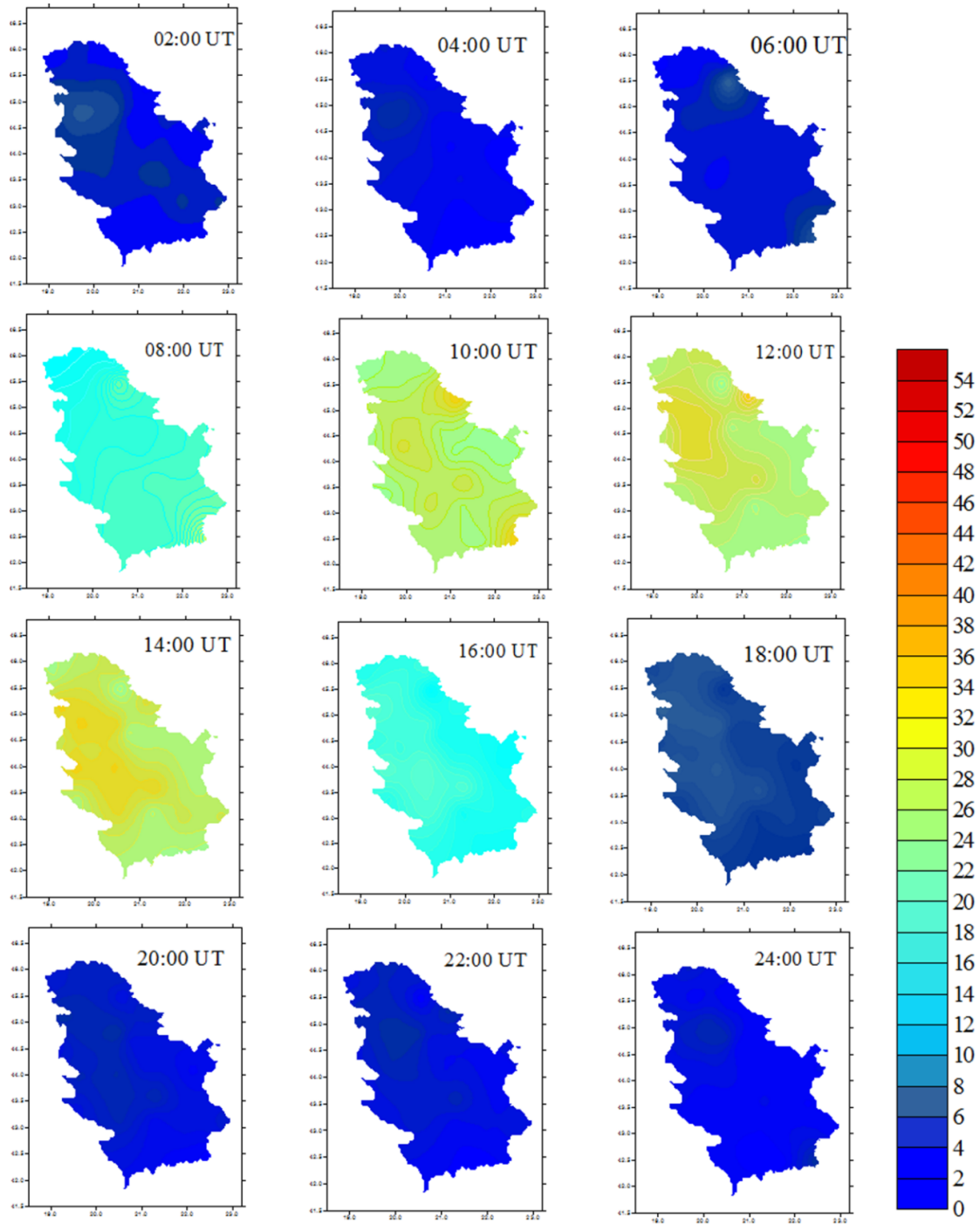
VTEC вредности изнад Србије дана 18.06.2014. год



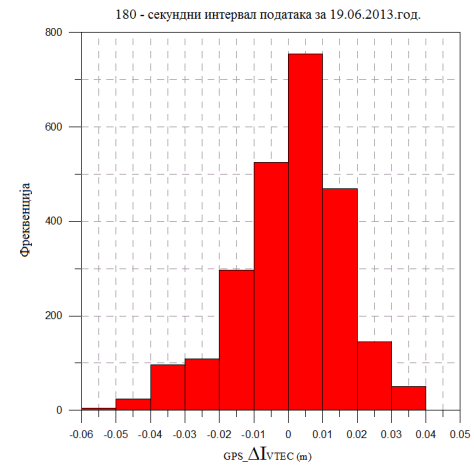
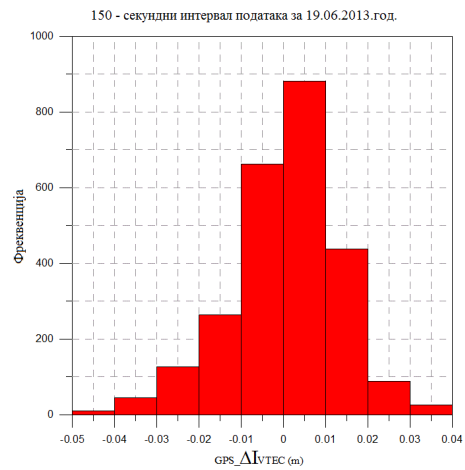
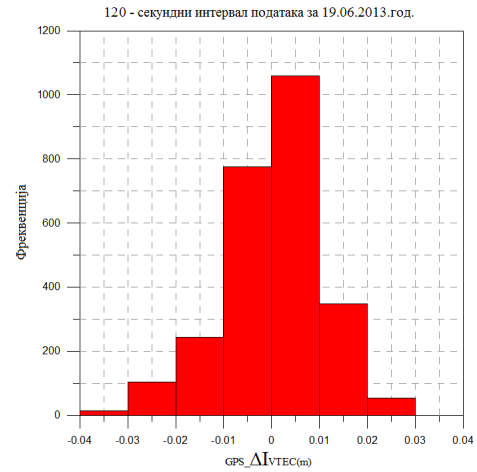
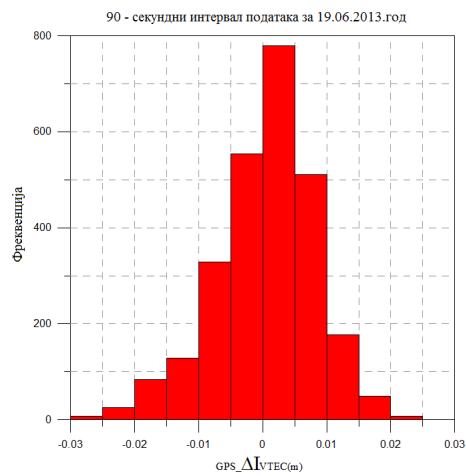
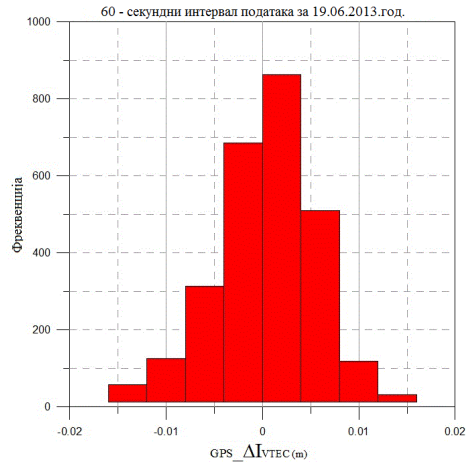
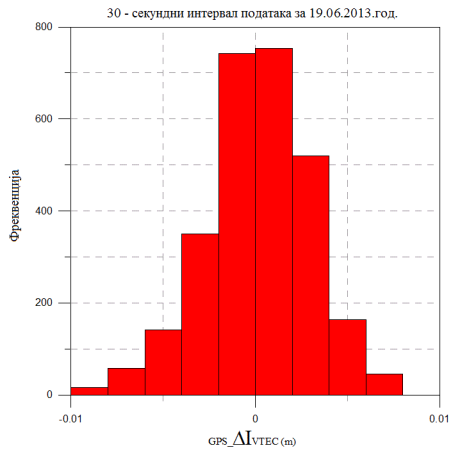
VTEC вредности изнад Србије дана 22.09.2014.god год.



