

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Виолета М. Василић

**МОДЕЛИРАЊЕ РЕГИОНАЛНИХ
ДЕФОРМАЦИЈА ЗЕМЉИНЕ КОРЕ И
СТАБИЛНОСТИ РЕФЕРЕНТНОГ СИСТЕМА**

Докторска дисертација

Београд, 2015.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Violeta M. Vasić

**REGIONAL DEFORMATION MODELLING OF
THE EARTH'S CRUST AND STABILITY OF
THE REFERENCE SYSTEM**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015.

Ментор

Др Драган Благојевић, редовни професор, Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Чланови комисије:

Др Драган Благојевић, редовни професор, Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Др Олег Одаловић, ванредни професор, Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Др Ивана Васиљевић, ванредни професор, Универзитет у Београду, Рударско геолошки факултет

Датум одбране: _____

По плодовима њиховим познаћете их.
Јеванђеље по Матеју

Посвећено

успомени на професора Геодетске астрономије
Грађевинског факултета Универзитета у Београду
Др.-Инж. Владету С. Миловановића

и

успомени на мог ујака
пуковника војске Југославије
хирурга Миливоја К. Радмановића

Захвалност

Пре свега бих желела да изразим своју посебну захвалност ментору дисертације проф. др Драгану Благојевићу на континуираној научној подршци и смерницама у раду. Искрено се захваљујем на заједничкој подршци и ауторитету проф. др Душана Најдановића и проф. др Драгана Благојевића за добијање специјализације у Француској лабораторији за геодезију 2013. год. у Паризу, што је допринело изради дисертације. Изражавам захвалност осталим члановима комисије проф. др Олегу Одаловићу и проф. др Ивани Васиљевић на прегледу и оцени тезе, на конструктивним коментарима и сарадњи током израде дисертације.

Желела бих да се захвалим проф. др Атанасиосу Дерманису са Аристотеловог Универзитета у Солуну за организовање летње школе IAG Reference Frames 2010. год. на Егејском Универзитету у Грчкој, чија су ми предавања значајно помогла у изради докторске дисертације.

Веома сам захвална колегама лабораторије LAREG у Паризу, посебно директору лабораторије проф. др Зухеиру Алтамимију за одвојено време, размену свог знања и искуства у анализи временских серија координата и реализацији референтних система, као и на великом стрпљењу. У оквиру специјализације у француској научној лабораторији изведени су коначни резултати експерименталног дела дисертације који се односе на стабилност референтног система коришћењем софтвера CATREF за изравнање Међународних терестричких референтних оквира. Боравак у француској лабораторији омогућен је добијањем стипендије Француске амбасаде и Француског института у Србији намењене српским истраживачима за научна истраживања на факултетима и лабораторијама у Француској, на чему им искрено захваљујем.

Захваљујем се колегама Мађарске геодетске опсерваторије у Пенцу, посебно проф. др Амбрусу Кениересу за подршку да наставим и стигнем до ове позиције где сам сада.

Наравно, дисертација не би могла да буде урађена без финансијске подршке, тако да користим прилику да се захвалим Министарству просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Такође, захваљујем се на техничкој подршци Републичком геодетском заводу Србије, колегама сектора за геодезију а посебно колеги Зорану Вељковићу. Захвалност на подршци и сарадњи дугујем колегама из Републичког сеизмолошког завода Србије, посебно др Миодрагу Петровићу.

Рад на дисертацији је много помогла подршка, критике и професионални и лични примери многих професора, колега и пријатеља.

Посебну захвалност изражавам мојој породици и мојим најближима који су ме увек подржавали, охрабривали и давали снагу свих ових година.

Аутор

Резиме

Ова дисертација је урађена у контексту наставка геодетских истраживања реализације и стабилности односно временске еволуције Терестричког Референтног Система и савремених померања Земљине коре регионалног карактера која се изводе у оквиру уже научне области Референтне геодетске мреже за коју је матичан Грађевински факултет Универзитета у Београду.

Земљина кора као највиши део у структурној грађи Земље трпи промене под истовременим и супростављеним дејством ендогених и егзогених процеса. Према моделу тектонике плоча Земљина кора је подељена у одређен број танких, крутих плоча које се крећу једна у односу на другу и чије су границе дефинисане сеизмичком активношћу. Висока прецизност позиционирања остварена данас помоћу просторних геодетских техника VLBI, SLR, GPS и DORIS омогућила је добијање информација о кинематици тектонских плоча на основу поновљених или континуираних опажања.

Сателитски системи као што је GPS систем омогућују опажања помоћу којих се добијају временске серије координата станица на физичкој површи Земље са милиметарском тачношћу. Глобалне мреже перманентних станица представљају стандарде за геодетско позиционирање као и за квантификовање кретања великих литосферних континенталних плоча. Регионалне и локалне мреже перманентних GNSS станица представљају полазну основу код задатака геодетског позиционирања и геодетског доприноса геодинамичким истраживањима. За интерпретацију геодетских мерења, за извођење студија о деформацијама као и да би извршена опажања имала физички смисао, примењује се одговарајући глобални референтни систем. За истраживања деформације Земљине површине потребан је референтни оквир фиксиран за Земљу познат под називом Терестрички Референтни Оквир, који има кључни значај у геодезији и другим геонаукама и представља универзални стандард. Међународни Терестрички Референтни Систем, ITRS према IERS Конвенцији, 2010 подразумева следеће: 1) почетак ITRS се налази у геоцентру и представља заједнички центар масе чврсте Земље, океана и атмосфере, 2) систем ротира заједно са Земљом у њеном дневном кретању у простору и 3) оријентација система је екваторијална при чему је Z оса у правацу пола и има за јединицу дужине SI метар.

Истраживања у овом раду су извршена са циљем реализације и оцене стабилности Терестричког Референтног Система, постизања репрезентативности кинематике регионалне области Републике Србије и добијања оцена геодетских квантитета деформација ове области. Основу за добијање оцена чини мрежа перманентних GPS станица Србије које обезбеђују континуирана мерења током више година. На основу добијених вредности брзина станица извршена је оцена квантитета екстензионих и компресионих деформација Земљине површине. Да би ове оцене биле тачне, од кључне важности је да су основна (и будућа) мерења деформација и брзина деформација на највишем нивоу тачности и прецизности. Из тог разлога требало би остварити високу стабилност и дугорочност Референтног система. Поред тога, упоређење и корелација са геолошким моделима доприноси разумевању геодинамичких процеса ове области и резултати истраживања се могу користити за укључивање у више међународних пројеката као што је на пример пројекат European Dense Velocity Field Project.

Кључне речи: Просторне геодетске технике, Терестрички референтни систем, савремена померања Земљине коре

Научна област: Геодезија

Ужа научна област: Референтне геодетске мреже

УДК: 528.3(043.3)

Summary

This PhD. thesis is done in the context of continuing geodetic research and realization of stability and temporal evolution of the Terrestrial Reference System and recent displacement of the Earth's crust which have a regional character that are performed within the scientific geodetic field the Geodetic Reference Network for which is academically competent the Faculty of Civil Engineering of the University of Belgrade.

As the highest part of the structural composition of the Earth, the Earth's crust suffers changes under the simultaneous and opposed effects of endogenous and exogenous processes. According to the model of plate tectonics, the Earth's crust is divided into a some number of thin, rigid plates that have a relative motion, i.e. the one in relation to another plate, and have boundaries that are defined by seismic activity. High precision of positioning achieved today with the spatial geodetic techniques VLBI, SLR, GPS and DORIS, enabled to obtain the information on kinematics of tectonic plates on the basis of repeated or continuous observations.

Satellite systems such as the GPS system, allow observations which are the basis for obtaining the coordinate time series of the stations on the physical surface of the Earth with a millimeter accuracy level. A global network of permanent stations provides the standards for geodetic positioning as well as for quantifying the movements of large continental plates of lithosphere. Regional and Local permanent GNSS networks represent a basis in the geodetic positioning tasks and also for geodetic contribution to geodynamic research. Appropriate global reference system is used for the interpretation of geodetic measurements, for the study of the deformation of the Earth's crust and, also in order to have the observations with physical meaning. Investigations of the deformation of the Earth's surface requires a Earth-fixed Reference Frame known as the Terrestrial Reference Frame, which is a universal standard frame and crucial in geodesy and other geosciences. In accordance with the recommendations provided by IERS Convention, 2010, International Terrestrial Reference System, ITRS include the following: 1) ITRS origin is in the geocenter and represents a common center of mass of the solid Earth, the ocean and the atmosphere, 2) system rotates together with the Earth in its daily movement in space and 3) the orientation of system is equatorial wherein Z axis is in direction of pole and unit length is SI meter.

In this thesis researches were conducted with the aim to realize and evaluate the stability of the Terrestrial Reference System, in order to achieve a representativeness kinematics of regional area of the Republic of Serbia and derivation the estimates of geodetic deformation quantity of this area. The basis for derivation the estimates represents the network of permanent GPS stations of Serbia, through which are realized the continuous measurements over several years. Based on the estimated station velocity is carried out the assess of quantity of extensional and compressive deformation of the Earth's surface. To make these estimates were correct, it is crucial that the basic (and future) strain measurement and strain rate are on the highest level of accuracy and precision. For this reasons, we should realize the high stability and long-term reference system. In addition, comparison and correlation with geological models contributes to the understanding of the geodynamic processes in this area and the results of the research can be used to engage in international projects, such as for example the European Dense Velocity Field Project.

Keywords: Space geodetic techniques, Terrestrial Reference System, recent displacement of the Earth's crust.

Scientific field: Geodesy

Special scientific field: Geodetic reference networks

UDK: 528.3(043.3)

Садржај

Списак скраћеница.....	i
Списак табела.....	iii
Списак слика.....	iv
Списак важнијих ознака.....	vii
Увод.....	1
1 Структурна грађа Земље.....	4
1.1 Физичка и хемијска грађа Земље.....	4
1.2 Геолошка временска скала Земље.....	6
1.3 Литосфера.....	8
1.3.1 Дефиниција литосфере.....	9
1.3.2 Типови литосфере.....	10
1.3.3 Литосферске плоче.....	11
1.3.4 Границе плоча.....	13
2 Састав Земљине коре.....	17
2.1 Магматске стене.....	18
2.2 Седиментне стене.....	20
2.3 Метаморфне стене.....	22
2.4 Минераложке карактеристике Земљине коре.....	24
3 Референтни оквири за описивање вертикалних кретања литосфере.....	27
3.1 Референтни оквири за геодинамичке проблеме.....	28
3.1.1 Референтни оквири: сфера, елипсоид и геоид.....	28
3.1.2 Ојлеров и Лагранжов референтни оквир.....	29
3.1.3 Референтна литосфера.....	30
4 Референтни системи времена.....	31
4.1 Звездано и Универзално време.....	32
4.2 Динамичко време.....	35
4.3 Атомско време.....	36
4.4 UTC преступне секунде.....	38
4.5 Параметри оријентације Земље.....	39
5 Референтни Системи и Референтни Оквири.....	40
5.1 Конвенционални Небески Референтни Систем и Оквир.....	41
5.2 Дефиниција Терестричких Референтних Система.....	42
5.3 Реализација Терестричких Референтних Система.....	45
5.3.1 Реализација ТРС на основу мерења извршених просторним сателитским техникама VLBI, SLR, GPS и DORIS.....	45
5.3.2 Реализација ТРС комбиновањем појединачних референтних оквира.....	57
5.4 Међународни Терестрички Референтни Систем ITRS.....	57
5.4.1 Дефиниција ITRF.....	58
5.4.2 ITRF2005.....	59
5.4.3 ITRF2008.....	60
6 Сателитски GPS систем.....	63
6.1 Референтни систем WGS84.....	63
6.1.1 Однос WGS84 са ITRF.....	65
6.2 GPS системске компоненте.....	66
6.3 Принцип мерења псеудодужина.....	69

6.4	Иzvори грешака GPS мерења	71
6.4.1	Нестабилност осцилатора.....	72
6.4.2	Кашњење електронике.....	73
6.4.3	Кашњења повезана са положајем фазног центра.....	73
6.4.4	Атмосферска рефракција.....	74
6.4.5	Вишелинијске путање сигнала.....	77
6.4.6	Периодични релативистички утицај	77
6.4.7	Мерни шум.....	78
6.5	Моделске једначине кодних и фазних псеудодужина	79
6.5.1	Модели разлика мерења псеудодужина.....	80
6.5.2	Стохастички модел мерења псеудодужина	82
7	Реализација Терестричког Референтног Система Републике Србије	85
7.1	Математички модел CATREF софтвера решења Терестричког Референтног Оквира	85
7.2	Дефиниција датума Терестричког Референтног Оквира на основу временских серија координата.....	87
7.2.1.	Дефиниција датума Терестричког Референтног Оквира једначинама Минималних услова.....	87
7.2.2.	Дефиниција датума Терестричког Референтног Оквира једначинама Унутрашњих услова.....	92
7.3	Реализација Терестричког Референтног Оквира ITRF у Републици Србији	93
7.4	Стратегија реализације ITRF у Републици Србији.....	94
7.4.1	Перманентна GPS мрежа Србије - улазни подаци за извођење CATREF комбинације	95
7.4.2	Дефиниција датума ITRF2008_SRB_UoB применом принципа Минималних услова.....	99
7.4.3	Решење терестричког референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB.....	102
7.4.4	Испитивање офсета, дисконтинуитета и сезонских сигнала за решење референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB.....	110
7.4.5	Поље брзина станица терестричког референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB	121
7.4.6	Референтни оквир EPN08_SRB_UoB.....	125
7.4.7	Упоређење референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB и референтног оквира EPN08_SRB_UoB	127
7.5	Стабилност референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB у односу на референтни стандард ITRF2008	130
7.5.1	Терестрички референтни оквир ITRF2008	130
7.5.2	Почетак референтног оквира ITRF2008 и почетак референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB	132
7.5.3	Размера референтног оквира ITRF2008 и размера референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB	134
7.5.4	Оријентација референтног оквира ITRF2008 и оријентација референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB	135
7.5.5	Трансформациони параметри између референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB и EPN2008_SRB_UoB	137
7.5.6	No-Net-Rotation услов глобалне не-ротације ITRF2008	138
7.5.7	Стабилност и одржање дугорочности ITRF.....	142
8	Математичке основе Структурне геологије.....	144

8.1 Скаларне, векторске и тензорске величине	144
8.2 Координатни системи, трансформација вектора и тензора	145
9 Математичке основе деформације и напона	153
9.1 Дефиниција вектора помераја тачке у деформабилном телу	153
9.1.1 Једначине деформације тачке	154
9.1.2 Једначине вектора помераја тачке	155
9.2 Дефиниција деформације тела	155
9.2.1 Дефиниција дужинске деформације тела	155
9.2.2 Градијент деформације	157
9.2.3 Дефиниција угловне деформације тела	160
9.2.4 Геолошка деформација, реалан стрејн	164
9.3 Компоненте спољашњих и унутрашњих сила које делују на тело	165
9.3.1 Унутрашње силе у пресеку тела	165
9.4 Компоненте тензора напона у тачки тела	167
9.4.1 Стања напона у оптерећеном телу	169
9.5 Напони у стенама литосфере	171
9.5.1 Анализа равнотеже сила стена литосфере	171
9.5.2 Еластичност и референтна стања напона литосфере	173
9.5.3 Куломбов критеријум раседања	176
9.6 Међусобна зависност напона и деформација	178
9.6.1 Хуков закон за стање напона у равни	180
9.6.2 Хуков закон за троосно стање напона тела	181
9.6.3 Тродимензионални модел деформације	182
9.6.4 Модел деформације у топоцентричном оквиру	184
10 Деформација Земљине коре	188
10.1 Моделирање деформације Земљине коре коришћењем метода коначних елемената	192
10.1.1 Главни кораци метода коначних елемената	193
10.2 Главне компоненте тензора брзине деформације у оквиру области територије Републике Србије	197
10.2.1 Геотектонска подела региона области истраживања	197
10.2.2 Сеизмотектонска истраживања испитиваног региона	202
10.2.3 Математички модел ITRF локалних брзина станица	214
10.2.4 Избор станица референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB за одређивање деформација Земљине коре	215
10.2.5 Рачунање локалних брзина станица	217
10.3 Тензор геодетских брзина деформације	220
10.4 Резултати геодетских хоризонталних брзина деформације	223
10.5 Анализа и интерпретација резултата геодетских хоризонталних брзина деформације	226
10.5.1 Локалне брзине EPN станица	226
10.5.2 Локалне брзине GPS станица Србије	227
10.5.3 Анализа брзина деформација Delaunay-евих троуглова	229
10.5.4 Зоне брзина деформација Земљине коре за област територије Србије ...	241
10.5.5 Зоне брзине дилатације у области територије Србије	243
11 Закључак и препоруке	247
Литература	253

Списак скраћеница

АГРОС	Активна Геодетска Референтна Основа Србије
ВИН	Bureau International de l'Heure
ВИРМ	Bureau International Des Poids Et Mesures
ВТС	ВИН Terrestrial System
CATREF	Combination and Analysis of Terrestrial Reference Frames Software
CCRS	Conventional Celestial Reference System
CEP	Celestial Ephemeris Pole
CERGOP	The Central European Geodynamics Project
CIO	Celestial Intermediate Origin
CIS	Conventional Inertial System
CCRS	Conventional Celestial Reference System
CRF	Celestial Reference Frame
CRS	Celestial Reference System
CTP	Conventional Terrestrial Pole
CTRF	Conventional Terrestrial Reference Frame
CTRS	Conventional Terrestrial Reference System
CTS	Conventional Terrestrial System
DoD	Department of Defense
DOMES	Directory Of MERIT Sites
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
DOY	Day Of Year
DTM	Digital Terrain Model
ECEF	Earth-Centered Earth-Fixed
ECM	Earth's Center of Mass
EGM	Earth Gravitational Model
EGM96	Earth Gravitational Model 1996
EGM2008	Earth Gravitational Model 2008
EOP	Earth Orientation Parameters
EPN	EUREF Permanent Network
EPN08_SRB_UoB	Realizacija Referentnog okvira EPN08 u Srbiji (SRB) u okviru naučog rada na Univerzitetu u Beogradu (UoB)
ESA	European Space Agency
ET	Ephemeris Time
ETRF2000	European Terrestrial Reference Frame 2000
ETRS89	European Terrestrial Reference System 1989
EUREF	IAG Reference Frame Sub-Commission for Europe
GALILEO	GNSS sistem nazvan po astronomu Galileo Galilei
GCRS	Geocentric Celestial Reference System
GFZ	German Research Centre for Geosciences
GIS	Geographic Information System
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GMST	Greenwich Mean Sidereal Time
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment (satellite mission)
GRS80	Geodetic Reference System 1980
GAST	Greenwich Apparent Sidereal Time
GMST	Greenwich Mean Sidereal Time
GST	Greenwich Sidereal Time
GTT	Greenwich True Time
IAG	International Association of Geodesy

IAU	International Astronomical Union
ICRF	International Celestial Reference Frame
ICRS	International Celestial Reference System
IDS	International DORIS Service
IERS	International Earth Rotation Service
IGS	International GPS Service
IGN	L'Institut National de l'Information Géographique et Forestière,
ILRS	International Laser Ranging Service
IRM	IERS Reference Meridian
IRP	IERS Reference Pole
ITRF	IERS Terrestrial Reference Frame
ITRF2008	International Terrestrial Reference Frame 2008
ITRF2008_SRB_UoB	Realizacija Referentnog okvira ITRF2008 u Srbiji (SRB) u okviru naučog rada na Univerzitetu u Beogradu (UoB)
ITS	Instantaneous Terrestrial System
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics
IVS	International VLBI Service for Geodesy and Astrometry
JD	Julian Dates
LAGEOS	LAser GEOdynamics Satellites
LAREG	LABoratoire de Recherche en Géodésie
MLE	Maximum Likelihood Estimation
MNK	Metod Najmanjih Kvadrata
MSF	Matrix Scaling Factor
MSL	Mean Sea Level
MST	Mean Sidereal Time
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAVSTAR	Navigation Satellite Timing and Ranging GPS
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
NGS	National Geodetic Survey
NIMA	National Imagery and Mapping Agency
NNR	No-Net-Rotation model
NUVEL	Global Relative Plate Motion Model
PCV	Phase Center Variation
PGA	Peak Ground Acceleration
PGR	Post Glacial Rebound phenomena
PMM	Plate Motion Model
PTZ	Републички геодетски завод Србије
RINEX	The Receiver Independent Exchange Format
RMS	Root-Mean-Square
SA	Selective Availability
SHARE	Seismic Hazard hARmonization in Europe
SI	Le Système International D' Unites
SINEX	Solution INdependent EXchange format
SLR	Satellite Laser Ranging
SPS	Standard Positioning Service
SRB	Republic of SeRBia
SRTM	Shuttle Radar and Topography Mission
TAI	Temps Atomique International
TEO	Terrestrial Ephemeris Origin
TDB	Temps Dynamique Barycentrique
TDT	Temps Dynamique Terrestre
TIO	Terrestrial Intermediate Origin
TOPEX	ocean TOPography EXperiment (satellite mission)
TR	Technical Report

TRF	Terrestrial Reference Frame
TRS	Terrestrial Reference System
TT	Terrestrial Time
TWG	Technical Working Group
UoB	University of Belgrade
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USNO	United States Naval Observatory
UT	Universal Time
UTC	Coordinated Universal Time
UTM	Universal Transverse Mercator
VF	Variance Factor
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
WGS84	World Geodetic System 1984
WRMS	Weighted Root Mean Squared error
WSM	World Stress Map

Списак табела

Табела 1.1. Геолошка доба фанерозоика.

Табела 1.2. Главне и мање тектонске плоче изграђене од океанске и конт. литосфере.

Табела 2.1. Елементарни састав Земљине коре.

Табела 6.1. Геометријски и физички параметри дефиниције система WGS84.

Табела 7.1. Приближне координате GPS станица и временски интервал мерења.

Табела 7.2. Резултати упоређења референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB и глобалног референтног оквира ITRF2008.

Табела 7.3. Координате и брзине станица референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB.

Табела 7.4. Брзине станица у локалном E, N, U оквиру.

Табела 7.5. Резултати упоређења референтног оквира EPN08_SRB_UoB и EUREF реализације EPN_A_IGb08 референтног оквира.

Табела 7.6. Резултати упоређења референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB и референтног оквира EPN08_SRB_UoB.

Табела 7.7. Параметри трансформације у епохи 2005.0 и њихове брзине између ITRF2008 и ITRF2005.

Табела 9.1. Једнодимензионалне деформације.

Табела 9.2. Дводимензионалне деформације.

Табела 10.1. Области јужне Европе значајне за геодинамички статус региона.

Табела 10.2. Сеизмичка угроженост на подручју на територији Србије.

Табела 10.3. Класификација сеизмотектонске структуре Србије.

Табела 10.4. Списак станица коришћених за истраживање деформација Земљине коре у области територије Србије.

Табела 10.5. Апсолутни полови ротације три плоче са и без PGR корекција.

Табела 10.6. Хоризон. брзине станица Delaunay триангулације ITRF2008_SRB_UoB.

Табела 10.7. Delaunay-еви троуглови, координате и брзине тежишта.

Табела 10.8. Параметри брзине деформације троуглова за област истраживања.

Списак слика

- Слика 1.1. Структурна грађа Земље.
Слика 1.2. Деформациони процеси Земљине површи.
Слика 1.3. Карактеристични делови литосфере.
Слика 1.4. Топлотни профил и профил густине континенталне литосфере.
Слика 1.5. Механички и термички гранични слој литосфере.
Слика 1.6. Тектонске плоче Земље.
Слика 1.7. Границе тектонских плоча Земље.
Слика 1.8. Шематски приказ дивергентних граница између две океанске плоче.
Слика 1.9. Шематски приказ конвергентних граница између две континенталне плоче.
Слика 1.10. Конвергентна граница између континенталне и океанске плоче – субдукција.
Слика 1.11. San Andreas расед у С. Америци, Калифорнија.
Слика 1.12. Троструки чвор између Аденског залива, Црвеног мора и ист. Афричк. система.
Слика 2.1. Интермедијарна магматска дубинска стена Диорит.
Слика 2.2. Кластична седиментна стена Бреча.
Слика 2.3. Масивна метаморфна стена Кварцит.
Слика 2.4. Најтврђи минерал у природи Дијамант.
Слика 2.5. Тврдоћа минерала према стандарду из Мосове скале.
Слика 3.1. Релативно кретање равних плоча.
Слика 3.2. Референтни оквири за описивање вертикалних кретања у литосфери.
Слика 3.3. EGM2008 модел висина геоида (u m) у односу на референтни елипсоид.
Слика 3.4. Ојлеров и Лагранжов референтни оквир.
Слика 4.1. Прави (тренутни) и средњи конвенцијални терестрички систем.
Слика 4.2. Звездани дан и Универзални (соларни) дан.
Слика 4.3. Однос временских скала.
Слика 4.4. Стандардни ЕОР параметри - (x_p, y_p) .
Слика 4.5. Стандардни ЕОР параметри – Length Of Day (LOD).
Слика 5.1: Краљевска Опсерваторија - Greenwich примарни меридијан.
Слика 5.2. Међународни Небески Референтни Оквир ICRF2.
Слика 5.3. Хоризонталне брзине VLBI станица глобалне мреже у ITRF2008.
Слика 5.4. 3Д приказ оцена кретања пола на основу VLBI опажања од 1984. год.
Слика 5.5. LAGEOS сателит са пречником сфере 60 cm и 426 ретро-рефлектора.
Слика 5.6. Следећа генерација SLR система (лево) и SLR станица Zimmerwald у Швајцарској (десно).
Слика 5.7. Дистрибуција SLR станица ILRS мреже 2007. год.
Слика 5.8. Глобална мрежа IGS/GPS станица.
Слика 5.9. Глобална DORIS мрежа станица 2011. год.
Слика 5.10. Сателитска констелација DORIS технике.
Слика 5.11. Вертикалне брзине EPN станица изражене у ITRF2005.
Слика 5.12. ITRF2008 мрежа VLBI, SLR и DORIS станица са придруженим GPS станицама.
Слика 6.1. EGM2008 модел грида 2.5' x 2.5' у односу на WGS 84 елипсоид.
Слика 6.2. GPS сателити Block IIА (лево), Block IIR (десно).
Слика 6.3. Перманентна EPN мрежа станица.
Слика 6.4. Основни принцип сателитског позиционирања.
Слика 7.1. Мрежа перманентних GNSS станица у Републици Србији.
Слика 7.2. Распоред GPS станица кампање Serbia EUREF2010 Campaign.
Слика 7.3. Распоред ITRF2008 станица у односу на АГРОС мрежу.
Слика 7.4. Утицај позиције офсета у временским серијама на оцене брзина GPS станица.
Слика 7.5. Резидуали врем. серија са присутним офсетима (црвено) EPN станице ORID.
Слика 7.6. Резидуали временских серија са уклоњеним офсетима EPN станице ORID.
Слика 7.7. Сезонски сигналу у временским серијама станица KLAD и MATE.
Слика 7.8. Резидуали временских серија станица ITRF2008 оквира WTZR и GRAZ.
Слика 7.9. Резидуали временских серија GPS станица OSJE, SRJV, KUMA и VELE.

Слика 7.10. Резидуали временских серија GPS станица SUBO, BEOG, PRIJ и BUJA.

Слика 7.11. Периодограм резидуала временских серија IGS станица од 1996.0-2006.0.

Слика 7.12. Географска дистрибуција GPS станица ITRF2008_SRB_UoB.

Слика 7.13. Поље хоризонталних брзина станица референтног оквира ITRF2008.

Слика 7.14. Поље вертикалних брзина станица референтног оквира ITRF2008.

Слика 7.15. Поље хоризонталних брзина станица референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB.

Слика 7.16. Поље вертикалних брзина станица референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB.

Слика 7.17. Разлике хоризонталних положаја станица два референтна оквира ITRF2008_SRB_UoB и EPN08_SRB_UoB.

Слика 7.18. Разлике вертикалних компоненти положаја станица два референтна оквира ITRF2008_SRB_UoB и EPN08_SRB_UoB.

Слика 7.19. Параметри транслације индивид. оквира у решењу ITRF2008_SRB_UoB.

Слика 7.20. Параметар размере индивидуалних оквира у решењу ITRF2008_SRB_UoB.

Слика 7.21. Параметри ротације индивидуалних оквира у решењу ITRF2008_SRB_UoB.

Слика 7.22. Поље резидуала брзина референтног оквира ITRF2005 Евроазијске плоче.

Слика 7.23. Хоризонтално поље брзина станица референтног оквира ITRF2008.

Слика 7.24. Вертикално поље брзина станица референтног оквира ITRF2008.

Слика 7.25а. Сферне грешке положаја станица ITRF2008_SRB_UoB.

Слика 7.25б. Сферне грешке положаја и брзина станица ITRF2008_SRB_UoB.

Слика 7.26. Хоризонтално поље брзина станица реф. оквира ITRF2008_SRB_UoB.

Слика 8.1. Положај координатног система $O X'_1 X'_2 X'_3$ у односу на $O X_1 X_2 X_3$.

Слика 8.2. Вектор \vec{F} у десно оријентисаном координатном систему.

Слика 8.3. Компоненте вектора \mathbf{F} у почетном и трансформисаном координатном систему.

Слика 8.4. Диференцирање вектора положаја.

Слика 9.1. Вектор помераја тачке у деформабилном телу.

Слика 9.2. Деформација тела облика круга у 2Д равни.

Слика 9.3. Дужинска деформација линије PQ.

Слика 9.4. Дужинска деформација растојања између две тачке.

Слика 9.5. Деформација вектора помераја тачке унутар тела.

Слика 9.6. Вектор помераја тачке тела у тродимензионалном координатном систему.

Слика 9.7. Једнодимензионална деформација тела.

Слика 9.8. Угловна деформација.

Слика 9.9. Угловна деформација тела.

Слика 9.10. Угловна деформација у тачки тела.

Слика 9.11. Деформација правоугаоног елемента.

Слика 9.12. Ротација правоугаоног елемента.

Слика 9.13. Деформација стена настала сабијањем.

Слика 9.14. Ротација стене без унутрашњег стрејна.

Слика 9.15. Деформација стене смицањем.

Слика 9.16. Компоненте вектора правога напона у тачки тела.

Слика 9.17. Компоненте тензора напона у правоуглом Охуз координатном систему.

Слика 9.18. Главни правци напона.

Слика 9.19. Једноосно стање напона.

Слика 9.20. Двоосно стање напона.

Слика 9.21. Троосно стање напона у тачки тела.

Слика 9.22. Мохорова кружница напона за просторно стање напона у тачки тела.

Слика 9.23. Напон на површини елемента стене.

Слика 9.24. Силе које делују на троугаони елемент стене.

Слика 9.25. Мохоров дијаграм нормалног напона и напона смицања.

Слика 9.26. Цилиндрични механизам за испитивање деформација стена.

Слика 9.27. Нормални напон и напон смицања у односу на осе главних напона.

Слика 9.28. Дијаграми деформација различитих материјала стена.

Слика 9.29. Тродимензионална деформација тачке.

Слика 9.30. Топоцентрични координатни систем.

Слика 9.31. Деформација јединичног круга у елипсу по главним осама деформације.
Слика 10.1. Дијаграм глобалних брзина деформације.
Слика 10.2. Дијаграм глобалне сеизмичности.
Слика 10.3. Прости и дводимензионални елементи вишег реда.
Слика 10.4. Прости и тродимензионални елементи вишег реда.
Слика 10.5. Релативно кретање места на Афричкој плочи у односу на Европску плочу.
Слика 10.6. Геометрија микро плоча региона јужне Европе.
Слика 10.7. Скица главних тектонских плоча и микро плоча у области јужне Европе.
Слика 10.8. Границе Балканског полуострва.
Слика 10.9. Геотектонске структуре Србије.
Слика 10.10. Велики крустални блокови на подручју државе СФР Југославије.
Слика 10.11. Главни сеизмотектонски разломи на територији државе СФР Југославије.
Слика 10.12. Напонска тектонска поља у области јуж. обода Европске плоче државе СФРЈ.
Слика 10.13. Сеизмотектонске структуре територије Србије.
Слика 10.14. Карта сеизмичког хазарда за област територије Србије.
Слика 10.15. Садашњи активни раседи у Европско-Медитеранском региону.
Слика 10.16. Садашњи активни раседи и оцењена брзина деформације у области Србије.
Слика 10.17. Део Европске сеизмичке карте хазарда.
Слика 10.18. Карта напона за област Србије.
Слика 10.19. Диспозиција станица за рачунање регионалних деформација.
Слика 10.20. Хоризонталне брзине 203 станице за оцену ITRF2008 РММ.
Слика 10.21. Резидуали брзина станица након изравнања ITRF2008 РММ.
Слика 10.22. Мрежа Delaunay триангулације за област територије Србије.
Слика 10.23. Локалне хоризонталне брзине станица Delaunay-евих троуглова.
Слика 10.24. Мрежа троуглова са локалним хоризонталним брзинама тежишта троуглова.
Слика 10.25. Неотектонска карта Републике Србије са мрежом Delaney-евих троуглова.
Слика 10.26. Троугао 3 - SRJV-OSJE-BEOG (Sarajevo - Osijek - Beograd).
Слика 10.27. Троугао 4 - OSJE-SUBO-BEOG (Osijek - Subotica - Beograd).
Слика 10.28. Троугао 5 - SUBO-OROS-BEOG (Subotica - Oroshaza - Beograd).
Слика 10.29. Троуглови 6 и 7. BEOG-OROS-KLAD (Beograd - Oroshaza - Kladovo).
Слика 10.30. Троугао 8 - SRJV-BEOG-PRIJ (Sarajevo - Beograd - Prijepolje).
Слика 10.31. Троугао 9 - PRIJ-BEOG-KNJA (Prijepolje - Beograd - Knjaževac).
Слика 10.32. Троугао 10 - BEOG- KLAD-KNJA (Beograd - Knjaževac - Kladovo).
Слика 10.33. Троугао 13 - PRIJ-KNJA-BUJA (Prijepolje - Knjaževac - Bujanovac).
Слика 10.34. Троугао 14 - BUJA-KNJA-SOFI (Bujanovac - Knjaževac - Sofija).
Слика 10.35. Зоне брзина крусталних деформација за област Србије.
Слика 10.36. Зоне брзине дилатације у области Србије.
Слика 10.37. Карта догођених земљотреса магнитуде веће од 4 степена Рихтерове скале у периоду од 1975-2010. год. у области Србије.

Списак важнијих ознака

A, B	конфигурационе матрице
C, Q, Σ	коваријационе матрице
I	јединична матрица
N	матрица коефицијената нормалних једначина
R	матрица ротације
T	вектор translације
D	фактор размере
1	вектор или матрица са свим члановима једнаким јединици
e	јединични вектор
n	вектор слободних чланова у нормалним једначинама
r, x	вектор положаја
X	вектор координата
\dot{X}	вектор брзине
a	велика полуоса елипсоида
1/f	фактор спљоштености Земље
ω	средња угаона брзина ротације Земље
ω_p	вектор ротације тектонске плоче
c_0	брзина светлости у вакууму
ϕ	латитуда
λ	лонгитуда
t	епоха времена
E	оператор математичког очекивања
f	фреквенција сигнала
g	убрзање силе теже
h	кашњење сигнала при проласку кроз хардвер пријемника и сателита
I	јоносферско кашњење сигнала
L	фазна псеудодужина
M	утицај вишеструке рефлексије сигнала
N	фазна неодређеност
O	утицај грешке сателитске орбите
P	кодна псеудодужина
T	тропосферско кашњење сигнала
ε, ω	мерни шум
ϕ, ψ	фазно мерење
λ	таласна дужина
γ	Гама тачка
δt	одступање часовника од системског времена
ρ	геометријско растојање између пријемника и сателита
σ	стандард
τ	време пута сигнала
Δ	оператор просте разлике интерферометријског типа
∇	оператор просте разлике доплерског типа
$\Delta\nabla$	оператор двоструке разлике
$\delta\Delta\nabla$	оператор троструке разлике
δ_{ij}	Кронекеров симбол
\times	векторски производ
\otimes	Кронекеров производ матрица

Списак важнијих ознака у геологији

F	вектор силе
T	тензор
p	вектор положаја
S_i	главне компоненте тензора
u	вектор помераја
ρ	густина
σ	напон, стрес
τ	напон смицања
σ_n	нормални напон
ε	деформација, стрејн
E	Јунгов модул еластичности
ν	Поасонова константа
λ, ζ	Ламеове константе
γ	инжењерски стрејн
μ	Куломбов модул
S_H	максимални хоризонтални напон
S_h	минимални хоризонтални напон
S_v	вертикална компонента напона
T	температура
M	магнитуда земљотреса у степенима Рихтерове скале
q	проток топлоте
k	пермичка проводљивост
z	дубина

Увод

Земља као динамичко тело мења свој облик током времена тако да се и Земљина кора као њен највиши део мења под истовременим и супростављеним дејством ендеогених и егзогених процеса, чије се порекло налази у унутрашњости Земље, океанима, атмосфери, лунисоларним утицајима, топљењу ледника, утицаја биљног и животињског порекла или људској активности. Истраживања настанка и механизма ових процеса су предмет свих геонаука међу којима геодезија пружа изузетан допринос.

Остварена висока прецизност позиционирања просторним геодетским техникама VLBI, SLR, GPS и DORIS је омогућила добијање информација о кинематици тектонских плоча из поновљених или континуираних опажања. Према моделу тектонике плоча Земљина кора је подељена у одређен број танких, крутих плоча које се крећу једна у односу на другу. Границе плоча су дефинисане сеизмичком активношћу и такође могу бити карактерисане вулканима. На основу тога идентификовано је седам већих тектонских плоча: Пацифичка, Северно-Америчка, Јужно-Америчка, Евроазијска, Афричка, Индо-Аустралијска и Антарктичка плоча и око двадесетак мањих плоча међу којима су: Caribbean, Nazca, Cocos, Арабијска плоча и др. Детаљније познавање кинематичке понашања плоча је од фундаменталног значаја за разумевање њиховог механизма функционисања и требало би да допринесе бољем разумевању и прогнози сеизмичке активности.

Оцењене брзине кретања на основу глобалних модела тектонике плоча заснованим на геолошким, палеомагнетским и сеизмичким истраживањима и изведеним из акумулираних брзина кретања током великих временских периода, варирају између 1 cm/у и око 10 cm/у. Ове предикције је могуће доказати само са савременим сателитским техникама и проверити да ли су у садашњем тренутку кретања континуирана. Од 1980. год. истраживања указују на то да су кретања тектонских плоча, изведена из геодетских мерења и осредњена током неколико година, генерално једнака онима која су изведена из геолошких опажања и осредњена током неколико милиона година. Захваљујући предностима сателитских техника драматично је промењена улога деформационе анализе Земљине коре а такође, није тешко предвидети да ће тачност положаја и густина дистрибуције тачака у геодетским мрежама које имају кључну улогу у истраживањима деформације Земљине коре, брзо расти у не тако далекој будућности.

Уз мултидисциплинарну научну сарадњу савремене просторне геодетске технике и анализа резултата мерења у мешовитим математичким моделима, представљаће основу будућих геодетских истраживања у области одређивања померања и деформација Земљине коре. Сателитски системи као што је GPS систем омогућују опажања помоћу којих се добијају временске серије координата станица на физичкој површи Земље са милиметарском тачношћу. Глобалне мреже перманентних станица представљају стандарде геодетског позиционирања и квантификовање кретања великих литосферних континенталних плоча. Регионалне и локалне мреже перманентних GNSS станица представљају полазну основу код задатака геодетског позиционирања и геодетског доприноса геодинамичким истраживањима.

Прерасподеле површинских маса Земље узрокују варијације Земљине коре у времену, које се могу прецизно опајати са високом просторном и временском резолуцијом. За интерпретацију геодетских мерења, за извођење студија о деформацијама као и да би извршена опажања имала физички смисао, потребно је применити одговарајући глобални референтни систем.

Концепт је потекао од научног рада Kovalevsky et al., 1989, према коме важи да положај и кретање нису апсолутни чланови јер увек описују неки физички феномен релативно у односу на референтни систем. Увек је могуће наћи такав референтни систем где се описивање опајаних физичких догађаја може поједноставити. Из тог разлога, изабрани референтни систем зависи од циљева истраживања што је у овом случају према научној литератури (IERS Конвенцији) Конвенционални Референтни Оквир. За истраживања деформације Земљине површине потребан је референтни оквир фиксиран за Земљу познат као Терестрички Референтни Оквир, TRF. За опажање кретања Земље потребан је оквир који се односи на небеска тела и назива се Небески Референтни Оквир, CRF. Према томе, референтни оквири TRF и CRF имају кључни значај у геодезији и другим геонаукама и представљају универзалне стандарде.

Важно је правилно разумети појам референтног система који значи опис физичког окружења и његовог концепта док је референтни оквир физичка реализација референтног система. Појам Међународни Терестрички Референтни Систем, ITRS према IERS Конвенцији, 2010 подразумева: (1) почетак ITRS се налази у геоцентру и представља заједнички центар масе чврсте Земље, океана и атмосфере, (2) систем ротира заједно са Земљом у њеном дневном кретању у простору и (3) оријентација система је екваторијална при чему је Z оса у правацу пола и јединица дужине је SI метар.

Доступност ITRS система је обезбеђена на основу његових најпрецизнијих реализација као што је Међународни Терестрички Референтни Оквир, ITRF који је у надлежности Међународног сервиса ротације Земље и Референтних Система, IERS преко скупа координата и брзина станица. У овом случају координате станица чине темена полиhedрона који дискретизује Земљину површину. Познавањем параметара почетка, оријентације и размере TRF је апсолутно одређен у датој епохи. У таквом Референтном оквиру варијација опајаних положаја је минимална у смислу кинетичке енергије, односно положаји трпе мале али током времена трајне деформације. Према IERS Конвенцији, 2010 тренутни положај фиксне станице на Земљи, на пример GPS станице, $\vec{X}(t)$ у временској епохи t додавањем корекција се доводи у свој регуларни положај $\vec{X}_R(t)$ у референтном оквиру ITRF. Примењујући овај концепт могуће је уклонити високе фреквенције или друге геофизичке ефекте помоћу конвенцијалних корекција $\Delta\vec{X}_i(t)$ у циљу добијања положаја са правилним временским варијацијама, односно

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_R(t) + \sum_i \Delta\vec{X}_i(t)$$

Истраживања у овом раду су извршена са циљем да се постигне репрезентативност кинематике на регионалној области површине Земље, односно области коју покрива територија Републике Србије и да се оценом геодетских квантитета деформација допринесе дубљем разумевању геодинамичких процеса ове области. Основу за

добијање оцена чини мрежа перманентних GPS станица које обезбеђују континуирана мерења током више година.

2008 година у ITRF2008 означава податке мерења последње године који се користе за реализацију референтног оквира. Доступна опажања могу се посматрати као нулта опажањима на основу којих су добијени резултати у референтном оквиру ITRF2008. Следећа реализација која се налази у финалној фази би требало да буде реализација ITRF2015. Са континуираним опажањима током дужег временског периода будући резултати деформација на основу геодетских мерења ће постати све више и више поуздани.

Поред тога, резултати одређивања савремених померања Земљине коре на основу геодетских мерења могу се користити за деформациону анализу великих антропогених објеката, код пројектовања и одржавања референтних геодетских мрежа, пројектовања и одржавања хидроенергетских објеката, истраживања и коришћења природних ресурса, у планирању и усвајању урбанистичких и других планова и слично.

Ова дисертација је урађена у контексту наставка геодетских истраживања реализације и стабилности односно временске еволуције терестричког референтног система и савремених померања Земљине коре регионалног карактера која се изводе у оквиру уже научне области Референтне геодетске мреже за коју је матичан Грађевински факултет Универзитета у Београду.

У том смислу извршена је ригорозна анализа и процесирање временских серија координата GPS станица референтне мреже Србије научним софтвером CATREF Combination and Analysis of Terrestrial Reference Frames (Altamimi, Sillard, Boucher, 2006) у француској националној лабораторији за геодезију LAREG (Laboratoire de Recherche en Géodésie). На овај начин је истовремено реализован терестрички референтни систем ITRF2008 у Србији и оцењене вредности непознатих параметара положаја и брзина станица државне геодетске референтне GPS мреже. На основу добијених вредности брзина станица перманентне мреже Србије према математичком моделу предложеном у више научних радова (Altamimi 2013; Cai, 2007; Grafarend, 2003; King; 2002) извршена је оцена геодетских квантитета деформација Земљине површине. Да би ове оцене биле тачне, од кључне важности је да су основна (и будућа) мерења деформација и брзина деформација на највишем нивоу тачности и прецизности. Укупно, то ће допринети упоређењу и корелацији са геолошким моделима и разумевању геодинамичких процеса ове области као и могућност коришћења моћног алата за геодинамичке примене. Осим тога, резултати истраживања се могу користити за укључивање у више међународних пројеката као што је на пример пројекат: European Dense Velocity Field Project.

Дисертација је организована у оквиру једанаест поглавља. У поглављу 1 дат је приказ структурне грађе Земље, у поглављу 2 је приказан састав Земљине коре, стенски и минералогски материјал. Поглавље 3 представља Референтне оквири за описивање вертикалних кретања литосфере док су у поглављу 4 дате основне дефиниције Референтних система времена. Поглавља 5, 6 и 7 приказују дефиниције и кључне појмове о реализацији референтног система, његовој временској еволуцији и дугорочности. Поглавље 5 приказује основне дефиниције и појмове о референтним системима и референтним оквирима у геодезији и астрономији и даје

приказ функционисања просторних геодетских техника VLBI, SLR, GPS и DORIS. Поглавље 6 представља опис сателитског GPS система и основних принципа позиционирања. У поглављу 7 детаљно је разрађен општи облик математичког модела изравнања на основу временских серија координата GPS станица националне мреже Србије. Изравнање је извршено помоћу CATREF научног софтвера који је пројектован за ригорозну анализу и процесирање временских серија четири просторне геодетске технике VLBI, SLR, GPS и DORIS за генерисање решења терестричког референтног оквира ITRF. Као кључно поглавље целине о референтним системима, поглавље 7 садржи резултате реализације референтног оквира ITRF2008 у Србији под називом ITRF2008_SRB_UoB, оцене вредности положаја и брзина станица као и резултате упоређења овог референтног оквира са реализацијом EUREF референтног оквира под називом EPN08_SRB_UoB. Приказане су математичке оцене стабилности параметара дефиниције референтног система и приказано је поље брзина које карактерише област територије Србије. Поглавља 8, 9 и 10 која се могу груписати у једну целину, дају преглед главних деформација Земљине површине одређене на основу "директних" геодетских мерења која су већ показала свој потенцијал у деформационој анализи Земљине коре. У поглављу 8 су дате математичке основе структурне геологије а у поглављу 9 математичке основе деформације и напона и њиховог међусобног односа. Поглавље 10 као кључно поглавље ове целине описује математички модел деформације и даје оцењене резултате деформација Земљине коре регионалног карактера, односно области територије Србије. Такође, дат је приказ доступних података догођених земљотреса у овој области у последњих 35 година, карте догођених земљотреса у Србији на основу базе глобалних података института GFZ, The World Stress Map Project, Европске сеизмичке карте хазарда, пројекат SHARE, карте сеизмичког хазарда Србије, као и података геолошког модела Неотектонске карте Србије. На основу добијених резултата извршена је подела области истраживања у четири зоне према интензитету крусталних брзина деформација и у односу на доминантне екстензионе и компресионе деформације. Након сумирања резултата закључци и препоруке које би биле корисне за касније студије, отворена питања и могући правци даљих истраживања, дати су у поглављу 11.

1 Структурна грађа Земље

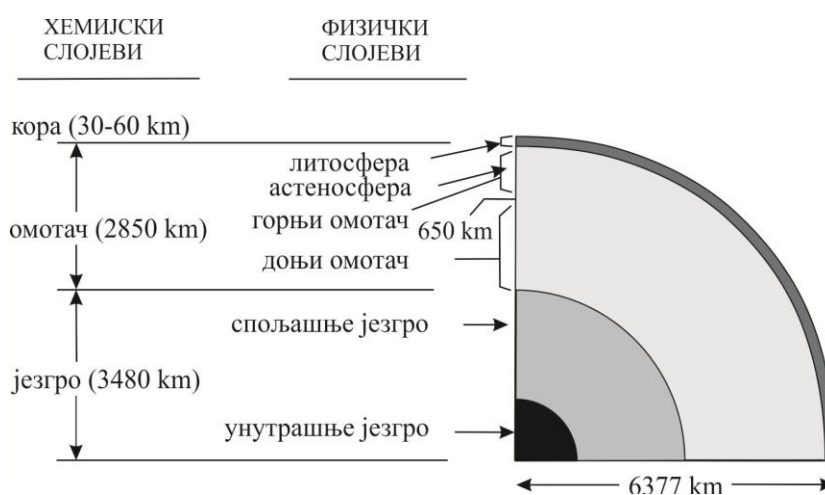
1.1 Физичка и хемијска грађа Земље

Структурну грађу Земље чини неколико слојева који се могу сврстати и поделити у односу на:

- А) Различите материјале од којих су изграђени и
- Б) Различите физичке особине појединачних слојева.

Слојеви грађе Земље сачињени од различитих материјала се могу сврстати у три карактеристична дела: кора, омотач и језгро. У овој подели не учествују слојеви који се налазе изнад површине чврсте земље, односно хидросфера, биосфера и атмосфера. Кора представља највиши слој Земље који у свом нормалном стању има дебљину између 5-7 km за океанску кору и 30 km за континенталну кору. Дебљина коре варира тако да у регионима деформисане континенталне коре њена вредност може бити и до 80 km као на пример регион у Европи испод Алпа.

По хемијском саставу кора је веома диференцирана и хетерогена, али већина њених механичких и физичких особина као што су густина или проводљивост, највише одговарају физичким особинама кварца. Хемијски садржај омотача је у највећем проценту минерал оливин и на већим дубинама се налазе деривати овог минерала добијени под дејством високог притиска. Контактна област коре и омотача која се може издвојити по сеизмичности, назива се Мохоровичић дисконтинуитет (Мохо). Интернационални назив ове области је усвојен према проф. др Андрији Мохоровичићу (1857-1936), једном од најзначајнијих сеизмолога на подручју бивше Југославије. У својим проучавањима серија земљотреса догођених у региону Загреба у периоду 1904-1909. године, проф. Мохоровичић је идентификовао и квантитативно утврдио просторни положај доње границе Земљине коре чиме је започео проучавање унутрашњости Земље на основу сеизмолошких података. Дубина омотача од Мохо дисконтинуитета износи око 2900 km. Трећи карактеристичан део грађе Земље представља језгро које је највише сачињено од метала гвожђа и никла. Грађа Земље према ова два критеријума је приказана на слици 1.1.



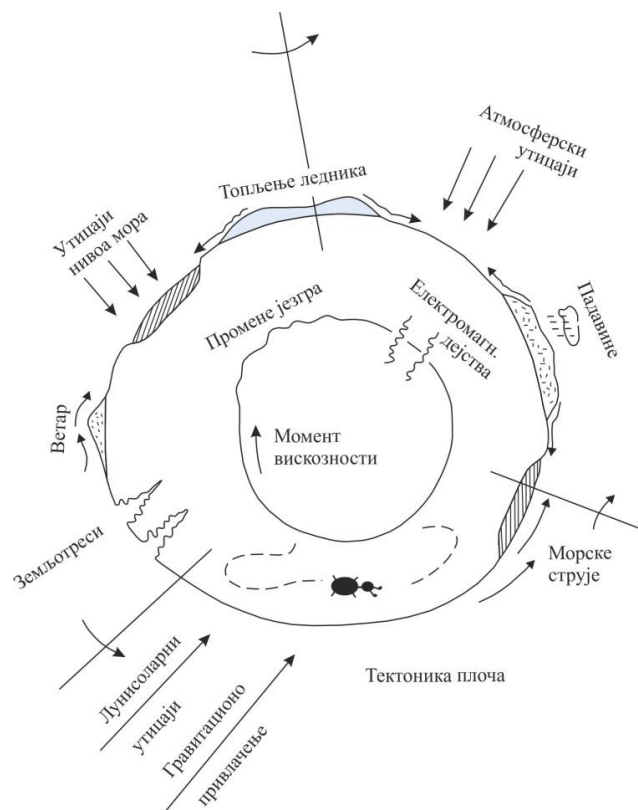
Слика 1.1. Структурна грађа Земље.

Према физичким особина структурна грађа Земље има другачију поделу. Спољашњи слојеви Земље су литосфера и астеносфера. Литосфера се налази у чврстом стању као стенска маса одакле потиче и сам назив овог слоја (од старогрчких речи *lithos* - стеновит и *sphaira* - сфера). Литосфера обухвата и кору и део омотача. Астеносфера потиче од старогрчке речи *asthenia* - мека и састоји се од мекшег дела омотача који се налази испод литосфере. У литератури се могу видети различита тумачења, по неким ауторима астеносфера је цели горњи омотач испод литосфере. Други аутори астеносферу сматрају као део омотача који се налази изнад тачке у којој је адијабатска крива топљења најближа температурном профилу и да се омотач може поделити у три зоне (Wyllie, 1988):

1. Горњи омотач, који приближно достиже дубину до 400 km и карактерише се сеизмичким р - таласима са брзинама од око 8.1 km s^{-1} .
2. Прелазна зона приближне дубине од 400 km до 650 km дисконтинуитета.
3. Доњи омотач који достиже дубину од 650 km дисконтинуитета до границе омотача и језгра на 2900 km дубине.

Испод слоја омотача налази се језгро које се према физичким особинама може поделити на спољашње језгро које се налази у течном стању и унутрашње језгро које се састоји од чврстог материјала.

Као динамичко тело Земља мења свој облик са временом под истовременим и супростављеним дејством ендогених и егзогених процеса. Порекло ових процеса се налази у унутрашњим слојевима Земље као и у спољашњим утицајима као што су океани, атмосфера, лунисоларни утицаји, топљење ледника, утицаји биљног и животињског порекла или људској активности, Lambeck, 1980, слика 1.2.



Слика 1.2. Деформациони процеси Земљине површи.

1.2 Геолошка временска скала Земље

Подела Земље на геолошкој временској скали није иста свуда у свету али је најчешћа подела на еоне, ере, периоде и епохе, табела 1.1. Такође постоје разлике и у одређивању апсолутне старости Земље. Генерално гледано, еони су најкрупније јединице поделе (осим супереона који се у странијој литератури користи за прекамбријум због дужине трајања), затим у оквиру еона се издвајају ере, у оквиру једне ере издвајају се периоде а у оквиру једне периоде епохе.

Табела 1.1. Геолошка доба фанерозоика.

Еон	Ере	Периоде	Епохе	Старост		
Фанерозоик	Кенозоик (Ново доба)	квартар Q	холоцен	65.5 Ма до данашњег дана		
			плеистоцен			
		неоген Ng	плиоцен			
			миоцен			
		палеоген Pg	олигоцен			
			еоцен			
			палеоцен			
			доња креда			
		Мезозоик (Средње доба)	креда K		горња креда	251 Ма – 65.5 Ма
					доња креда	
	јура J		малм			
			догер			
	тријас T		лијас			
			горњи			
	Палеозоик (Старо доба)	перм	средњи	542 Ма – 251 Ма		
			доњи			
		карбон	горњи			
			доњи			
		девон	горњи			
			средњи			
силур		доњи				
ордовицијум						
камбријум						

Старост Земље је процењена на 4.55 милијарде година на основу детаљних научних података. Ова процена представља компромис између најстаријих земаљских минерала и астрономских и планетолошких процена старости Сунчевог система.

Са-Al богате инклузије као најстарији познати тврди састојци унутар метеорита који су се формирали заједно са Сунчевим системом су стари 4.567 милијарде година, што је најстарија граница за старост Сунчевог система а тиме и граница за старост Земље (www3.geosc.psu.edu).

На временској скали у развоју Земље кључни догађаји су се догодили у Мезозоику и Кенозоику када је дошло до раздвајања јединственог континента Пангеје и јединственог океана Панталаса. Током Тријаса суперконтинент Пангеја се почео раздвајати али се није распао. За време Јуре континент Пангеја се раздвојио

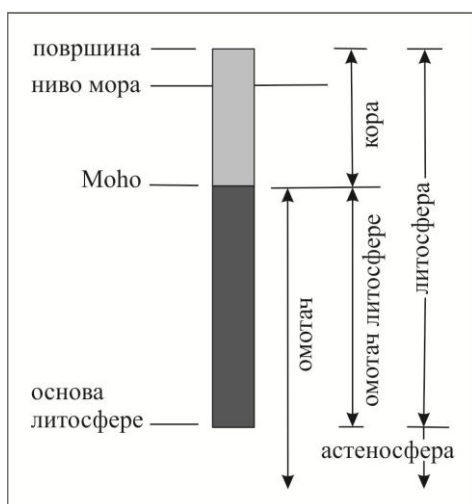
на С. Америку, Евроазију и Гондвану. Међутим, рани Атлантски и Тетијски океани су били релативно уски. У касној Јури се јужни континент Тетис затворио, тако је настао басен Неотетис. Као и у Тријасу није било копна на половима као ни великих поларних капа.

Креда представља један од најважнијих периода геолошке хронологије, који обухвата време од краја Јуре, пре 146 милиона година (Ma), до почетка палеоценске епохе, односно, терцијарске периоде (65.5 Ma). Крај Креде такође дефинише границу између мезозојске и кенозојске ере. За време Креде, касни палеозојски и рани мезозојски суперконтинент Пангеја је довршио свој распад на данашње континенте, иако су њихове позиције биле битно другачије од данашњих. Како се Атлантски океан проширио а Јужна Америка помакла на запад, Гондвана се распала на Антарктик и Аустралију које су се удаљавале од Африке (иако су Индија и Мадагаскар остали спојени с њом). Тако активни, раседи су створили велика подморска горја, подижући еустатички ниво мора широм света. На северу Африке море Тетис се наставило сужавати.

Кенозјска ера или Кенозоик (од грчких речи *kainos* = нов + *zoe* = живот) је најмлађа ера. Она је започела пре 65.5 милиона година са кредско-терцијалним масовним изумирањем на крају Креде које је означило смрт последњих диносаура. Кенозоик се дели на периоде палеоген, неоген и квартар, а они су подељени у епохе. Палеоген се састоји од епоха палеоцена, еоцена и олигоцена, неоген се састоји од епоха миоцена, плиоцена и квартар од епоха плеистоцена (ледничко доба) и холоцена (постледничко доба), од којих последња траје и данас. Квартар је периода у којој се развио човек.

1.3 Литосфера

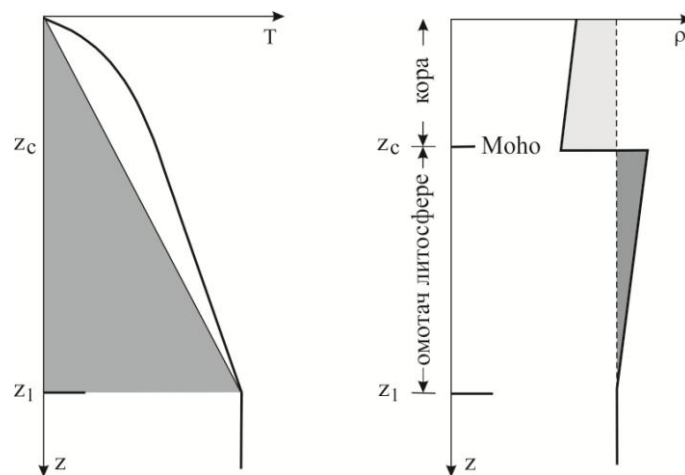
Литосфера представља спољашњи чврсти слој Земље. Посматрано са аспекта целе Зељине кугле, литосфера се може поделити у односу на своје физичке особине или у односу на своје хемијске особине. На слици 1.3 је приказана подела литосфере која није строга јер постоји преклапање појединих слојева који се разликују по особинама тако да се за већину геодинамичких истраживања посматра деловање литосфере као целине.



Слика 1.3. Карактеристични делови литосфере.

У односу на само хемијске особине, литосфера се састоји од коре и дела омотача. Кора се састоји од високо диференцираних отопљених делова који потичу из омотача. Део омотача у литосфери се састоји од материјала који је сличан материјалу на којем се налази омотач астеносфере али за разлику од њега се налази у чврстом стању због своје ниже температуре. Постојање хемијских разлика између омотача литосфере и астеносфере гради дубок механички стабилан омотач литосфере. У оквиру највишег дела омотача постоје варијације и према хемијским особинама и на основу сеизмичких брзина. Једноставнији приступ је да се варијације густине између омотача литосфере и астеносфере посматрају у функцији разлике температуре.

Карактеристични профили литосфере су топлотни профил и профил густине који су значајни за многе геодинамичке процесе који су директно у функцији облика кривих линија ова два профила. Профил температуре је закривљен у делу коре због ширења радиоактивне топлоте а унутар дела омотача литосфере има линеаран облик, односно налази се у стабилном стању. Почетак литосфере се дефинише тачком пресека профила температуре и изотерме између 1200°C и 1300°C . На вишим температурама материјал омотача се налази у течном стању где се сваки температури градијент елиминише конвекцијом тако да су и температура и густина константне испод дубине z_1 (Sanet, 2015).



Слика 1.4. Топлотни профил и профил густине континенталне литосфере.

Дубина Мохо дисконтинуитета испод површине износи z_c а дубина целе литосфере је z_1 . Закривљеност геотерме унутар континенталне коре узрокована радиоактивном производњом топлоте приказана је светло осенченим подручјем. Тамно осенчена област одговара садржају топлоте који се реализује у литосфери из астеносфере, слика 1.4 (<http://jupiter.ethz.ch>). Укупни садржај топлоте коре долази од подједнаких делова топлоте омотача и радиоактивне топлоте.

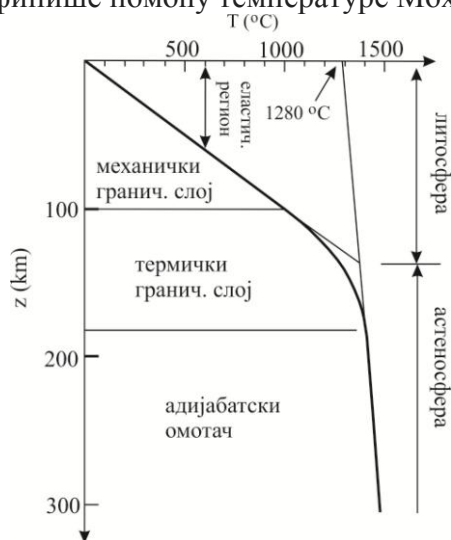
Нагиб профила густине унутар коре и унутар омотача литосфере је функција топлотног ширења. Упоредбење осенчених области показује да је недостатак густине у кори (светло осенчена област) сразмеран вишку густине у омотачу литосфере (тамно осенчена област), релативно у односу на астеносферу. У конвексној астеносфери долази до изједначавања свих хетерогености густине и температуре тако да криве оба профила постају вертикалне, слика 1.4.

1.3.1 Дефиниција литосфере

Појам "литосфера" први је увео Suess 1885. године а касније Barrell 1914. године. 1968. године Isacks је дефинисао литосферу као чврсти површински слој Земље (енг. *near surface layer of strength*) што је и даље једна од прецизних дефиниција литосфере. Већина физичких параметара литосфере мењају се континуирано испод Мохо нивоа као што је и континуиран прелаз са круте спољне љуске Земље (механичког граничног слоја) у вискозну топлу астеносферу. Прелазна зона из литосфере у астеносферу се назива "топлотни гранични слој" (енг. *thermal boundary layer*), слика 1.5 (Perry, 2007). Постоје различите дефиниције појма "топлотни гранични слој", по неким ауторима то је зона транзиције између литосфере и астеносфере, а по другим читава литосфера је топлотни гранични слој Земље.

Преко истраживања разних врста процеса који се одвијају у литосфери може се одредити њена дебљина. Дебљина литосфере је такође у функцији опажаног временског интервала појединих процеса. Геодинамички процеси (сеизмичко кретање, изостатичко издизање, дуктилне деформације) који се догађају у већем временском интервалу подразумевају мању дебљину литосфере. То значи да посматрано са стране сеизмике литосфера је реда дебљине до 200 km, за дуктилне деформације дебљина еластичне литосфере износи само неколико десетина километара. Према Turcotte and Schubert 2002, дефиниција литосфере гласи да дебљина континенталне литосфере представља слој који је у изостатичкој равнотежи са средње океанским гребенима где средње океански гребени представљају манометре горњег омотача Земље.

Према термичкој дефиницији литосфера је део Земље у којој се топлотна енергија преноси провођењем (кондукцијом), за разлику од астеносфере где се топлота преноси конвекцијом. Термичка дефиниција може да обухвата и механичку дефиницију јер механичка својства стена зависе од односа температуре стена и температуре топлења стена. Дебљина стабилне континенталне литосфере према термичкој и механичкој дефиницији износи 100-150 km. Дебљина коре и садржај радиоактивних минерала у кори имају кључни значај за дебљину литосфере зато што највише утичу на температуру Мохо нивоа. На слици 1.5 (<http://jupiter.ethz.ch>) линија геотерме у горњој кори, односно механичком граничном слоју има занемарљиву закривљеност. У литератури се избегава бројчано изражавање тј. дебљина литосфере се дефинише помоћу температуре Мохо дисконтинуитета.



Слика 1.5. Механички и термички гранични слој литосфере.

1.3.2 Типови литосфере

Постоје два фундаментално различита типа литосфере на Земљи:

1. Океанска литосфера и
2. Континентална литосфера.

Корелација океанске литосфере са географским површинама океана и обрнуто је само приближна а такође постоје и значајни делови континенталне литосфере који леже испод океана и обрнуто. Доста груба процена је да се од око 500 m дубине воде налази линија која раздваја континенталну од океанске литосфере. Већина региона у океанима (који су на слици 1.6 приказани белом бојом) чине континенталну литосферу.

Океанска литосфера

Почетак океанске литосфере се налази у средње океанским гребенима. На тим местима литосфера се састоји од једног насипа океанске коре дебљине 7 km која се састоји од кристализованих отопљених делова из највишег дела омотача. Дебљина омотача океанске литосфере је нула близу средине океанског гребена. Са старењем, односно са повећањем удаљености од гребена дебљина омотача океанске литосфере се повећава како се астеносфера постепено замрзава до основе хладне коре. У најстаријим деловима познате океанске литосфере дебљина омотача океанске литосфере је скоро дебела као омотач континенталне литосфере. Међутим, океанска литосфера се производи и троши све време, тако да је тешко да постоји било која океанска литосфера на Земљи која је много старија од око 150 My. Због младости (а тиме и ниске дебљине) средњи океански проток топлоте је значајно већи него континентални. Иако практично не постоји радиоактивна производња топлоте у океанској кори средње океански проток топлоте износи 101 mWm^{-2} (Davies, 2010).

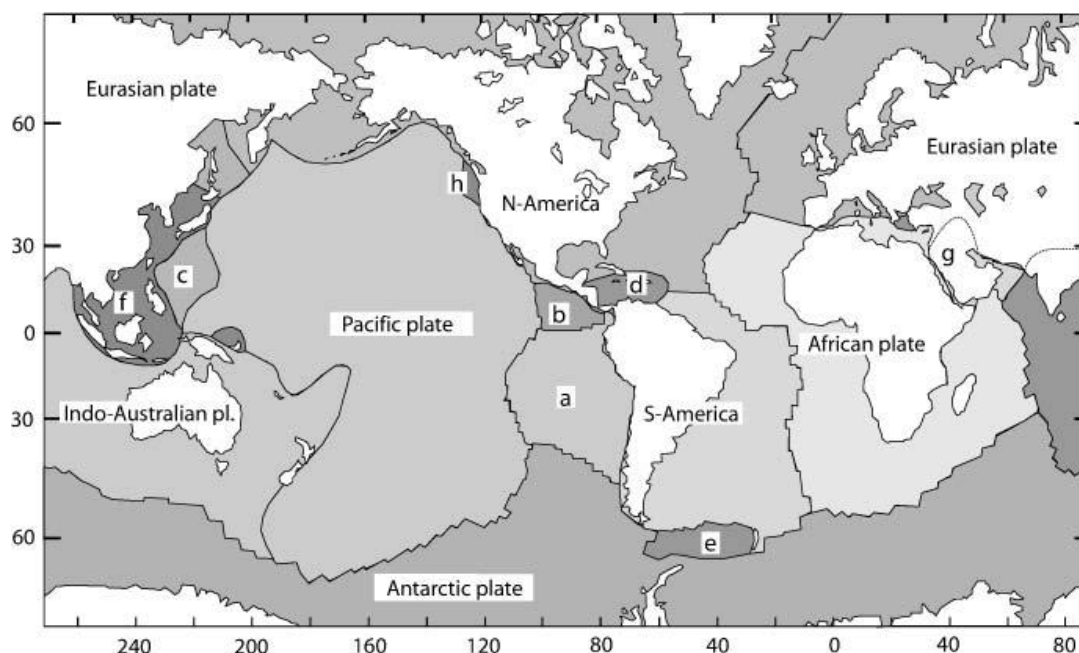
Континентална литосфера

За разлику од океанске литосфере, укупна површина континенталне литосфере је остала углавном константна у целом Фанерозоику. Данас се континенти састоје углавном од континенталне литосфере Протерозоика, која је доживела велике промене у многим регионима. Постоји довољно региона на Земљи где је сачувана континентална кора Архаика и Протерозоика што је значајно за сазнања о тектонским процесима Прекамбрианског доба (Гренланд, Канадски блок и др.). Према хемијским особинама континентална кора је високо диференцирана, има висок садржај радиоактивних елемената и у свом стабилном стању има дебљину око 30-50 km. Према термичкој и механичкој дефиницији омотач литосфере је дебљине око 70-100 km, тако да је укупна дебљина стабилне континенталне литосфере реда 100-150 km. У старијим областима, највероватније због различитог хемијског састава омотача литосфере, дебљина континенталне литосфере може бити много већа. Средњи проток топлоте континенталне литосфере износи око 65 mWm^{-2} (Davies, 2010).

1.3.3 Литосферске плоче

Површ Земље се може поделити на седам главних литосферских плоча и одређен број мањих плоча (слика 1.6, табела 1.2). Главне плоче не кореспондирају са седам континената без обзира што им је број једнак. Већина великих плоча се састоји и од

континенталне и од океанске литосфере. Од седам главних плоча, Афричка и Антарктичка плоча имају специјалну позицију јер су са свих страна окружене само са средње океанским гребенима. Код обе ове плоче перманентно се повећава величина и оне представљају пример где плоче иду из компресивног у екстензивно стање ако се посматра само у функцији повећавања њихове старости (Turcotte and Schubert, 2002). Само на неколико места границе плоча коинцидирају са линијом обале која описује континенте (табела 1.2). Главне тектонске плоче су: Пацифичка плоча, Северно-Америчка плоча, Јужно-Америчка плоча, Евроазијска плоча, Антарктичка плоча, Афричка плоча и Индо-Аустралијска плоча а мање плоче су: а) Nazca плоча; б) Cocos плоча; ц) Филипинска плоча; д) Карибска плоча; е) Scotia плоча; ф) Кинеска подплоча; г) Арабијска плоча; х) Juan de Fuca плоча, слика 1.6.



Слика 1.6. Тектонске плоче Земље (<http://www.learner.org/dynamicearth/>).

Табела 1.2. Главне и мање тектонске плоче изграђене од океанске и континенталне литосфере.

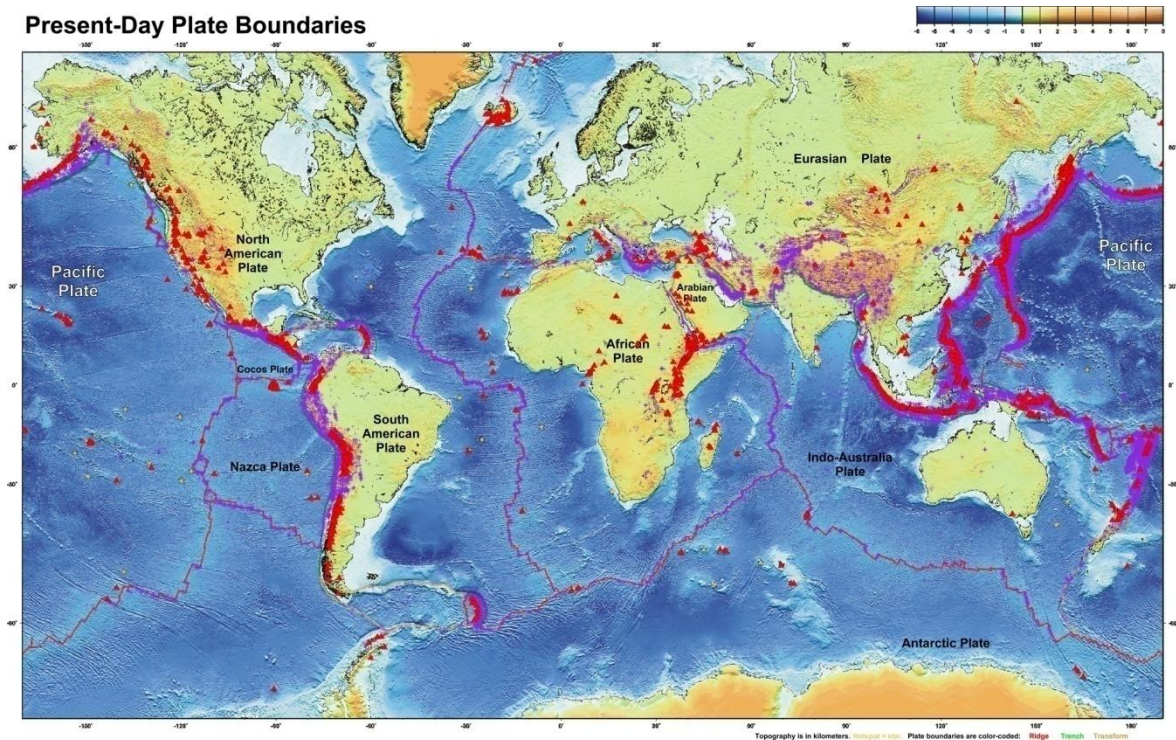
Тектонска плоча	% континент. литосфера	% океанска литосфера
главне плоче		
Пацифичка плоча	100	0
Северно-Америчка плоча	30	70
Јужно-Америчка плоча	50	50
Евроазијска плоча	30	70
Антарктичка плоча	50	50
Афричка плоча	50	50
Индо-Аустралијска	40	60

мање плоче	% континент. литосфера	% океанска литосфера
Nazca плоча	100	0
Кокос плоча	100	0
Juan-de-Fuca плоча	100	0
Scotia плоча	100	0
Филипинска плоча	100	0
Карибска плоча	100	0
Арабијска плоча	10	90

1.3.4 Границе плоча

Дуж граница тектонских плоча догађа се већина геодинамичких процеса, слика 1.7, тако да је за истраживања тих процеса значајна подела граничних плоча у односу на:

- Врсту плоча које су у међусобном контакту и
- Кинематику граничних плоча.



Слика 1.7. Границе тектонских плоча Земље (<http://www.ig.utexas.edu/>).

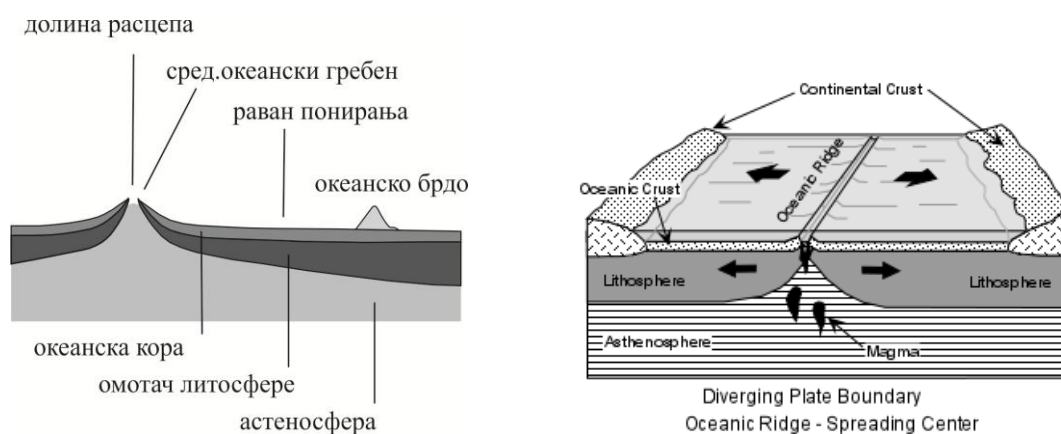
У односу на врсту међусобно граничних плоча, границе између плоча могу бити следеће:

- границе између две континенталне плоче,
- границе између две океанске плоче,
- границе између континенталне и океанске плоче.

У односу на поделу према кинематици плоча постоје конвергентне, дивергентне и трансформне границе плоча. Пасивне границе су некада биле дивергентне границе између две континенталне плоче које сада у облику пасивног контакта између океанске и континенталне литосфере.

Дивергентне границе плоча

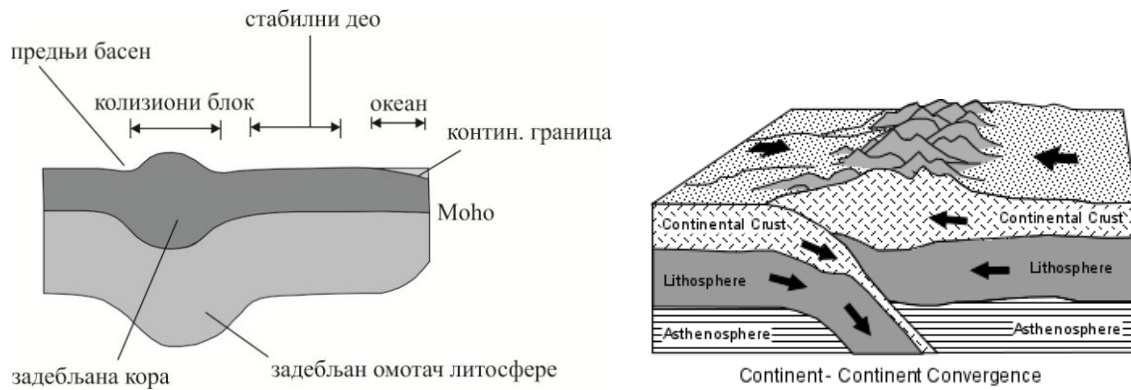
Дивергентне границе плоча су региони у којима се две плоче крећу у супротним правцима или где се једна плоча дели на два дела и на тај начин ствара простор који се пуни новим материјалом коре. Дивергентне границе плоча постоје само између две континенталне плоче, на пример источно Афрички расцеп, или само између две океанске плоче, на пример средње-Атлански гребен. Пасивни састави између континенталних и океанских литосфера су механички веома јаки и није могуће формирање дивергентних граница плоча дуж ових састава. Дивергентне границе плоча код континената се називају расцепи, енг. *rift*. Најпознатији примери су Rheingraben, источно Афрички систем и Црвено море. Дивергентне границе плоча између две океанске плоче (средње океански гребени) представљају најчешће последњу фазу дивергенције до расцепа, слика 1.8. Порекло нове дивергентне границе се налази у троструком чвору за који се сматра да је узрок феномена тзв. вруће тачке. Вруће тачке су места на којима велике конвекцијске ћелије доносе огромне количине врућег астеносферског материјала близу површине, па је кинетичка енергија на тим местима довољна за разламање литосфере. Врућа тачка која је иницирала стварање система Средњеатланског гребена се тренутно налази испод Исланда који се проширује брзином од неколико центиметара по веку.



Слика 1.8. Шематски приказ дивергентних граница између две океанске плоче (<http://www.tulane.edu>).

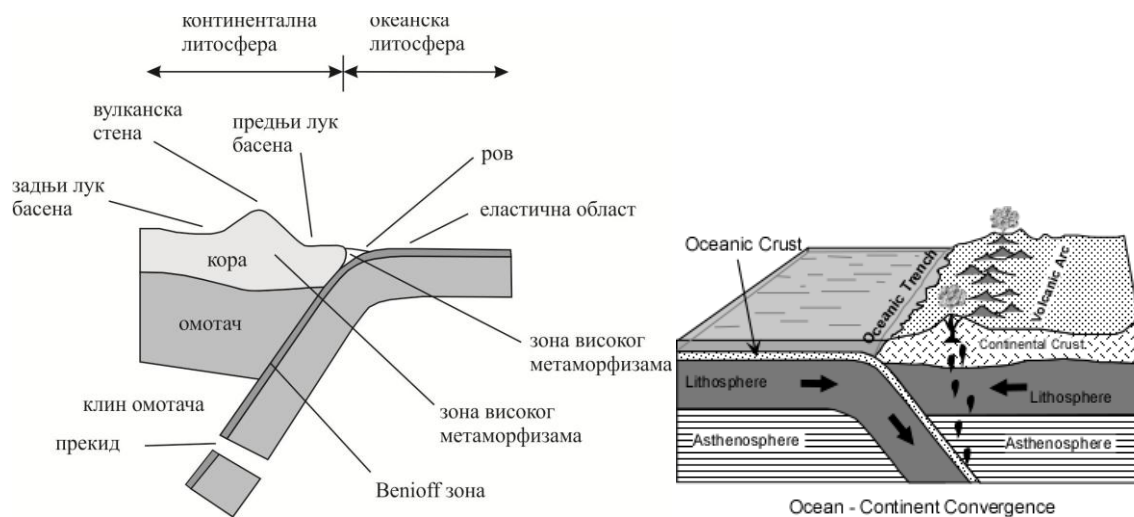
Конвергентне границе плоча

Конвергентне границе плоча се формирају између две континенталне плоче (слика 1.9), између две океанске плоче или између континенталне и океанске плоче. У конвергентним границама плоча између континенталних и океанских плоча, океанска плоча понире испод континента због своје веће густине. Процес понирања се назива субдукција и њен изглед шематски је приказан на слици 1.10. Субдукција доводи до метаморфизма услед високог притиска који се формира у висини зида субдуковане плоче. Овај метаморфизам настаје са губитком течности и делимичним топљењем океанске плоче у тзв. Бениоф зони (Nelson, 2012).



Слика 1.9. Шематски приказ конвергентних граница између две континенталне плоче (<http://www.tulane.edu>).

Кинематика субдукционих зона је веома компликована. Силе и брзине под којима субдукционе плоче тону у астеносферу се упоређују са силама које врши средње океански гребен на плочу. Субдукционе зоне могу да се крећу уназад (према средини океанског гребена) ако је брзина субдукционе плоче већа од брзине расцепа на гребену, док у супротном случају могу да се крећу напред (према континенту) ако је брзина расцепа на гребену већа од брзине понирања. Због тога, растојање између расцепа и континента у широј области се повећава, смањује или остаје константно. У околини субдукционе зоне у зависности од делујућих сила и поља брзина могу настати басени са предњим односно задњим луковима. У неким случајевима колизије океанске и континенталне литосфере делови океанске плоче су спојени на континенталну плочу или је потискују. Такав процес се назива обдукција.



Слика 1.10. Конвергентна граница између континенталне и океанске плоче - субдукција (<http://www.tulane.edu>).

Код конвергенције две континенталне плоче долази до директног судара. До колизије континенталних плоча може доћи из следећих разлога: а) континентална литосфера има већу дебљину, б) има мању густину и в) мекша је од океанске литосфере.

На местима где се плоче сударају долази до њиховог испупчавања или збијања, или се једна плоча поткопава испод друге или прелази преко друге плоче. Ови директни судари доводе до формирања колизионих планинских области који чине већину топографски високих планинских венаца Земље. Током овог главног судара кора постаје деформисана а делови омотача литосфере налажу једни на друге. Један од примера процеса судара две континенталне плоче је област где се северна граница Индијске плоче подвлачи под део Евроазијске плоче чиме је издиже и ствара планински венац Хималаја испред и Тибетски плато иза зоне колизије. Овај процес колизије је такође узрок деформације Азијског континента према западу и према истоку на свакој страни колизије. У случају спајања две океанске плоче не долази до колизије већ се формира субдукциона зона која је слична као када се сударају две плоче различите врсте. За разлику од судара између две континенталне плоче судар између две океанске плоче се не догађа јер су плоче тање, много јаче и гушће па због тога урањају лакше у горњи омотач.

Трансформне границе плоча

У случају када две плоче клизе једна мимо друге а не долази до значајне конвергенције или дивергенције тада се њихов контакт назива трансформна граница плоча. У обе плоче се накупља притисак узрокован овим трећем све док се не достигне степен прекорачења прага деформације стена. Када се догоди прекорачење овог прага долази до ослобађања акумулиране потенцијалне енергије у виду деформације на обе стране раседа.

Деформација је акумулативна и тренутна и зависи од реологије стене - растегљива доња кора и омотач акумулирају деформацију поступно путем смицања, при чему горња кора реагује ломљењем или тренутним отпуштањем притиска, које изазива кретање дуж раседа. Растегљива површина раседа може такође да отпусти притисак када степен деформације постане превелик и тада је енергија која је отпуштена тренутним притиском узрок земљотреса који се догађа дуж трансформних граница. Код овог типа граница не формирају се значајне топографске карактеристике као што су долине расцепа или планински масиви. Међутим, трансформне границе плоча су добро познате јер формирају неке од најзначајнијих зона сеизмичности на планети. Један од најпознатијих примера је зона San-Andreas раседа у Северној Америци (<http://www.tulane.edu>), слика 1.11.

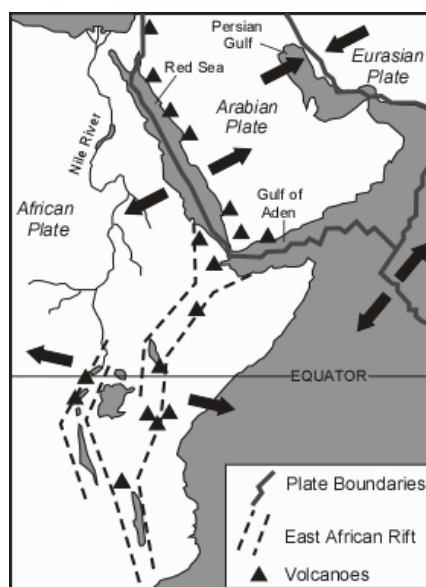


Слика 1.11. San Andreas расед у С. Америци, Калифорнија.

Троструки чвор

Три или више плоча због сферне геометрије Земље додирују једна другу у одређеним деловима и то место додира плоча се назива троструки чвор. Ако се релативним кретањем додирних граничних плоча одржава геометрија током времена онда троструки чвор има стабилну конфигурацију. У случају када је геометрија додирних плоча непостојана тада троструки чвор има нестабилну конфигурацију. Места где се додирују четири или више плоча су увек нестабилна и долази до поделе на два или више трострука чвора.

У зависности од кинематике граница плоча постоји велики број различитих троструких чворова. У литератури се троструки чворови означавају као RRR, TTT, FFF, RTF и друге комбинације троструких чворова где је: "R" (Ridge, гребен) ознака за дивергентне границе плоча, "T" (Trench, расцеп) ознака за конвергентне границе плоча и "F" (Fault, расед) ознака за трансформне границе. Један од најпознатијих троструких чворова је RRR троструки чвор који се налази између Аденског залива, Црвеног мора и источно Афричког рифтинг система, слика 1.12. Као и код других RRR троструких чворова и овде се појављују три различите гране које се налазе у различитим фазама развоја, што онда значи да једна грана чвора може да заустави рифтинг (Lee et al., 2002).



Слика 1.12. Троструки чвор између Аденског залива, Црвеног мора и ист. Афричког система (<http://www.tulane.edu/>).

2 Састав Земљине коре

Земљина кора заједно са омотачем литосфере чини стеновиту целину. У састав Земљине коре улазе сви у природи познати хемијски елементи. Распоређеност елемената није равномерна тј. 75% целокупног састава Земљине коре чине кисеоник и силицијум. Просечна дебљина Земљине коре износи 35 km на континентима и око 7 km испод океанског дна. У табели 2.1 приказан је приближни састав Земљине коре.

Табела 2.1. Елементарни састав Земљине коре

Хемијски елемент	%
Кисеоник (O)	47
Силицијум (Si)	28
Алуминијум (Al)	8
Гвожђе (Fe)	4.5
Калцијум (Ca)	3.5
Натријум (Na)	2.5
Магнезијум (Mg)	2.2
Калијум (K)	2.5
Остали	< 1

Старе консолидоване масе или кратони (штитови и платформе) чине делове континенталне коре која се састоји претежно од гранита. У литератури се назива и СИАЛ по главним елементима силицијуму (Si) и алуминијуму (Al). Просечна дебљина континенталне коре износи 35km а највише 70km и одликује се веома хетерогеним саставом у коме учествују и тзв. некомпатибилни елементи (Cs, Rb, K, Ba, Pb, La, Ce, U, Th, Ta, Nb и P). Некомпатибилни елементи су због својих особина, при диференцијацијским процесима за време топљења, заостали у магми. Океанска кора изграђује чврсту подлогу океана. Сеизмичким мерењима је показано да њен састав не варира ни хоризонтално ни вертикално и да је већим делом чини базалт са малим количинама серпентинита. Океанска кора се назива и СИМА по главним елементима силицијуму (Si) и магнезијуму (Mg). Према начину настанка све стене Земљине коре се деле у три велике групе: Магматске стене, Седиментне стене и Метаморфне стене. Настанак стена или петрогенеза је геолошки процес који се врши преносом топлоте (кондукцијом, конвекцијом, радијацијом), преносом материје (механички, дифузијом) и хемијским процесима зависно од средине (хидролошки, магматски, биохемијски и трошењем). Распрострањеност стена у Земљиној кори је неједнака и зависи од места и начина настанка као и од стабилности у одређеним условима (Васковић, 2012).

2.1 Магматске стене

Хлађењем магме настају магматске стене. Магматске стене су прве настале приликом образовања прве охлађене коре на Земљи, али настају и данас као последица магматских процеса. Магма се дефинише као течни, хомогени силикатни растоп изграђен од тешкоиспарљивих (90%) и лакоиспарљивих (10%) састојака.

Температура магме, мерена на живим вулканима износи 900-1400°C, али је вероватно да се температура магме у дубини Земљине коре разликује од оне на вулканима. Лава може имати нижу температуру него магма као последица хлађења током кретања, али и вишу температуру услед наглог одласка лакоиспарљивих састојака у атмосферу. Лакоиспарљиви састојци, пре свега вода, својим присуством обарају температуру система, тако да по њиховом одласку температура може у извесној мери да порасте. Познавајући температуру кристализације неких минерала такође се може посредно одредити температура магме. Због тога се овакви минерали називају "геолошким термометрима".

На основу досадашњих сазнања о процесима који покрећу магматски растоп и његовом пореклу постоји мали број "изворних" магми. Са друге стране, у природи постоји велики број врста магматских стена. Разноврсним процесима или диференцијацијом магме стварају се различите врсте продуката од једне изворне магме. Процеси диференцијације се одвијају и док магма мирује и у току њеног кретања.

На високим температурама и под дејством спољашњих притисака магматски растоп је потпуно хомоген. До поремећаја овог хомогенитета долази услед опадања температуре. Прва последица опадања температуре је ограничена могућност мешања појединих материја у магми. Због тога долази до издвајања капљица сулфида, пре свега никла, кобалта и бакра. Ово је процес ликвације а продукти који су издвојени су ликвидни сегрегати. Капљице сулфида имају већу густину од остатка растопа, па тону на његово дно. Ови почетни процеси магматске диференцијације имају за последицу осиромашење остатка растопа издвојеним компонентама. Даљим опадањем температуре долази до кристализације првих минерала из растопа. Прво су то металични минерали, као што су хромит или титаномагнетит, а касније почиње кристализација првих петрогених минерала. Ова фаза магматске диференцијације се обично назива фракциона кристализација.

Генерално, главни петрогени минерали се из растопа излучују одређеним редоследом. Научник Боев је поставио шему реда кристализације састојака из магме. На овој шеми су дата два низа, један који приказује ред излучивања бојених (фемских) минерала и други који приказује ред кристализације светлих (салских) минерала. Са опадањем температуре најпре кристалише оливин, затим ромбични па моноклинични пироксени, с тим што најпре кристалишу базични (калцијски) типови, па се састав мења ка албиту који настаје на нижим температурама. На крају на нижим температурама излучује се калијски фелдспат, кварц и мусковит. Анализа Боеве шеме се користи у одређивању минералних асоцијација карактеристичних за поједине типове стена.

Кретањем магме кроз стене Земљине коре долази до откидања фрагмената околних стена који се због високе температуре стапају и у потпуности мешају са магмом. Процес уклапања околних стена у магму се назива асимилација или, с обзиром на мењање састава магме, контаминација (Васковић, 2012). Један од процеса који утичу на промену састава изворних магми је и хибридизација где

долази до мешања двеју магми различитог састава, при чему настаје растоп потпуно нових карактеристика.