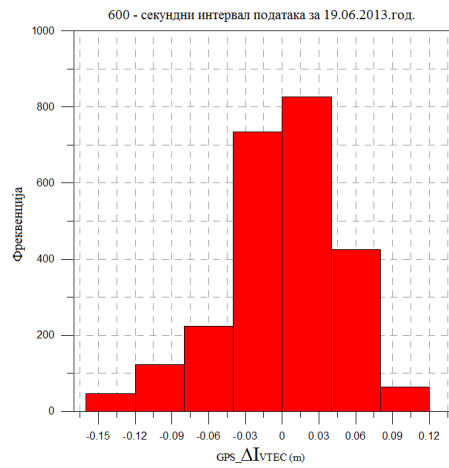
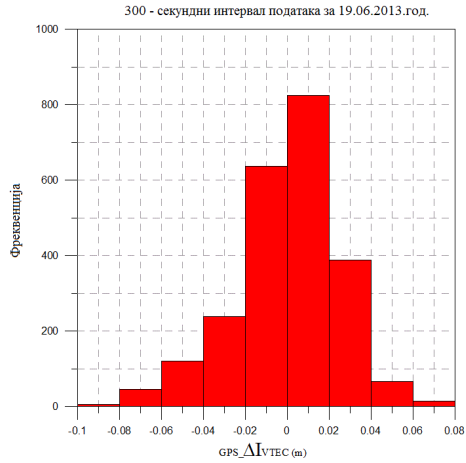
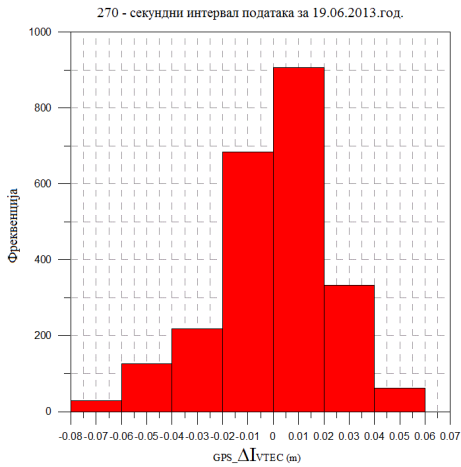
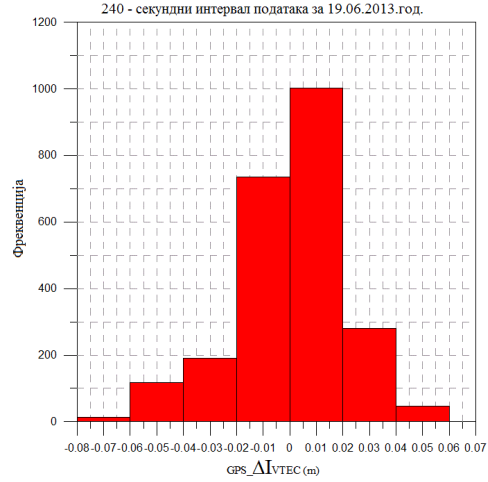
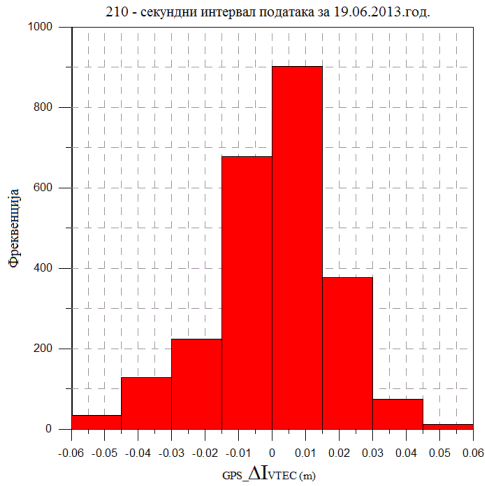
VTEC вредности изнад Србије дана 22.12.2014. год.



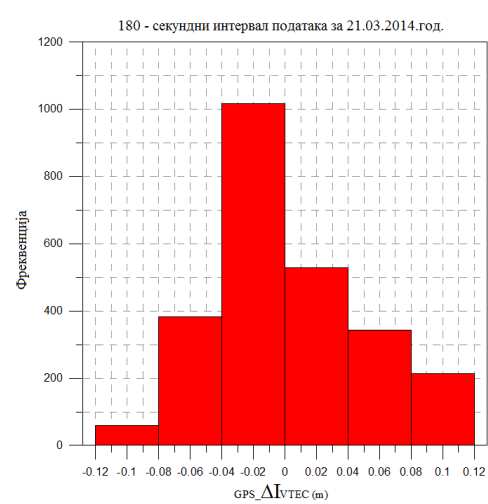
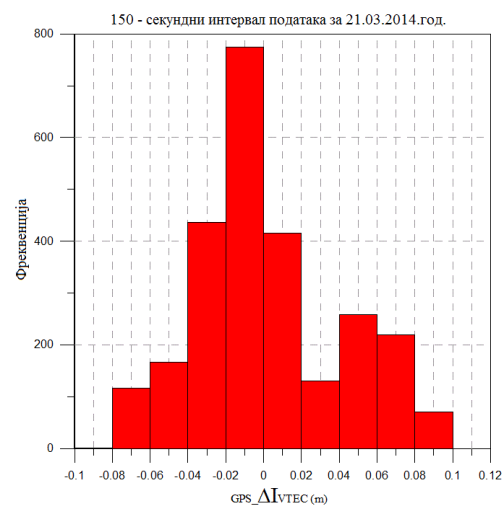
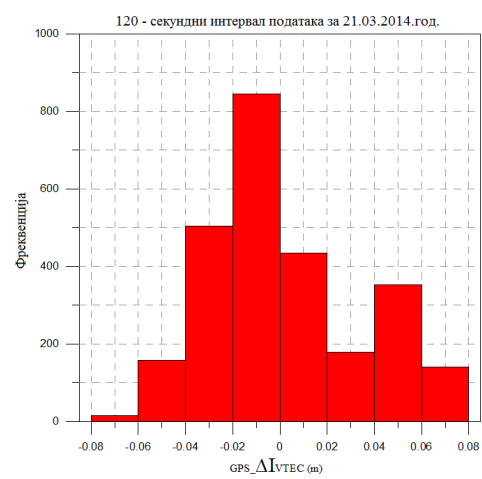
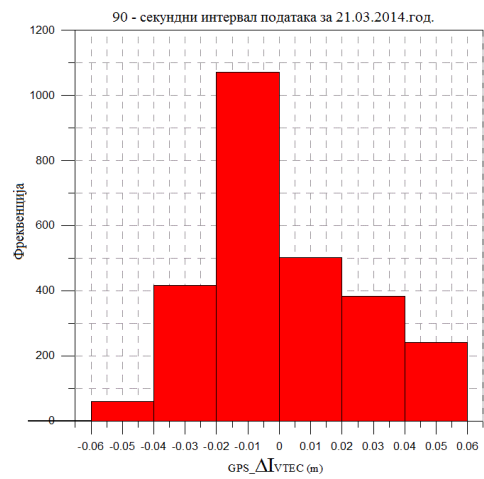
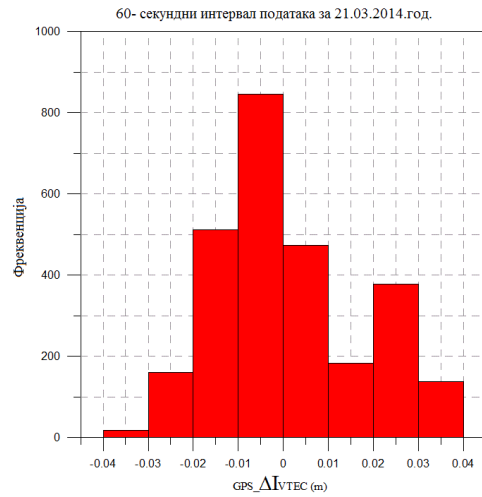
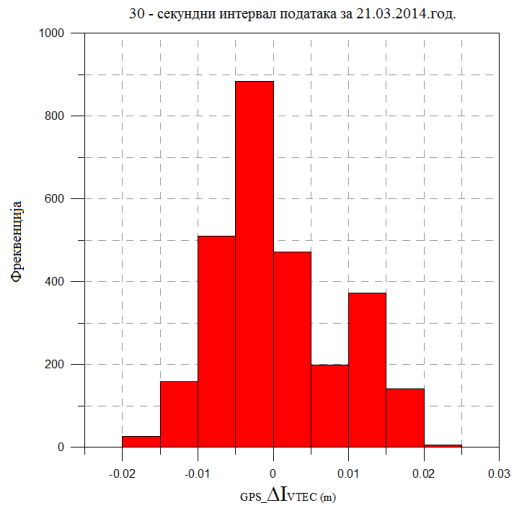
Хистограми временских варијација јоносферског кашњења 9. Јун 2013. год.



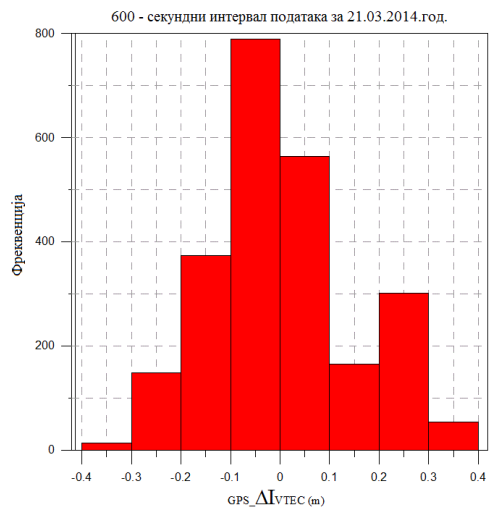
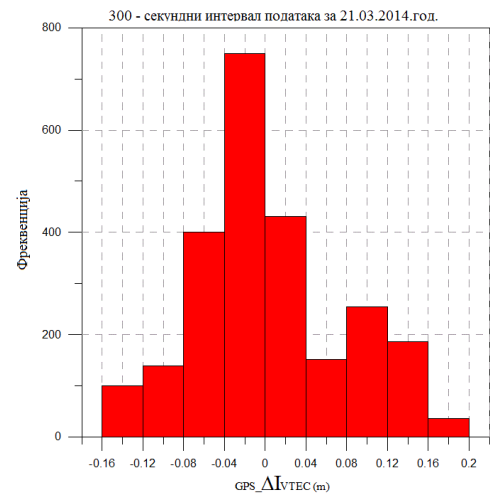
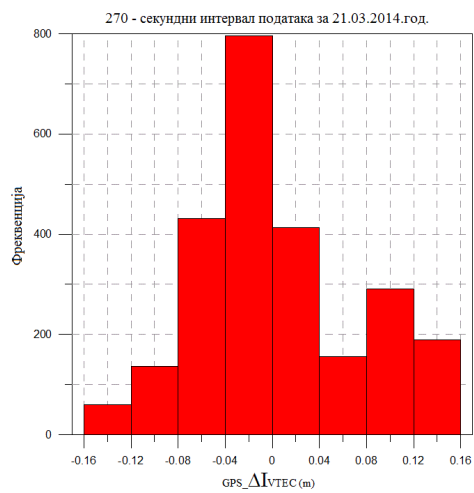
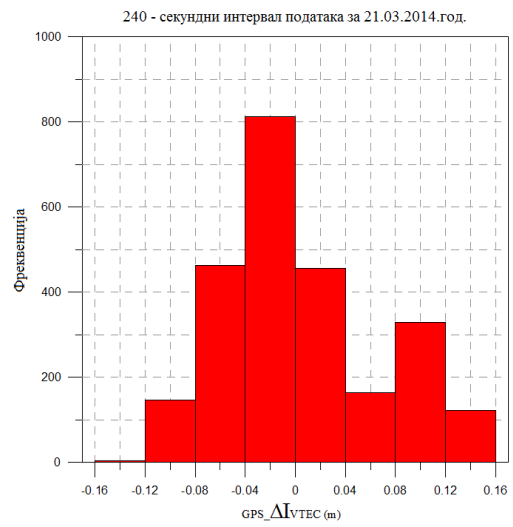
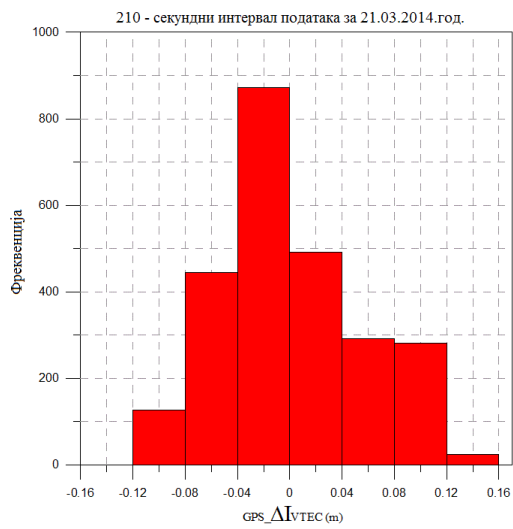
Хистограми временских варијација јонсферског кашњења 9. Јун 2013. Год.



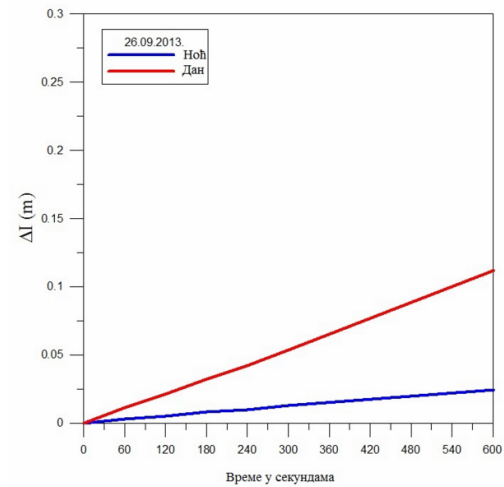
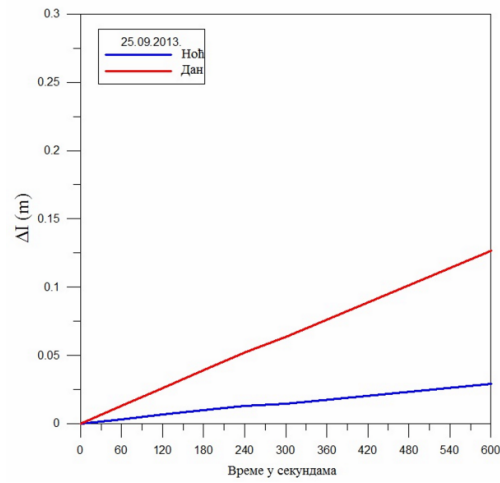
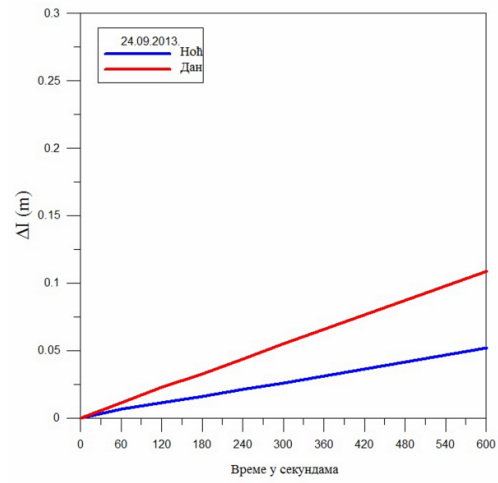
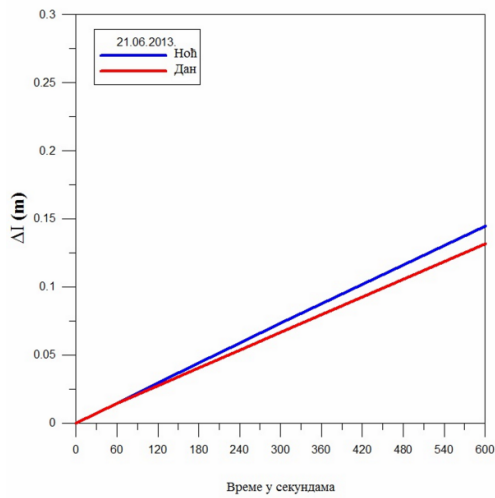
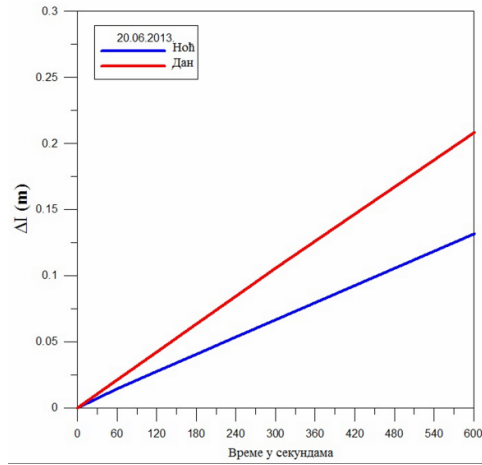
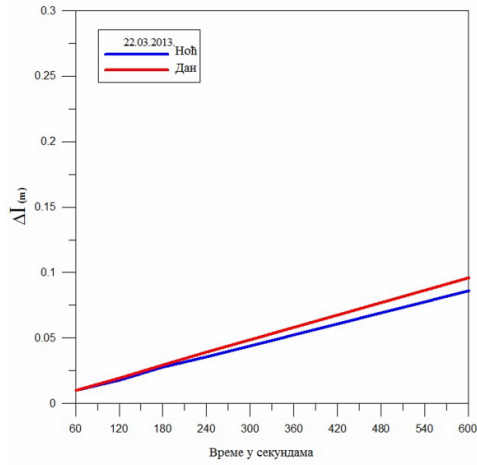
Хистограми временских варијација јоносферског кашњења 21 Март 2014. год.