Према месту настанка магматске стене се деле на изливне (ефузивне - купе, плоче и лавични токови) и дубинске (интрузивне, плутонске). Магматске стене у односу на структуру деле се на зрнасте (структура дубинских стена) и порфирске (структура изливних стена). Према хемизму магматске стене се деле на: киселе (гранит - дубинска, риолит - изливна), интермедијарне (диорит - дубинска, трахит - изливна), слика 2.1, базичне (габро - дубинска, базалт - изливна) и ултрабазичне (перидотит - дубинска, коматит - изливна).



Слика 2.1. Интермедијарна магматска дубинска стена Диорит.

У минералном саставу магматских стена које настају консолидацијом магме, односно силикатног растопа, учествују пре свега силикати. Најважнији представници су кварц, фелдспати, лискуни, пироксени, амфиболи, оливини и др. Састојци магматских стена се могу поделити по више критеријума. Пре свега на битне - оне који својим присуством одређују карактер стене (кварц, фелдспати, пироксени, амфиболи, оливини) и споредне - оне који у стени могу бити присутни и у значајним количинама, али то неће утицати на карактер стене (магнетит, апатит, пирит и др.). Такође, минерали у стени могу бити примарни - они који су формирани када и стена и секундарни - настали трансформацијом примарних минерала. Једна од класификација која се често користи заснива се на боји минерала. Они се могу поделити на светле (салски, термин који потиче од хемијског састава ових минерала у којима преовлађују Si и Al), као што су кварц и фелдспати и бојене или тамне (фемски, термин потиче од Fe и Mg који учествују у њиховом саставу), као што су биотит, амфиболи, пироксени или оливин. Стене које садрже испод 30% бојених минерала називају се леуократким, са 30-60%, мезократким, а стене које у свом саставу имају преко 60% фемских минерала, меланократким.

2.2 Седиментне стене

Седиментне или таложне стене су оне стене које настају у процесу таложења односно седиментације. У општем случају процес стварања седиментних стена се одвија кроз четири фазе, с тим што неке од њих могу и да изостану.

За стварање једне нове стене потребно је "обезбедити материјал" па је прва фаза стварања стена површинско распадање. Површинско распадање као скуп

егзогенних процеса доводи до уситњавања стенске масе у површинским деловима или њеним делимичним или потпуним растварањем под дејством површинских или подземних вода. Површинско распадање према начину на који настаје може се поделити на механичко (физичко), хемијско и биогено. Биогено распадање стена под дејством живих организама може се свести на механичко или хемијско. Интензитет и брзина површинског распадања осим од саме природе стена зависи у највећој мери од климатских услова. Од климатских услова зависе и количина падавина и степен огољености терена као значајних фактора за процесе распадања. Разликују се четири главна климатска региона:

1. Региони са нивалном климом (поларна подручја и подручја високих планина са висином преко 3000 m),
2. Региони са хумидном климом (тајге и тропске шуме),
3. Региони са аридним климом (пустињски и полупустињски региони) и
4. Региони са сезонском климом (са најчешће полугодишњим смењивањем периода са много падавина и периода са мало падавина).

Процесима механичког распадања долази до превођења чврсте, компактне стене у растресито стање. Фактори који условљавају механичко распадање су различити: колебања дневних и сезонских температура, дејство мрза, рашћење корења биљака, кристализација соли у пукотинама стена, процеси условљени деловањем егзогенних геолошких фактора (спољашњих сила), као што су ветар, текуће воде, рад морских таласа, глечера итд.

Хемијски процеси су значајни за формирање земљишта а такође су значајни и као фактори који доводе до настанка седиментогених лежишта, па се може рећи да је хемијско распадање значајније од механичког. Процеси хемијског распадања су разноврснији од механичких, међутим одмакло механичко распадање ће утицати на брзину и интензитет хемијских процеса. Битан фактор хемијског распадања је вода која раствара компоненте стена у њиховим површинским деловима. На брзину и интензитет распадања стена утичу и особине воде, односно њена температура, киселост, обогаћење неким раствореним компонентама и сл.

Како се све компоненте стена (минерали) не растварају подједнако, интензитет и брзина хемијског распадања зависе и од минералног састава стена. Најлакше су растворни хлориди (халит, силвин), док се неки минерали као што су карбонати (калцит, доломит) растварају тек после дужег деловања растварача, а постоје минерали као што је кварц, који су практично резистентни на хемијско деловање вода. Степен углачаности површине стене такође утиче на хемијско распадање на тај начин што се стене које имају неравне површине лакше и брже распадају него стене са углачаном површином.

Од врсте распадања зависиће и карактер седиментног материјала. Уколико је примарна стена била захваћена механичким распадањем, последица ће бити само механички здробљен материјал без икаквих или са минималним хемијским променама. Уколико је дошло до хемијског распадања односно до растварања појединих минерала, последица ће бити две врсте материјала, раствор распадања (део стене који је растворен и одлази са растварачем) и остатак распадања или механички детритус (нерастворени део стене који заостаје на месту распадања или може касније бити преталожен).

Следећа фаза стварања седиментних стена је транспорт материјала. Уколико се на месту површинског распадања стекну услови за формирање нових седиментних стена тада транспорт материјала може и да изостане. Транспорт механички здробљеног материјала се може одиграти под утицајем различитих фактора: силом гравитације, површинским токовима (потоцима и рекама), ветром

или глечерима, док се раствор распадања преноси само површинским или подземним водама. Од снаге преносног средства и величине и облика фрагмената зависиће и дужина транспорта, односно пут који материјал може да пређе пре таложења.

У пределима са нивалном климом (где температура не прелази 0°C), у поларним областима или на високим планинама долази до нагомилавања великих наслага снега и леда. Под тежином горњих слојева снега долази до прекристализације у подини и стварања зрнастих агрегата леда - фирнова. Ледена маса услед тежине клизи низ падину, успут откидајући комаде стена од подлоге. Овај класични материјал (морене) глечер транспортује вукући га по подлози, што доводи до даљег распадања стена. Овако се могу преносити осим ситних делова распаднутих стена и блокови тежине и по неколико тона. Када се ледена глечерска маса спусти на оне висине на којима владају температуре изнад 0°C долази до њеног отапања и сав материјал који је глечер носио почиње да се таложи. Изузетак су случајеви када може даље да буде преношен површинским токовима који настају отапањем глечера.

Таложењем делова распаднутих стена добија се растресита невезана стенска маса. У следећој фази процеса стварања седиментних стена, дијагенези (литификацији, окамењавању) од растреситих настају чврсте стене. Сам процес дијагенезе може да траје доста дуго, тако да данас налазимо седиментне стене различитог степена везивања. Према начину настанка, седиментне стене се могу поделити на оне које настају таложењем чврстих фрагмената - кластичне или теригене, седиментне стене настале таложењем из хемијских раствора - хемијске и стене које су формиране таложењем нерастворних органских остатака - органогене или биогене. Посебну категорију представљају стене настале таложењем вулканокластичног материјала - вулканокластичне. Према степену дијагенезе или литификације, седиментне стене се могу поделити на невезане седimente, полувезане седimente и везане седиментне стене. Везане и невезане кластичне седиментне стене су: бреча, конгломерат, пешчар, алевролит, лес, глина, глинац, дробина, шљунак, песак, прах, муљ, слика 2.2. Седиментне стене настале таложењем из хемијских раствора или хемијске седиментне стене су: карбонатне стене (кречњаци, лапорци, доломити, бигар, мермерни оникс), евапорати - соли, гвожђевити седименти, силициклстити. Стене настале таложењем нерастворних органских остатака или органогене седиментне стене су: органогени кречњак, дијатомејска земља, рожнаци.



Слика 2.2. Кластична седиментна стена Бреча.

Минерали седиментних стена се могу поделити у две групе. Алотигени минерали који су већ раније формиран и на место седиментације доспевају у чврстом стању и аутигени, минерали који настају приликом настанка саме стене. У изградњи седиментних стена учествују, како минерали магматских стена, као што је кварц, мусковит, фелдспати, тако и минерали који се формирају у хидатогеном циклусу, као што су калцит, доломит, минерали глина, разни сулфати, халоиди и сл.

2.3 Метаморфне стене

Метаморфне стене су оне стене у којима је услед промене физичко-хемијских услова дошло до промене њиховог првобитног састава и (или) склопа. Метаморфне промене су само оне које се врше у унутрашњости Земље, док су промене на површини Земље настале површинским распадањем. Фактори који узрокују метаморфне промене су притисак, температура и дејство флуида. Метаморфизам може бити изохемијски када хемизам стене остаје непромењен при чему се мења склоп и (или) минерални састав стене и алохемијски када долази до промене хемизма стене.

Метаморфне стене настале преображајем магматских стена називају се орто-метаморфитима (ортогнајс, ортоамфиболит), док метаморфне стене које су настале од седиментних стена пара-метаморфити (парагнајс). У зависности од фактора који делују у току метаморфизма постоје два основна типа: регионални динамотермални метаморфизам и контактни метаморфизам.

Регионални или динамотермални метаморфизам обухвата промене стена на великим просторствима изазване повећањем температуре (од 200 - 800°C) у дубини Земље, и повећаним хидростатичким притиском (од 2-10 kbar). Уз хидростатички притисак, који је последица тежине стенских маса и чији је значај већи на великим дубинама, у плићим деловима литосфере настаје као последица тектонских покрета, усмерени притисак или стрес. Снажни усмерени притисци могу да доведу до интензивног дробљења стенских маса и настанка потпуно нових стена. Овакав вид метаморфизма је познат под називом катакластични.

У великим дубинама, захваљујући геотермичком градијенту, температуре могу да достигну вредност при којој долази до делимичног стапања појединих стена. Овако стопљени стенски материјал (мигма) меша се са нестопљеним и формира специфичне метаморфне стене које се називају мигматити, а ова врста метаморфизма се назива ултра-метаморфизам.

Промене изазване деловањем хидротермалних раствора се називају хидротермални метаморфизам, док су овакве промене изазване сопственим лакоиспарљивим компонентама познате као ауто-метаморфизам.

Контактни метаморфизам представља промене које су последица контакта између магме и околних стена у које се она утискује. При оваквим процесима магма може околним стенама да преда само топлоту, термоконтактни метаморфизам, или може да дође и до размене материје, што представља контактано метасоматски метаморфизам. За контактано метасоматске промене неопходно је да магма садржи довољно лакоиспарљивих компонента (кисела), које ће да се крећу кроз околне стене и преносе материјал, као и да околне стене буду довољно порозне и подложне хемијским променама (карбонатни седименти). До термоконтактних промена доћи ће и уколико неки од ових услова није испуњен (на пример на контакту магме са глиновитим седиментима, кроз које флуиди не циркулишу). При контактном

метаморфизму формира се зона у којој се успоставља равнотежа између прегрејаног магматског растопа и хладних околних стена - контактни ореол.

Регионално метаморфне стене су најчешће подељене на кристаласте шкриљце и масивне метаморфне стене. Кристаласти шкриљци су: аргилошист, филит, микашист, зелени шкриљци, гнајс. Масивне метаморфне стене су: амфиболит, мермер, кварцити, серпентинити, слика 2.3. Контактне метаморфне стене настале у условима термоконтактног метаморфизма су: корнит, бобичави шкриљац, скарн.



Слика 2.3. Масивна метаморфна стена Кварцит.

За минерале који изграђују метаморфне стене карактеристично је да су често настали преображајем примарних минерала, односно прилагођавањем њихове кристалне решетке новонасталим условима. Неки минерали су стабилни само на ниским притисцима или ниским температурама, па када дође до поремећаја ових фактора, прелазе у нове минералне врсте. Уколико се ради о алохемијском метаморфизму (контактно метасоматском), мешањем компонената из магме и околних стена могу да настану минерали веома разноврсног хемијског састава. Најчешћи минерали метаморфних стена су: фелдспати, амфиболи, пироксени, лискуни, хлорити, серпантини, алуминијски силикати, талк, кварц, корунд, калцит, доломит, гранити и сл.

2.4 Минералашке карактеристике Земљине коре

Стене као природни агрегати минерала могу бити изграђене од једног минерала или мономинералне или од више минерала или полиминералне стене. Минерали могу настати кристализацијом магме тј. примарни минерали, сублимацијом гасова и пара, таложењем из врелих или хладних раствора, метаморним путем или хемијским распадањем примарних минерала када се стварају секундарни минерали. Минерали се најчешће дефинишу као чврста тела одређеног хемијског састава, који се може приказати хемијском формулом и са тачно одређеном унутрашњом грађом, од чега зависе њихове физичке особине и спољашњи облици.

До данас је у природи пронађено и одређено преко 4000 минерала, међутим тај број није коначан јер се савременим методама могу вршити детаљнија рашчлававања унутар појединих минералних врста и дефинисање нових минерала. На основу карактеристика минерала може се закључити каква је била генеза стена, односно у којим условима су стене настале. У изградњи стена учествује око 150 петрогених минерала од којих само неколико десетина одређује врсту стене у односу на проценат учешћа. Пример просте стене је мермер која садржи само

минерал калцит. Сложена стена гранит садржи минерале ортоклас, лискун, кварц и др.

Према хемијском саставу минерали могу бити различита једињења или елементи. Хемијски састав Земљине коре чине петрогени минерали од којих су најчешћи силикати док су мање заступљени оксиди, карбонати, сулфиди, сулфати итд. Важан састојак неких минерала је и вода која се може појавити у више облика. Поред главних елемената, постоје и споредни елементи, као примесе, али они не мењају главна својства минерала већ утичу на боју минерала. Минерали који су изграђени од једног елемента су прости минерали, на пример дијамант, графит, злато, платина и др. Када су изграђени од два или више елемената онда су то сложени минерали.

Минерали могу имати правилан и неправилан спољашњи облик. Уколико поседују правилну унутрашњу грађу у облику дефинисане кристалне решетке у којој постоји тачно одређен распоред атома и молекула, тада им је спољашњи облик правилан и такви минерали се називају кристали. Кристали као минерали правилног облика имају симетрично распоређене основне елементе. Елементи кристала су пљосни или равне површине, ивице и рогљеви који се формирају на додиру најмање три ивице. У односу на број површина могу бити троугаони, квадратни, правоугаони, многоугаони, итд. (Ђорђевић, 2012).

Када минерали немају правилну унутрашњу грађу тада им је и спољашњи облик неправилан односно појављују се у аморфним облицима. Аморфни минерали се појављују у виду гроздастих агрегата а такође су изотропни, односно физичке особине су им једнаке у свим правцима, што није случај код кристала. Често се материја истог хемијског састава појављује у кристалним или аморфним облицима што се назива полиморфизмом. На пример, појављивање угљеника у два потпуно различита минерала графиту и дијаманту или кварцна (SiO_2) материја која гради неколико кристалних и аморфних облика различитих физичких особина (слика 3.4). Такође постоји и изоморфизам, односно појава да минерали различитог (или сличног) хемијског састава имају сличну унутрашњу грађу, па су им тако слични и начин појављивања и физичке особине.



Слика 2.4. Најтврђи минерал у природи Дијамант.

За ближе дефинисање појединих минералних врста, поред њихових облика и начина појављивања, неопходно је познавати и њихове најважније физичке особине. Неке од физичких особина су непроменљиве за сваки поједини минерал на основу чега се врши њихово препознавање. Физичке особине минерала су следеће: боја, огреб, сјајност, цепљивост, тврдоћа, еластичност, густина, магнетичност, електричне особине, радиоактивност (слика 2.5). Укус, мирис или опип минерала могу да се подведу под физиолошке особине и да се такође користе за идентификацију

минерала. Какве ће се промене десити на неком минералу током површинске деградације зависи од његових физичких и хемијских особина.



Слика 2.5. Тврдоћа минерала према стандарду из Мосове скале.

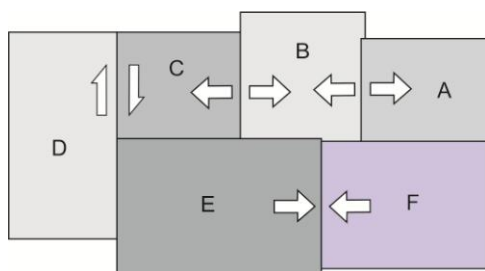
У односу на хемијски састав подела минерала је следећа:

- Силикати
 - примарни анхидридни силикати (фелдспати, пироксени, амфиболи, оливини)
 - примарни са конституц. водом (лискуни)
 - секундарни хидратисани (серпентин, минерали глине)
- Оксиди (кварц, магнетит, хематит)
- Хидратисани оксиди (опал, лимонит, боксит)
- Карбонати (калцит, магнезит, доломит)
- Сулфати, хромати, волфрамати, молибдати, ванадати (гипс, анхидрит, апатит, карнотит, леграндит, вулфенит, волфрамит)
- Сулфиди (пирит, халкопирит, пентландит)
- Фосфати (апатит, фосфорит)
- Хлориди (халит)

Приликом распадања стена и минерала ствара се распаднут стеновит материјал у виду комадића или детритус од чега настаје земљиште. Процес распадања је важан са еколошког аспекта због мобилизације и преноса штетних материја које се током деградирања ослобађају. Најраспрострањенији минерали у Земљиној кори су фелдспати који се распадају до глине а нерастворни минерали: кварц, глина, лимонит и хематит представљају главне минералне конституенте земљишта (Milovanović i dr., 2013).

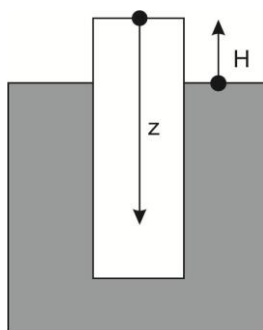
3 Референтни оквири за описивање вертикалних кретања литосфере

Кретања у литосфери као што су кретање дуж раседа, издизање планинског венца, приближавање две литосферске плоче и др. могу се посматрати само релативно, слика 3.1. За било коју врсту кинематичког кретања неопходно је дефинисати координатни систем у односу на који се то кретање односи. На пример, ако се ради о декстралном раседу, односно раседу код кога се креће десна страна раседа, референтни оквир се фиксира на другу страну истог раседа у односу на коју се кретање описује.



Слика 3.1. Релативно кретање равних плоча.

Постоје различити приступи за дефинисање референтних оквира, а посебно за референтне оквири у којима се описују вертикална кретања или кретања плоча великих димензија. Код геотермалних кривих, координатни систем се фиксира на површ Земљине коре чиме се постиже да референтни ниво није повезан са топлотном еволуцијом у случају издизања целе литосферске колоне као и у случају да је она стационарна. Када се описује вертикално кретање ове саме површи овакав референтни ниво није погодан, односно висина планинског венца релативно у односу на сопствену површ увек је једнака нули. Вертикално кретање површи не може да се опише у референтном оквиру који је фиксиран на ту површ. За потребе висина површи референтни оквир се мора фиксирати на ниво мора или на неки други екстерно фиксиран референтни оквир. Шематски су на слици 3.2. приказана два референтна нивоа чије вертикалне осе, које се користе за описивање вертикалних кретања у литосфери, имају различит и правац и почетак. Висина површи H се описује у односу на ниво мора или референтну литосферу са позитивном вредношћу вертикално на горе док се у општем случају дубина стена у кори мери у односу на површину у смеру позитивно на доле.



Слика 3.2. Референтни оквири за описивање вертикалних кретања у литосфери.

3.1 Референтни оквири за геодинамичке проблеме

3.1.1 Референтни оквири: сфера, елипсоид и геоид

За описивање геолошких проблема, за које није могуће урадити дводимензионалну апроксимацију Земље, неопходно је пронаћи одговарајући модел којим се описује тродимензионални облик Земље. Сфера је апроксимација првог реда за описивање облика Земље. Овом апроксимацијом један метар је био дефинисан као 40.000.000-ти део обима планете, док је према овој дефиницији полупречник сферне Земље приближно 6366 km. Ова апроксимација полупречника Земље је довољна за већину проблема који се односе на тектонику плоча, као на пример код истраживања закривљености планинских појасева или зона субдукција или истраживања која се односе на моменте које врше средње океански грбени.

"Прави" облик Земље одступа од сфере, односно спљоштен је у правцу осе Земљине ротације, како центрифугалне силе које настају због ротације Земље узрокују да њен облик више одговара облику елипсоида. Сплљоштеност Земље на половима је много израженија у атмосфери него у чврстом делу Земље. Сплљоштеност у атмосфери је изражена толико тако да нпр. Mount Everest не може да се успење више ако би се налазио на некој вишој географској ширини. Полупречник пола Земље износи $R_p = 6356.752$ km, а полупречник Земље на екватору износи $R_E = 6378.137$ km. Како је разлика између полупречника пола и екватора веома мала (око 21 km што је приближно 0.3% дужине полупречника), елипсоид Земље се такође често назива спљоштени сфероид. Елипсоид дефинисан овим полупречницима је елипсоид који се користи код система за глобално позиционирање WGS84. Разлика у дужини два полупречника елипсоида изражена у облику разломка износи $f \approx 1:298$ назива се спљоштеност елипсоида или елиптичност. Полупречник Земље на било којој локацији се изражава једначином $R = R_E(1 - fsin^2\lambda)$.

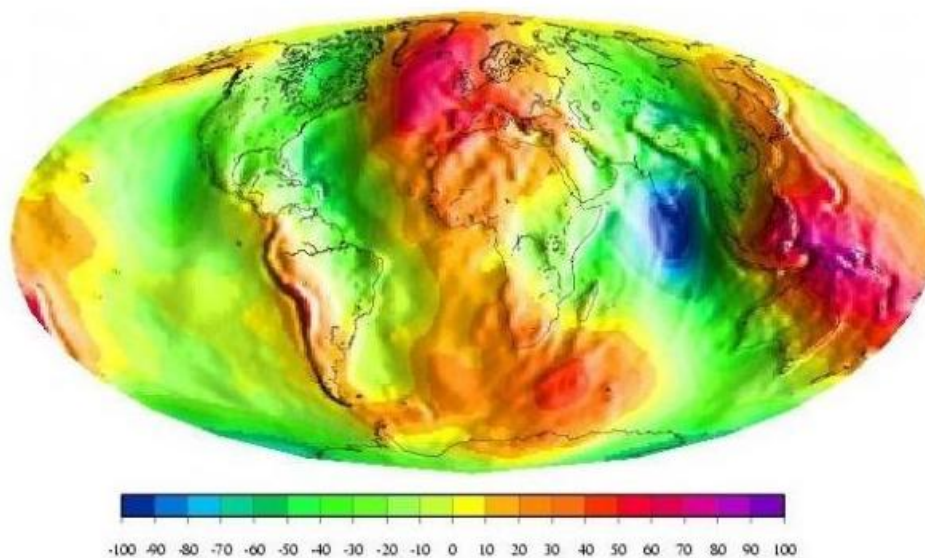
Други најчешће коришћен референтни елипсоид је Беселов елипсоид који се разликује у оба полупречника од елипсоида WGS84 за око 700 m. Тренутно се користи у неколико земаља у Европи и другим континентима као основа националних пројекција, посебно у земљама северне хемисфере а вероватно је да ће у наредним деценијама бити замењен савременим елипсоидима сетелитске геодезије.

За описивање правог физичког облика Земље не може се користити идеализована геометријска фигура референтног елипсоида већ се мора користити модел који ближе апроксимира облик Земље, односно геоид. Порекло речи геоид потиче од грчко-енглеских речи *gē* (eng. earth) + *oidēs* (eng. oid). Геоид је глатка површ константне гравитационе потенцијале енергије која пролази кроз ниво мора у мировању (без таласа или струја) и испод топографије континената. Међутим, геоид је веома неправилна површ чији је облик резултат неједнаке дистрибуције масе у и на површи Земље. Геоид не одговара стварној површи Земљине коре али одговара моделу површи који се може одредити преко обимних гравитационих мерења и рачунања. У областима високе густине, гравитационо убрзање је релативно високо и површина геоида лежи ниже од референтног елипсоида и обрнуто (као компензација високог убрзања са нижом масом). Геоидне аномалије су разлике између еквипотенцијалне површи Земље и њеног референтног облика који је компликованији него елипсоид (Vaníček, 2011). Иако се физичка површина Земље

уздиже до +8.000 m (Mount Everest) и иде до - 418 m (Dead Sea), варијација геоида се налази у распону од -106.9 до +85.8 m, што је укупно мање од 200 m.

Велике аномалије одражавају расподелу густина маса унутар Земље. Корита одговарају регионима омотача гушћих стена, вероватно хладнијих а испупчења у регионима мање густих стена, највероватније топлијих. На слици 3.3 је представљен EGM2008 модел висина геоида (у m) са највећом геоидном аномалијом која се налази у Индијском океану где геоид има највећу дубину у односу на референтни сфероид (<http://www.insu.cnrs.fr/en/terre-solide/>).

На Земљи се значајне геоидне аномалије налазе у зонама субдукције и жариштима земљотреса. Међутим, у континенталним регионима оне не корелишу са топографијом због изостатичке компензације.

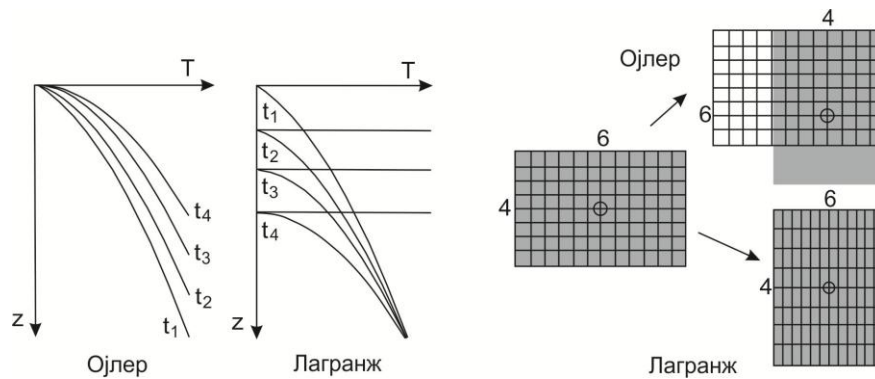


Слика 3.3. EGM2008 модел висина геоида (у m) у односу на референтни елипсоид.

3.1.2 Ојлеров и Лагранжов референтни оквир

Описивање процеса као што су промена температуре стена и њихово кретање изводи се релативно у односу на координатни систем, односно процеси се посматрају у фиксним референтним оквирима. Фиксни референтни оквир се назива Ојлеров референтни оквир а описивање процеса у Ојлеровом референтном оквиру назива се Ојлерово или просторно описивање. За многа истраживања процеса литосфере Земље погодније је изабрати координатни оквир који се креће заједно са литосфером. Такви координатни системи се називају Лагранжови референтни системи а Лагранжово описивање процеса се назива и материјално описивање.

На слици 3.4 приказано је описивање геотерми и деформације стена у оба референтна оквира. На слици 3.4 (лево) приказан је изглед геотерми током ерозије. Ако се посматра у Ојлеровом систему када посматрач стоји на ерозионој површини, стене и геотерма се померају кроз површину. Посматрано у Лагранжовом систему, координатни систем је фиксиран за стене и положај граничних услова површине мења своју локацију надолу у координатном систему. На слици 3.4 (десно) приказана је деформација једног квадратног блока стене. У Ојлеровом систему блок се помера у односу на фиксни координатни систем док је Лагранжово описивање деформације у координатном систему који се креће заједно са блоком стене.



Слика 3.4. Ојлеров и Лагранжов референтни оквир.

3.1.3 Референтна литосфера

Код гравиметријских података или глобалних сеизмолошких података референтне оквира представљају геоид или елипсоид. За већину задатака у области геологије, најпогоднији референтни оквир је референтна недеформисана литосфера (Pichon et al., 1988). Референтна недеформисана литосфера је хипотетичка литосферска колона која остаје непромењена релативно у односу на планински појас током опажања. Ако је недеформисано стање литосфере током опажања непознато, онда се претпоставља да површ референтне недеформисане литосфере одговара средњој површи континената. Њена висина износи 840 m изнад површи мора а средња дубина океана износи 3700 m. Међутим, око 80% површи Земље је између 100 m и 200 m изнад нивоа мора. Све висине се посматрају релативно у односу на површ референтне литосфере па су према томе релативне у односу на висину одговарајућег литосферског нивоа (Земљине површи, Мохо нивоа, итд.) пре почетка деформације (задебљања или стањивања).

У геологији се користи такозвана $f_c - f_l$ равна која уствари представља дијаграм за одређивање одређених параметара у односу на референтну недеформисану литосферу. Осе ове равни представљају дебљину коре и дебљину дела омотача литосфере, релативно у односу на референтну литосферу. Ова два дела литосфере током орогенезе мењају своју дебљину различитим брзинама и у различитим опсезима. Због тога је важно истражити утицај повећања дебљине експлицитно и истовремено ова два дела литосфере. Строго гледано f_c и f_l су вертикална напрезања коре и литосфере а у геологији се осим оубичајене ознаке за напрезање ϵ користе и ознаке f_c и f_l . По дефиницији напони се изражавају као:

$$f_c = \frac{z_{defc}}{z_c} \quad f_l = \frac{z_{defl}}{z_l}$$

при чему су z_{defc} и z_{defl} повећања дебљине коре и дебљине литосфере у датом тренутку током орогенезе и z_c и z_l повећања дебљине недеформисане референтне коре и референтне литосфере. Еволуција орогенског повећања дебљине у $f_c - f_l$ равни се може приказати одговарајућим параметарским кривим по времену. У складу са оригиналном дефиницијом f_l је напрезање повећањем дебљине целе литосфере а не само омотача литосфере, Sandiford and Powell, 1990. Такође, f_l је инверзно од фактора истезања β који се обично користи у опису екстензије континената.

4 Референтни системи времена

У класичној Њутновој механици време t је апсолутно време које "протиче" на хомоген начин. Могло би се рећи да време тече константном брзином, међутим сама дефиниција брзине зависи од дефиниције времена. Систем времена зависи од избора почетка или одређеног тренутка када време има вредност $t = 0$ и од избора одређеног временског интервала који служи као јединица за мерење времена. Однос између два различита система времена t и t' са различитим почетком и јединицама може се изразити једначином:

$$t' = a t + b \quad (4.1)$$

при чему је a константа фактора размере времена или временски дрефт и b константа офсета времена. Фактор размере је однос јединице времена у систему t са јединицом времена у систему t' . У тренутку када је вредност времена у првом систему " t " једнака $t = 0$, офсет времена b једнак је вредности времена $t' = b$ у другом систему " t' ". Комбинацијом једначине (4.1) са једначином везе координата између два инерцијална система: $\mathbf{x}' = \mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{d}$, \mathbf{R} ортогонална матрица ротације и \mathbf{d} вектор translације су константе, добија се Галилејева просторно временска трансформација, Dermanis, 2010:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}' \\ t' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ b \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Галилејева трансформација омогућава инваријантност Њутновог закона кретања, односно једначине кретања имају исти математички облик у оба система (\mathbf{x}, t) и (\mathbf{x}', t') . Основна карактеристика Галилејевог трансформације је раздвајање времена од простора. За све тачке у простору време је исто и временски систем дефинисан у одређеној тачки може да се пренесе на било коју другу тачку на исти начин као што се паралелно трансформише почетак орто-нормалне основе референтног система до неког другог простора.

У теорији релативитета свака тачка простора има сопствено време али просторно-временска закривљеност не омогућава паралелну трансформацију основе референтног система. Због тога се релативистички аспекти простора и времена не могу игнорисати када се опажања врше са високим нивоом тачности савремене опајачке технике. У већини случајева због разлике између теорије релативитета и Њутнове теорије уводе се као додатни чланови а ригорозни "релативистичке корекције" без изражавања математичких модела у релативистичком оквиру. Основна карактеристика релативитета је спајање простора и времена у јединствен четвородимензионални систем, где се једначине Галилејевог трансформације $\mathbf{x}' = \mathbf{x}'(\mathbf{x}, t)$ и $t' = t'(\mathbf{x}, t)$ замењују следећим једначинама:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x}'(\mathbf{x}, t), t' = t'(\mathbf{x}, t) \quad (4.3)$$

С обзиром да је време различито у сваком тренутку, када се користи Њутнова апроксимација за релативистичко време или просторне координате ова дефиниција важи у околини појединачне тачке на коју се односи, на пример на центар масе Сунчевог система или на центар масе Земље. Ван теоријске дефиниције, главни проблем је реализација временског система уз помоћ једног или више часовника.

Часовник представља физички систем или уређај са периодичним карактеристикама које су повезане са Њутновим временом.

У научним применама први часовник је ротирајућа Земља која чини основу за два међусобно повезана временска система: Звездано време и Универзално време. Земља као часовник је због варијација у својој брзини ротације 1960. год. замењена соларним системом часовника. Позиције планета у својим орбитама представљају основу Динамичког времена које је првобитно реализовано као Ефемеридско време. Данас се користе атомски часовници као хронометри засновани на природном периоду осцилација одређеног физичког елемента и остварују време које се назива Атомско време. Реализација Атомског временског система се заснива на одређеном сету атомских часовника који се налазе у лабораторијама на различитим местима широм Земље.

4.1 Звездано и Универзално време

Два еквивалента временска система заснована на ротацији Земље су Звездано време и Универзално време. Звездано време се односи на остваривање једне ротације у односу на звездану позадину чиме се дефинише звездани дан, док је Универзално време ротација Земље у односу на Сунце (тј. фиктивно средње Сунце) чиме је дефинисан соларни дан. Универзално време је повезано са сменом дана и ноћи што више одговара у свакодневном животу и активностима на Земљи.

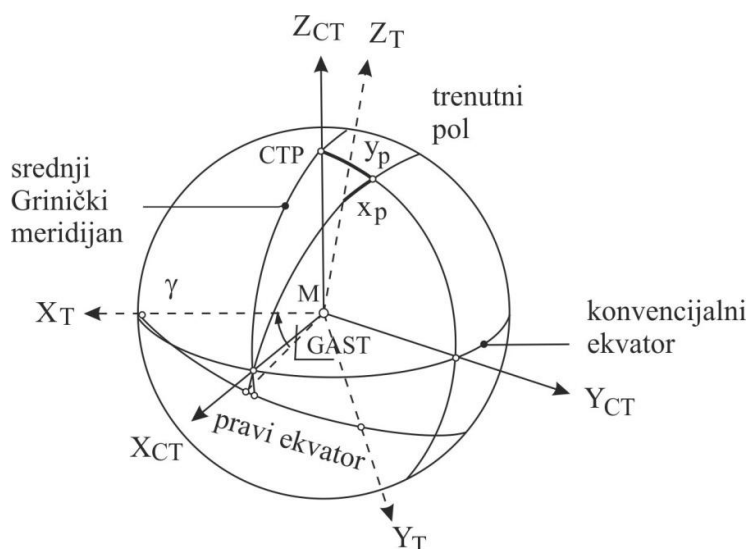
Јединица времена у оба система је SI секунда која је резултат поделе јединице дана на $24 \times 60 \times 60 = 86400$ једнаких делова. Оно што варира је дефиниција дана. Ако је правац осе ротације фиксан у односу на инерциони простор било би могуће дефинисати звездани дан као временски период у коме је Земља завршила једну револуцију. Међутим, ово није случај јер оса ротације Земље због утицаја прецесије и нутације непрекидно мења правац. Из тог разлога, за дефиницију дана потребна су два елемента "не-ротирајући" референтни правац и "ротирајућа" референтна равна која увек садржи осу ротације. Временски период између два узастопна укрштања референтног правца са референтном равни дефинише одговарајући дан, одакле следи секунда као основна јединица временског система. Због утицаја прецесије и нутације и варијација у угаоној брзини Земље дефинисани дан и секунда имају различито трајање у смислу апсолутног Њутновог времена.

Историјски прва референтна равна је био Гринвички астрономски меридијан, односно равна дефинисана у правцу вертикалне у Гриничу и правцу осе ротације која садржи геоцентар. Овај избор, тада одређен због доминантних астрогеодетских метода позиционирања је замењен меридијанском равни са осам \vec{e}_1^{CT} и \vec{e}_3^{CT} правог небеског система \vec{e}^{CT} , тј. система са осом \vec{e}_3^{CT} у правцу осе ротације и што је могуће ближе терестричком референтном систему \vec{e}^T , слика 4.1.

Традиционално не ротирајући референтни правац Звезданог времена је био тренутна (права) γ тачка, тј. пресек екваторијалне равни са тренутном равни еклиптике. Тако је звездани дан временски интервал између два узастопна пролаза γ тачке кроз Гринички меридијан.

Гриничко привидно звездано време (GAST) се дефинише као угао између Гриничког меридијана и право (тренутног) меридијана γ тачке. Оригинални назив је заменио једноставнији назив Гриничко Звездано време (GST). На овај тип времена утиче између осталог и нутација. Да би се уклонио ефекат нутације γ тачка је замењена средњом γ_M тачком, која представља пресек еклиптике са средњим

екватором (раван управна на правац фиктивног вектора средње ротације узимајући у обзир прецесију али не и нутацију).

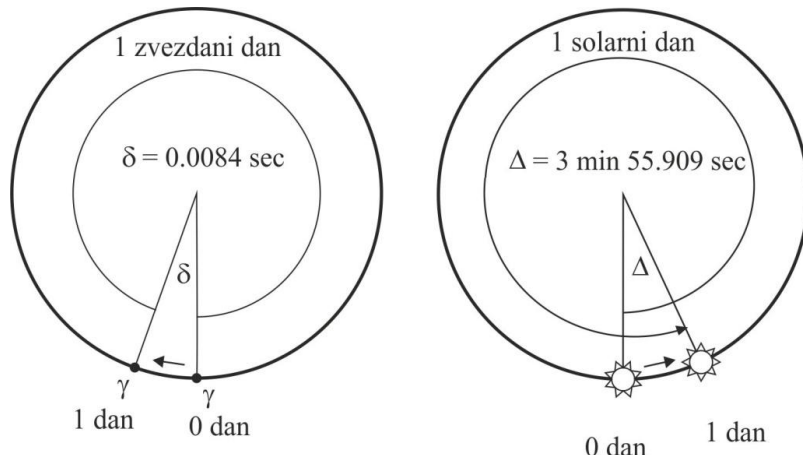


Слика 4.1. Прави (тренутни) и средњи конвенцијални терестрички систем.

Гриничко средње звездано време (GMST) се дефинише као угао између Гриничког меридијана и меридијана (тренутне) средње γ_M тачке. Како се Земља креће у својој орбити око Сунца, правац Земља-Сунце трпи годишњу ротацију и у односу на инерцијални простор и у односу на правац средње γ_M тачке који варира због годишњег ефекта прецесије (годишње померање γ_M). На овај начин Сунце достиже зенит касније у односу на Звездано време под углом од око $360^\circ/366.25$ (360° у години од 366.25 дана). За свакодневне активности на Земљи потребан је временски систем који одговара смени дана и ноћи и из тог разлога је правац γ тачке замењен правцем Земља-Сунце.

Средњи звездани дан не одговата тачно комплетној револуцији Земље око своје осе у односу на инерцијални простор, зато што је позиција γ тачке под утицајем прецесије, Seeber, 2003. Дневна разлика износи 0.0084 sec, за колико је звездани дан краћи, слика 4.2.

Гриничко право време (GTT) се дефинише као угао између Гриничког меридијана и меридијана Сунца плус 12 часова, да би се промена датума одвијала у поноћ уместо у подне. Према Кеплеровим законима Земља се креће на елиптичкој орбити са Сунцем у једној од својих фокуса на такав начин да сегмент описан линијом Земља-Сунце има једнаке површине у једнаком времену. Стога линија Земља-Сунце ротира са већом угаоном брзином када је Земља у перигеуму него када је у апогеуму, односно у тачки најближе и најдаље раздаљине Земље од Сунца. Због тога правац Сунца има варијације у угаоној брзини што изазива годишњу варијацију трајања GTT дана у години.



Слика 4.2. Звездани дан и Универзални (соларни) дан.

Да би се одржао униформни временски систем право Сунце је замењено фиктивним средњим Сунцем које пролази привидну ротацију око Земље са константном угаоном брзином. Резултујуће време се назива Универзално време (UT) и дефинише се као угао између Гриничког меридијана и меридијана средњег сунца.

$$UT = 12h + \text{Гринички часовни угао средњег Сунца}$$

Један средњи соларни дан (UT дан) је већи од једне инерцијане револуције јер је дневна револуција Сунца $1/365.25$ у истом правцу као ротација Земље. Према томе, соларни дан одговара $1 + 1/365.25$ или $366.25/365.25$ револуције, слика 4.2.

Оба концепта времена су заснована на ротацији Земље и међусобно су уско повезани. Универзално време се може сматрати као посебан облик Звезданог времена. Разлика у дужини дана за обе дефиниције је око 4 минута, јер дневно кретање Земље у својој орбити износи $360^\circ/365 \approx 1^\circ$. Апроксимативна релација би била: 1 средњи звездани дан = 1 средњи соларни дан – 3 min 55.909 sec.

Универзално време UT_0 мерено на одређеној станици В зависи од позиције актуелног правог пола. Редукција на конвенционални терестрички пол (СТР) узрокује промену у лонгитуди $\Delta\lambda_p$, а због тога и у времену. Универзално време које се односи на СТР означава се као:

$$UT1 = UT_0 + \Delta\lambda_p \quad (4.4)$$

$UT1$ је фундаментална временска скала у геодетској астрономији и сателитској геодезији јер дефинише стварну оријентацију конвенционалног терестричког система у односу на простор. Такође, $UT1$ је основна временска скала за навигацију. Међутим, $UT1$ садржи све варијације брзине ротације Земље и стога није униформа временска скала. У циљу усвајања ригорозне дефиниције сидеричке ротације Земље нивоа mas, на 24. Генералној скупштини IAU 2000. год. усвојена је резолуција (Res. В 1.8) спроведена до почетка 2003. год. Према овој дефиницији $UT1$ је линеарно пропорционална углу ротације Земље θ који је дефинисан као угао мерен дуж екватора СТР између јединичних вектора Celestial Ephemeris Origin (CEO) и Terrestrial Ephemeris Origin (TEO), McCarthy, 2000.

Од 1. јануара 2003. год. Универзално време $UT1$ је повезано са углом ротације Земље, који представља угао између тренутног небеског пола СЮ и тренутног терестричког пола ТЮ и рачуна се према следећој формули:

$$\theta = 2\pi (0.7790572732640 + 1.00273781191135448 T_u)$$

$$T_u = JD - 24515450 \quad (4.5)$$

при чему је JD Јулијански датум. У релацији $\theta = 2\pi(a + b T_u)$ коефицијент b је суштински однос $UT1$ дана и звезданог дана. T_u је број дана (децимална вредност) протеклих од референтне епохе у $12h UT1$, 1. јануара 2000. када је Јулијански датум имао вредност $JD = 2451545$. Јулијански датум се рачуна из заједничког Грегоријанског календара у годинама (Y), месецима (M), данима (D) и UT времену. Гриничко звездано време GST ($GAST$) је повезано са углом ротације Земље θ следећом једначином:

$$GST = 0.014506 + \theta + 4612.15739966 t + 1.39667721 t^2 - 0.00009344 t^3 + 0''.00001882 t^4 + \Delta\psi \cos \varepsilon_A - \sum_k C_k \sin \alpha_k - 0.00000087 t \sin \Omega \quad (4.6)$$

при чему је Ω средња лонгитуда узлазног чвора орбите Месеца. Узлазни чвор је у пресеку орбиталне равни са равни еклиптике, мерено од γ тачке. Последња три члана једначине (4.6) садрже додатне чланове у складу са унапређеним новим моделом прецесије-нутације IAU2000.

4.2 Динамичко време

Динамичко време се обично дефинише као "параметар t који се појављује у једначинама кретања Сунчевог система". Ово није ригорозна дефиниција јер идентификује динамичко са Њутновим временом, при чему је динамичко време само реализација Њутновог времена. Право значење дефиниције би било следеће: када се тело опажа у Сунчевом систему (нпр. Земља) које се налази у одређеном положају, означава се догађај одговарајуће вредности t коју тело има у складу са својом орбиталном теоријом једначине кретања. Неправилности у решавању једначина кретања или занемаривања неких ефеката утичу да се динамичко време разликује од Њутновог времена. Динамичко време је првобитно названо Ефемеридско време (ЕТ) што потиче од астрономских ефемерида које обезбеђују положаје планета и Месеца у свакој епохи. У зависности од тога где се примењује, у употреби су два типа динамичког времена:

1. Барицентрично динамичко време TDB које се односи на барицентар (центар масе) Сунчевог система. Оно је заменило Ефемеридско време, које је одређено опажањима орбите Месеца. Почетак TDB је изабран на такав начин да се подудара са ЕТ од 1. јануара 1984. године.

2. Терестричко динамичко време TDT се односи на геоцентар и као и TDB то је практична реализација Њутновог инерцијалног времена. Разлика између TDT и TDB се може видети у оквиру теорије релативитета. У складу са теоријом релативитета време (и дужине) губи свој апсолутни универзални карактер и зависи од кретања једног референтног система у односу на други, као и од гравитационог привлачења које је повезано са просторно временском закривљеношћу. На Земљи која се креће око Сунца, време је под утицајем периодичних варијација изазваних гравитацијом Сунца које износе до $1.6 \cdot 10^{-3}$ sec. За описивање сателитских орбита најпогодније време је TDT време, Seeber, 2003.

4.3 Атомско време

Интернационално Атомско време TAI користи као јединицу SI секунду (International System of Units), која се дефинише као

трајање 9 192 631 770 периода зрачења које одговара прелазу између два хиперфина нивоа основног стања атома цезијума 133 на 0 K

Почетак TAI система је дефинисан на тачав начин да коинцидира са UT1 временом почевши од 1. јануара 1958. год. Пошто се угаона брзина Земље смањује од тог датума, TAI време је испред UT1 времена. У пракси TAI скала је реализована из комбинације мерења великог броја атомских сатова који користе осцилатор цезијума, коју су постављени на чврстим позицијама на нивоу мора, тако да су на истој еквипотенцијалној гравитационој површини Земље (геоиду) и налазе се под истом силом гравитације. Одговорност за одређивање и десиминацију TAI времена има Међународни биро за тегове и мере у Паризу BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) и представља референтну основу других временских скала.

1991. год. Међународна астрономска унија IAU је увела Терестричко време TT као теоретски идеално време на Земљи уместо Терестричког динамичког времена (TT \equiv TDT). TT време користи исту јединицу као TAI време, SI секунду и разликује се само за константан износ

$$TT = TDT = TAI + 32.184 \text{ s} \quad (4.7)$$

Дефиниција Терестричког времена TT се мења 2000. год. и TT време се од тада дефинише преко своје релације као координата "време" четвородимензионалног система простор-време у околини геоцентра. У сваком случају однос TT = TDT још увек важи уместо замењене дефиниције TT \equiv TDT. Разлика $\Delta T = TT - UT1$ је разлика између TT временске скале и стварне ротације Земље.

1972. год. уведен је систем Универзалног координисаног времена UTC (Universal Time Coordinated), који представља компромис између TAI и UT1 система. UTC време има исту јединицу као TAI, SI секунду али у исто време остаје близу по вредности UT1 помоћу 1 преступне секунде (leap seconds) која се уводи у одређеним временским интервалима у циљу одржавања њихове разлике у вредности мање од 0.9 sec. Однос између два система изражава се следећом формулом, BIPM, 2011:

$$UTC = TAI - n \cdot (1 \text{ sec}) \quad (4.8)$$

при чему је n цео број. Негативан знак у једначини (4.8) рефлектује чињеницу да угловна брзина ротације Земље опада у последњим декадама тако да је TAI > UTC. Вредност TAI-UTC, на пример од 10 sec у 1972. год. је достигла 33 sec у 2009. год., слика 4.3. UTC је цивилни емитовани стандард који се управља преко ITU-R Rescomm. 460, и носилац је прецизне фреквенције и временског интервала за емитовање стандарда заснованих на SI секунди. Иако је атомска UTC скала потпуно секвенцијална и кохерентна у оквиру прописаног UTC стандарда, дужина UTC дана није униформна, због могућег сабирања или одузимања преступне секунде на крају UTC месеца, што је обично обично јун или децембар месец. DUT1 је предикција разлике између UT1 и UTC у десетинама секунде и доступна је унапред.

Геоцентрично координисано време TCG је координисано време центра масе Земље, геоцентра. Његово време једнако је теоријском часовнику који се креће са

центром масе Земље, али који није под утицајем гравитације Земља - Месец. TCG систем је повезан са TT системом преко Јулијанског датума на следећи начин:

$$TCG = TT + L_G \times (JD - 2443144.5) \times 86400 \quad (4.9)$$

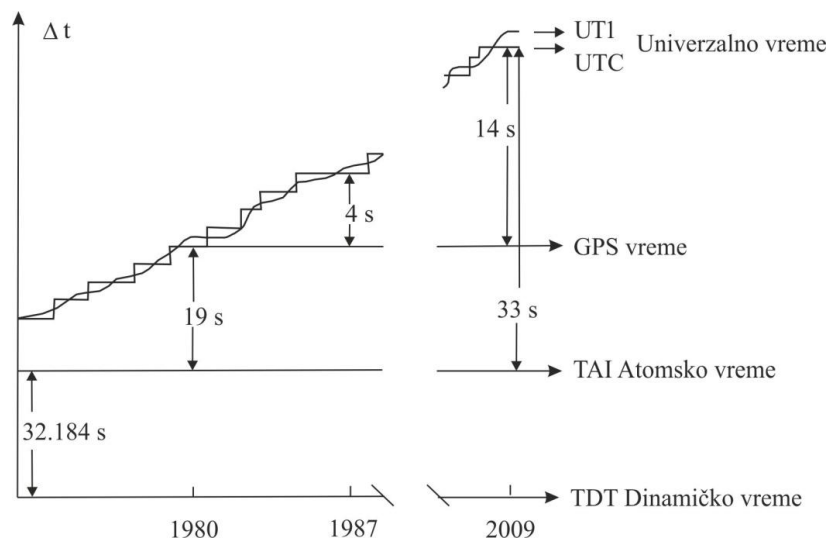
где је $L_G \equiv 6.969290134 \times 10^{-10}$ константа временске скале срачуната за утицај гравитационог и ротационог потенцијала Земље на промену часовника. IAU Resolution B1.9 (2000) препоручује L_G као константу добијену на основу најбоље оцене у време усвајања, што би не мењајући однос између TCG и TT, требало да буде унапређење у познавању гравитационог потенцијала Земље.

GPS глобани систем позиционирања користи свој сопствени временски систем који се назива GPS време и има исту јединицу као TAI SI секунду и реализује се помоћу различитог сета атомских часовника. Одржавање и дисеминација GPS времена и релевантног координисаног атомског UTC(USNO) времена које зависи од атомског времена које одржава америчка обсерваторија USNO, спада у надлежност GPS контролног сегмента.

GPS време је континуирано без скокова у циљу задовољења потреба за рачунањем временског интервала на једноставан начин без обзира на период између преступних секунди као у случају UTC времена. Два пута су GPS и UTC(USNO) коинцидирале у "GPS референтној епохи", 0h 6. јануара 1980, када је вредност преступне секунде у једначини (4.8) била $n_{1980} = 19$ s. У каснијој епохи t , када је цео број вредности преступне секунде постао n , GPS је испред UTC(USNO) са $n-19$ секунди. Комбинацијом односа $GPST = UTC(USNO) + (n-19)$ s са врло малом разликом $C = UTC(USNO) - TAI(USNO) - TAI$, добија се веза GPS и UTC времена, слика 4.3:

$$GPST = UTC + (n - 19)s + C = TAI - 19s + C \quad (4.10)$$

Реално мала разлика C , осим дела због употребе различитог скупа часовника, садржи део због координације GPS времена са временом UTC(USNO).



Слика 4.3. Однос временских скала.

4.4 UTC преступне секунде

Преступна секунда је уметнута секунда преко које се остварује поравнање у оквиру 0.9s између UTC атомски емитованог стандарда времена дана и UT1 времена ротације Земље. Позитивна преступна секунда почиње у 23:59:60 и завршава се у 00:00:00 првог UTC дана наредног месеца.

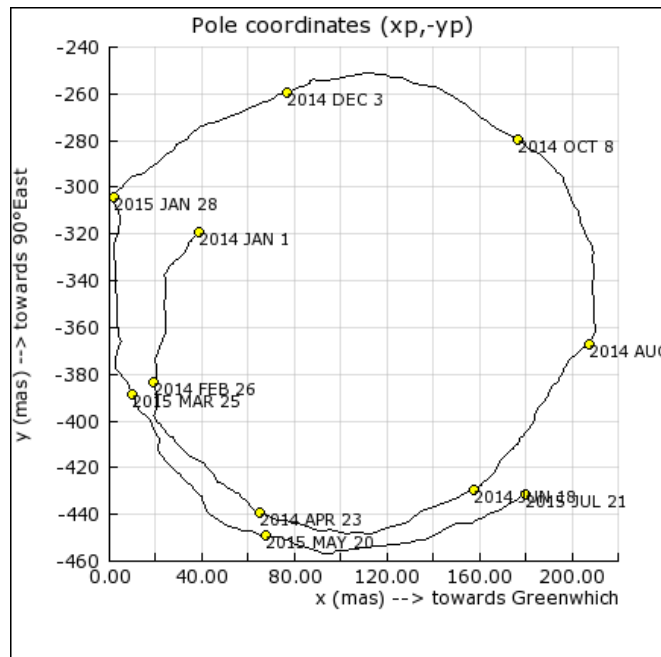
Преступна секунда се нерегуларно распоређује као што се и брзина ротације Земље мења нерегуларно. Ротација Земље дугорочно је непредвидива што објашњава зашто се преступне секунде најављују само шест месеци унапред. 30. јуна 2015. год. разлика TAI – UTC износила је 36 s. Главни фактори за успоравање ротације Земље су плиматски утицаји, померање Земљине коре у односу на језгро, промене у конвекцији коре и други догађаји или процеси који узрокују значајну прерасподелу масе Земље. Ови процеси мењају момент инерције Земље утицајући на њену брзину ротације. На пример, утицај ледника скраћује соларни дан за 0.6 ms/век и сматра се да је земљотрес у Индијском океану 2004. год. скратио соларни дан за 2.68 ms, McCarthy, 2008. Правило је да се преступне секунде додају крајем јуна или децембра што може бити делимично историјски због саопштења IERS Bulletin C о преступним секундама. Оперативно, преступна секунда може бити додата на крају било ког месеца Грегоријанског календара.

4.5 Параметри оријентације Земље

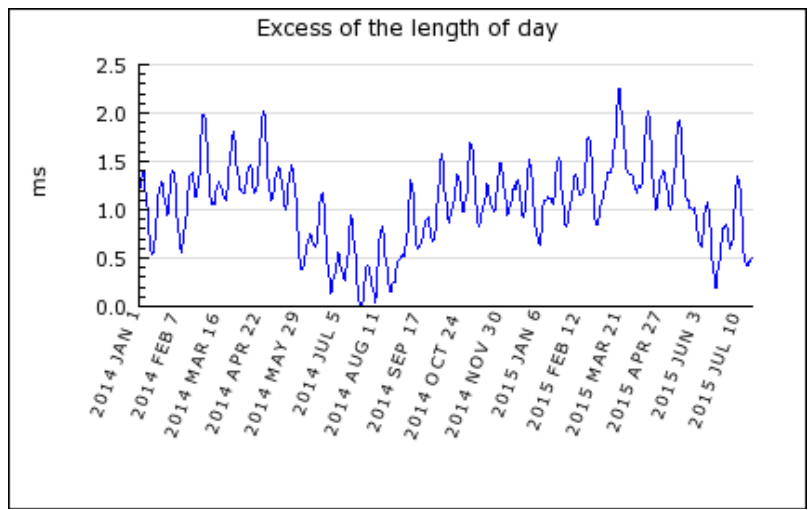
Подаци о параметрима оријентације Земље (EOP) дефинишу специфичну оријентацију Земље изведену из више извора (на пример IERS, NGA и USNO). Састоји се од разлике $\Delta UT1$ UT1 и UTC времена, координата кретања пола (x_p, y_p) и неједнаких дужина дана (LOD).

Координате пола су дефинисане као разлика између стварне оријентације осе ротације Земље (тренутни пол) и конвенционалне средње оријентације (Конвенционални терестрички пол CTP), слика 4.1. Гриничко звездано време, GAST, је еквивалентно Универзалном времену UT1. Варијације у брзини ротације Земље могу се описати разликом UT1–UTC. Оне су такође изражене периодом једне потпуне револуције Земље око своје осе или дужином дана, LOD. Због поларног кретања и дневних осцилација брзине ротације, било који координатни систем фиксан за Земљу (на пример ITRS) трпеће варијације у односу на просторно фиксан (инерцијални) референтни систем.

На слици 4.4 и слици 4.5 приказани су резултати кретања пола (x_p, y_p) и неједнаких дужина дана (LOD), респективно, Међународног сервиса за ротацију Земље и Референтне системе IERS, Gambis, 2015, (<http://www.iers.org/>).



Слика 4.4. Стандардни ЕОР параметри - (x_p, y_p) .



Слика 4.5. Стандардни ЕОР параметри – Length Of Day (LOD).

5 Референтни Системи и Референтни Оквири

Опажања која се изводе просторним геодетским техникама током неколико деценија омогућавају истраживања различитих феномена о планети Земљи: гравитационог поља Земље, ротације Земље и процеса који доводе до деформација Земљине коре. Да би се извршила оцена параметара којима се описују ове појаве потребно је дефинисати референтни оквир који ће бити повезан са Земљом како у њеном дневном кретању тако и погледу деформације Земљине коре. Такав оквир је нумеричка реализација објекта који није математички доступан, односно терестричког референтног система. Разлика између референтног система и референтног оквира је у томе што је референтни систем недоступан и непроменљив, док је референтни оквир доступан али је променљив. У ширем смислу, референтни систем првенствено математички конципиран, уведен је у област геодезије како би се описали физички параметри Земље и временске варијације Земљиног облика. Према томе, координате на физичкој површи Земље и њихов придружени референтни систем не могу се опажати, али имају суштинску важност. Избор референтног система подразумева и одређене конвенције иако је преко геодетских опажања одређен број параметара референтног система доступан. Како је референтни систем математички модел то онда подразумева да се сви параметри којима је систем потпуно дефинисан могу изабрати или произвољно или конвенционално. За избор референтног система је важно да референтни оквир као његова нумеричка имплементација мора да сачува све физичке особине опажања.

Почетак Земље који се налази у центру масе Земље није фиксан у односу на површ кугле јер се тело Земље не може разматрати као круто тело. Такође, полупречник Земље је дефинисан само у смислу средњег полупречника као и облик Земље који се стално мења услед периодичних (нпр. гравитационим привлачењем или плимом океана) и неповратних феномена (нпр. тектоника плоча, теорија изостазије). Периодични ефекти се могу моделирати или се могу посматрати кроз просечне вредности током времена, док су неповратни ефекти компликовани за стварање модела. Генерално посматрано свака тачка на Земљи заузима одређену позицију само у одређеном тренутку. Да би се описало стварно стање и односи, референтни систем треба јединствено, континуирано и прецизно да опише положаје тачака узимајући у обзир и њихова стална померања.

У општем смислу референтни системи се деле у две класе: просторно фиксирани или небески референтни системи и референтни системи фиксирани за тело Земље или терестрички референтни системи. Кретања сателита се описују у небеском референтном систему а за одређивање положаја станица на Земљи као и за описивање резултата опажања у сателитској геодезији користе се терестрички референтни системи, Seeber, 1993. Реализација референтног система заснива се на скупу усвојених или оцењених координата. Скуп координата звезда или квазара формирају небеске референтне оквири, док терестричке референтне оквири формирају скупови координата и брзина опажањких станица на површини Земље, Ma et al., 1998. По дефиницији, за било који референтни систем могућ је велики број реализација референтних оквира у зависности од изабраног скупа квазара односно скупа станица.

Одговорност за успостављање и одржавање и конвенционалних небеских и конвенционалних терестричких референтних система и оквира припада Међународној Служби Ротације Земље и Референтних Система - IERS. Процес одржавања референтних система и унапређење резултата референтних оквира огледа се у повећању тачности одређивања оса система.

5.1 Конвенционални Небески Референтни Систем и Оквир

Инерцијални референтни систем је онај који се налази у стању мировања или је у стању униформног праволинијског кретања без убрзања, у складу са првим Њутновим законом кретања, Seeber, 1993. Небески референтни систем се заснива на кинематичкој дефиницији према којој су фиксни правци оса обезбеђени у односу на далеке материје универзума. Систем је материјализован преко небеског референтног оквира који се састоји од прецизних координата екстагалактичких објеката, углавном квазара, BL Lac извора и активних галактичких језгара (AGNs), на основу тога што су ови извори веома удаљени па је њихово одговарајуће очекивано кретање занемарљиво мало.

Тренутне позиције екстагалактичких објеката су боље од mas , а крајња тачност је првенствено ограничена структуром нестабилности извора у радио таласним дужинама. Подаци снимања небеских објеката су доступни преко USNO Radio Reference Frame Image Database и Bordeaux VLBI Image Database. Међународна астрономска унија IAU је 1991. год. на својој 21. Генералној скупштини (Преп. VII, Резол. А4) усвојила препоруку да почетак небеског референтног система буде у барицентру соларног система и правци оса фиксни у односу на квазаре. Ова препорука је даље предвиђала да небески референтни систем треба да има главну раван колико је могуће ближе средњем екватору у епохи J2000.0 и да је почетак ове главне равни што је могуће ближе динамичком еквиноцију за исту епоху. Овај систем је припремљен од стране IERS и усвојен од стране IAU на 23. Генералној скупштини 1997. год. (Резол. В2) под именом International Celestial Reference System (ICRS). ICRS је званично заменио FK5 систем 1. јануара 1998. год., с обзиром да су сви услови постављени резолуцијама из 1991. били испуњени, укључујући доступност Hipparcos оптичког референтног оквира при реализацији ICRS са бољом тачношћу него FK5. Одговорност за одржавање система, оквира и везе ка Hipparcos референтним оквиром су дефинисане од стране IAU на 24. Генералној скупштини 2000. год. (Резол. В1.1).

Посебан значај овог система је за дефинисање кретања сателита, укључујући све GNSS сателите, као и за опажања звезда и квазара VLBI просторном техником. Због неопходности очувања фиксних референтних праваца и континуираног унапређења координата извора потребно је редовно одржавање референтног оквира. VLBI опажања која се користе за успостављање екстрагалактичког референтног оквира такође се користе и за праћење кретања небеског пола (појаве прецесије и нутације). На овај начин, анализом VLBI опажања обезбеђују се корекције ка IAU конвенционалним моделима за утицаје прецесије и нутације као и тачна оцена померања средњег пола за епоху J2000.0 релативно у односу на ICRS конвенционални референтни пол, Capitaine et al., 2012.

ICRS је реализован преко International Celestial Reference Frame (ICRF). ICRF реализација садржи скуп прецизних координата компактних екстра галактичких радио извора. За процену стабилности положаја дефинисани извори би требало да имају велики број опажања током довољно дугог периода времена будући да они одржавају осе ICRS. ICRF позиције су независне од екватора, еквиноција, еклиптике и епохе, али су конзистентне са претходним звезданим и динамичким реализацијама у оквиру својих несигурности. Прва реализација ICRF (ICRF1) је изведена 1995. год. помоћу VLBI позиција 212 "дефинисаних" компактних екстра галактичких радио извора (Ma et al., 1998). Поред дефинисаних извора, за погушћење оквира коришћени су положаји за близу 400 мање опажаних могућих извора. Позиције 212 дефинисаних извора имају средњу несигурност $\pm 0.35 \text{ mas}$ у ректасцензији и ± 0.40

mas у деклинацији. Несигурност реализације ICRS је остварена са вредношћу мањом од 0.01 mas. Скуп добијених позиција је ротиран ка ICRS и упоређењем расипања резултата параметара ротације показано је да су осе ICRS стабилне са вредношћу од ± 0.02 mas.

Друга реализација ICRF (ICRF2) је изведена 2009. године са 295 нових дефинисаних екстрагалактичких радио извора изабраних на основу стабилности положаја. ICRF2 садржи тачне позиције додатних 3119 компактних екстрагалактичких радио извора, што је укупно више од пет пута од броја извора у односу на ICRF1. Формална позициона несигурност скупа је $\approx 40 \mu\text{as}$ односно 5-6 пута боља него у претходној реализацији док се стабилност оса налази у оквиру $10 \mu\text{as}$, што је скоро два пута већа стабилност у односу на ICRF1. На 27. Генералној скупштини IAU (Рез. В3) усвојено је да од 1. Јануара 2010. год. ICRF2 представља фундаменталну реализацију ICRS на основу скупа 295 нових извора одређених прецизним VLBI опажањима.

Стабилност оквира која се заснива на претпоставци да извори немају одговарајуће кретање и да не постоји глобална ротација универзума редовно се проверава на сукцесивним IERS оквирима, Petit and Luzum, 2010.

5.2 Дефиниција Терестричких Референтних Система

Суштински елементи теоријске дефиниције терестричког референтног система су посебно истакнути у IERS конвенцији 2003. Године, McCarthy and Petit, 2004. Терестрички Референтни Систем (TRC) је просторни референтни систем који ротира са Земљом у њеном дневном кретању у простору. Позиције тачака у TRC које се налазе на површини чврсте Земље имају координате које подлежу временским варијацијама услед геофизичких ефеката (посебно тектонских или услед плиме земљишта и океана). Терестрички Референтни Систем има одговарајућу физичку реализацију под називом Терестрички Референтни Оквир (TRF). TRF је дефинисан скупом физичких тачака са оцењеним координатама (Декартовим, географским или картографским), које су изражене у Терестричком Референтном Систему. У складу са терминологијом усвојеном последњих неколико деценија у астрономској и геодетској заједници постоје три врсте терестричких референтних система: идеалан референтни систем, конвенционални референтни систем и конвенционални референтни оквир, Boucher, 2001.

Идеалан Терестрички референтни систем је дефинисан као референтни трихедрон повезан са Земљом и коротира са њом, математички моделиран помоћу афиног оквира ортогоналног Еуклидовог простора (O, E). Почетак оквира O је произвољна тачка у простору, E је придружени векторски простор. Оријентацију TRC изражавају јединични вектори колинеарни са векторима основа а заједничка дужина ових вектора представља размеру TRC, што се изражава на следећи начин:

$$\Lambda = \|\vec{E}_i\|_{i=1,2,3} \quad (5.1)$$

при чему је $\vec{E}_i \cdot \vec{E}_j = \Lambda^2 \delta_{ij}$, Λ је јединица дужине вектора почетка израженог у метрима и δ_{ij} је Кронекеров симбол. Почетак система је близак центру масе Земље (геоцентар), оријентација је екваторијална (Z оса је у правцу пола) и размера је блиска SI метру.

Конвенционални референтни систем је дефинисан помоћу скупа конвенција, константних параметара и алгоритама који су потребни за одређивање координата

тачака. Конвенционални Референтни Оквир је дефинисан скупом физичких тачака са својим координатама и конституише физичку реализацију идеалног референтног система. Према препоруци IAU ове три врсте терестричких референтних система се у даљим радовима посматрају као "систем" чији је концепт теоријски и општи и "оквир" чији је концепт решење таквог система (Преп. IAU, 2006).

Међународни Терестрички Референтни Систем (The International Terrestrial Reference System ITRS) као конвенционални референтни систем садржи скуп процедура за стварање референтних оквира погодних за извођење опажања на или близу Земљине површи. Систем ITRS и његова реализација ITRF представљају стандард систем и стандард оквир који се одржавају од стране IERS. По дефиницији ITRS задовољава следеће услове, McCarthy and Petit, 2004:

- Геоцентричан систем: почетак се налази у центру масе целе земље, укључујући океане и атмосферу;
- Оријентација система је иницијално дата од стране ВИН оријентације за епоху 1984.0 што подразумева следеће:
 - Z оса се налази у правцу Конвенцијалног Терестричког Пола (Conventional Terrestrial Pole CTP);
 - X оса се налази у правцу пресека равни референтног меридијана (Greenwich Meridian, слика 1) и равни конвенцијалног терестричког екватора;
 - Y оса чини са X и Z осом десно оријентисани систем.
- Временска еволуција оријентације је обезбеђена увођењем тзв. No-Net-Rotation (NNR) услова над целом Земљом у односу на хоризонтална померања тектонских плоча;
- Јединица дужине система је SI метар.



Слика 5.1: Краљевска Опсерваторија - Greenwich примарни меридијан.

Општа трансформација Декартових координата између два геоцентрична система са почетком у центру масе Земље и екваторијалне оријентације врши је помоћу тродимензионалне трансформације сличности:

$$\vec{X}_2 = \vec{T} + \lambda \cdot \mathcal{R} \cdot \vec{X}_1 \quad (5.2)$$

при чему је \vec{T} вектор транслације, λ фактор размере и R општа матрица ротације која је дата преко три матрице ротације за три осе ротације:

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R1 & \sin R1 \\ 0 & -\sin R1 & \cos R1 \end{pmatrix}$$

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos R2 & 0 & -\sin R2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin R2 & 0 & \cos R2 \end{pmatrix}$$

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos R3 & \sin R3 & 0 \\ -\sin R3 & \cos R3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Линеаризацијом једначине (5.2) стандардне трансформације између два референтна система добијају се параметри трансформације и одговарајући изводи параметара трансформације по времену. Према томе, трансформација између два референтна система је трансформација сличности Еуклидових 7 параметара: 3 параметра транслације, 1 параметра фактора размере и 3 параметра ротације, који се означавају као $T1, T2, T3, D, R1, R2, R3$ и њихових одговарајућих извода по времену $\dot{T}1, \dot{T}2, \dot{T}3, \dot{D}, \dot{R}1, \dot{R}2, \dot{R}3$. Трансформација вектора координата $\vec{X}1$ израженог у референтном систему **1** у вектор координата $\vec{X}2$ израженог у систему **2** дата је формулом (5.3) уз претпоставку линеарности за скупове координата које су добијене преко просторних геодетских техника (разлике између почетака два система су неколико стотина метара, разлике у размери и оријентацији два система су мање од 10^{-5} , док су чланови другог реда занемарени у моделу):

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_1 + \vec{T} + D \cdot \vec{X}_1 + R \cdot \vec{X}_1 \quad (5.3)$$

при чему је:

$$\vec{T} = \begin{pmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \end{pmatrix}, \quad \lambda = 1 + D, \quad R = (I + R), \quad R = \begin{pmatrix} 0 & -R3 & R2 \\ R3 & 0 & -R1 \\ -R2 & R1 & 0 \end{pmatrix}$$

Генерално сви елементи једначине (5.3) $\vec{X}_1, \vec{X}_2, \vec{T}, D$ и R су функције времена. Диференцирањем израза (5.3) по времену добија се следећа једначина:

$$\dot{\vec{X}}_2 = \dot{\vec{X}}_1 + \dot{\vec{T}} + \dot{D} \cdot \vec{X}_1 + D \cdot \dot{\vec{X}}_1 + \dot{R} \cdot \vec{X}_1 + R \cdot \dot{\vec{X}}_1 \quad (5.4)$$

Чланови D и R су реда величине 10^{-5} , елементи вектора \vec{X} су реда 10 cm годишње, тако да се чланови $D \cdot \dot{\vec{X}}_1$ и $R \cdot \dot{\vec{X}}_1$ могу занемарити јер је њихова вредност реда 0.1 mm за период од 100 година, Altamimi, 2007. Узимајући у обзир вредности ових чланова једначина (5.4) се може онда написати у следећем облику:

$$\dot{\vec{X}}_2 = \dot{\vec{X}}_1 + \dot{\vec{T}} + \dot{D}\vec{X}_1 + \dot{R}\vec{X}_1 \quad (5.5)$$

5.3 Реализација Терестричких Референтних Система

За реализацију Терестричког Референтног Система користе се координате скупа опажаних станица, односно оцене њихових позиција и брзина добијених преко процеса изравнања. На тај начин добијени Терестрички Референтни Оквир је дефинисан мрежом станица и њиховим координатама које су у функцији времена. У основи постоје две главне врсте реализације референтних система:

- Реализација референтних система преко мерења која се изводе са једном или више просторних геодетских техника.
- Реализација референтних система комбинацијом терестричких референтних оквира који су реализовани преко неколико просторних техника.

5.3.1 Реализација ТРС на основу мерења извршених просторним сателитским техникама VLBI, SLR, GPS и DORIS

У општем случају, да би се успоставио Терестрички Референтни Оквир у одређеном тренутку потребно је седам параметара. Да би се дефинисала еволуција Референтног оквира у времену користе се изводи ових седам параметара по времену, што укупно представља 14 параметара. Избором ових 14 параметара који су потребни за дефинисање почетка, размере, оријентације и њихових временских еволуција, врши се фиксирање или дефинисање Референтног оквира.

Опажањима са одређеним просторним геодетским техникама, помоћу којих се одређују поједини параметри, омогућено је фиксирање Референтног оквира. Почетак Референтног оквира који се налази у центру масе Земље, нпр. теоретски је доступан преко динамичких техника SLR, GPS и DORIS. Размера Референтног оквира зависи од одређених физичких параметара (гравитациона константа GM и брзина светлости c) и усвојених релативистичких корекција. Временска промена размере у принципу нема физички смисао. Оријентација и њене временске варијације Референтног оквира су произвољно или конвенционално дефинисане и не могу бити доступне, односно не могу се опажати ни једном техником. Такође постоји услов глобалног неротирања Референтног оквира у односу на хоризонтална померања на површини Земље.

Пошто опажања просторних геодетских техника не садрже све потребне параметре за успостављање Референтног оквира, потребне су додатне спољашње информације да би се комплетирано фиксирање Референтног оквира. Ова ситуација се огледа у чињеници да се при конструкцији нормалних једначина из опажања добија сингуларна матрица нормалних једначина N . Дефект ранга матрице нормалних једначина који није редукован путем опажања кореспондира броју параметара потребних за фиксирање оквира. Да би се отклонио овај недостатак ранга, центри за анализу опажања просторних геодетских техника при рачунању комбинованог решења усвајају једно од следећих ограничења на делу мреже или на свим станицама мреже, Altamimi et al., 2002a:

1. Removable Constraints - RC (Уклоњиви услови): решења за које су позиције односно брзине станица условљене на екстерне вредности са несигурношћу од $\sigma \approx 10^{-5}$ m за позиције и m/year за брзине. Овај тип услова се лако може уклонити.
2. Loosely Constraints - LC (Слаби услови): решења за која су несигурности код примењених услова $\sigma \geq 1$ m за позиције и $\sigma \geq 10$ cm/year за брзине.

$$(\mathbf{B}^T \Sigma_{\theta}^{-1} \mathbf{B})(\vec{\mathbf{X}} - \vec{\mathbf{X}}_0) = 0 \quad (5.10)$$

при чему је Σ_{θ} дијагонална матрица која садржи релативно мале варијансе за сваки параметар трансформације. Преко једначине (5.10) добија се регуларност нормалне матрице \mathbf{N} , и истовремено изражавање оцењеног решења у истом Терестричком Референтном Оквиру као а priori решења $\vec{\mathbf{X}}_0$.

Број колона матрице \mathbf{A} одговара броју параметара фиксирања Референтног оквира (3 параметра транслације, 1 параметар фактора размере и 3 параметра ротације). Из тог разлога у зависности од технике опажања, матрица \mathbf{A} треба да буде редукована на само потребне параметре не редукујући тиме и опажања (тј. у готово свим техникама то су 3 параметра ротације и у случају VLBI технике то су 3 параметра транслације).

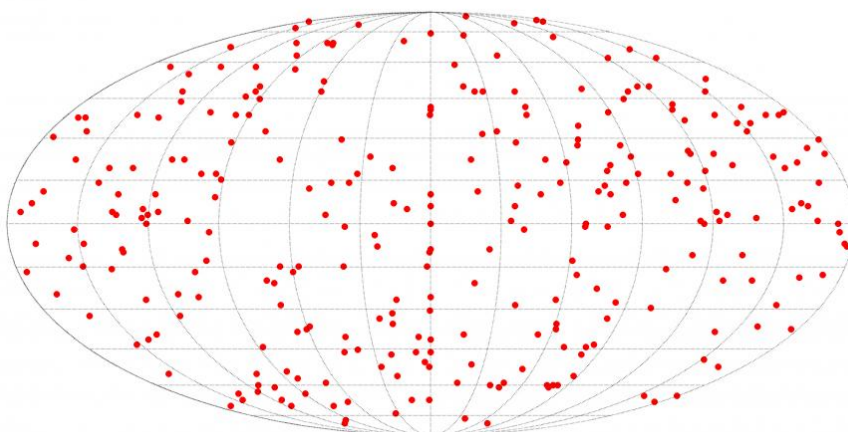
Просторна сателитска VLBI техника

Просторна сателитска VLBI техника (Very Long Baseline Interferometry) крајем 1970-их година изворно је развијена у оквиру пројекта за високо-прецизна геодетска одређивања динамике Земљине коре, дизајнирана за опажање удаљених небеских радио извора са високом угаоном резолуцијом (Sovers et al., 1998).

Концептуално, сателитска VLBI техника користи радио таласе из удаљених квазара са познатим позицијама на небеској сфери, и на станицама - радио опсерваторијама на Земљиној површини мери временску разлику доласка сигнала из квазара. Из тих података се добијају значајне информације о томе како геометрија мреже станица на Земљи еволуира током времена. Резултати високе прецизности временски променљиве геометрије мреже се користе за проучавање геофизичких процеса Земље као што су ротација Земље и тектоника плоча, као и за дефинисање глобалног терестричког референтног оквира. Јединственост VLBI технике је да обезбеђује недвосмислену стабилну везу између оријентације терестричког референтног оквира и небеског референтног оквира, односно оријентације Земље.

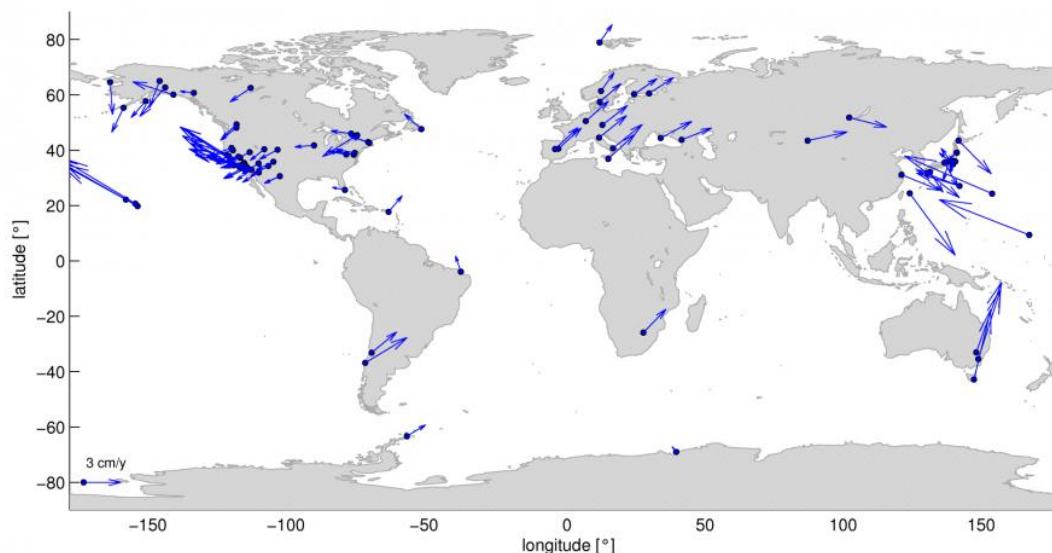
Као чисто геометријска техника, VLBI техника међутим не може директно опажати центар масе Земље и Земљино гравитационо поље, иако се закључци о гравитационом пољу могу изводити кроз моделе којима се повезује гравитационо поље са обликом Земље, нпр. модели плиме и Земљиних оптерећења. Као алтернативна, SLR техника се користи да обезбеди независну потврду научних сазнања изведених на основу мерења VLBI технике и упоређењем добијених резултата између ове две технике доприноси побољшању резултата код обе методе. VLBI је као радио техника осетљивија на грешке атмосферске рефракције од SLR технике као оптичке технике (Niell, 2006). Предност VLBI технике је то да су у суштини радио извори квазари фиксни на небу чиме се обезбеђује максимум стабилности небеског референтног система.

Штавише, сателитска VLBI техника је једина техника за одређивање Међународног Небеског Референтног Оквира (ICRF). 2009. године на својој 27. Генералној Скупштини Међународна Астрономска Унија IAU је усвојила ICRF2 као реализацију ICRS, са 295 радио извора који су једнако дистрибуирани на небеској сфери, посебно у јужној небеској хемисфери, слика 5.2 (Feu et al., 2009).



Слика 5.2. Међународни Небески Референтни Оквир ICRF2 (<http://views.geo.tuwien.ac.at/>).

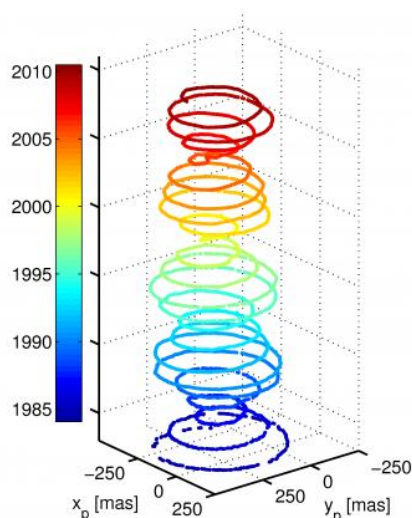
Сателитска VLBI техника такође доприноси у реализацији Међународног Терестричког Референтног Оквира (ITRF) мерењима дугих интерконтиненталних дужина у оквиру глобалних мрежа. У поређењу са другим просторним геодетским сателитским техникама, VLBI техника има главну предност јер њена реализација размере ITRF зависи само од брзине светлости c , која се користи код трансформације кашњења опажања у метричке јединице. Током последње три деценије нису постојали подаци о постојању биаса или неких промена ове трансформације а да су узроковани из неких техничких разлога. На слици 5.3 приказане су хоризонталне брзине VLBI станица глобалне мреже које учествују у реализацији ITRF2008 (Altamimi et al., 2011).



Слика 5.3. Хоризонталне брзине VLBI станица глобалне мреже у ITRF2008.

Сателитска VLBI техника је примарна техника за одређивање параметара који описују ротацију Земље у инерцијалном простору, односно прецесије, нутације, и Universal Time UT1 (угла ротације у односу на UTC). Просторна VLBI техника је једина сателитска техника која омогућава опажања комплетног скупа параметара оријентације Земље (EOP), јединствена је у обезбеђењу UT1 као и офсета небеског пола над дужим интервалом времена. На слици 5.4 приказане су оцене кретања пола

одређених из VLBI опажања од 1984. године са софтвером VLBI VieVS, TU Vienna (Böhm et al., 2011).



Слика 5.4. 3Д приказ оцена кретања пола на основу VLBI опажања од 1984. год.

Сателитска VLBI техника са највећом прецизношћу међу свим техникама данас, користи се за карактеризацију феномена дуго-таласне дужине као што су постглечерска издизања и због тога је саставни део стабилности глобалних терестричких референтних оквира (Argus, 2007). Као кратак резиме главни доприноси научних истраживања на основу опажања изведена просторном VLBI техником обухватају:

- једнозначни параметри оријентације Земље за повезивање терестричког референтног оквира и небеског референтног оквира;
- обезбеђивање стабилне размере глобалног терестричког референтног оквира; и
- обезбеђивање најпрецизних мерења дуго-таласне дужине деформације Земље, чиме се обезбеђује стабилност глобалног оквира и даје увид у ограничења која долазе од геодинамичких процеса као што су постглечерска издизања и тектоника плоча.

Просторна сателитска SLR техника

Просторна сателитска SLR техника (Satellite Laser Ranging) којом се врше мерења дужина на основу времена путовања ултра кратког (неколико пикосекунди) ласерског импулса од терестричке станице до сателита и назад је свакако најједноставна и најпрецизнија метода опажања од свих просторних сателитских техника. У најбољим SLR системима, систематска оптичка и електронска кашњења у инструмената обично се оцењују повезивањем два или више система пре почетка оперативности, а након тога контролисањем преко честих калибрација на добро одређеним циљевима на нивоу од неколико милиметара. Сагласност SLR података на кратком орбиталном луку генерално за најбоље системе се може видети преко RMS вредности нивоа од 1-3 mm, међутим перформансе система варирају у оквиру постојеће глобалне мреже од око 45 станица.

Од свих просторних сателитских техника, на SLR технику најмање утичу дневне варијације атмосферских кашњења. У поређењу са микроталасним фреквенцијама које користе VLBI, GPS и DORIS технике оптичке фреквенције SLR

су релативно неосетљиве на две највише динамичне, а самим тим најмање предвидиве компоненте кашњења атмосферске рефракције, односно јоносфере и дистрибуције водене паре. Јонски садржај због свијих особина (тежина и спорост) на оптичким фреквенцијама опсега од 300-900 THz нема значајни утицај на опажања и ласерске таласне дужине немају значајне карактеристике апсорпције у спектру водене паре. Односно, утицај водене паре на ласерски опсег креће се око 70 пута мање у односу на микроталасна мерења дужина. Према томе, такозвана "сува" компонента атмосфере је главни узрочник појављивања грешака у SLR мерењима па се атмосферске корекције могу релативно лако применити преко метеоролошких мерења на самим станицама и преко модела сферне атмосфере за елевационе углове веће од 20°. Садашњи модел атмосферског кашњења, усвојен крајем 2006. године од стране радне групе ILRS и који је део SLR Data Satellite Analysis софтверског пакета, користи се за различите ласерске таласне дужине за садашњу опрему SLR система (Mendes and Pavlis 2004).

Још једна предност SLR технике је једноставност и нижа цена просторног сегмента. За разлику од микроталасних сателитских система који захтевају напајање, антенску структуру и одговарајуће процедуре за подршку ових подсистема, SLR техника користи релативно јефтине лоптасте сателите опремљене са пасивним ретро-рефлекторима. Ласерски сателити, као што су LAGEOS I, LAGEOS II и ETALON су тешки и компактни и смештени у релативно високим орбитама (6000 - 20.000 km) да би се минимизирали ефекти отпора и других неконзервативних сила. Сателитска SLR техника је јединствена техника за опажање споро-варирајућих геодинамичких процеса Земље и дуготаласних компоненти гравитационог поља и његових варијација у времену. Сателити као што су ласерски геодинамички сателити (LAsER GEODynamics Satellite, LAGEOS) имају врло дуг животни век и биће годинама изучавани што их чини идеалним и стабилним дугорочним научним инструментима, слика 5.5 (Smith and Dunn 1980). Сателити који се налазе на нижим висинама сличног дизајна (нпр. GFZ-1, Stella, и Starlette) се највише користе да би добили бољи резултати за компоненте вишег реда статичког гравитационог поља.



Слика 5.5. LAGEOS сателит са пречником сфере 60 cm и 426 ретро-рефлектора (<http://ilrs.gsfc.nasa.gov>).

На основу SLR мерења обезбеђена је стабилана и предвидива орбита а самим тим и стабилан динамички оквир из којег се опажа ротација Земље и кретања опажачке станице. Велики је допринос SLR мерења потврди теорије тектонике плоча и разумевању савремене деформације Земљине коре у зонама граница плоча (Jackson et al., 1994). До данас, SLR је остала примарна техника за одређивање позиције центра масе Земљиног система као и кретање центра масе у односу на Земљину површину. Померања геоцентра одређена са LAGEOS опажачима показују годишње и полугодишње сигнале амплитуде од 2-4 mm (Tapley et al., 1993).

Као оптичка техника која је релативно мање осетљива на водене паре у атмосфери, SLR такође има кључну улогу у реализацији размере референтног оквира. Емпиријска реализација размере и почетка референтног оквира је веома важна за испитивање динамичких модела Земље у оквиру ригорозног Међународног Терестричког Референтног Система (ITRS) (McCarthy, 1996). Такође, SLR техника обезбеђује највећу апсолутну тачност у одређивању висина станица релативно у односу на геоцентар. Осим тога, SLR је једини заједнички систем за праћење за три алтиметријска сателита за мерења висина површина мора и ледника (ERS-1, ERS-2 и TOPEX = POSEIDON) и подржава алтиметријске мисије као што су GFO-1, TOPEX-2 и GLAS.

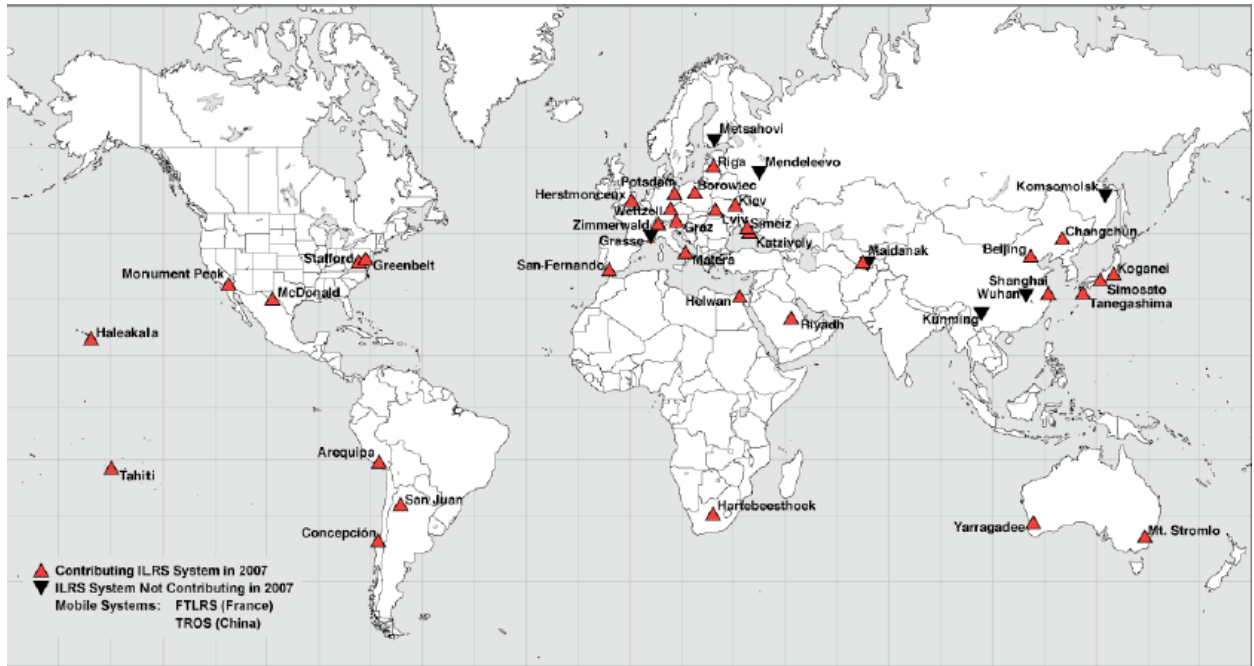
Приказ изгледа једног од SLR система са постољем азимут-елевацијског типа са одвојеном трансмисионом и пријемном оптиком дат је на слици 5.6. Негативна страна је да SLR техника није техника за све временске услове као и да тренутна глобална дистрибуција станица свакако није оптимална, односно на јужној хемисфери има мало сталних станица високог квалитета, слика 5.7.



Слика 5.6. Следећа генерација SLR система (лево) и SLR станица Zimmerwald у Швајцарској (десно) (<http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>).

Највећи допринос SLR технике у оквиру истраживања IAG Међународног Сервиса за ласерска мерења (ILRS) се огледа у следећем, Pearlman et al., 2007:

- Прерасподела маса у Земљиној флуидној структури кроз проучавање интеракције атмосфера - хидросфера - крајосфера - чврста Земља.
- Дугорочна динамика чврсте Земље, океана и ледника.
- Интеракција омотача и коре кроз дугорочне варијације у ротацији Земље.
- Општа теорија релативности, посебно Lens-Thirring ефекат повлачења оквира.



Слика 5.7. Дистрибуција SLR станица ILRS мреже 2007. год. (<http://ilrs.gsfc.nasa.gov>).

Просторна сателитска GPS техника

Први пут су 1992. год., почевши од ITRF91, позиције станица срачунате из опажања сателитским GPS системом за позиционирање укључене у формирање Међународног Терестричког Референтног Оквира (ITRF), Boucher et al. 1992. Међународни GNSS Сервис (IGS), бивши међународни GPS Сервис, као добровољна федерација више од 200 светских агенција има за циљ пружање GNSS резултата највишег квалитета а поред тога и сви IGS резултати су директно или индиректно изражени у ITRF оквирима.

На почетку рада IGS сервис користи директно ITRF оквира као основне оквира својих резултата, Kouba, 2003. Према познатој методологији од 2000. год. IGS је почела да формира свој сопствени оквир који је интерно конзистентнији GPS оквир али користи и даље резултате ITRF датума, односно почетак, размеру и оријентацију и вредности њихових брзина. Почевши од 1400. GPS недеље, IGS је прешла са релативног на апсолутни модел корекција за варијације фазног центра антена (PCV). Истовремено IGS је усвојила ITRF2005 за формирање сопственог оквира, IGS05 састављеног од око 100 станица чије су координате кориговане са релативних на апсолутне PCV разлике. У циљу очувања параметара датума (почетка, размере и оријентације) IGS05 је усклађен са ITRF2005 помоћу 14-параметарске трансформације сличности.

Центри за анализу сателитских техника VLBI, SLR, GPS и DORIS обезбеђују доступност временских серија позиција станица и параметара оријентације Земље (EOP) у SINEX формату преко својих званичних адреса. Значај временских серија позиција станица, се огледа у могућности контролisaња не само понашања појединачне станице, већ посебно праћење њеног нелинеарног кретања. Почевши од ITRF2005, ITRF Продукт Центар је одговоран за физичке параметре оквира (почетак и размера) јер представљају улазне параметре за генерисање ITRF. Улазна решења ITRF временских серија су обезбеђена на недељном нивоу од стране IAG

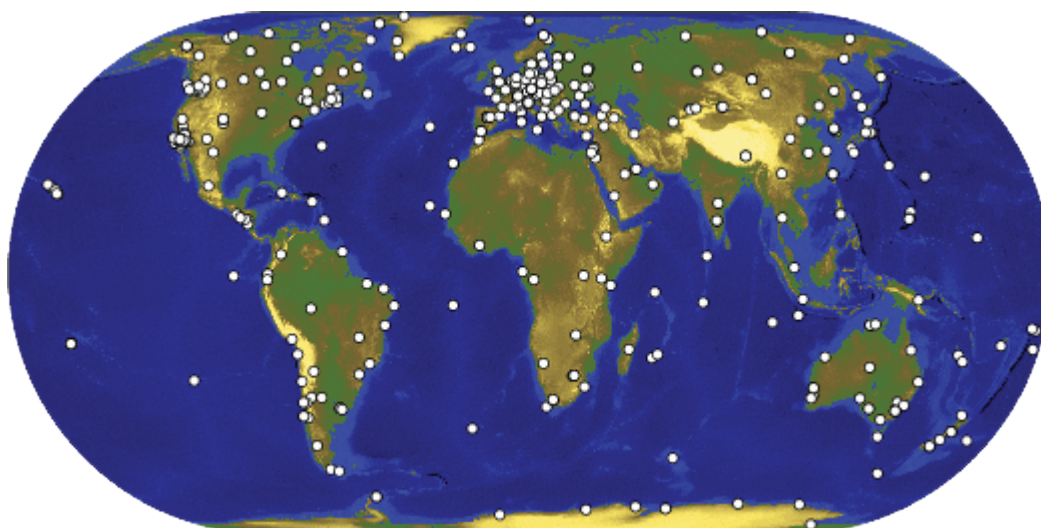
Међународних сервиса сателитских техника: IGS, Међународни сервис за ласерска мерења (ILRS), Међународни DORIS сервис (IDS) и на дневној основи (VLBI серије) од стране Међународног VLBI сервиса (IVS). Временске серије по свакој техници су већ комбинације појединачних решења центара за анализу те технике.

Добијени резултати из опажања GPS техником показују врхунски квалитет временских серија координата GPS станица, тачности орбита и часовника, параметара ротације Земље и др. Због промена убрзања а посебно оних који су узроковани притиском зрачења, вредности Length of Day (LOD) изведене помоћу GPS технике могу бити пристрасне због корелација које користе оцењене параметре притиска зрачења. Због тога се за потребе калибрације GPS као и остале сателитске технике мора ослањати на VLBI технику.

GPS и VLBI техника користе радио-опсег електромагнетног спектра и стога су у потпуности изложене тзв. влажној компоненти тропосферског кашњења па се код обе технике тропосферско кашњење оцењује. Модели за оцену тропосферских параметара су сложени, такође опасност од корелације параметара тропосфере са другим параметрима расте са сложеностју модела али такви модели могу боље представити опажања. Код GPS је познато нпр. да постоје јаке корелације између висине станица и параметара тропосфере. У том контексту SLR техника је идеалан алат за калибрацију: SLR ради у оптичком делу спектра, где се тропосферска кашњења могу моделирати са тачношћу неколико милиметара чак и са скромним знањем о атмосфери која окружује дату опажачку станицу. Дакле, за дефиницију датума висина или за оцену позиције геоцентра за добијање резултата високе тачности GPS техника се ослања на SLR технику у сврху калибрације. Овај аспект калибрације је још већег значаја када се моделирају кретања станица на нивоу испод дневног.

Као техника која је најдоступнија и са остваривањем мерења високог квалитета, GPS сателитска техника је погонска снага у свим будућим регионалним геодинамичким истраживањима. Велики значај имају GPS опажања изведена преко кампања у планираним временским периодима на континуираним оперативним GPS станицама, слика 5.8. Поред тога, стратегије за комбинацију континуирано оперативних GPS станица у оквиру регионалних GPS решења омогућују праћење временске еволуције Референтног оквира локалног нивоа. Регионалне мреже континуираних GPS станица својим кумулативним решењима доприносе унапређењу глобалног Референтног оквира ITRF и за Европу одговорна комисија је EUREF, IAG Reference Frame Sub-Commission (<http://www.euref.eu/>).

Реализацију и одражање Европског Референтног Оквира као геодетске инфраструктуре за мултинационалне пројекте где је потребно прецизно геореференцирање (нпр. тродимензионално и позиционирање зависно у времену, геодинамику и др.) EUREF изводи у сарадњи са IAG Сервисима, IAG Комисијама и др.



Сл 5.8. Глобална мрежа IGS/GPS станица (<ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/>).

Најважније предности сателитске GPS технике за унапређење решења ITRF комбинација као и значајан добринос другим геонаукама су следеће (Altamimi et al. 2008):

- Просторна густина и дистрибуција GPS станица која обезбеђује добру покривеност и узорковања на главним тектонским плочама. Ово је један важан аспект који омогућава прецизно одређивање временске еволуције ITRF оријентације будући да ITRF треба да задовољи услов no-net-rotation (NNR) који се директно примењује користећи плоче као дискретизацију површине Земље;
- GPS обезбеђује најпрецизније резултате кретања пола која се заснивају на континуираном опажању густе мреже;
- GPS омогућава приступ ITRF у реалном времену или у скоро реалном времену користећи IGS резултате (орбите и часовнике);
- GPS мрежа заједно са VLBI и SLR мрежама чини основу у ITRF комбинацији.
- Погушћење ITRF-а развојем и унапређењем регионалних мрежа перманентних GPS станица;
- Унапређење анализе регионалних мрежа станица и алгоритама обраде података доприносе ITRF-у;
- Анализа у реалном времену са применама у GPS сеизмологији и унапређење система за упозорење од природних хазарда;
- Репроцесирање глобалних скупова GPS података; и
- Даља побољшања у одређивању орбита, моделирања тропосфере и модела јоносфере вишег реда.

Просторна сателитска DORIS техника

Крајем осамдесетих година дизајниран је нови сателитски систем DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) за потребе одређивања прецизних нижих сателитских орбита (Low Earth Orbiting, LEO), Willis et al., 2006a. Првобитно, Доплерски радиопозициони сателитски систем DORIS је дизајниран од стране Националног Центра за свемирска истраживања (CNES) Француске

Свемирске Агенције. Пошто су циљеви DORIS и GPS система фундаментално другачији, DORIS систем нема унапред дефинисану сателитску констелацију (број сателита, број орбиталних равни) за разлику од GPS.

DORIS систем је заснован на прецизним мерењима Доплерских помераја радиофреквентног сигнала емитованог са станице на земљи и примљеног DORIS пријемницима који су инсталирани на броду различитих сателита. Правилно дистрибуиране станице за праћење чине глобалну DORIS мрежу, слика 5.9. За праћење времена сваког DORIS пријемника на броду сателита инсталиран је ултра стабилни осцилатор којим се обезбеђује референтно време пријемника. Контролни центар (Тулуз у Француској) врши предпроцесирање Доплерских мерења и њихову дистрибуцију IDS Центрима за Анализу (AC) у којима се софтвером за прецизно одређивање орбита анализирају подаци и одређују параметри прецизних орбита и других геофизичких параметара.

1990. год. изведен је први DORIS тест пријемник на сателиту SPOT-2 који је био у функцији више од 19 година. 1992. год. лансиран је TOPEX/Poseidon алтиметријски сателит на чијем броду је инсталиран и DORIS пријемник који заједно са подацима ласерске SLR технике одређују прецизне орбите радијалне тачности од 1.5-2.5 cm, Lemoine et al., 2006.



Слика 5.9. Глобална DORIS мрежа станица 2011. год. (<http://ids-doris.org/>).

Подаци добијени мерењима DORIS пријемника Jason-1 сателита не могу се користити за неке прецизне геодетске примене услед високе осетљивости осцилатора пријемника на ефекат зрачења изнад Јужно Атланске Аномалије (South Atlantic Anomaly, SAA). Поремећаји услед зрачења остају и утичу на податке позиције станице и оцене параметара оријентације Земље (EOP) чак и у случају када се користи SAA модел корекције (Beckley et al., 2007). DORIS сигнал се такође користи код пријемника са X-зрацима (CITRIS пријемник) на броду STPSAT1 сателита департамента за физику плазме и свемирских система, истраживачке Naval лабораторије за истраживања јоносферских параметара (Bernhardt et al., 2006). Истраживањима је показано да је за добијање најквалитетнијих геодетских

результата, испод 10 mm по све три 3Д компоненте, потребно да број сателита буде већи од четири на различитим нагибима (Willis, 2007). Главни напредак у конфигурацији DORIS сателитске констелације остварен је 2002. год. лансирањем сателита Envisat и SPOT-5 чиме је достигнута DORIS констелација од шест сателита, слика 5.10.

Од 1994. год., заједно са сателитским VLBI, SLR и GPS техникама, DORIS систем је саставни део у оквиру активности Међународне Службе ротације Земље и Референтних Система (IERS). На Генералној Скупштини Међународне Уније за Геодезију и Геофизику (IUGG) у Јапану, 2003. год. формиран је IDS Међународни DORIS сервис у циљу подстицања научне сарадње између центара за анализу као и за генерисање и дистрибуцију научних производа ширем кругу корисника. Такође, IDS сервис учествује у Глобалном Геодетском Опажачком Систему (GGOS) под покровитељством Међународне асоцијације за геодезију (IAG), чији је главни циљ обезбеђење светске оперативне инфраструктуре за добијање геодетских опажања и резултата потребних за садашња и будућа геофизичка истраживања (Rummel et al., 2005).

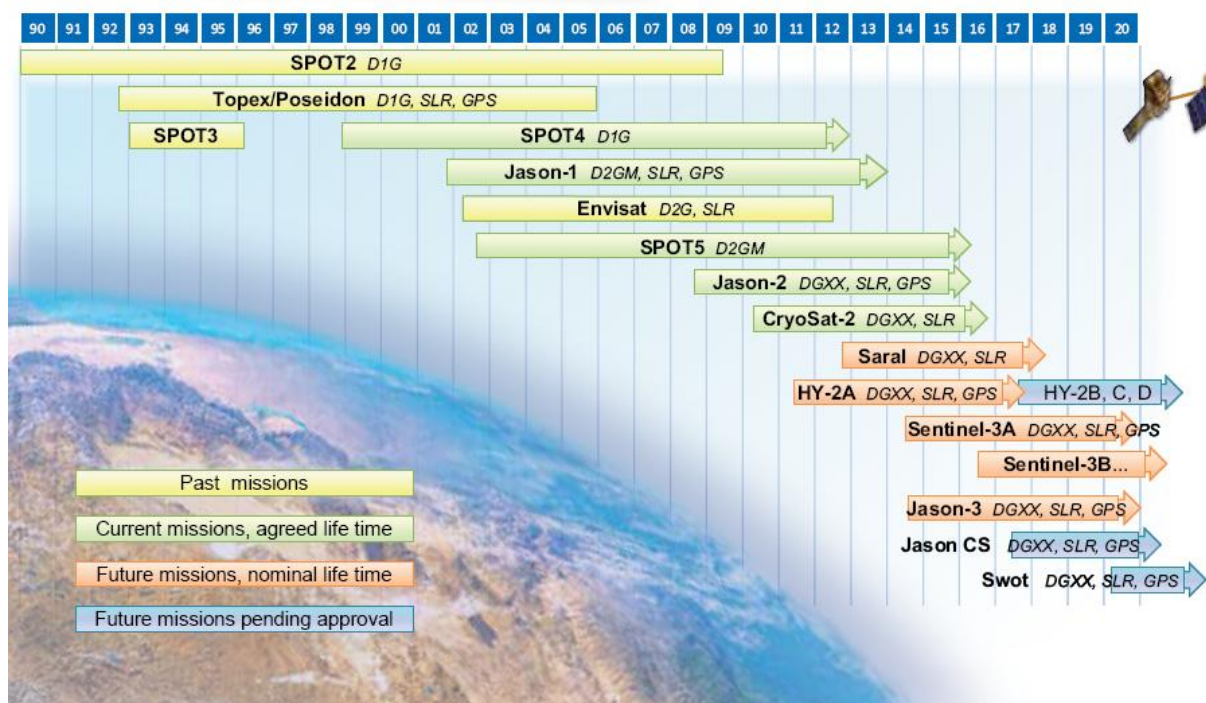
IDS научни резултати се изводе на основу међународних DORIS центара за анализу и достављају се широј научној заједници. Тренутни IDS центри за анализу су следећи (<http://ids-doris.org/>):

1. CNES-CLS у Француској (софтвер: Gins)
2. ESA-ESOC у Немачкој (софтвер: NAPEOS)
3. IGN-JPL у Француској (софтвер: Gipsy/Oasis)
4. INASAN, Русија (софтвер: Gipsy/Oasis)
5. Geoscience Australia (софтвер: Geodyn)
6. Геодетска опсерваторија Ресну, Чешка (софтвер: Bernese)
7. GSFC/NASA, USA (софтвер: Geodyn)

Задатак DORIS центара за анализу је да на регуларној основи обезбеде најмање један од IDS научних резултата и као кључни фактор за добијену тачност резултата појављује се експертност центара у анализи DORIS података. Најважнији резултати су следећи (<http://ids-doris.org/>):

- Резултати положаја (координате и брзине DORIS станица) као недељна решења добијају се од свих центара за анализу која се затим оцењују, комбинују и достављају IERS као допринос ITRF.
- Резултати положаја геоцентра, размере терестричког референтног оквира и параметара ротације Земље. DORIS техника има значајан допринос за одређивање положаја геоцентра, обезбеђује дугорочну стабилност мреже и равномерну географску дистрибуцију станица. DORIS решење размере за ITRF2008 је знатно побољшано у односу на решење за ITRF2005 и у истом је рангу одређивања размере као и са SLR и VLBI техникама које су референтне за ова одређивања.
- Висока прецизност ефемерида DORIS сателита.
- DORIS јоносферски резултати још увек нису потребног нивоа па се врши унапређење пројеката за постизање потребног квалитета упоређењем са резултатима добијених од стране других техника.
- Упоређење резултата тропосферских корекција између DORIS и других система показује да би DORIS резултати на основу остварене прецизности тропосферских корекција требало да буду у широј употреби. У односу на друге технике постигнута је конзистентност од 5 mm у вертикалној компоненти.

- Остали производи су прецизни резултати SAA корекција добијени на основу анализе карата сателитских антена и одређивања ултра стабилних фреквенција осцилатора на броду сателита за праћење Јужно Атланске Аномалије.



Слика 5.10. Сателитска констелација DORIS технике (<http://ids-doris.org/>).

5.3.2 Реализација ТРС комбиновањем појединачних референтних оквира

Комбинација терестричких референтних оквира обрадом опажања просторних сателитских техника је заснована на основу фундаменталне трансформације између два референтна система преко следећих једначина:

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_1 + \vec{T} + D \cdot \vec{X}_1 + R \cdot \vec{X}_1 \quad (5.11)$$

$$\dot{\vec{X}}_2 = \dot{\vec{X}}_1 + \dot{\vec{T}} + \dot{D} \vec{X}_1 + \dot{R} \vec{X}_1 \quad (5.12)$$

Овај метод и једначине модела комбинације су детаљно описани у поглављу 7 и представља основу за реализацију Међународног терестричког референтног система (ITRS).

5.4 Међународни Терестрички Референтни Систем ITRS

1984. година је значајна у историји ITRS јер је тада први пут добијена комбинација Терестричког Референтног Оквира под називом BTS84 (Bureau International de l'Heure, VIH Terrestrial System, BTS) коришћењем координата станица израчунатих

из опажања сателитских техника VLBI, LLR, SLR и Doppler/TRANSIT (Boucher and Altamimi, 1990). BTS84 је реализован у оквиру активности Међународног бироа ВИН који је координирао реализацијом међународне кампање MERIT (Monitoring of Earth Rotation and Inter-comparison of Techniques). 1988. год. завршене су три сукцесивне реализације BTS закључно са BTS87.

Од почетка деведесетих година приближно сваких годину до две добијене су побољшане реализације ITRS укључивањем нових података (IERS Technical Note). Реализација ITRS се састојала од скупа Декартових координата и брзина станица и потпуне варијанс-коваријанс матрице ових параметара. У реализацијама пре 1996. год. (ITRF96) матрица варијанси је садржала само одговарајуће елементе за координате станица. Свака нова реализација доноси већи број координата и брзина станица, заједно са побољшањем стандардних девијација ових параметара. Оваква унапређења прецизности ITRF су резултат и додатних опажања и побољшања веза код станица на којима је инсталирано више просторних сателитских техника. Садашња реализација ITRS је ITRF2008 а наредна реализација би требало да буде ITRF2014 (крајем 2015. год.) што је укупно објављених 12 верзија ITRF почев од ITRF88 и завршно са ITRF2008 од којих је свака унапређена и представља замену своје претходне реализације.

5.4.1 Дефиниција ITRF

Од реализације ITRF94 када су укључене комплетне матрице варијанси индивидуалних решења у комбинацију ITRF, дефиниција Терестричког Референтног Оквир се може описати на следећи начин:

- почетак: реализован је из пондерисаних средњих вредности неколико решења добијених SLR и GPS техникама;
- размера: реализована је из пондерисаних средњих вредности неколико решења добијених VLBI, SLR и GPS техникама. Њена вредност је коригована у складу са резолуцијама IUGG и IAU, тј. усвојеном временском скалом TCG (Coordinated Time Geocentric) уместо временске скале TT (Terrestrial Time);
- оријентација је усклађена са ITRF92;
- временска еволуција оријентације оса је дефинисана усклађивањем поља брзина ITRF94 према моделу NNR-NUVEL-1A преко 7 извода параметара трансформације.

Реализација ITRF96 је затим усклађена са ITRF94, реализација ITRF97 са ITRF96 преко 14 параметара трансформације. Мрежа ITRF је прогресивно повећавана новим станицама а посебно станица са више сателитских техника. Прецизност положаја ITRF станица и брзина је побољшана у времену на основу побољшања која су добијена у центрима за анализу као и у самој комбинацији ITRF. Реализација ITRF2000 поред основних станица, VLBI, SLR, GPS и DORIS обухвата погушћења регионалних GPS мрежа у Европи, Азији, Америци, Аљасци, Антарктику и на Пацифику. Дефиниција оквира ITRF2000 се карактерише следећим својствима:

- почетак је дефинисан сетовањем трансација и њихових извода на нулу између ITRF2000 и средњих пондерисаних вредности решења добијених SLR техником.
- размера је дефинисана постављањем на нулу размере и њеног извода између ITRF2000 и пондерисане средње вредности SLR решења и VLBI решења. Размера ITRF2000 је компатибилна са Терестричким временом (TT) да би се ускладила решења добијена од аналитичких центара који учествују у изградњи ITRF2000.

- оријентација је дефинисана поравнањем углова ротације и њихових извода у ITRF97 према моделу NNR-NUVEL-1A (DeMets et al., 1994) .

Кинематички модел који обухвата шест главних тектонских плоча добијен је почев од поља брзина у ITRF2000 према следећој једначини:

$$\dot{X}_i = \omega_p \times X_i \quad (5.13)$$

при чему је ω_p вектор ротације, \dot{X}_i вектор брзине тачке i са вектором координата X_i која припада тектонској плочи p . Релативно у односу на добијени модел апсолутног кретања оцењени су полови ротације шест главних тектонских плоча. Усклађивање оријентације ITRF2000 са моделом NNR-NUVEL-1A остварено је са 1 mm/y. Иако је поље брзина у ITRF2000 генерално усклађено према моделу NNR-NUVEL-1A могу се појавити разлике брзина на регионалном нивоу до 3 mm/y (Altamimi et al., 2003).

5.4.2 ITRF2005

Реализација терестричког оквира ITRF2005 обухвата недељна решења IVS, ILRS и IGS мрежа за временски период од десет година (1995 - 2005) и резултате од шест IDS станица (Altamimi et al., 2007). Први пут у историји ITRF, комбинација ITRF2005 обухватала је параметре оријентације Земље (померање пола, дужину дана и универзално време - UT) чиме је осигурана конзистентност између ITRF и IERS параметара оријентације Земље. Усклађивање ITRF2005 комбинације према дефиницији ITRS извршено је изравнањем и оценом параметара са применом следећих услова:

- почетак је дефинисан тако да је транслација у епохи 2000.0 једнака нули и промена размере између ITRF2005 и ILRS SLR серија једнака нули;
- размера је дефинисана тако да је фактор размере у епохи 2000.0 једнак нули и промена размере између ITRF2005 и IVS VLBI серија једнака нули;
- оријентација је дефинисана тако да су параметри ротације у епохи 2000.0 једнаки нули и промене ротације између ITRF2005 и ITRF2000 једнаке нули.

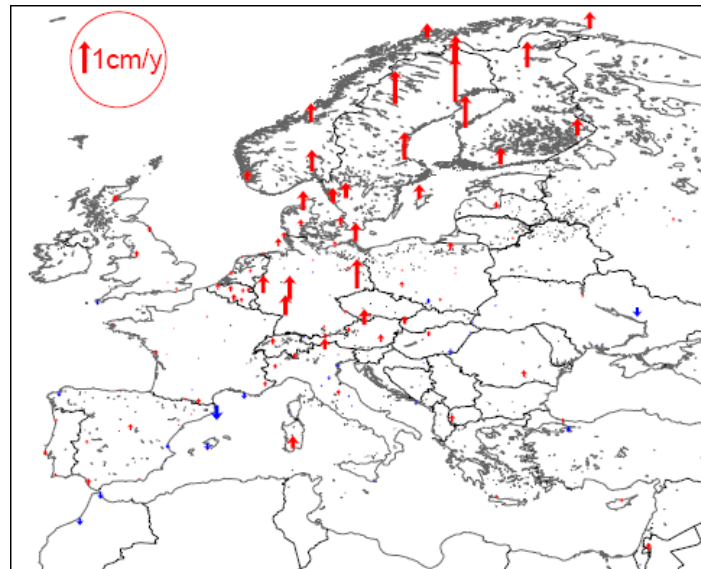
Оцена координата и брзина станица глобалне мреже добијене су изравнањем по методи најмањих квадрата комбинујући сва решења добијена од различитих просторних техника. У општем случају координате тачака се односе на референтну епоху t_0 , односно епоха 2000.0 за координате тачака у ITRF2005. Генерално, координате тачака $X_i = X, Y, Z$ за епоху $t \neq t_0$ могу се срачунати линеарном интерполацијом према једначини:

$$\begin{aligned} X_i(t) &= X(t_0) + \dot{X}_i(t - t_0) \\ \sigma_{X_i}^2(t) &= \sigma_{X_i}^2 + \sigma_{\dot{X}_i}^2(t - t_0)^2 \end{aligned} \quad (5.14)$$

Због ниског степена апдејтовања ITRF оперативно нове станице мреже учествују у решењу ITRF неколико година након почетка рада у циљу обезбеђења довољног броја временских серија ранијих епоха што је потребно за тачну оцену брзина станица.

Оцена тачности параметара дефиниције оквира ITRF2005 (епоха 2000.0) приказана преко оцене тачности почетка, размере и NNR услова ITRF је следећа:

- почетак има несигурност 5 mm и временски извод почетка има несигурност 2 mm/y у поређењу са ITRF2000. Разлог за добијање ових резултата је због веће дисперзије Z компоненте почетка него дисперзије X и Y компоненте. Разлика брзине translације по Z оси у износу од 1.8mm/y узрокује промену вертикалних брзина станица у функцији латитуде станице према формули $1.8 \cdot \sin \varphi$ (Altamimi et al., 2007), слика 5.11.



Слика 5.11. Вертикалне брзине EPN станица изражене у ITRF2005.

- размера и њен временски извод су одређене са тачношћу реда 1 ppb и 0.1 ppb/y. Ове оцене одговарају нивоу сагласности између VLBI и SLR решења.
- оријентација - сагласност NNR модела, APKIM2005P и GRSM-NNR-2 и модела NNR-NUVEL-1A (за ITRF2000) је нивоа 2 mm/y, тако да се може извести закључак да је тачност остваривања NNR услова 2 mm/y.

5.4.3 ITRF2008

ITRF2008 је редефинисана верзија Међународног терестричког референтног оквира добијена репроцесирањем решења добијених просторним VLBI, SLR, GPS и DORIS техникама. Улазни подаци су недељне временске серије положаја станица, 24h VLBI сесије и дневна решења параметара оријентације Земље (EOP). Реализација ITRF2008 је срачуната на основу извршених мерења за временске периоде од 29 година за VLBI, 26 година за SLR, 12.5 година за GPS и 16 година за DORIS технику. Мрежа станица све четири сателитске технике које чине ITRF2008 приказана је на слици 5.12.

За изградњу ITRF и комбиновање временских серија користи се CATREF софтвер (CATREF Software, Combination and Analysis of Terrestrial Reference Frames, Altamimi et al., 2006) у којем је имплементиран математички модел комбинације. Стратегија решења комбинације која се примењује за изградњу ITRF тренутно се изводи кроз две етапе: 1) изравнање индивидуалних временских серија за добијање оцене дугорочног решења положаја станица у референтној епохи, брзина положаја

станица и дневних вредности EOP за све четири технике, и 2) комбиновање дугорочних решења добијених од све четири технике заједно са резултатима локалних веза на станицама које су опремљене са више сателитских техника (колокацијске станице). Под претпоставком да је за свако индивидуално решење s и сваку тачку i оцењен положај тачке X_s^i у епохи t_s^i и брзина тачке \dot{X}_s^i , изражених у TRF k , решење комбинације се састоји од оцењивања следећих вредности:

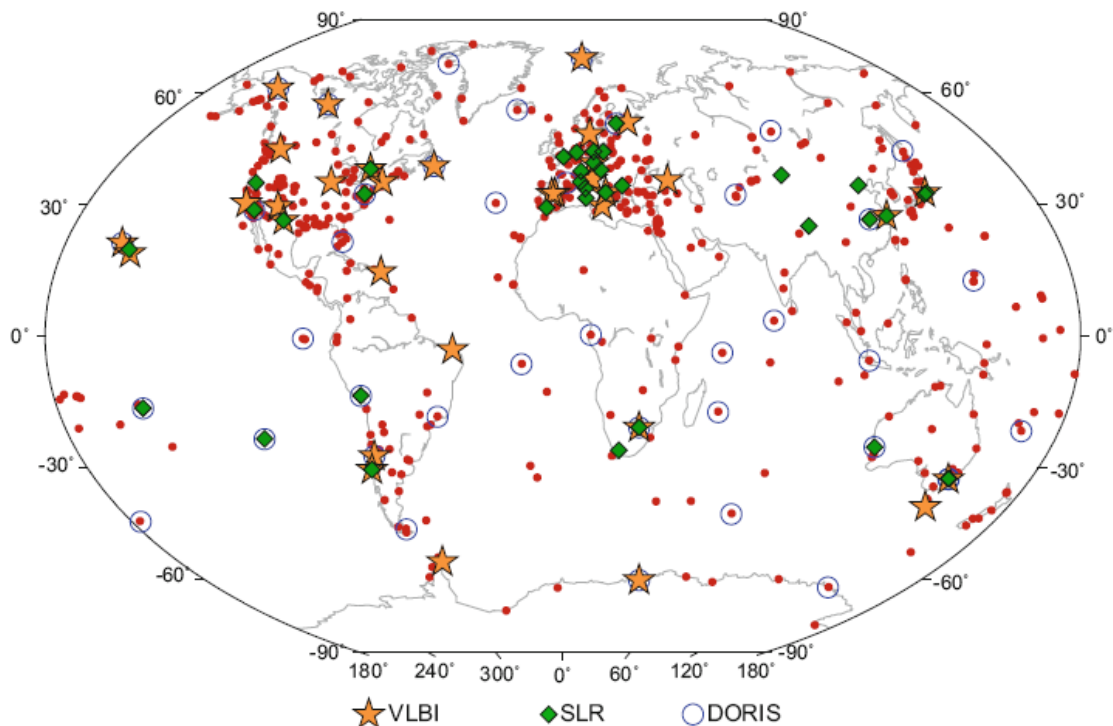
- Положаја тачака X_c^i у датој епохи t_0 и брзина тачака \dot{X}_c^i изражених у решењу комбинованог оквира s ;
- Трансформационих параметара T_k у епохи t_k и њихових брзина \dot{T}_k од комбинованог TRF ка сваком индивидуалном оквиру k .

Општи модел комбинације изражава се следећом једначином:

$$X_s^i = X_c^i + (t_s^i - t_0)\dot{X}_c^i + T_k + D_k X_c^i + R_k X_c^i + (t_s^i - t_k)[\dot{T}_k + \dot{D}_k X_c^i + \dot{R}_k X_c^i] \quad (5.15)$$

$$\dot{X}_s^i = \dot{X}_c^i + \dot{T}_k + \dot{D}_k X_c^i + \dot{R}_k X_c^i$$

За сваки индивидуални оквир k који је имплицитно дефинисан индивидуалним решењем s , D_k је фактор размере, T_k је вектор транслације и R_k означава матрицу ротације. У једначини (1) чланови са тачком означавају изводе ових параметара по времену. Вектор транслације T_k се састоји од три компоненте почетка T_x, T_y, T_z и матрица ротације од три параметра ротације R_x, R_y, R_z по три осе X, Y и Z . t_k је конвенционално изабрана епоха седам параметара трансформације.



Слика 5.12. ITRF2008 мрежа VLBI, SLR и DORIS станица са придруженим GPS станицама.

Оцена тачности параметара дефиниције оквира ITRF2008 (епоха 2005.0) приказана преко оцене тачности почетка, размере и NNR услова ITRF је следећа Altamimi et al., (2011):

- Почетак ITRF2008 је дефинисан тако да има трансалацију и промену трансалације једнаке нули у односу на средњи центар масе Земље добијен на основу SLR временских серија. Оцене компоненти почетка ITRF2008 у односу на ITRF2005 показују разлике од -0.5 по X оси, -0.9 по Y оси и -4.7 по Z оси у епохи 2005.0. Разлике у оценама брзине трансалације између два оквира су једнаке нули за Y и Z осу, док разлика брзине трансалације по X оси износи 0.3 mm/уг. Оцењене формалне грешке параметара трансалације су 0.2mm и брзине трансалације 0.2mm/уг. Висок степен сагласности почетка између оквира ITRF2008 и ITRF2005 указује на непрецизност почетка ITRF2000. Тачност почетка ITRF2008 изведена на основу сагласности са ITRF2005 је нивоа од 1 cm за временски период SLR опажања.
- Размера ITRF2008 је дефинисана средњим вредностима VLBI и SLR дугорочних решења добијених изравнањем одговарајућих временских серија. Сагласност размере између два решења добијена овим техникама оцењена за епоху 2005.0 износи 1.05 ± 0.13 ppb и сагласност промене размере износи 0.049 ± 0.010 ppb/уг. На основу овога може се рећи да ће се унапређење ITRF добити остваривањем конзистентности између локалних веза на станицама са више сателитских техника.
- Оријентација ITRF2008 (епоха 2005.0) и вредност промене оријентације су усклађене према ITRF2005 на основу опажања која су извршена на 179 станица са високим квалитетом.

Захваљујући континуираним унапређењем улазних података обезбеђених преко техничких сервиса сателитских техника и унапређењем стратегије решења комбинације, ITRF2008 прати серију побољшаних решења ITRF. У поређењу са претходним решењима ITRF2008 решење има најбоље оцене не само у смислу прецизности положаја и брзина станица, већ и у побољшању оцена његових параметара дефинисања, посебно почетка и размере.

6 Сателитски GPS систем

Кључно у GPS позиционирању је то да представља савремену прецизну стратегију процесирања која може да обезбеди 3Д позиције на нивоу испод центиметра према препорукама IERS Конвенције 2010 (IERS TN 36), Petit and Luzum, 2010. Поред тога, велики број GPS станица глобалних и регионалних мрежа покрива целу Земљину површину и обезбеђује статистички значајан број опажања, између осталог, за истраживања деформације Земљине коре на различитим просторним и временским скалама. Велики број истраживања извршен је на основу GPS временских серија положаја која су имала за циљ квантификовање утицаја различитих геофизичких феномена (на пример Collilieux et al., 2012).

Сателитски GPS систем за глобално позиционирање је сателитски систем развијен од стране америчког Министарства одбране (DoD) крајем седамдесетих година са основним циљем, у прво време за војне потребе, да омогући позиционирање, навигацију и трансфер времена. Потпуна конфигурација GPS система је базирана на констелацији од 24 сателита распоређених у 6 орбиталних равни на око 20 200 km висине изнад Земљине површине и употреби електромагнетних таласа из радио фреквентног опсега. Распоред и оријентација сателитских путања пројектована је тако да је обезбеђена електронска видљивост најмање 4 сателита у било ком тренутку времена и са било које тачке на Земљиној површи.

GPS систем је пасивни сателитски систем који се заснива на позиционирању по методи трилатерације и мерењу дужина на основу времена простирања радио сигнала. За прецизно мерење времена потребно је да часовници у сателитима и пријемника буду синхронизовани. Опажане псеудодужине су изведене из мерења времена простирања сигнала у једном правцу (кодне псеудодужине) или фазне разлике (фазне псеудодужине) између примљених и генерисаних сигнала. Сателити последње генерације имају три или више носећих таласа чије се фреквенције разликују од једног система у односу на други систем. У GPS систему постоје следеће три оперативне фреквенције: $f_1 = 154 \cdot f_0 = 1575.42 \text{ MHz}$, $f_2 = 120 \cdot f_0 = 1227.60 \text{ MHz}$ и $f_5 = 115 \cdot f_0 = 1176.45 \text{ MHz}$, где је $f_0 = 10.23 \text{ MHz}$ основна фреквенција.

6.1 Референтни систем WGS84

Референтни систем на кога се односе резултати GPS позиционирања и навигације је референтни систем WGS84, World Geodetic System 1984. Референтни систем WGS84 је реализација конвенционалног терестричког референтног система CTRS и осим за позиционирање и навигацију представља терестрички референтни систем за све примене у картографији и геодезији. Потпуна дефиниција WGS84 референтног система обухвата скуп глобалних модела и дефиниција: координатни систем, елипсоидни и гравитациони модел Земље, систем времена и дефиниционе и изведене геометријске и физичке параметре, табела 6.1.

WGS84 елипсоид је дефинисан великом полуосом (a), реципрчном вредношћу спљоштености обртног елипсоида ($1/f$), геоцентричном гравитационом константом (GM) и средњом угаоном брзином ротације Земље (ω). Прва два параметра (a и $1/f$) комплетно дефинишу геометрију ротационог елипсоида док друга два параметра (GM и ω) омогућавају јединствено одређивање придруженог нормалног гравитационог поља.

Табела 6.1. Геометријски и физички параметри дефиниције система WGS84.

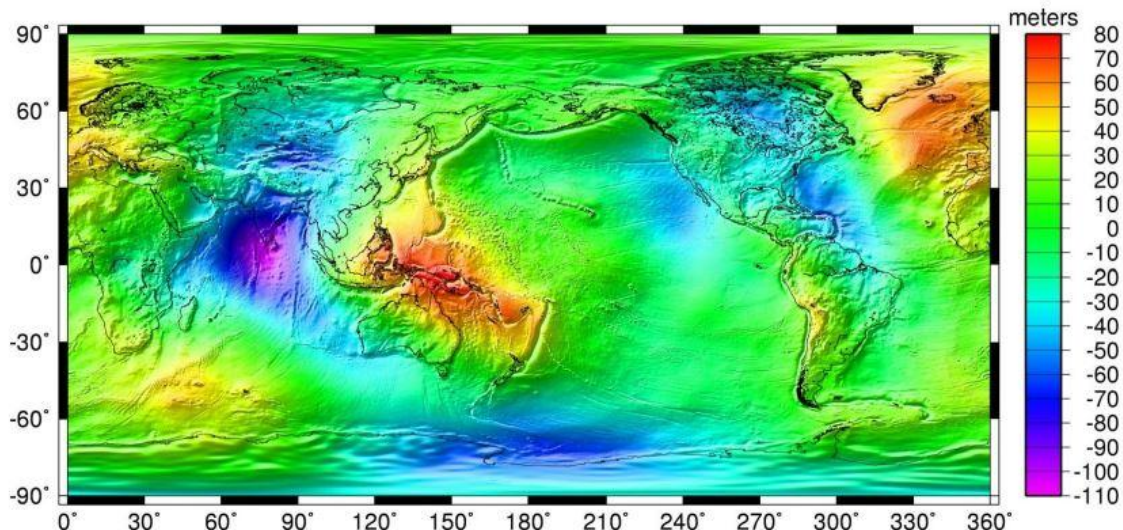
Параметар	Вредност
Велика полуоса елипсоида (a)	6 378 137.0 m
Фактор спљоштености Земље (1/f)	298.257 223 563
Геоцентрична гравитациона константа (GM)	$3.986\,004\,418 \cdot 10^{14} \text{m}^3 \text{s}^{-2}$
Средња угаона брзина ротације Земље (ω)	$7.292\,115 \cdot 10^{-5} \text{rad s}^{-1}$
Специјални WGS84 параметри	
Зонални хармоник другог степена $\bar{C}_{2,0} \text{ dyn [2008]}$	$-4.84\,165\,143\,790\,815 \cdot 10^{-4}$
Секторски хармоник другог степена $\bar{C}_{2,2} \text{ dyn [2008]}$	$2.439\,383\,573\,283\,13 \cdot 10^{-6}$
Фундаменталне константе	
Брзина светлости у вакууму (c)	$2.997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{m s}^{-1}$
Универзална гравитациона константа (G)	$6.674\,428 \cdot 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$

WGS84 систем је десно оријентисани правоугли координатни систем са почетком у центру масе Земље, локалном размером у смислу релативистичке теорије гравитације и оријентацијом одређеном од стране Међународне службе времена ВИН за епоху 1984.0. Несигурност оријентације износи око 0.005" са временском еволуцијом која по дефиницији не резултира никаквом глобалном резидуалном ротацијом у односу на Земљину кору, Petit and Luzum, 2010.

Координатни почетак и Z оса правоуглог координатног система која се налази у правцу IERS Референтног пола служе и као основа дефиниције геометријског центра и мале полуосе WGS84 елипсоида као геометријског модела Земље. X оса се налази у пресеку IERS Референтног меридијана и равни која садржи почетак и нормална је на Z осу и Y оса комплетира десно оријентисани ортогонални координатни систем. Параметари дефиниције система велика полуоса и спљоштеност елипсоида усвојени су по угледу на приступ Међународне геодетске и геофизичке уније IUGG при успостављању и усвајању геодетског референтног система GRS80, Moritz, 1984. Једини изузетак у том погледу представља геоцентрична гравитациона константа GM, јер се уместо GRS80 вредности $3.986\,005\,0 \cdot 10^{14} \text{m}^3 \text{s}^{-2}$ од 1994. год. користи вредност $3.986\,004\,418 \cdot 10^{14} \text{m}^3 \text{s}^{-2}$. Према томе, WGS84 се заснива на теорији геоцентричног екипотенцијалног обртног елипсоида, при чему је елипсоид референтна површ за геометријску употребу, док придружено нормално гравитационо поље представља референтни систем за гравиметрију и сателитску геодезију. Садашњи WGS84 модел гравитационог поља Земље је модел EGM2008, Earth Gravitational Model 2008.

Теоријски EGM2008 се заснива на развоју гравитационог потенцијала (V) у бесконачан ред чланова или сферних хармоника. Сферни хармоници се идентификују преко степена n и реда m. Практично, развој потенцијала силе Земљине теже у ред сферних хармоника се може извести само до неког коначног степена. Модел EGM2008 развијен је до степена и реда 2159 и садржи приближно 4.7 милиона коефицијената, Pavlis et al. 2012. EGM2008 модел је развијен по методи најмањих квадрата комбинацијом ITG-Grace03s сателитског модела и гравитационих података добијених анализом глобалног сета вредности гравитационих аномалија за области величине 5' x 5'. ITG-Grace03s модел је развијен анализом података сателитске мисије GRACE обухватајући 57 месеци, Mayer-Guerr, 2007. Слика 6.1 приказује референтну површ геоидних ундулација WGS84 геоида заснованог на геопотенцијалном моделу EGM2008. Облик геоидне површи добро репрезентује континенталне масе и зоне аномалија чиме описује

границе великих литосферских плоча. Максимална вредност ундулације износи +85.82 m на подручју Нове Гвинеје а минимална ундулација од -106.91 m налази се у Индијском океану. Глобална средња вредност геоидних ундулација је приближно једнака нули, а глобална тачност реализације геоидне површи на основу геопотенцијалног модела EGM2008 износи 11 cm, NGA, 2014.



Слика 6.1. EGM2008 модел грида 2.5' x 2.5' у односу на WGS 84 елипсоид.

Функционисање GPS сателитског система заснива се у суштини на употреби динамичке (TDT) и атомске (TAI) временске скале. Односи временских скала углавном као резултат међународних конвенција приказани су у поглављу Референтни временски системи.

6.1.1 Однос WGS84 са ITRF

Референтни систем WGS84 је од своје првобитне дефиниције имао низ од неколико побољшања. Практична реализација референтног оквира је одређена скупом глобално дистрибуираних перманентних GPS станица које су погледу квалитета у складу са вредностима високо тачних координата станица терестричког референтног оквира ITRF.

У односу на референтни оквир ITRF2008 референтни оквир WGS84 показује у целини RMS вредности разлика до једног центиметра. Такође, упоређењем између NGA GPS прецизних ефемерида које се референцирају на WGS84 и GPS прецизних ефемерида Међународног GNSS Сервиса (IGS) које су референциране на ITRF2008, потврђује се да су два референтна система конзистентна. Ово указује на то да су ова два референтна оквира сагласна са разликама које нису статистички значајне за већину примена, NGA, 2014.

Последња реализација WGS84 (G1674) је "поравната" са референтним оквиром ITRF2008 у истој епохи 2005.0. Сврха овог усклађивања је обезбеђење научног интегритета као и поступање у складу са најбољом праксом. Реализација ITRF је заснована на више просторних геодетских техника за реализацију референтног система као што су SLR, VLBI, DORIS и GPS за разлику од NGA WGS84. Усклађивање WGS84 са ITRF омогућава да референтни оквир искористи предност ових техника без њиховог директног укључивања у оквиру софтвера за процесирање и оцену координата.

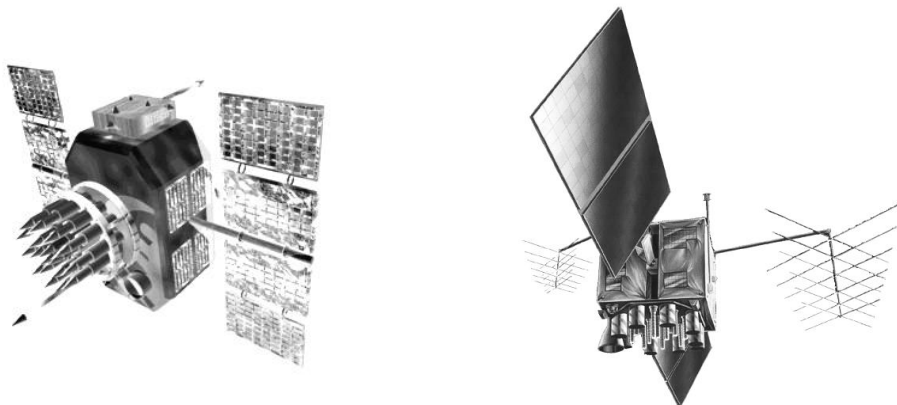
Референтни систем WGS84 (G1674) се базира на усвојеним вредностима NGA координата станица у референтном оквиру ITRF2008, са изузетком станица које се налазе у Бахреину и Кореји. Сва рачунања су извршена на тај начин да би се ускладиле остале WGS84 референтне станице на ову мрежу. У референтном систему WGS84 (G1674), за све WGS84 референтне станице су усвојене брзине станица ITRF2008 или њихових суседних локација. Оцењена тачност WGS84 (G1674) је укупно боља од једног центиметра за сваку од координата станица референтног оквира. 7-параметарска трансформација из система WGS84 (G1674) у систем ITRF2008 је извршена тако да су параметри трансформације једнаки нули. Овај начин је пројектован тако што су за референтни систем WGS 84 (G1674) усвојене у потпуности ITRF2008 координате и брзине у заједничким станицама између два референтна оквира осим два изузетка. Овим процесом је обезбеђено "поравнање" референтног система WGS84 са Међународним терестричким референтним системом ITRF2008 нивоа до једног центиметра у иницијалној WGS84 (G1674) реализацији, NGA, 2014.

6.2 GPS системске компоненте

GPS систем чине три системске компоненте: космичка, контролна и корисничка компонента. Традиционалној подели данас се додаје четврта, терестричка GPS компонента која подразумева цивилну инфраструктуру изграђена у последње две деценије.

Космичка компонента GPS система

Космички сегмент система обухвата GPS сателите и њихову констелацију. Почев од 1974. год. лансирано је више генерација сателита: NTS, NDS (Block I), Block II, BlockIIA, Block IIR и Block IIF, слика 6.2.



Слика 6.2. GPS сателити Block II (лево), Block IIR (десно).

GPS сателити представљају платформе за радио пријемнике и одашиљаче, рубидијумске и цезијумске атомске часовнике, компјутере и друге електронске уређаје потребне како за позиционирање, тако и за војне пројекте као што је рано откривање нуклеарних удара. Поред тога опремљени су соларним панелима који

обезбеђују електричну енергију реакционим точковима за контролу стања и млазним системом потребним за корекцију орбите. Количина горива и компоненте које обезбеђују енергију ограничавају век трајања GPS сателита на 10 година. Последња генерација сателита у односу на раније генерације је дизајнирана са могућношћу међусателитске комуникације и AutoNav дизајна за шестомесечно аутономно одређивање путања без интервенције са Земље.

Номинална GPS сателитска констелација позната као GPS-24, веома је блиска Вокеровој фамилији кружних орбита 24/6/1, Walker, 1984, при чему први број означава укупан број сателита, други број орбиталних равни, а трећи фазну разлику сателита у суседним орбитама. Оваква констелација обезбеђује глобалну покривеност Земље и видљивост шест сателита у сваком тренутку времена и са сваке тачке Земљине површи. Актуелна GPS констелација садржи 27 сателита од којих су 3 резервна и оптимизована је за случај отказивања рада једног сателита. Орбиталне равни имају инклинацију од 55° , са путањама чија је велика полуоса 26561.754 km и ексцентрицитетом блиском нули. Период обиласка сателита износи 12 звезданих часова, што доводи до ефеката резонанције са Земљиним гравитационим пољем, због чега је потребна релативно честа корекција орбита. Номинална међусателитска и међуорбитална лучна растојања пројектована су тако да буду приближно равномерна.

Контролна компонента GPS система

Контролна компонента GPS система се састоји од пет станица за праћење, четири Земаљске антене за комуникацију са сателитима и контролног центра. Оперативни контролни систем (OCS) активан је од 1985. год. чији је задатак да одржава сателите у предвиђеним орбитама, коригује стања сателитских часовника и других електронских компоненти, генерише навигационе поруке и управља премештањем сателита и њиховом заменом у случају квара.

Свака од пет станица за праћење (Colorado Springs, Hawaii, Ascension Island, Diego Garcia, Kwajalein Island) опремљена је двофреквентним пријемницима и редундантним цезијумским фреквентним стандардима који служе као референтни осцилатори. Осим станице Hawaii, на осталим локацијама се налазе велике Земаљске антене преко којих се одвија комуникација са сателитима у S-фреквентном опсегу. Colorado Springs је главна станица за праћење и представља истовремено оперативни контролни центар.

Са становишта корисника најважнија функција контролног сегмента је обезбеђење навигационих података у реалном времену. Након прикупљања свих извршених кодних и фазних мерења, у оперативном контролном центру се Калмановим филтером оцењују ефемериде, стања часовника и други навигациони параметри за сваки сателит. Срачунати и форматизовани навигациони подаци упућују се потом Земаљским антенама које их прослеђују сателитским меморијама. Корисничка грешка мерења псеудодужина превасходно зависи од учесталости којом се сателитске меморије пуне навигационим подацима. Контролни сегмент је дизајниран тако да се ажурирање навигационе поруке може вршити три пута дневно.

Корисничка компонента GPS система

Корисничка компонента система обухвата све врсте стационарних и покретних GPS пријемника који раде на физичкој површи Земље, сувоземним, поморским,

ваздухопловним платформама и нисколетећим сателитима (LEO), а служе у цивилне и војне сврхе. Упркос широком спектру корисника и специфичним пољима примене (позиционирање, навигација, трансфер времена, геодезија, геодинамика, геофизика, физика атмосфере итд.) архитектура сваког савременог GPS пријемника садржи стандардне функционалне целине, Seeber, 2003.

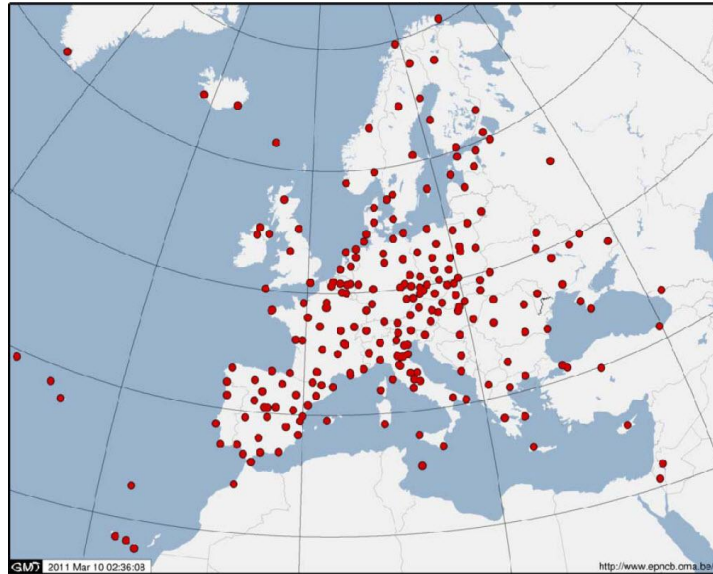
Како су GPS мерења у принципу базирана на времену доласка сателитских сигнала, референтни осцилатор има кључну улогу у функционисању пријемника. Његов излаз употребљава фреквентни синтисајзер, са задатком да изведе више локалних осцилатора и часовника које пријемник онда користи како за генерисање међуфреквенција, тако и приликом обраде примљених, појачаних и дигитализованих сигнала. Резултате обраде чине кодне и фазне псеудодужине, односи сигнала и шума, епохе мерења у локалној временској скали пријемника и GPS системски подаци за сваки сателит чији су сигнали праћени. Пошто је GPS превасходно навигациони систем, пријемник ове резултате користи пре свега за рачунање навигационог решења. Постоји међутим читав низ специфичних примена за које се употребљавају пријемници који уместо тога врше трансфер времена, генеришу корекције на референтним станицама, прате јоносферску активност или само прикупљају податке.

Терестричка компонента GNSS система

Терестричка компонента као глобална инфраструктура Међународне GNSS службе IGS станица обухвата глобалне, регионалне и локалне мреже перманентних GNSS станица.

IGS се у општем смислу састоји од компоненти као што су мрежа стално оперативних GNSS станица, центри за прикупљање података, центри за анализу података, координатор, централни биро, управни одбор и корисници. Чланство IGS је мултинационално и чине га различите организације, државне агенције и универзитети. Оперативни центри за анализу података координирано одређују и публикују прецизне ефемериде свих активних GNSS сателита, параметре ротације Земље, координате и брзине IGS станица у SINEX формату, стања сателитских и станичних часовника, диференцијална кодна кашњења, станична тропосферска зенитна кашњења и јоносферске мапе. IGS резултати се односе се на глобални терестрички референтни систем ITRS. У случају GLONASS система податке обезбеђује перманентна мрежа IGEX која је такође део IGS инфраструктуре.

Регионалне перманентне мреже, као што је Европска EUREF перманентна EPN мрежа са Централним бироом у Бриселу у чијој је надлежности генерално управљање EPN мрежом, чине прогушћење глобалне IGS мреже станица, слика 6.3, <http://www.epncb.oma.be>. Поред тога што непосредно реализују ITRS регионалне перманентне мреже представљају активне референтне основе које омогућују приступ мерењима и корекцијама у реалном времену или са дефинисаним закашњењем.

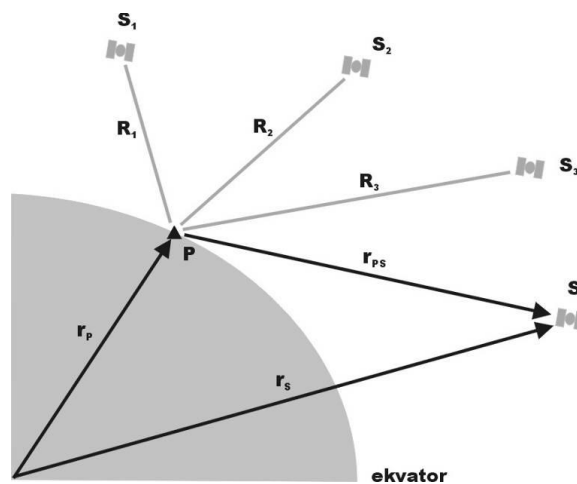


Слика 6.3. Перманентна EPN мрежа станица.

6.3 Принцип мерења псеудодужина

Позиционирање помоћу вештачких Земљиних сателита заснива се на једноставном геометријском принципу одређивања непознатог вектора положаја тачке \mathbf{r}_P , слика 6.4, на основу познатог вектора положаја сателита \mathbf{r}_S и мереног вектора релативног положаја сателита у односу на тачку \mathbf{r}_{PS} , Blagojević, 2014:

$$\mathbf{r}_P(t) = \mathbf{r}_S(t) - \mathbf{r}_{PS}(t) = \mathbf{r}_S(t) - \mathbf{e}_{PS}(t) \cdot |\mathbf{r}_{PS}(t)| \quad (6.1)$$



Слика 6.4. Основни принцип сателитског позиционирања.

Мерење вектора \mathbf{r}_{PS} подразумева одређивање његових компоненти правца, смера и интензитета. Сателитско позиционирање заснива се на поступку симултаног мерења некопланарних дужина до три или више сателита. Положај тачке P одређен је пресеком сфера са центрима у сателитским локацијама чији су полупречници једнаки измереним дужинама R_i . Код GPS позиционирања неопходно је мерити четири дужине због тога што је поред тродимензионалног положаја тачке непозната и величина одступања часовника пријемника од системског GPS времена.

Овакав начин позиционирања назива се апсолутно позиционирање јер се одређивање положаја тачака врши у координатном систему чији се почетак налази у центру масе Земље, а истовремено се подудара са жижама елиптичних сателитских путања. Пошто координатни систем реализују сателитске ефемериде, квалитет апсолутног позиционирања одређен је пре свега геометријским распоредом сателита, тачношћу њихових положаја и тачношћу мерења. Да би се смањило или у потпуности елиминисао утицај великог броја систематских извора грешака позиционирање тачке P изводи се релативно у односу на другу тачку Q при чему се интензитет вектора \overrightarrow{PQ} изражава следећом једначином:

$$\mathbf{r}_{PQ}(t) = \mathbf{r}_{PS}(t) - \mathbf{r}_{QS}(t) = \mathbf{e}_{PS}(t) \cdot |\mathbf{r}_{PS}(t)| - \mathbf{e}_{QS}(t) \cdot |\mathbf{r}_{QS}(t)| \quad (6.2)$$

Овај начин позиционирања се назива релативно позиционирање јер се одређивање положаја тачке Q врши у топоцентричном координатном систему чији се почетак налази у тачки P са очуваном глобалном оријентацијом координатних оса. Поступак релативног позиционирања изводи се симултаним мерењем дужина са обе тачке до три или више сателита, при чему је довољно познавање приближних положаја сателита и координатног почетка да би се остварила висока тачност релативног положаја. Постоји велики број метода апсолутног и релативног GPS позиционирања које се могу класификовати на различите начине тако да се могу дефинисати следећа три општа критеријума:

1. На основу дужине времена запоседања тачака пријемницима, GPS позиционирање може бити перманентно, статичко, брзо статичко, псеудокинематичко и кинематичко, са редоследом који одговара опадајућем времену задржавања на тачкама. Метода перманентног GPS позиционирања подразумева стално стациониране пријемнике којима се непрекидно врше мерења, док се кинематичком методом позиционирање изводи док је пријемник практично у покрету.

2. На основу начина обраде односно времена протеклог од извршених мерења, GPS позиционирање може бити са обрадом апостериори или у реалном времену. Обрада апостериори врши се након свих извршених мерења и има ту предност што пружа могућност детаљне анализе и контроле квалитета како мерног материјала тако и резултата позиционирања.

3. На основу врсте мерних величина, GPS позиционирање може бити кодно или фазно. Кодна мерења су једнозначна, али су резултати позиционирања ниже тачности. С друге стране, обрада много прецизнијих фазних мерења повезана је са проблемом фазних неодређености.

Један од најважнијих критеријума избора конкретног поступка је тачност позиционирања. У том смислу методе GPS позиционирања показују различиту осетљивост на промену фактора као што су на пример атмосферски услови, број сателита, њихова геометријска констелација, или интервал времена са којим се врши регистрација мерења. На основу поменутих критеријума издвајају се следећи

поступци GPS позиционирања са апостериори оценом: перманентни, статички, брзи статички, квазикинематички и кинематички поступак, Seeber, 2003.

6.4 Извори грешака GPS мерења

Извори грешака имају кључни утицај у прецизним геодетским применама и морају се свакако обухватити моделским једначинама псеудодужина. Потпуна моделска једначина кодних псеудодужина се изражава у следећем облику:

$$\begin{aligned}
 P_{Fm}^j(t_i) = & \rho_m^j(t_i) - c_0 \delta_m(t_i) \left(1 - \frac{\dot{\rho}_m^j(t_i)}{c_0} \right) + c_0 \delta^j(t_i) + I_{Fm}^j(t_i) + T_m^j(t_i) \\
 & + A_{Fm}^j(t_i) + O_m^j(t_i) + M_{Fm}^j(t_i) - h_{Fm}(t_i) + h_F^j(t_i) + r_m^j(t_i) + \omega_{Fm}^j(t_i)
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

са следећим значењем појединих члановима:

- P_{Fm}^j - кодна псеудодужина,
- ρ_m^j - геометријско растојање између сателита у тренутку емитовања и пријемника у тренутку пријема сигнала,
- c_0 - брзина електромагнетних таласа у вакууму,
- $\dot{\rho}_m^j$ - брзина промене геометријског растојања,
- I_{Fm}^j - утицај кашњења сигнала при проласку кроз јоносферу,
- T_m^j - утицај кашњења сигнала при проласку кроз тропосферу,
- A_{Fm}^j - утицај тренутног положаја фазног центра антене,
- O_m^j - утицај грешке сателитске орбите, независан од фреквенције носећег таласа,
- M_{Fm}^j - утицај вишеструке рефлексије сигнала,
- h_{Fm} - утицај кашњења сигнала при проласку кроз хардвер пријемника,
- h_F^j - утицај кашњења сигнала при проласку кроз хардвер сателита,
- r_m^j - периодични релативистички утицај, независан од фреквенције носећег таласа,
- ω_{Fm}^j - случајна грешка кодне псеудодужине (мерни шум).

Формулација потпуне моделске једначине фазних псеудодужина има следећи облик:

$$\begin{aligned}
 L_{Fm}^j(t_i) = & \rho_m^j(t_i) - c_0 \delta_m(t_i) \left(1 - \frac{\dot{\rho}_m^j(t_i)}{c_0} \right) + c_0 \delta^j(t_i) - I_{Fm}^j(t_i) + T_m^j(t_i) + A_{Fm}^j(t_i) \\
 & + O_m^j(t_i) + M_{Fm}^j(t_i) - h_{Fm}(t_i) + h_F^j(t_i) + r_m^j(t_i) + \lambda_F N_{Fm}^j + \omega_{Fm}^j(t_i)
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

са истим значењем појединих члановима као у претходној једначини, као и са ознакама за:

$L_{Fm}^j = \lambda_F \psi_{Fm}^j$ - фазна псеудодужина,

$\omega_{Fm}^j = \lambda_F \varepsilon_{Fm}^j$ - случајна грешка фазне псеудодужине (мерни шум).

Обе једначине укључују амбијентална (услове средине) и физичка ограничења. Међу овим утицајима је неколико атмосферских грешака, а остали утицаји су грешке часовника, шумови у пријемнику, вишелинијска путања итд. Циљ је математички одвојити и одредити сваку од ових грешака. Важно је прецизирати шта је то геометријска дужина. У систему позиционирања путем сателита, геометријска дужина одговара практично дужини која раздваја активни део антене сателита (фазни центар) у тренутку емитовања сигнала и активни део антене пријемника у моменту пријема сигнала. Између тренутка t^j када часовник сателита генерише сигнал и тренутка t_m када је тај сигнал примљен од стране пријемника, утичу многобројни фактори обухваћени моделским једначинама 6.3 и 6.4, Василић, 2009.

6.4.1 Нестабилност осцилатора

Код прецизног GPS позиционирања часовници сателита и пријемника имају кључну улогу. На пример, грешка часовника од 1 ns узрокује грешку ≈ 30 cm на дужини између сателита и пријемника ($c \cdot \delta t$) и ≈ 1.228 фазну грешку (у циклусима) на L2 GPS фреквенцији ($c \cdot \delta t / \lambda$), Xu, 2007.

Нестабилност осцилатора сателита

Одступање временских скала стабилних атомских осцилатора сателита у односу на скуп часовника контролног сегмента континуирано се одређује и доставља корисницима путем навигационе поруке у форми прогнозираних полиномских коефицијената. У прецизном GPS позиционирању користе се прецизне ефемериде које садрже информације о стању часовника сваког сателита тачности реда 0.1 ns. Међутим, за остваривање бољег квалитета коначних прецизних оцена грешака часовника одређених заједно са прецизним орбитама, центари за анализу омогућују доступност ових оцена две недеље након последњег опажања чија је тачност ≈ 75 ps у односу на IGS временску скалу, Kouba, 2009.

У принципу, за уклањање овог ефекта могу се применити две технике обраде: грешке сателитских часовника могу се оценити заједно са другим параметрима модела или се могу елиминисати формирањем простих разлика интерферометријског типа. Ова три начина у потпуности елиминишу утицај грешака сателитског часовника на мерену псеудодужину.

Нестабилност осцилатора пријемника

За разлику од сателитских часовника, часовници пријемника базирају се на кварцним осцилаторима који су економичнији али зато и мање тачнији и стабилнији. Већина савремених GPS пријемника аутономно одређује одступање сопствених временских скала од системског GPS времена и одржава га у границама од 1 ms. Синхронизација часовника пријемника остварује се том приликом техником апсолутног позиционирања, са тачношћу бољом од 1 μ s, што у измереној псеудодужини износи мање од 30 m. Грешка због кашњења сигнала при проласку кроз хардвер пријемника неодвојива је од одступања часовника од системског времена и одређује се заједно са њим.

Релативно велика резидуална грешка часовника пријемника елиминише се принципијелно на исти начин као и грешка сателитског часовника, експлицитним оцењивањем у свакој епохи мерења или формирањем простих разлика доплерског

типа. У оквиру посебних истраживања, грешка часовника може се елиминисати и употребом екстерног високостабилног осцилатора.

6.4.2 Кашњење електронике

Сигнал генерисан у тренутку t^j помоћу атомског осцилатора сателита ће бити ефективно емитован путем антене са извесним закашњењем које одговара времену које је потребно сигналу да пређе скуп електронских компонента које деле осцилатор и антену у унутрашњости сателита. Сваки сателит производи сигнале који се емитују на различитим фреквенцијама, та производња је побољшана помоћу различитих електронских компоненти и тај застој, који се назива електронско кашњење хардвера сателита, зависи од фреквенције и типа опажаних мерења (кодна или фазна). У моделским једначинама псеудодужина члан h_F^j означава за дату фреквенцију електронско кашњење код фазних и кодних мерења за сателит j .

Овај утицај има систематски карактер као и одступање емитованих ефемерида од истинских сателитских положаја. Кашњење сигнала је неодвојиво од грешке сателитског часовника, тако да се одређује или елиминише заједно са њом. Грешка ефемерида не спада у мерне грешке, већ систематски утиче на слободне чланове линеаризованог функционалног модела. Релативна грешка позиционирања је на тај начин пропорционална количнику грешака ефемерида и висине лета сателита. Ефемериде из састава навигационе поруке имају тачност већу од 3 m, док је тачност прецизних ефемерида боља од 3 cm. Утицај грешака сателитског положаја елиминише се употребом прецизних ефемерида, формирањем разлика мерења, дужим временом опажанја или оценом члана O_m^j заједно са осталим параметрима моделске једначине.

Код пријемника појављује се сличан систематски извор грешака. Између тренутка пријема сигнала који долази од сателита j и његовог доласка до часовника пријемника m , протекне изванвременски интервал, назван електронско кашњење повезано за хардвер пријемника. Електронско кашњење у основи зависи од канала у пријемнику који је намењен одређеном сателиту. У моделским једначинама h_{Fm} означава за дату фреквенцију електронско кашњење код фазних и кодних мерења пријемника m . Чланови електронских кашњења пријемника могу бити еталонирани узимајући да се један исти сателит истовремено прати на свим каналима пријемника. Неки пријемници су тако конструисани да сами имају овакав еталон, Teunisen and Kleusberg, 1998.

6.4.3 Кашњења повезана са положајем фазног центра

Геометријска дужина је дужина која раздваја положај фазног центра антене сателита и положај фазног центра антене пријемника. Код пријемника фазни центар одговара ударној тачки сигнала на активном делу антене. Позиција ове тачке варира у зависности од интензитета примљеног сигнала, коришћене фреквенције, висине и азимута сателита, Hofmann-Welenhof, 1997.

Код сателита фазни центар одговара тачки емитовања сигнала путем активног елемента антене. Њена позиција варира у функцији интензитета емитованог сигнала, фреквенције и правца емисије. Позиција фазног центра антене се изражава помоћу два параметра, Mader and Czopek, 2002:

- константна удаљеност која одговара разлици између просечне позиције фазног центра антене и позиције референтне материјалне тачке антене - ARP (Antenna Reference Point).
- варијабилни члан варијације фазног центра који је у функцији интензитета сигнала, фреквенције и правца емитовања или пријема сигнала - PCV (Phase Center Variation).

Позиција сателита, израчуната помоћу радио-дифузних ефемерида, одговара позицији фазног центра антене. Контролни сектор одређује позицију центра масе сателита користећи законе небеске механике и преноси ту позицију на ниво фазног центра антене. Вредности ексцентрицитета антена за GPS сателите се могу наћи на интернет сајту NIMA (National Imagery and Mapping Agency) и на адреси: www.defenselink.mil.

За примене статичког (геодетског) позиционирања, ексцентритети које дају конструктори за антене GPS сателита су неподударни са резултатима IGS и за овај тип пост-процесинга, IGS има своју сопствену оцену удаљености од центра антене за GPS сателите на свом интернет сајту: igsb.jpl.nasa.gov. Код пријемника варијација позиције фазног центра антене око њене просечне позиције је типично од 1 cm до 2 cm. Она се може занемарити код кодних мерења псеудодужина јер је инфериорнија у односу на мерни шум (1 метар за код C/A), али мора се узети у обзир у случају фазних мерења када је мерни шум неколико милиметара, Hofman-Welenhof, 1997.

6.4.4 Атмосферска рефракција

Простирући се кроз простор (вакуум) радио-електрични сигнал креће се константном брзином (брзином светлости c) по правој линији ако се не узимају у обзир релативистички ефекти. Код GNSS система, сателитски сигнали пролазе Земљину атмосферу пре него што дођу до пријемника. Правац кретања и брзина сигнала зависе од природе средине кроз коју пролазе. Тај феномен је познат под називом атмосферска рефракција. У једној средини са коефицијентом рефракције n , брзина простирања електромагнетског таласа v фреквенције f и таласне дужине λ је увек мања или једнака брзини светлости, односно важи израз, Seeber 2003:

$$v = \frac{c}{n} = \lambda f \quad (6.5)$$

Принцип Fermat (Doerflinger, 1997) описује утицај средине на правац простирања радио-електричног сигнала. По овом принципу, електромагнетски талас се простире од сателита ка пријемнику кроз атмосферу путањом, под називом оптички пут, минималним временом простирања таласа. Брзина простирања једног таласа у основи зависи од средине кроз коју пролази (6.5) а оптички пут S који прелази талас је такав да је $\int_S n ds$ минималан и назива се дужина оптичког пута. Оптички пут S углавном не одговара геометријском путу G између сателита и пријемника. Ако је $\int_G ds$ геометријска дужина између пријемника и сателита, $\int_S ds$ одговара дужини коју је заиста талас прешао. Разлика између дужине оптичког пута и геометријске дужине између сателита и пријемника назива се атмосферско кашњење, једначина 6.6:

$$\Delta L = \int_S n ds - \int_G ds \quad (6.6)$$

Атмосферско кашњење се углавном изражава преко дужине коју талас прелази, тј. дужине оптичког пута S:

$$\begin{aligned} \Delta L &= \int_S (n - 1) ds + \int_S ds - \int_G ds \\ \Delta L &= \int_S (n - 1) ds + \Delta_g L \end{aligned} \quad (6.7)$$

Члан $\Delta_g L$ се назива геометријско кашњење. Он одговара разлици између дужине оптичког пута коју пређе талас и геометријске дужине између сателита и пријемника. Понекад се исказује као јединица времена и тада се назива кашњење због закривљености. У случају када је атмосфера хоризонтално слојевита (у случају стратосфере), оптички путеви S и геометријски G су идентични у правцу зенита и тада је геометријско кашњење једнако нули. Геометријско кашњење се директно узима у обзир у моделима тропосферског и јоносферског кашњења.

Јоносферско кашњење

Јоносфера је део атмосфере у којој постоји највише слободних електрона тако да јоносферска радијација утиче на ширење радио-електричних таласа, Seeber 2003. Теоријски, јоносферу чини скуп честица које пуне атмосферу а у пракси углавном се сматра да је већина ових честица затворена (заробљена) у атмосферском слоју који се простире између 50 km и 1000 km висине.

За фреквенције које се користе у GNSS системима јоносфера је дисперзивна средина што значи да коефицијент рефракције n зависи од фреквенције сигнала. Ова особина омогућава, почев од мерења на различитим фреквенцијама, да се елиминише или оцени у реалном времену вредност јоносферског кашњења користећи различите комбинације мерења. Важна косеквенца дисперзивности јоносферске средине је да је на истој фреквенцији утицај на фазна и кодна мерења различит. Разматрањем носећих таласа GNSS сигнала, који је по дефиницији чисто синусоидни талас а његова брзина ширења v_{ph} , названа брзина фазе, добија се, Hofmann-Welenhof, 1997:

$$v_{ph} = \frac{c}{n} = \lambda f \quad (6.8)$$

Тако да утиче на кодна мерења на тај начин што постају дужа (delayed) и на фазна мерења која су краћа (advanced) од стварне геометријске дужине. Утицај се описује бројем укупног садржаја електрона (TEC). Однос између TEC и ефекта јоносфере на мерење псеудодужине дат је једначином 6.9, за фазна мерења одговарајућа вредност ће бити потпуно иста, али са супротним знаком.

$$I_r^s = \frac{40.3}{f_i^2} \cdot TEC \quad (6.9)$$

при чему I_r^s представља јоносферску рефракцију у метрима између сателита s и пријемника r , f_i је фреквенција носећег таласа i , TEC се изражава у јединицама TECU и TECU је еквивалентно 10^{16} електрона/ m^2 . Овај утицај је важан јер може да изазове грешку до 30 m у мереној дужини. При GPS процесирању могуће је елиминисати први ред ефекта јоносфере користећи одговарајућу линеарну

комбинацију кодних или фазних опажања, која се назива *ionosphere-free* комбинација, док се за прецизне геодетске примене чланови вишег реда морају моделирати. IERS Конвенција 2010 препоручује моделе за елиминисање чланова вишег реда утицаја јоносфере, Petit and Luzum 2010. Садржај електрона ТЕС је у функцији од многобројних параметара као што је час у дану, латитуда места опажања, висина опажаног сателита, годишње доба, флуks јонизације, магнетска активност, соларни циклус и феномен јоносферског треперења.

Утицај јоносфере зависи од просторне расподеле електрона и јона што зависи од сунчевог зрачења, густине гаса и процеса транспорта. Због варијације времена сунчевог зрачења и транспортних процеса постоје различити слојеви јонизованог гаса са варирајућом просторном екстензијом. Главне временске варијације јоносферске рефракције су дневне, сезонске и са циклусима дужих периода. Ове варијације се јављају углавном због сунчевог зрачења које директно утиче на промене густине електрона у јоносфери. Дневне варијације су узроковане променама које се јављају у неким регионима јоносфере у току дневног сунца и нестају ноћу из разлога рекомбинације електрона и јона. Током дана, густина електрона зависи од локалног времена и максималне вредности која настаје око 15 h. Годишња доба такође утичу на варијацију густине електрона због промене зенитног угла Сунца и интензитета флуksа јонизације, што карактерише сезонске варијације. Дакле, током еквиноција ефекти јоносфере су већи а током солстиција су мањи. Варијације дужег периода (циклуса од око 11 година) су повезане са појавом сунчевих пега. Када се број пега увећава, јонизација јоносфере постаје јача, Webster 1993.

На различитим местима на Земљи различити су ефекти јоносфере због варијација густине електрона јоносфере која се одликује хетерогеном глобалном структуром. На различитим географским ширинама различит је зенитни угао Сунца, што директно утиче на ниво зрачења а самим тим и густину електрона у јоносфери. Екваторијални региони се одликују великим степеном густине електрона, средње географске ширине се сматрају релативно слободне од аномалија јоносфере, док се за поларне регионе не може вршити предикција, Seeber 2003.

Тропосферско кашњење

Тропосфера је најнижи део Земљине атмосфере и садржи већину метеоролошких феномена. Висина тропосфере варира око 9 km на половима и максимално 16 -18 km у нивоу екватора, њена температура опада са висином, такође њена дебљина варира са латитудом и садржи 90% атмосферских маса. Тропосфера је средина која није дисперзивна за фреквенције које се користе у GNSS систему (<30 GHz) и чине је неутрални атоми и молекули. Вредност кашњења који је изазван тропосфером код простирања сигнала је идентичан на свим фреквенцијама и на свим типовима мерења (кодна и фазна).

Тропосферска рефракција узрокује већу путању простирања сигнала радиоталаса. Овај ефекат зависи од атмосферских параметара као што су притисак, температура и влажност ваздуха као и од геометрије сателит-пријемник, односно угла елевације сателита и положаја пријемника. Тропосферско кашњење се карактерише индексом рефракције N који се може поделити на два дела $N = N_{dry} + N_{wet}$, тј. суву и влажну компоненту. Хидростатичко кашњење је изазвано сувим атмосферским гасовима и може се предвидети познавајући локалне вредности атмосферског притиска и температуре. Овај ефекат се не може ублажити коришћењем неке од комбинација података опажања, дакле адекватни модели се

примењују као а priori вредности а параметри тропосферске рефракције се оцењују током GPS позиционирања према једначини 6.10.

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (6.10)$$

која садржи следеће чланове: ZTD (Zenith Total Delay), ZHD (Zenith Hydrostatic Delay) и ZWD (Zenith Wet Delay). Сува компонента или хидростатички део има спору временску варијацију тако да је она је моделирана и коришћена као а priori вредност док се влажна компонента или ZWD оцењује у поступку оцене параметра. Најчешће коришћени модели за ZHD компоненту су ECMWF или GPT (Global Pressure Temperature), Boehm et al., 2006.

Тропосферско хидростатичко кашњење износи $\approx 2.3\text{m}$, док влажна компонента кашњења изазива $\approx 10\text{-}150\text{ mm}$ грешку мерења дужине у правцу зенита. За висине сателита мање од 10° грешка простирања може достићи вредности веће 10m док су за елевације мање од 3° могућа кашњења до 50 m , Seeber 2003.

6.4.5 Вишелинијске путање сигнала

Појава вишелинијских путања се јавља када сигнал који емитује сателит стигне до пријемника пошто је прешао путању која није директна путања, а нарочито после рефлексije од блиске препреке. Зависи искључиво од окружења пријемника и утиче на различит начин на фазна и кодна мерења псеудодужина.

Члан M_{Fm}^j моделске једначине псеудодужина (6.3) означава кашњење придружено појави вишеструке путање за фазна и кодна мерења псеудодужина за сателит j и пријемник m . Феномен вишеструких путања има за последицу модификацију вредности кодних псеудодужина које се мере помоћу пријемника. Вишеструке путање такође утичу на фазна мерења, тако да је максимална грешка мерења фазе $\frac{1}{4}$ циклуса што одговара грешци геометријске дужине која је мања од 5 cm на таласу L1 GPS система, Teunisen and Kleusberg, 1998.

6.4.6 Периодични релативистички утицај

Гравитациона закривљеност Земље утиче на простирање GPS сигнала. Овај релативистички ефекат, назван феномен релативитета код дужина изражава се следећом једначином, Hofmann-Welnhof, 1997:

$$r_m^j = (1 + \gamma) \frac{\mu}{c^2} \ln \left(\frac{r^j + r_m + \rho_m^j}{r^j + r_m - \rho_m^j} \right) \quad (6.11)$$

где чланови означавају следеће параметре:

- γ - релативистички параметар ($\gamma = 1$),
- μ - универзална гравитациона константа,
- c - брзина светлости,
- ρ_m^j - геометријска дужина између сателита j у моменту t^j емисије сигнала и пријемника m у тренутку пријема t_m сигнала ,
- r^j - геометријска дужина између сателита j у тренутку t^j и центра масе Земље,

r_m - геометријска дужина између пријемника m у тренутку t_m и центра масе Земље.

Према Hofmann-Welenhof, 1997, максимална вредност добијена овом једначином износи 18.7 mm.

6.4.7 Мерни шум

Изворе случајних грешака у GPS кодним и фазним мерењима представљају пре свега процеси у електронским склоповима пријемника и појава вишеструке рефлексije сигнала. Њихово дејство има за последицу случајне грешке мерења које се означавају као компоненте такозваног мерног шума. Поред њих, у састав мерног шума улазе и немоделирани систематски утицаји, као и непознате резидуалне грешке преостале након непотпуне елиминације или редукције систематских утицаја. У моделским једначинама псеудодужина мерни шум је означен чланом ω_{Fm}^j .

Иако не постоји општи математички модел којим би се одредио или прогнозирао ефекат вишеструке рефлексije на резултате релативног позиционирања, најједноставнији начин ипак представља пажљиви избор локације за станицу, уз употребу савремених антена са заштитницима од рефлексije и пријемника који имају могућност додатне интерне филтрације сигнала. Истим поступцима у великој мери се отклања и шум који настаје интерференцијом GPS таласа са електромагнетним таласима неког другог извора радио зрачења као што су релеји, радари или високонпонски водови.

Релативно комплексна електронска структура пријемника представља извор многобројних случајних грешака мерења као што су термички шум, грешка услед нестабилности локалног осцилатора, интеракција и интерференција сигнала при проласку кроз различите канале радио фреквентне секције, или непрецизност аналогно дигиталних претварача. Дизајном савремених пријемника већина наведених случајних грешака може се сматрати безначајним, тако да прецизност фазних и кодних мерења пре свега зависи од квалитета електронских уређаја за праћење сигнала. Прецизност компоненти којима се врше кодна и фазна мерења (DLL и PLL петље), може се изразити следећим формулама, Langley, 1996:

$$\sigma_{DLL} = \lambda_C \sqrt{\frac{\alpha B_C}{c/n_0}}$$

$$\sigma_{PLL} = \frac{\lambda_P}{2\pi} \sqrt{\frac{B_P}{c/n_0}}$$
(6.12)

При чему чланови једначина означавају следеће:

- α - бездимензионални фактор (1 или 0.5) чија вредност зависи од конкретне електронске имплементације корелатора,
- B_C, B_P - фреквентни опсег шума DLL и PLL уређаја,
- λ_C, λ_P - таласне дужине кодне модулације и носећих таласа,
- c/n_0 - реперезент односа јачине сигнала и јачине шума.

Коришћењем стандардних вредности ових параметара за прецизност мерења C/A и P кодних псеудодужина добија се око 1 m и 10 cm респективно, с тим што савремена

корелаторска техника данас омогућује готово двоструко већу тачност. Прецизност мерења фазних псеудодужина на првој фреквенцији износи око 0.2 mm, док та вредност за другу фреквенцију зависи од начина праћења сигнала.

6.5 Моделске једначине кодних и фазних псеудодужина

Основна једначина опажања кодних мерења на станици m према сателиту j изражава се следећом једначином, Seeber, 2003:

$$P_{Fm}^j = \rho_{Fm}^j - c_0 \delta t_m + c_0 \delta t^j + I_{Fm}^j + T_{Fm}^j + \delta_{Fm}^P + \varepsilon_{Fm}^P \quad (6.13)$$

Опажање P на левој страни једначине изражено је у метрима и једнако је геометријском растојању између сателита у време емисије и пријемника у време пријема сигнала кориговано додатним чланом. Индекс F означава фреквенцију носећег таласа. На десној страни први члан ρ_{Fm}^j је чисто геометријско растојање између пријемника и сателита. Чланови корекције времена часовника (δt_m и δt^j) се множе са брзином светлости c_0 . Поред тога, чланови I_{Fm}^j и T_{Fm}^j означавају јоносферске и тропосферске ефекте. Члан δ_{Fm}^P представља кодне биасе (изворе грешака) и ε_{Fm}^P означава преостале грешке.

Кодови којима су модулисани носећи таласи омогућују да се у пријемнику директно мери време пута сигнала. Основни модел извршеног кодног мерења Δt_{Fm}^j има следећи облик:

$$\Delta t_{Fm}^j(t_i) = \tau(t_m, t^j) - \delta_m(t_i) + \delta^j(t^j) + \varepsilon_m^j(t_i) \quad (6.14)$$

све величине односе на јединствену, унапред планирану епоху мерења t_i у систему GPS времена, $\delta_m(t_i)$ представља одступање часовника пријемника од GPS времена у епохи t_i , док је $\tau(t_m, t^j)$ време пута сигнала од сателита до пријемника које је функција тренутака емитовања и пријема. Захваљујући високој стабилности осцилатора, одступање часовника сателита у тренутку емитовања $\delta^j(t^j)$ практично се може заменити одступањем у програмираном тренутку $\delta^j(t_i)$. Када се поред тога време пута τ поново развије у Тејлоров ред у околини програмиране епохе мерења, добија се:

$$\Delta t_{Fm}^j(t_i) = \tau(t_i) - \delta_m(t_i)(1 - \dot{\tau}(t_i)) + \delta^j(t_i) + \varepsilon_m^j(t_i) \quad (6.15)$$

Потпуна моделска једначина кодних псеудодужина у линеарним јединицама подразумева множење кодних мерења брзином електромагнетних таласа у вакууму c_0 и проширењем модела инструменталним, атмосферским и релативистичким утицајима (једначина 6.3).

Основна једначина опажања фазних мерења на станици m према сателиту j изражава се следећом једначином, Seeber, 2003:

$$\lambda_F \phi_{Fm}^j = \rho_{Fm}^j - c_0 \delta t_m + c_0 \delta t^j - I_{Fm}^j + T_{Fm}^j + \lambda_F N_{Fm}^j + \omega_{Fm}^j + \delta_{Fm}^\phi + \varepsilon_{Fm}^\phi \quad (6.16)$$

Мерење $\lambda_F \phi_{Fm}^j$ на левој страни изражено је метрима, λ_F је таласна дужина носећег таласа. Јоносферски ефекат утиче на кодно мерење са кашњењем док је фазно

мерење иде испред у односу на стварну геометријску удаљеност, тако да члан јоносферског ефекта има различите предзнаке у једначинама *** и ***. Члан N_{Fm}^j означава фазну неодређеност, ω_{Fm}^j фазни остатак, δ_{Fm}^ϕ представља фазне биасе (изворе грешака) и ε_{Fm}^ϕ представља преостале грешке. Све остале ознаке су исте као у једначини 6.3.

Имајући у виду да се фазно мерење састоји од упоређења две фазе, као и чињеницу да су фазе инваријанте у односу на Лоренцове трансформације, мерење извршено у пријемнику може се представити у облику следеће једначине, Seeber, 2003:

$$\psi_{Fm}^j(t_i) = \phi_{Fm}(t_m) - \phi_F^j(t^j) + N_{Fm}^j + \varepsilon_{Fm}^j(t_i) \quad (6.17)$$

где употребљене ознаке имају следећа значења:

- t_i - планирана епоха мерења у систему GPS времена,
- $\psi_{Fm}^j(t_i)$ - фазно мерење (у фазним циклусима), при чему је m индекс пријемника, j индекс сателита и F индекс фреквенције,
- $\phi_{Fm}(t_m)$ - фаза осцилатора пријемника у тренутку пријема сигнала t_m (очитавање часовника пријемника),
- $\phi_F^j(t^j)$ - фаза осцилатора сателита у тренутку емитовања сигнала t^j (очитавање часовника сателита),
- N_{Fm}^j - непознати цели број фазних циклуса или такозвана фазна неодређеност,
- $\varepsilon_{Fm}^j(t_i)$ - случајна грешка извршеног фазног мерења (мерни шум).

Уз одговарајуће апроксимације добија се основна моделска једначина фазних мерења у којој се све величине односе на исти тренутак времена:

$$\psi_{Fm}^j(t_i) = f_F \tau(t_i) - f_F \delta_m(t_i) (1 - \dot{\tau}(t_i)) + f_F \delta^j(t_i) + N_{Fm}^j + \varepsilon_{Fm}^j(t_i) \quad (6.18)$$

Формулација потпуне моделске једначине фазних псеудодужина у линеарним јединицама постиже се множењем фазних мерења одговарајућом таласном дужином λ_F и проширењем модела орбиталним, инструменталним, атмосферским и релативистичким утицајима (једначина 6.4).

По структури функционални модели кодних и фазних псеудодужина су веома слични. Разлика се пре свега односи на супротан предзнак члана који описује утицај јоносферске рефракције I_{Fm}^j и на чињеницу да су кодна мерења једнозначна, због чега не садрже члан са целим бројем таласних дужина $\lambda_F N_{Fm}^j$.

6.5.1 Модели разлика мерења псеудодужина

Формирање разлика извршених мерења врши се у циљу елиминисања или редуковања утицаја одређених извора грешака. Саме разлике могу се формирати на основу мерења која се односе на два пријемника, два сателита или две временске епохе а добијају се коришћењем оператора Δ , ∇ и δ респективно, Wells et al., 1986. Принцип формирања разлика подједнако важи како за оригиналне псеудодужине, тако и за њихове двофреквентне линеарне комбинације.

Просте разлике

Разлика фазних псеудодужина измерених са два пријемника m и n до истог сателита j назива се простом разликом интерферометријског типа:

$$\Delta L_{Fmn}^j(t_i) = \Delta L_{Fm}^j(t_i) - \Delta L_{Fn}^j(t_i) \quad (6.19)$$

Проста разлика није оптерећена утицајима који се односе на сателитски часовник, кашњење сигнала при проласку кроз хардвер сателита и периодичне релативистичке ефекте. Јоносферски и тропосферски утицаји просторно су корелисани, због чега им је у простој разлици интензитет знатно редукован. То, међутим, није случај са вишеструком рефлексijом сигнала и кашњењем сигнала при проласку кроз хардвер пријемника, јер је интензитет ових утицаја специфичан за сваку локацију односно пријемник. Доминантан утицај грешака часовника пријемника у простој разлици састоји се у члану који садржи брзину електромагнетних таласа. Чланови са брзинама промена растојања мањи су по интензитету од доминантног више од $3 \cdot 10^5$ пута. Појава новог члана P представља утицај грешке координата прве станице које се у поступку обраде узимају као познате.

Уколико се одузимају фазне псеудодужине измерене од истог пријемника до два сателита j и k , добија се проста разлика доплерског типа:

$$\nabla L_{Fm}^{jk}(t_i) = L_{Fm}^j(t_i) - L_{Fm}^k(t_i) \quad (6.20)$$

У овој простој разлици елиминисан је доминантни члан који се односи на одступање часовника пријемника. Редукција утицаја јоносфере и тропосфере није тако изражена као у простим разликама интерферометријског типа, док је интензитет вишеструке рефлексije сигнала приближно истог реда величине. Присуство грешака часовника пријемника и сателита захтева додатно моделирање, због чега се просте разлике користе за анализу мерног материјала, али не и за потребе геодетског позиционирања.

Двоструке разлике

Двоструке разлике формирају се одузимањем простих интерферометријских разлика које се односе на два сателита, односно простих доплерских разлика које се односе на два пријемника:

$$\Delta \nabla L_{Fm}^{jk}(t_i) = \Delta L_{Fmn}^j(t_i) - \Delta L_{Fmn}^k(t_i) = \nabla L_{Fm}^{jk}(t_i) - \nabla L_{Fn}^{jk}(t_i) \quad (6.30)$$

У двоструким разликама елиминисани су доминантни чланови који се односе на одступања часовника пријемника, као и на кашњења сигнала при проласку кроз хардвер пријемника. Интензитет осталих утицаја, са изузетком вишеструке рефлексije, додатно је редукован у поређењу са простим разликама, што двоструке разлике чини најпогоднијим мерним величинама за потребе геодетског позиционирања.

Троструке разлике

Троструком разликом назива се разлика двоструких разлика које се односе на две узастопне епохе:

$$\delta\Delta\nabla L_{Fm}^{jk}(t_i) = \Delta\nabla L_{Fmn}^{jk}(t_{i+1}) - \Delta\nabla L_{Fmn}^{jk}(t_i) \quad (6.31)$$

Епоха мерења која се придружује трострукој разлици ствар је само погодности у нотацији, јер се трострука разлика иначе односи на временски интервал $[t_i, t_{i+1}]$.

У троструким разликама практично су присутни исти утицаји као и у двоструким разликама. Важан изузетак односи се на фазну неодређеност која је константна током времена, тако да се елиминише приликом формирања троструких разлика. Уколико током мерења дође до појаве фазног скока или прекида пријема сигнала, грешка ће оптеретити само једну троструку разлику, док ће иста ситуација узроковати константну грешку за све наредне двоструке разлике. Ова особина чини троструке разлике погодним величинама за претходну анализу мерног материјала, али се због знатно ниже тачности не користе за потребе геодетског позиционирања.

6.5.2 Стохастички модел мерења псеудодужина

Стохастичка својстава GPS мерења и импликације употребе различитих схема моделирања њихових релативних односа су предмет истраживања више аутора (на пример Koch, 1988; Grafarend, 2000; Dermanis, 2010 и др.). Од избора стохастичког модела зависе у одређеној мери дефинитивни резултати оцењивања, али оно што је кључно је реално обухватање и вредновање различитих фактора тачности што умногоме опредељује поузданост у откривању фазних скокова и решавању фазних неодређености. Истраживања су пре свега усмерена на стохастичко моделирање GPS фазних мерења јер се код обраде података у прецизним геодетским применама кодне псеудодужине углавном користе само као помоћне величине.

Код формулације стохастичког модела оригинално мерених фазних и кодних псеудодужина усвајају се следеће емпиријски потврђене полазне претпоставке:

- Фазне и кодне псеудодужине на обе фреквенције L_1, L_2, P_1 и P_2 усвајају се као међусобно независне, јер температура околине као и други параметри електронских склопова пријемника у којој се симултано врше мерења узрокује занемарљиво малу физичку корелацију.