Хистограми временских варијација јоносферског кашњења 21 Март 2014. год.

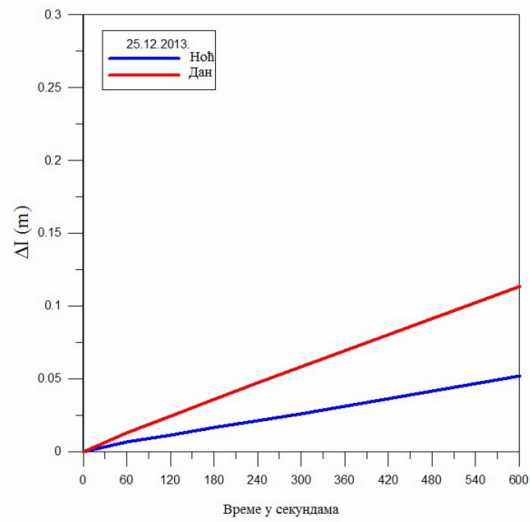
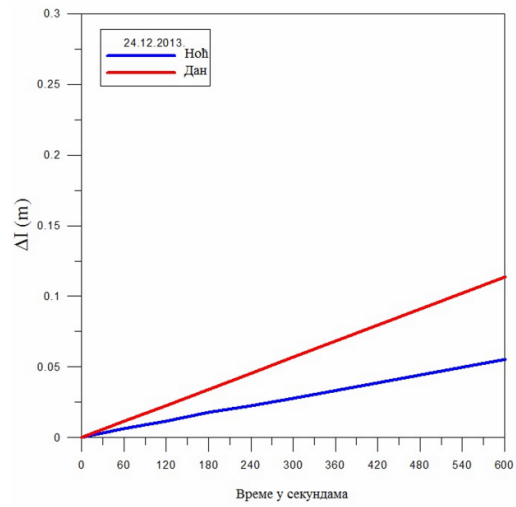
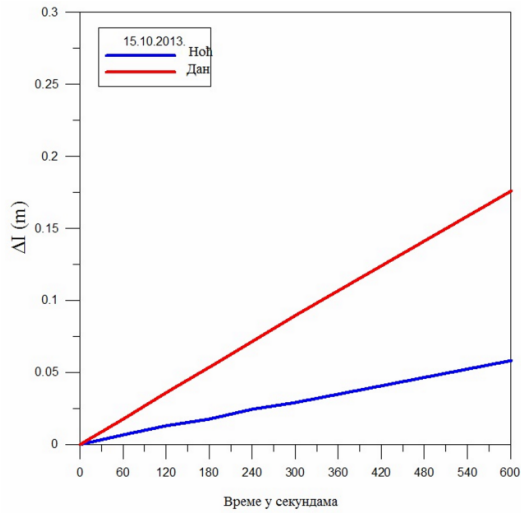


Разлике варијација јоносферског кашњења за дневне и ноћне периоде 2013. год.

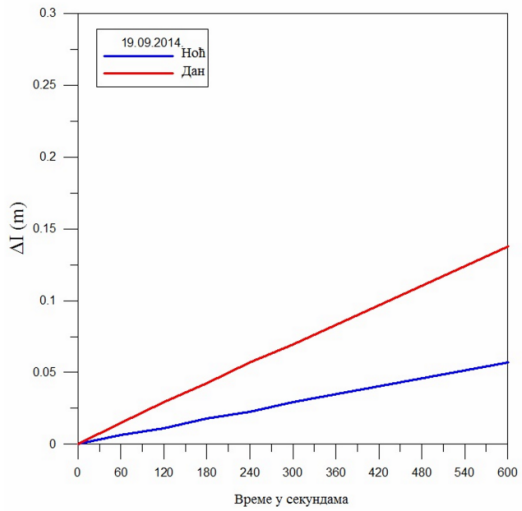
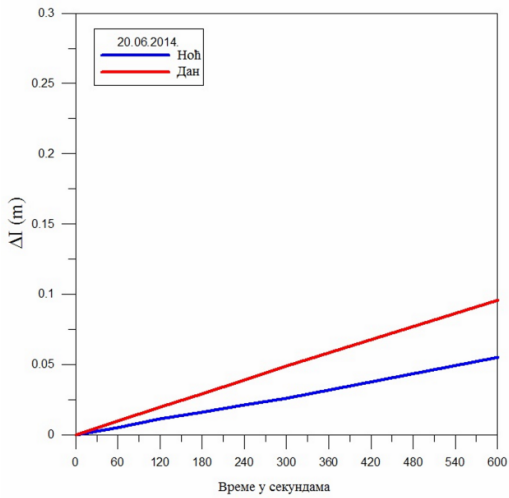
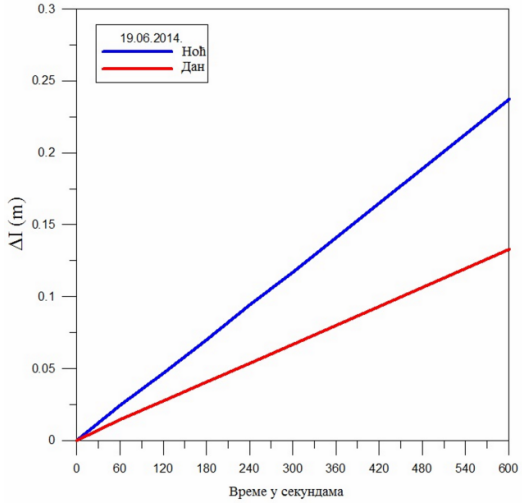
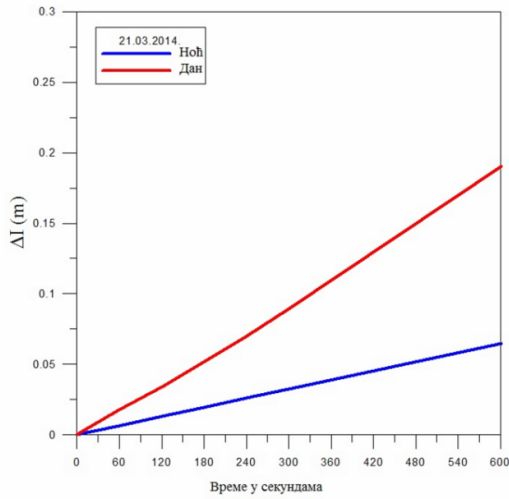
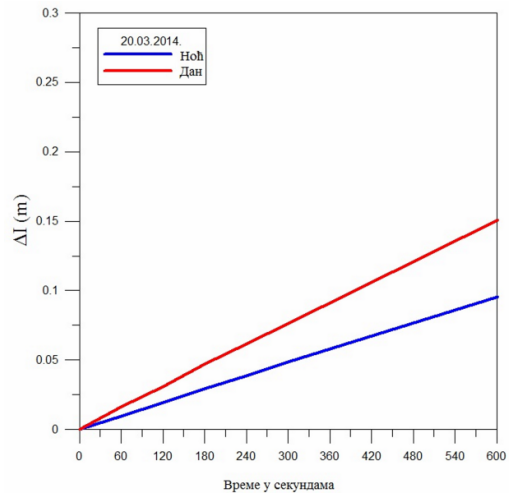
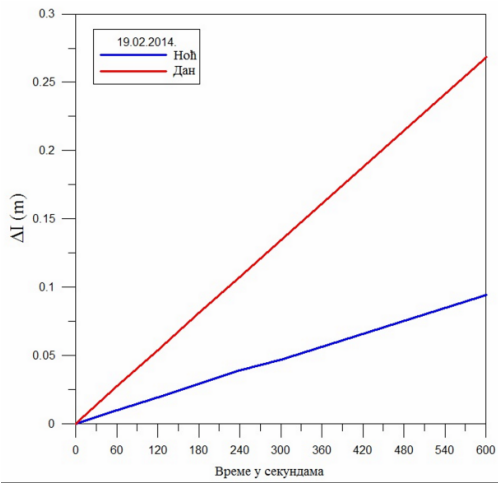