- Мерни шум фазних и кодних псеудодужина састављен је од немоделираних и случајних резидуалних компоненти, случајне грешке услед вишеструке рефлексije сигнала и случајне грешке мерења електронских уређаја за праћење сигнала. Када су на неки од начина обухваћени систематски утицаји, немоделиране и случајне резидуалне компоненте односиће се пре свега на јоносферске и тропосферске ефекте.

- За различита зенитна одстојања GPS сателита сигнали прелазе различите путеве кроз Земљин атмосферски појас од чега у општем случају зависи интензитет резидуалних јоносферских и тропосферских утицаја. Значи да је тачност измерених фазних и кодних псеудодужина у функцији висине сателита изнад хоризонта.

- Јачина GPS сигнала зависи од дужине пута кроз Земљину атмосферу а тиме посредно и од сателитског зенитног одстојања. Тачност праћења PLL и DLL петљи је функција јачине сигнала односно SNR односа.

Према томе, варијанса фазних и кодних мерења има следећу структуру:

$$\sigma^2 = \sigma_A^2 + \sigma_M^2 + \sigma_\varepsilon^2 \quad (6.32)$$

у којој је σ_A стандард мерења псеудодужине због случајних резидуалних атмосферских варијација, σ_M стандард због случајног утицаја вишеструке рефлексије, а σ_ε стандард због случајних грешака праћења сигнала. Варијанса је осим тога функција параметра p који може бити зенитно одстојање сателита или однос сигнала и шума SNR :

$$\sigma^2 = \sigma^2(p) \quad (6.33)$$

Најчешћи коришћени модели варијансе мерења су у функцији висине сателита над хоризонтом α . С обзиром на уједначеност квалитета сигнала сателита чија је висина већа од граничне вредности α_0 , за модел варијансе се користи степ функција облика:

$$\sigma^2(\alpha) = \begin{cases} \sigma^2 & \alpha > \alpha_0 \\ \sigma^2(\alpha) & \alpha \leq \alpha_0 \end{cases} \quad (6.34)$$

Имајући у виду тачност праћења сигнала DLL и PLL петљама, општи облик модела варијансе мерења у функцији SNR вредности се описује следећим односима:

$$\begin{aligned} \sigma^2(SNR) &= c_6/SNR \\ \sigma^2(SNR) &= c_7 + c_8 \cdot 10^{-SNR/10} \end{aligned} \quad (6.35)$$

Предност ових модела је пре свега у могућности коришћења реалних показатеља квалитета актуелних мерења јер савремени пријемници региструју вредности односа сигнала и шума.

Експериментално је утврђено да мерења псеудодужина истим пријемником до истог сателита нису независна током времена и да је степен физичке корелације тим већи што су мерења временски мање раздвојена, Rabbany, 1994. Модел коефицијента корелације r у функцији временске разлике мерења τ гласи:

$$r(t_i, t_i + \tau) = r(\tau) = e^{-\tau/T} \quad (6.36)$$

при чему је T корелационо време са типичном вредношћу између 250 s и 350 s. Пошто је интервал регистрације података при GPS мерењима константан и износи τ_0 , коефицијент корелације између мерења која су временски раздвојена за $k\tau_0$, при чему је k цео број, биће:

$$r(k\tau_0) = e^{-k\tau_0/T} = r(\tau_0)^k \quad (6.37)$$

Узрок временске корелације псеудодужина је највише временска корелација резидуалних атмосферских утицаја, који након елиминације укупног ефекта још увек у одређеној мери имају систематски карактер. Слично важи и за псеудодужине мерене истим пријемником ка различитим сателитима и псеудодужине мерене са више пријемника ка једном или више сателита.

Ако је $\mathbf{l}_{i,k}$ вектор мерења пријемника i према свим сателитима у епохи k , тада ће његова коваријациона матрица бити:

$$\mathbf{C}_{i,k} = \text{diag} [\sigma_{i,j,k}^2(p_{j,k})]_{m \times m} \quad (6.38)$$

при чему је j индекс сателита, m укупан број сателита у епохи k , а $p_{j,k}$ означава параметар специфичан за сателит и епоху, од којег зависи тачност мерења. Матрица \mathbf{C} је дијагонална због претпоставке о независности мерења једног пријемника према различитим сателитима у истој епохи. С друге стране, коваријациона матрица која изражава међусобну корелацију вектора мерења из епоха k и l има облик:

$$\mathbf{C}_{i,kl} = \text{diag} [r_{kl} \cdot \sigma_{i,j,k}^2(p_{j,k}) \cdot \sigma_{i,j,l}(p_{j,l})]_{m \times m} \quad (6.39)$$

где је r_{kl} одговарајући коефицијент корелације. Вектор \mathbf{l}_k компонован од вектора мерења у истој епохи али од свих n пријемника може да се напише као:

$$\mathbf{l}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{1,k} \\ \dots \\ \mathbf{l}_{n,k} \end{bmatrix}_{(n \cdot m) \times 1} = \mathbf{1}_{n \times 1} \otimes \mathbf{l}_{i,k} \quad (6.40)$$

са n -димензионалним вектором $\mathbf{1}$ чији су чланови јединице и симболичком ознаком \otimes за Кронекеров производ две матрице.

Коначно, комплетни вектор мерења \mathbf{l}_0 свих пријемника до свих сателита у свих q епоха, као и његова коваријациона матрица, могу се изразити у матричном облику:

$$\mathbf{l}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_1 \\ \dots \\ \mathbf{l}_q \end{bmatrix} = \mathbf{1}_{q \times 1} \otimes \mathbf{l}_k \quad (6.41)$$

$$\mathbf{C}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} & \dots & \mathbf{C}_{1q} \\ & \mathbf{C}_{21} & \dots & \mathbf{C}_{2q} \\ & & \dots & \dots \\ & & & \mathbf{C}_{qq} \end{bmatrix} = \mathbf{1}_{q \times q} \otimes \mathbf{C}_{kl} \quad (6.42)$$

где је $\mathbf{1}$ квадратна матрица чији су сви чланови једнаки јединици. Једначина 6.42 представља општи облик стохастичког модела оригиналних GPS мерења једног типа мерења (фазне или кодне псеудодужине на првој или другој фреквенцији). У реалним условима, подматрице хиперматрице \mathbf{C}_0 немају исте димензије јер се током мерења број сателита мења.

7 Реализација Терестричког Референтног Система Републике Србије

7.1 Математички модел CATREF софтвера решења

Терестричког Референтног Оквира

Центри за анализу просторних сателитских техника производе недељна решења и дневна решења (VLBI техника) положаја станица и параметара оријентације Земље (ЕОР). Дневни параметри ЕОР су координате пола и њихови изводи, универзално време UT1 и дужина дана LOD. Проширењем метода комбинације на кумулативне временске серије и параметре оријентације Земље могу се открити извори грешака и може се контролисати понашање сваке станице током времена. На тај начин се могу евидентирати нелинеарне варијације и дисконтинуитети у серијама положаја станица које настају због земљотреса, нестабилности станица и саме конструкције на којој је станица инсталирана, сезонских кретања, итд. Поред тога, са параметрима оријентације Земље обезбеђује се ригорозно поравнање ЕОР према коначном референтном оквиру. Почевши од ITRF2005, затим ITRF2008 и будућих ITRF решења, захваљујући овим предностима временских серија као улазним подацима, обезбеђена је и унапређена конзистентност између ITRF реализације и ЕОР параметара IERS.

CATREF софтвер (Combination and Analysis of Terrestrial Reference Frames) је развијен од стране Лабораторије за Геодезију (LAREG) Француског Института за Географију и Шумарство (IGN) за потребе глобалног решења ITRF комбинације обезбеђујући дугорочне оцене положаја и брзина станица, Altamimi et al., 2002; 2007. По методи најмањих квадрата комбинацијом временских серија координата тачака и параметара ЕОР долази се до ригорозног решења непознатих параметара комбинације. Општи модел за комбиновање више референтних оквира који се користи у софтверу CATREF је проширена Хелмертова трансформација и заснива на трансформацији сличности 14 Еуклидових параметара. Основни принцип ове комбинације је да се почев од сета индивидуалних решења изгради јединствено решење које је са сваким појединачним решењем повезано преко скупа од 14 параметара трансформације. Под претпоставком да је за свако индивидуално решење s и сваку тачку i оцењен положај тачке X_s^i у епохи времена t_s^i и брзина положаја тачке \dot{X}_s^i , изражених у TRF k , решење комбинације се састоји од оцењивања следећих вредности:

1. Положаја тачака X_c^i у датој епохи t_0 и брзина положаја тачака \dot{X}_c^i изражених у решењу комбинованог оквира c ;

2. Трансформационих параметара T_k у епохи t_k и њихових брзина \dot{T}_k за сваки индивидуални оквир k у односу на комбиновани Референтни оквир TRF.

Општи модел комбинације положаја и брзина станица изражава се следећим једначинама:

$$\begin{aligned} X_s^i &= X_c^i + (t_s^i - t_0) \dot{X}_c^i + T_k + D_k X_c^i + R_k X_c^i \\ &+ (t_s^i - t_k) [\dot{T}_k + \dot{D}_k X_c^i + \dot{R}_k X_c^i] \end{aligned} \quad (7.1)$$

$$\dot{X}_s^i = \dot{X}_c^i + \dot{T}_k + \dot{D}_k X_c^i + \dot{R}_k X_c^i$$

где је за сваки индивидуални оквир k који је имплицитно дефинисан индивидуалним решењем s , D_k је фактор размере, T_k је вектор транслације и R_k означава матрицу ротације. Чланови са тачком у једначини (7.1) означавају изводе одговарајућих параметара по времену. Вектор транслације T_k се састоји од три компоненте почетка T_x, T_y, T_z а матрица ротације од три параметра ротације R_x, R_y, R_z по осама X, Y и Z . t_k је конвенционално изабрана епоха седам параметара трансформације.

Увођењем параметара оријентације Земље (ЕОР) у модел CATREF комбинације добијају се једначине у којима фигуришу координате пола x_s^p, y_s^p, UT Универзално време и дневне брзине ових параметара означене као \dot{x}_s^p, \dot{y}_s^p и LOD_s :

$$\begin{aligned} x_s^p &= x^p + R2_k \\ y_s^p &= y^p + R1_k \\ UT_s &= UT - \frac{1}{f} R3_k \\ \dot{x}_s^p &= \dot{x}^p + \dot{R}2_k \\ \dot{y}_s^p &= \dot{y}^p + \dot{R}1_k \\ LOD_s &= LOD + \frac{\Lambda_0}{f} \dot{R}3_k \end{aligned} \quad (7.2)$$

при чему је $f = 1.002737909350795$ фактор конверзије између универзалног времена и звезданог времена. Веза између LOD и UT се изражава интегралом $LOD = \int_t^{t+\Lambda_0} dUT$, под претпоставком да је $\frac{dUT}{dt}$ константно у интервалу $[t, t + \Lambda_0]$, добија се вредност $LOD = -\Lambda_0 \frac{dUT}{dt}$ и може се видети да је Λ_0 хомогено са dt где је $\Lambda_0 = 1$ на дневној основи. Веза између параметара ЕОР и Референтног оквира је обезбеђена преко три угла ротације R_1, R_2, R_3 и њихових временских извода $\dot{R}_1, \dot{R}_2, \dot{R}_3$. У случају да постоји неки извор грешке (биас) у дефинисању и успостављању комбинованог Референтног оквира онда ће тај извор утицати на саме вредности параметара ЕОР па је стога неопходно да се обезбеди стабилност оријентације Референтног оквира у времену.

7.2 Дефиниција датума Терестричког Референтног Оквира на основу временских серија координата

Дефиниција датума Терестричког Референтног Оквира (TRF) се заснива на принципу примене следећа два услова:

1. Дефиниција Референтног оквира у одређеној временској епохи t_0 која је генерално централна епоха временских серија (теоријски се може усвојити било која епоха);
2. Дефиниција или примена закона линеарне (секуларне) временске еволуције Референтног оквира.

Дефиниција датума са ова два услова у оцени параметара по методи најмањих квадрата подразумева 14 степени слободe што одговара броју Еуклидових параметара трансформације. Овим приступом померања станица се моделирају као линеарна тако да се за станице које показују дисконтинуитете у временским серијама положаја врши више моделирања по деловима која се затим узимају у рачунање. Осим тога, део нелинеарног кретања станица (сезонска годишња или полугодишња кретања) се анализира преко резидуала временских серија положаја. Матрица нормалних једначина модела комбинације је сингуларна, односно има дефект ранга 14, што одговара броју параметара неопходних за дефинисање комбинованог Референтног оквира. За отклањање дефекта ранга матрице у моделу SATREF комбинације постоји неколико метода а најчешће се примењују следеће две методе: метод са применом минималних услова (Minimum Constraints, MC) и метод којим се примењују унутрашњи услови за параметре трансформације временских серија код оцене кумулативног решења (Internal Constraints, IC), Altamimi et al., 2007.

7.2.1. Дефиниција датума Терестричког Референтног Оквира једначинама Минималних услова

За реализацију терестричког референтног система, имплицитно или експлицитно, потребно је усвојити 7 параметара датума и то 3 компоненте транслације, један фактор размере и 3 угла ротације као и 7 параметара њихових временских извода. Код комбиновања индивидуалних недељних решења у SATREF софтверу, референтни оквир се дефинише специфицирањем 14 параметара потребних за дефиницију датума ITRF оквира. Матрица система нормалних једначина индивидуалних решења је сингуларна, односно има недостатак ранга 14 што је једнако броју параметара дефиниције датума. Дакле, усвајањем ових 14 параметара дефинише се почетак, размера, оријентација ITRF и временске еволуције параметара ITRF.

Центар масе Земље се описује положајем у телу Земље на који се односе орбите динамичких техника SLR, GPS и DORIS. Међутим, центар масе Земље се налази под утицајем различитих геодинамичких процеса узрокованих прерасподелом маса у унутрашњости Земље и површинских слојева што узрокује варијације положаја центра масе у односу на површину Земље. Другим речима, геоцентрично кретање станица узроковано овим ефектима познато као тзв. кретање геоцентра (енг. geocenter motion) вероватно је да садржи периодичне и секуларне компоненте. Већина центара за анализу сателитских техника ефекат кретања геоцентра не укључује експлицитно у математичким моделима, Ray, 1999. Тако да почетак коначног ITRF коинцидира са положајем центра масе који је добијен осредњавањем за временски период коришћених опажања.

Приликом генерисања ITRF могу бити усвојене различите опције за експлицитно специфицирање 14 параметара датума. Док се седам параметара бира у датој епохи, избор параметара брзине транслације и брзине размере зависи од значајности релативних брзина појединачних TRF који су укључени у комбинацију. Брзине транслације између сателитских TRF оквира у великој мери зависе од конфигурације мреже, орбите и коришћених опажања а такође могу бити и под утицајем секуларних кретања геоцентра. Брзина размере је под утицајем вертикалних кретања станица и модела тропосфере као и ефеката специфичних за

сваку технику, нпр. ефекти у вези антена код VLBI, GPS и DORIS технике и извори грешака који долазе у вези са станицама код SLR технике. Брзина оријентације се може произвољно изабрати, али би требало да има геофизичко значење због тектонских кретања плоча.

Према томе, ITRF треба да узме у обзир кретања и деформације Земљине коре будући да се станице просторних геодетских опажања налазе управо на кори која трпи деформације. Поред тога, како просторне геодетске технике користе позиције и/или кретања свемирских објеката, (сателити и екстра галактички радио извори) природно је да треба обезбедити конзистентност између Небеског референтног оквира (CRF), TRF и EOP (који повезују два оквира) за сваку индивидуалну реализацију TRS. Такође, ITRF као један од IERS глобалних референтних оквира, потребно је да буде конзистентан са ICRF и серијама параметара EOP.

Основне једначине теорије ротације Земље подразумевају координатни систем у коме било које кретање или деформација Земље не утиче на укупни угловни моменат тог система, Kovalevsky et al., 1989. Да би се постигао овај циљ, опште прихваћен приступ је примена Тисерановог система средњих оса које су дефинисане са минималном кинетичком енергијом, односно:

$$T = \frac{1}{2} \int_C V^2 dm \quad (7.3)$$

при чему је dm елемент масе и V његова брзина. Интуитивни избор домена интеграла C је Земљина кора на којој се налазе геодетске опажачке станице па су у њиховим опажањима садржани сви сигнали кретања и деформација коре. Један од циљева дефинисања минималне кинетичке енергије T на кори је да се минимизира глобално кретање коре које би могло утицати на параметре EOP. Свакако, дубљи геодинамички процеси као што су конвекција коре и процеси на граници језгро-кора ће и даље утицати на ротацију Земље. Решење интеграла (7.3) минималне кинетичке енергије T састоји се од два интеграла линеарног (p) и угловног момента (h) са вредностима једнаким нули, Kovalevsky et al., 1989:

$$p = \int_C V dm = 0 \quad (7.4)$$

$$h = \int_C X \times V dm = 0 \quad (7.5)$$

при чему је X вектор положаја јединичне масе dm . Једначине (7.4) и (7.5) теоретски дефинишу брзину translације и брзину ротације TRF. Иако у овом приступу није разматрана, брзина размере је сразмерна оцењеној физичкој вредности на основу опажања просторних геодетских техника.

С обзиром на чињеницу да се из опажања сателитских техника добија оцена кретања геоцентра при чему се полажаји станица односе на центар масе као природни почетак TRF, једначина (7.4) се неће даље разматрати. Једначином (7.5) се дефинише услов не ротирања Земљине коре или енг. No-Net-Rotation, NNR. За строгу примену једначине (7.5) захтева се познавање густине и дебљине Земљине коре која просторно варира нарочито између океана и континената. Такође да би се одредила вредност интеграла (7.5) користи се сума за одређен број опажачких станица или тектонских плоча које представљају литосферу. Избор било које могућности, или станице или плоче, доводи до различите имплементације NNR

услова. За примену NNR услова над опажањим станицама потребан је пажљив избор, односно обухваћене станице треба да задовољавају минималне критеријуме, као што је да имају довољно дуг опажачки период (минимално 2.5 године) и да буду оптимално дистрибуиране преко целе Земљине површине. Осим тога, овим приступом решење једначине (7.5) захтева објективан избор или разграничење сваког елемента области повезаног са сваком станицом која репрезентује своје геофизичко окружење.

14 параметара датума треба разумети као релативне вредности које омогућавају трансформацију положаја и брзина станица из једног TRF у други TRF. Ако се са X означе вектори положаја и брзина станица два референтна оквира, једначина трансформације се изражава у матричном облику као:

$$X_2 = X_1 + A \cdot \theta \quad (7.6)$$

при чему је: $\theta = (T_1 \ T_2 \ T_3 \ D \ R_1 \ R_2 \ R_3 \ \dot{T}_1 \ \dot{T}_2 \ \dot{T}_3 \ \dot{D} \ \dot{R}_1 \ \dot{R}_2 \ \dot{R}_3)^T$ вектор 14 трансформационих параметара, A дизајн матрица парцијалних извода за елементе вектора X_1 или X_2 са приближним вредностима положаја станица (X_{0i}) , $1 < i < n$, n - број станица:

$$A = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & 0 & 0 & x_0^i & 0 & z_0^i & -y_0^i & & & & & & & \\ 0 & 1 & 0 & y_0^i & -z_0^i & 0 & x_0^i & & & 0 & & & & \\ 0 & 0 & 1 & z_0^i & y_0^i & -x_0^i & 0 & & & & & & & \\ & & & \approx 0 & & & & 1 & 0 & 0 & x_0^i & 0 & z_0^i & -y_0^i \\ & & & & & & & 0 & 1 & 0 & y_0^i & -z_0^i & 0 & x_0^i \\ & & & & & & & 0 & 0 & 1 & z_0^i & y_0^i & -x_0^i & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \quad (7.7)$$

Претпоставља се да се дато TRF решење s , одређено на основу опажања сателитске GPS технике системом нормалних једначина редукованих на положаје (и брзине) станица, може изразити у следећем матричном облику:

$$N_s \cdot \Delta X_s = K_s \quad (7.8)$$

при чему је N_s матрица нормалних једначина, ΔX_s вектор линеаризованих непознатих величина (тако да је $X_s = X_0 + \Delta X_s$, X_s оцењено решење), и K_s вектор константних чланова. Да би резултујући TRF био дефинисан потребно је додати одговарајуће условне једначине при формирању нормалних једначина. За добијање математичког решења нормалних једначина, потребно је отклонити недостатак ранга сингуларне нормалне матрице додавањем условних једначина којима кореспонирају параметри дефиниције датума који су инваријантни у опажањима. Дефиниција и реализација референтних система и проблем недостатка ранга разматрани су од стране више аутора, нпр. Dermanis, 2000. Код свих сателитских техника потребно је додавање 6 псеудо једначина опажања (једначина услова) које одговарају угловима ротације и њиховим временским изводима. Код VLBI технике потребно је 9 додатних једначина за дефинисање 3 компоненте почетка TRF и њихових временских извода и 3 компоненте CRF оријентације.

Најчешће се примењују следећа два типа услова помоћу којих се може остварити инверзија система нормалних једначина (7.8):

- Класични услови који се у општем случају примењују над једним делом станица где се додате условне једначине изражавају у облику $X_S = X_0$. Код овог типа услова омогућена је инверзија система нормалних једначина али постоји могућност појаве дисторзије у резултујућем TRF решењу X_S и његовим варијансама.
- Минимални услови који омогућавају комплетирање недостатка ранга матрице нормалних једначина N_S , што у ствари подразумева само параметре који недостају да би се дефинисао датум оквира.

Принцип Минималних услова представља тзв. "природни" начин за реализацију TRF над селектованим скупом станица референтног оквира као стандард оквира, што је у садашњем тренутку референтни оквир ITRF2008. Пионирски радови у области изравнања мрежа а посебно дела са једначинама Минималних услова припада аутору Vlaha (Vlaha, 1971).

Општи облик једначине Минималних услова је директно повезан са једначином (7.6), и један од начина за извођење услова је коришћење концепта пројекције. Једначином (7.6) се може описати проблем пројекције усвајајући као непознате величине векторе X_1 и θ и за опажања вектор X_2 . Класичан начин решења проблема је идентификовање $A \cdot \theta$ са компонентама X_2 ранга A , $(R(A))$ и X_1 са ортогоналном пројекцијом од A ($R(A)^\perp$), тако да је:

$$\mathbb{R}^{6n} = R(A)^\perp \oplus R(A) \quad (7.9)$$

У складу са сумом векторског простора \mathbb{R}^{6n} декомпозиција вектора X_2 је једнозначна, па ће се ортогоналном пројекцијом добити следеће једначине:

$$\begin{cases} A \theta = A (A^T P A)^{-1} A^T P X_2 \\ X_1 = (I - A (A^T P A)^{-1} A^T P) X_2 \end{cases} \quad (7.10)$$

при чему је I јединична матрица, P скаларни производ матрице \mathbb{R}^{6n} који се може бити изабран на следеће начине:

- $P = I$, јединичне тежине;
- P инверзно од матрице коваријансе X_2 ;
- P инверзно од матрице коваријансе X_2 редуковано на дијагоналне чланове.

Из прве једначине система (7.10) добија се решење за θ :

$$\theta = (A^T P A)^{-1} A^T P X_2 \quad (7.11)$$

Дакле, кључну улогу има примена члана $B_P = (A^T P A)^{-1} A^T P$ чиме је омогућена дефиниција датума у простору.

Код дефиниције TRF датума, X_S оцењено TRF решење дато сателитском техником, треба повезати са X_R специфичним TRF решењем које се узима као референтно решење. Због тога се веза између X_S и X_R може изразити једначином (7.6) при чему је вектор трансформационих параметара θ једнак нули. Према томе, коришћењем концепта ортогоналних пројекција, једначина Минималних услова има следећи облик:

$$B (X_S - X_R) = 0 \quad (7.12)$$

при чему је $B = (A^T A)^{-1} A^T$. Једноставним увођењем једначине Минималних услова (7.12) намеће се решење код кога су референтни оквири X_S и X_R идентични. Матрица P је једнака јединичној матрици са циљем избегавања сваког могућег утицаја које екстерно решење X_R може увести у оцењено решење X_S . На овај начин, применом принципа Минималних услова оцењено TRF решење добија своје пуно геометријско значење. Такође је $R(B) = R(A^T)$, тако да се уместо B може користити A^T али са нумеричке тачке гледишта, коришћењем матрице B обезбеђује се боља нумеричка стабилност него коришћењем матрице A^T . На крају, матрица A дата једначином (7.7) треба да буде редукована на број колона које одговарају параметрима датума који су неопходни за отклањање недостатка ранга система нормалних једначина (7.8).

Додавањем једначине Минималних услова систему нормалних једначина (7.8) са априори вредностима X_0 добиће се систем нормалних једначина у следећем облику:

$$(B^T \Sigma_\theta^{-1} B) \cdot \Delta X_S = (B^T \Sigma_\theta^{-1} B)(X_R - X_0) \quad (7.13)$$

при чему дијагонална матрица Σ_θ садржи мале варијансе 14 трансформационих параметара. Сабирањем једначина (7.8) и (7.13) добија се следећи систем нормалних једначина:

$$(N_S + B^T \Sigma_\theta^{-1} B)(\Delta X_S) = K_S + B^T \Sigma_\theta^{-1} B (X_R - X_0) \quad (7.14)$$

Због својства инваријантности увођење дијагоналне матрице Σ_θ као матрице тежина, која се може изабрати као јединична матрица, неће утицати на оцену ΔX_S , Dermanis, 2010. Оцењена варијанс/коваријанс матрица добиће се инверзијом једначине (7.14) у зависности од избора матрице тежина Σ_θ која има улогу дефинисања оквира од стране корисника. Другачије речено, додавањем $B^T \Sigma_\theta^{-1} B$ сингуларној нормалној матрици N_S омогућиће се њена инверзија чак и ако је $\Sigma_\theta = I$ и истовремено ће се дефинисати TRF са нивом тежина Σ_θ .

Ако је X_R референтно TRF решење иницијално изабрано као априори решење X_0 , једначина Минималних услова постаје једначина тзв. унутрашњих услова, енг. inner constraints, па једначина (7.13) добија следећи облик, Dermanis, 2010:

$$(B^T \Sigma_\theta^{-1} B)(\Delta X_S) = 0 \quad (7.15)$$

Сабирањем једначина (7.8) и (7.15) систем нормалних једначина са унутрашњим условима постаје:

$$(N_S + B^T \Sigma_\theta^{-1} B)(\Delta X_S) = K_S \quad (7.16)$$

Применом принципа Минималних услова за дефинисање датума терестричког референтног оквира остварују се следећи главни циљеви, Altamimi and Dermanis, 2009:

- "Најбоља" дефиниција датума TRF
- Унутрашња конзистентност TRF: нема дисторзије
- Очување актуелног квалитета просторних геодетских опажања

7.2.2. Дефиниција датума Терестричког Референтног Оквира једначинама Унутрашњих услова

Да би се сачувале особине унутрашњих физичких параметара, почетка и размере појединачних сателитских техника и размере VLBI технике, примењују се једначине услова за дефинисање коначног комбинованог референтног оквира без увођења неког екстерног оквира.

Једначина која повезује све параметре трансформације P_k референтног оквира k у епохи t_k модела комбинације, под претпоставком линеарне временске еволуције положаја станица и параметара трансформације, има следећи облик:

$$P_k(t_k) = P_k(t_0) + \dot{P}_k \times (t_k - t_0) \quad (7.17)$$

при чему је t_0 конвенционална референтна епоха коначног комбинованог оквира. У оквиру решења модела комбинације добијају се параметри трансформације између сваког појединачног недељног (или дневног) оквира k и дугорочног кумулативног решења. Постављањем одговарајућих минималних унутрашњих услова за параметре трансформације обезбедиће се дефинисање оквира дугорочног решења у референтној епохи t_0 и дефинисање временске еволуције референтног оквира.

Како се веза сваке временске серије трансформационих параметара између појединачног оквира k и кумулативног оквира описује једначином линеарне регресије, минимални услови се могу поставити на следећи начин:

$$\begin{aligned} P_k(t_0) &= 0 \\ \dot{P}_k &= 0 \end{aligned} \quad (7.18)$$

Увођењем условних једначина (7.18) у једначине модела комбинације (7.1) добиће се следеће две једначине:

$$\begin{aligned} \sum_{k \in K} P(t_k) &= 0 \\ \sum_{k \in K} \frac{P(t_k)}{t_k - t_0} &= 0 \end{aligned} \quad (7.19)$$

Једначине (7.19) комплетирају дефект ранга матрице нормалних једначина а истовремено дефинишу комбиновани Референтни оквир у референтној епохи t_0 и временску еволуцију референтног оквира. Увођењем минималних услова добија се независност физичких параметара референтног оквира од било каквих спољашњих информација а такође се доприноси и очувању временских варијација (нпр. сезонских) параметара трансформације. Временске серије резидуала положаја станица, које су независне од дефиниције Референтног оквира или референтног оквира у коме се изражава дугорочно решење потпуно су исте у оба приступа. Једина разлика између ова два метода ће бити параметри трансформације који су различити од нуле између два одговарајућа дугорочна решења у референтној епохи t_0 и њихових извода по времену што се оцењује преко класичне формуле са 14 параметара, Dermanis, 2000.

Овај метод може бити посматран као дефинисање физички природног референтног оквира ослобођеног од било каквих екстерних информација. Примењујући овај приступ, за физичке параметре почетак и размеру који су одређени сателитским техникама као и размеру одређену са VLBI техником, добијају се параметри нераздвојиви и својствени техникама преко којих су одређени. Због тога свака врста грешке у овим параметрима која би могла да настане због системских грешака одређене технике у сваком случају биће пренета у кумулативно дугорочно решење.

7.3 Реализација Терестричког Референтног Оквира ITRF у Републици Србији

Имплементација референтног система ITRS преко референтног оквира ITRF обухвата следећа три елемента, Dermanis, 2010:

- а) Усвајање модела општег облика $\mathbf{x}_i(t) = \mathbf{F}(\mathbf{a}_i, t)$ при чему су \mathbf{x}_i координате појединачних ITRF станица i изражених у функцији времена t преко сета параметара \mathbf{a}_i .
- б) Сетови доступних података сваке појединачне технике T у форми координата $\mathbf{x}_{T,i}(t_k)$ станица i у различитим “опажачким” епохама t_k , које одређују референтни систем S_T посебно за сваку технику T различите од референтног система S_{ITRF} коначних ITRF координата.
- в) Усвајање критеријума за добијање оптималног решења ITRF референтног оквира на основу датих за исте временске секвенцијалне облике ITRF мреже станица.

Општи модел комбинације CATREF софтвера који се користи за генерисање ITRF решења је описан у предходном поглављу као и у наведеној литератури (Altamimi et al. 2002b, 2007). Генерисање ITRF2008 решења изводи се преко два корака:

- 1) добијање дугорочног решења на основу индивидуалних временских серија координата посебно за сваку технику које садржи положаје станица у референтној епохи, брзине станица и дневне вредности параметара EOP;
- 2) комбиновање резултујућих дугорочних решења све четири технике заједно са локалним подацима за станице са више техника, енг. co-location sites.

Главне једначине модела са ознакама датим у предходном поглављу имају облик:

$$\begin{aligned} X_s^i &= X_c^i + (t_s^i - t_0)\dot{X}_c^i + T_k + D_k X_c^i + R_k X_c^i \\ &+ (t_s^i - t_k)[\dot{T}_k + \dot{D}_k X_c^i + \dot{R}_k X_c^i] \end{aligned} \quad (7.20)$$

$$\dot{X}_s^i = \dot{X}_c^i + \dot{T}_k + \dot{D}_k X_c^i + \dot{R}_k X_c^i$$

$$\begin{aligned} x_s^p &= x^p + R2_k \\ y_s^p &= y^p + R1_k \\ UT_s &= UT - \frac{1}{f} R3_k \\ \dot{x}_s^p &= \dot{x}^p + \dot{R}2_k \\ \dot{y}_s^p &= \dot{y}^p + \dot{R}1_k \\ LOD_s &= LOD + \frac{\Lambda_0}{f} \dot{R}3_k \end{aligned} \quad (7.21)$$

За добијање реализације терестричког референтног оквира ITRF2008 у Србији (ITRF2008_SRB_UoB), недељна решења координата станица и њихових варијанси перманентне GPS мреже Србије комбинована су у CATREF софтверу узимајући као референтни оквир Међународни терестрички референтни оквир ITRF2008 (<http://itrf.ensg.ign.fr/>). Резултати временских серија координата станица у SINEX формату добијени су процесирањем RINEX фајлова извршених мерења GPS техником. За имплементацију државног референтног система, реализацију и одржавање мреже перманентних станица глобалних навигационих сателитских система, процесирање GNSS података мерења и др. у Републици Србији надлежан је Републички геодетски завод Србије (РГЗ), Сектор за геодетске радове. Процесирање RINEX фајлова извршено је у Контролном GNSS центру Сектора за геодетске радове у софтверу Bernese v.5.0. Захваљујући доступности решења процесирања АГРОС мреже за потребе научних истраживања, недељна решења координата станица за временски период од децембра 2008. године до октобра 2012. године, односно укупно 202 серије, коришћена су као улазни подаци за добијање реализације терестричког оквира ITRF2008_SRB_UoB и оцену стабилности реализације референтног система Србије.

7.4 Стратегија реализације ITRF у Републици Србији

Усвојена стратегија за реализацију ITRF у Републици Србији састоји од следеће две етапе, Altamimi et al., 2011:

Етапа 1: Комбинација индивидуалних GPS недељних серија координата станица перманентне мреже Србије која појединачно обухвата следеће фазе:

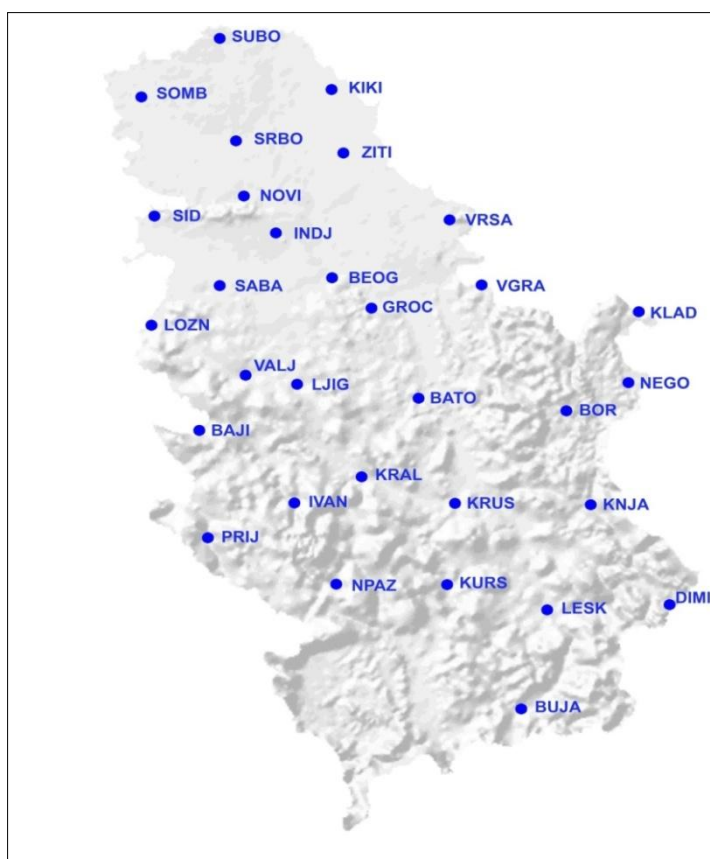
- увођење једначина минималних услова у временске серије координата станица;
- формирање решења терестричког референтног оквира ITRF које садржи положаје и брзине тачака;
- идентификација грубих грешака, офсета, дисконтинуитета и сезонских сигнала на основу резидуала решења оквира;
- оцењивање офсета по деловима серија и увођење скокова за нову итерацију;
- формирање коначног решења терестричког референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB које садржи положаје и брзине станица;
- поље брзина станица терестричког референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB.

Етапа 2: Упоређење решења терестричког референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB и терестричког референтног оквира EPN_SRB_UoB.

- формирање решења терестричког референтног оквира EPN_SRB_UoB које садржи положаје и брзине станица;

7.4.1 Перманентна GPS мрежа Србије - улазни подаци за извођење SATREF комбинације

Крајем 2005. године успостављена је мрежа перманентних GNSS станица у Републици Србији (АГРОС мрежа) од укупно 32 станице, која покрива целу државну територију са раздаљинама између станица око 60 km, слика 7.1. За потребе разних врста задатака у области позиционирања и геодетског премера на перманентним станицама је инсталирана опрема Trimble произвођача као и одговарајући софтвер.



Слика 7.1. Мрежа перманентних GNSS станица у Републици Србији.

Управљање мрежом перманентних станица је надлежност РГЗ тако да је то и главни разлог постављања свих GNSS антена на кровове административних зграда катастарa у градовима Србије изузев станице у Београду где је антена постављена на кров зграде Грађевинског факултета. GNSS антене немају релативни или апсолутни модел калибрације тако да перманентне АГРОС станице немају званичне ознаке за идентификацију, односно DOMES бројеве. Али, упркос чињеници да станице нису инсталиране за прецизне геодинамичке задатке, из расположивих података изведена су истраживања и оцењене брзине координата станица и успешно откривен тренд и понашање (патерн) у кретању станица, Blagojević and Vasilić, 2013.

Координате станица мреже су одређене у форми недељних решења коришћењем софтвера Bernese v5.0 и стандардне процедуре за процесирање GPS опажања од стране групе контролног GNSS центра РГЗ, Вељковић, 2012.

Недељна решења координата станица су изражена у SINEX формату од 1509-1710 GPS недеље (од децембра 2008. год. до октобра 2012. год.), односно укупно 202 SINEX фајла који покривају временски период од 3.87 године. За 24 станице мреже Србије (BEOG, BOR_, BUJA, DIMI, GROC, INDJ, KLAD, KNJA, KURS, LESK, NEGO, PRIJ, SOMB, SRBO, SUBO, VALJ, VGRA, ZITI, BATO, PLAN, BOSI, SABA, LOZN, GMIL) временски период мерења прелази 2.5 године што је неопходан минимум за оцену брзина координата станица (Blewitt and Lavallée, 2002), а за осталих 8 станица (BAJI, IVAN, KIKI, KRUS, NPAZ, SID_, KRVK, NSVK) мерења покривају временски период од 1.5 година и мање, табела 7.1.

Табела 7.1. Приближне координате GPS станица и временски интервал мерења.

No.	CODE	Mesto	Država	Longituda [deg]	Latituda [deg]	H [m]	Epoha [y]
1	AUT1	Thessaloniki	GR	23 00 13.3	40 34 00.5	150.1	3.87
2	BACA	Bacau	RO	26 54 43.9	46 33 43.4	219.1	3.87
3	BAIA	Baia Mare	RO	23 33 27.7	47 39 06.4	270.9	3.87
4	BEOG	Beograd	SR	20 28 35.8	44 48 19.8	198.3	3.87
5	BOR_	Bor	SR	22 05 51.3	44 04 44.1	442.0	3.87
6	BUCU	Bucuresti	RO	26 07 32.6	44 27 50.2	143.2	3.87
7	BUJA	Bujanovac	SR	21 45 58.1	42 27 34.4	459.1	3.87
8	BZRG	Bolzano– Bozen	IT	11 20 12.4	46 29 56.4	329.1	3.85
9	DEVA	Deva	RO	22 54 48.7	45 52 42.3	246.6	3.87
10	DIMI	Dimitrovgrad	SR	22 46 41.0	43 00 57.5	517.4	3.87
11	GRAZ	Graz	AT	15 29 36.5	47 04 01.6	538.3	3.87
12	GSRI	Ljubljana	SI	14 32 37.3	46 02 53.2	351.7	3.87
13	INDJ	Indjija	SR	20 04 49.0	45 02 50.5	172.8	3.83
14	ISTA	Istanbul	TR	29 01 09.6	41 06 16.0	147.2	3.87
15	KLAD	Kladovo	SR	22 36 46.3	44 36 37.5	101.1	3.84
16	KNJA	Knjazevac	SR	22 15 19.1	43 33 59.5	291.0	3.87
17	KURS	Kursumlija	SR	21 16 17.3	43 08 15.5	421.3	3.87
18	LESK	Leskovac	SR	21 56 52.3	42 59 51.2	294.9	3.87
19	MATE	Matera	IT	16 42 16.0	40 38 56.8	535.7	3.87
20	NEGO	Negotin	SR	22 31 48.9	44 13 34.3	98.4	3.87
21	ORID	Ohrid	MK	20 47 38.5	41 07 38.3	773.0	3.87
22	OROS	Oroshaza	HU	20 40 16.8	46 33 18.8	146.0	2.01
23	OSJE	Osijek	HR	18 40 49.7	45 33 38.7	153.9	1.86
24	PADO	Padova	IT	11 53 45.8	45 24 40.1	64.7	3.87
25	PENC	Penc	HU	19 16 53.5	47 47 22.5	291.7	3.87
26	PRIJ	Prijepolje	SR	19 38 32.9	43 23 07.9	514.5	3.87
27	SOFI	Sofia	BG	23 23 41.0	42 33 21.9	1119.5	3.80
28	SOMB	Sombor	SR	19 06 51.2	45 46 26.7	148.5	3.87
29	SRBO	Srbobran	SR	19 47 27.8	45 32 40.3	140.4	2.59
30	SRJV	Sarajevo	BA	18 24 50.0	43 52 04.2	645.8	3.83
31	VALJ	Valjevo	SR	19 53 01.3	44 16 17.6	242.7	3.87
32	VGRA	Vel. Gradiste	SR	21 31 11.9	44 45 59.5	130.3	3.87
33	WTZR	Bad Koetzing	DE	12 52 44.0	49 08 39.1	666.0	3.87
34	ZIMM	Zimmerwald	CH	7 27 55.0	46 52 37.5	956.3	3.87
35	ZITI	Zitiste	SR	20 33 00.2	45 29 05.1	136.0	3.85
36	DUBR	Dubrovnik	HR	18 06 37.5	42 38 59.9	454.3	3.65
37	GROC	Grocka	SR	20 45 09.1	44 38 32.3	276.7	3.59
38	SUBO	Subotica	SR	19 40 01.5	46 05 58.1	180.3	3.73
39	BATO	Batocina	SR	21 04 44.2	44 09 09.8	168.0	3.52
40	PLAN	Plandiste	SR	21 07 16.4	45 13 46.4	132.5	3.19

41	BOSI	Bosilegrad	SR	22 28 18.1	42 30 03.0	793.9	3.21
42	SABA	Sabac	SR	19 41 48.0	44 45 34.4	140.9	3.02
43	LOZN	Loznica	SR	19 13 28.3	44 32 06.7	184.9	2.92
44	GMIL	Gor. Milanovac	SR	20 27 36.5	44 01 28.3	389.6	2.79
45	BALE	Bale	HU	18 56 23.7	46 10 52.1	156.4	0.10
46	BERO	Berovo	MK	22 51 10.7	41 42 19.3	900.3	2.22
47	BITO	Bitola	MK	21 20 07.6	41 01 26.7	667.3	2.22
48	DEBA	Debar	MK	20 31 41.7	41 31 17.2	715.6	2.22
49	HALA	Hala	HU	19 29 09.5	46 25 51.2	193.0	0.10
50	KICE	Kicevo	MK	20 57 34.0	41 30 32.3	663.9	1.99
51	KRPA	Kriva Palanka	MK	22 20 09.1	42 12 22.8	706.9	2.22
52	KUMA	Kumanovo	MK	21 43 03.0	42 08 10.9	391.5	2.22
53	MONT	Mont	BG	23 13 30.1	43 24 56.3	204.8	0.10
54	NEGM	Negotino	MK	22 05 20.4	41 29 01.4	214.5	2.22
55	PRIL	Prilep	MK	21 33 34.7	41 20 36.8	710.7	1.96
56	SKOP	Skoplje	MK	21 24 26.7	41 59 58.8	311.2	2.11
57	SRED	Sred	BG	23 22 12.5	42 41 20.6	601.0	0.10
58	STN1	STN1	STN1	19 21 24.4	43 21 24.3	830.6	0.10
59	STN2	STN2	STN2	20 10 01.5	42 50 34.1	1065.8	0.10
60	SZEG	Szeg	HU	20 09 06.8	46 15 19.0	145.6	0.10
61	TETO	Tetovo	MK	20 58 13.1	42 00 33.9	527.3	2.22
62	VALA	Valandovo	MK	22 33 48.3	41 19 05.7	189.1	2.22
63	VELE	Veles	MK	21 46 13.8	41 43 05.4	246.2	2.22
64	VINI	Vinica	MK	22 30 16.3	41 53 02.6	456.6	2.22
65	BLAG	Blagoevgrad	BG	23 05 58.4	42 01 16.9	448.6	0.06
66	BAJI	Bajina Basta	SR	19 34 14.1	43 58 06.4	306.7	1.51
67	IVAN	Ivanjica	SR	20 13 48.6	43 34 51.4	522.6	1.51
68	KIKI	Kikinda	SR	20 27 48.6	45 49 45.2	143.7	1.50
69	KRUS	Krusevac	SR	21 19 43.0	43 34 49.7	222.0	1.50
70	NPAZ	Novi Pazar	SR	20 31 09.4	43 08 22.7	549.5	1.51
71	PLND	Plandiste	SR	21 07 16.4	45 13 46.4	132.4	0.21
72	SID_	Sid	SR	19 13 33.9	45 07 43.2	164.5	1.49
73	KRVK	Kraljevo	SR	20 41 11.9	43 43 02.8	248.1	1.15
74	NSVK	Nis	SR	21 51 31.8	43 18 40.7	290.9	1.15

2010. године током пет недеља, од 1595-1599 GPS недеље, у Србији је реализована GPS мерна кампања (Serbia EUREF2010 Campaign) од стране Европске комисије за реализацију Европских геодетских референтних система са циљем укључивања решења изведене кампање у EUREF базу података. Мерном кампањом је обухваћено 20 EPN станица, 48 станица националних перманентних мрежа (Србије, Бивше Југословенске Републике Македоније, Бугарске и Мађарске) и 19 допунских тачака. Мрежа станица обухваћена кампањом има радијус око 600 km у правцу север-југ за област Србије и БЈР Македоније, слика 7.2. За добијање оптималног решења мреже Србије обухваћене кампањом примењен је приступ са минималним условима на транслагационе параметре датума дефинисаног EPN референтним станицама. Кампања EUREF Serbia 2010 је прихваћена као унапређење и проширење ETRS89 у Србији реализоване у ETRF2000 референтном оквиру са квалитетом класе В одређених координата станица, Bruyninx et al., 2010.



Слика 7.2. Распоред GPS станица кампање Serbia EUREF2010 Campaign.

Резултати кампање EUREF Serbia 2010 су значајни не само као основа за успостављање националног референтног система већ и као могућност унапређења научних радова. Тако, квалитет реализације ETRF2000 оквира зависи од геометрије мреже станица и броја изабраних EPN референтних станица као и од поузданости станица перманентних мрежа које су укључене у кампању. За унапређење и процену стабилности националног TRF, потребно је у правилним интервалима времена (неколико година) изводити поновне мерне кампање као и отклањање свих врста нерегуларности које се појављују у GPS временским серијама координата станица перманентне мреже Србије независно од кампање. У складу са Законом о државном премеру и катастру Србије, Европски Терестрички Референтни Систем 1989 (ETRS89) је усвојен као национални референтни систем па је почетком 2011. год. реализација референтног система ETRS89 референтни оквир ETRF2000 (епоха 2010.63) усвојена као званична реализација националног референтног система Републике Србије (Службени гласник РС, бр. 72/2009, 18/2010, 65/2013).

У циљу унапређења сагласности референтног оквира ETRF2000 са Међународним терестричким референтним оквиром ITRF потребно је да у изравнање мреже кампање буде укључено више станица које учествују у генерисању ITRF оквира и које би имале равномеран распоред у односу на мрежу кампање, Vasilic and Blagojevic, 2015.

Усвајање ETRS89 референтног система, дефинисаног од стране IAG подкомисије EUREF је значајан корак према унапређењу сарадње и остваривању кохерентности националних терестричких референтних оквира у оквиру Европе.

7.4.2 Дефиниција датума ITRF2008_SRB_UoB применом принципа

Минималних услова

Помоћу екстерног терестичког референтног оквира са одговарајућим вектором положаја и брзина станица X_R (ITRF2008), на ефикасан начин се може дефинисати датум комбинованог референтног оквира X_C (ITRF2008_SRB_UoB). Једначине минималних услова у математичком моделу CATREF софтвера примењују се на вектор положаја и брзина станица екстерног терестричког референтног оквира ITRF2008 што подразумева минимизацију трансформационих параметара између референтног X_R и комбинованог односно оцењеног оквира X_C . Стандардна једначина везе између референтног оквира и комбинованог оквира има следећи облик:

$$X_R = X_C + A\theta \quad (7.22)$$

при чему је θ вектор параметара трансформације и A дизајн матрица парцијалних извода:

$$\theta = (T_1 \ T_2 \ T_3 \ D \ R_1 \ R_2 \ R_3 \ \dot{T}_1 \ \dot{T}_2 \ \dot{T}_3 \ \dot{D} \ \dot{R}_1 \ \dot{R}_2 \ \dot{R}_3)^T \quad (7.23)$$

$$A = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & 0 & 0 & x_0^i & 0 & z_0^i & -y_0^i & & & & & & & \\ 0 & 1 & 0 & y_0^i & -z_0^i & 0 & x_0^i & & & & 0 & & & \\ 0 & 0 & 1 & z_0^i & y_0^i & -x_0^i & 0 & & & & & & & \\ & & & \approx 0 & & & & 1 & 0 & 0 & x_0^i & 0 & z_0^i & -y_0^i \\ & & & & & & & 0 & 1 & 0 & y_0^i & -z_0^i & 0 & x_0^i \\ & & & & & & & 0 & 0 & 1 & z_0^i & y_0^i & -x_0^i & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \quad (7.24)$$

Решење вектора θ по методи најмањих квадрата изражава се у следећем облику:

$$\theta = (A^T A)^{-1} A^T (X_R - X_C) \quad (7.25)$$

Изражавање комбинованог оквира X_C у истом терестричком референтном оквиру ITRF2008 као референтном оквиру, постиже се изједначавањем са нулом вектора трансформационих параметара θ између два оквира, чиме се добија следећа позната једначина минималних услова:

$$\overbrace{(A^T A)^{-1} A^T}^B (X_R - X_C) = 0 \quad (7.26)$$

или

$$B (X_R - X_C) = 0$$

у облику нормалних једначина:

$$(B^T \Sigma_\theta^{-1} B) (X_R - X_C) = 0 \quad (7.27)$$

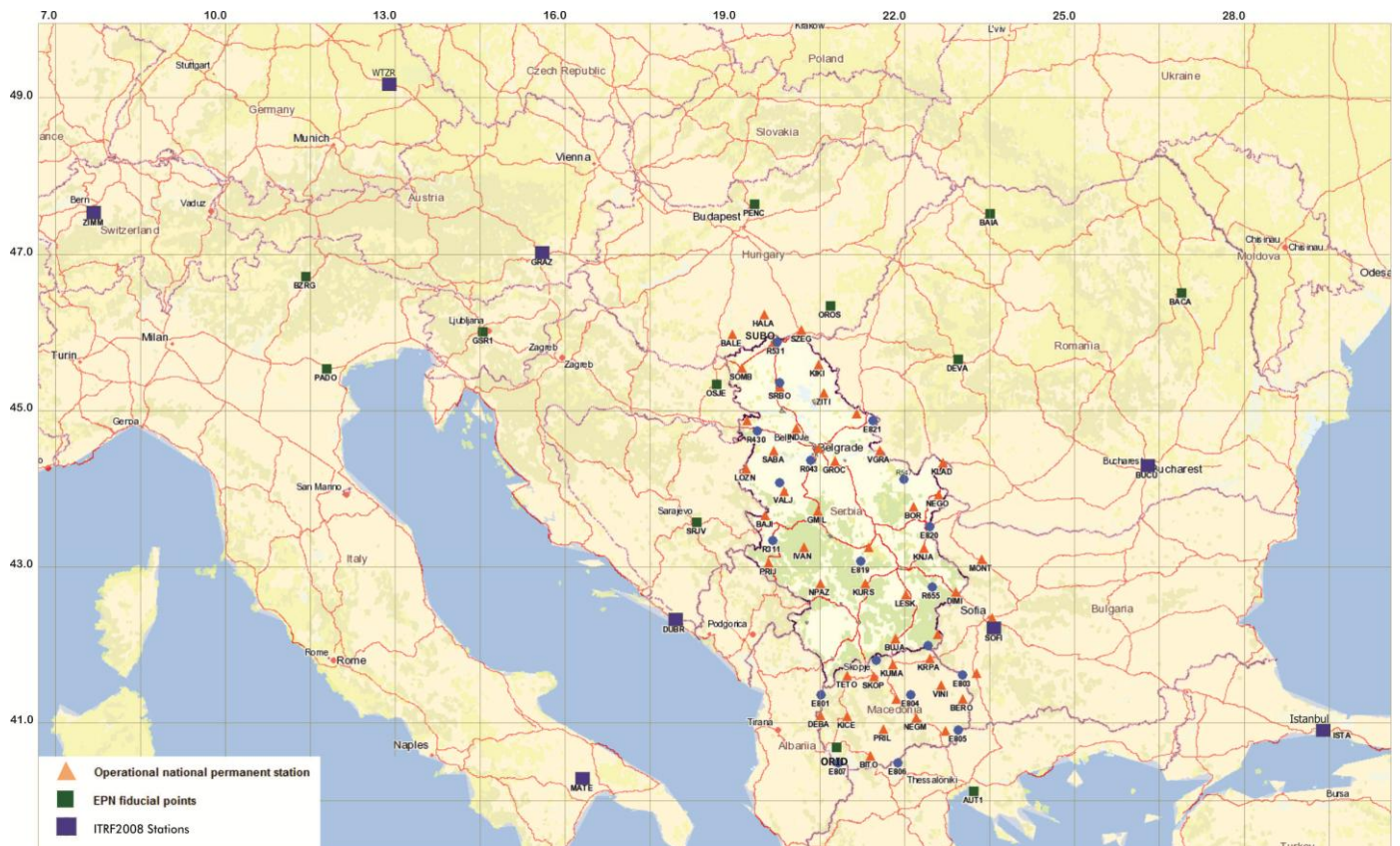
Комплетирање недостатка ранга матрице нормалних једначина и извођење њене инверзије добиће се додавањем једначине (7.27) сингуларној матрици нормалних једначина добијеној по моделу (7.22). За разлику од принципа класичног датума код

кога се услови директно примењују на координате станица, принцип минималних услова подразумева примену услова на трансформационе параметре оквира што омогућава изражавање комбинованог оквира у екстерном референтном оквиру ITRF2008 без мењања квалитета и унутрашње конзистентности комбинованог оквира.

Приликом процесирања мерења извршених на перманентним станицама АГРОС мреже Србије за добијање вредности њихових координата коришћен је тзв. датумски фајл IGS08 који са оквиром ITRF2008 има само 8 заједничких станица које имају дуг опажачки период и висок квалитет мерења који је потребан код глобалног решења ITRF2008 и то су следеће станице: Bucuresti (BUCU), Graz (GRAZ), Istanbul (ISTA), Matera (MATE), Sofia (SOFI), Bad Koetzing (WTZR), Zimmerwald (ZIMM) и Dubrovnik (DUBR). Све ITRF станице припадају Европској тектонској плочи и својим просторним распоредом окружују перманентну мрежу Србије, слика 7.3.

Распоред ITRF станица као и њихов број јесте довољан да се референтни оквир Србије може изразити у глобалном референтном оквиру ITRF2008, међутим референтни оквир Србије је локалног карактера тако да је за његово изражавање у глобалним референтном оквиру ITRF2008 потребно укључивање већег броја станица глобалне дистрибуције, Dermanis, 2010.

Ово потврђују и добијене вредности несигурности параметара трансформације θ које износе: 11.3 mm, 6.5 mm и 10.3 mm за три параметра транслације T_x, T_y, T_z , $0.880 \cdot 10^{-9}$ за параметар размере D , 0.189 mas, 0.451 mas и 0.228 mas за параметре ротације R_x, R_y, R_z за референтну епоху $t_0 = 10.317$, табела 7.2. Међутим, оцењене WRMS вредности у локалном координатном систему по позицији износе 0.4 mm за компоненте N и E и 0.3 mm за компоненту U; оцењене WRMS вредности брзине износе 0.1 mm/у за све три компоненте N, E и U, што показује да је за 8 датумских станица остварена добра сагласност са референтним оквиром ITRF2008 за временски период од 3.87 год.



Слика 7.3. Распоред ITRF2008 станица у односу на АГРОС мрежу.

Табела 7.2. Резултати упоређења референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB и глобалног референтног оквира ITRF2008

Solution	T _x	T _y	T _z	D	R _x	R _y	R _z	Epoch		
	[mm]			[10 ⁻⁹]	[mas]					
	\dot{T}_x	\dot{T}_y	\dot{T}_z	\dot{D}	\dot{R}_x	\dot{R}_y	\dot{R}_z			
	[mm/y]			[10 ⁻⁹ /y]	[mas/y]			y		
ITRF2008_SRB_UoB	0.00	0.00	0.00	-0.000	0.000	-0.000	-0.000	10:317		
+/-	11.3	6.50	10.3	0.880	0.189	0.451	0.228			
VT	-0.00	-0.00	0.00	0.000	0.000	-0.000	-0.000			
+/-	11.3	6.50	10.3	0.880	0.189	0.451	0.228			
ITRF2008	0.0	0.0	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000	10:317		
+/-	0.0	0.0	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000			
Solution	N	WRMS-Pos.			WRMS-Vel.			VF	MSF	Epoch
		E	N	U	E	N	U			
		mm			mm/y					
ITRF2008_SRB_UoB	8	0.4	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1	0.00	1.000	10:317
ITRF2008	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.010	10:317
Sigma_0=	0.00153									

7.4.3 Решење терестричког референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB

За добијање решења терестричког референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB коришћена су недељна решења координата станица АГРОС мреже од 1509 до 1710 GPS недеље (децемб. 2008. – октоб. 2012. год.), односно укупно 202 SINEX фајла који покривају временски период од 3.87 год. Од укупно 32 станице перманентне мреже Србије за 24 станице временски период мерења прелази 2.5 године као неопходан минимум за оцену брзина, и то следеће станице: BEOG, BOR_, BUJA, DIMI, GROС, INDJ, KLAD, KNJA, KURS, LESK, NEGO, PRIJ, SOMB, SRBO, SUBO, VALJ, VGRA, ZITI, BATO, PLAN, BOSI, SABA, LOZN и GMIL. За осталих 8 станица: BAJI, IVAN, KIKI, KRUS, NPAZ, SID_, KRVK и NSVK мерења покривају временски период од 1.5 година и мање. Од 24 станице са минималним периодом мерења од 2.5 године, 5 станица имају лош квалитет антена и то станице: BOSI, INDJ, GMIL, PLAN и SRBO као и станица SID_ са периодом мерења мањим од две године, што је оцењено на XIXth EUREF симпозијуму када је кампања EUREF Serbia 2010 прихваћена као унапређење и проширење ETRS89 у Србији. Станице су категоризоване у класи В са прецизношћу положаја од 1 cm за епоху са минималном положајном варијансом за све станице мреже осим за станице које имају лош квалитет антена, Res. of the XIXth EUREF Symposium, 2011.

Станице GPS перманентне мреже Србије немају још увек примењен апсолутни модел калибрације антена, а неки примери типова антена које се користе у перманентној мрежи Србије су TRM41249.00, TRM55971.00, LEIAT504GG. Из тог разлога је при процесирању података у софтверу Bernese v5.0 коришћен релативни NGS модел калибрације антена који је конвертован у апсолутни модел калибрације за све типове антена. Овакав начин свакако није строги начин за дефинисање националног датума будући да однос између фазног центра антене и фиксне тачке станице није познат, тако да се поставља питање одрживости националног датума након промене антена на станицама перманентне мреже.

У сваком случају, посебно је важно да се изолоју, детектују и истраже све врсте дисконтинуитета у временским серијама координата станица јер свака врста промене у положају станице (офсет, шум или сезонски сигнал) може довести до деградирања карактеристика временских серија координата, односно до деградирања квалитета оцењених вредности положаја и брзина станица.

Недељна решења положаја станица су комбинована користећи CATREF софтвер према математичком моделу описаном у поглављу 7.1. Сви офсети, дисконтинуитети и грубе грешке (скокови) присутни у временским серијама морају се уклонити пре коначне оцене координата и брзина. Итеративним путем се изолоју и искључују скокови и дисконтинуитети до добијања адекватности модела, односно вредности за σ_0 блиску јединици. Нелинеарно кретање станица се може оценити из временских серија резидуала положаја станица након изравања а из резидуала се могу оценити и уклонити сезонски сигнали како би се избегле погрешне оцене брзина код краћих временских серија. Из временских серија ослобођених ових утицаја итеративним путем оцењене су вредности положаја станица у референтној епохи 10.317 и њихове одговарајуће константне брзине. У табели 7.3 приказане су оцењене вредности координата станица у референтној епохи као и њихове брзине са одговарајућим вредностима стандардних одступања за 32 перманентне станице Србије, 13 перманентних станица БЈР Македоније и 20 EPN станице (укупно 65) и 8 суседних станица које припадају перманентним мрежама Мађарске и Бугарске, односно укупно 73 станице.

Код свих станица перманентне мреже БЈР Македоније временски период мерења је мањи од 2.5 године што је недовољно да би се добила поуздана оцена њихових брзина. Међутим оцена брзина станица перманентне мреже БЈР Македоније је ипак изведена да би се добила нека информација о вредностима брзина која може бити корисна за будућа истраживања, са напоменом да две станице KICE и PRIL имају временски период мерења мањи од 2 године. Такође, код 8 суседних станица које припадају перманентним мрежама Мађарске и Бугарске: BALE, HALA, MONT, SRED, STN1, STN2, SZEG, BLAG временски период мерења је мањи од 0.2 године и добијене оцене за вредности стандарда σ све три компоненте брзина су веће од 1 cm/y.

Решење референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB добијено је итеративним путем након искључења одступања – outliers, детекције офсета, дисконтинуитета и периодичних сигнала у временским серијама координата станица. За 19 станица перманентне мреже Србије (BEOG, BOR_, BUJA, DIMI, GROG, Klad, KNJA, KURS, LESK, NEGO, PRIJ, SOMB, SUBO, VALJ, VGRA, ZITI, BATO, SABA, LOZN) и 20 EPN станица просечно стандардно одступање по координатама X и Z износи 0.27 mm и 0.18 mm по координати Y, док стандардна одступања компоненти брзина V_X и V_Z износе 0.20 mm/y и 0.10 mm/y за V_Y . Оцењена вредност σ_0 јединице тежине износи 1.03.

Табела 7.3. Координате и брзине станица референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB.

No.	Stanica	Komp. polož.	P [m]	Sigma [mm]	Komp. brzine	V [cm/y]	Sigma [cm/y]
1	AUT1	X	4466283.34225	0.2566	VX	-1.5215	0.0179
		Y	1896167.00152	0.1796	VY	2.1154	0.0090
		Z	4126096.81140	0.2411	VZ	0.4253	0.0163
2	BACA	X	3917524.86082	0.2739	VX	-1.8451	0.0188
		Y	1988524.19819	0.1865	VY	1.6133	0.0096
		Z	4608585.66941	0.2855	VZ	1.0078	0.0197
3	BAIA	X	3945839.67581	0.2812	VX	-1.7658	0.0192
		Y	1720428.36401	0.1818	VY	1.6717	0.0089
		Z	4691082.76856	0.2887	VZ	1.0422	0.0198
4	BEOG	X	4246572.06027	0.2326	VX	-1.9147	0.0151
		Y	1585753.82071	0.1700	VY	1.8480	0.0075
		Z	4472178.85371	0.2262	VZ	0.9702	0.0145
5	BOR_	X	4252559.29444	0.2506	VX	-1.9583	0.0175
		Y	1726577.24362	0.1788	VY	1.8567	0.0091
		Z	4414702.66159	0.2431	VZ	0.9642	0.0168
6	BUCU	X	4093760.76985	0.2075	VX	-1.6112	0.0114
		Y	2007793.91262	0.1670	VY	1.8291	0.0065
		Z	4445130.04056	0.2075	VZ	1.1105	0.0114
7	BUJA	X	4377012.23511	0.2367	VX	-1.8981	0.0159
		Y	1747681.38957	0.1718	VY	1.9061	0.0079
		Z	4283713.29453	0.2236	VZ	0.6969	0.0145

8	BZRG	X	4312657.40011	0.2911	VX	-1.4165	0.0234
		Y	864634.75708	0.1770	VY	1.8349	0.0094
		Z	4603844.51542	0.2885	VZ	1.2437	0.0230
9	DEVA	X	4097210.39737	0.2558	VX	-1.7490	0.0173
		Y	1731870.48649	0.1776	VY	1.7481	0.0086
		Z	4556026.81199	0.2550	VZ	1.0305	0.0172
10	DIMI	X	4306825.40142	0.2358	VX	-1.8813	0.0158
		Y	1808482.83322	0.1755	VY	1.8657	0.0085
		Z	4329154.43928	0.2309	VZ	0.8898	0.0153
11	GRAZ	X	4194423.72006	0.3099	VX	-1.6229	0.0182
		Y	1162702.80120	0.1926	VY	1.8147	0.0084
		Z	4647245.47959	0.3225	VZ	1.1080	0.0189
12	GSR1	X	4292609.41066	0.2474	VX	-1.6745	0.0166
		Y	1113639.33289	0.1667	VY	1.7746	0.0069
		Z	4569215.69086	0.2441	VZ	1.2293	0.0163
13	INDJ	X	4239593.74261	1.0023	VX	-1.7049	0.0358
		Y	1549818.19474	0.5249	VY	2.0903	0.0176
		Z	4491192.15932	0.9866	VZ	0.7782	0.0352
14	ISTA	X	4208830.19960	0.2141	VX	-1.8051	0.0120
		Y	2334850.40916	0.1716	VY	1.7880	0.0071
		Z	4171267.30246	0.2036	VZ	0.8649	0.0109
15	KLAD	X	4198525.24137	0.2453	VX	-1.8448	0.0173
		Y	1748784.90688	0.1761	VY	1.7983	0.0089
		Z	4456702.68315	0.2391	VZ	0.8969	0.0167
16	KNJA	X	4284174.50082	0.3448	VX	-1.6403	0.0290
		Y	1753166.62741	0.2082	VY	1.9688	0.0141
		Z	4373521.99796	0.3295	VZ	1.0825	0.0276
17	KURS	X	4344218.17124	0.2299	VX	-1.8635	0.0153
		Y	1691248.69074	0.1718	VY	1.9069	0.0079
		Z	4338960.57769	0.2244	VZ	0.9386	0.0148
18	LESK	X	4333721.19614	0.2508	VX	-1.6061	0.0179
		Y	1746352.93202	0.1788	VY	1.9852	0.0092
		Z	4327504.98256	0.2414	VZ	1.1200	0.0170
19	MATE	X	4641949.44815	0.2086	VX	-1.7985	0.0132
		Y	1393045.53500	0.1643	VY	1.8931	0.0066
		Z	4133287.55316	0.2014	VZ	1.5122	0.0123
20	NEGO	X	4228641.52285	0.2336	VX	-1.8128	0.0153
		Y	1754177.47942	0.1729	VY	1.9048	0.0080
		Z	4426206.65390	0.2268	VZ	0.8919	0.0146
21	ORID	X	4498451.60741	0.2385	VX	-1.5957	0.0164
		Y	1708267.10201	0.1717	VY	2.0490	0.0079
		Z	4173591.92317	0.2306	VZ	0.8909	0.0155

22	OROS	X	4110946.76429	0.3733	VX	-1.8449	0.0274
		Y	1551048.76717	0.2188	VY	1.7806	0.0133
		Z	4608010.08546	0.3748	VZ	0.9941	0.0277
23	OSJE	X	4237753.13257	0.2471	VX	-1.7371	0.0167
		Y	1432791.80642	0.1720	VY	1.8885	0.0079
		Z	4531310.33923	0.2447	VZ	1.1170	0.0165
24	PADO	X	4388881.92841	0.2397	VX	-1.5434	0.0163
		Y	924567.57083	0.1663	VY	1.7455	0.0069
		Z	4519588.80350	0.2413	VZ	1.0936	0.0165
25	PENC	X	4052449.37000	0.2728	VX	-1.7639	0.0183
		Y	1417681.22689	0.1777	VY	1.7695	0.0084
		Z	4701407.17070	0.2775	VZ	0.9826	0.0188
26	PRIJ	X	4372826.04297	0.2462	VX	-1.8717	0.0174
		Y	1560748.86878	0.1736	VY	1.8408	0.0084
		Z	4359082.38434	0.2437	VZ	1.0923	0.0173
27	SOFI	X	4319371.98856	0.3723	VX	-1.6959	0.0215
		Y	1868687.89290	0.2342	VY	1.9097	0.0116
		Z	4292063.98940	0.3478	VZ	0.8753	0.0199
28	SOMB	X	4210756.79947	0.2399	VX	-1.7355	0.0163
		Y	1459276.11704	0.1696	VY	1.9065	0.0077
		Z	4547875.94363	0.2370	VZ	1.1380	0.0161
29	SRBO	X	4210388.76220	1.9522	VX	-2.7932	0.1120
		Y	1515091.01440	0.9670	VY	3.4671	0.0549
		Z	4530038.42592	1.9322	VZ	0.8632	0.1108
30	SRJV	X	4370292.87452	0.3126	VX	-1.7650	0.0266
		Y	1454980.23979	0.1931	VY	1.8910	0.0124
		Z	4397965.39646	0.2947	VZ	1.0841	0.0249
31	VALJ	X	4301919.86293	0.2359	VX	-1.7108	0.0159
		Y	1555888.84530	0.1709	VY	1.9345	0.0079
		Z	4429917.70423	0.2334	VZ	1.1391	0.0158
32	VGRA	X	4219785.96727	0.2941	VX	-1.8749	0.0198
		Y	1663918.69123	0.1931	VY	1.8543	0.0100
		Z	4469057.28270	0.2818	VZ	0.9854	0.0187
33	WTZR	X	4075580.45673	0.2596	VX	-1.6524	0.0155
		Y	931853.90081	0.1777	VY	1.8063	0.0075
		Z	4801568.19476	0.2721	VZ	0.9966	0.0164
34	ZIMM	X	4331296.98246	0.2214	VX	-1.3344	0.0133
		Y	567555.98659	0.1626	VY	1.7247	0.0057
		Z	4633134.00555	0.2316	VZ	1.1779	0.0138
35	ZITI	X	4194384.53658	1.0594	VX	-1.3799	0.0792
		Y	1572395.19915	0.5422	VY	1.6814	0.0394
		Z	4525379.75239	1.0495	VZ	1.4883	0.0782

36	DUBR	X	4465939.94758	0.2602	VX	-1.9221	0.0230
		Y	1460594.57783	0.1800	VY	1.7546	0.0114
		Z	4299291.49731	0.2440	VZ	1.2159	0.0207
37	GROC	X	4250871.39405	0.4553	VX	-1.7885	0.0401
		Y	1610726.94935	0.2548	VY	1.6293	0.0195
		Z	4459349.49703	0.4964	VZ	1.0634	0.0443
38	SUBO	X	4172026.83961	0.2414	VX	-1.8708	0.0160
		Y	1491099.78006	0.1700	VY	1.8142	0.0076
		Z	4573052.31995	0.2381	VZ	0.9483	0.0158
39	BATO	X	4277070.59754	0.3098	VX	-1.8912	0.0242
		Y	1648580.51320	0.1980	VY	1.9348	0.0120
		Z	4420400.20585	0.2987	VZ	0.8711	0.0233
40	PLAN	X	4197325.13537	0.7794	VX	-1.5426	0.0710
		Y	1621400.48092	0.4110	VY	1.5907	0.0355
		Z	4505445.73009	0.7767	VZ	0.8980	0.0705
41	BOSI	X	4352527.10079	0.4343	VX	-1.7338	0.0488
		Y	1800358.47605	0.2595	VY	1.9826	0.0258
		Z	4287320.00545	0.3837	VZ	0.7837	0.0424
42	SABA	X	4271111.48282	0.3612	VX	-1.7020	0.0421
		Y	1529000.66810	0.2139	VY	1.9397	0.0199
		Z	4468514.70802	0.3537	VZ	1.1989	0.0413
43	LOZN	X	4300140.14685	0.2772	VX	-1.8298	0.0235
		Y	1499531.74934	0.1876	VY	2.0035	0.0119
		Z	4450807.41839	0.2725	VZ	0.8957	0.0231
44	GMIL	X	4304059.43532	0.8110	VX	-1.6595	0.0663
		Y	1605811.05656	0.4273	VY	1.9332	0.0325
		Z	4410324.57325	0.7822	VZ	1.1714	0.0631
45	BALE	X	4184409.40328	8.2834	VX	-2.3961	3.4552
		Y	1435901.32275	3.9185	VY	0.7030	1.6348
		Z	4579323.84567	8.3591	VZ	-2.1606	3.4916
46	BERO	X	4395120.96284	0.8192	VX	-1.5953	0.0562
		Y	1852322.40054	0.4445	VY	1.9836	0.0293
		Z	4221827.02064	0.7790	VZ	0.7106	0.0534
47	BITO	X	4489050.33540	0.8638	VX	-1.6421	0.0590
		Y	1753409.89630	0.4570	VY	2.0502	0.0300
		Z	4164880.87018	0.8088	VZ	0.7298	0.0551
48	DEBA	X	4479215.50714	1.0181	VX	-1.6994	0.0705
		Y	1677228.11397	0.4442	VY	1.8734	0.0294
		Z	4206430.72933	0.8481	VZ	1.1425	0.0585
49	HALA	X	4151633.17409	8.0846	VX	-2.6485	3.3691
		Y	1469027.67313	3.8585	VY	0.0935	1.6082
		Z	4598530.27561	8.1986	VZ	1.6696	3.4214

50	KICE	X	4467287.82893	0.9966	VX	-2.0683	0.0763
		Y	1711204.93789	0.4815	VY	2.2452	0.0356
		Z	4205358.68176	0.9105	VZ	1.3811	0.0694
51	KRPA	X	4377110.85260	0.8924	VX	-1.6435	0.0613
		Y	1798385.33386	0.4720	VY	1.9741	0.0313
		Z	4263084.72680	0.8328	VZ	0.8721	0.0572
52	KUMA	X	4400895.99068	0.8586	VX	-1.7309	0.0585
		Y	1752888.92484	0.4534	VY	1.8021	0.0297
		Z	4257110.33576	0.7929	VZ	1.0385	0.0538
53	MONT	X	4264436.42662	10.0200	VX	-3.1511	4.1916
		Y	1829947.54384	5.0716	VY	0.5796	2.1217
		Z	4361299.25271	8.8609	VZ	-2.2453	3.7089
54	NEGM	X	4434095.26680	0.8535	VX	-1.9822	0.0577
		Y	1799508.58987	0.4437	VY	1.6866	0.0288
		Z	4202961.71014	0.7768	VZ	1.0775	0.0524
55	PRIL	X	4460456.16052	0.8727	VX	-1.8987	0.1047
		Y	1762386.11282	0.4431	VY	2.1735	0.0519
		Z	4191613.91240	0.7936	VZ	0.5075	0.0957
56	SKOP	X	4419733.54940	0.8484	VX	-1.7107	0.0632
		Y	1732736.04936	0.4375	VY	1.9185	0.0313
		Z	4245785.82126	0.7978	VZ	0.7777	0.0594
57	SRED	X	4310639.90456	8.6953	VX	-3.7431	3.6364
		Y	1862714.79421	4.3105	VY	0.7938	1.8024
		Z	4302583.47173	7.7978	VZ	-0.1536	3.2616
58	STN1	X	4382843.43570	9.8957	VX	-3.1557	4.1311
		Y	1539727.94556	4.4897	VY	-0.4846	1.8739
		Z	4356974.72145	9.3070	VZ	-0.9421	3.8898
59	STN2	X	4397416.17588	10.1480	VX	-4.7245	4.2350
		Y	1615068.09633	4.7415	VY	3.0839	1.9792
		Z	4315440.36916	9.4811	VZ	-5.7608	3.9616
60	SZEG	X	4147508.29517	8.3730	VX	-2.0686	3.4829
		Y	1522034.60025	4.0054	VY	0.5582	1.6656
		Z	4585018.79051	8.3692	VZ	1.5474	3.4879
61	TETO	X	4432296.89741	0.9230	VX	-1.6550	0.0631
		Y	1698764.50147	0.5042	VY	2.0133	0.0334
		Z	4246736.01262	0.8400	VZ	0.7770	0.0574
62	VALA	X	4430249.66774	0.8991	VX	-1.7266	0.0637
		Y	1840818.69422	0.4660	VY	2.1376	0.0318
		Z	4189158.61212	0.7832	VZ	0.6089	0.0552
63	VELE	X	4427995.63004	0.8173	VX	-1.6387	0.0558
		Y	1768429.92420	0.4304	VY	2.0064	0.0282
		Z	4222455.14523	0.7581	VZ	0.7600	0.0518

64	VINI	X	4393777.08302	0.7847	VX	-1.8520	0.0536
		Y	1820368.86993	0.4177	VY	2.0130	0.0273
		Z	4236330.34332	0.7400	VZ	0.7972	0.0505
65	BLAG	X	4365251.52396	21.3030	VX	3.6529	9.7557
		Y	1861898.83508	10.5740	VY	5.0938	4.8448
		Z	4247667.20352	18.7080	VZ	5.6154	8.5733
66	BAJI	X	4332494.34061	0.8196	VX	-1.9808	0.0747
		Y	1540227.00279	0.4050	VY	1.8736	0.0349
		Z	4405783.05151	0.7795	VZ	0.9388	0.0709
67	IVAN	X	4342572.22245	0.9589	VX	-1.7856	0.0918
		Y	1600353.90063	0.4747	VY	1.9385	0.0438
		Z	4374843.35292	0.8826	VZ	1.0901	0.0844
68	KIKI	X	4171105.90274	0.8576	VX	-1.9126	0.0960
		Y	1556486.55276	0.4307	VY	2.0486	0.0463
		Z	4552146.46623	0.8498	VZ	1.1091	0.0948
69	KRUS	X	4310927.25405	1.4175	VX	-1.2946	0.2133
		Y	1683242.47557	0.7050	VY	1.8273	0.1054
		Z	4374596.56402	1.3240	VZ	1.8050	0.1990
70	NPAZ	X	4365990.82850	0.8084	VX	-1.8301	0.0745
		Y	1634053.39639	0.4091	VY	1.9701	0.0359
		Z	4339210.77830	0.7482	VZ	1.0162	0.0694
71	SID_	X	4256180.44498	0.7763	VX	-1.8609	0.0686
		Y	1484332.32487	0.3909	VY	1.7921	0.0325
		Z	4497565.08083	0.7630	VZ	0.9788	0.0676
72	KRVK	X	4319705.95467	1.7447	VX	-1.5048	0.1718
		Y	1631131.79385	0.8536	VY	1.4576	0.0833
		Z	4385627.19337	1.6674	VZ	-0.3191	0.1643
73	NSVK	X	4314298.46420	1.5237	VX	-2.0531	0.1060
		Y	1730737.86598	0.7771	VY	1.8683	0.0533
		Z	4352932.79807	1.4596	VZ	0.6964	0.1015

У табели 7.4 су приказане вредности компоненти брзина у локалном E,N,U систему за 20 EPN станица, 32 станице перманентне мреже Србије и 13 станица перманентне мреже БЈР Македоније. Вертикалне компоненте 8 станица перманентне мреже Србије: BAJI, IVAN, KIKI, KRUS, NPAZ, SID_, KRVK, NSVK нису срачунате због кратког мерног периода док су станице SRBO и ZITI у временским серијама координата садржале дисконтинуитете и скокове чији је узрок настајања потребно истражити. Станице перманентне мреже БЈР Македоније KICE и PRIL имају временски период мерења мањи од две године и њихове вертикалне компоненте нису срачунате.

Табела 7.4. Брзине станица у локалном E, N, U оквиру.

No.	Stanica	Država	Longituda	Latituda	VE [cm/y]	VN [cm/y]	VU [cm/y]
1	AUT1	GR	23.0037	40.5668	2.54176	0.69623	-1.5935
2	BACA	RO	26.9122	46.5621	2.27370	1.35737	1.0260
3	BAIA	RO	23.5577	47.6518	2.23811	1.40457	1.2998
4	BEOG	SR	20.4766	44.8055	2.40109	1.49681	-1.3028
5	BOR_	SR	22.0976	44.0789	2.45697	1.46901	-1.3103
6	BUCU	RO	26.1257	44.4639	2.35174	1.24161	3.2027
7	BUJA	SR	21.7662	42.4596	2.47405	1.22701	-3.0861
8	BZRG	IT	11.3368	46.4990	2.07751	1.60187	1.9438
9	DEVA	RO	22.9135	45.8784	2.29112	1.38526	0.9204
10	DIMI	SR	22.7781	43.0160	2.44860	1.34114	-1.3314
11	GRAZ	AT	15.4935	47.0671	2.18227	1.54487	0.7614
12	GSR1	SI	14.5437	46.0481	2.13821	1.69926	0.6934
13	INDJ	SR	20.0803	45.0474	2.54854	1.17515	-0.7352
14	ISTA	TR	29.0193	41.1044	2.43924	1.11923	0.3280
15	KLAD	SR	22.6129	44.6104	2.36940	1.34891	-0.9025
16	KNJA	SR	22.2553	43.5665	2.44340	1.31674	1.8639
17	KURS	SR	21.2715	43.1376	2.45302	1.39927	-1.2064
18	LESK	SR	21.9479	42.9976	2.44165	1.32909	2.1699
19	MATE	IT	16.7045	40.6491	2.33014	1.91499	0.9095
20	NEGO	SR	22.5303	44.2262	2.45403	1.29789	-0.5478
21	ORID	MK	20.7941	41.1273	2.48205	1.17383	0.1020
22	OROS	HU	20.6714	46.5552	2.31725	1.48046	-0.3302
23	OSJE	HR	18.6805	45.5608	2.34541	1.52518	0.6888
24	PADO	IT	11.8961	45.4112	2.02611	1.58700	-0.2877
25	PENC	HU	19.2815	47.7896	2.25270	1.46055	0.0179
26	PRIJ	SR	19.6425	43.3855	2.36284	1.57970	-0.8108
27	SOFI	BG	23.3947	42.5561	2.42608	1.18463	0.0398
28	SOMB	SR	19.1142	45.7741	2.36974	1.52149	1.0716
29	SRBO	SR	19.7911	45.5445	4.20803	1.64257	
30	SRJV	BA	18.4139	43.8679	2.35175	1.52811	-0.2540
31	VALJ	SR	19.8837	44.2716	2.40105	1.47939	1.1430
32	VGRA	SR	21.5200	44.7665	2.41276	1.44887	-0.6150
33	WTZR	DE	12.8789	49.1442	2.12918	1.56575	-0.3658
34	ZIMM	CH	7.4653	46.8771	1.88346	1.60732	1.0849
35	ZITI	SR	20.5501	45.4848	2.05880	1.54391	
36	DUBR	HR	18.1104	42.6500	2.26514	1.76249	-1.1871
37	GROC	SR	20.7525	44.6423	2.15727	1.52615	-0.3197
38	SUBO	SR	19.6671	46.0995	2.33800	1.48698	-1.1494

39	BATO	SR	21.0790	44.1527	2.48554	1.36949	-1.5998
40	PLAN	SR	21.1212	45.2296	2.03973	1.24707	0.2777
41	BOSI	SR	22.4717	42.5008	2.49478	1.14822	-0.9298
42	SABA	SR	19.6967	44.7596	2.39986	1.51927	1.7055
43	LOZN	SR	19.2245	44.5352	2.49427	1.38762	-1.3314
44	GMIL	SR	20.4602	44.0246	2.39139	1.45324	1.8201
45	BERO	MK	22.8530	41.7054	2.44743	0.99604	-0.4960
46	BITO	MK	21.3355	41.0241	2.50713	1.06493	-1.1222
47	DEBA	MK	20.5283	41.5215	2.35036	1.47488	0.5764
48	KICE	MK	20.9595	41.509	2.83647	1.78198	
49	KRPA	MK	22.3359	42.2064	2.45059	1.16325	0.1552
50	KUMA	MK	21.7175	42.1364	2.31469	1.40152	-0.0120
51	NEGM	MK	22.0890	41.4837	2.30818	1.60369	-1.8708
52	PRIL	MK	21.5596	41.3436	2.71910	1.01990	
53	SKOP	MK	21.4074	41.9997	2.41050	1.17511	-1.4286
54	TETO	MK	20.9703	42.0094	2.47224	1.12940	-0.9286
55	VALA	MK	22.5634	41.3183	2.63644	0.96848	-1.7944
56	VELE	MK	21.7705	41.7182	2.47107	1.08481	-0.7470
57	VINI	MK	22.5045	41.8841	2.56858	1.22137	-1.6797
58	BAJI	SR	19.5706	43.9685	2.42882	1.53571	
59	IVAN	SR	20.2302	43.5810	2.43634	1.48258	
60	KIKI	SR	20.4635	45.8292	2.58796	1.54441	
61	KRUS	SR	21.3286	43.5805	2.17305	1.68070	
62	NPAZ	SR	20.5193	43.1396	2.48663	1.44136	
63	SID_	SR	19.2261	45.1287	2.30488	1.51757	
64	KRVK	SR	20.6867	43.7175	1.89516	0.38646	
65	NSVK	SR	21.8588	43.3113	2.49838	1.33662	

7.4.4 Испитивање офсета, дисконтинуитета и сезонских сигнала за решење референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB

Брзине положаја станица су оцењене изравнањем по моделу линеарне регресије на основу временских серија положаја станица. Кључно питање за оцену брзина, а можда и највећи извор грешака, је присуство офсета, дисконтинуитета, грубих грешака (одступања) и периодичних сигнала у временским серијама положаја станица.

Офсети

Офсети у временским серијама координата станица се дефинишу као изненадне и перманентне промене положаја станица што резултира дуготрајним ефектом на

оцене брзина станица, Gazeaux et al., 2013. Офсети могу натати као последица померања Земљине коре (нпр. код земљотреса), због померања која се односе на станице а нису узрокована померањима (деформацијама) Земљине коре или из очигледних померања која се односе на станице променама оцењених положаја станица (тј. ниједна станица се не помера). Извори настајања ових промена положаја станица су различити и углавном се односе на следеће:

- Померање стуба на којој се налази станица. Све GPS станице су повезане са Земљином кором преко грађевинских елемената на којима се налазе (бетонски стубови, метални штапови, различите врсте зграда и др.). Свако кретање ових структура ће изазвати померање које се односи на саме станице и није померање Земљине коре.

- Промена опреме станица. Промена антена може довести до промене положаја ARP у односу на белегу (маркер) станице (промена ексцентра антене). Промена заштитне куполе антене може довести до промене положаја PCO у односу на ARP. Чак и промене пријемника, софтвера или друге хардверске промене (каблови) могу да изазову офсет у оценама временских серија положаја станица.

- Промена локалних услова опажања. Промена околине станице (земљиште или блиски објекти) може да изазове мултипат сигнала или промене локалне елевационе маске што може да доведе до офсета у оценама временских серија координата станица.

- Грешка мета података станица. Погрешна промена у информацијама о станици (нпр., модел антена или вредности ексцентра антена) које се користе у резултатима обраде података за оцењену промену положаја.

- Промена података моделирања. Свака промена модела (нпр., за тропосферско кашњење, модел варијација фазног центра антена) у обради података директно утиче на оцењене положаје станице што онда може увести офсет у временску серију положаја.

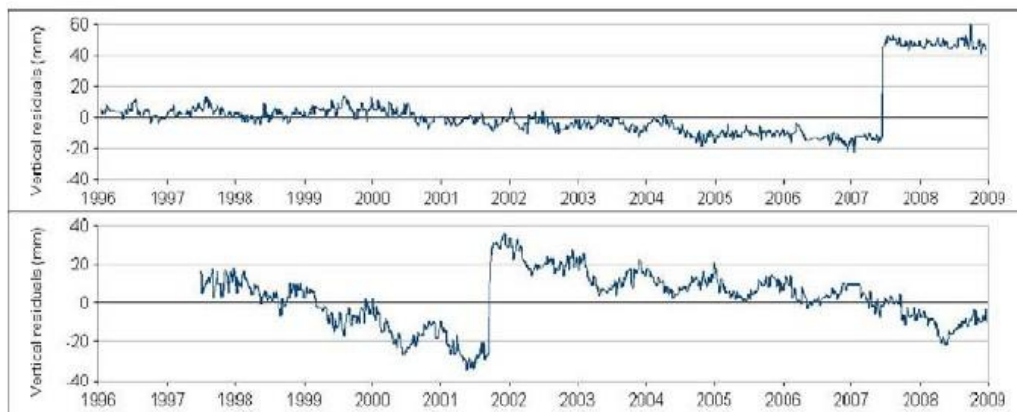
- Промена референтног оквира. Оцењени положаји станица су везани за референтни оквир. Свака промена у дефиницији референтног оквира (почетак, размера и оријентација) ће узроковати офсет у оцењеним положајима станица.

Последње две врсте офсета нису разматране јер су суштински уклоњене у фази препроцесирања при чему је иста стратегија процесирања (моделовања) и иста дефиниција оквира примењена за цео сет података. Поред тога, сви идентификовани офсети немају познате изворе и морају се означити као резултат непознатог извора због недостатка информације о променама на станици (промене опреме или околине). Сви офсети, иако значајни за нека геофизичка (нпр. земљотреси) или техничка (нпр. антене) истраживања, имају штетан утицај на оцену брзине. Како дужина временских серија повећава број офсета вероватно је да се повећава и кумулативни ефекат чак и малих офсета што онда може значајно да измени оцену положаја и брзина. Због тога је детекција офсета важан корак у покушају да се добије тачно разумевање деформације Земљине површине.

Када се офсет детектује, временска серија се дели у два различита дела података за које постоји независна оцена положаја станице и брзине по линеарном моделу. Према томе, временска серија положаја се састоји од $n+1$ решења, где је n број офсета, а свако од ових појединачних решења се назива $soln$ решење. Амплитуда офсета се оцењује као разлика положаја станице сваког $soln$ решења, пропагирана на епоху офсета и коришћењем брзине сваког $soln$ решења. Да би се офсет уклонио, сви положаји након епохе офсета се коригују за ове разлике. Брзине истих станица различитих $soln$ решења су условљене да буду исте осим ако се

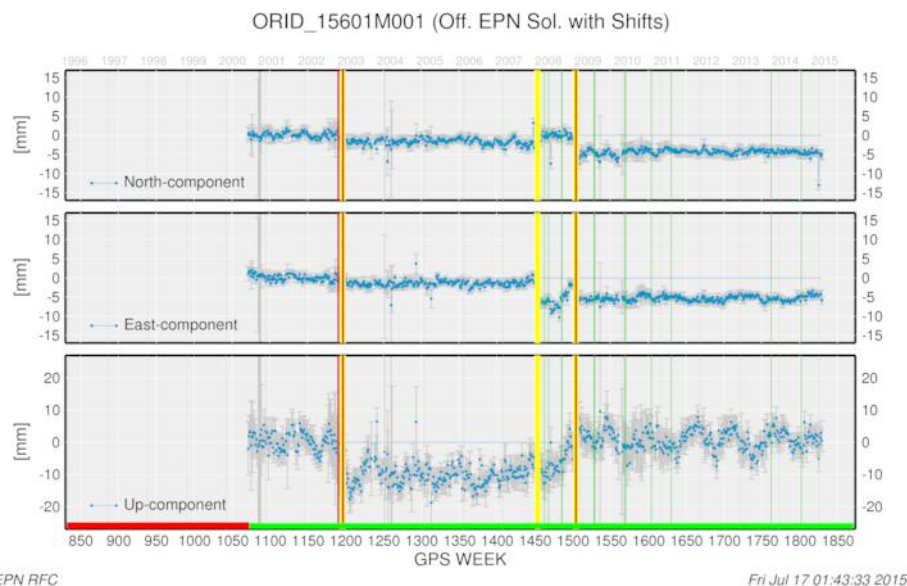
претпоставља постојање дисконтинуитета брзине, у оцени по методи најмањих квадрата са а priori стандардном девијацијом од 0.01 mm/уг.

Ако се офсети у временским серијама не детектују и не искључе може доћи до грешке у оцени брзине до неколико mm/уг, у зависности од амплитуде офсета, дужине временских серија и позиције офсета у временској серији (или обрнуто, у зависности од дужине добијеног *soln* решења). Један од примера лошег утицаја офсета је случај када се велики офсет налази у средини кратке временске серије. За илустрацију лошег утицаја офсета на оцену брзине на слици 7.4 приказани су резидуали детрендованих временских серија две перманентне GPS станице Француске. На слици 7.4 (горе) станица има офсет око 60 mm што резултира грешком брзине од око 2 mm/уг док станица на слици 7.4 (доле) има офсет око 45 mm али много већу грешку брзине од око 6mm/уг (разлика оцењене брзине са и без уклањања офсета). Офсет у временској серији доње станице се више налази у центру и њена временска серија је краћа. У овим примерима оба офсета су настала због промене антене, Collilieux, 2010.



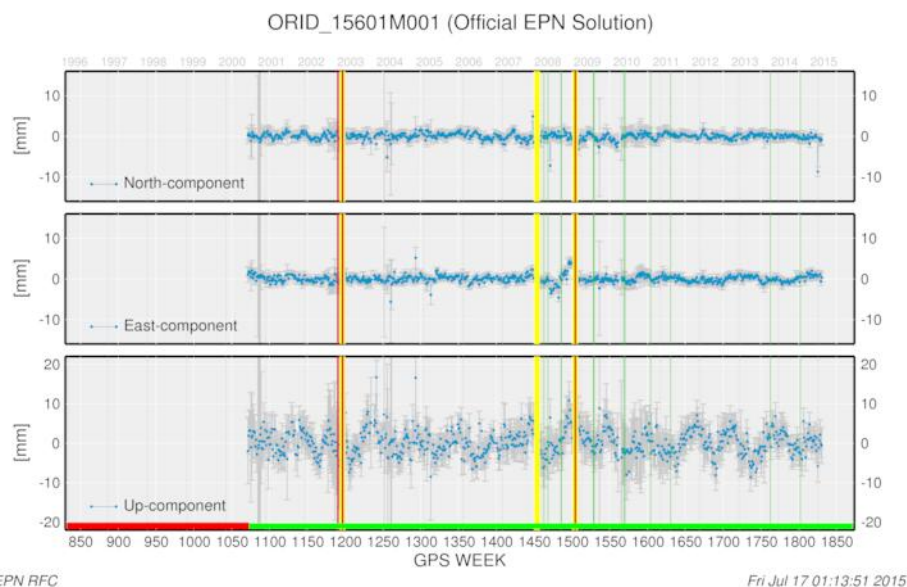
Слика 7.4. Утицај позиције офсета у временским серијама на оцене брзина GPS станица.

Велики офсети са познатим или непознатим извором, могу се лако открити и уклонити једноставним визуелним прегледом резидуала временских серија. Такође, обе епохе офсета могу се лако оценити са временском резолуцијом од недељу дана. Међутим, мањи офсети са амплитудом од неколико mm који су маскирани у шуму временске серије се много теже детектују. Овај случај офсета представља извор грешака за оцењене вредности брзина и такође мали офсети уводе временски-корелисани шум близак случајном ходу, Williams, 2003a.



Слика 7.5. Резидуали врем. серија са присутним офсетима (црвено) EPN станице ORID.

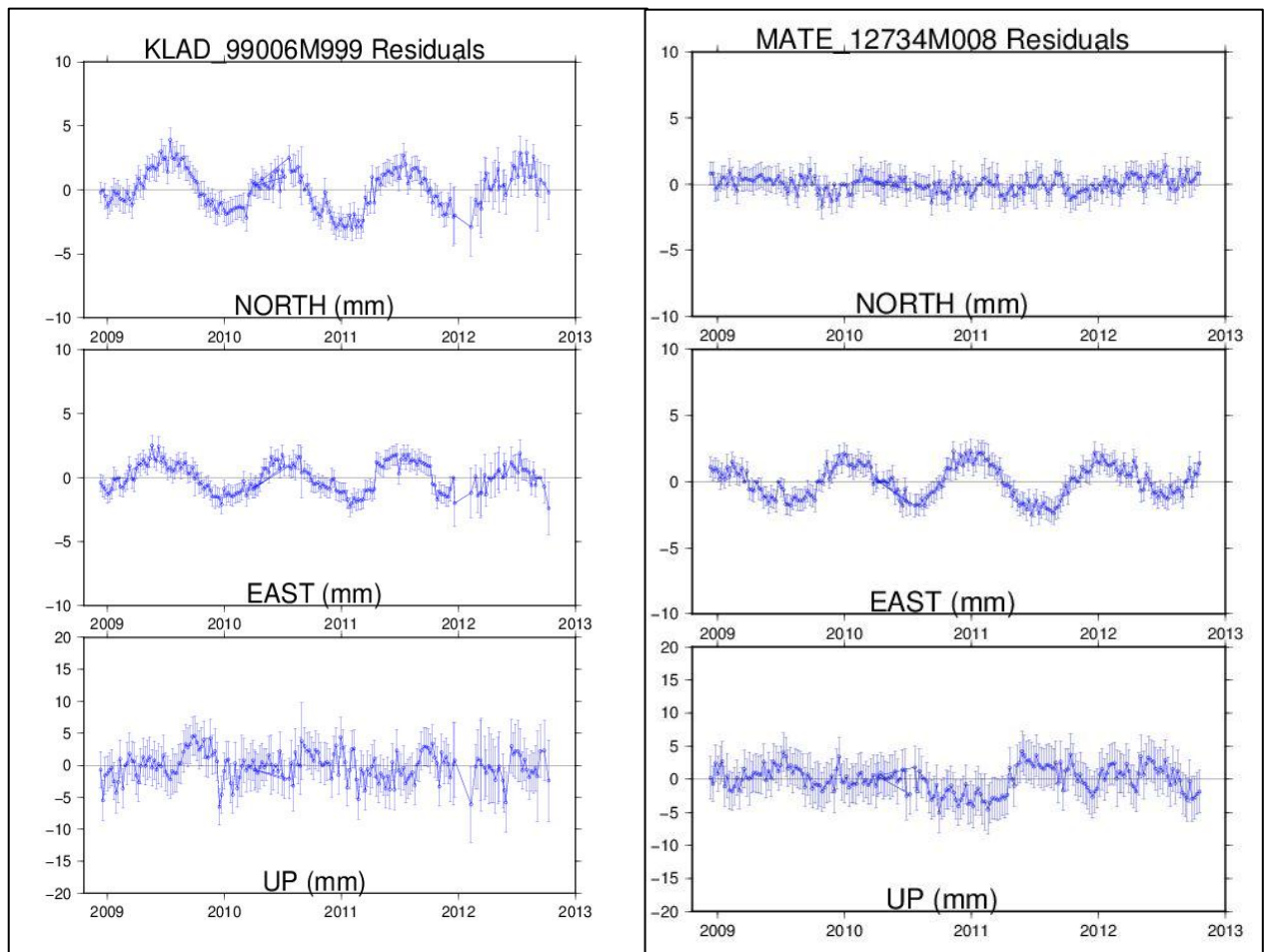
Као један пример присутности офсета су резидуали временских серија EPN станице ORID, слика 5.2 (<http://www.epncb.oma.be>). У овим временским серијама, три офсета настала због промене антене (црвена боја) су детектована у све три компоненте визуелним прегледом. Међутим, у овом случају у хоризонталним компонентама N и E, могуће је да се не могу детектовати визуелним прегледом временске серије два офсета настала око 1200 GPS недеље. Иако су оба офсета значајна, односно амплитуде оба офсета вертикалне компоненте износе до 10 mm, офсети могу бити маскирани расипањем резидуала временских серија. Разлика између временских серија са и без уклоњених офсета се може видети упоређем слика 7.5 и 7.6. Ако се два поменута офсета не уклоне, који у овом случају имају исти знак и који су детектовани у вертикалној компоненти, може доћи до значајне грешке оцењене брзине. У супротном случају, ако би оба офсета имала супротне знаке њихов утицај на грешку брзине би могао да буде занемарљив, Williams, 2003а.



Слика 7.6. Резидуали временских серија са уклоњеним офсетима EPN станице ORID.

Процес оцене офсета и његовог утицаја на оцењене вредности извршен је са CATREF софтвером за све временске серије координата станица. Највише детектованих офсета је настало због промене антена, лошег квалитета антена и из непознатих извора. Случај када временске серије имају велики број офсета од којих неки нису значајни може довести до погрешне вредности брзине ако резултујућа *soln* решења нису довољно дуга. Овај ефекат је посебно наглашен у присуству периодичних сигнала у временским серијама, односно не-значајан офсет може заправо бити оцењен као значајан због присуства сезонских сигнала.

Пример присуства сезонских утицаја је приказан на слици 7.7 (лево) перманентне GPS станице KLAD где резидуали временских серија имају годишњи периодичан карактер посебно видљив у хоризонталним компонентама N и E и достижу максималне вредности половином године, односно у летњим месецима. Слика 7.7 (десно) приказује перманентну GPS станицу MATE у Италији са присутним годишњим периодичним понашањем које је посебно видљиво у хоризонталаној компоненти E код које се максимална вредност амплитуде појављује почетком године, односно у зимским месецима. Изворе настајања сезонских сигнала треба посебно истражити и оценити вредности амплитуда сезонских сигнала.



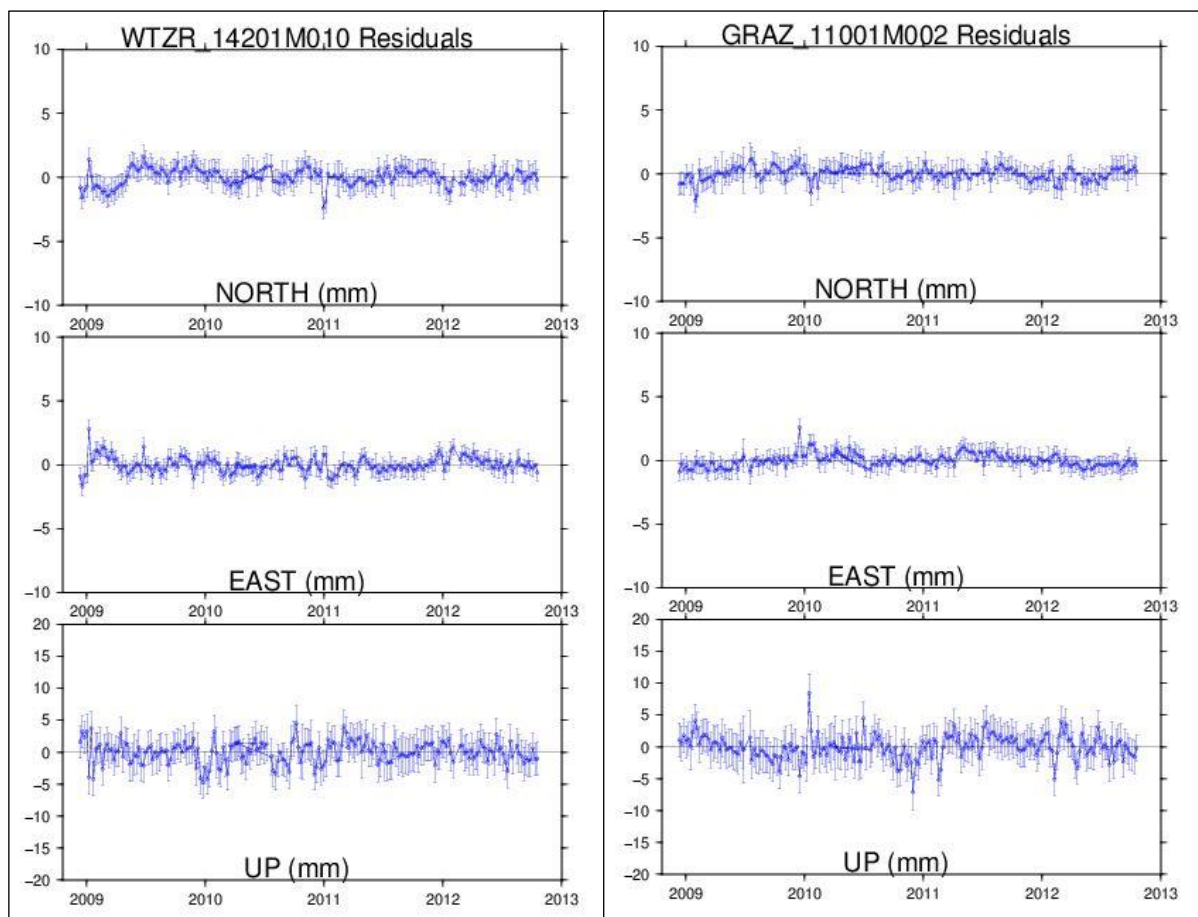
Слика 7.7. Сезонски сигналу у временским серијама станица KLAD и MATE.

Поред тога, укључивањем офсета *soln* решења су скраћена па ће формална несигурност брзине станице бити вештачки повећава. Међутим, овај ефекат може бити безначајан ако су несигурности брзина оцењене узимајући у обзир корелисани

шум у временским серијама. На пример, неурачунати мали офсети имају мали или немају утицај на вредност несигурности ако су временске серије веома корелисане (нпр. случајни ход), Williams, 2003а.

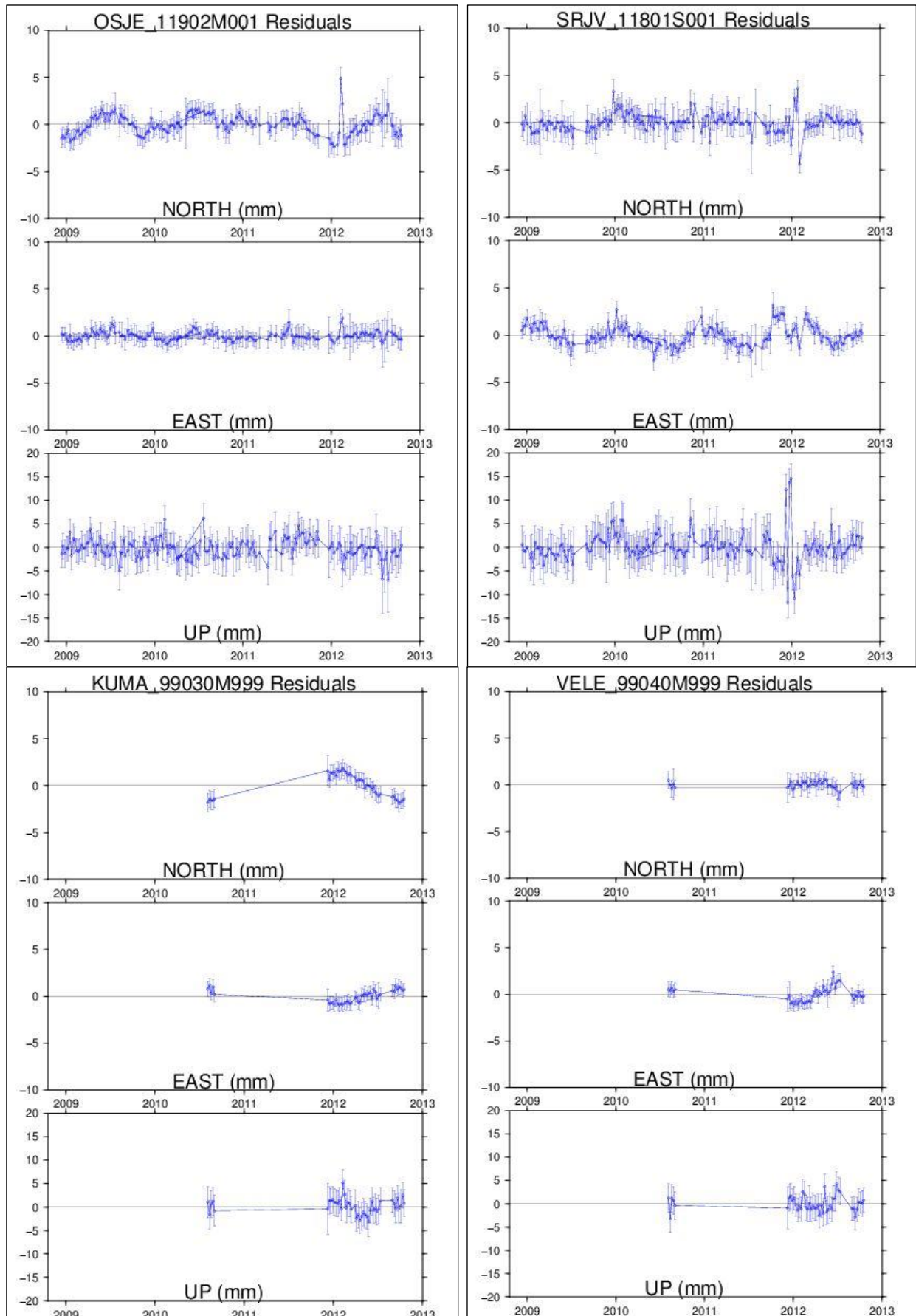
Из тог разлога, неопходно је да се уклоне сви значајни офсети из временских серија али вредности брзина оцењених из временских серија са великим бројем офсета (или обрнуто са веома кратким *soln* решењима) треба узети са резервом, Altamimi, 2013. У временским серијама GPS перманентне мреже Србије детектован велики број офсета за станице SRBO, BAJI, ZITI и GMIL. Сви детектовани офсети сваке појединачне станице су обележени и задржани у случају да су значајни, односно када је нормализована амплитуда имала вредност већу од 5. Детекција офсета и њихова елиминација је итеративно урађена (четири итерације) за све временске серије од већих ка мањим амплитудама офсета. Квалитет и значај детекције офсета углавном зависи од саме амплитуде офсета али и од амплитуде шума временске серије. Дакле, смањење шума временске серије унапређењем GPS процесирања такође може индиректно да побољша оцену брзине у случају скривених и несигурних офсета.

На слици 7.8 приказани су резидуали временских серија две станице референтног оквира ITRF2008 WTZR и GRAZ са очекиваном вредношћу једнакој нули. Вредност стандарда σ за све три компоненте брзине станице WTZR не прелази вредност од 0.16 mm/y и станице GRAZ вредност од 0.18 mm/y, табела 7.3. На слици 7.9 (горе) приказани су резидуали EPN станица OSJE и SRJV код којих су грубе грешке искључене посебно код станице SRJV настале почетком 2012. год. вероватно због промене опреме.

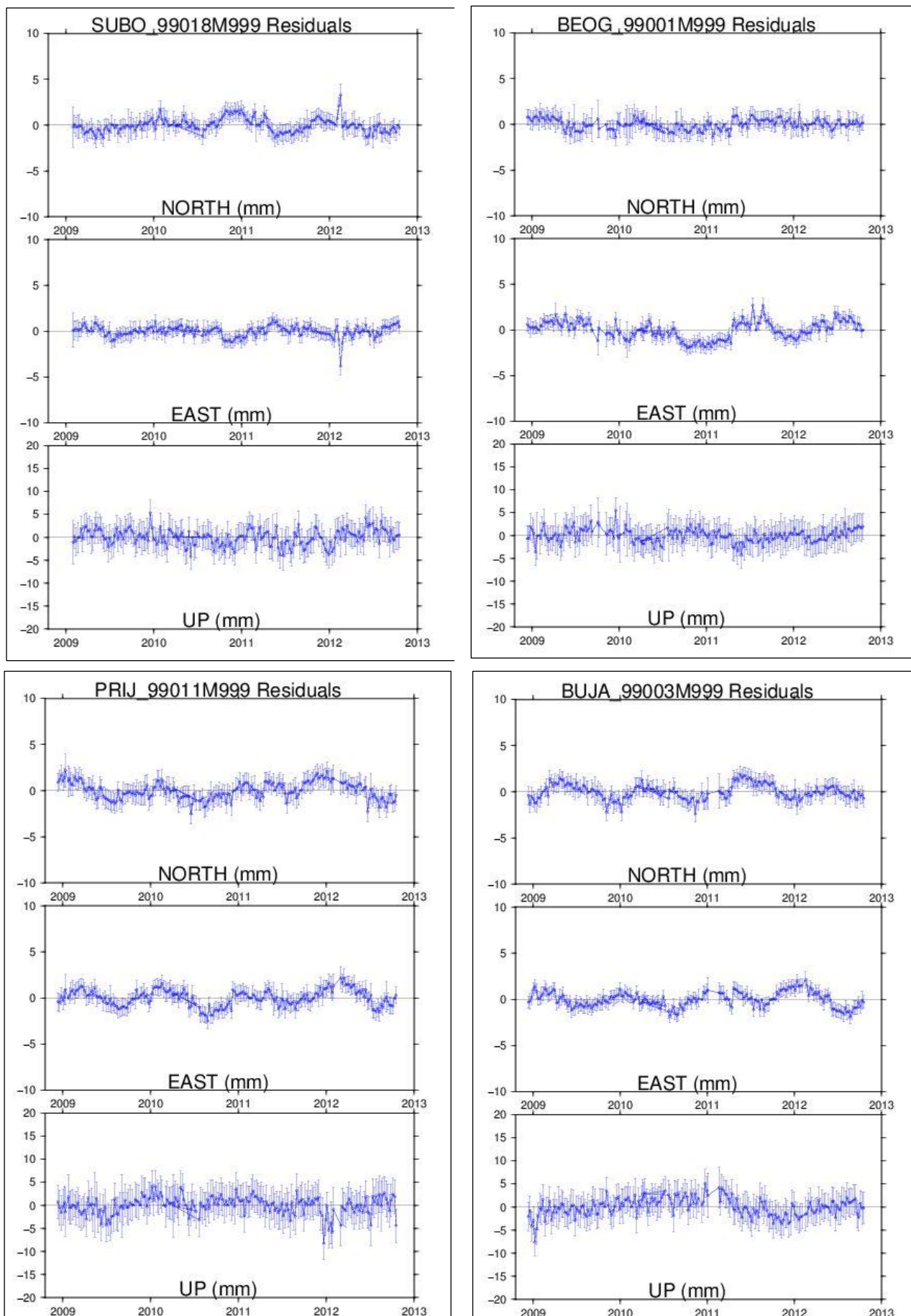


Слика 7.8. Резидуали временских серија станица ITRF2008 оквира WTZR и GRAZ.

Вредност стандарда σ за све три компоненте брзине станице OSJE је мања од 0.2 mm/y и станице SRJV 0.3 mm/y, табела 7.3.



Слика 7.9. Резидуали временских серија GPS станица OSJE, SRJV, KUMA и VELE.



Слика 7.10. Резидуали временских серија GPS станица SUBO, BEOG, PRIJ и BUJA.

Такође, на слици 7.9 (доле) приказани су резидуали станица перманентне мреже БЈР Македоније KUMA и VELE које имају кратак период мерења недовољан за оцене брзина, али се на основу резидуала временских серија може пратити присуство грубих грешака. Међутим, као што је раније поменуто ипак је извршена оцена свих брзина станица које су имале период мерења мањи од 2.5 године и већи од једне године у циљу будућих истраживања и добијања било каквих информација о вредностима брзина тих станица. Добијена оцена стандарда σ за све три компоненте брзине станица KUMA и VELE не прелази вредност од 0.6 mm/y, табела 7.3.

На слици 7.10 приказани су резидуали временских серија перманентних GPS станица Србије SUBO, BEOG, PRIJ и BUJA у којима није детектовано присуство офсета и грубих грешака. Оцењена вредност стандарда σ за све три компоненте брзине станица SUBO, BEOG, PRIJ и BUJA не прелази вредност од 0.2 mm/y, табела 7.3.

Током израде дисертације развијен је метод за детектовање епохе офсета и оцене амплитуде офсета у временским серијама користећи Хефисајд (Heaviside unit step function) степ функцију, Vladojević et al., 2012.

Дисконтинуитети брзина

Као што је описано у претходном делу, за оцењене брзине сваког soln решења се поставља услов да једна станица има једну јединствену брзину. Међутим, уколико се претпоставља да временске серије садрже дисконтинуитете брзина, онда су брзине оба soln решења са леве стране неусловљена. Како станице са дисконтинуитетима брзина немају јединствену дугорочну брзину (једна брзина за свако soln решење), оне се не могу користити и неће се даље разматрати. Ова врста дисконтинуитета није доста честа појава и најчешће је резултат тектонике (нпр. пре или пост сеизмичке деформације) или било ког локалног догађаја који утиче на бетонски стуб станице или на његову основу. Такође, дисконтинуитети брзина не морају да одговарају офсетима у временским серијама станице.

У прелиминарној анализи терестричког оквира ITRF2008 утврђено је на основу резидуала вертикалне компоненте временских серија станице MANA постојање дисконтинуитета брзине који је настао услед земљотреса јачине 7.0 степени у близини ове станице, Collilieux, 2010. Да би се дисконтинуитети правилно детектовали, најважније је да су временске серије што је могуће дуже јер се може десити да се промена брзина замени са дугорочним нелинеарним кретањем станице.

У временским серијама перманентних станица Србије није утврђена промена брзина која би сугерисала на постојање дисконтинуитета, али за извођење закључака потребне су дуже временске серије и потребно је додатно истраживање и утврђивање евентуалног нелинеарног кретања станица или испитивање понашања стубова станица.

Грубе грешке

Када су уклоњени сви офсети и дисконтинуитети, такође морају се уклонити све нетипичне или девијантне тачке познате као грубе грешке у временским серијама. Груба грешка (outlier, одступање) се дефинише као улазно опажање које је приметно далеко од скупа сличних улазних опажања (карактерише се великим резидуалом) и која има релативно велику тежину (мала несигурност) на погрешну оцену

параметра. У односу на догађај офсета, груба грешка представља изненадну али не и перманентну промену положаја станице.

Грубе грешке настају и повезане су са одређеним физичким догађајима који се дешавају на опреми саме станице и њеној околини, услед изолованих грешка моделирања, итд. Како CATREF софтвер фитује временске серије положаја станица линеарним деформационим моделом (тј. константна брзина), могу се појавити тачке са великим резидуалима ако су у временским серијама присутни офсети, нелинеарни сигнали (нпр. сезонски) или постоји висока амплитуда шума. Линеарним моделом опажања се не моделирају оптимално, тј. такозвани пост-фит резидуали немају очекивану вредност једнаку нули, односно постоји пристрасност или систематска грешка у моделу.

Тако да се алгоритмом за детекцију грубих грешака постављањем одговарајућег прага највећи резидуали могу погрешно идентификовати као грубе грешке. Да би се позиција резидуала разматрала као груба грешка, потребно је прво извршити упоређење са целом временском серијом резидуала. Резидуали временских серија свих перманентних GPS станица Србије за све три компоненте су визуелно прегледани у циљу уклањања грубих грешака. Слично као код офсета, грубе грешке се могу пропагирати на временске серије суседних станица и због тога су грубе грешке уклоњене итеративним процесом од већих ка мањим амплитудама резидуала. Као општи критеријум у алгоритму за детекцију је усвојено да се грубе грешке уклањају ако им амплитуде резидуала имају вредност већу од 5 cm и вредност нормализованих резидуала већу од 5, Altamimi, 2013. У временским серијама GPS перманентне мреже Србије од детектованих грубих грешака највише је присутно код станица SRBO (14 %), INDJ (7.4 %), PLAN и GROC (5 %), ZITI, KRUS и GMIL (3 %).

Сезонски сигнали

Анализа GPS временских серија у фреквенцијском спектру показује доминантан сигнал са годишњим и полугодишњим периодом. Оцене амплитуде и фазе таквих сезонских сигнала добијених на основу GPS резултата описане су у бројним радовима, Van Dam et al., 2001. Сезонски сигнали могу представљати право кретање Земљине коре које није моделирано у поступку процесирања GPS података због атмосферских и хидролошких утицаја. Такође, могу представљати и кретања станица узрокована кретањем стубова станица и термичког ширења њиховог темеља. Такође могу представљати и сва не реална кретања станица уопште, која произилазе из сигнала који су настали у случају грешака код процесирања података, нпр. утицај плиме чврсте Земље, утицај оптерећења океана, утицај тропосферског кашњења, корекције фазног центра антена, утицај вишеструке рефлексије сигнала и др.

Као и офсети, сезонски сигнали се могу користити за геофизичка истраживања, али за оцене брзина представљају сметњу и извор шума. Ако се не узиму у обзир сезонски сигнали могу утицати на оцену брзине нарочито за временске серије краће од 4.5 год., Blewitt and Lavallée, 2002. Према томе, потребно је оценити и уклонити годишње и полугодишње сигнале из временских серија заједно са кретањем станица. Укључивање параметара амплитуде и фазе у модел комбинације доводи до повећања формалне несигурности брзине код краћих временских серија, али реалне несигурности брзина ће бити оцењене добијањем коначног решења референтног оквира. За временске серије краће од 2.5 год. и након уклањања периодичних сигнала оцењене брзине нису у потпуности поуздане због

постојања корелације између оцењених параметара периодичних сигнала и тренда, Blewitt and Lavallée, 2002. Из тог разлога се оцењене брзине за временске серије краће од 2.5 год. не могу користити за извођење поузданих закључака или у даљим научним истраживањима.

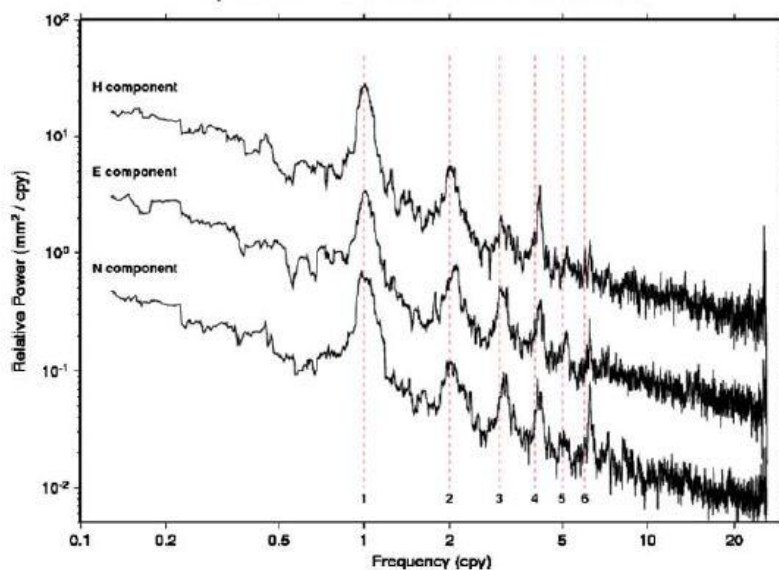
Помоћу CATREF софтвера није могуће истовремено оценити сезонске сигнале и трендове. Уклањање ефекта сезонских сигнала извршено је алгоритмом који је развијен у француској лабораторији за Геодезију (LAREG), Collilieux, 2010. Након што се све временске серије ослободе офсета и грубих грешака, у првом кораку се оцењују амплитуде и фазе за годишње и полугодишње сигнале по методи најмањих квадрата на основу детрендованих резидуала временских серија. У другом кораку се врши процедура комбиновања временских серија где информације о оцењеним параметрима сезонских сигнала имају повратни ефекат. Оцењене вредности амплитуда годишњих сигнала су мање од 3.5 mm са оценом несигурности до 0.2 mm и то за следеће EPN станице: DUBR, AUT1, BZRG, PADO, MATE, ISTA и GSR1 и за следеће станице мреже Србије: KLAD, BUJA, VGRA и PRIJ.

Оцене параметара који карактеришу шум временске серије зависе од присутности периодичних сигнала у временској серији, Amiri-Simkooei et al., 2007. Како би се избегле пристрасне оцене шума, пре започињања MLE (Maximum Likelihood Estimation) анализе неопходно је уклонити било какав значајан периодични сигнал из GPS временских серија. Занемаривање сезонских сигнала може да доведе до већих вредности пристрасних оценама спектралне густине, Мао et al., 1999. Један од метода који се користи за утврђивање постојања преосталих периодичности је FFT метод (Fast Fourier Transform) за испитивање спектра у фреквенцијском домену на основу резидуала временских серија.

Прелиминарна оцена параметара који карактеришу шум временских серија извршена је на основу временских серија координата GPS станица АГРОС мреже Србије са периодом од 1.4 год. почевши од 1. јануара 2006. год. Добијени резултати су показали да је у временским серијама координата доминантан бели шум и да је за добијање оцена параметара годишњих и полугодишњих сигнала свакако потребан дужи временски период мерења, Blagojević and Vasilic, 2013.

Испитивања присуства периодичних сигнала у GPS временским серијама описана су у радовима више аутора. На основу резултата 167 IGS станица у периоду од 1996.0 до 2006.0 оцењен је периодограм користећи све временске серије спектра, Ray et al., 2008. Добијени периодограм за компоненте N, E, U приказан је на слици 7.11. На овој слици јасно се уочава 5 пикова који издвајају позадински шум са близу 1, 2, 3, 4 и 6 циклуса годишње (сру), респективно. Међутим, ови пикови нису хармоници са фреквенцијом од 1 сру већ хармоници различите основне фреквенције. У свом раду Ray et al., 2008 је користећи 6. хармоник оценио да основна фреквенција има вредност од 1.04 ± 0.01 сру или период од 351.2 ± 2.8 дана. Овакве периодичности нису пронађене у другим просторним геодетским техникама (VLBI и SLR) нити у геофизичким моделима за утицаје оптерећења флуида (атмосфера, континенталне воде и др.). Односно, ове периодичности нису права кретања станица тако да ће представљати GPS систематску грешку. Извор ове систематске грешке је вероватно повезан са GPS "драконским" годишњим периодом, тј. периодом револуције GPS констелације у инерцијалном простору у односу на Сунце, Ray et al., 2008. Присутност овог ефекта у положајима временских серија може се одразити преко грешака мултипата насталих због окружења станице, Ray et al., 2008. Ова систематска периодична грешка треба да се моделира у поступку процесирања података у функционалном моделу или, ако то није могуће

мора бити уклоњена пре анализе шума. У супротном случају биће обухваћена стохастичким моделом у анализи садржаја шума.



Слика 7.11. Периодограм резидуала временских серија IGS станица од 1996.0-2006.0.

7.4.5 Поље брзина станица терестричког референтног оквира

ITRF2008_SRB_UoB

Поље брзина и поступак изабора станица које су изабране за даљу анализу одређен је на основу временског периода мерења и оцењених вредности несигурности брзина. Поље брзина није могло бити упоређено са неким претходним пољем брзина због недостатка информација о томе. Геодетски квалитет оцењених брзина је само процењен помоћу упоређења са глобалним ITRF2008 решењем за осам станица датума.

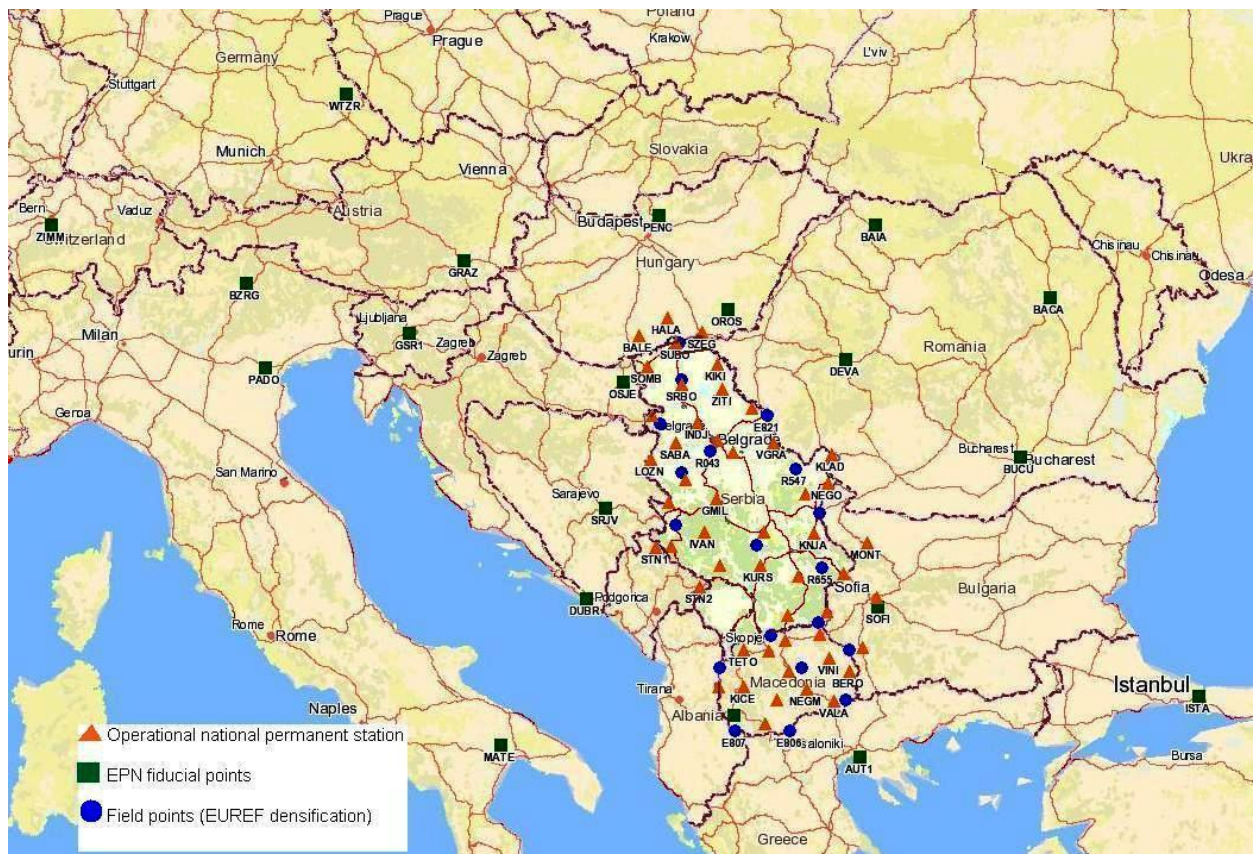
На слици 7.12 приказана је географска дистрибуција станица перманентних мрежа која се састоји од укупно 73 GPS станице. Укупни временски период мерења станица, од децембра 2008. год. до октобра 2012. год., односно од 1509-1710 GPS недеље, износи 3.87 године. Међу 73 станице је 20 EPN станица EUREF реализације референтног оквира, 32 перманентне станице Србије, 13 перманентних станица БЈР Македоније (укупно 65) и 8 станица које припадају перманентним мрежама Мађарске и Бугарске.

Осам станица глобалног ITRF2008 решења коришћено је за реализацију референтног оквира са следећим вредностима хоризонталних брзина: BUCU (2.63 cm/y), ISTA (2.70 cm/y), MATE (3.01 cm/y), ZIMM (2.56 cm/y), WTZR (2.56 cm/y), GRAZ (2.68 cm/y), SOFI (2.69 cm/y) и DUBR (2.89 cm/y), са вредношћу стандардног одступања од 0.1 mm/y, Altamimi et al., 2011 (слика 7.13). Број и распоред станица глобалног ITRF2008 решења би требао да буде већи у циљу побољшала геометрије мреже и доприноса регионалном пољу брзина Европе, Bruyninx et al., 2009.

Максималне вредности стандарда компоненти брзина EPN станица износе од 0.11 mm/y и 0.12 mm/y за станице BUCU и ISTA до 0.27 mm/y и 0.28 mm/y за станице SRJV и OROS. Од 32 станице перманентне мреже Србије 24 станице (BEOG, BOR_, BUJA, DIMI, GROG, INDJ, KLAB, KNJA, KURS, LESK, NEGO, PRIJ, SOMB, SRBO, SUBO, VALJ, VGRA, ZITI, BATO, PLAN, BOSI, SABA, LOZN,

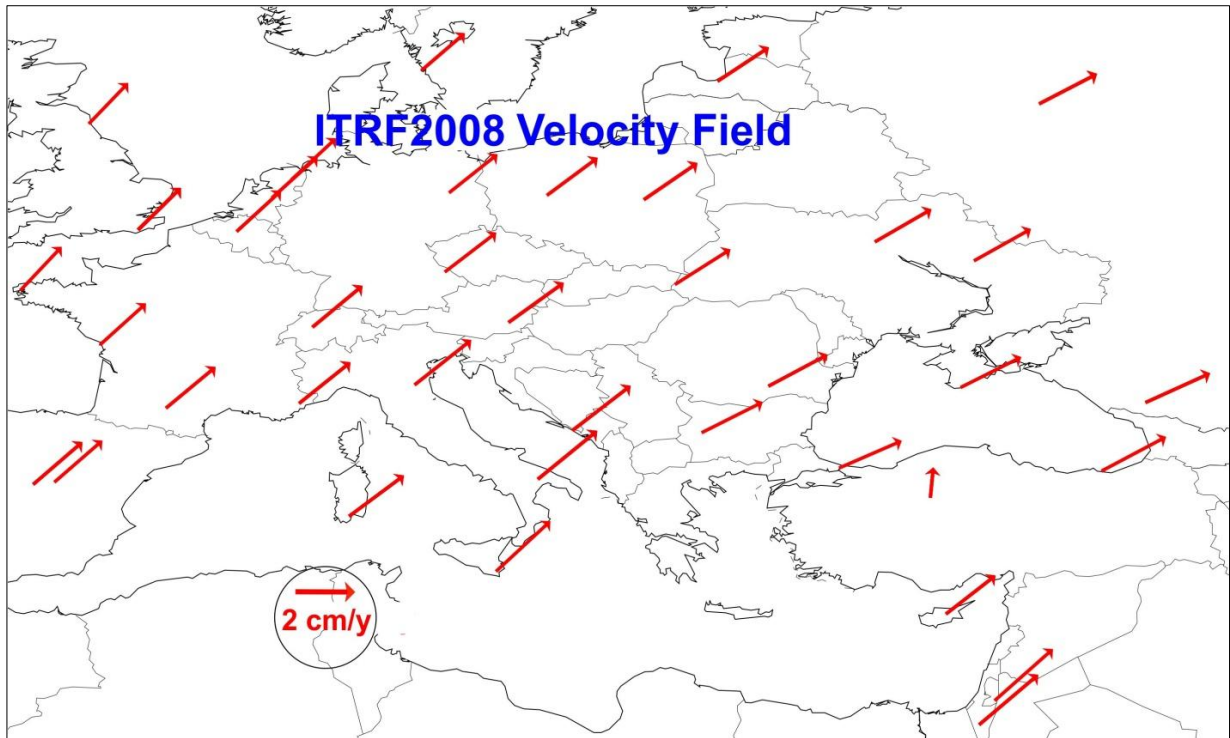
GMIL) имају временски период мерења преко 2.5 године што је неопходан минимум за оцену брзина станица а за осталих 8 станица (BAJI, IVAN, KIKI, KRUS, NPAZ, SID_, KRVK, NSVK) мерења покривају временски период од 1.5 година и мање. Од 24 станице са минималним периодом мерења од 2.5 године, 5 станица имају лош квалитет антена и то станице: BOSI, INDJ, GMIL, PLAN и SRBO као и станица SID_ са периодом мерења мањим од 1.5 годину. Станица ZITI је садржала велики број офсета (стандард компоненти брзина износи до 0.79 mm/y) тако да за осталих 18 станица (BEOG, BOR_, BUJA, DIMI, GROC, KLAD, KNJA, KURS, LESK, NEGO, PRIJ, SOMB, SUBO, VALJ, VGRA, BATO, SABA, LOZN) максималне вредности стандарда компоненти брзина износе од 0.15 mm/y за станицу BEOG до 0.44 mm/y за станицу GROC, табела 7.3.

Две перманентне станице БЈР Македоније KICE и PRIL имају временски период мерења мањи од једне године, док остале имају временски период мањи од 2.5 год. Такође, 8 станица које припадају перманентним мрежама Мађарске и Бугарске: BALE, HALA, MONT, SRED, STN1, STN2, SZEG, BLAG имају временски период мерења мањи од 0.2 год.



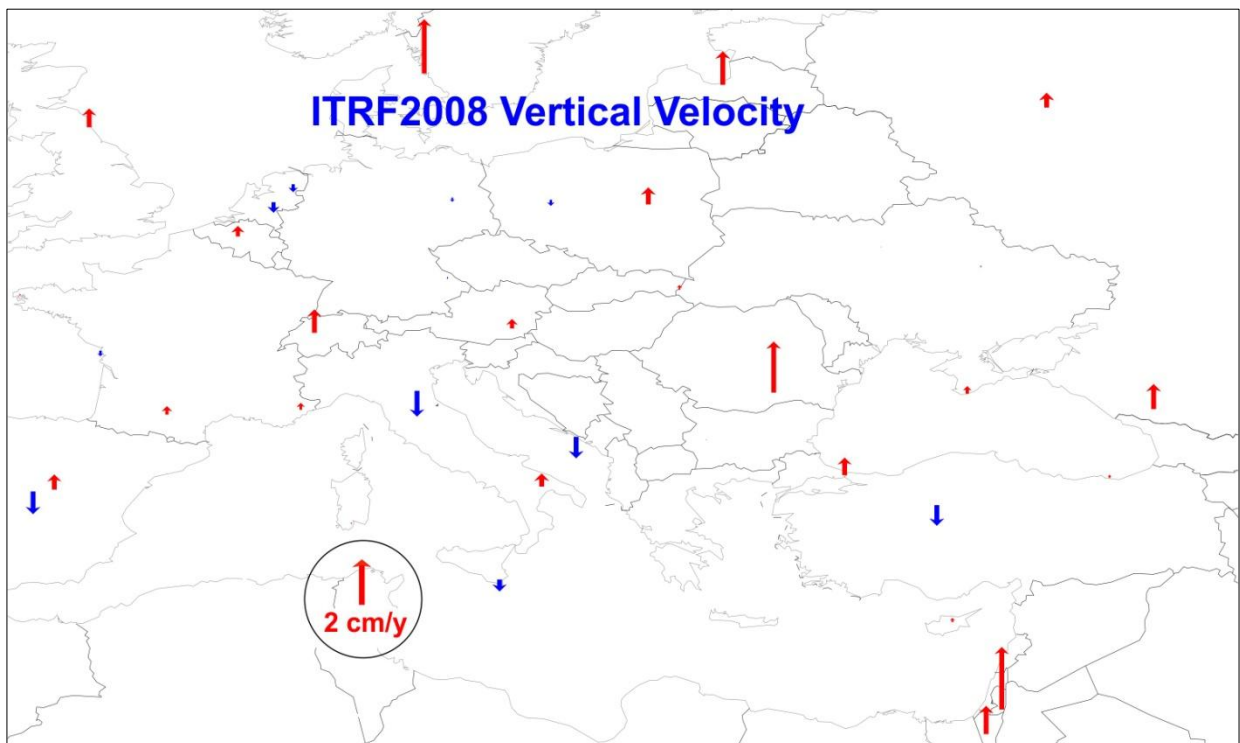
Слика 7.12. Географска дистрибуција GPS станица ITRF2008_SRB_UoB.

Поље хоризонталних брзина станица глобалног референтног оквира ITRF2008 приказано на слици 7.13 описује кретање дела региона Европске плоче. Правац хоризонталних брзина станица које припадају тзв. "стабилном" делу Европске плоче је југозапад-североисток са просечном вредношћу хоризонталних брзина осам датумских станица од 2.71 cm/y.



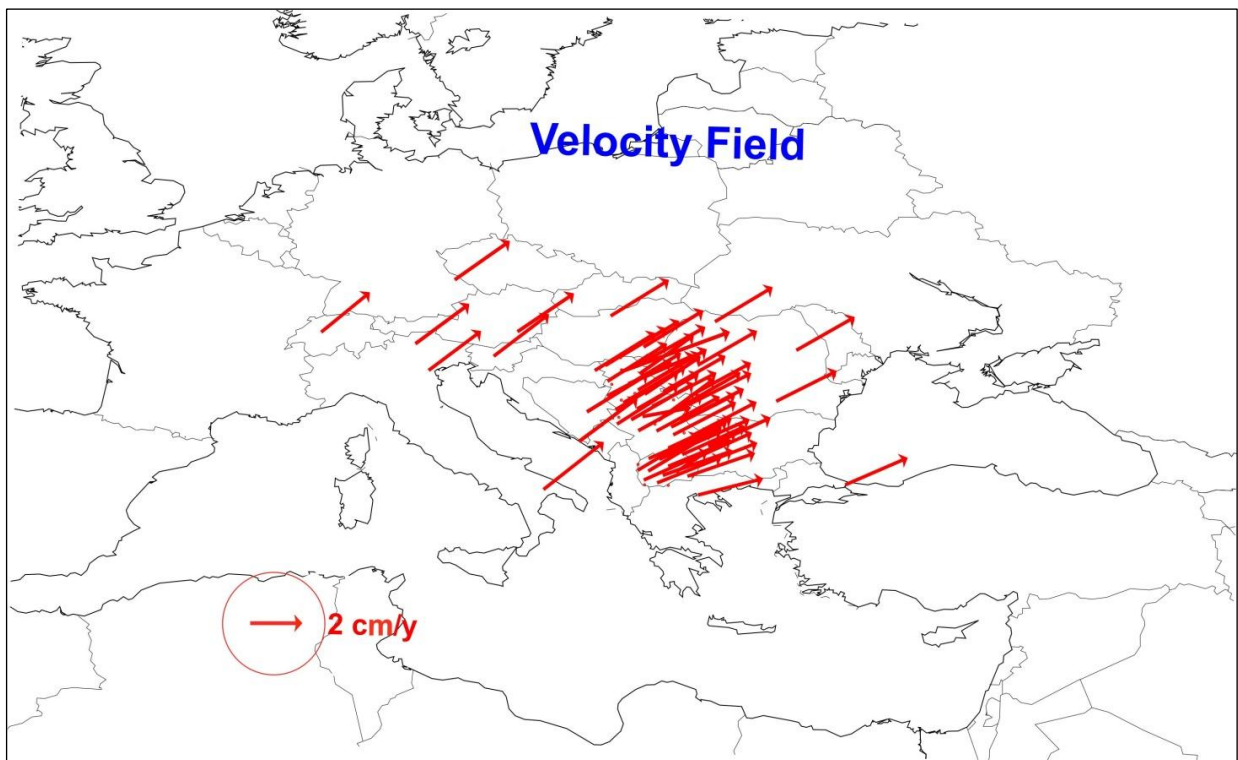
Слика 7.13. Поље хоризонталних брзина станица референтног оквира ITRF2008.

На слици 7.14 приказане су вертикалне компоненте брзина станица глобалног референтног оквира ITRF2008 у области Европе а осам станица глобалног решења коришћених за реализацију референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB имају следеће вредности вертикалних брзина: BUCU (2.69 cm/y), ISTA (0.94 cm/y), MATE (0.68 cm/y), ZIMM (1.23 cm/y), WTZR (-0.10 cm/y), GRAZ (0.48 cm/y), SOFI (-0.02 cm/y) и DUBR (-1.13 cm/y).



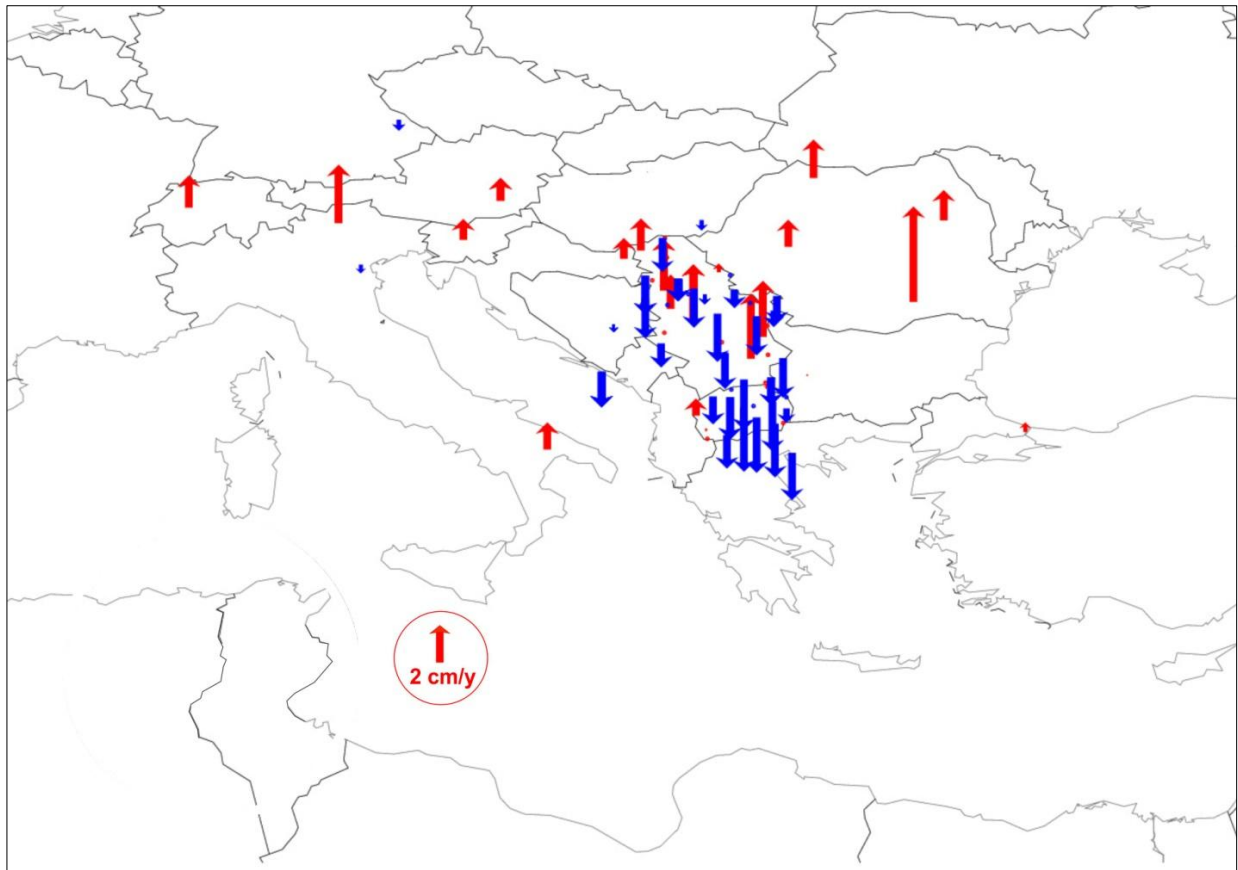
Слика 7.14. Поље вертикалних брзина станица референтног оквира ITRF2008.

Слика 7.15 приказује оцењене хоризонталне брзине станица референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB које описују локално поље брзина области коју покривају. Све брзине су усмерене од југозапада према североистоку са максималном вредношћу хоризонталне брзине од 3.02 cm/y за станицу MATE у Италији. Просечна вредност хоризонталних брзина станица износи 2.75 cm/y. Максималне вредности стандарда компоненти брзина осам датумских станица референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB износе: BUCU (0.11 mm/y), ISTA (0.12 mm/y), MATE (0.13 mm/y), ZIMM (0.14 mm/y), WTZR (0.16 mm/y), GRAZ (0.19 mm/y), SOFI (0.21 mm/y) и DUBR (0.23 mm/y), табела 7.3. Станице које описују поље брзина области коју покривају показују конзистентност хоризонталних брзина а тиме и хомогеност поља брзина те области.



Слика 7.15. Поље хоризонталних брзина станица референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB.

Слика 7.16 приказује оцењене вертикалне брзине станица са максималном брзином уздицања која износи 3.20 cm/y код станице BUCU у Румунији. Максимално слегање износи -3.09 cm/y код станице BUJA у Србији. Постоји неколико оцењених брзина станица које нису конзистентне са брзинама околних станица (позитиван предзнак вертикалне брзине) и то су следеће станице SOMB, VALJ, SABA, KNJA и LESK, табела 7.4. Ово може указивати на присуство неких локалних ефеката што свакако треба истражити али такође треба имати у виду да антене станица перманентне мреже Србије немају примењен модел апсолутне или релативне калибрације.



Слика 7.16. Поље вертикалних брзина станица референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB.

7.4.6 Референтни оквир EPN08_SRB_UoB

Решење референтног оквира EPN08_SRB_UoB добијено је по истом математичком моделу као и решење референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB примењујући принцип минималних услова на трансформационе параметре оквира с тим што је за екстерни референтни оквир коришћен референтни оквир EUREF реализација EPN_A_IGb08. Сва детектована одступања, офсети, дисконтинуитети и периодични сигнали у временским серијама координата станица искључени су итеративним поступком код предходног решења референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB.

Укупан број датумских тачака референтног оквира EPN08_SRB_UoB и EUREF референтног оквира EPN_A_IGb08 је 19. Ових 19 EPN станица које се налазе у окружењу Србије су приликом генерисања укључене у индивидуална SNX решења. То су следеће станице: BUCU (Bucuresti), GRAZ (Graz), ISTA (Istanbul), MATE (Matera), SOFI (Sofia), WTZR (Bad Koetzing), ZIMM (Zimmerwald) и DUBR (Dubrovnik) (исте у ITRF2008), AUT1 (Thessaloniki), BACA (Bacau), BAIA (Baia Mare), DEVA (Deva), GSR1 (Ljubljana), ORID (Ohrid), OROS (Oroshaza), OSJE (Osijek), PENC (Penc), SRJV (Sarajevo) и BZRG (Bolzano–Bozen). Датумске станице имају равномеран распоред у односу на перманентну мрежу Србије, слика 7.12. Дистрибуција EPN станица и њихов број је довољан да би се референтни оквир EPN08_SRB_UoB изразио у EUREF референтном оквиру EPN_A_IGb08.

Итеративним поступком у CATREF софтверу су две станице OROS и SRJV, код којих су резидуали компоненти положаја прелазили вредност од 1 cm, искључене са листе датумских станица. Тако је добијено решење референтног

оквира EPN08_SRB_UoB дефинисано помоћу 17 датумских тачака екстерног референтног оквира EPN_A_IGb08. На основу стандардних одступања координата за 39 станица, тј. 19 станица перманентне мреже Србије и 20 EPN станица процењена је тачност референтног оквира EPN08_SRB_UoB. Просечна вредност стандардних одступања по координатама X, Y и Z износе 0.26 mm, 0.18 mm и 0.25 mm, респективно, док просечна вредност стандардних одступања компоненти брзина V_x , V_y и V_z износе 0.19 mm/y, 0.09 mm/y и 0.18 mm/y, респективно. Добијена оцена вредности σ_0 јединице тежине износи 1.03.

Резултати упоређења оквира EPN08_SRB_UoB и EPN_A_IGb08 приказани су у табели 7.5. Како је распоред и број EPN станица већи него у случају екстерног референтног оквира ITRF2008 добијене вредности несигурности параметара трансформације θ између оквира EPN08_SRB_UoB и оквира EPN_A_IGb08 имају мање вредности и износе: 8.5 mm, 5.9 mm и 7.7 mm респективно за три параметра транслације T_x, T_y, T_z , $0.780 \cdot 10^{-9}$ за параметар размере D, 0.172 mas, 0.330 mas и 0.196 mas респективно за параметре ротације R_x, R_y, R_z за референтну епоху $t_0 = 10.317$. Већи број датумских тачака равномерно распоређених у односу на мрежу Србије, тј. 17 EPN станица, је очекивано произвео бољу сагласност између ова два оквира. Међутим, оцењене WRMS вредности у локалном координатном систему су веће и износе по позицији 0.7 mm за компоненте N и E и 0.8 mm за компоненту U; оцењене WRMS вредности брзине износе 0.2 mm/y за компоненте E и U и 0.1 mm/y за компоненту N.

Веће WRMS вредности од вредности добијених у случају екстерног референтног оквира ITRF2008, су последица већих вредности резидуала 17 EPN датумских тачака. Ово сугерише да је избор датумских станица веома значајан у смислу њиховог квалитета и дужине извршених мерења.

Табела 7.5. Резултати упоређења референтног оквира EPN08_SRB_UoB и EUREF реализације EPN_A_IGb08 референтног оквира.

Solution	T_x	T_y	T_z	D	R_x	R_y	R_z	Epoch
	[mm]			$[10^{-9}]$	[mas]			
	\dot{T}_x	\dot{T}_y	\dot{T}_z	\dot{D}	\dot{R}_x	\dot{R}_y	\dot{R}_z	
	[mm/y]			$[10^{-9}/y]$	[mas/y]			
EPN08_SRB_UoB	0.00	0.00	0.00	-0.000	0.000	-0.000	-0.000	10:317
+/-	8.50	5.90	7.70	0.780	0.172	0.330	0.196	
VT	-0.00	-0.00	0.00	0.000	0.000	-0.000	-0.000	
+/-	8.50	5.90	7.70	0.780	0.172	0.330	0.196	
EPN_A_IGb08	0.0	0.0	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000	10:317
+/-	0.0	0.0	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000	

Solution	N	WRMS-Pos.			WRMS-Vel.			VF	MSF	Epoch
		E	N	U	E	N	U			
		mm			mm/y					
EPN08_SRB_UoB	17	0.7	0.7	0.8	0.2	0.1	0.2	0.00	1.000	10:317
EPN_A_IGb08	17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.010	10:317
Sigma_0=		0.00186								

7.4.7 Упоредње референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB и референтног оквира EPN08_SRB_UoB

На основу резултата упоређења ITRF2008_SRB_UoB референтног оквира Србије израженог у Међународном оквиру ITRF2008 и EPN08_SRB_UoB референтног оквира Србије израженог у Европском EUREF оквиру, добијене су следеће вредности разлика транслационих параметара, односно разлике положаја геоцентра два оквира износе -0.7 mm, 1.4 mm и -0.6 mm по X, Y и Z оси, респективно. Брзине транслационих параметара износе 0.0 mm/y, 0.3 mm/y и 0.1 mm/y по X, Y и Z оси (табела 7.6). На основу упоређења два референтна оквира може се извести закључак да имају сагласност бољу од 1 mm по X и Z оси и 1.5 mm по Y оси.

Један од примера постизања значајних резултата сагласности положаја геоцентра су решења референтних оквира добијених од стране 9 Центара за Анализу (AC) IGS сервиса на основу репроцесираних података за период од 1994-2015 за 1848 GNSS станица која износе $\approx 2-5$ mm по X и Y оси и $\approx 5-10$ mm по Z оси, Rebischung et al., 2015.

Табела 7.6 приказује WRMS вредности разлика положаја у епохи 10.317 као и WRMS вредности разлика брзина. За 145 заједничких тачака између два референтна оквира, WRMS вредности на основу добијених разлика по положају износе 0.3 mm, 0.3 mm, 0.8 mm за компоненте E, N и U, као и 0.1 mm/y, 0.0 mm/y, 0.1 mm/y за компоненте E, N и U.

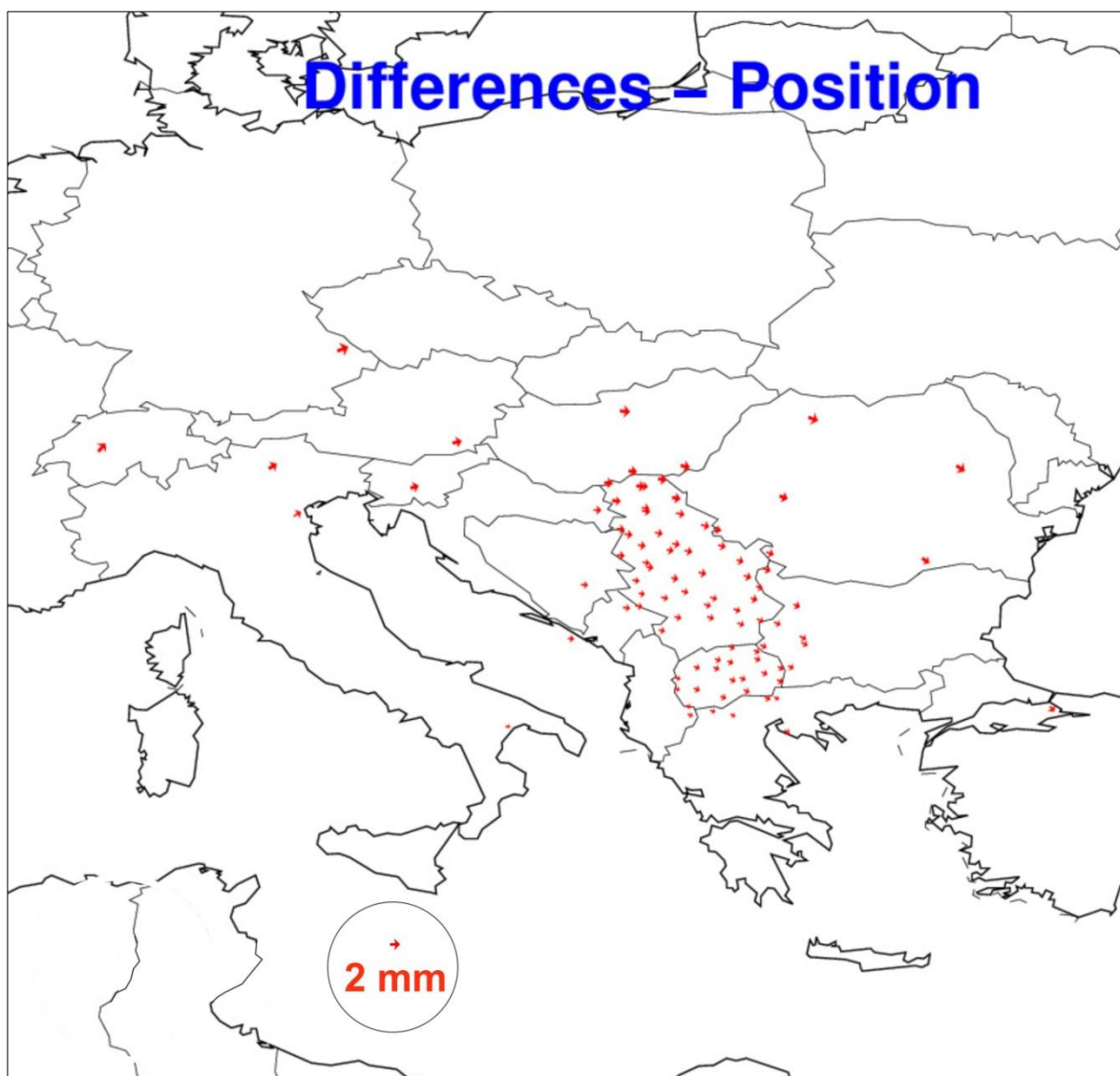
Табела 7.6. Резултати упоређења референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB и референтног оквира EPN08_SRB_UoB.

Solution	T _x	T _y	T _z	D	R _x	R _y	R _z	Epoch		
	[mm]			[10 ⁻⁹]	[mas]					
	\dot{T}_x	\dot{T}_y	\dot{T}_z	\dot{D}	\dot{R}_x	\dot{R}_y	\dot{R}_z		y	
	[mm/y]			[10 ⁻⁹ /y]	[mas/y]					
ITRF2008_SRB_UoB	-0.70	1.40	-0.60	0.000	0.000	0.000	0.000	10:317		
+/-	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000			
VT	0.00	0.30	0.10	0.000	0.000	0.000	0.000			
+/-	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000			
EPN08_SRB_UoB	0.0	0.0	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000	10:317		
+/-	0.0	0.0	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000			
Solution	N	WRMS-Pos.			WRMS-Vel.			VF	MSF	Epoch
		E	N	U	E	N	U			
		mm			mm/y					
ITRF2008_SRB_UoB	145	0.3	0.3	0.8	0.1	0.0	0.1	0.00	1.000	10:317
EPN08_SRB_UoB	145	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.010	10:317
Sigma_0=		0.00032								

Имајући на уму да терестрички референтни оквир ITRF2008 представља стандард референтних оквира овим упоређењем се такође потврђује и квалитет оцене Европског EUREF референтног оквира.

На слици 7.17 су приказане разлике хоризонталних положаја станица између два референтна оквира. Максимална вредност хоризонталне разлике положаја износи 2.5 mm за станицу WTZR. Разлике имају приближно правац запад-исток.

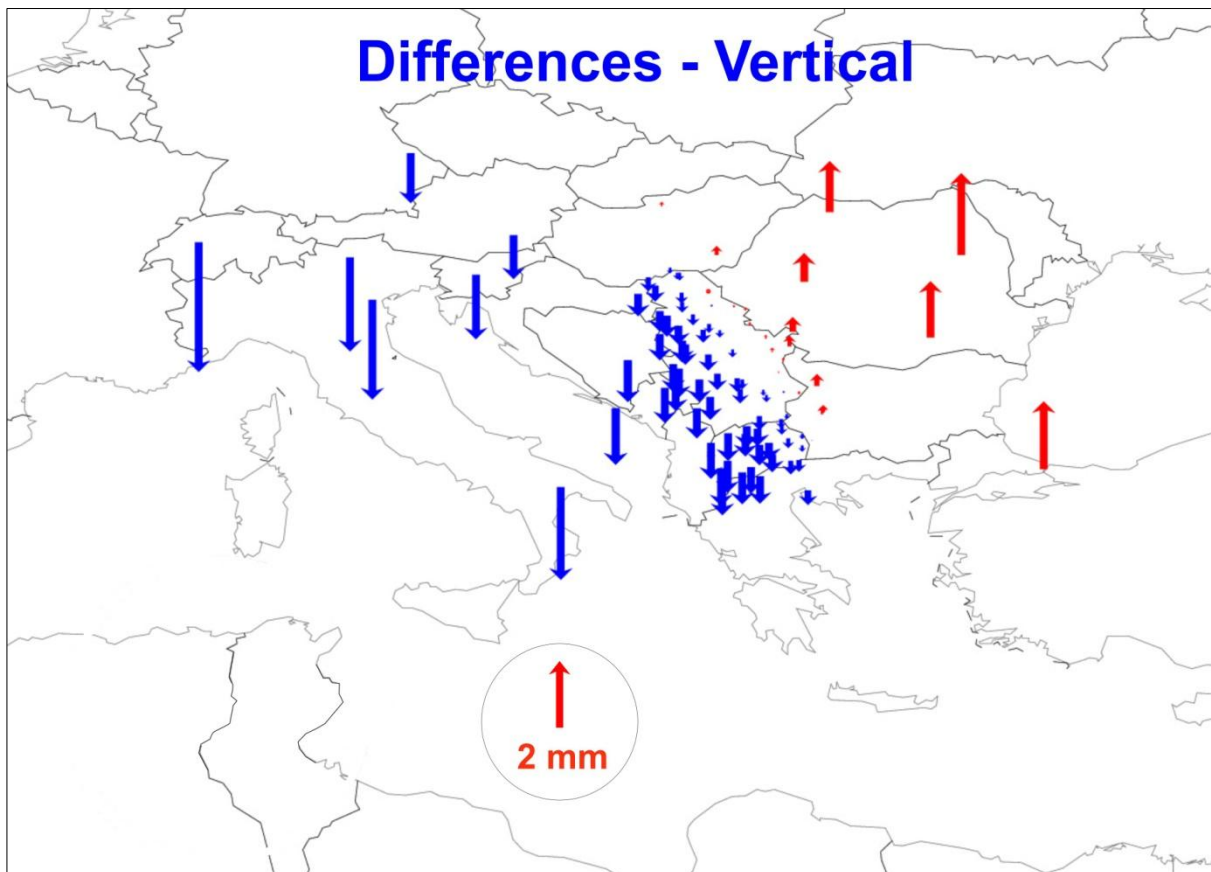
Правац разлика хоризонталних положаја може се објаснити тиме да је максимална вредност разлика компоненти транслационих параметара између два оквира по компоненти T_y која износи 1.4 mm.



Слика 7.17. Разлике хоризонталних положаја станица два референтна оквира ITRF2008_SRB_UoB и EPN08_SRB_UoB.

На слици 7.18 су приказане разлике вертикалних компоненти положаја станица између референтних оквира ITRF2008_SRB_UoB и EPN08_SRB_UoB. Максималне разлике вертикалних компоненти положаја износе -4.3 mm у северозападном делу мреже за станицу ZIMM и $+2.7\text{ mm}$ у североисточном делу мреже за станицу ВАСА.

Вредности разлика вертикалних компоненти положаја станица могу се објаснити постојањем разлика брзина трансационих параметара између два оквира и та разлика је максимална по компоненти \dot{T}_y и износи 0.3 mm/y . Такође на основу разлика положаја станица, добијене WRMS вредности достижу максималан износ за вертикалну U компоненту од 0.8 mm . На основу добијених резултата препорука је да се приликом процесирања GPS перманентне мреже за добијање локалног референтног оквира, а потом за његово изражавање у глобалном референтном оквиру, користи више станица терестричког референтног оквира ITRF2008 које имају глобални распоред, Altamimi, 2013.



Слика 7.18. Разлике вертикалних компоненти положаја станица два референтна оквира ITRF2008_SRB_UoB и EPN08_SRB_UoB.

7.5 Стабилност референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB у односу на референтни стандард ITRF2008

7.5.1 Терестрички референтни оквир ITRF2008

Захваљујући континуираним побољшањем улазних података и стратегијом за реализацију терестрички референтни оквир ITRF2008 представља последње решење (у време писања овог текста) у низу унапређених решења ITRF. У поређењу са претходним решењем референтног оквира ITRF2005, постигнуто је побољшање решења оквира ITRF2008 не само у смислу прецизности положаја и брзина станица већ и побољшања параметара дефиниције оквира. Квалитет решења референтног оквира ITRF2008 добијеног на основу резултата четири просторне технике посебно зависи од два главна фактора чији је утицај значајан на добијено решење, и то:

- квалитет, број и распоред станица на којима је оперативно више техника које представљају неопходну везу између појединачних референтних оквира,
- квалитет индивидуалних решења добијених процесирањем мерења просторних техника која су укључена у комбинацију и њихова способност детектовања физичких параметара терестричког оквира (почетак, односно центар масе Земље и размера).

Процена квалитета терестричког референтног оквира изводи се на основу његових унутрашњих карактеристика, почетка, размере, оријентације и његове еволуције у времену. За добијање решења референтног оквира ITRF користи се CATREF софтвер који је опширније је описан у предходним поглављима. Стратегија реализације терестричког референтног оквира ITRF2008 изводи се кроз два корака:

- 1) добијање оцене дугорочног решења положаја станица у референтној епохи, брзина и дневних вредности ЕОР параметара на основу индивидуалних временских серија за сваку технику и
- 2) комбиновање добијених дугорочних решења четири технике заједно са решењима локалних мрежа код станица на којима је оперативно више техника. Две главне једначине математичког модела које обухватају 14 параметара трансформације сличности, положаје и брзине станица и ЕОР параметре имају следећи облик:

$$\begin{aligned} X_s^i &= X_c^i + (t_s^i - t_0) \dot{X}_c^i \\ &+ T_k + D_k X_c^i + R_k X_c^i \\ &+ (t_s^i - t_k) [\dot{T}_k + \dot{D}_k X_c^i + \dot{R}_k X_c^i] \end{aligned} \quad (7.28)$$

$$\dot{X}_s^i = \dot{X}_c^i + \dot{T}_k + \dot{D}_k X_c^i + \dot{R}_k X_c^i$$

$$\begin{aligned} x_s^p &= x_c^p + R2_k \\ y_s^p &= y_c^p + R1_k \\ UT_s &= UT_c - \frac{1}{f} R3_k \\ \dot{x}_s^p &= \dot{x}_c^p \\ \dot{y}_s^p &= \dot{y}_c^p \\ LOD_s &= LOD_c \end{aligned} \quad (7.29)$$

где, за сваку тачку i , вектори X_s^i (у епохи t_s^i) и \dot{X}_s^i означавају положаје и брзине решења које је добијено техником s , вектори X_c^i (у епохи t_0) и \dot{X}_c^i означавају положаје и брзине оцењеног коначног (комбинованог) решења c . За сваки индивидуални оквир k , који је имплицитно дефинисан решењем s , оцењени су следећи параметри: D_k - фактор размере, T_k - вектор translације и R_k - матрица ротације, као и изводи ових параметара по времену $\dot{D}_k, \dot{T}_k, \dot{R}_k$. Вектор translације T_k се састоји од три компоненте почетка референтног оквира T_x, T_y, T_z , матрица ротације R_k од три параметра ротације R_x, R_y, R_z оса X, Y, Z референтног оквира, у t_k конвенционално изабраној епохи седам параметара трансформације.

За добијање решења референтног оквира користи се линеаризовани облик једначине опште трансформације сличности (7.28), занемаривањем чланова другог и вишег реда, IERS Convention, Petit and Luzum 2010. Једначина (7.28) обухвата положаје и брзине станица а једначина (7.29) уводи вредности параметара EOP користећи координате пола x_s^p, y_s^p и универзално време UT_s као и њихове дневне промене \dot{x}_s^p, \dot{y}_s^p и LOD_s . Веза између коначног решења референтног оквира и EOPs је остварена помоћу три параметра ротације који се појављују у прва три реда једначине (7.29). Три последње линије једначине (7.29) представљају изводе по времену прве три линије исте једначине, чиме су обухваћени чланови промене ротације.

За оцену дугорочних решења за сваку индивидуалну технику користи се прва линија једначине (7.28) и цела једначина (7.29) ригорозном обрадом временских серија положаја станица и EOP вредности индивидуалних техника. Овде нису укључене брзине параметара translације, размере и ротације јер брзине станица нису оцењиве на недељној основи. Дакле, дефиниција референтног оквира са придруженим резултујућим дугорочним решењем мора бити прецизна (састоји се од положаја станица у референтној епохи, брзина станица и вредности EOP параметара). Параметри трансформације су оцењени између сваког недељног оквира и дугорочног оквира, тако да је потребно дефинисати дугорочне вредности референтног оквира: почетак, размеру, оријентацију и њихове временске еволуције и према томе допунити недостатак ранга нормалних једначина. Кључно је да дугорочна решења треба да представљају средњу вредност почетка и средњу вредност размере просторних геодетских техника. Из тог разлога се примењују једначине минималних услова које се користе да би се сачувало дугорочно решење почетка добијено SLR и DORIS техником и дугорочно решење размере добијено на основу VLBI, SLR и DORIS технике.

Једна од главних предности временских серија као улазних података за решење ITRF јесте способност да се идентификују дисконтинуитети у положајима станица који углавном настају због промене опреме и земљотреса. У решењу оквира ITRF2008 постоји укупно 638 дисконтинуитета од чега је 550 везано за GPS технику. За генерисање дугорочних решења GPS технике, размотрени су различити положаји станица пре и после сваког догађаја. Суседне станице у оквиру истог места и више сегмената код дисконтинуитета у временским серијама су подешене да имају исте брзине, осим у случајевима где су се догодили велики земљотреси. Анализом временских серија може се проценити унутрашња прецизност решења за сваку технику на основу средњег квадратног корена пондерисаних резидуала недељних временских серија (WRMS). Резултати медијане WRMS вредности решења четири технике у односу на оцењена дугорочна решења по компонентама E, N и U износе: за GPS технику 1.6 mm, 1.7 mm и 4.4 mm; за VLBI технику 2.9 mm, 3.0

mm и 7.4 mm; за SLR технику 7.9 mm, 9.4 mm, 7.9 mm и за DORIS технику 11.9 mm, 10,9 mm и 13.3 mm.

Други корак реализације ITRF2008 оквира састоји се од комбиновања дугорочних решења четири технике заједно са решењима локалних мрежа код станица на којима постоји више техника, где је посвећена посебна пажња питању релативних тежина глобалних и локалних решења. Једна од тешкоћа локалних мерења је прецизно одређивање ексцентрицитета између пресека оса VLBI или SLR телескопа и физичке тачке на земљи, Sarti et al., 2009. Тежине индивидуалних решења су итеративно одређене у односу на добијену оцену фактора варијансе. Због неуједначености између глобалних решења и малих локалних мрежа станица потребно је адекватно применити математички или статистички метод оцене компоненти варијанси. У том циљу, прво су у дугорочним решењима четири технике уведене одговарајуће тежине у функцији фактора варијансе добијеног током индивидуалног изравнања временских серија за сваку технику по једначини:

$$\sigma_{VF}^2 = \frac{\sum_s^S v_s^T P_s v_s}{f} \quad (7.30)$$

где је v_s вектор резидуала координата станица решења s , P_s матрица тежина решења (инверзна варијанс-коваријанс матрица), S је укупан број решења у изравнању, f број степени слободе у изравнању по методи најмањих квадрата. Фактор варијансе, као функција резидуала нормализовањем преко матрица тежина, сматра се статистичким показатељем укупног квалитета решења оквира. Адекватне тежине индивидуалних решења треба да доведу до фактора варијансе блиског јединици. Ако долази до повећања фактора варијансе у итерацијама, то је онда показатељ повећања нормализованих резидуала што имплицира неодговарајуће тежине индивидуалних решења укључених у комбинацију или (и) постојање велике грубе грешке, Bähr et al., 2007.

7.5.2 Почетак референтног оквира ITRF2008 и почетак референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB

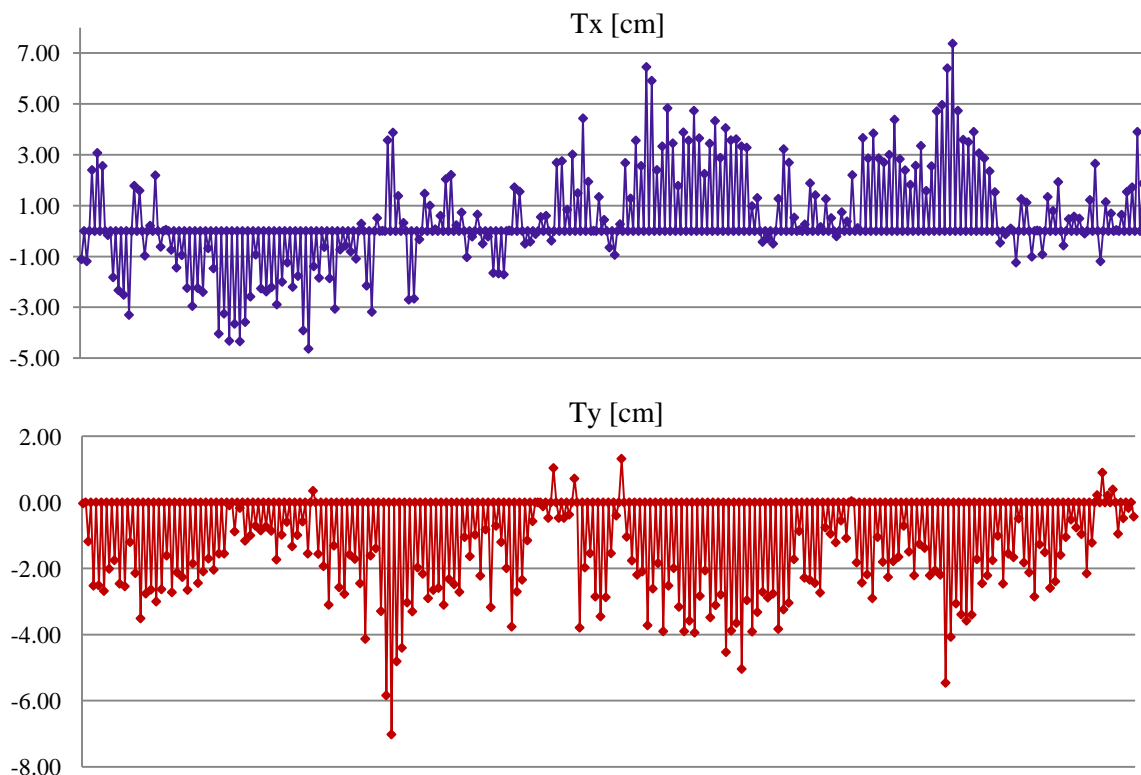
Почетак терестричког референтног оквира ITRF2008 дефинисан је параметрима трансације чије су вредности једнаке нули у епохи 2005.0 и параметрима брзине трансације чије су вредности једнаке нули у односу на ILRS SLR временске серије. У циљу процене квалитета одређивања SLR почетка, извршено је упоређење компоненти почетка између референтних оквира ITRF2008 и ITRF2005. Разлике компоненти трансације за епоху 2005.0 из ITRF2008 у ITRF2005 износе -0.5 mm, -0.9 mm и -4.7 mm по X, Y и Z осима, респективно, табела 7.7. Разлика брзине трансације износи 0.3 mm/уг по X осима и разлике брзине трансације су једнаке нули по Y и Z осима. Разлике компоненти трансације указују да је сагласност почетка између два референтна оквира на нивоу или боља од једног центиметра у току целог временског распона SLR опажања и сматра се нивоом тачности почетка терестричког референтног оквира ITRF2008.

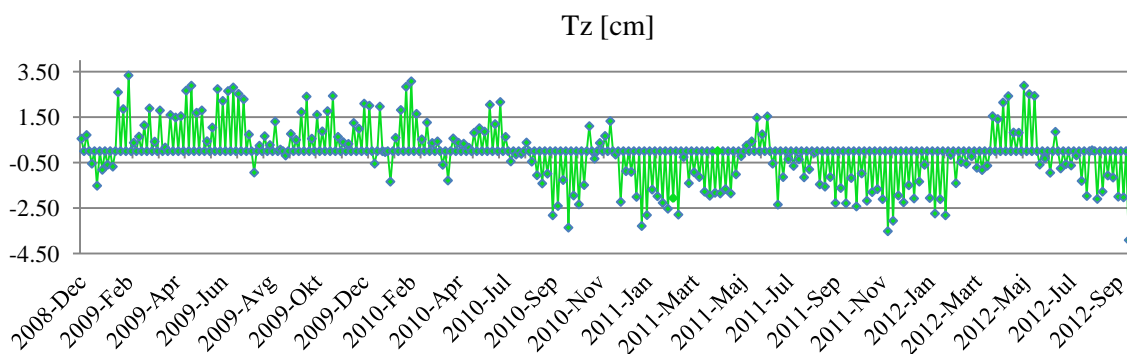
Табела 7.7. Параметри трансформације у епохи 2005.0 и њихове брзине између ITRF2008 и ITRF2005.

T_x [mm]	T_y [mm]	T_z [mm]	D [ppb]	R_x [mas]	R_y [mas]	R_z [mas]
\dot{T}_x [mm/y]	\dot{T}_y [mm/y]	\dot{T}_z [mm/y]	\dot{D} [ppb/y]	\dot{R}_x [mas/y]	\dot{R}_y [mas/y]	\dot{R}_z [mas/y]
-0.5	-0.9	-4.7	0.94	0.00	0.00	0.00
\pm 0.2	\pm 0.2	\pm 0.2	\pm 0.03	\pm 0.08	\pm 0.08	\pm 0.08
0.3	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
\pm 0.2	\pm 0.2	\pm 0.2	\pm 0.03	\pm 0.08	\pm 0.08	\pm 0.08

Терестрички референтни оквир ITRF2008_SRB_UoB изражен је на основу 8 станица датума (BUCU, GRAZ, ISTA, MATE, SOFI, WTZR, ZIMM и DUBR) у екстерном референтном оквиру ITRF2008 у епохи 2010.3. По дефиницији су трансформациони параметри између ова два оквира једнаки нули. Вредности несигурности параметара транслације, односно несигурности почетка референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB износе: 11.3 mm, 6.5 mm и 10.3 mm по X, Y и Z оси, респективно за временски период мерења од 3.87 год. На основу ових вредности несигурности параметара транслације може се закључити да је тачност реализације почетка референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB у односу на глобални референтни оквир ITRF2008 на нивоу од два центиметра (вредност 2σ).

На слици 7.19 су приказане вредности параметара транслације T_x , T_y , и T_z индивидуалних оквира у односу на решење референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB за период од децембра 2008. год. до октобра 2012. год. Средње вредности параметара транслације T_x , T_y и T_z за временски период од 3.87. год. износе 0.75 cm (\pm 0.29), -2.0 cm (\pm 0.13) и -0.18 cm (\pm 0.29), респективно. На основу добијених вредности параметара транслације појединачних оквира може се закључити да је тачност почетка индивидуалног референтног оквира у односу на референтни оквир ITRF2008_SRB_UoB нивоа два центиметра.





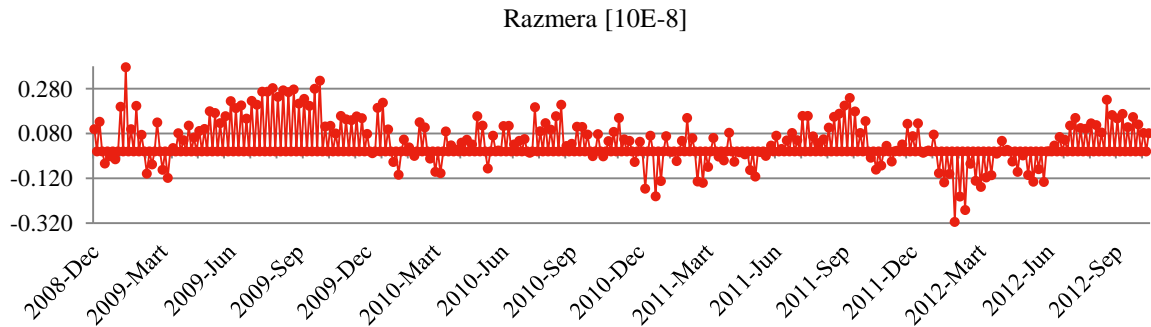
Слика 7.19. Параметри translације индивид. оквира у решењу ITRF2008_SRB_UoB.

7.5.3 Размера референтног оквира ITRF2008 и размера референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB

Размера терестричког референтног оквира ITRF2008 дефинисана је фактором размере који је једнак нули у епохи 2005.0 и брзином размере чија је вредност једнака нули у односу на средњу размеру и брзину размере VLBI и SLR временских серија. Степен сагласности размере и брзине размере између VLBI и SLR решења коришћених у ITRF2008 оквиру износи $1.05 (\pm 0.13)$ ppb, епоха 2005.0 и $0.049 (\pm 0.010)$, респективно. Најприкладнији избор за дефинисање размере оквира ITRF2008 је средња вредност решења VLBI и SLR технике која доводи до максималне разлике од 1.2 ppb (8 mm на екватору), што се може сматрати нивоом тачности размере остварене данас.

Размера терестричког референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB дефинисана је фактором размере који је једнак нули у епохи 2010.3 и брзином размере чија је вредност једнака нули у односу на брзину размере терестричког референтног оквира ITRF2008. Несигурност параметра размере референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB износи 0.88 ppb за временски период мерења од 3.87 год. На основу ове вредности несигурности параметра размере може се закључити да је тачност размере референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB у односу на глобални референтни оквир ITRF2008 око 1.8 ppb (вредност 2σ) што је приближно 8 mm за географску ширину Србије.

На слици 7.20 су приказане вредности параметра размере D индивидуалних оквира у односу на решење референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB за период од децембра 2008. год. до октобра 2012. год. Средња вредност параметра размере D за временски период од 3.87. год. износи 0.59 ppb (± 0.07). На основу добијених вредности параметара размере појединачних оквира може се закључити да је тачност размере индивидуалног референтног оквира у односу на референтни оквир ITRF2008_SRB_UoB око 0.6 ppb што је приближно 2.7 mm за географску ширину Србије.

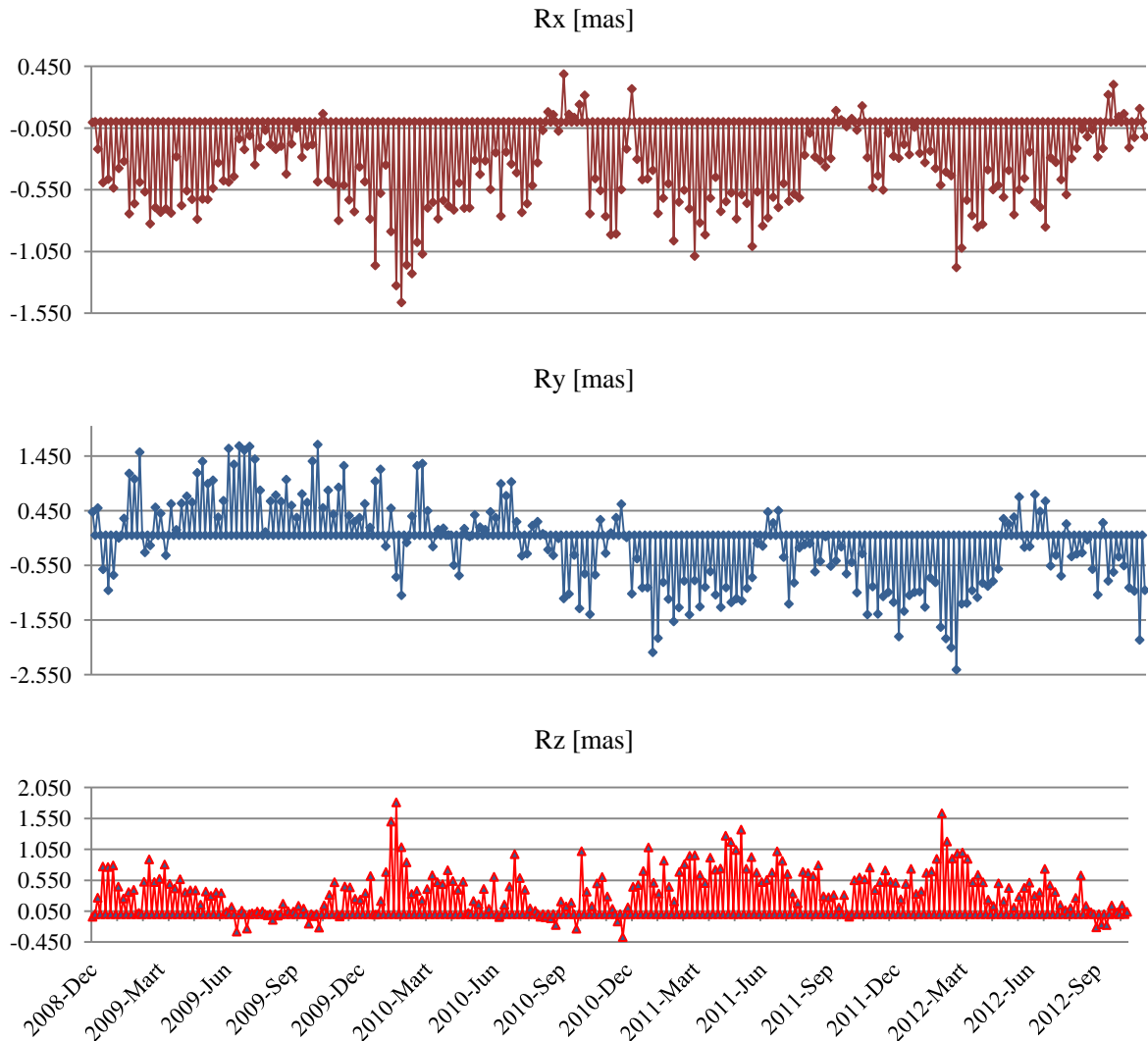


Слика 7.20. Параметар размере индивидуалних оквира у решењу ITRF2008_SRB_UoB.