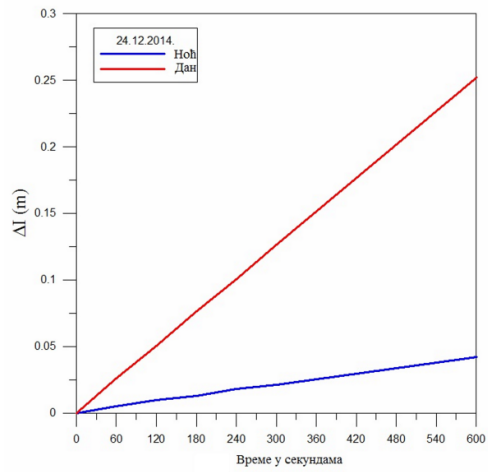
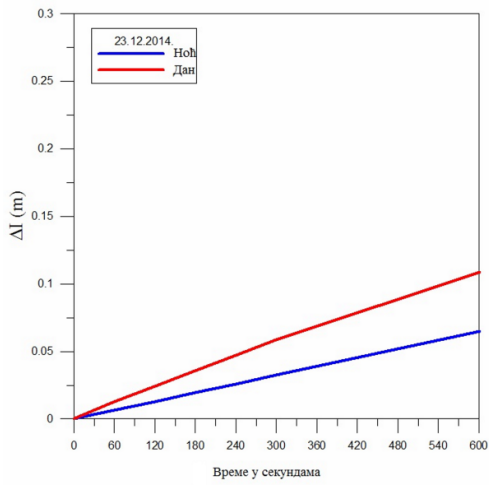
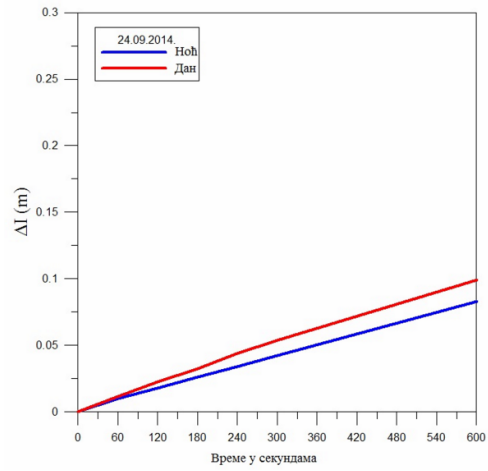
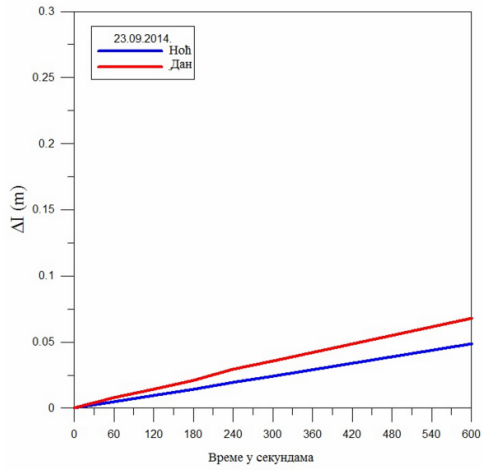
Разлике варијација јоносферског кашњења за дневне и ноћне периоде 2013. год.



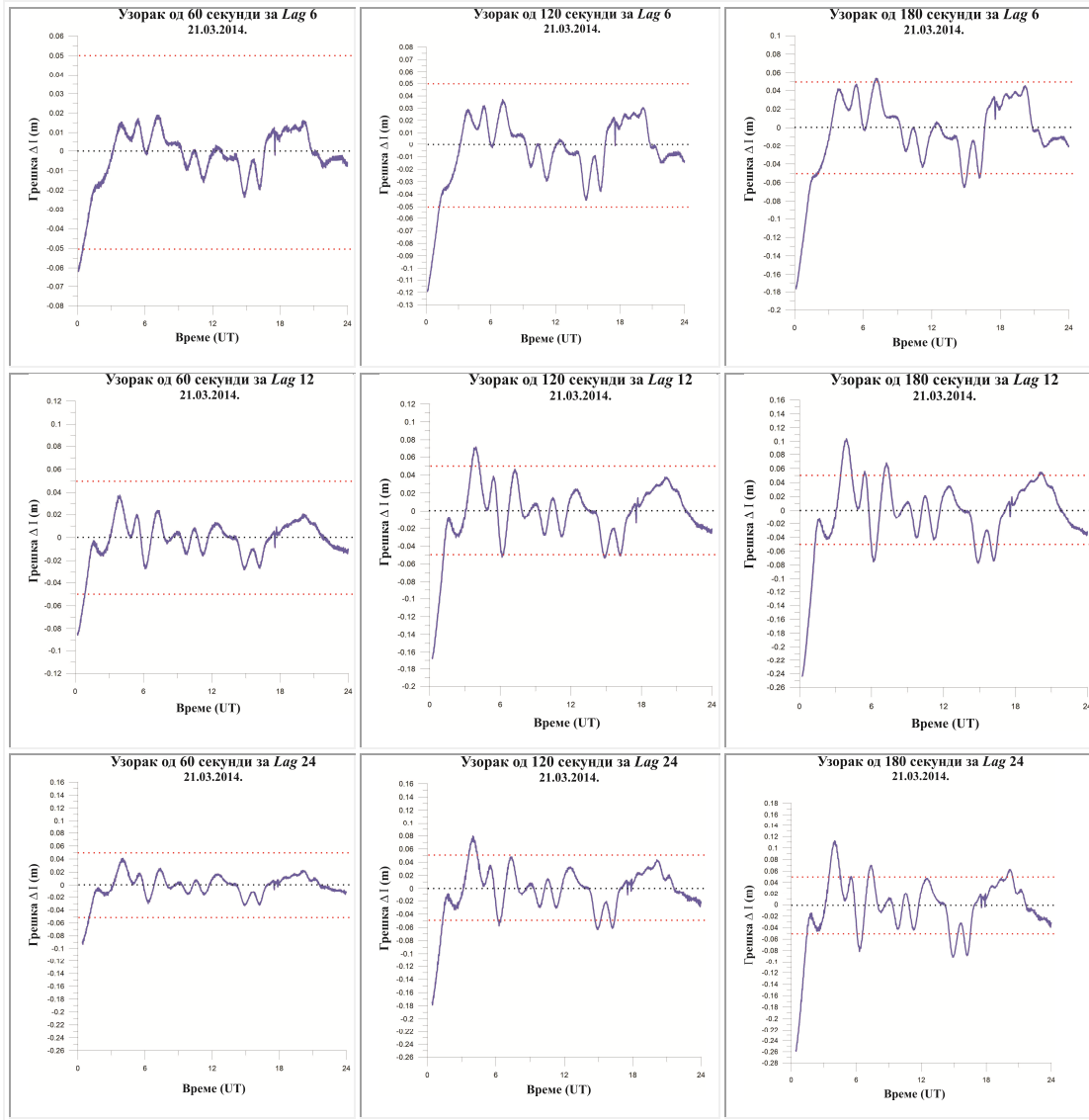
Разлике варијација јоносферског кашњења за дневне и ноћне периоде 2014. год.



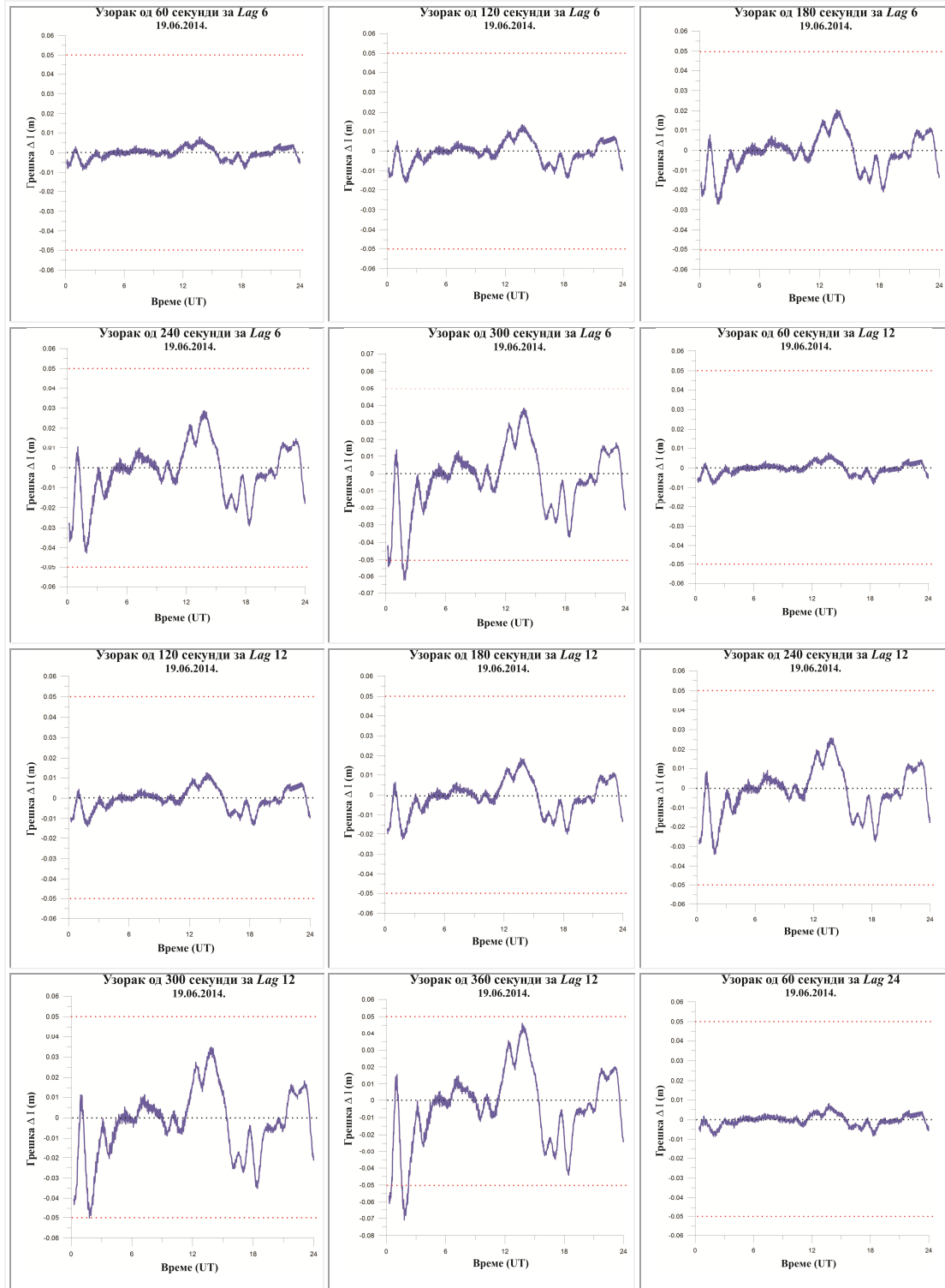
Разлике варијација јоносферског кашњења за дневне и ноћне периоде 2014. год.