7.5.4 Оријентација референтног оквира ITRF2008 и оријентација референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB

Оријентација терестричког референтног оквира ITRF2008 је дефинисана параметрима ротације чије су вредности једнаке нули у епохи 2005.0 и параметрима брзине ротације чије су вредности једнаке нули између оквира ITRF2008 и ITRF2005, табела 7.5. Ова два услова су примењена над скупом од 179 референтних станица које се налазе на 131 локацији. Референтне локације обухватају 107 GPS, 27 VLBI, 15 SLR и 12 DORIS. ITRF2008 обезбеђује конзистентну серију кретања пола и његових дневних промена, универзално време (UT1-UTC) и дужину дана (LOD) одређену VLBI техником. Разлог коришћења LOD вредности само на основу VLBI технике је избегавање грешака код одређивања на основу сателитских техника. Анализа конзистентности EOP параметара између решења четири технике на основу резидуала кретања пола је показала да GPS техника доминира у односу на остале три технике. Такође је добијено GPS решење кретања пола значајно за повезивање остала три решења преко два параметра ротације око X и Y осе. Срачунате WRMS вредности на основу резидуала између коначних и појединачних временских серија кретања пола за x и y компоненту износе: (10 μ as, 10 μ as), (142 μ as, 120 μ as), (144 μ as, 128 μ as), (239 μ as, 353 μ as) за GPS, VLBI, SLR и DORIS технику респективно, Altamimi et al., (2011).

Оријентација терестричког референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB дефинисана је параметрима ротације чије су вредности једнаке нули у епохи 2010.3 и параметрима брзине ротације чије су вредности једнаке нули у односу на глобални терестрички референтни оквир ITRF2008 над скупом од 8 референтних станица. Вредности несигурности параметара ротације референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB износе: 0.189 mas, 0.451 mas и 0.228 mas респективно за R_x , R_y и R_z у референтној епохи $t_0 = 10.317$. На основу ових вредности несигурности параметара ротације може се закључити да је тачност оријентације терестричког референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB у односу на глобални терестрички референтни оквир ITRF2008 нивоа до 3' (вредност 2σ).



Слика 7.21. Параметри ротације индивидуалних оквира у решењу ITRF2008_SRB_UoB.

На слици 7.21 су приказане вредности параметара ротације R_x , R_y и R_z индивидуалних оквира у односу на решење референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB за период од децембра 2008. год. до октобра 2012. год. Средње вредности параметара ротације за временски период од 3.87. год. индивидуалних референтних оквира у референтној епохи $t_0 = 10.317$ износе: -0.457 mas (± 0.038), -0.204 mas (± 0.128) и 0.416 mas (± 0.039), респективно за R_x , R_y и R_z . На основу добијених вредности параметара ротације индивидуалних референтних оквира може се закључити да је тачност ротације индивидуалног референтног оквира у односу на референтни оквир ITRF2008_SRB_UoB нивоа 1.7'.

7.5.5 Трансформациони параметри између референтног оквира

ITRF2008_SRB_UoB и EPN2008_SRB_UoB

У циљу обезбеђења боље сагласности између ITRF2008 и ITRF2008_SRB_UoB кључну улогу има 1) број и дистрибуција датумских референтних станица, 2) укључивање што већег броја датумских станица опремљених са више техника (поред GPS и VLBI, SLR и DORIS техника) и 3) остваривање што боље сагласности између два оквира на основу резидуала 14 параметара трансформације. Што се тиче трећег критеријума, WRMS вредности 14 параметра трансформације сличности износе по положају: 0.4 mm, 0.4 mm и 0.3 mm респективно за компоненте N, E и U у епохи 2010.3 и WRMS вредности за брзину од 0.1 mm/y за све три компоненте.

Као показатељ или оцењивач квалитета индивидуалних решења укључених у решење референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB, узета је медијана WRMS вредности 2Д положаја која износи 0.9 mm и 1.8 mm за вертикалну компоненту. Преко 70 % станица референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB има грешку положаја мању од 0.4 mm и грешку брзине мању од 0.3 mm/y.

Упоређењем референтних оквира ITRF2008_SRB_UoB и EPN08_SRB_UoB добијене вредности транслационих параметара износе: -0.7 mm, 1.4 mm и -0.6 mm респективно по X, Y и Z оси, једначина трансформације 7.31. Брзине транслационих параметара износе 0.0 mm/y, 0.3 mm/y и 0.1 mm/y респективно по X, Y и Z оси. На основу упоређења два референтна оквира може се извести закључак да је постигнута сагласност почетка ова два оквира боља од 2 mm.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{EPN}} &= \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ITRF}} + T + D \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ITRF}} + R \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ITRF}} \\ \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix}_{\text{EPN}} &= \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix}_{\text{ITRF}} + \dot{T} + \dot{D} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ITRF}} + \dot{R} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ITRF}} \end{aligned} \quad (7.31)$$

У једначини 7.31 EPN означава оквир EPN08_SRB_UoB и ITRF означава оквир ITRF2008_SRB_UoB, T је вектор транслације $T = (T_x, T_y, T_z)^T$, D фактор размере и R је матрица ротације:

$$R = \begin{pmatrix} 0 & -R_z & R_y \\ R_z & 0 & -R_x \\ -R_y & R_x & 0 \end{pmatrix}$$

За 145 заједничких тачака два референтна оквира, WRMS вредности разлика положаја у епохи 2010.3 износе 0.3 mm, 0.3 mm и 0.8 mm, респективно за компоненте E, N и U и WRMS вредности разлика брзина 0.1 mm/y, 0.0 mm/y и 0.1 mm/y, респективно за компоненте E, N и U.

7.5.6 No-Net-Rotation услов глобалне не-ротације ITRF2008

Фундаменталне једначине теорије ротације Земље повезане су са координатним системом у којем било која врста померања или деформација на Земљи не утичу на укупни угловни момент система. Генерално прихваћен приступ у том циљу је коришћење Тисерановог (Tisserand) система средњих оса дефинисаног минималном кинетичком енергијом према следећој једначини, Kovalevsky et al., 1989:

$$T = \frac{1}{2} \int_C V^2 dm \quad (7.32)$$

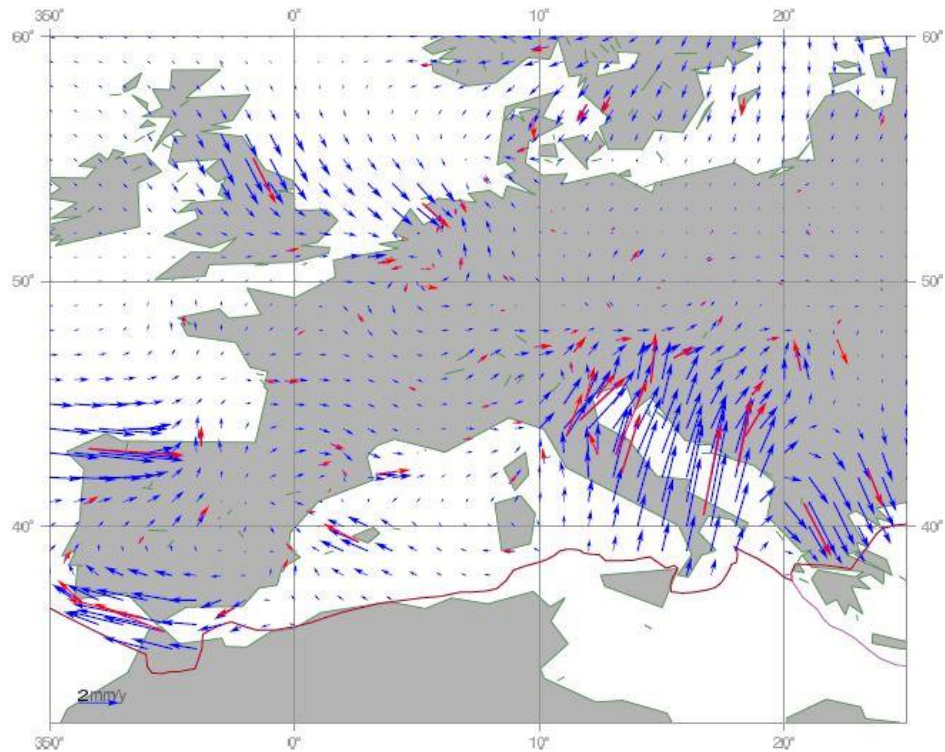
где dm представља елемент масе и V је његова одговарајућа брзина. Домен интеграла (7.32) је Земљина кора (C) на којој се налазе геодетске опажачке станице и чија опажачка садрже сигнале њиховог кретања и деформације Земљине коре. Један од циљева дефинисања минималне кинетичке енергије T на Земљиној кори јесте да се минимизира њено глобално кретање које би утицало на параметре ротације Земље. Из једначине (7.32) за минималну кинетичку енергију T добијају се једначине линеарног момента p и угловног момента h , Boucher, 1989:

$$p = \int_C V dm = 0 \quad (7.33)$$

$$h = \int_C X \times V dm = 0 \quad (7.34)$$

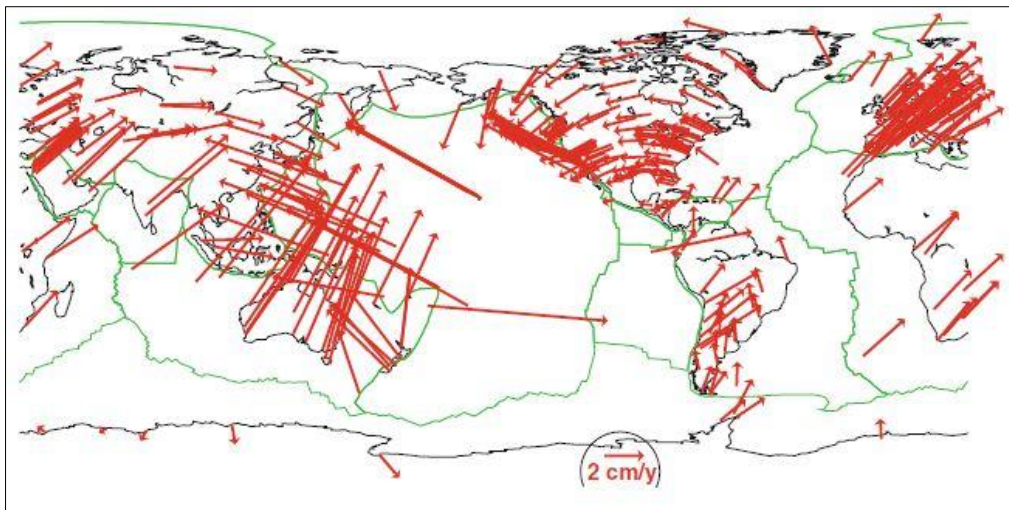
где X представља вектор положаја елемента масе dm . Једначина (7.34) представља дефиницију NNR (No-Net-Rotation) услова чији је домен примене Земљина кора. За ригорозну примену једначине (7.34) потребно је познавање густине као и дебљине Земљине коре што представља тешкоћу, тако се решење интеграла добија помоћу суме за одређени број опажачких станица или тектонских плоча које репрезентују литосферу.

За примену NNR услова за опажачке станице потребно је испуњавање минималних критеријума, односно потребно је да опажачке станице имају довољно дуг опажачки период (најмање три године) и да буду оптимално дистрибуиране преко целе Земљине површине. Поред тога, да би се користила једначина (7.34) потребан је објективан избор (или одређивање граница) сваког елемента области који је придружен свакој станици која би требала да репрезентује своје геофизичко окружење. Дакле, примена кинематичког модела Земљине коре који испуњава услов глобалне не-ротације подразумева дискретизацију Земљине коре и интерполацију поља брзина ITRF станица због њихове недовољне густине на Земљиној површини. Интерполација поља брзина ITRF изводи се помоћу неког од познатих метода, нпр. метод колокације најмањих квадрата који се посебно користи у гравиметрији, метод коначних елемената, Кригинг метод и др. У првој фази почев од поља брзина ITRF2008 добија се оцена модела апсолутног кретања Земљине коре са половима ротације плоча. У другом кораку се врши интерполација резидуала поља брзина оцењених у првој фази на сферну регуларну мрежу. Коначно, у трећем кораку се експлицитно примењује услов не-ротације на поље брзина интерполовано сферном мрежом. На слици 7.22 је приказан пример интерполованог поља резидуала брзина референтног оквира ITRF2005 Евроазијске плоче, Altamimi, 2009.

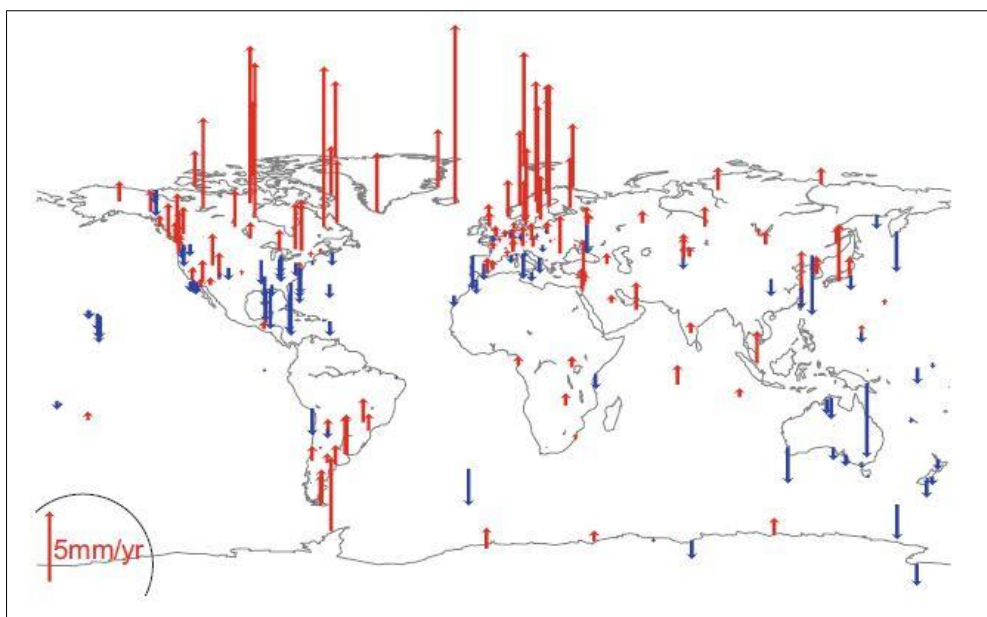


Слика 7.22. Поље резидуала брзина референтног оквира ITRF2005 Евроазијске плоче.

На сликама 7.22 и 7.23 приказано је хоризонтално и вертикално поље брзина референтног оквира ITRF2008 са формалним грешкама мањим од 0.2mm/y . За добијање овог високог нивоа прецизности референтни оквир ITRF2008 обухвата 406 станица хоризонталног и 278 станица вертикалног поља брзина, Altamimi et al., 2011.

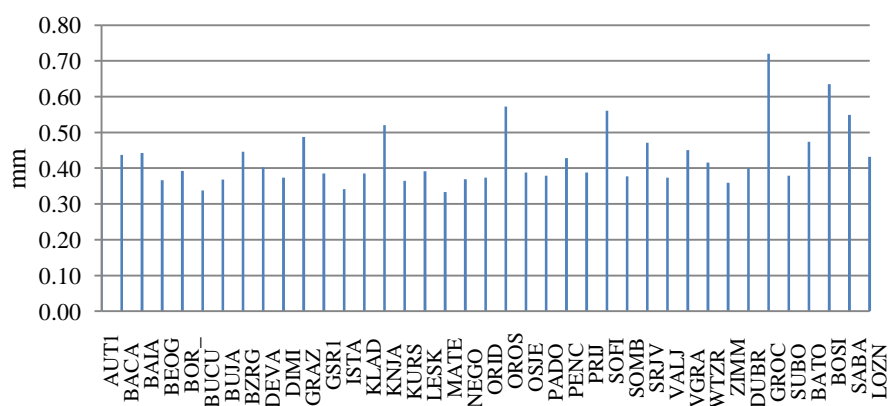


Слика 7.23. Хоризонтално поље брзина станица референтног оквира ITRF2008.

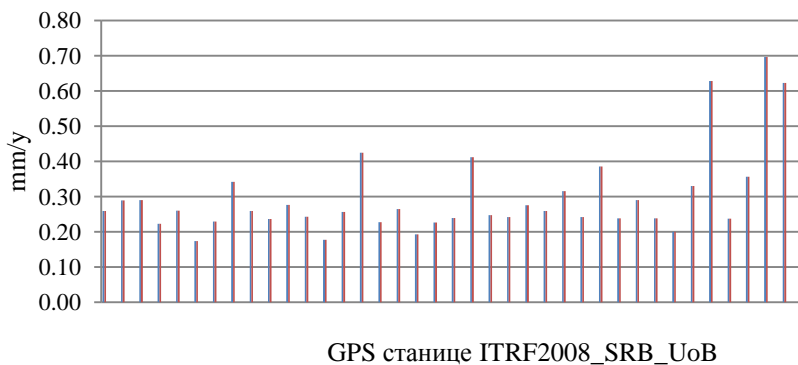


Слика 7.24. Вертикално поље брзина станица референтног оквира ITRF2008.

Процена квалитета референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB у одређивању положаја и брзина станица може се извести на основу прецизности ових оцењених параметара, односно на основу сферних грешака положаја и брзина станица. Сферне грешке положаја станица су срачунате у епохама са минималним варијансама за 39 станица референтног оквира које имају интервал мерења већи од 2.5 год. За сваки положај и брзину станице сферне грешке одговарају квадратном корену суме квадрата формалних грешака за све три компоненте положаја и брзине. За приближно 60% станица прецизност положаја је на нивоу или боља од 0.4 mm (слика 7.25a) и за приближно 80% станица прецизност брзина је нивоа до 0.3 mm/y (слика 7.25b). Код станица са кратким интервалом мерења (мањим од 2.5 год.) или код станица са лошим квалитетом антена грешке положаја су нивоа од 1 mm и грешке брзина 0.8 mm/y и више.

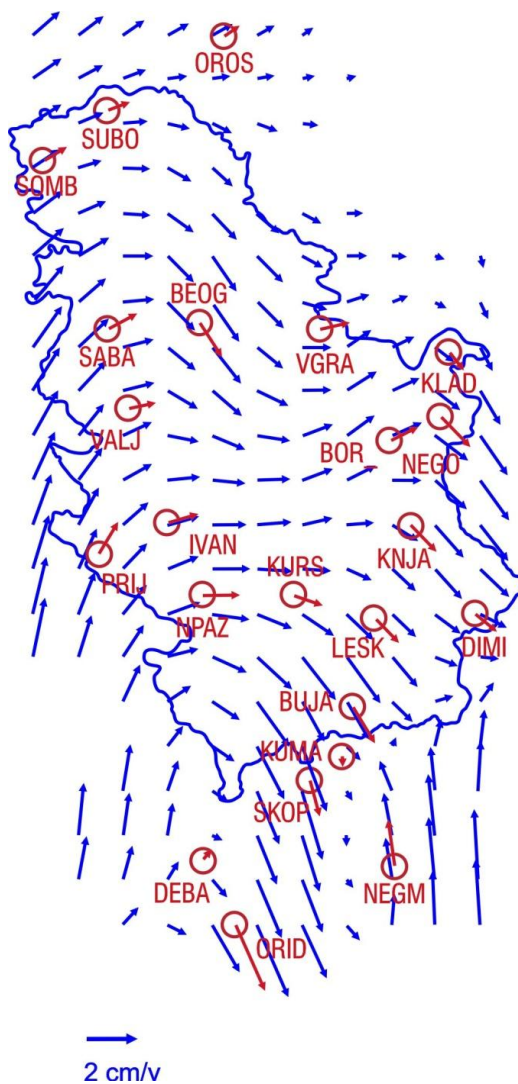


Слика 7.25a. Сферне грешке положаја станица ITRF2008_SRB_UoB.



Слика 7.25б. Сферне грешке положаја и брзина станица ITRF2008_SRB_UoB.

Интерполација хоризонталног поља брзина ITRF2008_SRB_UoB извршена је софтвером за деформациону анализу чешког Института за геодезију, топографију и картографију (<http://www.vugtk.cz/>) методом коначних елемената регуларним гридом приближно 17'x17', слика 7.26.



Слика 7.26. Хоризонтално поље брзина станица реф. оквира ITRF2008_SRB_UoB.

7.5.7 Стабилност и одржање дугорочности ITRF

Како се дефинитивно налазимо у ери временских серија положаја станица које отварају пут вишеструким применама и истраживања, глобални и секуларни терестрички референтни оквир ITRF је постао неопходност. Кључна чињеница је потреба за референтним стандардом као еталоном, за упоређење и изражавање резултата за различите примене у геонаукама. Поред тога, ITRF није само научни референтни оквир, већ такође као референтни стандард омогућава откривање некохерентности између просторних техника и процењивања њихових граница. Према томе, стабилност и одржање дугорочности терестричког референтног оквира ITRF представља један од најзначајнијих задатака геодетске научне заједнице.

Анализом тренутно доступних временских серија детектовано је присуство варијација положаја станица годишње или полугодишње амплитуде у распону од неколико милиметара до неколико центиметра са милиметарском прецизношћу. Највећи извори грешака у оцени брзина станица су ефекти скривених офсета или дисконтинуитета положаја и несигурност дефиниције Међународног терестричког референтног оквира ITRF. Због тога је важно пажљиво истажити сваку временску серију положаја станица како би се детектовали, оценили и уклонили колико је то могуће сви значајни офсети и дисконтинуитети брзина. Такође, сезонски сигнали су узрок појављивања значајне разлике брзина иако имају мали ефекат за станице са дугим временским серијама (више од 4.5 год.). У зависности од промене амплитуде офсета, његовог положаја у временској серији и дужине временске серије може доћи до промене брзине више од 1 mm/y. Будућа истраживања треба свакако усмерити у правцу унапређења метода оцене брзина у смислу конзистентности оцене амплитуда офсета и сезонских сигнала. Разумевање сезонских сигнала је веома важно јер могу настати као резултат физичке деформације Земљине коре али и постојања систематских грешака у самим мерењима. Први корак је разумевање резидуала детерминистичких сигнала присутних у временским серијама положаја станица.

Померања станица на Земљиној кори која су резултат различитих оптерећења (loading effects) морају се посебно проучавати и обухватити моделима деформације, као што су нпр. атмосферски или хидролошки модели. Први задатак је квантификовање утицаја ових феномена што доводи до нелинеарности у положајима и брзинама станицама што утиче на оцену референтног оквира на основу мерења извршених само GPS техником, а самим тим и на параметре дефиниције референтног оквира. Један од циљева метода оцене секуларног оквира GPS технике је декорелисање детерминистичких сигнала моделирањем грешака за део који је статистички значајан. Једна од првих фаза је анализа спектралног садржаја резидуала временских серија положаја GPS станица.

Поље брзина станица је повезано са референтним оквиром у којем су оцењене брзине, односно поље брзина је оцењено у односу на почетак дефинисан референтним оквиром ITRF2008. Оцена брзина станица као репрезентата дела Земљине коре са тачношћу бољом од 1 mm/y значи према томе познавање временске еволуције почетка оквира (актуелног центра масе Земље) са истим захтевом тачности. Поред тога, за брзине станица је такође потребно прецизно познавање тзв. секуларне размере ITRF. Тренутно, конзервативна тачност дефиниције ITRF2008 оцењена је са вредношћу мањом од 0.5 mm/y за брзину почетка по свакој компоненти, Wu et al., 2011, и са грешком у брзини размере мањом од 0.2 mm/y, Collilieux and Schmid, 2013. Несигурност брзине почетка ITRF испод нивоа 0.3 mm/y је вероватно главни и највећи изазов геодезије 21 века.

Један од кључних фактора за стабилност терестричког референтног оквира је свакако одржање дугорочности референтног оквира. Главни циљеви будућих истраживања за одржање дугорочности референтног оквира имајући у виду доступност континуираних временских серија координата станица су:

- Осигурање конзистентности рутине за обезбеђење дугорочности референтног оквира.
- Одржавање реализације референтног система у регуларном маниру преко кумулативних недељних решења што посебно доприноси стабилности почетка и размере.
- Спајање два претходна циља и извођење решења по математичком моделу комбинације CATREF софтвера.

Коначно, геодетске мреже и мерни инструменти са којима се врше опажања као и постизање стабилности референтног оквира захтева њихово одржавање и континуирано технолошко унапређење, што наравно захтева улагање од стране националних институција и подршку у међународним научним истраживањима.

8 Математичке основе Структурне геологије

8.1 Скаларне, векторске и тензорске величине

Математичке величине које се користе за описивање кретања тела деле се у две категорије: скаларне и векторске величине.

Скаларне величине су оне које се могу изразити потпуно само интензитетом, односно једним бројем и одговарајућом јединицом а такође се означавају и тензором нултог реда. Међусобно се могу упоређивати само скалари исте природе, односно величине које имају исту физичку димензију. Два скалара су једнака ако су једнаки њихови предзнаци и бројне вредности добијене мерењем њихових интензитета. Скаларне величине су на пример: маса m , температура T , време t , енергија E и др.

За описивање других карактеристика материјалних објеката које није могуће описати само једним бројем користе се друге величине. Таква најелементарнија величина је померај, односно величина којом се карактерише померање материјалне тачке са једног на друго место у простору. Да би се описало померање тачке потребно је одредити за колико се тачка помера, правац померања и смер померања на правцу. Вектори као величине за чије је потпуно одређивање довољно задати три броја представљају неопходан математички алат код модела Њутновог закона кретања. Назив потиче од латинске речи *vehere* што значи вући или повлачити. У истом смислу, вектор означава усмерени сегмент којим се представља векторска величина. Вектори се означавају и тензорима првог реда. Векторска величина се у простору може задати једном векторском функцијом или векторским пољем. На пример, вектор брзине одређен са три скаларне функције v_x , v_y и v_z може се изразити у облику једначине:

$$\mathbf{v}(x, y, z) = \mathbf{i} v_x(x, y, z) + \mathbf{j} v_y(x, y, z) + \mathbf{k} v_z(x, y, z) \quad (8.1)$$

У пракси се појављују многе величине које нису ни скалари ни вектори, које имају сложенију структуру и за чије одређивање није довољно задати три броја. Најзначајније такве величине у техничким дисциплинама су тензори. Назив потиче од латинске речи *tensio*, што значи напрезање, а повезано је са својством напрезања у еластичним (деформабилним) медијумима, Naerlović–Veljković, 1990. Постоје напрезања, тензор деформација, тензор инерције, тензор електромагнетског поља итд. Ако у производу између вектора нема ознаке за скаларни или за векторски производ, подразумева се да се ради о тензорском производу. Тензорски производ два вектора представља тензор другог реда. Тензор \mathbf{T} као резултат множења вектора \vec{A} и \vec{B} се записује на следећи начин:

$$\mathbf{T} = \vec{A} \vec{B} \quad (8.2)$$

Тензори се као и вектори изражавају преко својих компоненти. Ако се свакој тачки простора са вектором положаја \vec{r} у сваком временском тренутку t може придружити одређена вредност скалара s , вектора \vec{V} или тензора \mathbf{T} , односно ако је $s(\vec{r}, t)$, $\vec{V}(\vec{r}, t)$, $\mathbf{T}(\vec{r}, t)$, онда се такви скалари, вектори или тензори називају скаларним, векторским или тензорским пољем. Генерално, поља су функције више променљивих, најчешће три просторне и једне временске променљиве. На пример, скаларно поље температуре $T(\vec{r}, t)$ приказује вредност температуре у одређеној

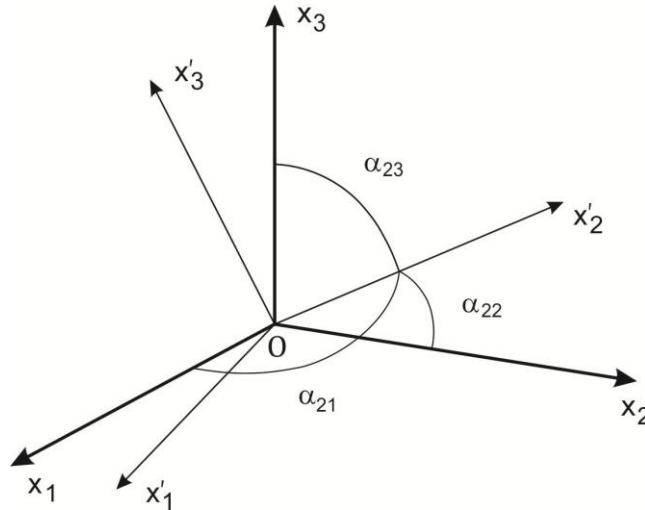
тачки простора \vec{r} у временском тренутку t . За флуид који се креће, може се дефинисати векторско поље брзине $\vec{V}(\vec{r}, t)$, које означава брзину флуида у тачки простора \vec{r} у тренутку t . Гравитационој сили привлачења Земље $\vec{F}_g(\vec{r})$ у свакој тачки простора придружује се вектор усмерен (приближно) према центру Земље са интензитетом који је једнак гравитационој сили у тој тачки. Скуп свих таквих вектора се назива поље гравитационе силе Земље. Као пример тензорског поља је поље тензора напона у еластичном телу које у различитим временским тренуцима може имати различите вредности у различитим тачкама тела.

8.2 Координатни системи, трансформација вектора и тензора

Природа физичких величина долази до изражаја тек када се посматрају у различитим координатним системима. Компоненте једне физичке величине могу у различитим системима имати различите вредности. Простор се посматра као раван еуклидски, хомоген и изотропан континуум где својство хомогености означава да простор има иста својства у свакој својој тачки а изотропност значи да простор има иста својства у свим смеровима. За дати конкретни проблем, ова својства омогућавају најпогоднији избор положаја почетка координатног система и смерова координатних оса.

У многим техничким областима за описивање одређеног проблема користи се низ једначина које се могу написати у сажетом облику у индексном запису. Осим што је једноставнији, индексни запис сажето и јасно истиче поједине особине закона који се изражава једначинама. Код примене тензорског рачуна индексно записивање је веома погодно нарочито при трансформацији координата. Уместо слова користе се бројеви, односно све што се односи на осу X има индекс 1, на осу Y има индекс 2 и на осу Z има индекс 3. Графички вектори и тензори представљају се увек у односу на неки координатни систем.

У индексном записивању координатне осе се означавају са X_1, X_2, X_3 уместо са X, Y, Z у десно-оријентисаном координатном систему (гледајући осу X_3 од почетка у смеру вертикално навише, X_1 оса ће се ротирати у X_2 осу за 90° у смеру супротном кретању казаљке на сату). Почетни координатни систем се означава $O X_1 X_2 X_3$. Трансформисани координатни систем се означава са $O X'_1 X'_2 X'_3$. Три нове координатне осе X'_1, X'_2 и X'_3 граде са почетним координатним осама девет углова који се означавају са $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{33}$. Први индекс се односи на нову осу а други на почетну осу, слика 8.1. Свих девет углова скраћено се означавају са α_{ij} где индекси i и j могу имати вредности 1, 2 и 3, Kelly, 2013.



Слика 8.1. Положај координатног система $O X'_1 X'_2 X'_3$ у односу на $O X_1 X_2 X_3$.

Како је физичка величина одређена својим компонентама важи закон трансформације компонената при прелазу из једног координатног система у други. Закон трансформације физичке величине мора да произилази из природе саме величине и из својстава простора који је одређен координатним системом. При трансформацији вектора и других виших физичких величина у једначинама се појављују косинуси углова између нових и почетних координата. Косинуси углова између оса два система скраћено се означавају са a_{ij} , односно

$$a_{ij} = \cos \alpha_{ij}, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (8.3)$$

Девет косинуса углова a_{ij} се може представити у форми квадратне матрице $[a_{ij}]$:

$$[a_{ij}] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (8.4)$$

Матрица $[a_{ij}]$ се назива матрица трансформације између два координатна система. Постоје само три независна од девет косинуса углова датих у матрици трансформације. Координате тачке $A(x_1, x_2, x_3)$ се могу трансформисати у координате тачке $A'(x'_1, x'_2, x'_3)$ преко косинуса углова између координатних оса два система:

$$\begin{aligned} x'_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 \\ x'_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 \\ x'_3 &= a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 \end{aligned} \quad (8.5)$$

За компоненте матрице трансформације важе следеће везе између косинуса углова:

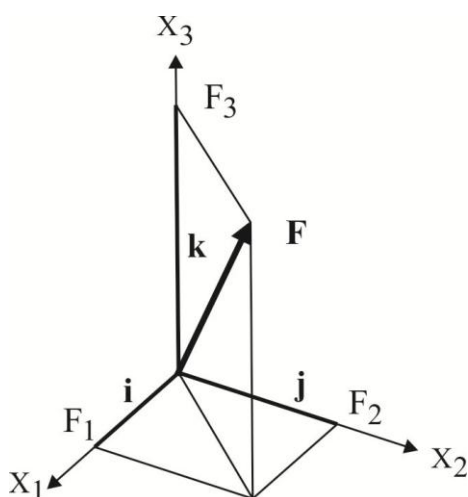
$$a_{ik} a_{jk} = \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (8.6)$$

при чему се δ_{ij} назива Кронекер делта симбол.

Вектори

Правоугли или Декартов координатни систем је представљен у правцу три позитивна јединична вектора \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} а било који вектор \vec{F} својим компонентама F_1, F_2, F_3 које представљају растојања дуж оса означених са три јединична вектора и које су независне од избора почетка координатног система, слика 8.2. Сваки вектор у простору може бити написан као линеарна комбинација јединичних вектора \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} . Вектор \vec{F} изражен преко својих компоненти је:

$$\vec{F} = F_1\vec{i} + F_2\vec{j} + F_3\vec{k} \quad (8.7)$$

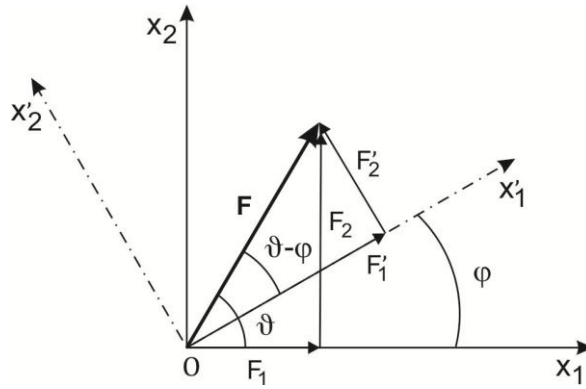


Слика 8.2. Вектор \vec{F} у десно оријентисаном координатном систему.

За описивање оријентације крутог тела у тродимензионалном Еуклидовом простору потребно је три параметра. Оријентација тела се може описати помоћу Ојлерових углова: угао нутације ϑ , угао прецесије ψ и угао ротације φ . Такође, Ојлеровим угловима се представља оријентација једног координатног система релативно у односу на други. Положај новог координатног система који је ротиран око координатног почетка O може се одредити помоћу ова три угла. Вредности компоненти вектора \vec{F} у почетном и новом координатном систему у 2Д равни се рачунају према следећим изразима, слика 8.3:

$$F_1 = F \cos \vartheta, \quad F_2 = F \sin \vartheta \quad (8.8)$$

$$F'_1 = F \cos(\vartheta - \varphi), \quad F'_2 = F \sin(\vartheta - \varphi) \quad (8.9)$$



Слика 8.3. Компоненте вектора \mathbf{F} у почетном и трансформисаном координатном систему.

Када се (8.8) уврсти у (8.9) добија се израз који представља закон трансформације компоненти вектора у равни при ротацији координатног система:

$$F'_1 = F_1 \cos \varphi + F_2 \sin \varphi, \quad F'_2 = -F_1 \sin \varphi + F_2 \cos \varphi \quad (8.10)$$

Матрица трансформације има следећи облик:

$$[a_{ij}] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (8.11)$$

Компоненте вектора у индексном запису имају следећи облик:

$$F'_i = \sum_{j=1}^2 a_{ij} F_j, \quad i = 1 \text{ или } 2 \quad (8.12)$$

Сумирање у тензорском рачуну се често изводи преко поновљених индекса, тако да у том случају није потребно писати знак суме па се израз (8.12) може написати у следећем облику:

$$F'_i = a_{ij} F_j, \quad i, j = 1, 2 \quad (8.13)$$

По Анштајновој конвенцији о сумирању овде се подразумева сабирање по поновљеном индексу j . Закон трансформације вектора \vec{F} у простору се добија сабирањем пројекција компоненти вектора на одговарајуће осе. Пројекција силе \vec{F} на осу x'_1 једнака се изражава на следећи начин, Kelly, 2013:

$$F'_1 = F_1 \cos \alpha_{11} + F_2 \cos \alpha_{12} + F_3 \cos \alpha_{13} = F_1 a_{11} + F_2 a_{12} + F_3 a_{13} \quad (8.14)$$

Применом Анштајнове конвенције о сумирању закон трансформације вектора \vec{F} у простору у општем облику гласи:

$$F'_i = a_{ij} F_j \quad (8.15)$$

при чему се подразумева сумирање по индексу j од 1 до 3, односно изражено у матричном запису:

$$\begin{bmatrix} F'_1 \\ F'_2 \\ F'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (8.16)$$

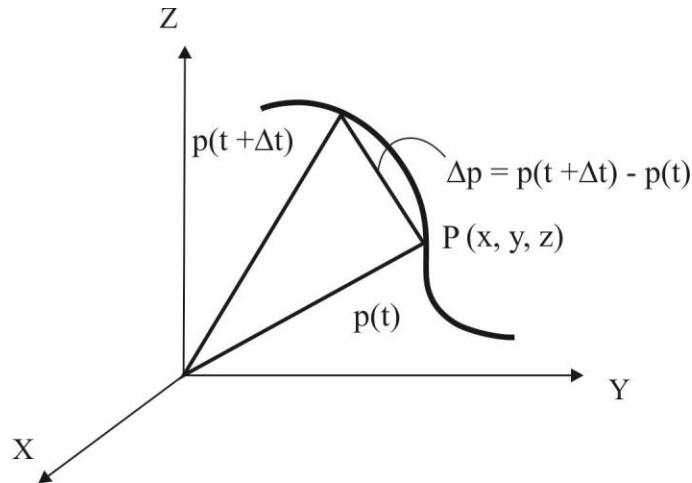
Да би се описало кретања тела потребно је разумевање диференцирања вектора, једне од операција векторског рачуна. Компоненте вектора могу бити функције неке независне варијабле, на пример просторних координата, времена, угла и слично. Када се свакој вредности независне варијабле може једнозначно придружити вектор, тада се о том вектору говори као о векторском пољу или векторској функцији (Kelly, 2013). Диференцирање вектора се може илустровати описом криве у простору као путање коју тело описује при свом кретању. Ако је вектор $\mathbf{p}(t)$ вектор положаја који спаја почетак O координатног система и било коју тачку $P(x, y, z)$ криве у простору, затим вектор функције $\mathbf{u}(t)$ који дефинише $x, y,$ и z као функције од временског тренутка t , онда важи израз:

$$\mathbf{p}(t) = x(t) \mathbf{i} + y(t) \mathbf{j} + z(t) \mathbf{k} \quad (8.17)$$

Са променом времена t , крајња тачка функције \mathbf{u} описиваће просторну криву чије су параметарске једначине $x = x(t), y = y(t), z = z(t)$, при чему је тада

$$\Delta \mathbf{p} / \Delta t = \{[\mathbf{p}(t + \Delta t)] - \mathbf{p}(t)\} / \Delta t \quad (8.18)$$

вектор у правцу $\Delta \mathbf{p}$, слика 8.4.



Слика 8.4. Диференцирање вектора положаја.

Када $\Delta t \rightarrow 0$ онда је $d\mathbf{p}/dt$ вектор у правцу тангенте на просторну криву у тачки $P(x, y, z)$, дат следећим изразом:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{dx}{dt} \mathbf{i} + \frac{dy}{dt} \mathbf{j} + \frac{dz}{dt} \mathbf{k} \quad (8.19)$$

Извод вектора положаја \mathbf{p} у односу на време t представља брзину \mathbf{v} . Нека је $\mathbf{u}(t)$ вектор положаја блока стене P која се креће у земљиној кори у времену t . Тада $\mathbf{u}(t)$

представља путању (просторну криву C) блока стене P . Познато је да је вектор $\mathbf{v} = d\mathbf{p}(t)/dt$ тангентан на криву C и према томе додирује тачку криве у тренутном правцу кретања блока P . Извод вектора брзине је вектор убрзања \mathbf{a} који се изражава као, Naerlović - Veljković, 1990:

$$\mathbf{a}(t) = \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} = d^2\mathbf{p}(t)/d^2t \quad (8.20)$$

Убрзање представља други извод положаја по времену. Убрзање \mathbf{a} је извод вектора брзине \mathbf{v} по времену t , односно $d\mathbf{v}/dt$, што се изражава другим Њутновим законом. За анализу кретања стенских структура у геологији други изводи су веома корисни. Слично се изводе и изрази за парцијалне изводе када векторско поље зависи од више независних варијабли. Ако је w диференцијабилна функција од x и ако је x диференцијабилна функција од t , тада важи

$$\frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (8.21)$$

За функцију две варијабле $w = f(x, y)$ и $x = x(t)$, $y = y(t)$ диференцијал функције се изражава као:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial w}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dt} \quad (8.22)$$

Операција $\partial/\partial x$ је добро познати парцијални извод функције. Ако су x и y функције положаја у координантном систему и t је функција времена, онда се w мења са положајем и временом. Ако је супротно претходном примеру $x = x(p, v)$ и $y = y(p, v)$ онда је

$$\frac{\partial w}{\partial p} = \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial p} + \frac{\partial w}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial p} \quad (8.23)$$

$$\frac{\partial w}{\partial v} = \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial v} + \frac{\partial w}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial v}$$

Парцијалне диференцијалне једначине могу бити замењене коришћењем Анштајнове суме. На пример, положај \mathbf{x} јединичног блока у оквиру стене је повезан са померањем \mathbf{u} преко градијената померања E . Вектор положаја и вектор померања имају компоненте x_1, x_2, x_3 и u_1, u_2, u_3 . Веза између \mathbf{x} и \mathbf{u} се изражава на следећи начин:

$$\begin{aligned} u_1 &= E_{11}x_1 + E_{12}x_2 + E_{13}x_3 \\ u_2 &= E_{21}x_1 + E_{22}x_2 + E_{23}x_3 \\ u_3 &= E_{31}x_1 + E_{32}x_2 + E_{33}x_3 \\ u_i &= \sum_{j=1}^3 E_{ij}x_j \end{aligned} \quad (8.24)$$

или изостављајући знак суме и увођењем конвенције Ајнштајнове суме $u_i = E_{ij}x_j$.

Тензори

Трансформација тензора физичке величине је иста без обзира на скуп изабраних координатних оса и то је главна карактеристика тензора. Трансформација из једног координатног система у други координатни систем зависи од косинуса углова које заклапају осе координатних система. Тензор има јединствену особину да се може трансформисати без губитка своје вредности. То значи да тензор има компоненте које представљају физички квантитет који задржава своју вредност, без обзира на то који координатни систем (правоугаони, цилиндрични, итд.) је коришћен или како се ротирају осе тог координатног система. Физички квантитет је исти без обзира на правац из ког се посматра. Општи случај када је тензор другог реда \mathbf{T} којим се описују физичке особине објекта повезан са два вектора $\mathbf{P} = [p_1, p_2, p_3]$ и $\mathbf{Q} = [q_1, q_2, q_3]$ може се изразити једначинама (<http://www.geosc.psu.edu/>):

$$\begin{aligned} p_1 &= T_{11}q_1 + T_{12}q_2 + T_{13}q_3 \\ p_2 &= T_{21}q_1 + T_{22}q_2 + T_{23}q_3 \\ p_3 &= T_{31}q_1 + T_{32}q_2 + T_{33}q_3 \end{aligned} \quad (8.25)$$

при чему компоненте тензора T_{11}, T_{12}, \dots формирају тензор другог реда:

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (8.26)$$

Вредност коефицијената T_{11}, T_{12}, \dots зависи од оријентације координатних оса x_1, x_2, x_3 . Ако се претпостави нови сет координатних оса x'_1, x'_2, x'_3 које су повезане са почетним осама преко косинуса углова a_{ij} , тада вектори \mathbf{P} и \mathbf{Q} имају нове компоненте p'_i и q'_i . Закон трансформације тензора другог реда гласи:

$$T'_{ij} = a_{ik} a_{jl} T_{kl} \quad (8.27)$$

Као што се компоненте p_i и q_i трансформишу у p'_i и q'_i тако се девет коефицијената T_{ij} трансформише у девет коефицијентима T'_{ij} . Индекси i и j су слободни индекси а k и l су индекси који се понављају.

Главне осе тензора

Једначина квадратне површи, односно површи другог степена као што је елипсоид или хиперболоид се може написати у следећем облику:

$$S_{ij} x_i x_j = 1 \quad (8.28)$$

при чему су S_{ij} коефицијенти. Једначина написана у потпуном облику под претпоставком услова симетрије $S_{ij} = S_{ji}$ гласи:

$$S_{11}x_1^2 + S_{22}x_2^2 + S_{33}x_3^2 + 2S_{12}x_1x_2 + 2S_{31}x_3x_1 + 2S_{23}x_2x_3 = 1 \quad (8.29)$$

Када се примени закон трансформације за компоненте симетричног тензора другог реда добија се израз:

$$S'_{ij} = a_{ik} a_{jl} S_{kl} \quad (8.30)$$

Теорија трансформације симетричног тензора другог реда је идентична са теоријом квадратне трансформације. Површ одређена једначином 8.30 представља квадратни тензор S_{ij} . Важно својство квадратних тензора је поседовање главних оса чија једначина има једноставнији облик:

$$S_{11}x_1^2 + S_{22}x_2^2 + S_{33}x_3^2 = 1 \quad (8.31)$$

Када се општи тензор редукује у односу на главне осе добија се тензор са главним компонентана тензора S_1, S_2, S_3 приказан у матричном облику као:

$$\begin{bmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{bmatrix} \quad (8.32)$$

Једначина елипсоида је облика $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$ а полуосе квадратног тензора су следеће дужине

$$\frac{1}{\sqrt{S_1}}, \frac{1}{\sqrt{S_2}}, \frac{1}{\sqrt{S_3}} \quad (8.33)$$

Главне осе имају својство радијус вектора који су паралелни са нормалама на квадратну површ. Нормала на квадратну површ се означава вектором x_i а радијус вектори квадратне површи су дати преко израза $S_{ij}x_j$. Услов паралелности радијус вектора и нормале је задовољен обезбеђењем пропорционалности одговарајућих компоненти, Naerlović - Veljković, 1990. Овај услов је задовољен преко следеће једначине:

$$S_{ij} x_j = \lambda x_i \quad (8.34)$$

при чему је λ константа. Једначина 8.34 представља скуп три хомогене линеарне једначине по променљивима x_i :

$$\begin{aligned} S_{11}x_1 + S_{12}x_2 + S_{13}x_3 &= \lambda x_1 \\ S_{21}x_1 + S_{22}x_2 + S_{23}x_3 &= \lambda x_2 \\ S_{31}x_1 + S_{32}x_2 + S_{33}x_3 &= \lambda x_3 \end{aligned} \quad (8.35)$$

Тривијално решење ових једначина је $x_i = 0$. За нетривијално решење детерминанта компоненти ове три једначине мора бити једнака нули:

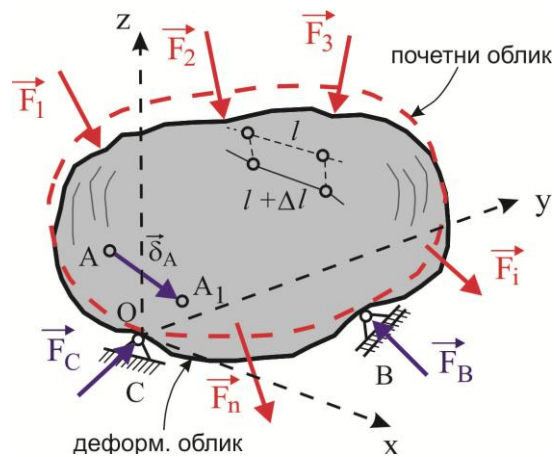
$$\begin{vmatrix} S_{11} - \lambda & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} - \lambda & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (8.36)$$

Три корена $\lambda', \lambda'', \lambda'''$ дају три могуће вредности за λ тако да обезбеђују да једначина 8.36 има решење различито од нуле. Вредности λ се често називају сопствене вредности или карактеристичне вредности матрице S . Сваки од корена дефинише правац у којем је радијус вектор квадратне површи паралелан нормали, који је, правац једне од главних оса. Правци се називају сопствени вектори или карактеристични вектори површи S .

9 Математичке основе деформације и напона

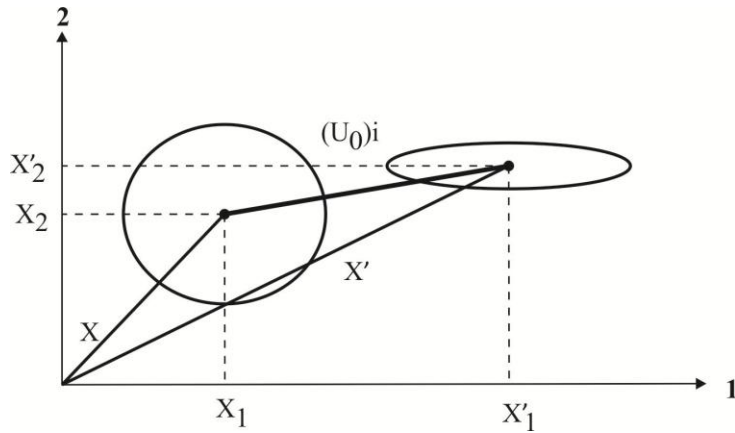
9.1 Дефиниција вектора помераја тачке у деформабилном телу

Под деформацијом тела подразумева се промена облика и димензија тела. На деформацију тела осим спољашњег оптерећења може утицати промена температуре, влажности, промене у структури тела, итд. Вектор помераја тачке тела је вектор који спаја почетни положај тачке са њеним положајем у деформисаном стању тела. Померај може да се разликује од пута који је тачка (елемент) прешла током деформације тела и који не мора бити правац. Ако је A почетни положај тачке тела и A_1 њен коначни положај након деформације тела, онда се вектор помераја $\vec{\delta}$ дефинише као $\vec{\delta}_A = \overline{AA_1}$, слика 9.1.



Слика 9.1. Вектор помераја тачке у деформабилном телу.

Код анализе деформације тела посматра се релативни положај две тачке у оквиру тела које се деформише. Пре описивања релативног кретања две тачке треба дефинисати апсолутно кретање једне тачке. Посматра се промена положаја материјалне тачке тела из недеформисаног положаја у њен деформисан положај. Један од геолошких облика недеформисаног тела који се често користи у анализи, је облик круга који у деформисаном стању тела добија облик елипсе. Да би се описала деформација тела посматра се апсолутно кретање центра круга. У недеформисаном положају центар круга је приказан вектором \mathbf{X} са компонентама X_i а у новом или деформисаном положају вектором \mathbf{X}' са компонентама X'_i , слика 9.2.



Слика 9.2. Деформација тела облика круга у 2Д равни.

Описивање кретања центра недеформисаног тела може се извести помоћу два приступа. Према првом приступу кретање се описује на основу скупа једначина које се односе на коначан положај центра тела. Другим приступом кретање центра недеформисаног тела се описује извођењем скупа једначина за вектор који повезује почетни положај и коначни положај центра тела.

9.1.1 Једначине деформације тачке

Један начин описивања дводимензионалног кретања центра круга је помоћу једначинама деформације пре и после деформације. Једначинама деформације описује се коначан положај тачке у деформисаном телу у односу на положај тачке пре деформације: $X'_1 = f(X_1, X_2)$, $X'_2 = f(X_1, X_2)$ или у општем облику $X'_i = f(X_j)$, слика 9.2. Однос почетног и коначног положаја у тродимензионалном систему је исти као у дводимензионалном. Једначине деформације у развијеном облику се изражавају на следећи начин, Means, 1990:

$$\begin{aligned} X'_1 &= a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 \\ X'_2 &= b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 \\ X'_3 &= c_0 + c_1 X_1 + c_2 X_2 + c_3 X_3 \end{aligned} \quad (9.1)$$

при чему константе a_0 , b_0 , и c_0 описују транслацију крутог тела.

У циљу поједностављења анализе често се користи посебан случај деформације - хомогена деформација. Хомогена деформација подразумева да се све тачке тела X'_i налазе у линеарном односу са тачкама X_i . Једноставан пример хомогене деформације у три димензије изражава следећим једначинама:

$$\begin{aligned} X'_1 &= a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 \\ X'_2 &= b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 \\ X'_3 &= X_3 \end{aligned} \quad (9.2)$$

Овим једначинама такође се описује деформација у равни код које су сва померања паралелна са равни нормалној на осу X'_3 . Транслација крутог тела дефинисана је померањем тачке $(0,0,0)$ у тачку $(a_0, b_0, 0)$.

У случају нехомогене деформације, тачка X'_i се налази у нелинеарном односу са тачком X_i . Нехомогена деформација у равни деформације се изражава следећим једначинама:

$$\begin{aligned} X'_1 &= a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_1^2 \\ X'_2 &= b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_1^2 \\ X'_3 &= X_3 \end{aligned} \quad (9.3)$$

9.1.2 Једначине вектора помераја тачке

Други начин описивања дводимензионалног кретања материјалне тачке од положаја X_i до положаја X'_i се заснива на вектору помераја \mathbf{u}_0 , слика 9.2. Вектор помераја центра круга представља разлику коначног вектора положаја \mathbf{X}' и почетног вектора положаја \mathbf{X} . Једначине вектора помераја центра круга изражавају се преко компоненти вектора помераја на следећи начин:

$$\begin{aligned} (u_0)_1 &= X'_1 - X_1 \\ (u_0)_2 &= X'_2 - X_2 \\ (u_0)_3 &= X'_3 - X_3 \\ \mathbf{u}_0 &= \mathbf{X}' - \mathbf{X} \end{aligned} \quad (9.4)$$

Највећи део кретања свих тачака у стенском блоку у Земљиној кори описује се померајем \mathbf{u}_0 тачке блока X_i . Овај пример помераја \mathbf{u}_0 представља translацију крутог тела јер се помоћу њега не описује кретање појединачних делова (елемената) стене релативно једне у односу на друге, већ се описује кретање свих делова по истој путањи.

9.2 Дефиниција деформације тела

Деформација тела представља промену облика и димензија тела под дејством спољашњег оптерећења, температуре, влажности и других фактора. Деформације тела зависе од оптерећења тела и еластичних својстава материјала од којих је тело сачињено. Појам деформације је у ствари геометријски појам тако да се може разматрати независно од оптерећења и еластичних својстава тела. Деформација је скуп геометријски дефинисаних величина које једнозначно дефинишу деформацију бесконачно малог елемента тела. За потпуно описивање деформације бесконачно малог елемента тела потребно је дефинисати девет величина, тј. елементе симетричног тензора другог ранга. Те величине су дужинске и угловне деформације у тачки тела, Means, 1990.

9.2.1 Дефиниција дужинске деформације тела

Једнодимензионална дужинска деформација или стрејн ϵ је бездимензионална величина дефинисана као промена дужине Δl по јединици дужине l (истезање или апсолутна деформација дужине), слика 9.3.



Слика 9.3. Дужинска деформација линије PQ.

Дужинска деформација која се у литератури се наводи и као лонгитудинална деформација, дефинише се следећом једначином:

$$\varepsilon = \Delta l / l \quad (9.5)$$

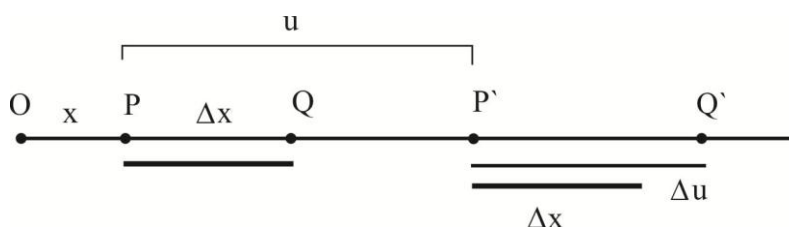
или помоћу лимеса диференцијалног рачуна што представља релативно истезање дужине:

$$\varepsilon = \lim_{l \rightarrow 0} (\Delta l / l) \quad (9.6)$$

увођењем диференцијалних ознака $l = \delta x$, $\Delta l = \delta u$ добиће се следећи израз:

$$\varepsilon = \lim_{\delta x \rightarrow 0} \frac{\delta u}{\delta x} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (9.7)$$

Код позитивне вредности дужинске деформације када је $\varepsilon > 0$ дужина се продужује, а код негативне вредности када је $\varepsilon < 0$ дужина се скраћује. Ако се не односи на неки одређени правац, дужинска деформација нема ознаку са индексом правца. Дужинска деформација се често назива и нормална деформација јер је повезана са нормалним напоном. Анализом померања две тачке Р и Q, односно деформације растојања Δx између њих, може се описати деформација у деловима стена Земљине коре (Means, 1990), слика 9.4.



Слика 9.4. Дужинска деформација растојања између две тачке.

На линији која полази из координатног почетка O и пролази кроз две тачке P и Q дужинска деформација се изражава као:

$$\Delta x + \Delta u = Q' - P' \quad (9.8)$$

Ако долази до истезања линије, тачке P и Q се померају у тачке P' и Q'. Дужинска деформација или стрејн дужине PQ се рачуна према једначини:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (9.9)$$

при чему је, слика 9.4:

- x - дужина линије од почетка O до тачке P,
- Δx - растојање између тачака P и Q,
- u - истезање од тачке P до P',
- x + u - укупна дужина од почетка O до P'
- Δu - истезање дужине Δx ,
- $\Delta x + \Delta u$ - растојање између тачака P' и Q'.

За описивање једнодимензионалне деформације у техничким областима користе се следеће дефиниције:

Табела 9.1. Једнодимензионалне деформације.

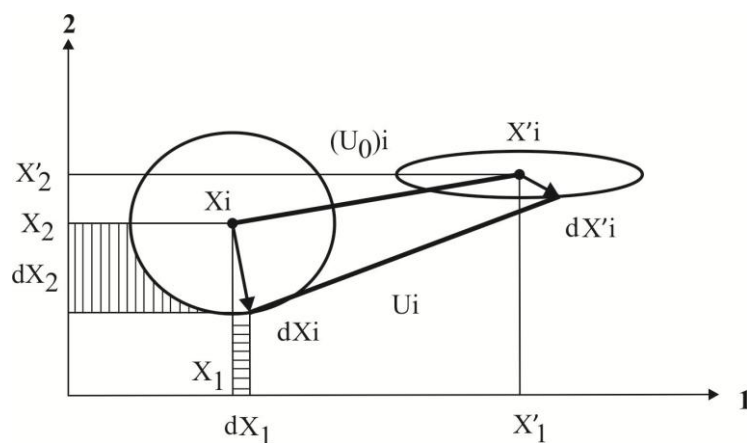
издужење - елонгација, стрејн	$\varepsilon = \Delta l/l$
истезање	$s = \frac{l_1}{l} = (1 + \varepsilon)$
квадратна елонгација	$\lambda = (l_1/l)^2 = (1 + \varepsilon)^2$
инфитезимални стрејн	$\varepsilon = dl/l$
прираштај стрејна	$\varepsilon = \Delta l/l$
природни стрејн	$\varepsilon = \int_l^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l_1}{l}\right) = \ln(1 + \varepsilon) = \frac{1}{2} \ln \lambda$

при чему је: l - иницијална дужина линије, Δl - апсолутна деформација дужине, l_1 - коначна дужина линије.

Конвенционално, деформација се дели у три компоненте. У једној димензији може да постоји само транслација крутог тела и истезање. Трећа компонента се појављује у две и три димензије где постоји додатна деформација у виду ротације када се тело ротира око одређене осе.

9.2.2 Градијент деформације

У кинематици математичко описивање кретања тела у суштини представља описивање путање коју тело прелази током деформације. Поред тога то је и математичко описивање релативног положаја две бесконачно блиске тачке током деформације тела. Две тачке тела се могу заједно транслирати, могу се ротирати једна око друге, или могу променити растојање релативно једна у односу на другу. Математичко представљање кретања тела на овај начин назива се деформационо описивање, Means, 1990.



Слика 9.5. Деформација вектора помераја тачке унутар тела.

Ако се током translације крутог тела тачке тела крећу релативно једна у односу на другу да би се деформација описала потребно је извести једначине које одговарају њиховом релативном кретању. У недеформисаном стању телу се може придружити линијски сегмент $d\mathbf{X}$ са компонентама dX_i , слика 9.5. За анализу деформације прате се промене у оријентацији и дужини $d\mathbf{X}$ према томе како се тачка из положаја \mathbf{X} помера деформацијом до тачке у положају \mathbf{X}' . Вектор dX_i под деформацијом је истегнут и ротиран у нови вектор dX'_i . Да би се релативно кретање честица унутар тела описало треба посматрати како се кретање u_i вектора $d\mathbf{X}$ разликује од кретања $(u_0)_i$ вектора \mathbf{X} .

Ако је $X'_i = f(X_j)$ онда је $X'_i + \Delta X'_i = f(X_j + \Delta X_j)$. Применом формуле за развој функције у Тејлоров ред:

$$f(x) = \sum_{n=0} \frac{f^n(a)}{n!} (x - a)^n$$

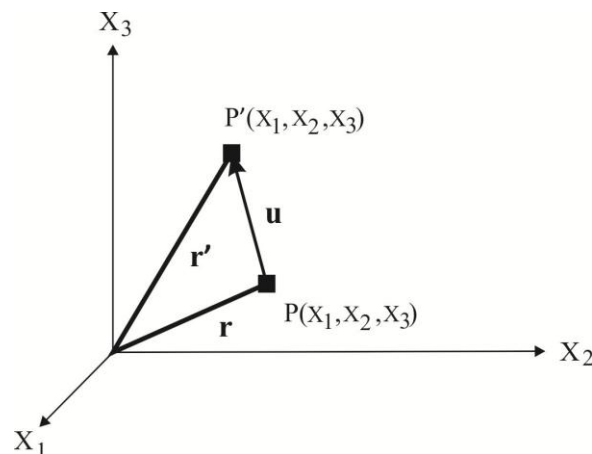
добија се следећи израз:

$$\Delta X'_i = (\partial X'_i / \partial X_j) \Delta X_j \quad (9.10)$$

$\partial X'_i / \partial X_j$ су коефицијенти, односно градијенти деформације и представљају функције положаја тачке у телу, X_i . Вектор помераја u_i представља суму $(u_0)_i$ и $E_{ij}dX_j$, где је градијент помераја E_{ij} функција положаја тачке у телу, односно $E_{ij} = \partial u_i / \partial X_j$. У анализи деформације корисније је некада користити једначине помераја од једначина деформације, Radovanović, 2014.

Осим једнодимензионалне дужинске деформације, стрејн представља и деформацију облика. Нека је у тродимензионалном координатном систему $O X_1, X_2, X_3$ дата тачка $P(X_1, X_2, X_3)$ која се током деформације померила у тачку $P'(X_1, X_2, X_3)$, где је вектор помераја између тачака P и P' једнак \mathbf{u}_P , слика 9.6:

$$\mathbf{u}_P = u_{X_1} \mathbf{i} + u_{X_2} \mathbf{j} + u_{X_3} \mathbf{k} \quad (9.11)$$



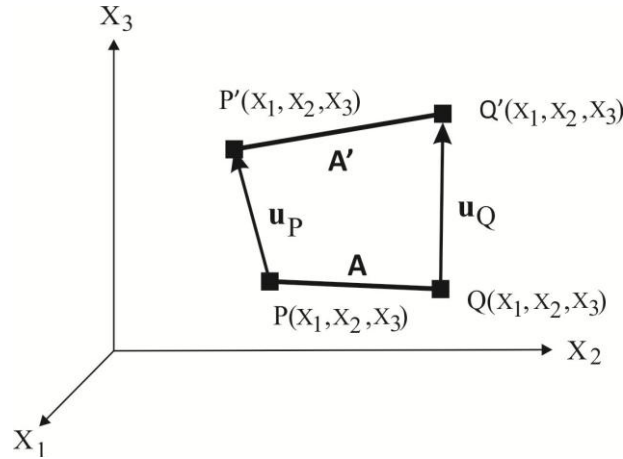
Слика 9.6. Вектор помераја тачке тела у тродимензионалном координатном систему.

У случају једнодимензионалне деформације тела потребно је посматрати деформацију између две тачке тела. Ако је дата друга тачка тела $Q(X_1, X_2, X_3)$ која

се током деформације померила у тачку $Q'(X_1, X_2, X_3)$, вектор помераја тачке Q је дат изразом, слика 9.7:

$$\mathbf{u}_Q = u'_{X_1} \mathbf{i} + u'_{X_2} \mathbf{j} + u'_{X_3} \mathbf{k} \quad (9.12)$$

Ако је \mathbf{A} вектор од тачке P до тачке Q и \mathbf{A}' вектор од тачке P' до тачке Q' тада је деформација тела једнака разлици вектора \mathbf{A} и \mathbf{A}' , односно $\delta\mathbf{A} = \mathbf{A}' - \mathbf{A}$.



Слика 9.7. Једнодимензионална деформација тела.

$\delta\mathbf{A}/\delta X$ се дефинише као брзина промене деформације по положају у оквиру тела. Према законима векторске анализе у том сличају је:

$$\mathbf{u}_P + \mathbf{A}' = \mathbf{A} + \mathbf{u}_Q \quad (9.13)$$

$$\delta\mathbf{A} = \mathbf{u}_Q - \mathbf{u}_P \quad (9.14)$$

Функција \mathbf{u} је аналитичка функција у тачки \mathbf{u}_Q ако се може представити развојем полинома у тачки P са радијусом конвергенције $R > 0$. Како је \mathbf{u} аналитичка функција, онда се \mathbf{u}_Q може изразити у зависности од \mathbf{u}_P користећи развој функције у Тејлоровог ред у тачки P . Тејлоров развој функције f у околини тачке a има следећи облик:

$$f(z) = f(a) + f'(a) \cdot (z - a) + f''(a) \cdot \frac{(z-a)^2}{2!} + \dots \quad (9.15)$$

где је ред центриран у тачки a . Развој функције \mathbf{u}_Q око \mathbf{u}_P се изражава као:

$$\mathbf{u}_Q = \mathbf{u}_P + (\partial\mathbf{u}/\partial X_1)_P \Delta X_1 + (\partial\mathbf{u}/\partial X_2)_P \Delta X_2 + (\partial\mathbf{u}/\partial X_3)_P \Delta X_3 + \dots \quad (9.16)$$

где је $\Delta X_i = A_i$ (тј. компоненте вектора \mathbf{A}). Чланови вишег реда се могу занемарити, па се функција \mathbf{u}_Q преко суме индекса изражава на следећи начин:

$$\mathbf{u}_Q = \mathbf{u}_P + (\partial\mathbf{u}/\partial X_j)_P A_j, \quad j = 1, 2, 3 \quad (9.17)$$

$$\delta\mathbf{A} = (\partial\mathbf{u}/\partial X_j)_P A_j \quad (9.18)$$

По конвенцији је $(\delta A)_i = \delta A_i$ и $(\partial u / \partial X_j)_i = (\partial u_i / \partial X_j)$ па је коначна једначина деформације тела једнака:

$$\delta A_i = (\partial u_i / \partial X_j) A_j \quad (9.19)$$

Једначине померања у којима фигуришу као компоненте скаларне величине градијенти деформације $\partial u_i / \partial X_j$, се изражавају на следећи начин:

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{\partial u_1}{\partial X_1} X_1 + \frac{\partial u_1}{\partial X_2} X_2 + \frac{\partial u_1}{\partial X_3} X_3 \\ u_2 &= \frac{\partial u_2}{\partial X_1} X_1 + \frac{\partial u_2}{\partial X_2} X_2 + \frac{\partial u_2}{\partial X_3} X_3 \\ u_3 &= \frac{\partial u_3}{\partial X_1} X_1 + \frac{\partial u_3}{\partial X_2} X_2 + \frac{\partial u_3}{\partial X_3} X_3 \end{aligned} \quad (9.20)$$

У тродимензионалном систему помераји u_i су повезани системом линеарних једначина са независним променљивим, односно са векторима dX_j :

$$\begin{aligned} u_1 &= (u_0)_1 + E_{11} dX_1 + E_{12} dX_2 + E_{13} dX_3 \\ u_2 &= (u_0)_2 + E_{21} dX_1 + E_{22} dX_2 + E_{23} dX_3 \\ u_3 &= (u_0)_3 + E_{31} dX_1 + E_{32} dX_2 + E_{33} dX_3 \\ u_i &= (u_0)_i + E_{ij} dX_j \end{aligned} \quad (9.21)$$

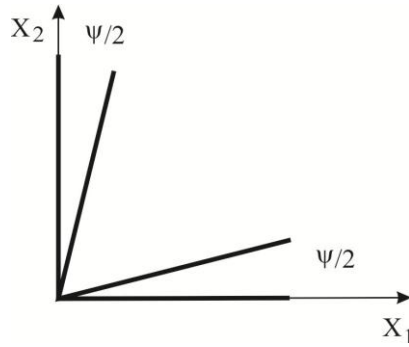
Сва кретања, односно деформације у оквиру тела а која нису транслација крутог тела описују се градијентима деформације E_{ij} . Градијенти имају два индекса што значи да повезују два вектора и у претходном примеру су то вектор помераја \mathbf{u} и вектор положаја $d\mathbf{X}$.

Померај и градијент деформације се разликују по природи информација које изражавају. Једначине помераја показују правац кретања честица током деформације. Вектор \mathbf{u} (u_1, u_2, u_3) показује коначну позицију тачке из иницијалне позиције која је дата почетним координатама X_1, X_2, X_3 . Градијентима деформације $\partial u_i / \partial X_j$ се описују како кретање почетне тачке варира са њеним положајем у телу. Насупрот томе, једначине деформације приказују коначну позицију тачке тела X'_1, X'_2, X'_3 помоћу чланова иницијалног координатног система X_1, X_2, X_3 .

9.2.3 Дефиниција угловне деформације тела

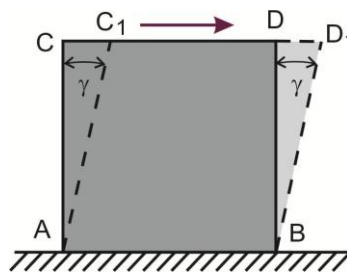
Формална дефиниција угловне деформације или деформације смицања (енг. shear strain) γ гласи да је угловна деформација промена угла ψ између две иницијално управне линије, слика 9.8:

$$\gamma = \tan \psi \quad (9.22)$$



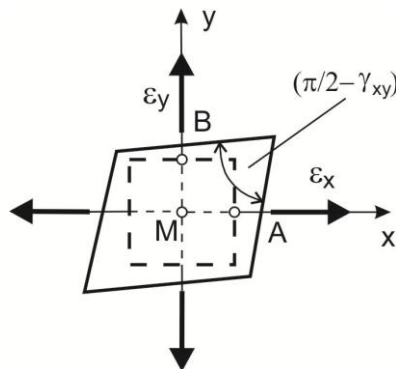
Слика 9.8. Угловна деформација.

Угловна деформација тела се дефинише као промена првобитно правоугла у телу, слика 9.9.



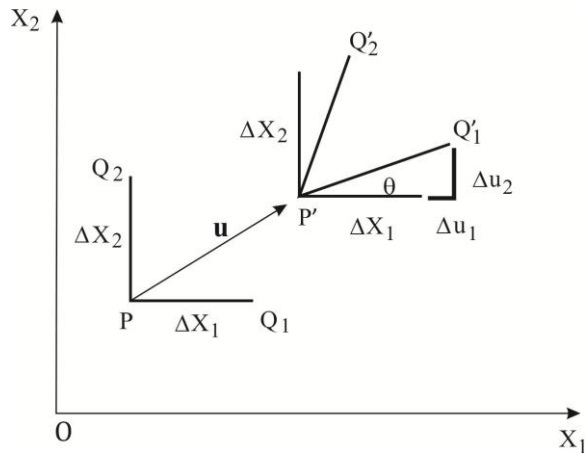
Слика 9.9. Угловна деформација тела.

Предзнак угловне деформације у тачки тела дефинише се у односу на координатни систем, слика 9.10. Предзнак угловне деформације је позитиван, ако се угао који чине позитивне координатне осе или негативне координатне осе смањује. Угловна деформација је негативна, ако се угао који чине једна позитивна и једна негативна координатна оса смањује, Glumac, 2006. На слици 9.10 је $\epsilon_x > 0, \epsilon_y > 0, \gamma_{xy} = \gamma_{yx} > 0$.



Слика 9.10. Угловна деформација у тачки тела.

Друга мера деформације смицања је тензор смицања који је једнак половини тангенса промене угла између иницијално управних линија, односно $\gamma/2$. У литератури γ се назива и инжењерско смицање и представља се линијом ротације. На слици 9.11 приказан је правоугаони елемент Q_1PQ_2 са теменом у тачки P који трпи дисторзију (истезање и ротацију) што се може описати градијентима деформације.



Слика 9.11. Деформација правоугаоног елемента.

Истежање линије PQ_1 паралелно са осом X_1 износи:

$$\Delta u_1 = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \Delta x_1 = E_{11} \Delta x_1 \quad (9.23)$$

Истежање линије PQ_1 у смеру супротном од казаљке на сату износи:

$$\Delta u_2 = \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \Delta x_1 = E_{21} \Delta x_1 \quad (9.24)$$

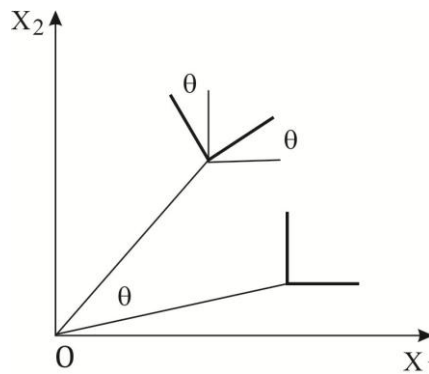
Угао за који је линија PQ_1 ротирана једнак је:

$$\tan \theta = \frac{\Delta u_2}{\Delta x_1 + \Delta u_1} \quad (9.25)$$

Како је $\Delta u_1 \ll \Delta x_1$ угао ротације је:

$$\theta = \frac{\Delta u_2}{\Delta x_1} = E_{21} \quad (9.26)$$

Случај када није дошло до дисторзије већ само до ротације правоугаоног елемента приказан је на слици 9.12.



Слика 9.12. Ротација правоугаоног елемента.

Неротациона и ротациона деформација

Тензор ротације E_{ij} је инваријантан у односу на произвољне, претпостављене помераје тачке почетка координатног система, односно свако својство тензора ротације је независно од положаја и оријентације координатног система. Тензор ротације E_{ij} у матричном облику се означава на следећи начин:

$$E_{ij} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} \end{bmatrix} \quad (9.27)$$

Први индекс означава компоненту у правцу осе деформације u_i , а други индекс означава компоненту у фронталној равни, односно равни нормалној на осу деформације u_j .

Постоји разлика између бесконачно мале деформације (стрејна) и коначне деформације. бесконачно мала деформација је она где су коначни положаји суседних тачака веома близу почетним положајима. Теорија бесконачно малих деформација се користи у теорији еластичности где су деформације веома мале. Инфинитезималне деформације су независне од стварне путање померања, што није случај за коначне деформације. Деформација које се догађа на површини Земљине коре је коначна деформација, Kattenhorn, 2013. Код бесконачно мале деформације тензор ротације E_{ij} , и општи тензор другог реда може се изразити као збир симетричне и асиметричне компоненте тензора

$$E_{ij} = \varepsilon_{ij} + \omega_{ij} \quad (9.28)$$

при чему је ε_{ij} симетрична компонента и ω_{ij} асиметрична компонента. Симетрична компонента инфинитезималног тензора ротације обухвата само дилатацију (промену у волумену) и дисторзију (промену облика). Због симетрије, компонента ε_{ij} се састоји од само шест независних варијабли. Компонента ε_{ij} се може дефинисати као сопствени (правилан) стрејн или неротациони стрејн. Асиметрични тензор ω_{ij} има само три независне компоненте и описује само ротацију због чега се назива ротациони стрејн.

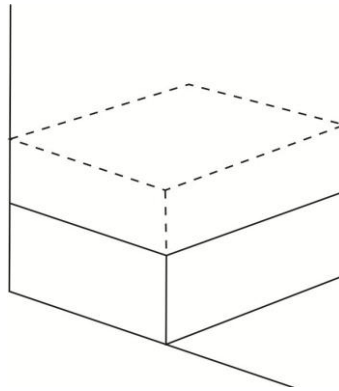
На основу ових једноставних дефиниција, јасна је разлика између чистог смицања и простог смицања. Разлика између чистог смицања и простог смицања се може видети у односу на правце главних оса стрејна. Ако се правци главних оса стрејна коначно не мењају као резултат деформације, онда је у питању неротациона деформација или чисто смицање. У случају простог смицања главне осе стрејна увек се разликују у зависности од величине смицања тако да је просто смицање ротациона деформација.

Код деформације која настаје ротацијом не значи да тело (блок стене) мора да се физички окреће око неке осе. У зони раседа због овог недостатка стварне ротације, ова ротација се означава као унутрашња ротација, односно деформација унутар стене. Овај тип ротације је супротан од спољашње ротације где се догађа коначна деформација код које су компоненте матрице градијента деформације значајне.

9.2.4 Геолошка деформација, реалан стрејн

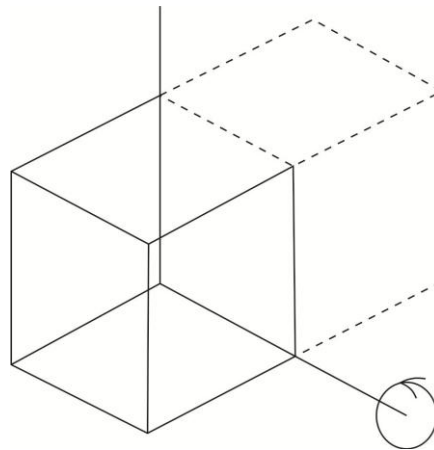
Три најпознатија примера геолошких деформација приказана преко померања и деформације блока стене су, Means, 1990:

1. Прва деформација која се догодила у историји седиментних стена је њихово сабијање. Ова деформација се приказује спљоштеношћу у вертикалном правцу без деформације у хоризонталним правцима, слика 9.13.



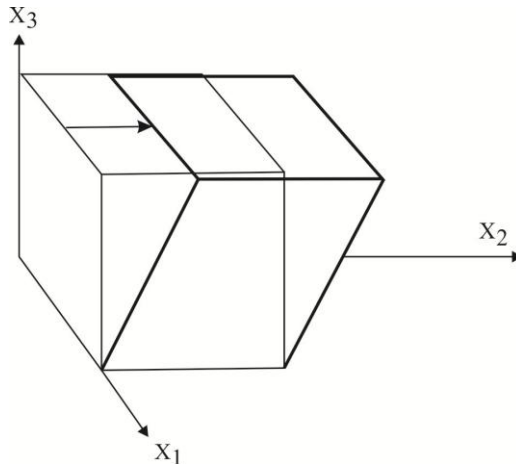
Слика 9.13. Деформација стена настала сабијањем.

2. Ако се блок стене из иницијалног положаја окрене на једну страну, деформација може представљати тектонско сабијање. Под претпоставком да се блок деформише без унутрашњег стрејна ова деформација представља ротацију крутог блока за 90° , слика 9.14.



Слика 9.14. Ротација стене без унутрашњег стрејна.

3. Деформација смицања се често догађа у зони раседа, које се због тога називају и зонама смицања. Смицање је приказано деформацијом јединичне коцке стене на слици 9.15.



Слика 9.15. Деформација стене смицањем.

9.3 Компоненте спољашњих и унутрашњих сила које делују на тело

Деловање спољашњих сила (силе оптерећења и реакције веза) између честица тела изазива појаву унутрашњих сила које се супротстављају деформацији тела, слика 9.1. На тело могу деловати две врсте спољашњих сила:

- а) површинске силе, тј. силе које делују само на спољашњој површини тела које не зависе од масе тела.
- б) волуменске силе које делују на све честице тела унутар његовог обима (нпр. гравитационе силе, магнетне силе, силе инерције код убрзаног кретања тела).

Специјалан случај површинских сила су концентрисане силе када је једна коначна сила расподељена на врло малој површини тела, тако да је интензитет те силе на том месту веома велик. За стање равнотеже тела потребно је да све спољашње силе које делују на тело чине равнотежни систем сила, односно да су задовољени услови равнотеже тела: резултанта и резултујући момент свих спољашњих сила морају бити једнаки нули. Услови равнотеже тела у векторском облику изражавају се на следећи начин:

$$\vec{R} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0, \quad \vec{M}_S = \sum_{i=1}^n (\vec{r}_i \times \vec{F}_i) = 0 \quad (9.29)$$

9.3.1 Унутрашње силе у пресеку тела

Када на неко тело делују спољашње силе онда оне настоје да раздвоје или приближе честице тела. Тело се томе супротставља унутрашњим силама које делују између његових честица, односно настаје напрегнуто стање у телу. Одређивање унутрашњих сила и деформација у свакој тачки тела услед деловања спољашњих сила је главни задатак научних области које се баве изучавањима еластичности тела, Kattenhorn, 2013.

Унутрашња сила подељена површином пресека на који сила делује назива се напон или напрезање. Унутрашње силе у телу не делују управно на површину

пресека тако да у општем случају у пресеку тела делује нормални и тангенцијални напон. Нормалним напоном тело се опире међусобном примицању или размицању својих честица. Нормални напон σ делује једнолико по попречном пресеку површине A , тако да се укупна сила у пресеку изражава као $F = \sigma \cdot A$. Интензитет нормалног напона у попречном пресеку се изражава следећом једначином:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (9.30)$$

Тангенцијалним напоном (смицањем) τ тело се опире клизању једног слоја честица тела по другом. Напон смицања није једнолико расподељен по површини пресека A па се може срачунати његова просечна вредност по формули:

$$\tau_{sr} = F/2A \quad (9.31)$$

Средњи, прави и тангенцијални напон у пресеку тела

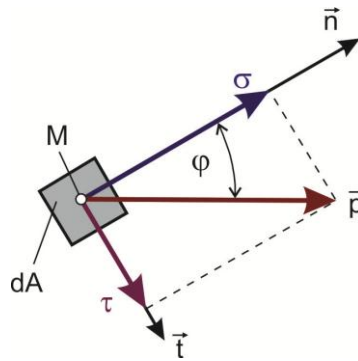
Ако се површина пресека A подели на низ елементарних површина ΔA_i тада ће на свакој елементарној површини деловати елементарна унутрашња сила $\Delta \vec{F}_i$. Ове силе се међају по смеру и интензитету и зависе од површине елементарне површине ΔA_i . Однос елементарне силе $\Delta \vec{F}_i$ и површине пресека ΔA_i дефинише се вектором средњег напона на елементу површине у околини тачке тела:

$$(\vec{p}_{sr})_i = \frac{\Delta \vec{F}_i}{\Delta A_i} \quad (9.32)$$

Ако се елементарна површина смањује, односно када $\Delta A_i \rightarrow 0$ али тако да стално обухвата тачку тела, смањиваће се и елементарна унутрашња сила $\Delta \vec{F}_i$, а средњи напон $(\vec{p}_{sr})_i$ ће бити ближи правом напону у тачки тела. Дакле, вектор средњег напона $(\vec{p}_{sr})_i$ тежи стварном вектору напона \vec{p} у некој тачки тела M . Вектор правог напона у тачки тела се изражава једначином:

$$\vec{p} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{F}}{\Delta A} \quad (9.33)$$

У општем случају вектор правог напона \vec{p} није управан на раван пресека на који делује, већ са нормалом \vec{n} на површини пресека у тачки тела M заклапа неки угао φ , слика 9.16. Апсолутна вредност $|p|$ вектора \vec{p} назива се прави напон у тачки тела. Вектор правог напона \vec{p} се може раставити на две компоненте: нормалну компоненту напона σ на раван пресека у правцу нормале \vec{n} и тангенцијалну компоненту напона τ која лежи у равни пресека. Нормална компонента правог напона (или нормални напон) се рачуна као: $\sigma = p \cdot \cos \varphi$. Угао φ је угао између вектора \vec{p} и нормале \vec{n} и може имати вредности $0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$, слика 9.16. Према томе, вредности нормалног напона σ могу бити $\sigma > 0$, $\sigma = 0$ или $\sigma < 0$. Ако је φ у распону $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$, нормални напон има позитивну вредност а када се налази у распону од $90^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ тада нормални напон има негативну вредност.



Слика 9.16. Компоненте вектора правог напона у тачки тела.

Тангенцијална компонента правог напона (или тангенцијални напон) се рачуна по формули: $\tau = p \cdot \sin \varphi$. Вредности тангенцијалног напона могу бити $\tau \geq 0$. Код изотропних тела смер деловања тангенцијалног напона τ нема никакво физичко значење. Предзнак тангенцијалног напона τ се може дефинисати у координатном систему. Компоненте напона σ и τ нису вектори и њихове вредности у некој тачки тела зависе од:

- димензија и облика тела, односно од еластичних својстава метеријала тела,
- вредности и распореда спољашњег оптерећења које делује на тело,
- оријентације пресека коме припада тачка тела.

Јединица притиска и напона у SI-систему је паскал (Pa) у част француском физичару Blaise Pascal, а дефинисана је као њутн по квадратном метру $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$. За изражавање вредности притиска течности и гасова, у техничкој пракси је у употреби нормирана јединица bar: $1\text{bar} = 10^5\text{Pa} = 0.1\text{MPa}$.

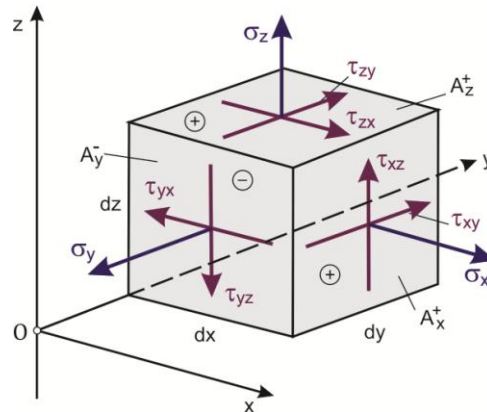
9.4 Компоненте тензора напона у тачки тела

За дефинисање тензора напона у тачки M неког тела (блока стене) потребна су три вектора правог напона за три међусобно управна пресека, односно 9 компоненти напона, слика 9.17. Предзнак компоненти напона у пресецима управним на одговарајуће осе координатног система одређује се као и за унутрашње силе:

- а) компонента напона је позитивна, ако на позитивном пресеку (спољашња нормала усмерена у позитивном смеру координатне осе) делује у позитивном смеру координатне осе или ако на негативном пресеку делује у негативном смеру координатне осе,
- б) компонента напона је негативна, ако на позитивном пресеку (спољашња нормала усмерена је у позитивном смеру координатне осе) делује у негативном смеру координатне осе или ако на негативном пресеку делује у позитивном смеру координатне осе.

На слици 9.17 су све приказане компоненте напона позитивне. Компоненте тензора напона означавају се симболом σ са два индекса: σ_{ij} , $i, j = x, y, z$. Индекс i означава координатну осу са којом је нормала на пресек на коме делује компонента напона паралелна а индекс j означава координатну осу са којом је компонента напона паралелна. Нормалне компоненте имају оба индекса једнака $i = j$, док тангенцијалне компоненте имају различите индексе $i \neq j$. У правоуглом Oxyz координатном

систему девет компоненти тензора напона у тачки тела (јединична коцка) су следеће: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{zx}, \tau_{xz}$ (Maksimović, 2008).



Слика 9.17. Компоненте тензора напона у правоуглом Охуз координатном систему.

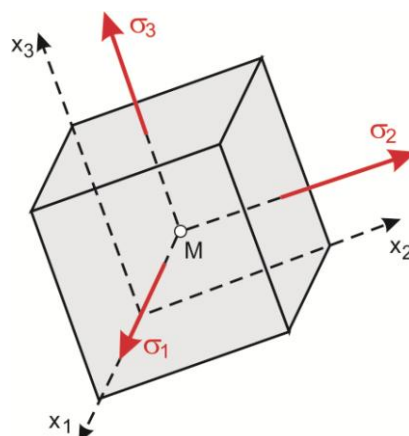
Квадратна матрица компоненти напона у тачки тела $[\sigma_{ij}]$ има следећи облик:

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (9.34)$$

По врстама су сложене компоненте напона које делују на пресецима A_x^+, A_y^+ и A_z^+ . Прву колону матрице $[\sigma_{ij}]$ чине компоненте напона које су паралелне са осом x , другу колону чине компоненте паралелне са осом y и трећу колону чине компоненте паралелне са осом z у посматраној тачки тела.

У простору постоји оријентација координатних оса за које су тангенцијалне компоненте напона у тачки тела једнаке нули а нормални напони имају максималне вредности, слика 9.18. Ове осе су главни правци напона а напони у правцу оса се називају главни напони σ_1, σ_2 и σ_3 за које важи $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. За такву оријентацију координатних оса матрица тензора напона $[\sigma_{ij}]$ у тачки тела има чланове само на главној дијагонали:

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (9.35)$$

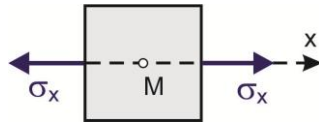


Слика 9.18. Главни правци напона.

9.4.1 Стања напона у оптерећеном телу

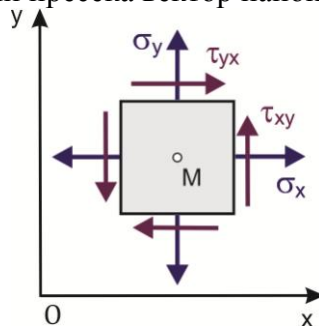
Са променом оријентације пресека у тачки тела вектор напона \vec{p} се мења по смеру и интензитету, тако да се разликују следећа могућа стања напона тела:

- линеарно (или једноосно) стање напона: $\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$, слика 9.19. Вектор напона \vec{p} увек лежи на једном правцу без обзира на оријентацију пресека.



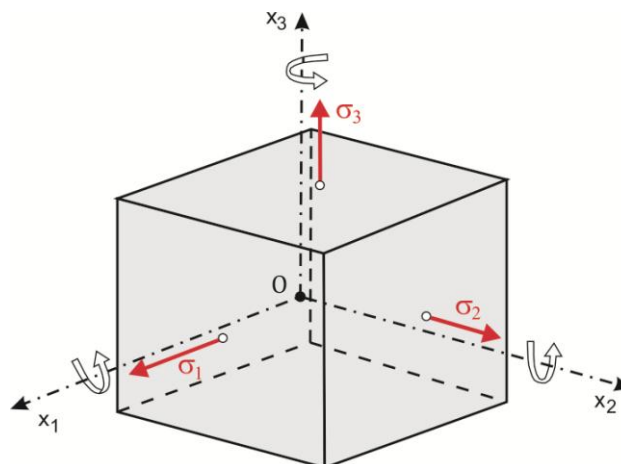
Слика 9.19. Једноосно стање напона.

- раванско (или двоосно) стање напрезања где је $\sigma_1 > \sigma_2 \neq 0, \sigma_3 = 0$, слика 9.20. При произвољној промени пресека вектор напона \vec{p} увек лежи у истој равни.



Слика 9.20. Двоосно стање напона.

- просторно (или троосно) стање напрезања где је $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \neq 0$, слика 9.21. При произвољној промени пресека тела, вектор напона \vec{p} мења оријентацију у простору.



Слика 9.21. Троосно стање напона у тачки тела.

За описивање троосног стања напона у геологији може се користити Мохорова кружница која се може конструисати само у примеру када су познате вредности главних напона σ_1, σ_2 и σ_3 у тачки тела где важи однос $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Апсцисе

тачака главних напона у Мохоровој кружници напона су: $A(\sigma_1, 0)$, $B(\sigma_2, 0)$ и $C(\sigma_3, 0)$, слика 9.22.

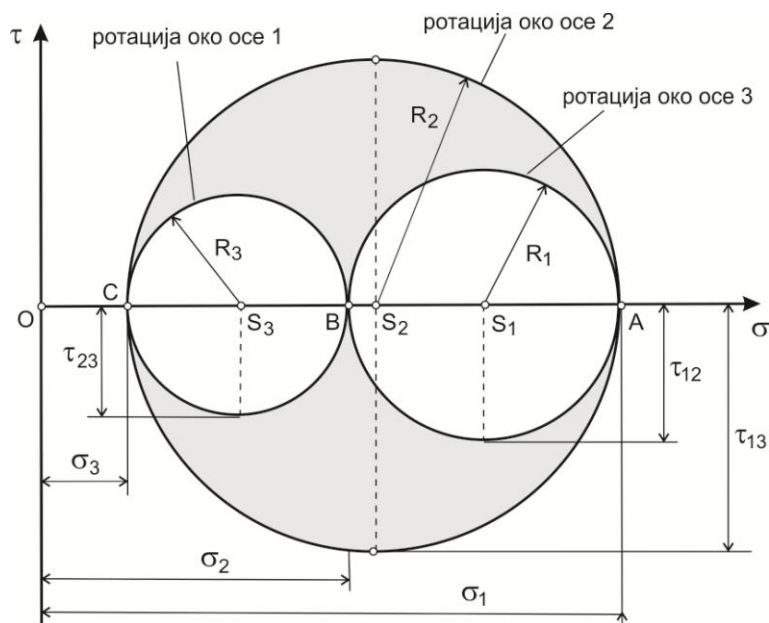
Апсцисе средишта кружница напона су одређене дужинама:

$$\overline{OS_1} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, \quad \overline{OS_2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad \overline{OS_3} = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \quad (9.36)$$

Полупречници кружница напона се рачунају на следећи начин:

$$R_1 = \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2}, \quad R_2 = \frac{|\sigma_1 - \sigma_3|}{2}, \quad R_3 = \frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2} \quad (9.37)$$

Ако коси пресек у тачки тела пролази кроз главни правац напона 1, тада се стања напона приказују тачкама кружнице чије су крајње тачке В и С. Ако пресек пролази кроз главни правац напона 2, стање напона одређено је тачкама највеће кружнице чије су крајње тачке А и С. Аналогно, ако пресек пролази кроз главни правац напона 3, стање напона одређено је тачкама кружнице чије су крајње тачке А и В. Код општег косог пресека кроз тачку тела код просторног стања напона, стање напона у пресеку одређено је тачкама исцртаног подручја између три кружнице.



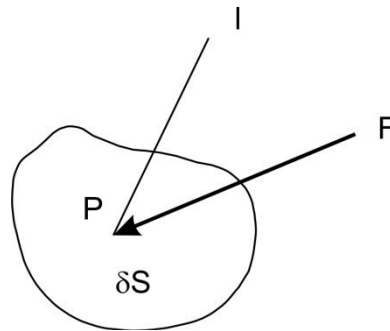
Слика 9.22. Мохорова кружница напона за просторно стање напона у тачки тела.

Максимална вредност тангенцијалног напона τ_{\max} појављује се у пресеку који је паралелан са главним правцем напона 2 и гради угао од 45° са пресецима на којима делују главни напони σ_1 и σ_3 , слика 9.22. У том случају на пресек делује нормални напон који износи $\sigma_S = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ а максимални тангенцијални напон износи $\tau_{\max} = \tau_{13} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$. У Мохоровој кружници напона максимални тангенцијални напон τ_{\max} одговара полупречнику највеће кружнице. Секундарни главни тангенцијални напони у косим пресецима кроз тачку М тела износе $\tau_{12} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$ и $\tau_{23} = (\sigma_2 - \sigma_3)/2$. Главни тангенцијални напони су веома значајни код употребе енергетских теорија чврстоће тела, Максимовић, 2008.

9.5 Напони у стенама литосфере

Конвенцијално, Мохоровим дијаграмом се графички приказују стања напона у Земљиној кори. Дијаграм је погоднији за дводимензионална представљања напона иако нека правила која се примењују у две димензије важе и за три димензије. Једно од важнијих правила стања напона је да је збир напона инваријантан или непромењен ротацијом координатних оса, Kattenhorn, 2013. Нека је \mathbf{F} вектор силе која делује на површину стене, који је такође и вектор напона $\boldsymbol{\sigma}$, онда се напон изражава следећом једначином, слика 9.23:

$$\boldsymbol{\sigma} = \lim_{\delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{F}}{\Delta S} \quad (9.38)$$



Слика 9.23. Напон на површини елемента стене.

Нека на мали елемент површине стене δS који садржи тачку P делује напон $\boldsymbol{\sigma}$, слика 9.23. Јединични вектор \mathbf{I} се може пројектовати управно на област δS у тачки P а сила која делује на овој површини се изражава производом $\boldsymbol{\sigma} \delta S$. Сила која делује на стену на позитивној страни области (што је дефинисано оријентацијом \mathbf{I}) изазива отпор напона у стени на негативној страни површине δS . Док је сила на позитивној страни дефинисана тензором првог реда са три компоненте силе вектора, напон на негативној страни површине је изражен помоћу тензора другог реда са девет компоненти тензора напона.

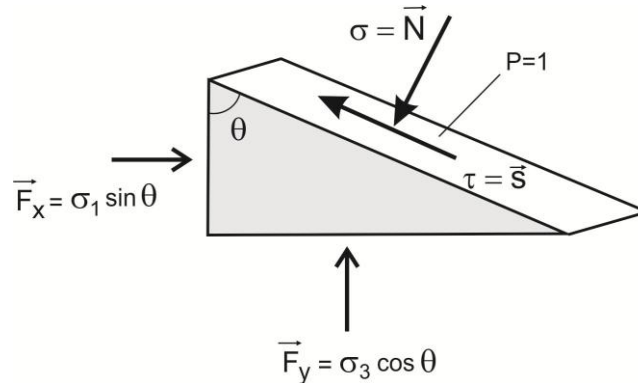
Како се оријентација \mathbf{I} мења унутар напрегнуте стене тако се појављују и варијације $\boldsymbol{\sigma} \delta S$. Под претпоставкама деловања хомогеног напона, постојања сила стене и равнотежног стања стене што значи да стена није тренутно деформисана, сила $\boldsymbol{\sigma} \delta S$ се неће мењати са оријентацијом \mathbf{I} . Вектор силе \mathbf{F} се може раставити на две компоненте, једну паралелну са равни површи и другу компоненту нормалну на раван у тачки P . Такође, напон који делује на одређену раван као вектор напона $\boldsymbol{\sigma}$, може се представити помоћу две компоненте: нормалног напона σ_n и тангенцијалног напона или напона смицања τ . Док се магнитуда и правац вектора напона $\boldsymbol{\sigma}$ не мењају при преоријентацији површине, магнитуда и правац нормалног напона σ_n и напона смицања τ се мењају.

9.5.1 Анализа равнотеже сила стена литосфере

По дефиницији притисак је једнак сили која делује по јединици површине као што се и случају напона може користити иста дефиниција. Разлика између притиска и напона у структурама у геологији се заснива на природи материјала на који сила делује, односно разлика се посматра у зависности од тога да ли материјал има снагу

смицања. Стенски материјали имају снагу смицања тако да врше напон на своју околину. Материјали који имају снагу смицања могу да врше различите напоне у различитим правцима. Термин притисак се користи када се описује сила по јединици површине коју течности или гасови врше на своју околину. На пример, вода у порама стена врши притисак на деловима у окружењу пора, Stein, 1996.

За описивање напона који делује на тело (блок стене) најкорисније једначине су једначине нормалног напона σ_n и напона смицања τ у односу на главне напоне σ_1 и σ_3 . Извођење ових једначина се заснива на равнотежном стању тела што значи да је збир свих сила у било ком правцу једнак нули.



Слика 9.24. Силе које делују на троугаони елемент стене.

Нека силе делују на тело паралелно предњој страни тела, тј. троугла чврсте стене, слика 9.24. Како силе делују у равни, проблем се своди на решење равнотежног стања сила у дводимензионалној области. Ако је површина хипотенузе једнака јединици онда је површина леве и доње стране троугла једнака косинусу и синусу угла θ . Силе које делују на странама троугла једнаке су производу напона и површине стране. Сабирањем сила у хоризонталном и вертикалном правцу добијају се следеће две једначине:

$$\sum F_h = 0 = F_x - S \sin \theta - N \cos \theta \quad (9.39a)$$

$$\sum F_v = 0 = F_y - N \sin \theta + S \cos \theta \quad (9.39b)$$

Заменом чланова компоненти сила са компонентама напона добијају се изрази у којима фигуришу нормални напон и напон смицања који делују на раван нагнуту за угао θ у односу на осе главних напона σ_1 и σ_3 :

$$\sigma_1 \cos \theta - \sigma_n \cos \theta - \tau \sin \theta = 0 \quad (9.40a)$$

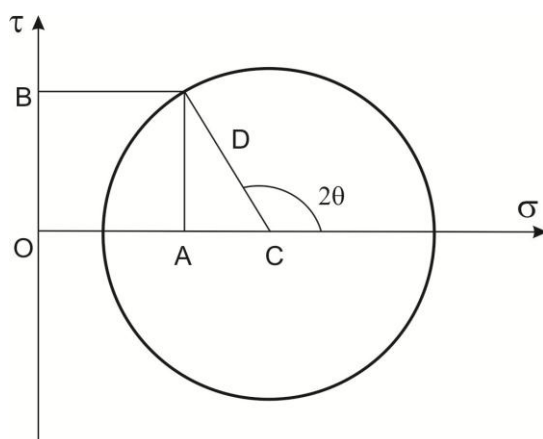
$$\sigma_3 \sin \theta - \sigma_n \sin \theta + \tau \cos \theta = 0 \quad (9.40b)$$

Посматрана раван у многим примерима у геологији је раван раседа чији се параметри σ_n и τ рачунају према следећим изразима:

$$\sigma_n = \sigma_3 \cos^2 \theta + \sigma_1 \sin^2 \theta \quad (9.41a)$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \cos \theta \sin \theta \quad (9.42b)$$

На Мохоровом дијаграму угао θ између осе главног напона σ_1 и нормале на раван раседа је представљен као двострука вредност у смеру супротном од казаљке на сату од правца максималног нормалног напона σ_1 . У општем случају, θ има вредност око 60° тако да је косинус 2θ негативан број. Ово је значајно зато што је нормални напон на активним равнима раседа мањи од средњег напона на равни раседа, на дијаграму $A < C$, слика 9.25.



Слика 9.25. Мохоров дијаграм нормалног напона и напона смицања.

Компоненте Мохоровог круга приказане тачкама А, В, С и D на слици 9.25 су:

- нормални напон, тачка А: $\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta$.
- напон смицања, тачка В: $\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta$.
- средњи напон, центар Мохоровог круга, тачка С: $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$.
- максимални напон смицања, полупречник Мохоровог круга, тачка D: $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$.

9.5.2 Еластичност и референтна стања напона литосфере

За разматрање референтних стања литосфере потребно је дати увод у основе еластичности коре литосфере. У многим мерним техникама на самом месту напона користе се особине еластичности стена. Такође, многи процеси повезани са стањем напона у литосфери настају од претпоставке да се горња кора понаша као линеарно еластично тело.

У распону од гранитних и седиментних стена ($\approx 12\text{-}5$ km) до дебљине литосферских плоча (≈ 100 km), Земља је приближно изотропна са еластичним својствима независним од правца посматрања. Ако се претпостави да литосфера подлеже малим деформацијама, као у случају еластичног понашања, онда главне осе напона морају да коинцидирају са главним осама деформације. Еластично понашање литосфере се представља линеарним једначинама које дефинишу главне напоне тродимензионалног тензора напона као линеарне функције главних деформација, Pollard and Fletche, 2005:

$$\sigma_1 = (\lambda + 2\zeta) \varepsilon_1 + \lambda \varepsilon_2 + \lambda \varepsilon_3 \quad (9.43)$$

$$\sigma_2 = \lambda \varepsilon_1 + (\lambda + 2\zeta) \varepsilon_2 + \lambda \varepsilon_3 \quad (9.44)$$

$$\sigma_3 = \lambda \varepsilon_1 + \lambda \varepsilon_2 + (\lambda + 2\zeta) \varepsilon_3 \quad (9.45)$$

при чему су λ и ζ константе које описују еластична својства стена познате као Ламеове константе. λ је константа која означава однос напона и деформације у два нормална правца, ζ је константа модула крутости материјала и показује однос напона смицања и просте деформације. $\lambda + 2\zeta$ је однос напона и деформације у истом правцу. Укупна запреминска деформација се дефинише једначином:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (9.46)$$

одакле се добија једначина која повезује главне напоне и укупну деформацију:

$$\sigma_i = \lambda \Delta\varepsilon + 2\zeta \varepsilon_i \quad (9.47)$$

За разумевање константи еластичности Јунговог модула (E) и Пуасоновог односа (ν) често се користи једноосно стање напона. Једноосно стање напона, за које је само једна компонента главног напона различита од нуле, је веома редак случај у Земљиној кори осим код стубова подземних рудника. Код једноосног напона када је $\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, једначине еластичности имају следећи облик:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= (\lambda + 2\zeta) \varepsilon_1 + \lambda \varepsilon_2 + \lambda \varepsilon_3 \\ 0 &= \lambda \varepsilon_1 + (\lambda + 2\zeta) \varepsilon_2 + \lambda \varepsilon_3 \\ 0 &= \lambda \varepsilon_1 + \lambda \varepsilon_2 + (\lambda + 2\zeta) \varepsilon_3 \end{aligned} \quad (9.48)$$

Однос између напона и деформације за једноосно стање напона представља Јунгов модул еластичности E , једноставнији облик Хуковог закона:

$$E = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = \frac{\zeta (3\lambda + 2\zeta)}{\lambda + \zeta}$$

У општем облику однос главних напона и главних деформација се описује следећом једначином:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (9.49)$$

при чему је C_{ijkl} тензор крутости материјала. Услед деловања једноосног напона, у еластичној стени ће доћи до компресије у једном правцу док ће у ортогоналном правцу доћи до истезања. Однос бочне екстензије (ширења) према лонгитудиналној компресији (скраћивању) назива се Пуасонов однос (ν):

$$\nu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \left(\frac{\lambda}{2(\lambda + \zeta)} \right) \quad (9.50)$$

Вредност Пуасонове константе ν за стене се налази у опсегу од 0.15 до 0.30. За разумевање стања литосферског напона потребно је дефинисати референтна стања која се јављају у литосфери која су ослобођена утицаја тектонике плоча и описати разлику између тих референтних стања и стварног стања напона. Напон који је генерисан процесима тектонике плоча не може се посматрати у оквиру референтног стања литосфере. Одговарајућа геолошка референтна стања су она која су очекивана у "младим" стенама убрзо након њиховог очвршћавања и других промена. Два општа типа "младих" стена су интрузивне магматске стене, настале убрзо након очвршћавања у великим блоковима дубоко у кори и седиментне стене, настале

убрзо након почетка физичких и хемијских промена унутар великих басена, Stein, 1996.

Литостатички напон

Најједноставније референтно стање литосфере је литостатички напон који се налази у магми која нема снагу смицања и понаша се као флуид, односно када је

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \Rightarrow S_H = S_h = S_v \Rightarrow P_m \quad (9.51a)$$

при чему је P_m притисак у магми. "Младе" стене које су настале из магме се налазе у стању литосферског напона у моменту када су кристали из магме довољно чврсти да могу да формирају крут облик и да одржавају напон земље, односно

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \Rightarrow S_H = S_h = S_v \Rightarrow P_c \quad (9.52b)$$

при чему је P_c гранични притисак.

Строго посматрано, правци главних напона не постоје јер је литосферско стање напона изотропно. Литостатички напон се развија ако стена нема дугорочну снагу смицања. Иако неке стене као што су шкриљци и кристали као нпр. камена со, имају врло малу снагу смицања, експериментима је показано да све стене подржавају мали диференцијални напон у току дужег временског периода. Литосферско стање напона је конвенционално референтно стање али је као такво веома ретко у литосфери, Stein, 1996.

Референтно стање једноосног напона

Друго референтно стање литосфере је засновано на постулатима граничних услова да је сума напона у свим фиксним вертикалним равнима једнака нули, Pollard and Fletche, 2005. Такав гранични услов доводи до стања напона које је приближно једнако ново створеним седиментима у седиментном басену, односно стању једноосног напона. Једноосни напон σ_1 је вертикални напон који произилази из тежине депозита минерала. Ако су стене неограничене у хоризонталном правцу одговор на додатну тежину минерала би био хоризонтална експанзија. Пошто су стене ограничене дубине у кори хоризонтална експанзија је ограничена од суседних стена, тако да је у идеалном случају $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$. Практично, подразумева се да је хоризонтални напон који настаје из једноосног стања напона у седиментном басену модификован променама еластичних својстава до којих долази код конверзије седимената у стену, код релаксације и код опадања дуж нормалних раседа. Сваки од ових процеса доводи до стања напона у седиментним басенима које је блиско литостатичком.

У случају једноосног напона где је $\varepsilon_1 \neq 0$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$ једначине еластичности имају следећи облик:

$$\sigma_1 = (\lambda + 2\zeta) \varepsilon_1, \sigma_2 = \sigma_3 = \lambda \varepsilon_1 \quad (9.53)$$

На основу једначина еластичности, однос између вертикалног $S_v = \rho g z = \sigma_1$ и хоризонталног напона $S_H = S_h = \sigma_2 = \sigma_3$ је дат преко Пуасонове константе:

$$S_H = S_h = \left[\frac{\nu}{(1-\nu)} \right] S_v = \left[\frac{\nu}{(1-\nu)} \right] \rho g z \quad (9.54)$$

при чему је ρ интегрална густина минерала, g гравитационо убрзање и z дубина у Земљи. За вредност Пуасоновог константе се најчешће узима вредност $\nu = 0.2$ при чему се добија да је $S_h = 0.25 S_v$, Stein, 1996.

Тектонски напон

Напони могу да варирају од референтног стања напона као резултат или природних процеса или процеса које је изазвао човек. У компоненте поља напона које су девијација од референтног стања настале као резултат природног процеса, спадају тектонски напони, резидуални напони, површински термички напони узроковани дневним и годишњим загревањем. Велике девијације од референтног стања напона које настају вештачким путем у рударству, разним бушотинама, ископавањима и другим активностима човека, нису повезане са напоном у литосфери.

Тектонски напони се односе на напоне који проистичу из природних извора највећих размера као што су истезања граница плоча. Локални напони који су настали на основу топографског оптерећења, термоеластичног оптерећења, тзв. растерећења услед ерозије, сматрају се нетектонским. Термин савремен тектонски напон означава садашње стање поља напона које је хомогено на регионалном нивоу или на нивоу целе плоче. Међутим, разлика између напона плоче и локалних напона не важи у одређеним геолошким контекстима. На пример, оријентација неких касније формираних блокова стена је контролисана пољем напона плоча а простирање је одговор на напоне због локалних растерећења услед ерозије, Pollard and Fletche, 2005.

Тектонски напони се могу дефинисати као хоризонталне компоненте поља напона које су девијација од референтног стања напона као последица природних процеса на свим нивоима, од нивоа плоча до локалног нивоа. Према овој дефиницији локални напони који су развијени због топографских оптерећења сматрају се тектонским напонима. Ова дефиниција је и даље предмет научних дискусија на који начин квалификовати тектонски напон.

9.5.3 Куломбов критеријум раседања

Проучавање деформација стена које се појављују као одговор стене на стање напона у лабораторијским експериментима где се испитују мањи узорци стена представља недостатак с обзиром да је природа деформација стена спор процес, Kattenhorn, 2013. Деформација малих узорака стена може се изразити помоћу кривих које описују однос између величине напона и износа деформације стене. Ове криве су у литератури познате као напон-стрејн криве. Стрејн ϵ је мера деформације када се стена деформише равномерно. Најједноставнија напон-стрејн крива ($\sigma - \epsilon$ крива) је крива где је однос напона и деформације изражен следећом једначином:

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = E$$

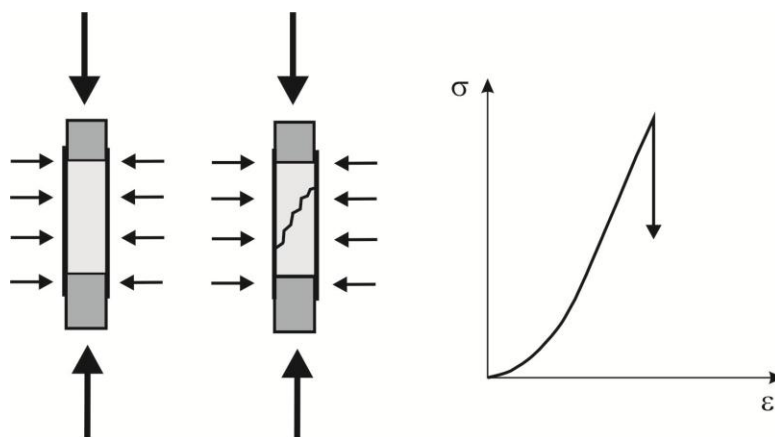
при чему је E константа еластичности. Ова диференцијална једначина представља Хуков закон за линеарно-еластично понашање материјала. Ако важи Хуков закон, константа еластичности E је позната као Јунгов модул. Реакција еластичног тела на

примењен напон код на пример гумене лопте је предвидива и износ стрејна је поновљив, односно стрејн еластичног тела је повратан. То значи да када се напон уклони тело ће се вратити у свој првобитни облик.

Материјали као што су стене не могу одржати бесконачно велик износ стрејна па после извесног износа еластичних деформација стена ће почети да се деформише на неки други начин. Тачка прелаза од еластичног понашања на другу врсту понашања назива се граница еластичности и означава почетак неповратне деформације. Уобичајени начини понашања стене после границе еластичности су крти лом (енг. brittle fracture) и други начин понашања стене је растезање (енг. ductile flow). Стена која је оштећена кртим ломом се обично дели у више делова.

У литосфери је сваки мали волумен стене окружен другом стеном. Околне стене ограничавају обим стене и делују својим притиском или стварају отпор који се понекад назива литостатички напон. Да би дошло до деформације стене главни напон у једном правцу σ_1 мора да пређе друга два главна напона σ_2 и σ_3 који су под правим углом у односу на σ_1 . Ова разлика између σ_1 и, на пример, σ_3 се назива диференцијални напон који делује на узорак стене. У анализи деформације стена σ_3 је еквивалентно отпору, Kattenhorn, 2013.

Лабораторијским експериментима помоћу посебног цилиндричног механизма испитује се деформација стена, слика 9.26. Клипови који додирују крај цилиндра стварају напон који је неопходан да се стена деформише. Цилиндар је окружен непропусним медијумом који спречава течење у порам узорка стене. На слици је узорак стене приказан светлом бојом, непропусни медијум стрелицама и клипови за оптерећење су приказани као тамнији објекти са оба краја узорка стене. Диференцијални притисак је приказан вертикалним стрелицама на оба краја клипа.



Слика 9.26. Цилиндрични механизам за испитивање деформација стена.

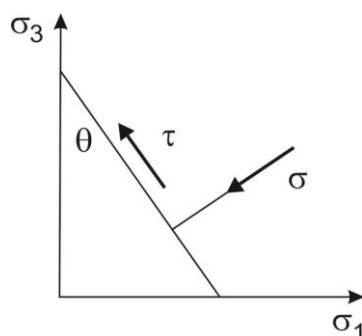
Примењујући напон долази до деформације стене која се описује стандардном напон-стрејн кривом која има изглед као на слици 9.26 (десно). Повећавањем напона стена се деформише и када се достигне снага прелома, односно фрактуре стене, стена се ломи дуж једне или више равни. На овој кривој лом је означен наглим падом криве.

Крајем XVIII века француски научник Coulomb је открио да напон смицања τ који је неопходан да изазове крти лом у равни, зависи од хомогености материјала S_0 и нормалног напона σ_n у тој равни, односно:

$$|\tau| = S_0 + \mu \sigma_n \quad (9.55)$$

Константа μ у овом изразу је коефицијент унутрашњег трења стене. Пошто је напон смицања паралелан са равни лома, крти лом се обично назива и лом смицањем. Овај начин лома се разликује од пукотине која настаје нормално на најмањи главни напон σ_3 . Једначине за рачунање σ_n и τ имају следећи облик, слика 9.27:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\theta \\ \tau &= -\frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta \end{aligned} \quad (9.56)$$



Слика 9.27. Нормални напон и напон смицања у односу на осе главних напона.

На основу претходних једначина добија се следећи израз:

$$\tau - \mu \sigma_n = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) [\sin 2\theta - \mu \cos 2\theta] - \frac{1}{2} \mu (\sigma_1 + \sigma_3) \quad (9.57)$$

Када долази до лома разлика између τ и σ_n мора бити максимална, што се догађа када је $\text{tg } 2\theta = -1/\mu$ при чему се вредност 2θ налази између 90° и 180° . Лом се догађа када је

$$2S_0 = \sigma_1 \{(\mu^2 + 1)^{1/2} - \mu\} - \sigma_3 \{(\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu\} \quad (9.58)$$

Овом једначином се изражава Куломбов критеријум за настанак кртог лома, Pollard and Fletche, 2005.

9.6 Међусобна зависност напона и деформација

Општа теорија стања напона и деформације тела постаје веома компликована када је у питању деформација нехомогеног медијума или када се истраживања врше обухватајући дужи временски период, како се односи и једначине не могу посматрати у линеарном облику. Да би се применила изводљива теорија, најчешће се уводе две претпоставке: да је деформација бесконачно мала - инфинитезимална величина и да је деформација структура хомогена.

Термин инфинитезимална деформација се узима у контексту тога да коначна величина деформације која се дешава током неког периода представља суму малих делова инфинитезималне деформације. Геодетско мерење деформација је мерење инфинитезималних деформација а не коначне деформације. Инфинитезималне

деформације ε би требало да буду толико мале да се њихови квадрати ε^2 могу занемарити. Да би се деформација посматрала као хомогена деформација морају бити испуњена следећа три критеријума (Means, 1976):

1. Праве линије после деформације морају остати праве.
2. Паралелне линије после деформације остају паралелне, иако њихов правац може бити измењен.
3. Све линије у истом смеру у деформисаном телу имају константне вредности лонгитудиналне деформације и деформације смицања.

Ако су ови критеријуми испуњени онда то имплицира да је деформација униформна у целој области истраживања. Хетерогена деформација настаје када један или више критеријума нису испуњени.

Напон и деформација оптерећеног тела су међусобно зависни, односно при повећању оптерећења расте напон али истовремено расте и деформација тела и обратно. Осим од напона, деформације зависе и од деформабилности тела. Међусобна зависност напона и деформација за разне врсте материјала одређује се у испитним лабораторијама различитим експериментима: растезања, сабијања, смицања, једноликог троосног сабијања, савијања и др. Код свих врста материјала на дијаграмима истезања, сабијања или смицања постоји подручје пропорционалности напона и деформација. Математички се зависност између напона σ и дужинске деформације ε изражава Хуковим законом за једноосно стање напона, $\sigma = E \cdot \varepsilon$ при чему је E модул еластичности материјала или фактор пропорционалности. Код деформације сабијања добијају се слични дијаграми односа напона и деформације, $\sigma = f(\varepsilon)$ као код истезања, односно Хуков закон важи и за напоне притиска, Lelović, 2012.

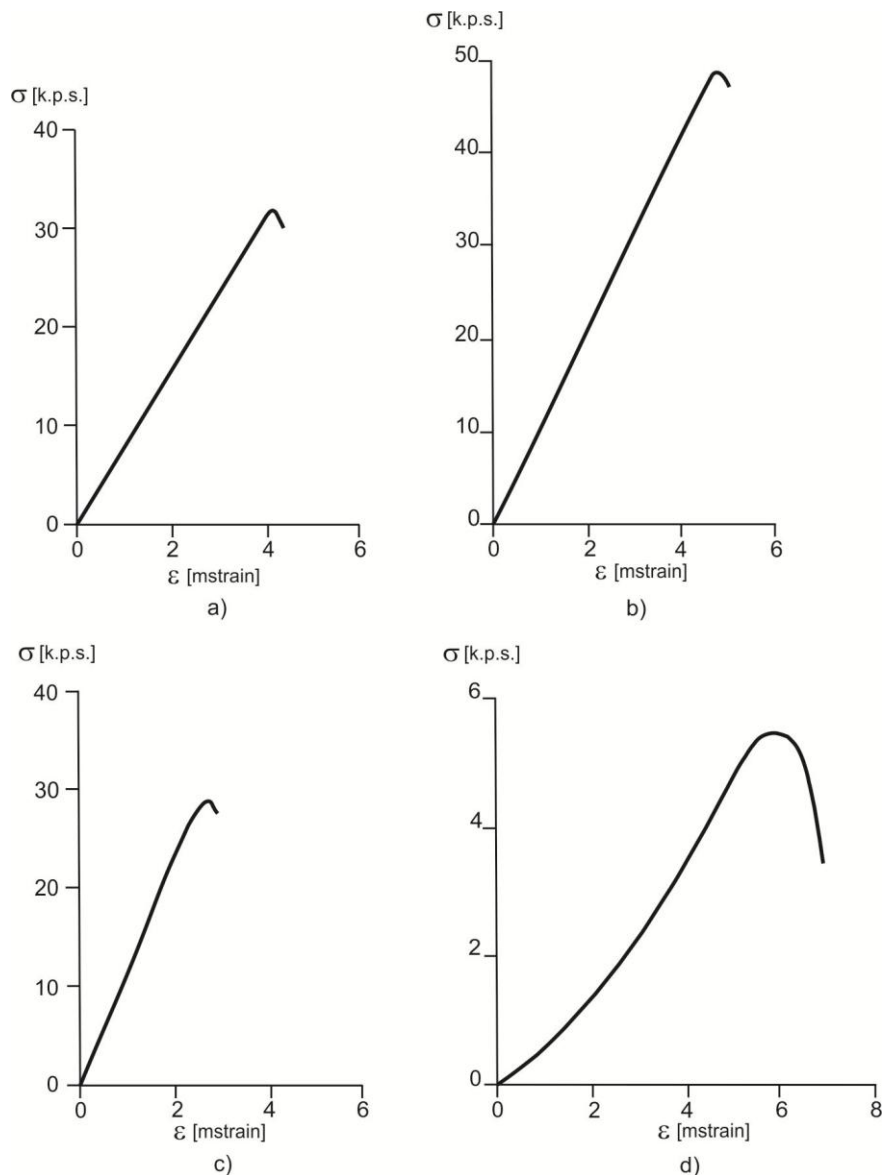
Дијаграми деформације смицања $\tau = f(\gamma)$, зависности тангенцијалног напона и угловне деформације по облику су слични дијаграмима истезања тела. И овде постоји подручје линеарне зависности тангенцијалног напона и угловне деформације. Линеарну зависност тангенцијалног напона и угловне деформације код смицања тела описује Хуков закон смицања:

$$\tau = \mu \cdot \gamma$$

Величина μ је Куломбов модул или модул смицања и има димензију напона. Од четири константе еластичности материјала E , ν , μ и K , (константа K је запремински модул еластичности или модул компресибилности) за еластично изотропно тело довољно је познавати само две јер се остале могу посредно израчунати. Модул смицања материјала се може одредити ако су познати модул еластичности и Пуасонов коефицијент према једначини:

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

На слици 9.28 су приказани дијаграми деформација различитих материјала који чине највећи проценат састава стена. Лабораторијско испитивање је извршено под једноосном компресијом следећих материјала: а) кречњак, б) долерит, ц) кварц и д) песак.



Слика 9.28. Дијаграми деформација различитих материјала стена.

9.6.1 Хуков закон за стање напона у равни

За тело оптерећено у равни ($x - y$), односно у равни у којој постоји стање напона, важи $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$ при чему је деформација у правцу осе z управне на раван $\epsilon_z \neq 0$. Док се тело понаша линеарно-еластично и док су величине деформација мале, може се применити принцип суперпозиције, тј. правило независности деловања напона. Компоненте деформације тела ϵ_x , ϵ_y и γ_{xy} се одређују применом правила суперпозиције где се стање напона у тачки тела приказује као скуп једноосног напона у смеру осе x , једноосног напона у смеру осе y и чистог смицања у равни ($x - y$), Максимовић, 2008. Укупне компоненте деформације тела у стању напона добиће се сабирањем деформација од појединачних напона. Хуков закон за стање напона у равни има следећи облик:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu \cdot \sigma_y), \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu \cdot \sigma_x), \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (9.59)$$

Дужинска деформација у смеру координатне осе z (управне на раван) једнака је:

$$\varepsilon_z = \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) \quad (9.60)$$

Обрнуто, ако су познате компоненте деформације онда се компоненте напона у тачки тела одређују према следећим једначинама:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_y), \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_y + \nu \cdot \varepsilon_x), \quad \tau_{xy} = \mu \cdot \gamma_{xy} \quad (9.61)$$

За двоосно (раванско) стање напона у тачки тела Хуков закон се изражава следећим једначинама:

а) за главне деформације:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu \cdot \sigma_2), \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu \cdot \sigma_1), \quad \gamma_{12} = 0 \quad (9.62)$$

б) за главне напоне:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu \cdot \varepsilon_2), \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu \cdot \varepsilon_1), \quad \tau_{12} = 0 \quad (9.63)$$

9.6.2 Хуков закон за троосно стање напона тела

За опште троосно стање напона аналогним начином се добијају изрази за Хуков закон троосног стања напона тела, односно:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], & \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{\mu} \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)], & \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{\mu} \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)], & \gamma_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{\mu} \end{aligned} \quad (9.64)$$

Ако су познати главни напони онда се Хуков закон за троосно стање напона изражава следећим једначинама:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E}[\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E}[\sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1)] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E}[\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \end{aligned} \quad (9.65)$$

Код изотропних материјала главни правци деформација увек се подударују са главним правцима напона, што није случај код анизотропних материјала где се главни правци деформација морају посебно одредити. Ако се компоненте напона прикажу као функције деформације, где је укупна деформација $\Theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$, Хуков закон за троосно стање напона има облик:

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_x + \frac{\nu}{1-2\nu} \cdot \Theta \right), \tau_{xy} = \mu \cdot \gamma_{xy} \\
\sigma_y &= \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_y + \frac{\nu}{1-2\nu} \cdot \Theta \right), \tau_{yz} = \mu \cdot \gamma_{yz} \\
\sigma_z &= \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_z + \frac{\nu}{1-2\nu} \cdot \Theta \right), \tau_{zx} = \mu \cdot \gamma_{zx}
\end{aligned}
\tag{9.66}$$

За одрађивање главних праваца напона Хуков закон за троосно стање напона се изражава једначинама:

$$\begin{aligned}
\sigma_1 &= \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_1 + \frac{\nu}{1-2\nu} \cdot \Theta \right) \\
\sigma_2 &= \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_2 + \frac{\nu}{1-2\nu} \cdot \Theta \right) \\
\sigma_3 &= \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_3 + \frac{\nu}{1-2\nu} \cdot \Theta \right)
\end{aligned}
\tag{9.67}$$

Ако се узорак материјала оптерети једноликим притиском p у свим смеровима, тзв. експеримент "хидростатичког притиска" доћи ће до смањења волумена узорка. Експериментима се показује да је релативна волуменска деформација тела пропорционална притиску p , односно $\Theta = -p/K$.

За елемент тела важи однос $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = -p$, који, када се уврсти у једначине Хуковог закона, има облик:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{1}{E} \left(\sigma_x - \nu \cdot (\sigma_y + \sigma_z) \right) \\
\varepsilon_x &= -\frac{p}{E} (1 - 2\nu) = \varepsilon_y = \varepsilon_z
\end{aligned}
\tag{9.68}$$

Запреминска деформација се изражава једначином:

$$\Theta = -p \frac{3(1-2\nu)}{E} = -p \frac{1}{K}
\tag{9.69}$$

и једначина за запремински модул еластичности има облик:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}
\tag{9.70}$$

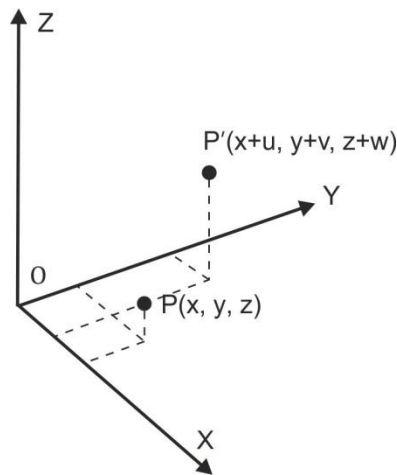
За изотропне материјале Пуасонов коефицијент мора бити $\nu < 0.5$, јер би у супротном деформације биле физички неприхватљиве.

9.6.3 Тродимензионални модел деформације

Напони који се дешавају у телу утицаће на деформацију тела у све три димензије. Међутим, у пракси је теже одредити вертикалну компоненту напона како се већина кретања и деформација јавља у хоризонталној равни као и због чињенице да срачунате висинске компоненте на основу мерења извршених просторним геодетским техникама имају најмању тачност. Већина истраживача у овој области је одређивала напоне у твдодимензионалном смислу коришћењем терестричких геодетских података игноришући вертикалну компоненту. Међутим, такав начин

одређивања компоненти напона може да доведе до дисторзије у оцењеним параметрима. Компоненте инфинитезималне деформације тачке $P(X, Y, Z)$ приказане су у тродимензионалном координатном систему $OXYZ$, слика 9.29. Компоненте деформације у правцима координатних оса са ознакама за основне компоненте $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ рачунају се према једначинама:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (9.71)$$



Слика 9.29. Тродимензионална деформација тачке.

Деформације смицања у свакој од двоосних равни и укупна дилатација се рачунају према следећим једначинама:

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}$$

$$\gamma_{zx} = \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$$

$$\Delta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

(9.72)

Компоненте ротације око координатних оса се одређују према једначинама:

$$\omega_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad \omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad \omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

(9.73)

Како је брзина деформације често значајнији податак од самог износа деформације, из решења тродимензионалних координата тачака на основу просторних геодетских техника могу се израчунати вредности брзине деформације сваке њене компоненте. За извођење брзина компоненти деформације сваки члан се дели са временском разликом између опажања (Δt) чиме се одређују брзине екстензије ($\dot{\varepsilon}_x, \dot{\varepsilon}_y, \dot{\varepsilon}_z$), брзине смицања ($\dot{\gamma}_{yz}, \dot{\gamma}_{zx}, \dot{\gamma}_{xy}$), брзине ротације ($\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$) и брзина дилатације ($\dot{\Delta}$). Деформација је мањи квантитет који се изражава јединицом μstrain (аналогно

ppm) или η strain (аналогно ppb). Брзине деформација се изражавају у јединицама μ strain/year или η strain/year. Из основних компоненти деформације могу се извести остали параметри значајни за истраживања деформација Земљине коре. Процес деформације се може представити у матричном облику, Guohua and Prescott, 1986:

$$\mathbf{X}_1 = (\mathbf{T} + \mathbf{R}) \mathbf{X}_0 + \mathbf{t} \quad (9.74)$$

при чему \mathbf{X}_0 и \mathbf{X}_1 представљају векторе координата тачака P_0 и P_1 у епохама t_0 и t_1 , слика 9.29. Када је задовољен услов хомогености деформације овај израз је идентичан изразу за афину трансформацију. У горњој једначини \mathbf{X}_1 означава вектор координата деформисане тачке са иницијалним координатама \mathbf{X}_0 , вектор \mathbf{t} садржи чланове тродимензионалне транслације. Симетрична матрица \mathbf{T} представља тензор деформације и матрица \mathbf{R} садржи компоненте ротације:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \epsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \epsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xz} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} & \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (9.75)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{bmatrix} \quad (9.76)$$

Трансформацијом компоненти матрице \mathbf{T} у нови референтни оквир тако да деформације смицања постају једнаке нули добија се матрица \mathbf{T}_r :

$$\mathbf{T}_r = \begin{bmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_3 \end{bmatrix} \quad (9.77)$$

На овај начин се могу срачунати вредности главних деформација ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 у одговарајућим главним правцима. Компоненте главних деформација добијају се налажењем корена следећих једначина:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x - \epsilon & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{zx} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \epsilon_y - \epsilon & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} & \epsilon_z - \epsilon \end{bmatrix} = 0 \quad (9.78)$$

9.6.4 Модел деформације у топоцентричном оквиру

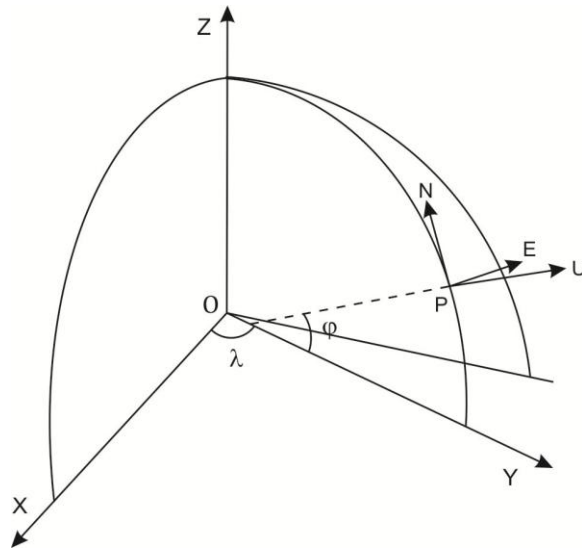
Референтни оквир у коме су вредности деформације срачунате требало би да буде изабран тако да најбоље одговара решавању одређеног проблема. У истраживањима деформација насталих на површини Земљине коре већина истраживача као најкорисније за оцену параметара користе моделе који су дефинисани у односу на локални вектор гравитације или локалну елипсоидну нормалу. У контексту геофизичке површи локалне вертикалне компоненте деформације су често

занемарљиве у мерењима геодетским мерним техникама, тако да се тродимензионални модел деформације често своди на дводимензионални модел.

Занемаривањем неких или свих вертикалних компоненти деформације може да се маскира прави карактер поља деформације, тако да су неки истраживачи усвојили потпун или поједностављен тродимензионални топоцентрични модел, King, 2002. Топоцентрични координатни систем са почетком у тачки $P(\varphi, \lambda)$ дефинисан је управним осама N и E равни која тангира елипсоид у тачки P , слика 9.30. Оса N је усмерена у правцу геодетског севера и тангентна је на меридијан у тачки P , вертикална оса се налази у правцу спољашње нормале на елипсоид у тачки P , док оса E чини десно оријентисани координатни систем са друге две осе и усмерена је у правцу геодетског истока. Тродимензионални модел деформације представљен матрицом тензора деформације \mathbf{T} и матрицом ротације \mathbf{R} може се описати у топоцентричном координатном систему (E, N, U) на следећи начин:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \varepsilon_e & \frac{1}{2}\gamma_{en} & \frac{1}{2}\gamma_{eu} \\ \frac{1}{2}\gamma_{en} & \varepsilon_n & \frac{1}{2}\gamma_{nu} \\ \frac{1}{2}\gamma_{eu} & \frac{1}{2}\gamma_{nu} & \varepsilon_u \end{bmatrix} \quad (9.79)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & \omega_u & -\omega_n \\ -\omega_u & 1 & \omega_e \\ \omega_n & -\omega_e & 1 \end{bmatrix} \quad (9.80)$$



Слика 9.30. Топоцентрични координатни систем.

Ако се занемаре вертикалне компоненте деформације ε_u , γ_{eu} и γ_{nu} добија се следећи дводимензионални топоцентрични модел:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \varepsilon_e & \frac{1}{2}\gamma_{en} \\ \frac{1}{2}\gamma_{en} & \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (9.81)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & \omega_u \\ -\omega_u & 1 \end{bmatrix} \quad (9.82)$$

У техничким областима користе се следећи изрази којима се описују дводимензионалне деформације, Welsch and Zhang, 1983:

Табела 9.2. Дводимензионалне деформације.

Чисто смицање	$\gamma_1 = \varepsilon_e - \varepsilon_n$
Инжењерско смицање	$\gamma_2 = 2\varepsilon_{en}$
Укупно смицање	$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}$
Макс. главна деформација	$\varepsilon_1 = \frac{1}{2}(\varepsilon_e + \varepsilon_n + \gamma)$
Мин. главна деформација	$\varepsilon_2 = \frac{1}{2}(\varepsilon_e + \varepsilon_n - \gamma)$
Азимут главног правца ε_1	$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right)$
Азимут главног правца ε_2	$\varphi = \theta \pm \frac{\pi}{2}$

Градијент брзине \mathbf{V} може се изразити преко две компоненте, брзине деформације $\dot{\mathbf{T}}$ и брзине ротације $\dot{\mathbf{R}}$, Feigl et al., 2002:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_e & \dot{\varepsilon}_{en} \\ \dot{\varepsilon}_{en} & \dot{\varepsilon}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \dot{\omega}_v \\ -\dot{\omega}_v & 0 \end{bmatrix} \quad (9.83)$$

брзина деформације $\dot{\mathbf{T}}$ може се претставити у координатном систему дефинисаном главним осама деформације декомпозицијом у њене сопствене вредности $\dot{\varepsilon}_i$ и њене сопствене векторе $\hat{\mathbf{e}}_i$:

$$\dot{\mathbf{T}} = \sum_{i=1}^2 \dot{\varepsilon}_i \hat{\mathbf{e}}_i \hat{\mathbf{e}}_i^T \quad (9.84)$$

Угао θ је оријентација максималне компресивне брзине деформације $\dot{\varepsilon}_2$ мерено у смеру казаљке на сату од севера ка главној оси $\hat{\mathbf{e}}_2$, слика 9.31. Сопствени вектори се могу изразити следећим једначинама:

$$\hat{\mathbf{e}}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad \hat{\mathbf{e}}_2 = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (9.85)$$

Како се сопствене вредности могу написати у следећем облику:

$$\dot{\varepsilon}_i = \hat{\mathbf{e}}_i^T \dot{\mathbf{T}} \hat{\mathbf{e}}_i \quad (9.86)$$

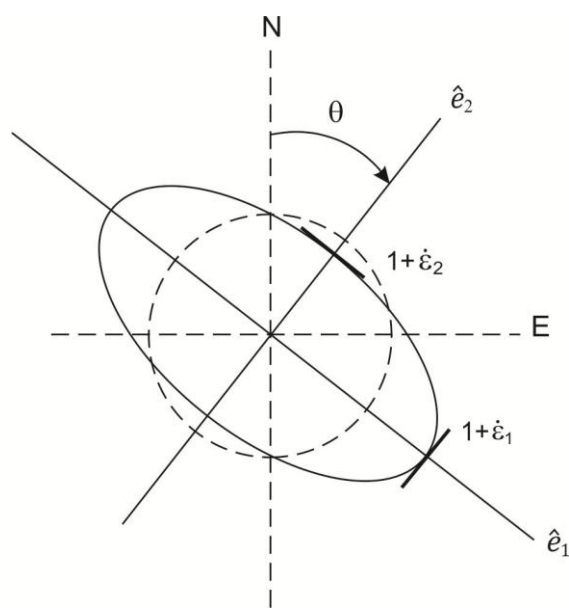
вредности брзина деформације у правцима главних оса изражавају се једначинама:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= \dot{\varepsilon}_e \cos^2 \theta + \dot{\varepsilon}_n \sin^2 \theta - 2\dot{\varepsilon}_{en} \sin \theta \cos \theta \\ \dot{\varepsilon}_2 &= \dot{\varepsilon}_e \sin^2 \theta + \dot{\varepsilon}_n \cos^2 \theta - 2\dot{\varepsilon}_{en} \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (9.87)$$

Помоћу четири параметра: $\dot{\epsilon}_1$, $\dot{\epsilon}_2$, θ и $\dot{\omega}_v$ може се описати дводимензионално поље брзина деформација, Feigl, 2002. Осим тога, брзине деформације смицања су дефинисане на следећи начин:

$$\dot{\gamma}_1 = \dot{\epsilon}_e - \dot{\epsilon}_n \tag{9.88}$$

$$\dot{\gamma}_2 = 2\dot{\epsilon}_{en}$$



Слика 9.31. Деформација јединичног круга у елипсу по главним осама деформације.

10 Деформација Земљине коре

Ово поглавље се бави практичним аспектима деформационе анализе Земљине коре. Математичке основе деформационе анализе Земљине коре захтевају познавање поља померања или поља брзина материјалних тачака. Геодезија као једна дисциплина геонаука геометријским моделирањем Земљине коре даје валидно познавање њених деформација и кретања на основу мерења извршених просторним геодетским техникама. Померања која се дешавају на Земљиној кори разматрају се као ефекат вискозно - еластичних деформација Земље као одговор на временски променљива површинска оптерећења и друге узроке.

Деформације Земљине коре се могу класификовати у секуларне, периодичне или епизодне деформације посматрано на временској скали и као глобалне, регионалне или локалне деформације посматрано на просторној скали. Знање о овим деформацијама у великој мери зависи од природе узрока њиховог настајања и временског трајања опажачких података. Истраживања ових деформација у геодезији се врше у смислу квантификовања хоризонталних и вертикалних померања Земљине коре.

Главни узроци деформације Земљине коре представљају силе плиме и осеке, ротација Земље и померања полова, људске активности, велика оптерећења и растерећења коре, тектоника плоча и епизодни покрети. Периодичне силе плиме директно утичу на Земљино гравитационо поље и деформишу облик Земље као тела које није круто. Најимпозантнији ефекат сила плиме је варијација водених маса мора који је познат као ефекат океанских оптерећења. Силе плиме и осеке деформишу Земљу на глобалној скали и максимална деформација у радијалном правцу износи 48 cm, Vanicek and Krakowski, 1986. Ови ефекти се могу математички моделирати јер им се порекло настанка довољно добро разуме и морају се узети у обзир код одређивања координата станица тачности од 1mm.

Кретање полова утиче на облик Земљине коре на нивоу cm. Узимајући у обзир тачност координата која се може постићи мерењима просторних геодетских техника GPS, VLBI, SLR и DORIS, координате станица се такође коригују за деформације које настају услед поларног кретања. Варијације у брзини ротације Земље изазивају померања која су испод нивоа mm и могу се занемарити. Људске активности изазивају деформације углавном на локалном нивоу. Главни узрок деформација је експлоатација нафте, подземних вода или других природних ресурса.

Земљина кора је састављена од литосферских плоча са просечном густином $\rho = 2.67 \text{ g/cm}^3$ и дебљином у распону од 10 до 80 km. Светлија учвршћена плоча плута на гушћем вискозном материјалу омотача који је настао под дејством топлоте и притиска. На Земљину кору утичу разна геофизичка оптерећења која изазивају њене деформације. Земљин одговор на процесе оптерећења или растерећења зависи од величине и временског понашања оптерећења и реологије литосфере и омотача. Најзначајнији примери регионалне деформације настали због растерећења Земљине коре су пост глечерски одскоци у Скандинавији и Канади. У појасу Скандинавије деформација се огледа кроз уздизање коре чија је максимална брзина од око 10 mm/yr, Kakkuri, 1997.

Дакле стара претпоставка о крутој Земљиној кори више није прихватљива у светлу новог динамичног концепта тектонике плоча и експерименталних доказа. За неколико последњих деценија, теорија тектонике плоча је омогућила геодинамички оквир геонаукама. Основни постулат овог оквира је да је Земљина литосфера подељена у коначан број квази-крутих плоча које се крећу једна у односу на другу.

Релативна кретања између претпостављених крутих плоча су описана моделима глобалног кретања плоча. Ови глобални модели су одређени инвертовањем геолошких података о кретању плоча као што су трансформација азимута раседа, брзина ширења раседа и вектора кретања код земљотреса догођених на границама плоча, Stein, 1996.

Први модели кретања плоча предложени су 1978. године од стране научника J. Minster, T. Jordan и C. Chase. Нови модели високог квалитета доступни су преко својих званичних публикација и интернет сајтова. За одређивање побољшаних глобалних модела користе се нови подаци, тако је настао модел NUVEL-1 (DeMets et al., 1990) затим модел NUVEL-1A (DeMets et al., 1994). Овим моделима се описују особине кинематике плоча великих размера. Како се главне деформације дешавају у релативно уским зонама у близини граница тектонских плоча велики број интензивних земљотреса се догађа у близини ових зона док се нижи ниво сеизмичности појављује у унутрашњости плоча.

Због кретања плоча долази до акумулирања енергије еластичних деформација у граничним зонама која се после одређеног времена, зависно од различитих фактора изненада реализује у облику земљотреса. Епизодне деформације које се појављују код земљотреса могу да достигну ниво и до неколико метара. Последњих година предвиђање земљотреса је, као озбиљна научна тема која подразумева интердисциплинарна истраживања, најразвијенија у земљама са високим ризиком од земљотреса као што су Јапан и САД.

У истраживањима догађања земљотреса главни извор геометријских информација о деформацијама Земљине коре представљају мерења извршена просторним геодетским техникама, Feigl, 2002. Геодетским мерењима се могу квантификовати потенцијалне сеизмичке активности и на раседима који су непознати или који споро клизе или се налазе сувише дубоко у кори да би могли да се проучавају конвенционалним геолошким или сеизмолошким методама.

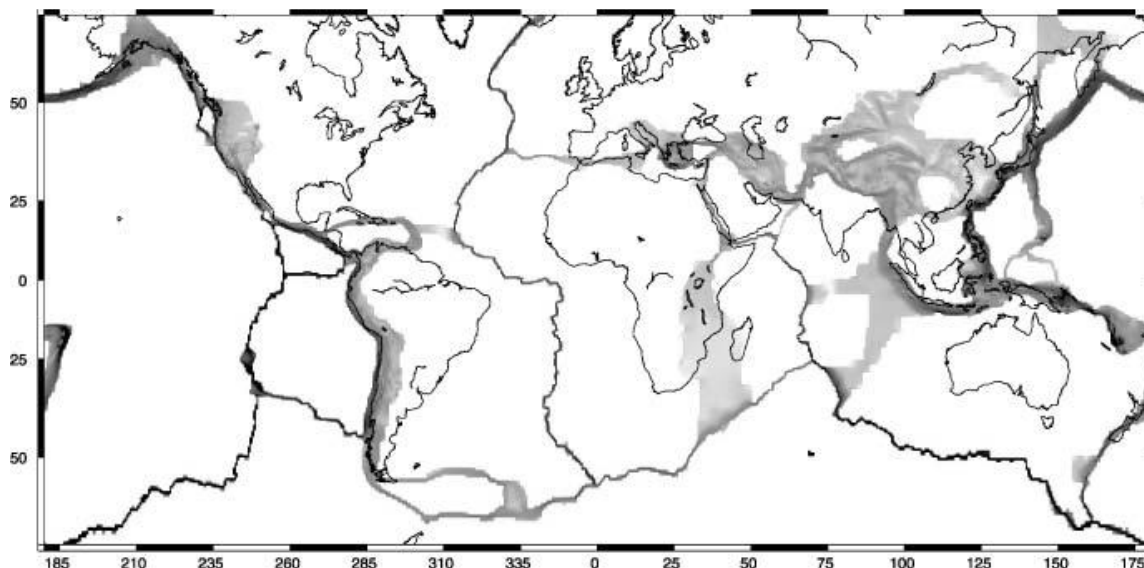
Теорија тектонике плоча претпоставља понашање крутих плоча и стога не објашњава опажане деформације унутар плоча. Ова претпоставка такође ограничава применљивост теорије јер се не може рећи да постоји апсолутно крути материјал, али оно што чини теорију применљивом је да се мање деформације и нижи ниво сеизмичких активности догађа унутар плоча у поређењу са границама плоча. У геофизици постоји подела Земљине коре у два домена, регион приближно круте унутрашњости плоча и регион деформација на границама плоча. У ова два домена деформације морају да се третирају на различит начин. Код унутрашњости плоча, где се појављују ограничене перманентне деформације изазване силама граница, деформације се генерално третирају као еластичне деформације плоча. Код граничних региона плоча, где се обично јављају значајне перманентне деформације, истраживања се врше разматрањем нееластичних деформација материјала коре, Gessner et al., 2007.

У деформационој анализи Земљине коре симетрични тензори деформације другог реда са компонентама главних праваца деформације представљају кључне параметре за анализу. Компоненте сопствених вредности тензора деформације (главне компоненте и главни правци) су посебно значајне у интерпретацији сеизмичких деформација, кретања плоча и деформација плоча. Са мерењима извршеним просторним геодетским техникама, компоненте тензора деформације се могу оценити из високо прецизних мерења положаја и вредности брзина положаја станица на површини Земље. Област територије Републике Србије, покривена мрежом перманентних GPS станица које су изабране у односу на историју и квалитет резултата одговарајућих брзина станица изражених у референтном оквиру

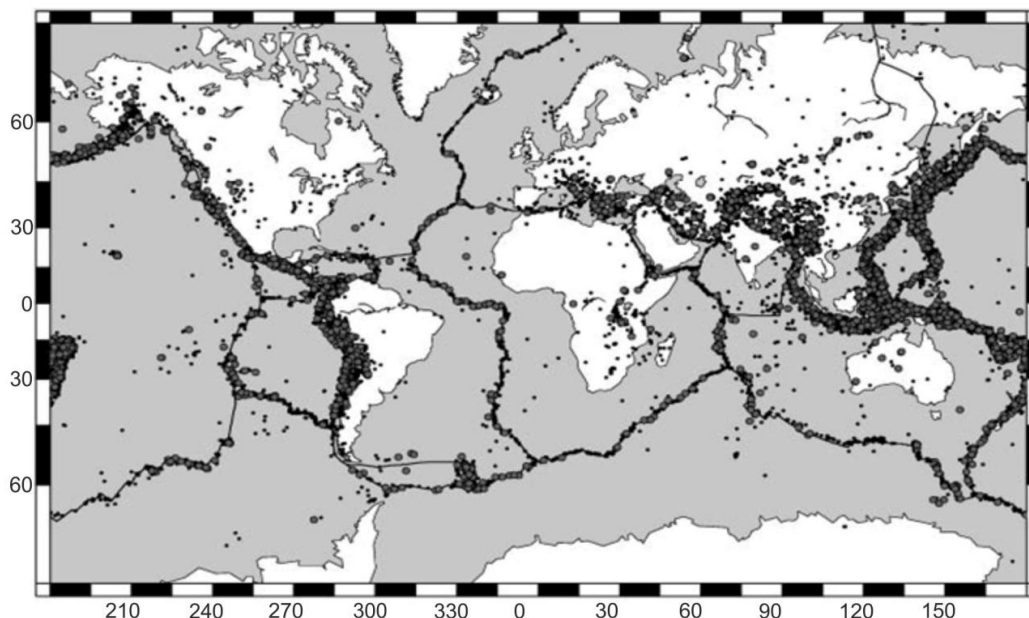
ITRF2008, на основу којих су добијени резултати компоненти сопствених вредности симетричног тензора деформације другог реда.

Док брзине станица рефлектују релативна померања у оквиру самих станица, брзине деформације приказују ситуацију у одређеној области и вредност промене концентрације напона која је директно повезана са локалном вредношћу концентрације напона и могућим потенцијалним сеизмичким хазардом. У деформационој анализи померања станица се сматрају континуирано диференцијабилним у односу на координате станица на површини Земље. Компоненте тензора деформације одређене помоћу брзина позиција опажачких станица могу да се користе за израчунавање компоненти тензора напона, узимајући у обзир особине материјала стена у оквиру области истраживања. Дакле, стрејн анализа се може сматрати основом динамичког модела, док је класична деформациона анализа слична кинематичком моделу, Means, 1976; Grafarend and Awange, 2012.

Дијаграми брзина деформација имају велики значај у многим анализама што показује један од примера дијаграма глобалних брзина деформација где су приказане вредности друге инваријанте тензора брзине деформације, слика 10.1. Магнитуде тензора брзине деформације се налазе у опсегу $0 - 3 \cdot 10^{-6}$ 1/у логаритамске скале (<http://gsrm.unavco.org/intro/>).



Слика 10.1. Дијаграм глобалних брзина деформације.



Слика 10.2. Дијаграм глобалне сеизмичности.

На слици 10.2 је приказана глобална сеизмичност евидентираних земљотреса магнитуде изнад 6 Рихтерове скале од 1975. године (<http://gsrm.unavco.org/intro/>). Упоредјујући слике 10.1 и 10.2 може се уочити значајна сагласност брзина деформације и дистрибуције догођених земљотреса. Већина земљотреса дуж граница океанских плоча, на пример средње Атлански гребен, догађа се врло близу граница плоча, док се земљотреси који су повезани са границама плоча континенталне литосфере догађају у областима које су више дифузне, на пример Индијско-Азијска колизиона зона.

Прва геодетска деформациона анализа заснована на геодетским хоризонталним померањима објавио је Tsuboi (1932), који је срачунао деформације користећи хоризонтална померања контролних тачака у области Танго у Јапану за период 1900 до 1930. године, где се 1927. године догодио разорни земљотрес магнитуде 7.4. Израчунавања деформације класичним методама из геодетских опажања (дужина, правца, висинских разлика, итд.) извршили су многи истраживачи, нпр. Frank (1966), Prescott (1976) и др. До сада је објављено више радова о истраживањима напона, деформације или брзине деформације на Земљиној површини, као што су радови: Joshi et al. (1989), Kahle et al. (1998), Kreemer et al. (2000), Johansson et al. (2001), Caporali (2003), Talich (2007), Grafarend (2009), Dermanis (2011), Riguzzi (2012) и др. Истраживања вертикалних и хоризонталних померања Земљине коре на основу геодетских мерења за област територије Србије извршили су Јовановић (1971), Д. Миловановић (1980), В. Миловановић и др. (1994), Благојевић (1993), Вишњић (2012), Сушић (2014) и др.

Просторне геодетске технике и континуирана опажања у перманентним мрежама заједно са IGS (International GPS Service) мрежом, ILRS (International Laser Ranging Service) мрежом, IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) мрежом и IDS (International DORIS Service) мрежом, и њиховом ITRF комбинацијом, представљају један од најзначајнијих извора одакле се могу извести опажања брзине тензора напона. Оцена параметара компонентни сопствених вредности брзине тензора напона односи се не само на садашње стање деформације већ и на његову континуирану промену, Cai et al. 2005.

Интерпретација и упоређење резултата брзине деформација са геодинамичким понашањем регионалног карактера су такође приказани у овом поглављу. Вредност главних компоненти тензора деформације пружа и визуелну презентацију величине деформације и праваца главних деформација, што је значајно за предвиђање тектонске активности укључујући и могући тренд и правац деформације.

10.1 Моделирање деформације Земљине коре коришћењем метода коначних елемената

Метод коначних елемената као снажна и широко коришћена нумеричка техника се дефинише као компјутерска математичка техника за добијање приближних нумеричких решења за апстрактне једначине које предвиђају одговор физичких система изложених спољним утицајима, Davies, 2011. Ова дефиниција метода идентификује широк спектар примена у области инжењерства, науке и примењене математике.

Најчешћи задаци који се решавају помоћу метода коначних елемената у овим областима подразумевају анализу сложених структура, пренос топлоте, проток течности, електромагнетни потенцијал и др. Генерално, код задатака где се решавају проблеми који укључују сложену геометрију, оптерећења и својства материјала, није могуће добити аналитичко математичко решење. Аналитичка решења су она која су дата математичким изразом којим се решавају вредности тражених непознатих величина у било којој тачки система када се посматра укупна структура физичког система и због тога важи за бесконачан број положаја тачака система.

Најчешће аналитичка решења захтевају решавање парцијалних диференцијалних једначина чији резултат није могуће добити због компликоване геометрије, оптерећења и особина материјала. Из тог разлога се за прихватљива решења користе нумеричке методе као што је метод коначних елемената. Решење добијено методом коначних елемената уместо решавањем диференцијалних једначина, захтева формулисање проблема преко система симултаних алгебарских једначина. Нумеричке методе одређују приближне вредности непознатих у дискретном броју тачака у континууму. Дискретизација је процес моделирања система којим се систем дели на еквивалентан систем мањих делова или јединица - коначних елемената. Коначни елементи су повезани заједничким тачкама (чворовима) и граничним линијама или површинама и на тај начин репрезентују систем који може имати најмање два елемента, Logan, 2012.

Моделирање се изводи на тај начин да се суседни елементи додирују без преклапања тако да не постоје празнине између елемената. У фази анализе домена дефинише се облик елемената што је могуће једноставније, односно врши се избор троугаоног и четвороугаоног елемента у дводимензионалним доменама и тетраедарских и пентаедарских елемената у тродимензионалном домену. Процесом дељења домена у скуп елемената генерише се мрежа, што је најчешће аутоматизована процедура која се изводи помоћу одговарајућих рачунарских програма. Методом коначних елемената формулишу се једначине за сваки коначни елемент чијом комбинацијом се добија решење целог домена. Решење структурних проблема се најчешће односи на утврђивање величине померања која се дешавају у сваком чвору и вредности напона у оквиру сваког елемента који су подвргнути оптерећењима и који чине ту структуру.

Модели за анализу унутрашње и спољашње деформације Земљине површине неопходно је да садрже парцијалне изводе функција и функције вектора померања у

односу на координате тачака на површини Земље. Идеалан облик ових функција треба да буде континуиран у просторним и временским доменима и континуирано диференцијабилан. До сада геодетске технике нису обезбедиле функције координата у идеалном облику, узимајући у обзир да су геодетска опажања дискретне функције у времену и простору. Као последица тога вектори померања тачака на површини Земље изведени из геодетских података мерења имају дискретну природу.

Континуиране информације у простору и времену морају бити оцењене израчунавањем функција интерполације или непознатих функција апроксимације над датим дискретним вредностима под претпоставком да је доступан довољан број адекватно дистрибуираних дискретних података. Одређивање ових интерполационих или апроксимационих функција је основни предмет примењене математике и нумеричке анализе и примењује се у разним областима истраживања. Једначине елемената су алгебарски идентичне за све елементе а због саме геометрије елемента њихово извођење је једноставно, што су веома битне особине за решавање функција методом коначних елемената.

10.1.1 Главни кораци метода коначних елемената

Код решавања проблема анализе напона потребно је да се одреде померања и деформације у одређеној структури која се налази у стању равнотеже и када је подвргнута оптерећењу. Код многих структура тешко је одредити расподелу деформације коришћењем конвенционалних метода тако да се најчешће у инжењерским струкама користи метод коначних елемената.

Постоје два директна приступа који се примењују за решавање структурних проблема механике. По једном приступу унутрашње силе одређене структуре се узимају као непознати параметри проблема, односно приступ одржања флексибилности система. Да би се добиле одговарајуће једначине, прво се користе једначине равнотеже а затим се уводе потребне додатне једначине са једначинама компатибилности. Резултат је скуп алгебарских једначина за одређивање редуванце или непознатих унутрашњих сила. Према другом приступу за непознате параметре система узимају се померања у чворовима, односно приступ одржања крутости система. На пример, услови компатибилности подразумевају да елементи који су повезани на заједнички чвор, дуж заједничке ивице или на заједничкој површини пре напрезања остану повезани на том чвору, ивици или површини после деформација. Одговарајуће једначине се тада изражавају у односу на померања у чворовима помоћу једначина равнотеже и применом закона који важи за силе које утичу на та померања.

Ова два директна приступа у анализи резултирају са различитим непознатим параметрима, силе или померања, и различитим матрицама према својим формулацијама, односно флексибилности или крутости. Већина програма се заснива на другом методу јер је његова формулација једноставнија код решавања већине задатака у анализи структура. Формулисање и решавање структурних проблема методом коначних елемената изводи се преко следећих општих корака, Logan, 2012:

1. Дискретизација и селекција типа елемента
2. Избор функције помераја
3. Дефинисање односа деформације и напона
4. Формирање матрице једначина елемента
5. Опште једначине елемента
6. Решавање генералних померања

7. Решавање деформације и напона елемента
8. Анализа и интерпретација резултата

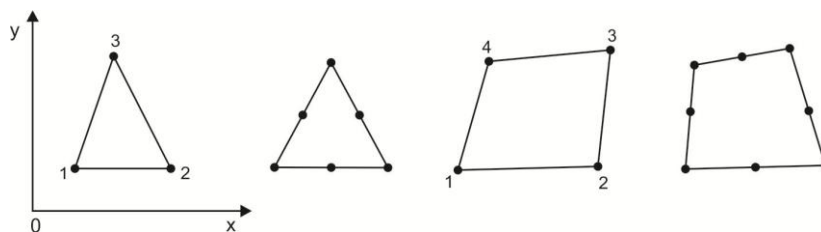
1. Дискретизација и селекција типа елемента

Дискретизација и селекција типа елемента подразумева поделу структуре (домена) у еквивалентан систем коначних елемената са одговарајућим чворовима и избором најпогоднијег типа елемента за моделирање најприближније стварном физичком понашању. Укупан број елемената који се усваја и њихова варијација по величини и типу у датом систему пре свега, представљају питања инжењерске одлуке. Елементи треба да буду довољно мали да би се добили употребљиви резултати али и довољно велики да би се смањили велики захтеви за њихово израчунавање.

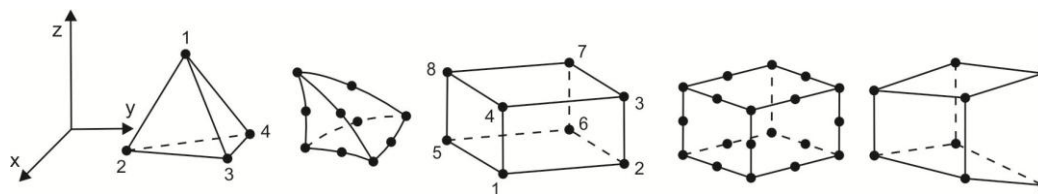
Генерално мали елементи (и евентуално елементи вишег реда) су пожељнији у ситуацијама где се резултати брзо мењају, као на пример у случајевима где се појављују промене у геометрији. Велики елементи се користе најчешће када су резултати релативно константни. Најчешће се дискретизован систем или мрежа креира уз помоћ програма за генерисање мреже.

Најједноставнији елемент је линијски елемент који има два чвора по један на сваком крају. Основни дводимензионални или равански елементи оптерећени силама у својој равни, тј. равни напона или равни деформације, су троугаони или квадратни елементи. Најједноставнији дводимензионални елементи имају само угаоне чворове, односно елементи са правим странама или границама (слика 10.3), мада постоје и елементи вишег реда обично са чворовима на средини стране (квадратни елементи) и закривљеним странама.

У општем случају елементи могу имати различите величине или могу бити константне величине. Најчешћи тродимензионални елементи су тетраедарски и хексаедарски елементи који се користе када је неопходно да се изврши тродимензионална анализа напона. Основни тродимензионални елементи имају само угаоне чворове и праве стране (слика 10.4), док елементи вишег реда са чворовима на срединама ивица и могућим чворовима на срединама страна имају закривљене површине страна.



Слика 10.3. Прости и дводимензионални елементи вишег реда.



Слика 10.4. Прости и тродимензионални елементи вишег реда.

2. Избор функције помераја

Функција помераја је дефинисана у оквиру сваког елемента на основу вредности чворова елемента. Најчешће коришћене функције због своје једноставности код формулисања коначних елемената су линеарни, квадратни и кубни полиноми али се такође често користе и серије тригонометријских функција. За избрани дводимензионални елемент, функција помераја је функција координата у равни елемента, на пример x – y равни. Код дводимензионалног проблема непознати параметри функције су x и y компоненте непознатих чворова. Исти општи тип функције помераја се може користити више пута за сваки елемент. На тај начин се методом коначних елемената континуални квантитет, као што су померања у оквиру целог тела, апроксимира дискретним моделом који се састоји од скупа континуираних функција дефинисаних у оквиру сваког коначног домена или коначног елемента.

3. Дефинисање односа деформације и напона

Односи деформације и напона су неопходни за извођење једначина за сваки коначни елемент. У случају једнодимензионалне деформације у правцу x осе, деформација ϵ_x повезана са померањем u за мале вредности деформација се изражава једначином: $\epsilon_x = \frac{du}{dx}$. Да би се добили прихватљиви резултати најважније је прецизно дефинисање понашање материјала. Напони су повезани са деформацијама на основу Хуковог закона који се назива и конститутивним законом: $\sigma_x = E \epsilon_x$.

4. Формирање матрице једначина елемента

Развој матрице одржања крутости елемента и матрице једначина елемента је заснована на концепту утицаја коефицијената крутости који подразумева познавање структуре елемента. Постоје и алтернативне методе које не захтевају ово претходно познавање структуре.

а) Метод одржања крутости или директна равнотежа

Матрица одржања крутости елемента и једначине елемента су повезане силама које делују у чворовима и које доводе до померања у чворовима. Једначине елемента се добијају помоћу услова равнотеже сила основног елемента и односа силе и деформације. Овај метод веома лако применљив на линијске или једнодимензионалне елементе.

б) Метод тежина резидуала

Метод тежина резидуала се често користи за извођење једначина елемената јер омогућава да метод коначних елемената буде примењен директно на било које диференцијалне једначине система. За формирање једначина којима се описују понашања елемената користи се један од познатих метода тежина резидуала: метод најмањих квадрата, Галеркинов метод, метод колокације и др. Конвенцијално једначине елемената се изражавају у матричном облику на следећи начин:

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \dots & k_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} \quad (10.1)$$

где је \mathbf{f} вектор сила у чворовима елемента, \mathbf{k} је квадратна и симетрична матрица крутости елемента и \mathbf{d} је вектор непознатих степени слободе чворова или генерална померања. Генерална померања могу да представљају квантитете као што су стварна померања, нагиби и закривљености.

5. Опште једначине елемента

Једначине равнотеже чворова генерисане у претходном кораку за сваки појединачни елемент се састављају у опште једначине равнотеже чворова. Коначан скуп или општа једначина изражена у матричном облику се може написати као: $\mathbf{F} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{d}$ Општа матрица крутости \mathbf{K} је сингуларна матрица пошто је њена детерминанта једнака нули што се обично отклања укључивањем одређених граничних услова (или увођењем ограничења или додавањем услова) тако да структура остаје на свом месту без кретања као крутог тела.

6. Решавање генералних померања

Када се опште једначине модификују увођењем граничних услова добиће се скуп симултаних алгебарских једначина које се у проширеном матричном облику могу изразити као:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} \quad (10.2)$$

при чему је n укупан број непознатих степени слободе чворова. Једначине се решевају по непознатим параметрима d_i коришћењем Гаусовог метода елиминације или итеративним путем. d_i се често називају и примарним непознатим параметрима као први квантитети који се одређују коришћењем једначина крутости (или померања) коначних елемената (Heidbach, 2004).

7. Решавање деформације и напона елемента

Код анализе напона одговарајућих структура добијају се вредности деформација и напони који се могу директно изразити у односу на померања одређена у претходном кораку. Општи однос између деформације и померања и између напона и деформације дати су претходним једначинама.

8. Анализа и интерпретација резултата

Крајњи циљ решавања структурних проблема методом коначних елемената је да се резултати интерпретирају и анализирају приликом планирања и доношења одлука. У општем смислу, одређивање локација у структури у којој се дешавају велике

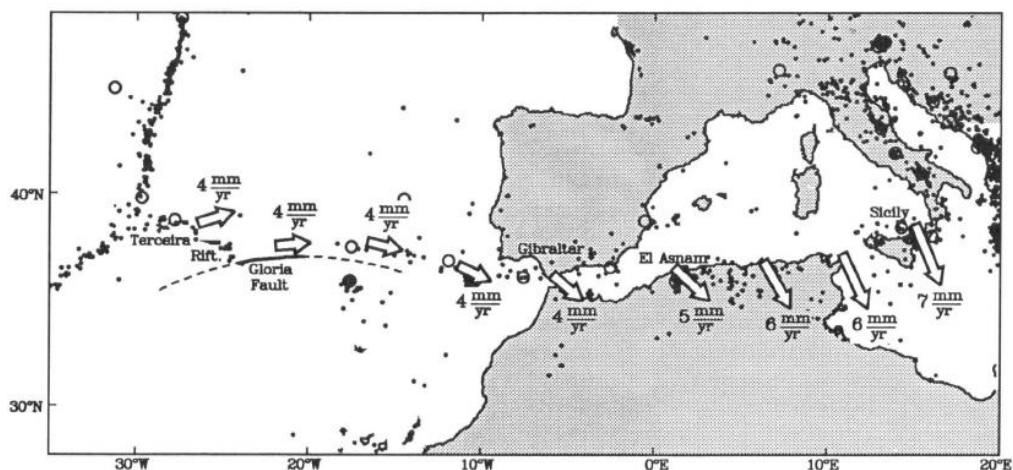
деформације и велика напрезања је значајно код доношења одлука. За интерпретацију резултата у графичком облику користе се разни рачунарски програми.

10.2 Главне компоненте тензора брзине деформације у оквиру области територије Републике Србије

10.2.1 Геотектонска подела региона области истраживања

Област Европе се може поделити у више подрегиона у односу на геодинамичке карактеристике: Западна Европа, Северна Европа, Јужна Европа, Балканско полуострво. Област територије Републике Србије према геотектонској подели припада региону Јужне Европе и Медитерана који се у многим радовима сматра природном лабораторијом за проучавање сеизмотектонских процеса, Grafarend and Voosoghi, 2003. Такође, својом највећом површином припада Балканском полуострву. Регион Јужне Европе и Медитерана је по геолошким, геофизичким и геодетским резултатима, један од најбоље проучених региона на земљиној површини. Бројна истраживања која обухватају последњих 100 година су резултирала великим бројем публикација које се односе на решавање локалних и регионалних геодинамичких процеса, на пример: Argus et al. (1989), DeMets et al., (1990), Mueller et al. (1993), Caporali et al. (2003), Altiner et al., (2006), Sledzinski (2007), Devoti et al. (2011), Nocquet (2012) и др.

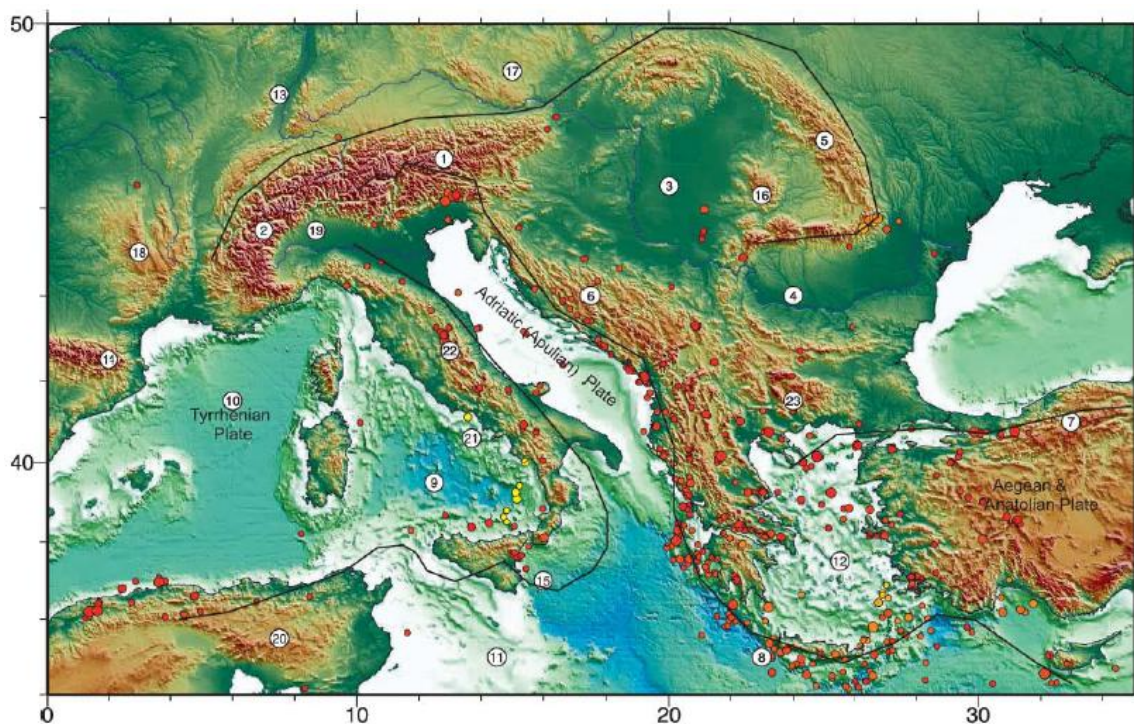
Садашња истраживања деформације земљине коре у региону Јужне Европе и источној области Медитерана се заснивају на континуираним подацима опажања просторних геодетских мрежа, као што су перманентне GPS мреже. Садашњи главни тектонски процеси се дешавају у оквиру великог кинематичког оквира који обухвата активно ширење океанског дна (дивергенцију) у Атлантском океану и Афричко - Евроазијску конвергенцију (субдукцију) граница у Медитерану. Стопа ширења у Јужном Атлантику износи око 40 mm/у и већа је од стопе ширења у Северном Атлантику која износи око 20 mm/у. Ова разлика доводи до постепене ротације афричке плоче у смеру казаљке на сату, што онда резултира притиском у правцу N-NW на Евроазијску плочу. Ови процеси заузврат доводе до скраћивања литосфере реда 5-6 mm/у у зонама дивергенције и повећавања од 40 mm/у у активним зонама субдукције. Изведен је кинематички модел у коме се показује затварање текућег кретања плоча које је извршено кружењем око троструког чвора Azores. Ово кретање се дешава на границама плоча великих размера и то кретање предиктује десно-бочно смицање од око 4 mm/у дуж зоне лома (фрактуре) Azores–Gibraltar и западно-северозападну конвергенцију испод Гибралтара у заливу Cadiz, слика 10.5 (Argus et al. 1989).



Слика 10.5. Релативно кретање места на Афричкој плочи у односу на Европску плочу.

Област јужне Европе или Алпско-Медитерански регион означава широку зону колизије између Афричке, Арабијске и Евроазијске плоче. Међутим деформације у овом региону се могу карактерисати сложенем просторно-временском расподелом компресионих и тензионалних догађаја. Због релативно јаких тектонских сила које управљају зоном компресије у овом региону постоји висока сеизмичка активност која се показује активним вулканима и земљотресима. Зона колизије плоча је комплексна и не може се прецизно дефинисати јер узрокује распрострањену сеизмичност која се јавља у ширем подручју.

Геотектонска подела региона јужне Европе са геометријом микро плоча које формирају геодинамички статус региона приказан је на слици 10.6, Pinter et al., 2006. Значајне области које формирају геодинамички статус региона означене на слици приказане су у табели 10.1.

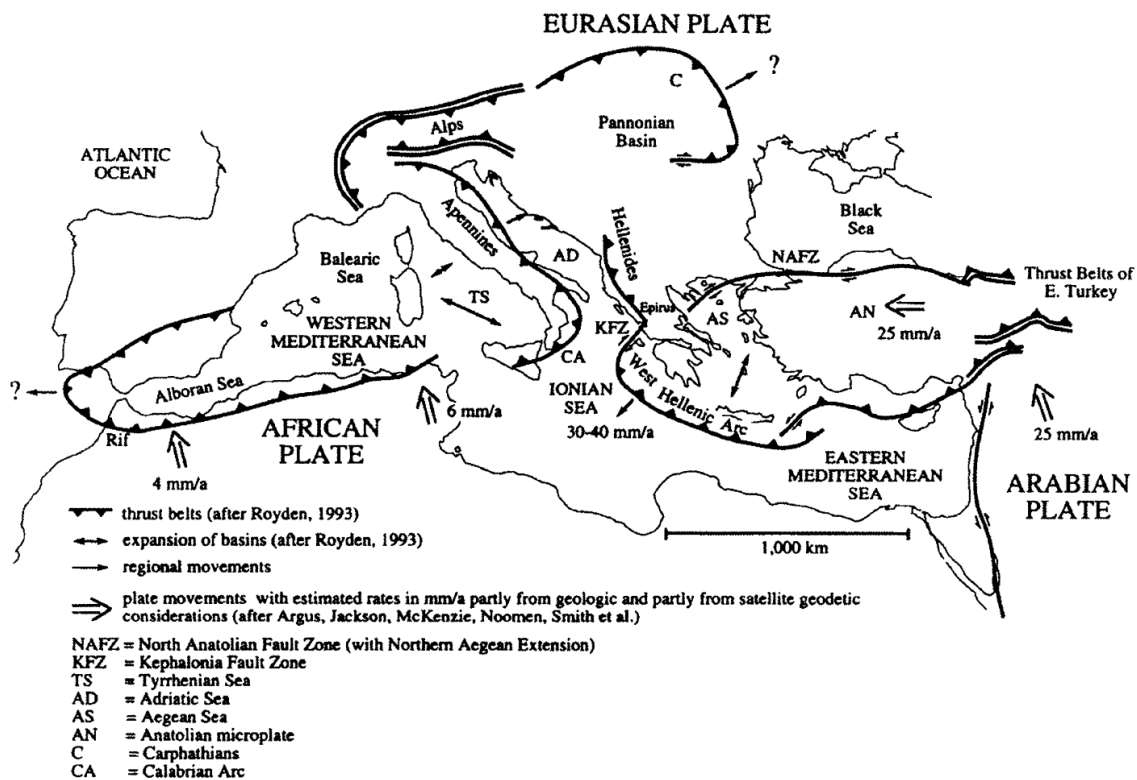


Слика 10.6. Геометрија микро плоча региона јужне Европе.

Табела 10.1. Области јужне Европе значајне за геодинамички статус региона.

1	Источни Алпи (троугластом карактеристичном линијом је означена граница између Европске и Јадранске плоче)
2	Западни Алпи
3	Панонски басен
4	Мезијска (Moesian) платформа (Ђердапска област где Дунав пробија лук Карпата)
5	Карпатски лук
6	Динарске планине
7	Северно Анатолијски раседни систем (западно - источне масивне структуре које пресецају област Турске)
8	Хеленски ров (усмерен је субдукцијом између Анатолијске плоче и Јадранске Плоче у правцу севера)
9	Тиренско море (интерпретира се као лук задњег басена између Италије и острва Корзике и Сардиније)
10	Лигуријско море
11	Јонско море са острвом Малта
12	Егејско море
13	Долина Рајне између планина Шварцвалд на истоку и Вогес на западу (јужно планине Јура имају облик банане)
14	Пиринеји
15	Зона субдукције између Јадранске плоче и Италијанске плоче (планина Етна се налази северозападно дуж источне обале Сицилије и повезана је са овом субдукцијом)
16	Планине Апусени
17	Бохемски масив
18	Централни масив
19	Пол ротације Јадранске плоче
20	Атласке планине
21	Везувио
22	Апенински ланац
23	Родопски ланац

Геотектонска подела региона јужне Европе приказана је на поједностављеној мапи са правцем померања главних тектонских плоча и микро плоча ове области оцењених на основу геолошких и геодетских података, Kahle et al., 1995, слика 10.7.



Слика 10.7. Скица главних тектонских плоча и микро плоча у области јужне Европе.

У оквиру бројних истраживања може се видети геотектонска подела састава геолошких јединица Балканског полуострва.

Јован Цвијић је у свом делу "Балканско полуострво и јужнословенске земље" 1922. године написао следеће: "Ако би се са висина тичијег лета посматрало Балканско Полуострво као географски организам, приметила би се једна копнена маса, на Северу широка и везана за европски континент са две системе планинских венаца: на Западу, Динарски који се приљубљује уз Алпе; на Истоку, Карпатско-балкански лук. На Југу се Полуострво сужава и у Егејском Мору разбија у многобројна острва која су поређана са Запада на Исток према М. Азији. Проучавањем геолошке грађе доказано је да главне тектонске системе Полуострва имају готово исту геолошку структуру као и планински венци М. Азије."

Балканско полуострво се налази у северозападном делу источног Медитеранског региона и обухвата геолошке јединице различитог порекла, слика 10.8. Главне јединице које чине Балканско полуострво су: 1) Мезијска микроплоча, део јужне маргине Евроазије; 2) Јадранска (често се назива и Апулија) микроплоча која је по пореклу формирана ртом Гондвана; 3) остаци Тетиса и његових маргина мора.

Прве две јединице су састављене од континенталне коре док је трећа јединица састављена океанске коре. Различити делови коре заједно са океанском кором Тетиса су транспортовани при чему су се спојили у веће континенталне јединице у току Палеозоика и Мезозоика. Овај процес срастања (кондензације) коре је трајао од раног Палеозоика до скоро краја Креде и дешавао се истовремено са субдукцијом океанске литосфере. Остаци Тетиса и његових маргина мора су сачувани као офиолитски појасеви у оквиру спојених континенталним јединица.

тзв. зашивање (конекција) се догодило преко компресије, ротације неких јединица и преко великих транскурентних покрета, Karamata, 2006.

Северна граница Балканског полуострва је зона транскурентног раседа која се налази дуж јужне маргине метаморфне основе Панонског басена. Ова граница у Славонији (западно од Дунава), формира око 20 km широку, тектонски мешовиту зону као резултат потиска метаморфних стена Панонског басена над млађим депозитима. Источно од Дунава ова граница је јасно изражена са трендом у источном правцу од Дунава. Даље на исток поново сече јужне Карпате, наставља дуж Дунава и онда одступа ка Констанци и Црном мору.

Јужну границу Балканског полуострва није лако дефинисати због комбинованог присуства Егејског мора и зоне субдукције на југу (јужно од Крита), и ефеката западног кретања Анадолије, али се може узети као линија између Крфа и Олимпа и северна маргина Егејског мора.

Источна граница Балканског полуострва је дефинисана као обала Црног мора и западна граница је дефинисана обалама Јадранског и Јонског мора.



Слика 10.8. Границе Балканског полуострва.

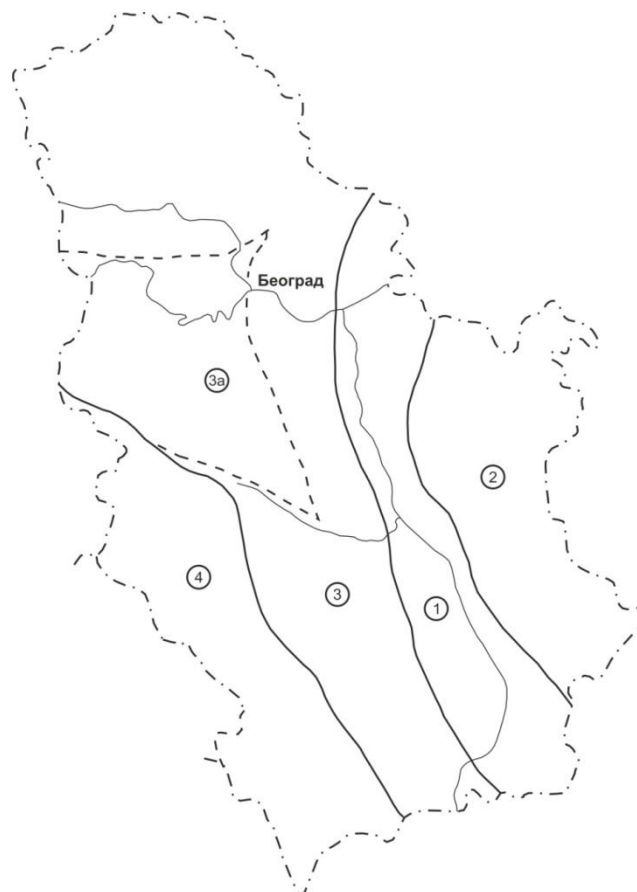
Такође геотектонска подела се може посматрати у односу на алпски орогени појас, при чему се територија Србије налази у саставу алпског орогеног појаса јужне Европе. На територији Србије алпски орогени појас показује типичан развој по принципу билатералног дивергентног састава: северна Алпска грана је заступљена у Карпатско-Балканском луку источне Србије док се западна Србија уклапа у Динариде и обухвата површину са најкарактеристичнијим представницима унутрашње зоне јужног огранка алпског орогеног појаса. Између ових грана леже Српско-Македонски или Српски масив и Вардарска зона. На слици 10.9 је приказана геотектонска подела области Србије са границама ова четири главна дела: 1) Српски масив, 2) Карпатско-Балкански лук, 3) Вардарска зона (обухвата и Јадарски блок) и 4) Динариди (Zlokolica-Mandic, 1998).