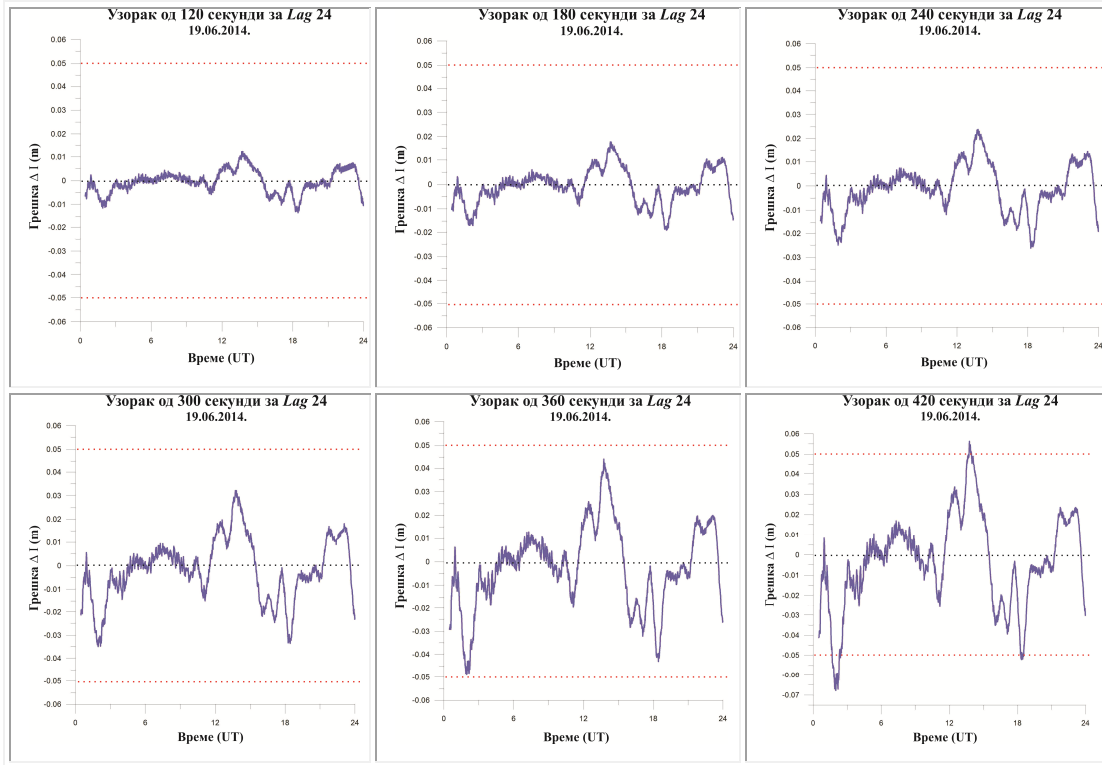
Линеарна регресија - грешке између реалних и предиктованих вредности за све величине узорака за 21.03.2014.год



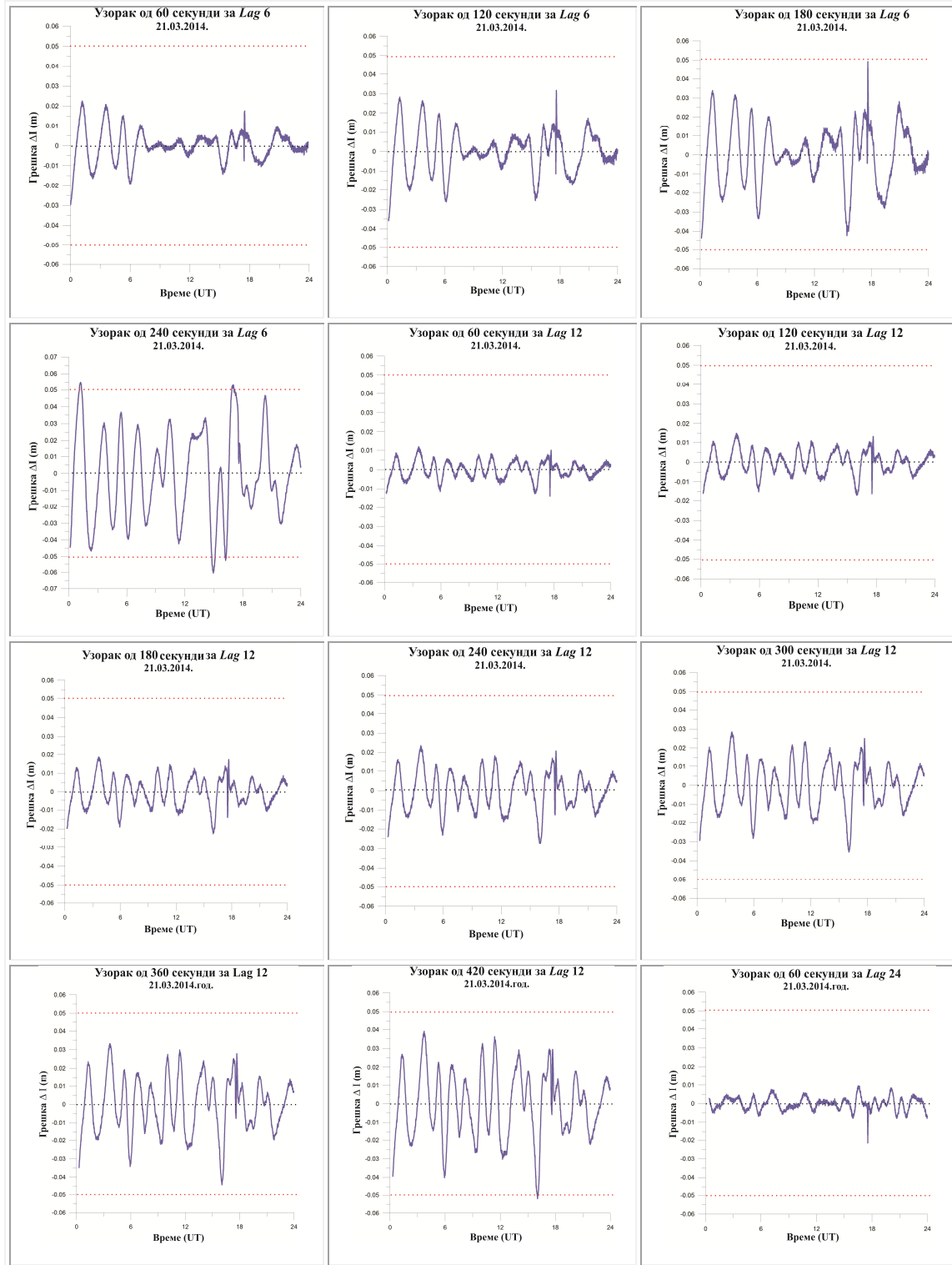
Линеарна регресија - грешке између реалних и предиктованих вредности за све величине узорака за 19.09.2014.год



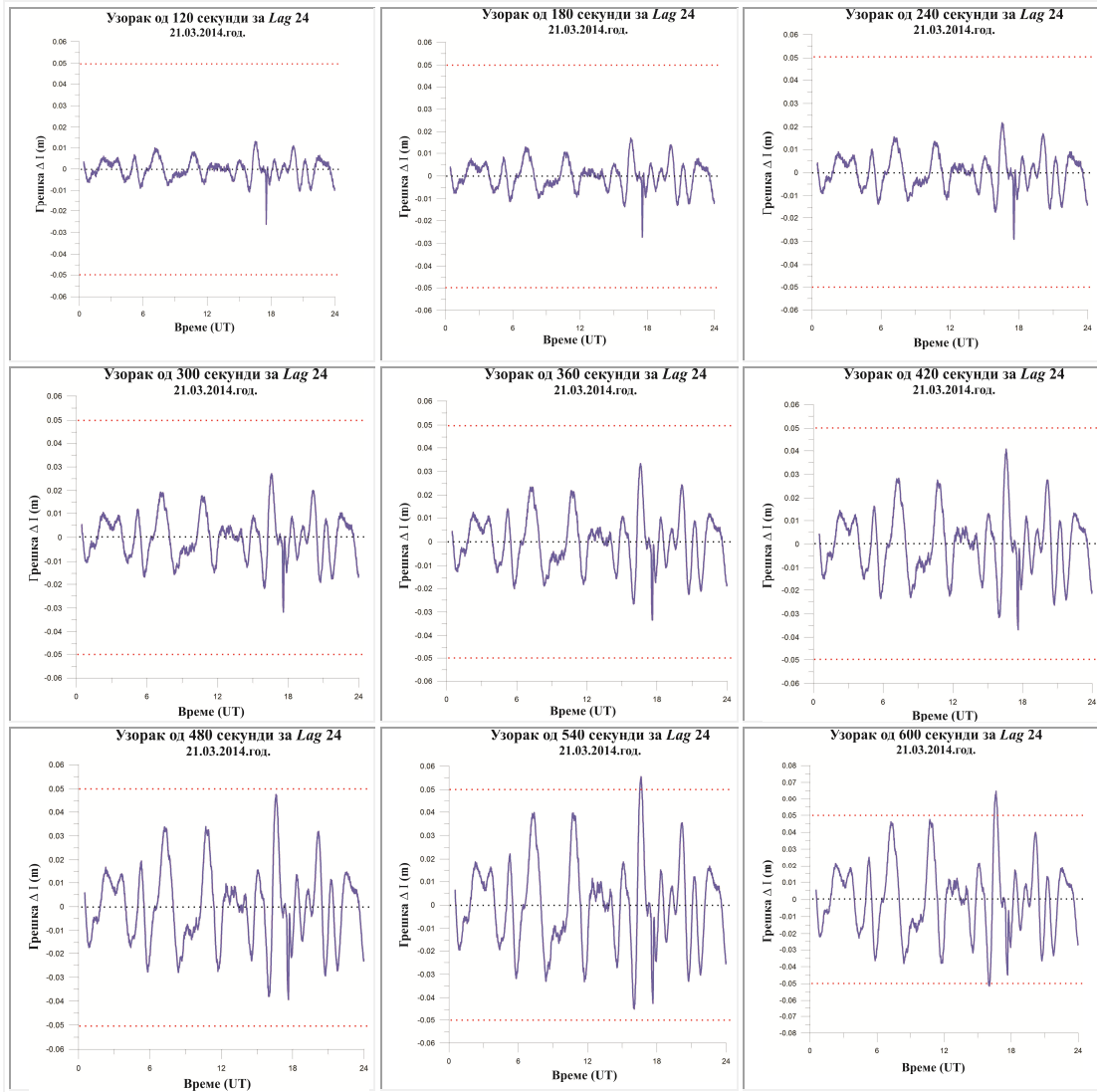
Линеарна регресија - грешке између реалних и предиктованих вредности за све величине узорака за 19.09.2014.год



Неуронске мреже - грешке између реалних и предиктованих вредности за све величине узорака за 21.03.2014.год

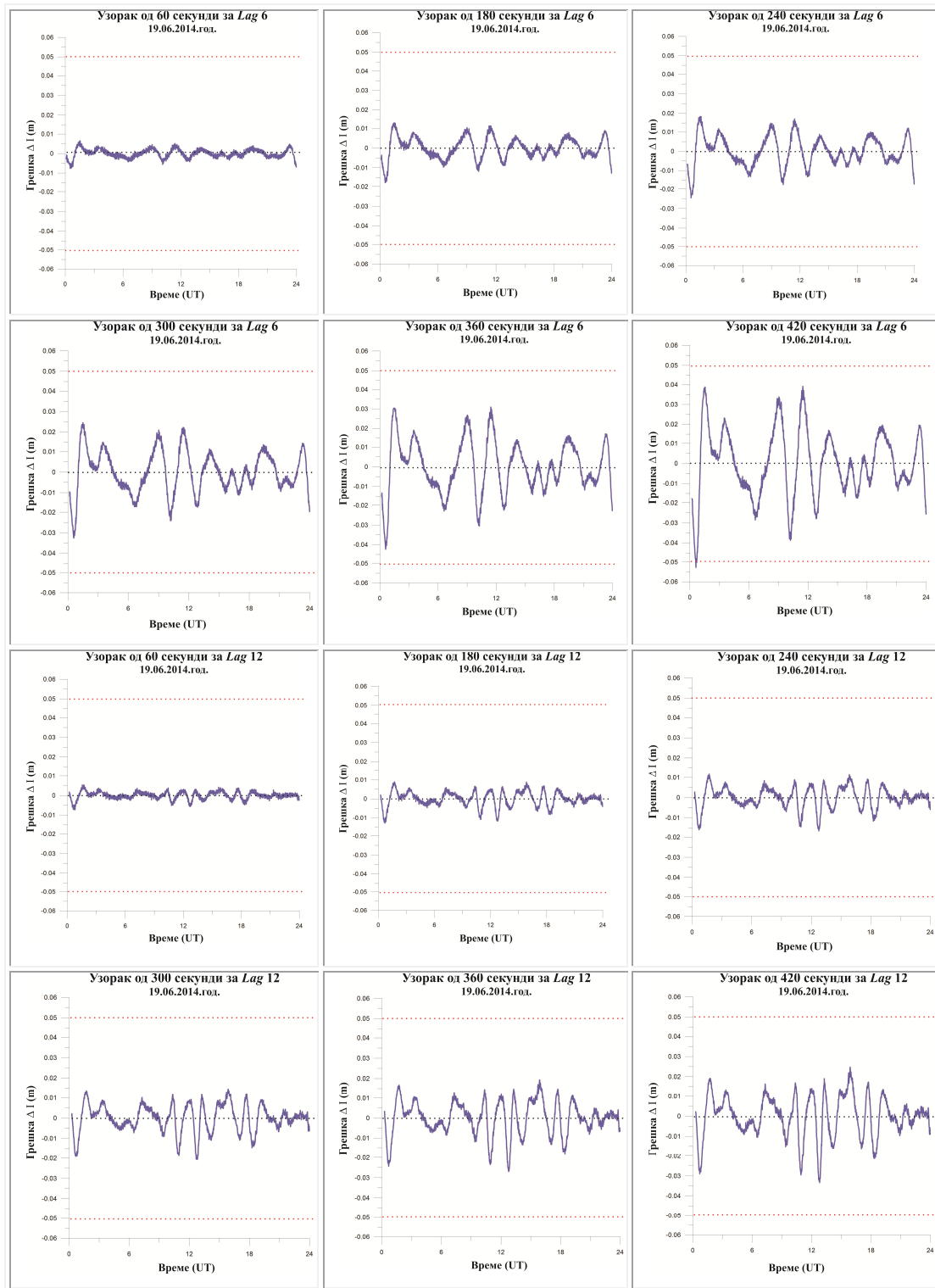


Неуронске мреже - грешке између реалних и предиктованих вредности за све величине узорака за 21.03.2014.год

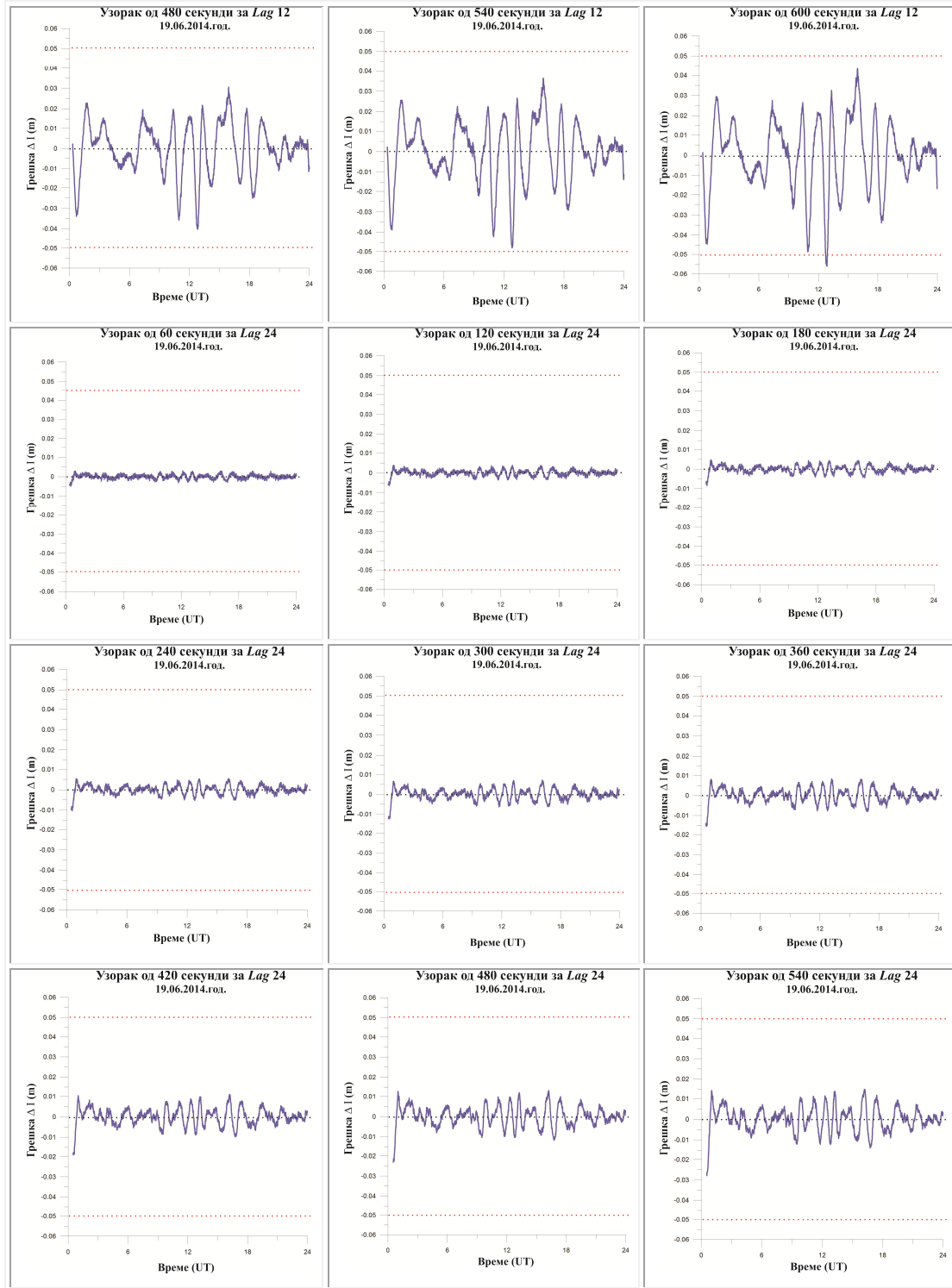




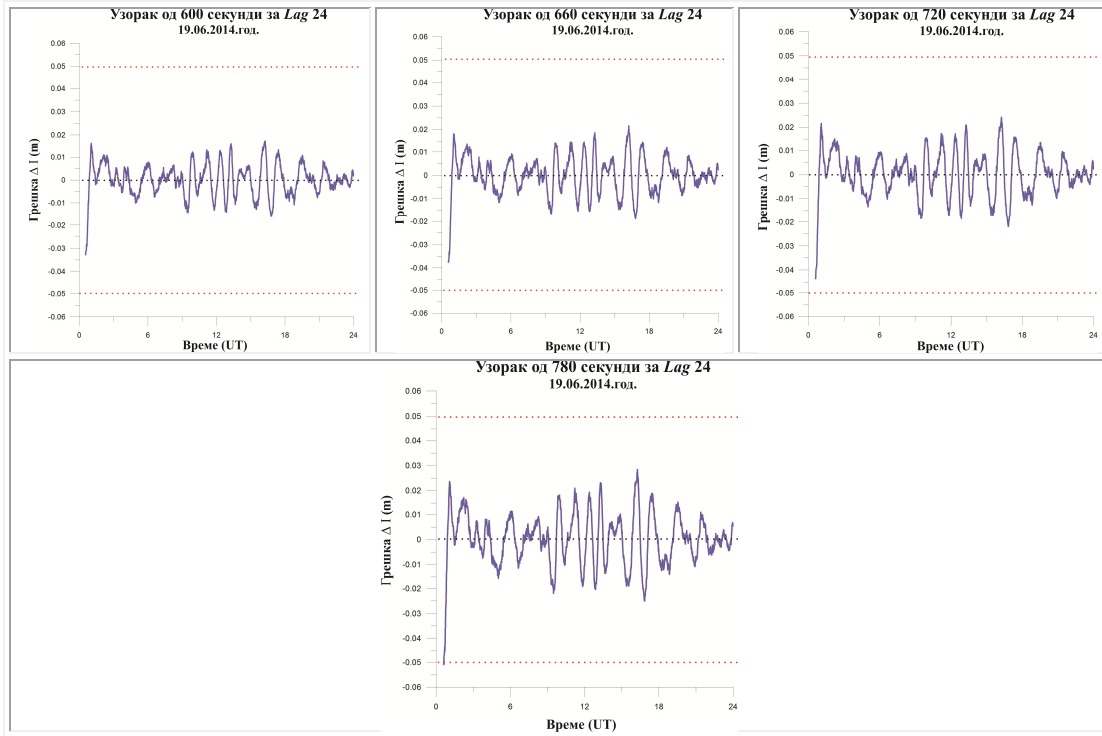
Неуронске мреже - грешке између реалних и предиктованих вредности за све величине узорака за 19.06.2014.год



Неуронске мреже - грешке између реалних и предиктованих вредности за све величине узорака за 19.06.2014.год



Неуронске мреже - грешке између реалних и предиктованих вредности за све величине узорака за 19.06.2014.год



## Биографија аутора

---

Миљана (Стојан) Тодоровић Дракул, дипл. инж. геод. рођена је 13.10.1980. године у Сарајеву, Босна и Херцеговина. Основну школу и средњу Геодетску техничку школу завршила је у Београду, Република Србија, са одличним успехом. Године 1999. године уписала се на Грађевински факултет у Београду, Одсек за геодезију, и све предвиђене испите положила са просечном оценом 8.32. Дипломски рад под насловом „Обележавање граница парцеле и спровођење промена у складу са законом на постојећим геодетским подлогама града Београда” одбранила је 2008. године са оценом 10 (десет), чиме је стекла звање дипломираног геодетског инжењера. Докторске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду, уписала је 2008. године и прописане испите положила са просечном оценом 10.

Од 2009. године, Миљана Тодоровић Дракул запослена је као асистент на Одсеку за геодезију и геоинформатику Грађевинског факултета у Београду. Учествује у настави на предметима: Технике геодетских мерења, Геодетски премер 1, Геодетски премер 2, Геодетски премер 3, Оптимизација у геодетском премеру и Практична настава из геодетског премера.

Миљана Тодоровић Дракул, учествовала је до сада у научно-истраживачком раду у оквиру пројекта реализованог у сарадњи са Републичким министарством просвете, науке и технолошког развоја под називом "Унапређење геодетске инфраструктуре Србије за потребе савременог државног премера" (2011-2016). Аутор је или коаутор више научних и стручних радова публикованих у часописима од међународног и националног значаја као и зборницима радова са скупова одржаних у земљи и иностранству.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани Миљана Тодоровић Дракул

број индекса 1/08

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

„МОДЕЛОВАЊЕ ЈОНОСФЕРЕ ЗА ПОТРЕБЕ ОДРЕЂИВАЊА УТИЦАЈА НА ГПС СИГНАЛЕ У МРЕЖНОМ РТК ОКРУЖЕЊУ“

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 29.08.2016. године



Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске  
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора Миљана Тодоровић Дракул

Број индекса 1/08

Студијски програм Геодезија и геоинформатика

Наслов рада МОДЕЛОВАЊЕ ИОНОСФЕРЕ ЗА ПОТРЕБЕ ОДРЕЂИВАЊА УТИЦАЈА  
НА GPS СИГНАЛЕ У МРЕЖНОМ РТК ОКРУЖЕЊУ

Ментор Проф. др Драган Благојевић, дипл. геод. инж

Потписани



Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 29.08.2016. године



Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„МОДЕЛОВАЊЕ ЈОНОСФЕРЕ ЗА ПОТРЕБЕ ОДРЕЂИВАЊА УТИЦАЈА НА ГПС СИГНАЛЕ У МРЕЖНОМ РТК ОКРУЖЕЊУ“

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
- 3. Ауторство – некомерцијално – без прераде**
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 29.08.2016. године



1. Ауторство - Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

**3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.**

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.