Српски масив заузима централни део територије Србије од Вршачког брега на северу до границе са Македонијом на југу. Границу са другим геотектонским јединицама представља дубоки реверсни расед.

Карпатско-Балкански лук обухвата источне делове територије Србије, до националних граница са Румунијом, Бугарском и Македонијом. Карпато-Балканиде карактерише тектонски модел зонске композиције са оријентацијом структура у смеру север-југ, које ротирају у правцу север-североисток у северном делу и у правцу југ-југоисток у јужном делу, чиме се формира лук.

Вардарска зона се граничи са Српским масивом и Динаридима. Одликује се сложеностом састава и обухвата и Јадарски регион.

Динариди, у облику свог унутрашњег појаса, се налазе у западној Србији и проширени су континуирано у суседним територијама на југоисток и сјеверозапад.



Слика 10.9. Геотектонске структуре Србије.

10.2.2 Сеизмотектонска истраживања испитиваног региона

Сеизмологија као једна од научних дисциплина геофизике бави се проучавањем процеса који условљавају припрему и генезу земљотреса, проучавањем кретања сеизмичких таласа кроз Земљину кору и њену дубљу унутрашњост и деструктивних ефеката сеизмичких таласа на тлу, грађевинским објектима и др. Феномен настанка земљотреса увек је представљао предмет проучавања бројних истраживача с обзиром на катастрофалне последице њиховог разорног дејства. Број жртава у

бројним катастрофалним земљотресима који су се догодили у свету током историје су највећи у поређењу са другим природним катастрофама.

Најсмртоноснији земљотрес у историји човечанства, према непотврђеним научним сазнањима, догодио се 1556. год. у кинеској покрајини Shaanxi са 830.000 људских жртава. Најснажнији регистровани земљотрес у свету догодио се 1960. год. у Чилеу јачине 9.5 степени Рихтерове скале у коме је настрадало преко 2.000 људи. У периоду између 1920. до 1976. год. у Кини је у три катастрофална земљотреса број жртава премашио цифру од 650. 000, а постоје процене да је тај број преко један милион људи. Снажан земљотрес се догодио 1952. год. у Камчатки у Русисји, 1964. год. на Аљасци у САД-у. 2004. год. настрадало је више од 230.000 људи у 14 земаља од разорног земљотреса који је погодио западну обалу Индонезије изазваши серију цунамија у целом Индијском океану. У земљотресу који је погодио североисточни део острва Хоншу у Јапану 2011. год. настрадало је око 10.000 људи, око 90.000 се води као нестало. Један од најснажнијих земљотреса који се догодио у Европи је 1775. год. када је за неколико минута португалски град Лисабон готово у потпуности порушен и однео је између 70 и 100 хиљада људских жртава.

Од деструктивних земљотреса који су се догодили на простору некадашње државе СФР Југославије у XX и XXI веку треба поменути следеће: 1931. год. земљотрес магнитуде преко 6 степени Рихтерове скале који се догодио у јужној Македонији на подручју Валандова са 31 људском жртвом; у Скопљу 1963. год. земљотрес магнитуде 6.1 Рихтерове скале са 1.070 људских жртава; у Бања Луци 1969. год. магнитуде 6.0 Рихтерове скале са 15 људских жртава; на Црногорском приморју 1979. год. магнитуде 7.0 Рихтерове скале са 136 људских жртава; на Копаонику 1980. год. магнитуде 5.9 Рихтерове скале; у Хрватској 1996. год. подручје Стон - Слано погодио је земљотрес магнитуде 6.0 Рихтерове скале; 1998. год. земљотрес магнитуде 5.7 догодио се у околини Мионице; 2010. год. земљотрес магнитуде 5.4 Рихтерове скале догодио се у Краљеву са две људске жртве.

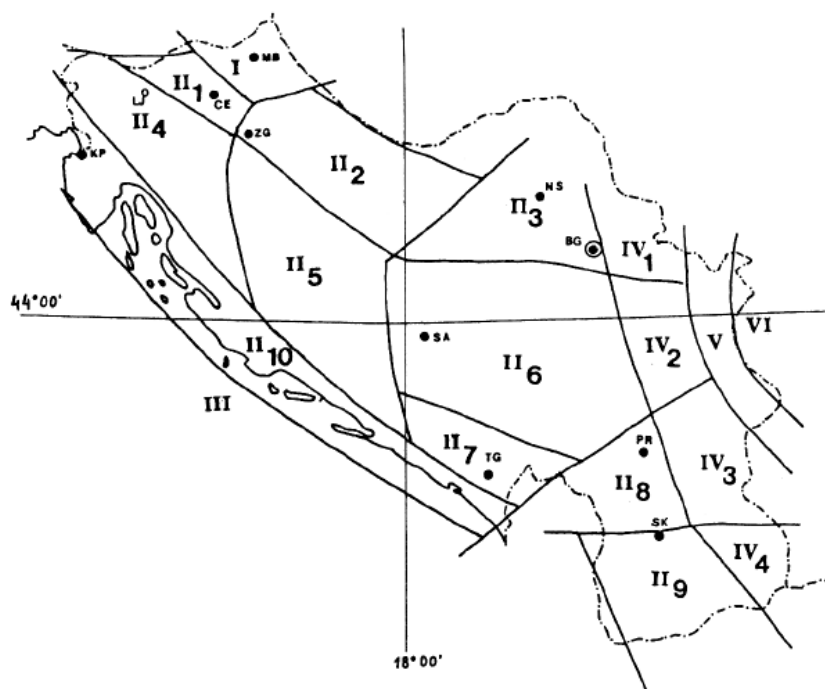
Последњих неколико деценија дошло је до врло интензивног развоја веома квалитетних инструмената за регистровање земљотреса, као и метода за анализу и обраду података. Прва инструментална регистровања земљотреса на подручју западне области Балкана извршена су 1882. год. у метеоролошкој опсерваторији у Загребу механичким сеизмографом. Почетком XX века почела су инструментална сеизмолошка осматрања у Сарајеву, Београду, Љубљани, Бања Луци, Скопљу, Подгорици и др. другим градовима ове области. Садашњу мрежу сеизмолошких станица Србије чини 18 сеизмолошких станица са централном сеизмолошком станицом у Београду која је све до 1970. год. имала једини механички сеизмограф на простору Србије. Систем дигиталне аутоматске сеизмолошке аквизиције (DASA) који је развијен у Републичком сеизмолошком заводу Србије је у периоду од 1991. до 2005. год. чинио основу сеизмолошке мреже.

Постоје бројни радови и научни пројекти развијени за потребу истраживања крустаних деформација и сеизмотектонских карактеристика за подручје компресионог субдукцијског, односно колизионог-смичућег контакта између Афричко-Арабијске плоче и Евроазијске плоче (радови: Arsovski i dr., 1973; Sikošek, 1987; Hadžijevski at all., 1988; Sikošek and Petrović, 1991; Glavatović, 2005; Altiner, 2001; Sledzinski, 2003; Grenerczy et al., 2005; Ivančić at all., 2006; Pinter at all., 2006; Caporali et al., 2009; Weber at all., 2010; Nocquet, 2012 и др.; пројекти: UNESCO/UNDP Project "Survey of the Seismicity of the Balkan Region", 1974.; EU 7th Framework Program, "Seismic Hazard hARmonization in Europe" (SHARE), 2009.-2012.; IAG Commission 3 - Earth Rotations and Geodynamics, Subcommittee 3.2 - Crustal Deformation, "The Central European Geodynamics Project CERGOP",

"CERGOP-2", 1994-2007; Harmonization of Seismic Hazard Maps in Western Balkan Countries Project (BSHAP), 2007-2011; The World Stress Map - WSM, 1986 - ; и др.).

Област територије Србије припада области некадашње државе СФР Југославије која се налази у делу јужног обода Европске плоче и потпада под дејство активне геотектонске спреге коју чине Европска, Афричка и Арабијска плоча. Због бржег померања Афричке плоче према северу у правцу Европске плоче, дуж тог контакта долази до акумулирања тектонских напона који се преко система неотектонских разлома преносе у шире подручје, што представља примарни услов сеизмичности ширег дела обода Европске плоче. Резултат геотектонске колизије је интензивна неотектонска раседност читавог консолидованог простора у области Алпа. Највећи утицај примарних геотектонских граница у простору компресионог субдукцијског, односно колизионог-смичућег контакта између Афричко-Арабијске плоче и Евроазијске плоче догађа се у простору Медитерана, и простире се у дубину залеђа тих контаката од око 150-200 km.

У истраживањима више аутора (Arsovski i dr., 1973; Sikošek, 1988) за области територије некадашње државе СФР Југославије изведена је подела дела консолидованог спољњег омотача дубоким разломима на 18 крусталних великих блокова који су плићим раседима даље издељени на мање блокове, слика 10.10.

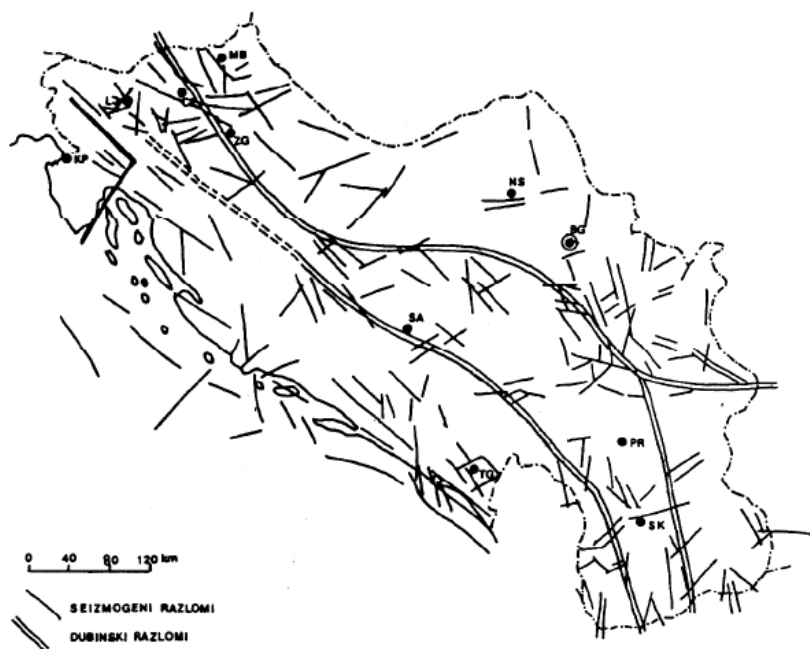


Слика 10.10. Велики крустални блокови на подручју државе СФР Југославије.

На слици 10.10 велики крустални блокови су означени римским бројевима: I - Источни Алпи, II₁ - Караванке - Сава, II₂ - Славонија, II₃ - Фрушка гора, II₄ - Соча - Велебит, II₅ - Западна Босна - Далмација, II₆ - Централни Динариди, II₇ - Црна Гора, II₈ - Метохија, II₉ - Пелагониди, II₁₀ - Периадријатски блок, III - Јадранска платформа, IV₁ - Војводина, IV₂ - Блок Мораве, IV₃ - Кукавица, IV₄ - Огражден - Беласица, V - Карпато - Балканиди, VI - Мисиска платформа.

Такође, на основу догођених земљотреса и распореда њихових епицентара постоји веза са присутним неотектонским разломима. Дистрибуција епицентара догођених земљотреса је коришћена за анализу и утврђивање сеизмогености одређених неотектонских разлома. Из распореда главних сеизмотектонских разлома

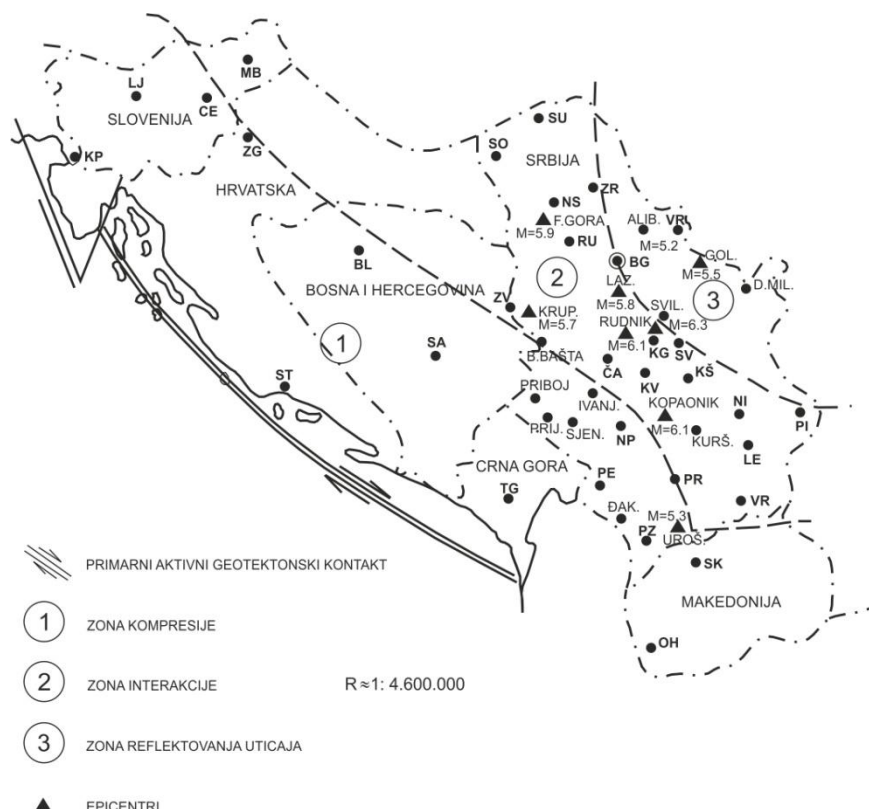
на територији СФР Југославије виде се њихове одређене концентрације које одговарају главним неотектонским чвориштима или њиховим линеарним низовима (Sikošek, 1988), слика 10.11.



Слика 10.11. Главни сеизмотектонски разломи на територији државе СФР Југославије.

На основу примарних утицаја за генерисање земљотреса на сеизмотектонским структурама на територији СФР Југославије издвојена су напонска тектонска поља која имају зонску диспозицију у оквиру којих се налазе сеизмогена подручја СФРЈ, слика 10.12. Зонирање је извршено у првом реду на основу ширине утицаја активног геотектонског контакта ~230 km између тзв. Јадранске платформе (најистакнутијег дела Афричке плоче) и орогеног појаса Динарида на јужном ободу Европске плоче у области Јадранског мора (Sikošek, Petrović, 1991).

На слици 10.12 је приказана диспозиција зона тектонских напона повезана са колизионим савременим активним геотектонским контактом дуж Јадранске обале за област територије некадашње државе СФРЈ и територије Србије. Прва зона која је под највећим утицајем овог примарног контакта је тзв. зона компресије ширине 220-230 km, друга зона је под утицајем интеракције компресија и плиматских утицаја горњих делова астеносфере. Трећа најудаљенија зона од примарног контакта је под утицајем рефлектоване компресије Мисиске платформе и одговарајућих вертикалних кретања блокова. Удаљеност површине Србије од примарног извора тектонских напона условљава присуство све три тектонске напонске зоне у њој и зависно од величина сеизмоактивних раседних површина зависе и распони могућих максималних величина магнитуда земљотреса које се на њима генеришу. Распоне магнитуда по зонама одражавају и догођени земљотреси у овој области (Hadžijevski at all., 1988; Sikošek and Petrović, 1991).



Слика 10.12. Напонска тектонска поља у области јуж. обода Европске плоче државе СФРЈ.

Дубина литосфере у Србији налази се између 45 km и 27 km. Тектонским померањима кроз две фазе, створени су системи присутни у горњим деловима литосфере у области Србије. У првој фази због палео и мезоалпских орогених померања, дошло је до набирања, преклапања, потискивања, дубоких и регионално уздужних и вишефазних раседања литосфере. У другој фази дошло је до одвајања блокова које је узроковано неотектонским уздужним, дијагоналним и трансферзалним раседањем преко старих консолидованих тектонских структура. Територија Србије је мрежама неотектонских раседа издељена на блокове величина $N \times km$ до $N \times 10 km$, од којих је изванстан број активан и данас уз неке индивидуалне сезмички активне раседе. Сеизмичка угроженост на подручју појединих напонских зона на територији Србије (слика 10.12) у односу на дужине сеизмоактивних сегмената сеизмогених раседа који чине сеизмотектонски склоп приказана је у табели 10.2, Петровић, 1998.

Табела 10.2. Сеизмичка угроженост на подручју на територији Србије.

1. зона	$6 \leq L_{km} \leq 25$	$4.2 \leq M \leq 5.9$	$6 \leq I_{MSK} \leq 8$
2. зона	$8 \leq L_{km} \leq 35$	$4.5 \leq M \leq 6.3$	$7 \leq I_{MSK} \leq 9$
3. зона	$10 \leq L_{km} \leq 25$	$4.4 \leq M \leq 5.5$	$6 \leq I_{MSK} \leq 8$

при чему је L - дужина раседа у km, M - магнитуда земљотреса у степенима Рихтерове скале и I_{MSK} - интензитет земљотреса у епицентру.

Сеизмогени склоп Србије је сачињен од сеизмогених региона, система, зона и индивидуалних линијских извора сеизмичке енергије:

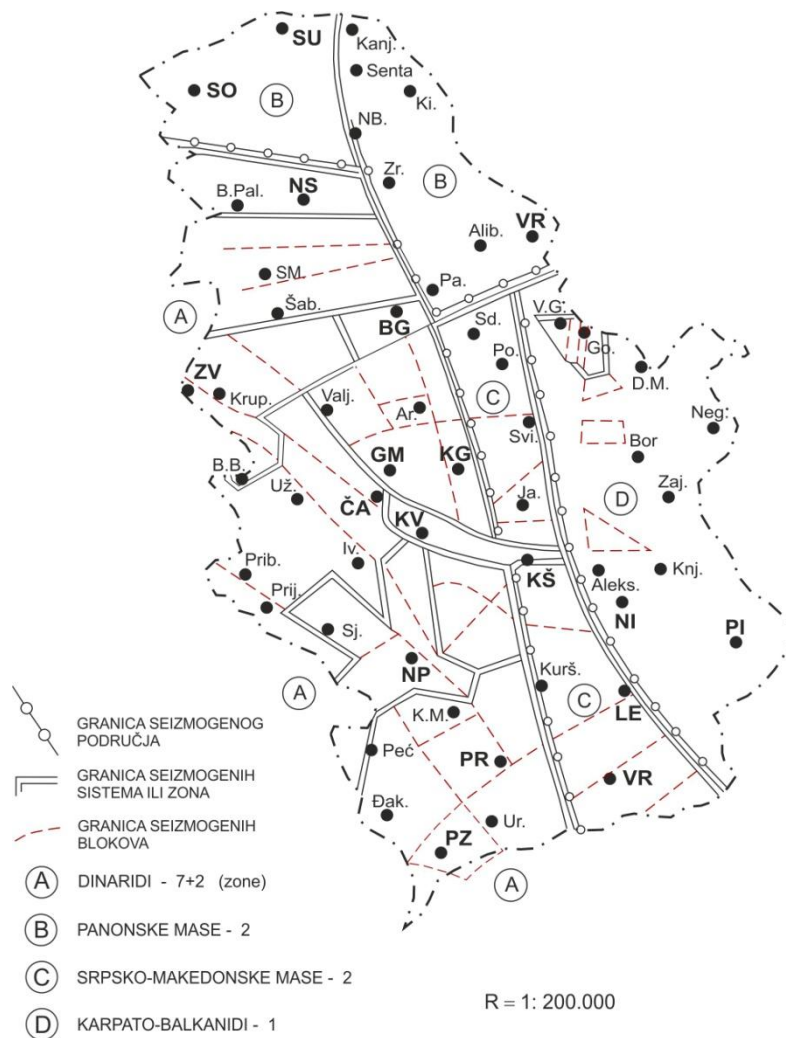
1. Сеизмогени региони су:
 - A) Динариди,
 - B) Панонске масе,
 - C) Српско-Македонске масе и
 - D) Карпато-Балканиде (4 сеизмогена региона).
 2. Сеизмогени системи су сачињени од: сеизмогених блокова и сеизмогених мањих блокова (12 сеизмогених система).
 3. Сеизмогене зоне су: линеарне структуре тектонских грабена и хорстова (долина и узвишења) (2 сеизмогене зоне).
 4. Индивидуални линијски извори сеизмичке енергије (13 линијских извора).
- Сеизмотектонске структуре територије Србије су приказане у табели 10.3. (највише неотектонски подељене).

Табела 10.3. Класификација сеизмотектонске структуре Србије.

Сеизмогени регион	Сеизмогени систем / Сеизмогени блок зона
A Динарски 7 сеизмогених система 2 сеизмогене зоне 32 сеизмогена блока	1. Нови Сад (сеизм. зона) 1а.
	2. Срем 1. Фрушка гора 2. Срем. Митровица 3. Сава
	3. Подриње 4. Поцерски 5. Крупањски 6. Зворнички 7. Бајина Башта
	4. Западна Србија 8. Кабларски 9. Пожешки 10. Златиборски 11. Златарски
	5. Санџак 12. Сјенички 13. Чемерно 14. Голија 15. Тутин
	6. Централна Србија 16. Београд 17. Лазаревац 18. Ваљево 19. Букуља 20. Рудник 21. Космај 22. Крагујевац
	7. З. Морава (сеиз. зона) 23.
	8. Копаоник 24. Жељин 25. Јошаничка бања 26. Брзеће 27. Александровац
	9. Косово-Метохија 28. Трепча 29. Газиводе 30. Србица 31. Метохија 32. Призрен 33. Урошевац

Сеизмогени регион	Сеизмогени систем	Линијски извори сеизмичке енергије
B Панонске масе 2 сеизмогена система са 4 линијска извора сеизмичке енергије	1. Бачка	1. Нови Кнежевац 2. Тиса-Нови Бечеј
	2. Банат	3. Перлез 4. Алибунар
Сеизмогени регион	Сеизмогени систем	Сеизмогени блок
C Српско-Македонски 2 сеизмогена система са 9 сеизмогених блокова	1. Велика Морава	1. Поморавље 2. Свилајнац 3. Јагодина 4. Рековац
	2. Јужна Морава	5. Јастребац 6. Прокупље 7. Јабланица 8. Врање 9. Трговиште
Сеизмогени регион	Сеизмогени систем	Сеизмогени блок
D Карпато-Балкански 1 сеизмоген систем 8 сеизмогених блокова 9 линијских извора сеизмичке енергије	1. Голубац	1. Дедина 2. Голубац 3. Туман 4. Брњица-Звижд
		5. Крепољин 6. Жагубица 7. Соко бања 8. Ниш
	Линијски извори сеизмичке енергије	
	1. Добра 2. Казан-Черна 3. Сип 4. Поречка река 5. Мироч 6. Јабуковац 7. Тимок-Салаш 8. Кобишница 9. Тимок-Књажевац	

Сеизмотектонске структуре територије Србије приказане су на слици 10.13, Sikošek and Petrović, 1991.

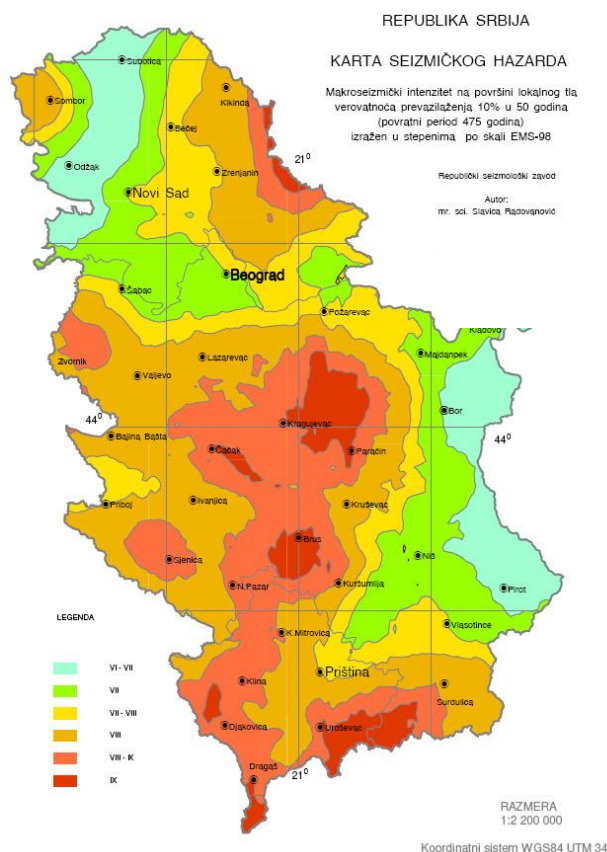


Слика 10.13. Сеизмотектонске структуре територије Србије.

За прорачун сеизмичког хазарда и конструисање карата за подручје територије Србије одговоран је Сеизмолошки завод Србије. Прорачун се заснива на коришћењу постојећих релевантних података и методе препоручене од стране Европског референтног центра за имплементацију, хармонизацију и развој Еврокода 8 (EN1998-1). Анализа сеизмичког хазарда обухвата следеће активности (<http://www.seismo.gov.rs>):

1. Коришћење свих података о догођеној сеизмичности на територији Србије и у суседним територијама чије сеизмогене зоне могу имати значајан утицај на сеизмичност односно формирање укупног сеизмичког хазарда у Србији.
2. Сагледавање тектонских и неотектонских услова појављивања земљотреса.
3. Дефинисање сеизмогених зона и одговарајућих закона поновљивости земљотреса за сваку зону.
4. Дефинисање законитости атенуације рачунатих сеизмичких параметара (макросеизм. интензитета земљотреса и хоризонталног убрзања осциловања тла).
5. Избор метода за прорачун сеизмичког хазарда и нумеричких вредности.
6. Конструисање карата сеизмичког хазарда за сваки од два параметра и за одабране периоде поновљивости.

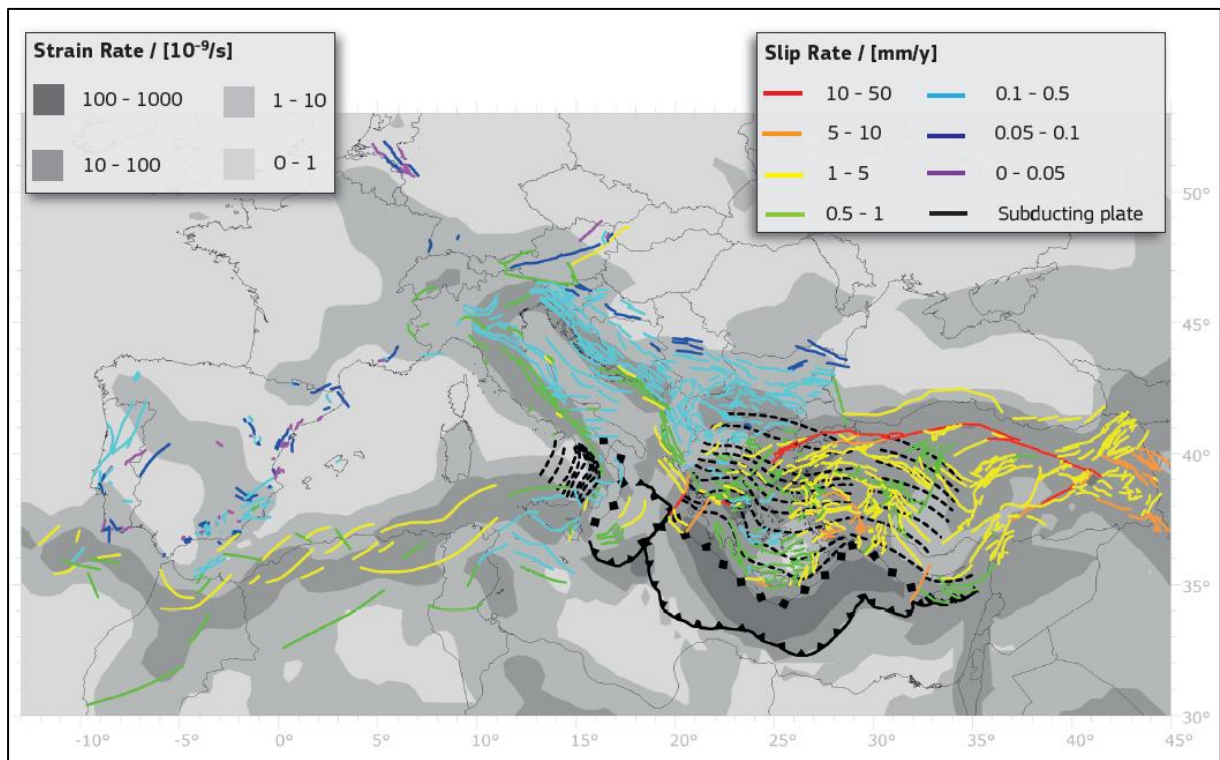
Прорачун макросеизмичког интензитета на површини локалног тла за област Србије за вероватноћу превазилажења 10% у 50 година (повратни период је 475 година према прописима Европских држава за стандардне типове зграда) у степенима EMS-98 приказан је на слици 10.14 (www.seismo.gov.rs).



Слика 10.14. Карта сеизмичког хазарда за област територије Србије.

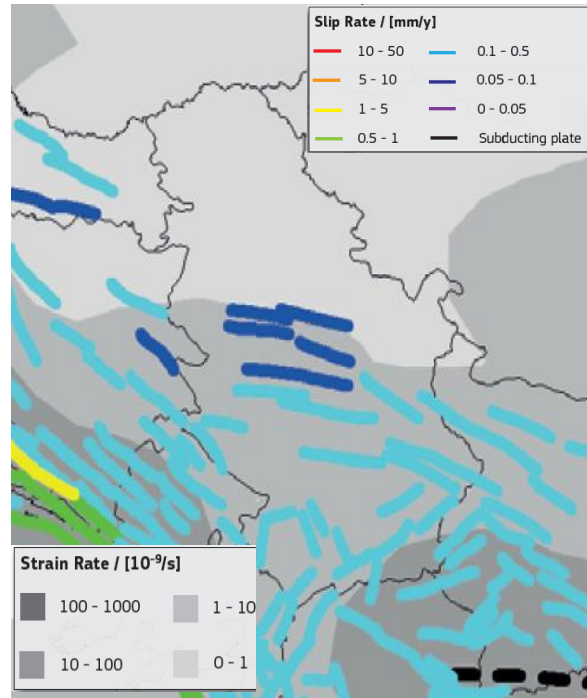
Максимално хоризонтално убрзање тла, PGA (Peak Ground Acceleration) за области плаво-зелене боје имају процењену вредност мању од 0.04g, области жуто-наранџасте боје ниског степена хазарда имају вредности од 0.04g - 0.08g и области црвене и тамно црвене боје средњег степена хазарда имају процењену вредност 0.08g - 0.20g, Петровић, 1998.

У оквиру европског пројекта "Seismic Hazard hARmonization in Europe" - SHARE за Европско-Медитерански регион добијени су резултати садашњих активних раседа и субдукционих плоча са оцењеним брзинама кретања који су приказани су на слици 10.15. У овом региону постоји преко 1100 активних раседа што покрива више од 64.000 km дужине раседа. Позадина мапе приказује оцењену брзину деформације активних раседа изведена из геолошких и геодетских података (<http://www.share-eu.org>).



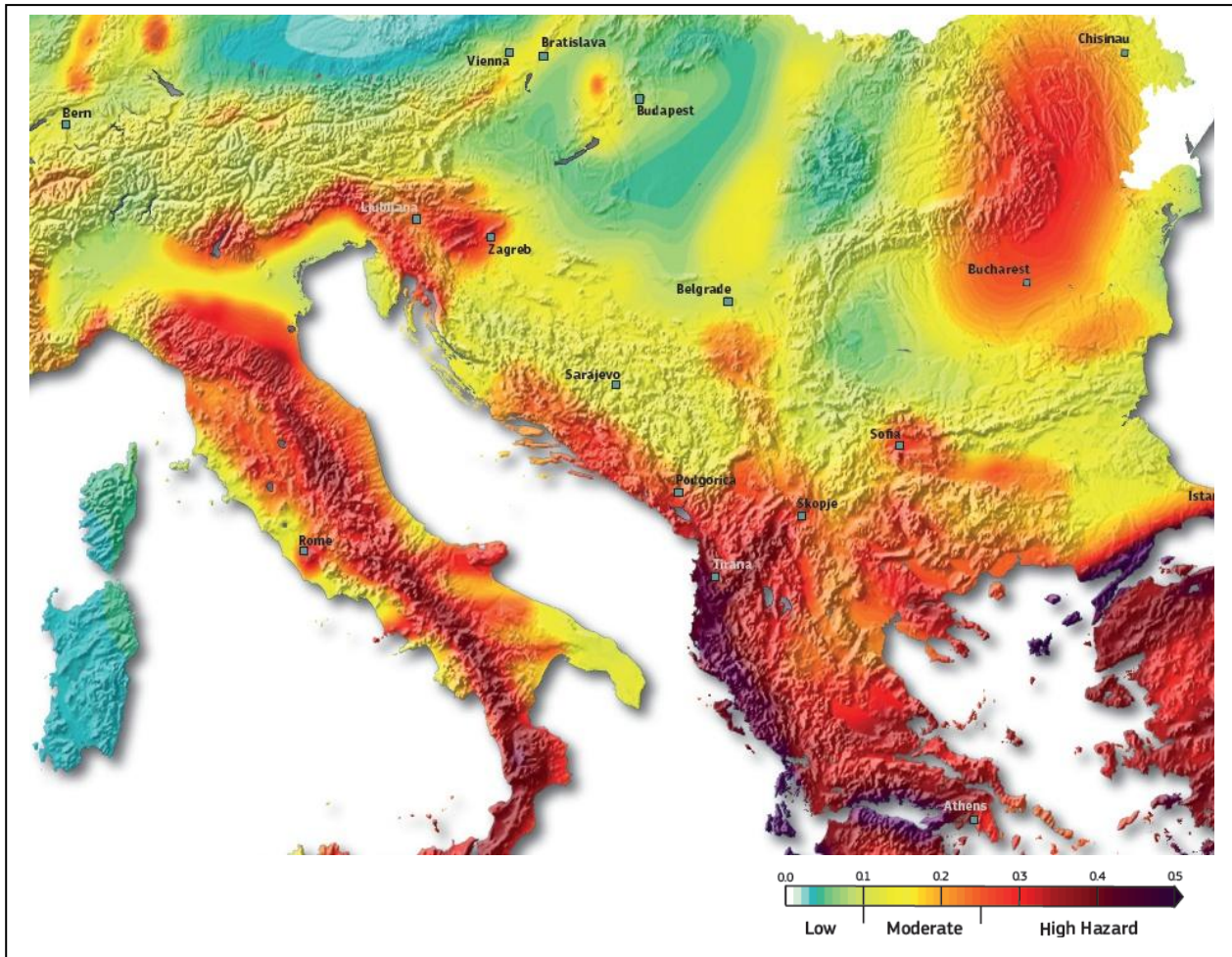
Слика 10.15. Садашњи активни раседи у Европско-Медитеранском региону.

За област територије Србије резултати садашњих активних раседа и вредности оцењене брзине деформације издвојени су са карте Европско - Медитеранског региона, слика 10.16. Оцењене вредности брзине кретања у правцима активних раседа у области Централне Србије се налазе у распону 0.05-0.1 mm/y, у области Јужне Србије брзине кретања у правцима активних раседа се налазе у распону 0.1-0.5 mm/y. Оцењена брзина деформације се налази у распону 0-1 η strain/s за област територије Србије северно од линије која повезује границу са БиХ - Зворник - Крупањ - Ваљево - Аранђеловац - Свилајнац - Зајечар - граница са Бугарском. Вредност брзине деформације за област територије Србије јужно од поменуте линије се налази у распону 1 - 10 η strain/s и за област која се налази југоисточно од Враћа до границе са Македонијом и Бугарском оцењена брзина деформације је у распону 10-100 η strain/s.



Слика 10.16. Садашњи активни раседи и оцењена брзина деформације у области Србије.

Пројектом SHARE сеизмички hazard је процењен са временски независним пробабилистичким приступом. Модели будућих потреса тла су засновани на историји земљотреса у протеклих 1.000 година, на познавању активних раседа мапираних у овој области, на основу GPS мерења брзине деформације Земљине коре и на основу инструменталних снимака јаких потреса тла генерисаних од претходних земљотреса. Европска сеизмичка карта hazard приказује потресе тла (максимална хоризонтална убрзања тла, PGA), слика 10.17, који би се догодили или премашили са 10% вероватноће у 50 година, што одговара просечном понављању оваквих кретања тла сваких 475 година. Резултати пројекта SHARE такође приказују веће потресе тла који се понављају само у 1000-5000 година а од значаја су за инфраструктуре као што су бране или мостови. Области плаво-зелене боје ниског степена hazard имају процењену вредност $PGA < 0.1g$, области жуто-наранџасте боје средњег степена hazard имају вредности од $0.1g < PGA < 0.25g$ у којој територија Србије спада у највећој мери и области црвене боје са већим ризиком које имају процењену вредност $PGA > 0.25g$. Вредности потреса тла приказаних на карти достижу вредност до $0.5g$, при чему је g гравитационо убрзање.



Слика 10.17. Део Европске сеизмичке карте хазарда.

Глобална карта стања напона или The World Stress Map (WSM) је мапа садашњег поља напона Земљине коре, реализација 2008. Пројекат WSM је изведен у сарадњи са академијама, индустријама и владама држава са циљем да се карактерише поље напона и разумеју извори настанка напона. Пројекат је почео 1986. године као део програма International Lithosphere Program - ILP а од 1995. до 2008. године је био истраживачки пројекат Heidelberg академије наука и уметности. Од 2009. године пројекат је настављен и истраживања се одвијају у оквиру Helmholtz Centre Potsdam, GFZ немачког истраживачког центра Геонаука. Програмом Create a Stress Map Online - CASMO којим се креирају карте поља напона урађена је мапа режима напона за територију Србије, слика ***. За одређивање оријентације тектонског напона коришћени су различити индикатори напона груписани у четири категорије, Zoback, 1989:

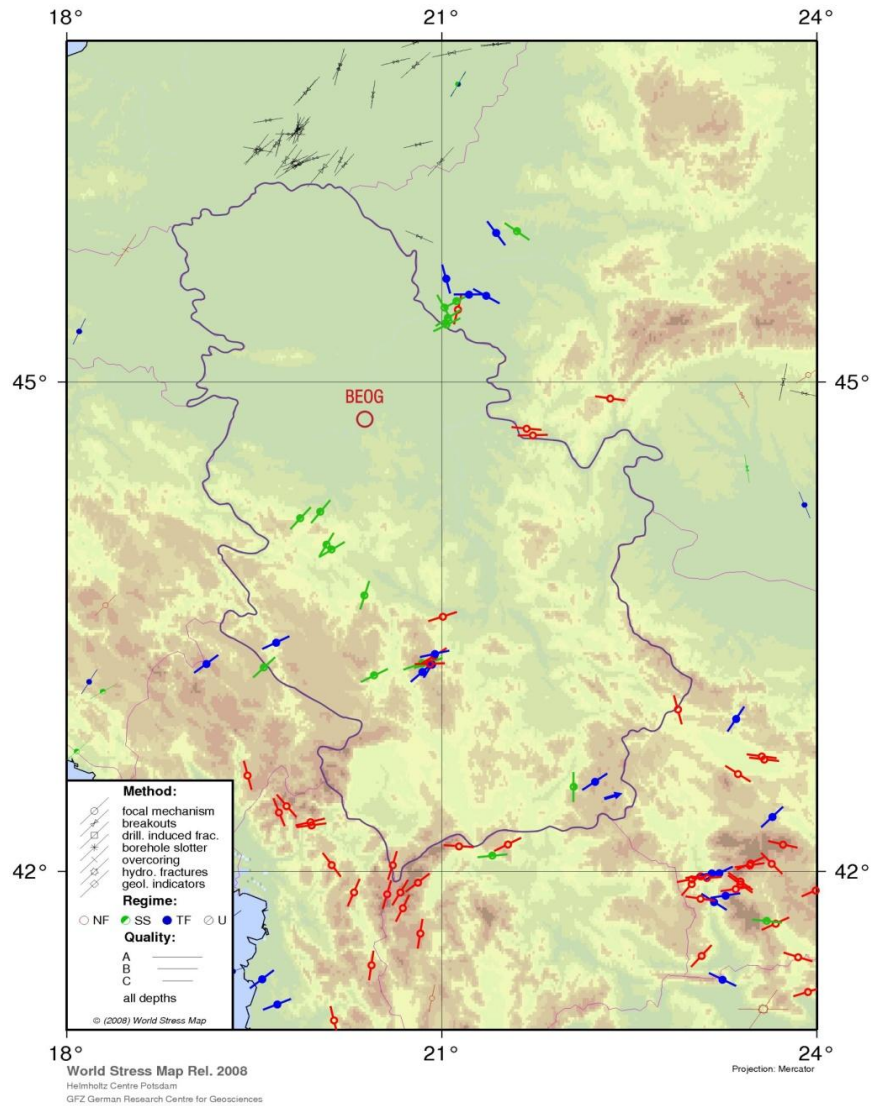
- механизам настајања земљотреса
- фрактуре изазване бушотинама и пукотинама
- мерења напона на локалном тлу
- млађи геолошки подаци (из анализе раседања и вулканских отвора)

Магнитуде напона су дефинисане користећи стандардну геолошку/геофизичку нотацију са позитивним компресивним напоном и $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ при чему је σ_1 максимални и σ_3 минимални главни компресивни напон. Категорије коришћене да се опише тектонски режим су:

1. Нормално раседање (NF - Normal faulting)

2. Раседање смицањем (SS - Strike-slip faulting)
3. Раседање потиском (TF - Thrust faulting)

Све три категорије тектонских кретања су присутне у области територије Србије што је приказано на слици 10.18.



Слика 10.18. Карта напона за област Србије.

10.2.3 Математички модел ITRF локалних брзина станица

Конструкција међународног ITRF оквира се заснива на комбинованом решењу на основу серија координата станица и њихових брзина изведених из опажања просторним геодетским техникама VLBI, SLR, GPS и DORIS. За одређивање положаја станице у ITRF оквиру све станице имају ознаке припадајуће тектонске плоче. Положај станице у временском тренутку t на површини чврсте земље се изражава следећом једначином, Boucher and Altamimi, 1993:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}_0 + \mathbf{V}_0(t - t_0) + \sum_i \Delta \mathbf{X}_i(t) \quad (10.3)$$

при чему су $\Delta \mathbf{X}_i$ корекције за различите утицаје зависне од времена, \mathbf{X}_0 положај станице у епохи t_0 , \mathbf{V}_0 брзина станице у епохи t_0 и t_0 нулта референтна епоха.

Кретања тектонских плоча узрокују промену координата станица на површини земље до 10 cm годишње. Општи облик једначине брзина координата тачака \mathbf{V}_0 се може изразити као сума одговарајућих компоненти, Cai and Grafarend, 2007:

$$\mathbf{V}_0 = \mathbf{V}_{\text{plate}} + \mathbf{V}_{\text{ice}} + \mathbf{V}_r \quad (10.4)$$

где појединачни чланови представљају следеће брзине:

$\mathbf{V}_{\text{plate}}$ - хоризонталне брзине тачака узроковане тектонским кретањем плоча, што се описује помоћу геофизичког и геолошког вектора угловне брзине ω (Декартов вектор ротације са компонентама модела $\omega_x, \omega_y, \omega_z$) апсолутног кретања плоча (садашњи модел кретања плоча - модел NNR-NUVEL-1A);

\mathbf{V}_{ice} - вертикалне брзине тачака узроковане пост ледничким издизањем, које се могу срачунати из модела (садашњи модел - модел ICE-5G, Peltier 2004);

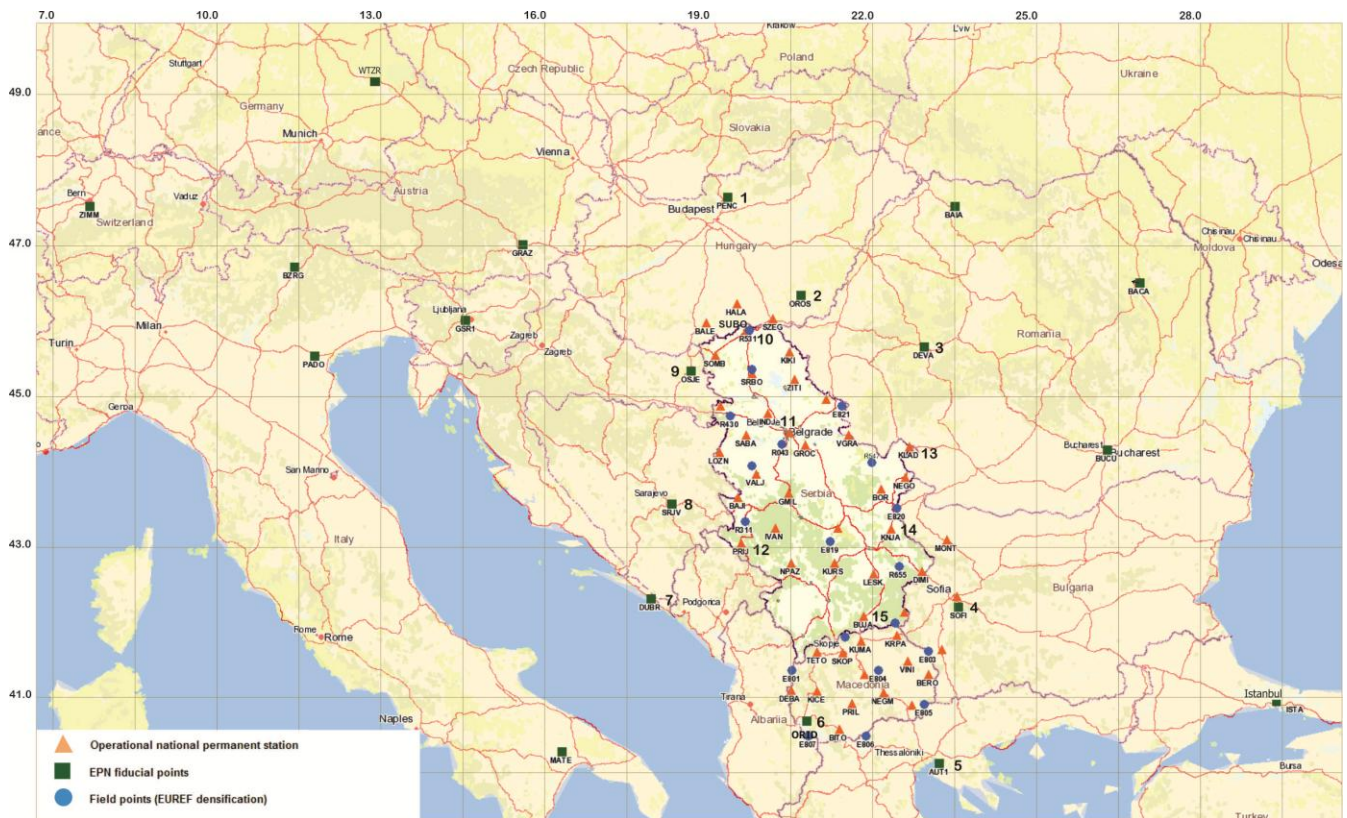
\mathbf{V}_r - локална (инкрементална) брзина.

Компонента \mathbf{V}_{ice} се може занемарити и узети да је једнака нули за станице које не припадају регионима Скандинавије. Непознати параметри \mathbf{X}_0 и \mathbf{V}_0 математичког модела ITRF (10.3) се оцењују по методи најмањих квадрата. Код изравнања и оцене непознатих параметара а посебно брзина, IERS оријентација треба да буде очувана у свим епохама, што значи да је потребно обезбедити поравнање у референтној епохи и обезбедити временску еволуцију увођењем услова No-Net-Rotation (стање без ротације) у односу на хоризонтално тектонско кретање на целој Земљи.

10.2.4 Избор станица референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB за одређивање деформација Земљине коре

За утврђивање критеријума за избор станица које ће се користити за одређивање крусталних деформација потребно је из изравнатих резултата мерења у оквиру GPS перманентне мреже Србије, добити што више информација уз оптималну покривеност области истраживања. Уз преглед опајачке историје и квалитета реализације решења положаја и брзина станица изражених у екстерном референтном оквиру ITRF2008 и оптималне диспозиције станица у области територије Србије извршен је избор станица.

Критеријуми за избор станица високог геодетског квалитета за рачунање крусталних деформација су усвојени у односу на критеријуме који се препоручују за избор станица које учествују за изражавање регионалних GPS мрежа у решењу глобалног референтног оквира ITRF, Altamimi, 2003.



Слика 10.19. Диспозиција станица за рачунање регионалних деформација.

У области Србије не постоји ни једна ITRF станица па је осигурање везе између ITRF и регионалног решења извршено избором ITRF станица које се налазе у суседним државама и које правилно окружују област Србије. Станице перманентне мреже Србије за рачунање деформација Земљине коре су изабране према следећим критеријумима:

- 1) Оптимална дистрибуција станица у оквиру GPS мреже Србије, односно покривеност целе области истраживања;
- 2) Опажачка историја од најмање 3 године;
- 3) Резидуали након коначног изравнања треба да буду мањи од 5 mm (евентуално 10 mm) за положаје и 3 mm/у за брзине за најмање 3 различита решења која учествују у коначном решењу реализације ITRF2008_SRB_UoB.

За одређивање геодетских деформација Земљине коре одабрано је девет EPN станица (истовремено ITRF) које се налазе у суседним државама Мађарској, Румунији, Бугарској, Грчкој, Македонији, Хрватској и Босни и Херцеговини и шест GPS перманентних станица које се налазе у Републици Србији са координатама и брзинама координата израженим у референтном оквиру ITRF2008 које испуњавају наведене критеријуме, тј. укупно 15 станица. Остале станице перманентне мреже Србије нису коришћене за рачунање деформација из разлога не испуњавања једног или више критеријума. Диспозиција тачака приказана је на слици 10.19 а листа станица дата је у табели 10.4.

Табела 10.4. Списак станица коришћених за истраживање деформација Земљине коре у области територије Србије.

Р.бр.	Станица	Држава	λ	φ	Плоча
1	PENC	EPN станица (Мађарска)	19.2815	47.7896	EURА
2	OROS	EPN станица (Мађарска)	20.6714	46.5552	EURА
3	DEVA	EPN станица (Румунија)	22.9135	45.8784	EURА
4	SOFI	EPN станица (Бугарска)	23.3947	42.5561	EURА
5	AUT1	EPN станица (Грчка)	23.0037	40.5668	EURА
6	ORID	EPN станица (Македонија)	20.7941	41.1273	EURА
7	DUBR	EPN станица (Хрватска)	18.1104	42.6500	EURА
8	SRJV	EPN станица (Б и Х)	18.4139	43.8679	EURА
9	OSJE	EPN станица (Хрватска)	18.6805	45.5608	EURА
10	SUBO	GPS перман. стан. (Србија)	19.6671	46.0995	EURА
11	BEOG	GPS перман. стан. (Србија)	20.4766	44.8055	EURА
12	PRIJ	GPS перман. стан. (Србија)	19.6425	43.3855	EURА
13	KLAD	GPS перман. стан. (Србија)	22.6129	44.6104	EURА
14	KNJA	GPS перман. стан. (Србија)	22.2553	43.5665	EURА
15	BUJA	GPS перман. стан. (Србија)	21.7662	42.4596	EURА

10.2.5 Рачунање локалних брзина станица

Као један од резултата изравнања за добијање решења терестричког референтног оквира ITRF2008 јесу полови ротације 15 тектонских плоча изведених на основу поља брзина срачунато на основу брзина 203 станице које испуњавају високе критеријуме тачности и имају дугу опажачку историју. Главни критеријуми избора станица су, Z. Altamimi at al., 2011:

- 1) формална грешка брзине треба да је мања од 0.5 mm/у и
- 2) резидуали брзина након изравнања за сваку станицу не би требало да пређу праг од 1.5 mm/у.

Пре оцене параметара полова ротације оцењен је утицај корекције која се односи на ефекте нехоризонталних дејстава ледника, односно тзв. PGR феномена (Post Glacial Rebound phenomen). Математички модел за оцену угаоне брзине плоча који повезује Ојлеровог вектор ω_p и брзину тачке \dot{X}_i која има вектор положаја X_i и налази се на плочи р изражава се следећом једначином, Altamimi at al., 2011:

$$\dot{X}_i = \omega_p \times X_i \quad (10.5)$$

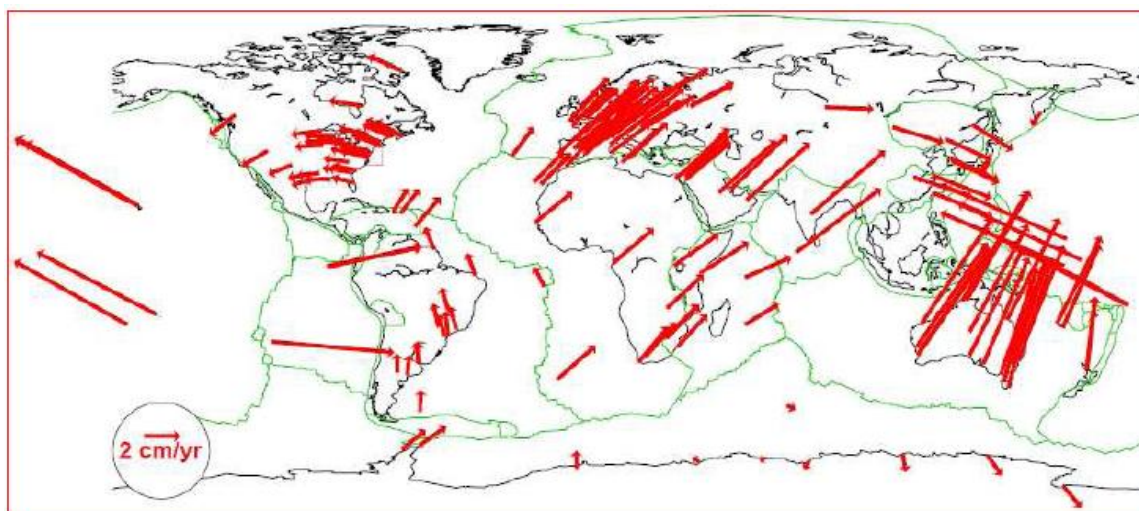
Ефекти дејства ледника или PGR феномени су највећи у Северној Еврозији, Северној Америци и Антарктику, тако да су хоризонталне брзине станица на овим плочама кориговане помоћу PGR модела предикције, Peltier, 2004. У Табели 10.5 су приказане угловне брзине за ове три плоче: ANTA (Антарктик), EURА (Еврозија) и NOAM (Северна Америка) када су корекције због ефеката дејства ледника примењене (PGR-Y) и у случају када корекције нису примењене на хоризонталне брзине станица (PGR-N) које припадају овим плочама.

Табела 10.5. Апсолутни полови ротације три плоче са и без PGR корекција.

Плоча	Бр. ст.	ω_x	ω_y	ω_z	ω	WRMS [mm/y]	
						E	N
		mas/y			°/m. y		
ANTA-PGR-N	10	-0.230	-0.320	0.670	0.216	0.79	0.48
±		0.023	0.024	0.015	0.004		
ANTA-PGR-Y	10	-0.223	-0.330	0.671	0.217	0.87	0.70
±		0.027	0.028	0.017	0.005		
EURА-PGR-N	94	-0.096	-0.537	0.757	0.259	0.56	0.50
±		0.010	0.010	0.007	0.003		
EURА-PGR-Y	94	-0.105	-0.524	0.758	0.258	0.46	0.44
±		0.008	0.008	0.006	0.002		
EURА-PGR-N	56	-0.084	-0.531	0.764	0.259	0.27	0.27
±		0.006	0.006	0.005	0.002		
EURА-PGR-Y	56	-0.085	-0.514	0.775	0.259	0.26	0.27
±		0.006	0.006	0.005	0.002		
NOAM-PGR-N	74	0.047	-0.676	-0.061	0.189	0.46	0.74
±		0.011	0.009	0.009	0.003		
NOAM-PGR-Y	74	0.063	-0.682	-0.059	0.191	0.53	0.93
±		0.011	0.009	0.009	0.003		
NOAM-PGR-N	38	0.034	-0.667	-0.078	0.187	0.21	0.34
±		0.006	0.005	0.005	0.001		
NOAM-PGR-Y	38	0.042	-0.679	-0.073	0.190	0.31	0.43
±		0.007	0.006	0.006	0.002		

За одређивање хоризонтаних брзина станица које припадају Евроазијској плочи истражен је утицај пост ледничког дејства на основу чега су дате одређене препоруке. Када се користе 94 станице Евроазијске плоче и примени PGR модел добијају се боље оцене изравнања у односу на оцене ако се модел не примењује. У случају када се користи 56 станица, искључујући станице које се налазе у области Скандинавије, добијају се исти резултати у оба случаја и ако се примени модел корекције или не (табела 10.5). Према томе, примена PGR модела ће имати ефикасне резултате у регионима Скандинавије.

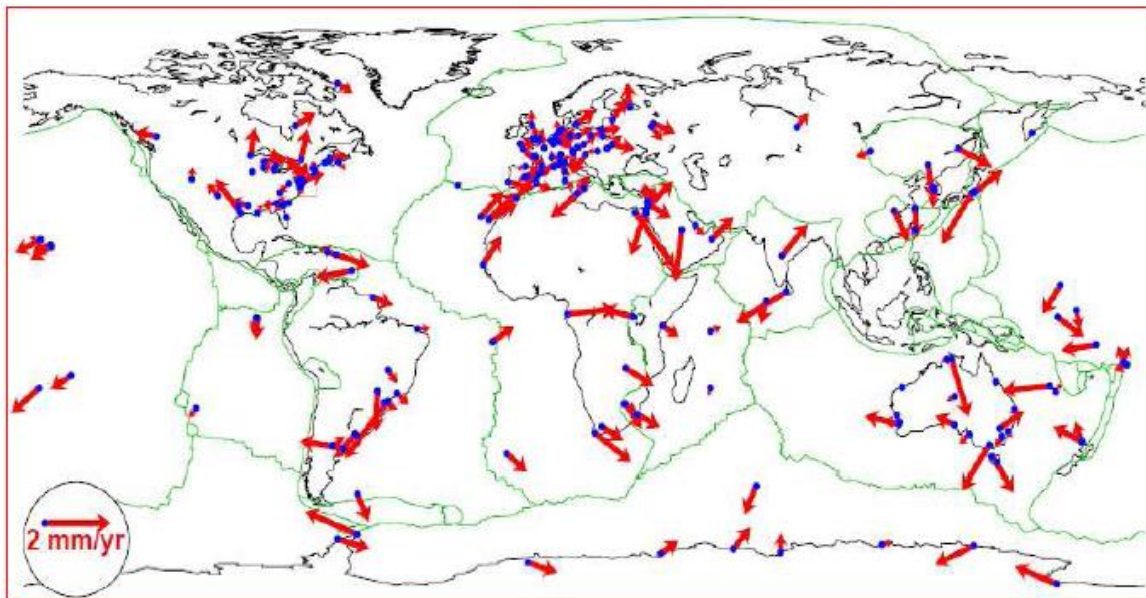
На основу тога препорука је да се у регионима ван Скандинавије Евроазијске плоче не примењује PGR модел корекција и да се станице које се налазе у регионима Скандинавије не користе у оценама хоризонтаних брзина других региона, Altamimi et al., 2011.



Слика 10.20. Хоризонталне брзине 203 станице за оцену ITRF2008 PMM.

На основу 56 брзина станица Евроазијске плоче за које је усвојени праг резидуала након изравњања 0.7 mm/yr, за које није примењен модел PGR корекција, глобалне WRMS вредности оцена износе 0.27 mm/yr за источну и северну компоненту брзине. Оцењене вредности компоненти Ојлеровог вектора ротације Евроазијске плоче на основу 56 станица коришћене за рачунање локалних брзина станица у области Србије износе: $\omega_x = -0.084 \pm 0.006$ mas/y, $\omega_y = -0.531 \pm 0.006$ mas/y, $\omega_z = 0.764 \pm 0.005$ mas/y (табела 10.5).

На слици 10.20 је приказана глобална дистрибуција укупно 203 станице чије су брзине коришћене у изравњању модела кретања плоча ITRF2008 (ITRF2008 Plate Motion Model, ITRF2008 PMM), а на слици 10.21 су приказане вредности резидуала брзина станица после изравњања које не прелазе праг од 1.5 mm/yr појединачно за 56 станица Евроазијске плоче. Обе слике су преузете из референтних радова за оцену ITRF2008 PMM, Altamimi et al., 2011.



Слика 10.21. Резидуали брзина станица након изравњања ITRF2008 PMM.

Девет станица ITRF2008 (истовремено станице европске перманентне мреже) које се налазе у суседним државама Србије које су укључене у оцену компоненти вектора ротације Евроазијске плоче су: PENC и OROS у Мађарској, DEVA у Румунији, SOFI у Бугарској, AUT1 у Грчкој, ORID у Македонији, DUBR и OSJE у Хрватској и SRJV у Босни и Херцеговини.

За одређивање брзине деформације Земљине коре потребне су брзине \mathbf{V}_0 које се одређују из оцењеног модела брзина ITRF2008. Брзине \mathbf{V}_0 се затим конвертују у локалне брзине \mathbf{V}_r у односу на Евроазијску фиксну плочу на тај начин што се одузиме круто кретање Евроазијске плоче које је обрачунато вектором угаоне брзине ω Евроазијске плоче у ITRF2008 апсолутном моделу кретања плоча, односно:

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{V}_0 - \mathbf{V}_{\text{plate}} = \mathbf{V}_0 - \omega \times \mathbf{X} = \begin{bmatrix} V_{X0} \\ V_{Y0} \\ V_{Z0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & Z & -Y \\ -Z & 0 & X \\ Y & -X & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (10.6)$$

За рачунање дводимензионалних крусталних деформација потребне су хоризонталне локалне брзине односно брзине на Земљиној површини. Како су локалне брзине одређене једначином (10.6) релативно малих интензитета, хоризонталне брзине се могу срачунати применом једначине трансформације из глобалног геоцентричног правоуглог координатног система у локални геодетски систем, Seeber 2003:

$$\begin{bmatrix} V_{Er} \\ V_{Nr} \\ V_{Ur} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin L & \cos L & 0 \\ -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Xr} \\ V_{Yr} \\ V_{Zr} \end{bmatrix} \quad (10.7)$$

при чему су B и L геодетске елипсоидне координате појединачне станице конвертоване из глобалних Декартових координатама станица X , Y и Z у односу на референтни елипсоид GRS80.

Локални геодетски систем је дефинисан као топоцентрични систем са почетком у тачки T и осама E , N , и U које граде десно оријентисани координатни систем. E оса је усмерена према геодетском истоку, N оса је усмерена према геодетском северу и U оса је спољашња нормала на елипсоид која пролази кроз почетак топоцентричног система T , Vanicek and Krakiwsky, 1986.

Хоризонталне или површинске брзине су прва два елемента V_E и V_N из једначине 10.7. На основу процедуре дате једначинама (10.6) и (10.7) могу се израчунати хоризонталне локалне брзине сваке ITRF реализације у односу на "фиксни" модел кретања Евроазијске плоче. Ове локалне брзине станица се користе за рачунање брзине деформације Земљине коре области истраживања којој припадају.

10.3 Тензор геодетских брзина деформације

На основу хоризонталних локалних брзина у референтном оквиру ITRF2008_SRB_UoB на изабраним станицама у области територије Републике Србије могу се израчунати компоненте дводимензионалног тензора брзине деформације. Изабране геодетске станице које представљају темена конвексних полигона (троуглова) преко својих хоризонталних брзина користе се за оцену тензора брзине деформација сваког полигона. Ако је познат вектор хоризонталне локалне брзине темена полигона i $[V_{E_i} \ V_{N_i}]^T$ у правцу истока и севера у локалном геодетском координатном систему онда важи следећа једначина, Devoti et al. 2002b:

$$\begin{bmatrix} V_{E_i} \\ V_{N_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{E_M} \\ V_{N_M} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial V_E}{\partial E} & \frac{\partial V_E}{\partial N} \\ \frac{\partial V_N}{\partial E} & \frac{\partial V_N}{\partial N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_i \\ \Delta N_i \end{bmatrix}$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{V}_{EN_i} = \mathbf{V}_{EN_M} + \mathbf{L} \Delta \mathbf{X}_{EN} \quad (10.8)$$

при чему је:

$[V_{E_M} \ V_{N_M}]^T$ - вектор непознатих брзина унутрашње референтне тачке полигона M ,

\mathbf{L} - градијент тензора брзине,

$[\Delta E_i \ \Delta N_i]^T$ - вектор координатних разлика дужина лука паралеле и дужина лука меридијана између станице i и референтне тачке M .

За инфинезималну вредност брзине деформације тензор брзине деформације се рачуна према следећој једначини: $\mathbf{T} = (\mathbf{L} + \mathbf{L}^T)/2$ и тензор брзине ротације према једначини: $\mathbf{R} = (\mathbf{L} - \mathbf{L}^T)/2$, Dermanis and Livieratos 1983.

Једначина (10.8) претпоставља линеарну варијацију компоненти брзина у односу на координатне разлике дужина лука паралеле и дужина лука меридијана. Линеарност важи када су полигони правилно одабрани не само у смислу области коју обухватају већ и очекиваног тектонског понашања области полигона. Претпоставка о константности просторних градијената је апроксимација првог реда основног тектонског понашања.

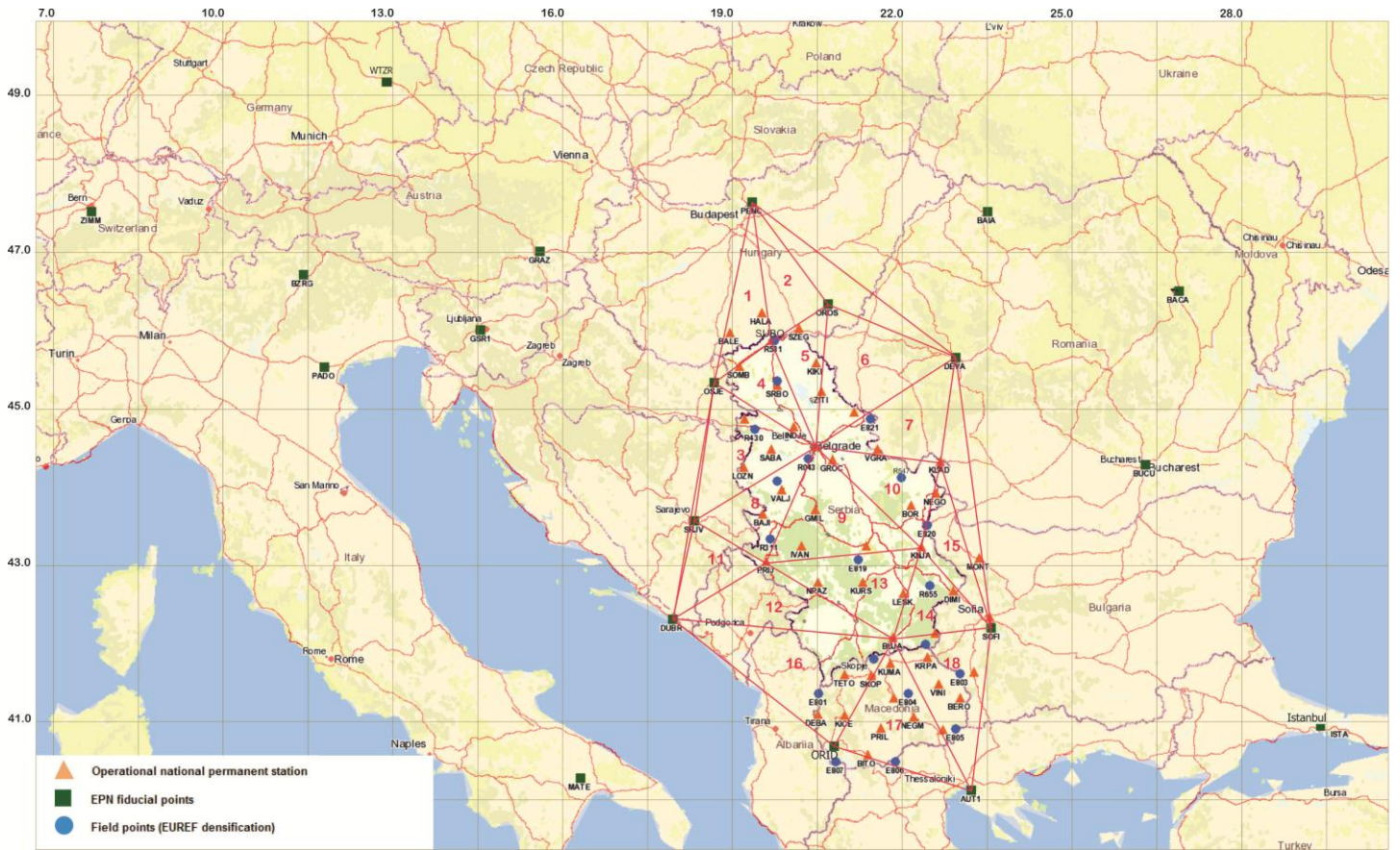
Како је континуирано поље брзина \mathbf{V}_r непознато, односно познате су вредности само у дискретним тачкама i , потребно је користити интерполациони метод за добијање поља брзина \mathbf{V}_r у било којој другој тачки области истраживања.

У том циљу примењен је метод коначних елемената за извођење линеарне интерполације троуглова који су оптимално генерисани методом Delaunay триангулације између одабраних петнаест станица које су претходно испуниле критеријуме геодетског квалитета. За оптимално генерисање мреже троуглова поштована су правила Delaunay триангулације, Delaunay, 1934:

- 1) У једном троуглу ни једна страница не сече страницу другог троугла.
- 2) Темена једног троугла нису садржана у описаном кругу било ког другог троугла.

Мрежа Delaunay триангулације са 15 изабраних станица која покрива област територије Србије, сачињена је од 21 троугла од којих је 18 троуглова целом површином или једним делом у области Србије док су три троугла изван ове области, слика 10.22. За сваки троугао изабрано је тежиште као референтна тачка за коју се директним начином може срачунати градијент тензора брзина. На основу три вектора брзина темена троугла - чворова елемента, проблем се решава инвертовањем система линеарних једначина са шест непознатих, чиме се добијају четири непознате компоненте тензора брзина и две компоненте брзине тежишта троугла:

$$\begin{bmatrix} V_{E_1} \\ V_{N_1} \\ V_{E_2} \\ V_{N_2} \\ V_{E_3} \\ V_{N_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta E_1 & \Delta N_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta E_1 & \Delta N_1 \\ 1 & 0 & \Delta E_2 & \Delta N_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta E_2 & \Delta N_2 \\ 1 & 0 & \Delta E_3 & \Delta N_3 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta E_3 & \Delta N_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{E_M} \\ V_{N_M} \\ \frac{\partial V_E}{\partial E} \\ \frac{\partial V_E}{\partial N} \\ \frac{\partial V_N}{\partial E} \\ \frac{\partial V_N}{\partial N} \end{bmatrix} \quad (10.9)$$



Слика 10.22. Мрежа Delaunay триангулације за област територије Србије.

Решење тензора брзина на овај начин први су предложили Terada and Miyabe, 1929. Из градијента тензора брзина изводи се симетрични тензор брзине деформација \mathbf{T} и антисиметрични тензор брзине ротације \mathbf{R} у тежишту Delaunay троуглова мреже, односно:

$$\mathbf{T} = \frac{1}{2}(\mathbf{L} + \mathbf{L}^T) = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_E}{\partial E} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_E}{\partial N} + \frac{\partial V_N}{\partial E} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_N}{\partial E} + \frac{\partial V_E}{\partial N} \right) & \frac{\partial V_N}{\partial N} \end{bmatrix} \quad (10.10)$$

$$\mathbf{R} = \frac{1}{2}(\mathbf{L} - \mathbf{L}^T) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_E}{\partial N} - \frac{\partial V_N}{\partial E} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_N}{\partial E} - \frac{\partial V_E}{\partial N} \right) & 0 \end{bmatrix} \quad (10.11)$$

На основу претходних једначина могу се израчунати геодетске брзине деформација сваког Delaunay троугла и одредити компоненте главних вредности и главних праваца заједно са максималном брзином смицања $\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2$ и другом инваријантом брзине деформације $\sqrt{\dot{\epsilon}_1^2 + \dot{\epsilon}_2^2}$.

10.4 Резултати геодетских хоризонталних брзина деформације

Хоризонталне апсолутне брзине станица и хоризонталне локалне брзине станица мреже Delaunay-еве триангулације Србије у односу на "фиксни" модел кретања Евроазијске плоче референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB приказане су у табели 10.6.

Табела 10.6. Хоризонталне брзине станица Delaunay триангулације ITRF2008_SRB_UoB.

Редни број	Станица	Брзина [mm/y]		Локална брзина [mm/y]	
		Е	Н	Е	Н
1	PENC	22.527	14.606	0.821	-0.009
2	OROS	23.172	14.805	0.955	0.384
3	DEVA	22.911	13.853	0.160	-0.236
4	SOFI	24.261	11.846	0.837	-2.173
5	AUT1	25.418	6.962	1.748	-7.117
6	ORID	24.820	11.738	1.594	-2.670
7	DUBR	22.651	17.625	0.143	2.848
8	SRJV	23.518	15.281	1.181	0.545
9	OSJE	23.454	15.252	1.400	0.554
10	SUBO	23.380	14.870	1.254	0.307
11	BEOG	24.011	14.968	1.487	-1.601
12	PRIJ	23.628	15.797	0.987	1.228
13	KLAD	23.694	13.489	0.761	-0.646
14	KNJA	24.434	13.167	1.376	-1.023
15	BUJA	24.740	12.270	1.574	-1.995

Према једначини 10.9 на основу три вектора брзина темена сваког троугла срачунате су четири непознате компоненте тензора брзина деформације и две компоненте брзине тежишта троуглова. На основу елемената симетричног тензора брзине деформација \mathbf{T} , примењујући једначину 10.10, рачунају се параметри брзине деформације у тежишту Delaunay-евих троуглова мреже:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_E}{\partial E} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_E}{\partial N} + \frac{\partial V_N}{\partial E} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_N}{\partial E} + \frac{\partial V_E}{\partial N} \right) & \frac{\partial V_N}{\partial N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \frac{1}{2} \left(t_{11} + t_{22} + \sqrt{(t_{11} - t_{22})^2 + 4t_{12}^2} \right) \\ \dot{\epsilon}_2 &= \frac{1}{2} \left(t_{11} + t_{22} - \sqrt{(t_{11} - t_{22})^2 + 4t_{12}^2} \right) \\ \theta &= \frac{1}{2} \arctan(2t_{12}/(t_{11} - t_{22})), \quad \theta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right] \end{aligned} \quad (10.12)$$

18 троуглова који чине мрежу Delaunay-еве триангулације Србије са теменима изабраних станица, приказани су у табели 10.7 са вредностима В и L геодетских елипсоидних координата тежишта троуглова и две компоненте брзине тежишта троуглова.

Табела 10.7. Delaunay-еви троуглови, координате и брзине тежишта.

Троугао	L	B	Брзина [mm/y]	
			E	N
1. OSJE - PENC - SUBO	19.2097	46.4833	1.157	0.283
2. SUBO - PENC - OROS	19.8733	46.8148	1.007	0.367
3. SRJV - OSJE - BEOG	19.1903	44.7447	1.071	2.860
4. OSJE - SUBO - BEOG	19.6081	45.4886	1.380	-0.247
5. SUBO - OROS - BEOG	20.2717	45.8201	1.230	-0.303
6. BEOG - OROS - DEVA	21.3538	45.7464	0.867	-0.487
7. BEOG - DEVA - KLAD	22.0010	45.0981	0.877	-0.895
8. SRJV - BEOG - PRIJ	19.5110	44.0196	1.300	-0.910
9. PRIJ - BEOG - KNJA	20.7915	43.9192	1.287	-0.463
10. BEOG - KLAD - KNJA	21.7816	44.3275	1.165	-1.050
11. DUBR - SRJV - PRIJ	18.7223	43.3011	0.770	1.540
12. DUBR - PRIJ - BUJA	19.8397	42.8317	0.900	0.697
13. PRIJ - KNJA - BUJA	21.2213	43.1372	1.313	-0.593
14. BUJA - KNJA - SOFI	22.4721	42.8607	1.263	-1.727
15. KNJA - KLAD - SOFI	22.7543	43.5777	0.993	-1.280
16. DUBR - BUJA - ORID	20.2236	42.0790	1.100	-0.603
17. ORID - BUJA - AUT1	21.8547	41.3846	1.637	-3.927
18. BUJA - SOFI - AUT1	22.7215	41.8608	1.387	-3.760

Главне вредности брзине деформација, максимална брзина деформације смицања и друга инваријанта брзине деформације Delaunay-евих троуглова приказани су у табели 10.8.

Табела 10.8. Параметри брзине деформације троуглова за област истраживања.

Компон. тензора брзине деформ. [ηstrain/y]			Главне вредности [ηstrain/y] [°]			Макс. брз.смиц. [ηstrain/y]	Друга инвар. [ηstrain/y]
t ₁₁	t ₁₂	t ₂₂	ε ₁	ε ₂	α ₁	ε ₁ – ε ₂	(ε ₁ ² + ε ₂ ²) ^{1/2}
Троугао 1: OSJE - PENC -SUBO							
-1.6264	0.2232	1.3387	1.355	-1.643	-4.2809	2.998	2.130
Троугао 2: SUBO - PENC - OROS							
-0.0726	-1.0571	-1.0754	0.596	-1.744	-32.3124	2.340	1.843
Троугао 3: SRJV - OSJE - BEOG							
1.6845	-7.2973	-9.9750	5.195	-13.485	-25.6895	18.680	14.451
Троугао 4: OSJE - SUBO - BEOG							
-0.2318	3.8729	0.5025	4.026	-3.755	-42.2920	7.781	5.505
Троугао 5: SUBO - OROS - BEOG							
-0.4992	4.4790	-4.3428	2.453	-7.295	33.3888	9.748	7.696
Троугао 6: BEOG - OROS - DEVA							
1.2590	2.3778	-5.9106	1.976	-6.628	16.7784	8.604	6.916
Троугао 7: BEOG - DEVA - KLAD							
0.0279	2.2280	-4.4988	0.940	-5.411	22.2750	6.351	5.492
Троугао 8: SRJV - BEOG - PRIJ							
1.4601	-6.6981	11.0287	14.476	-1.987	27.2314	16.463	14.611
Троугао 9: PRIJ - BEOG - KNJA							
-0.1992	-0.2695	10.0062	10.013	-0.206	1.5117	10.220	10.015
Троугао 10: BEOG - KLAD - KNJA							
1.0839	0.5268	-2.7422	1.155	-2.813	7.6985	3.968	3.041
Троугао 11: DUBR - SRJV - PRIJ							
1.0702	-4.0637	10.4731	11.986	-0.443	20.419	12.429	11.994
Троугао 12: DUBR - PRIJ - BUJA							
-1.9235	0.9570	11.3319	11.401	-1.992	-4.1080	13.393	11.573
Троугао 13: PRIJ - KNJA - BUJA							
-1.1093	3.0874	0.7149	3.022	-3.417	-36.7705	6.439	4.561

Троугао 14: BUJA - KNJA - SOFI							
2.2489	2.0709	-3.3078	2.936	-3.995	18.3498	6.930	4.958
Троугао 15: KNJA - KLAD - SOFI							
3.1941	4.5743	-0.1274	6.400	-3.333	35.0229	9.733	7.216
Троугао 16: DUBR - BUJA - ORID							
-2.4344	3.6288	3.0459	4.853	-4.241	-26.4715	9.094	6.445
Троугао 17: ORID - BUJA - AUT1							
-0.4566	6.4004	-0.8446	5.753	-7.054	44.1321	12.807	9.102
Троугао 18: BUJA - SOFI - AUT1							
0.8761	6.3098	-9.2168	3.909	-12.250	25.6739	16.159	12.859

10.5 Анализа и интерпретација резултата геодетских хоризонталних брзина деформације

Интерпретација геодетске брзине деформација произилази из главних вредности брзине деформација и максималне брзине деформације смицања у области истраживања и упоређења ових вредности са геодинамичким понашањем ове области.

Изглед главних вредности хоризонталних брзина деформације (сопствених вредности и сопствених праваца тензора брзине деформације) 18 Delaunay-евих троуглова и локалних брзина одабраних станица референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB у области истраживања приказан је на сликама 10.26-10.34. У тежиштима троуглова приказане су следеће вредности брзина деформација: екстензија је представљена симетричним стрелицама усмереним споља (плава боја), компресија симетричним стрелицама усмереним ка унутра (црвена боја) и максимална брзина смицања линијама (црна боја). Хоризонталне локалне брзине су представљене појединачним стрелицама на свакој изабраној станици.

10.5.1 Локалне брзине EPN станица

Хоризонтална кретања одабраних станица у односу на евроазијску фиксну плочу могу пружити значајне информације о геодинамичким процесима регионалног карактера.

Изабране четири EPN станице PENC у Мађарској, OROS у Мађарској, OSJE у Хрватској и SRJV у Босни и Херцеговини имају локалне брзине у ITRF2008_SRB_UoB референтном оквиру испод нивоа од 1.5 mm/y у смеру W-NE што указује да припадају "стабилној" Европској плочи, слика 10.23.

EPN станице DUBR у Хрватској и MATE у Италији (није коришћена за рачунање брзине деформације) приказују кретања у односу на стабилну Европску плочу испод нивоа од 3.0 mm/y у смеру приближно југ-север. Ове вредности локалних брзина одражавају чињеницу да се кретања ових станица не слажу са моделом NNR-

NUVEL-1A. Објашњење оваквог кретања је да се ове две станице налазе у граничној зони између плоча Евроазије и Африке.

EPN станица DEVA у Румунији креће се релативно малом брзином од 0.3 mm/y у смеру N-SE. Положај ове станице припада тектонским структурама Карпато - Балканида.

Три EPN станице које се налазе у јужном делу региона истраживања: SOFI у Бугарској, ORID у БЈР Македонији и AUT1 у Грчкој, показују приближно исти смер брзина, односно смер приближно север-југоисток и налазе се у распону од 2.3 mm/y станица SOFI, 3.1 mm/y станица ORID до 7.3 mm/y станица AUT1 (Tessaloniki) у Грчкој. Правац локалних брзина ових станица приказује кретање различито од модела NNR-NUVEL-1A. Станице се налазе у граничној зони између плоча Евроазије и Африке у близини Хеленског рова и под утицајем су северно Анатолијског раседног система, слике 10.6, 10.23.

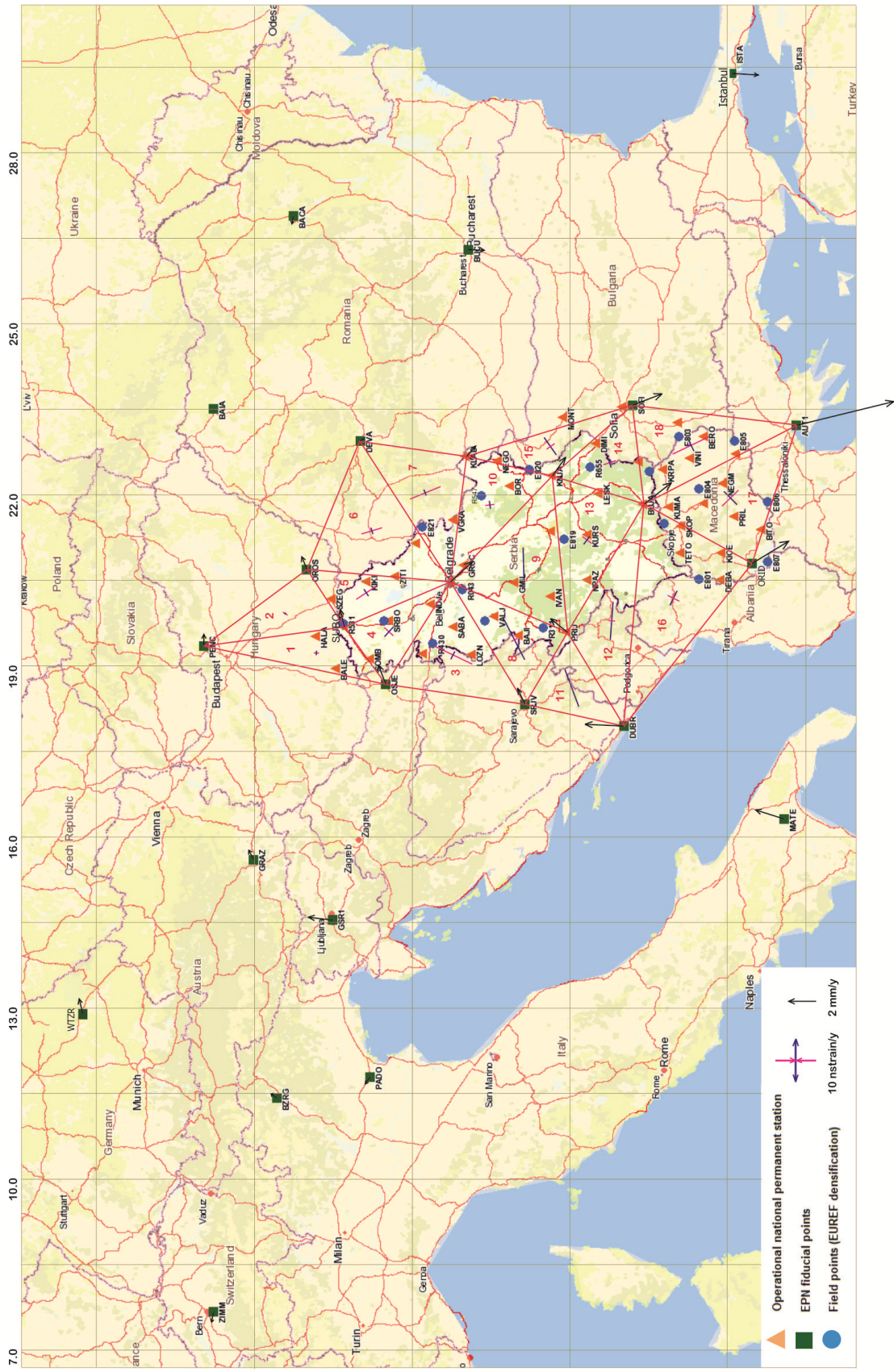
10.5.2 Локалне брзине GPS станица Србије

Станице GPS перманентне мреже Србије које испуњавају раније поменуте критеријуме изабране за одређивање брзине деформација Земљине коре према свом положају могу пружити значајне информације о геодинамичким процесима тектонских структура којима припадају, слике 10.6, 10.23.

Станица SUBO у северној области Србије има локалну брзину од 1.3 mm/y у смеру W-NE као и правци брзина четири EPN станице PENC, OROS, OSJE и SRJV које по својим карактеристикама припадају стабилној Европској плочи.

Четири GPS станице које припадају централној и југоисточној области Србије: BEOG са брзином од 2.2 mm/y, KLAD са брзином од 1.0 mm/y, KNJA са брзином од 1.7 mm/y и BUJA са брзином од 2.5 mm/y имају приближно смер север-југоисток као и EPN станице DEVA, SOFI, ORID и AUT1. По интензитету брзине су мање од брзина поменутих EPN станица док је правац локалних брзина ових станица као и код EPN станица различит од модела NNR-NUVEL-1A, слика 10.23.

GPS станица PRIJ која се налази у југозападној области Србије са интензитетом брзине од 1.6 mm/y има смер кретања приближно W-NE као и смер кретања EPN станица SRJV у Босни и Херцеговини и OSJE у Хрватској.



Слика 10.23. Локалне хоризонталне брзине станица Delaunay-евих троуглова.

10.5.3 Анализа брзина деформација Delaunay-евих троуглова

На основу добијених резултата брзина деформација, табела 10.8, Неотектонске карте Србије, слика 10.25 (Маровић и др., 2002), и визуелних приказа на сликама 10.26-10.34, може се извести закључак да магнитуда и правац брзина деформација у већини Delaunay-евих троуглова показује у великој мери сагласност са геолошким резултатима истраживања. Крусталне деформације области истраживања се карактеришу сложенем просторном расподелом компресионих и тензионих догађаја.

Троугао 1 - OSJE-PENC-SUBO (Osijek - Pencil - Subotica)

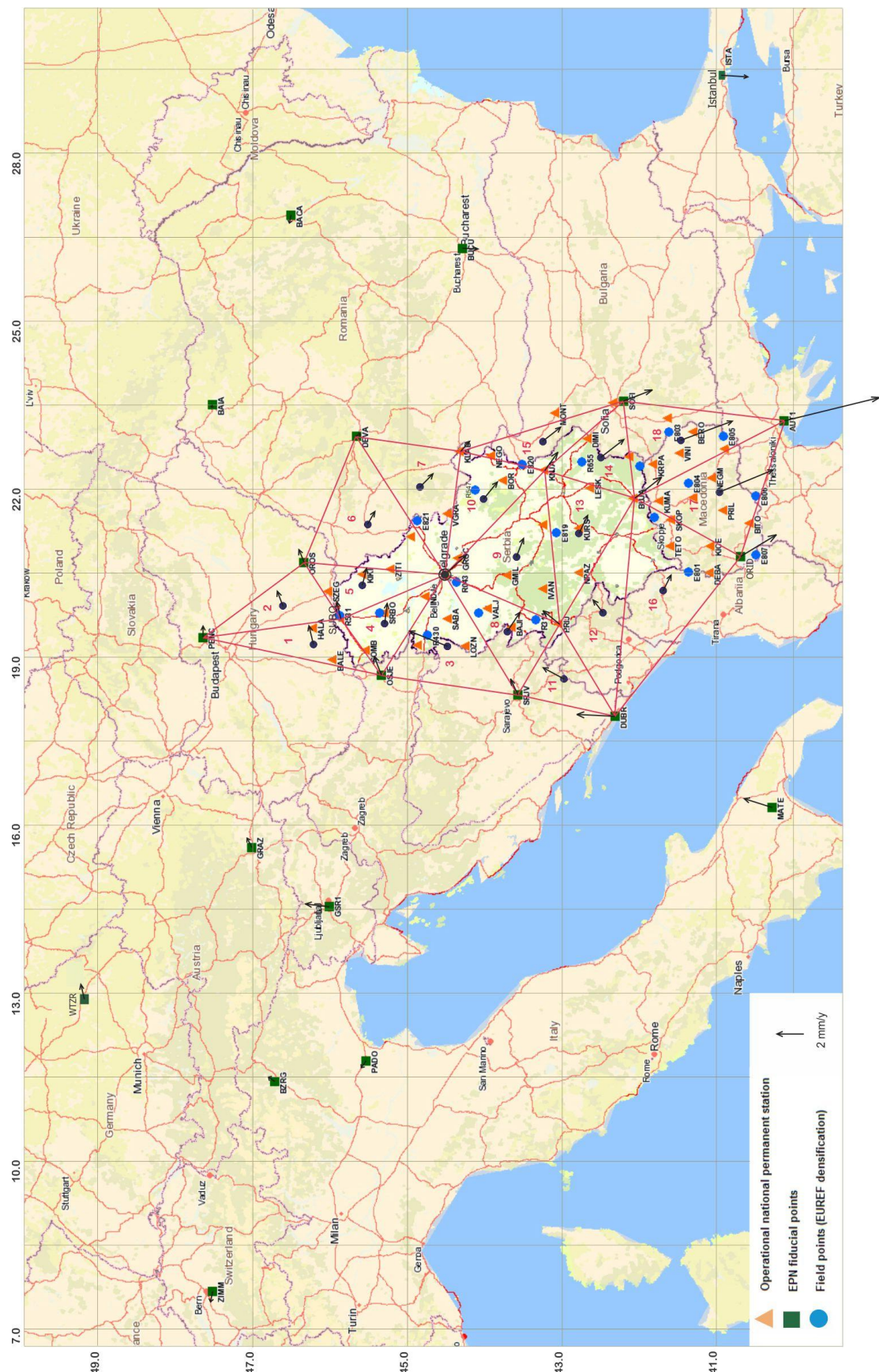
Тежиште троугла 1 OSJE-PENC-SUBO се налази северно од области испитивања у суседној држави Мађарској. Локална хоризонтална брзина тежишта троугла износи 1.2 mm/y у смеру W-NE, слика 10.24. Троугао 1 има приближно једнаке вредности брзина компресионих и екстензионих деформација које износе око 1.5 η strain/y. Максимална брзина деформације смицања износи 3.0 η strain/y, слика 10.23.

Троугао 2 - SUBO-PENC-OROS (Subotica - Pencil - Oroshaza)

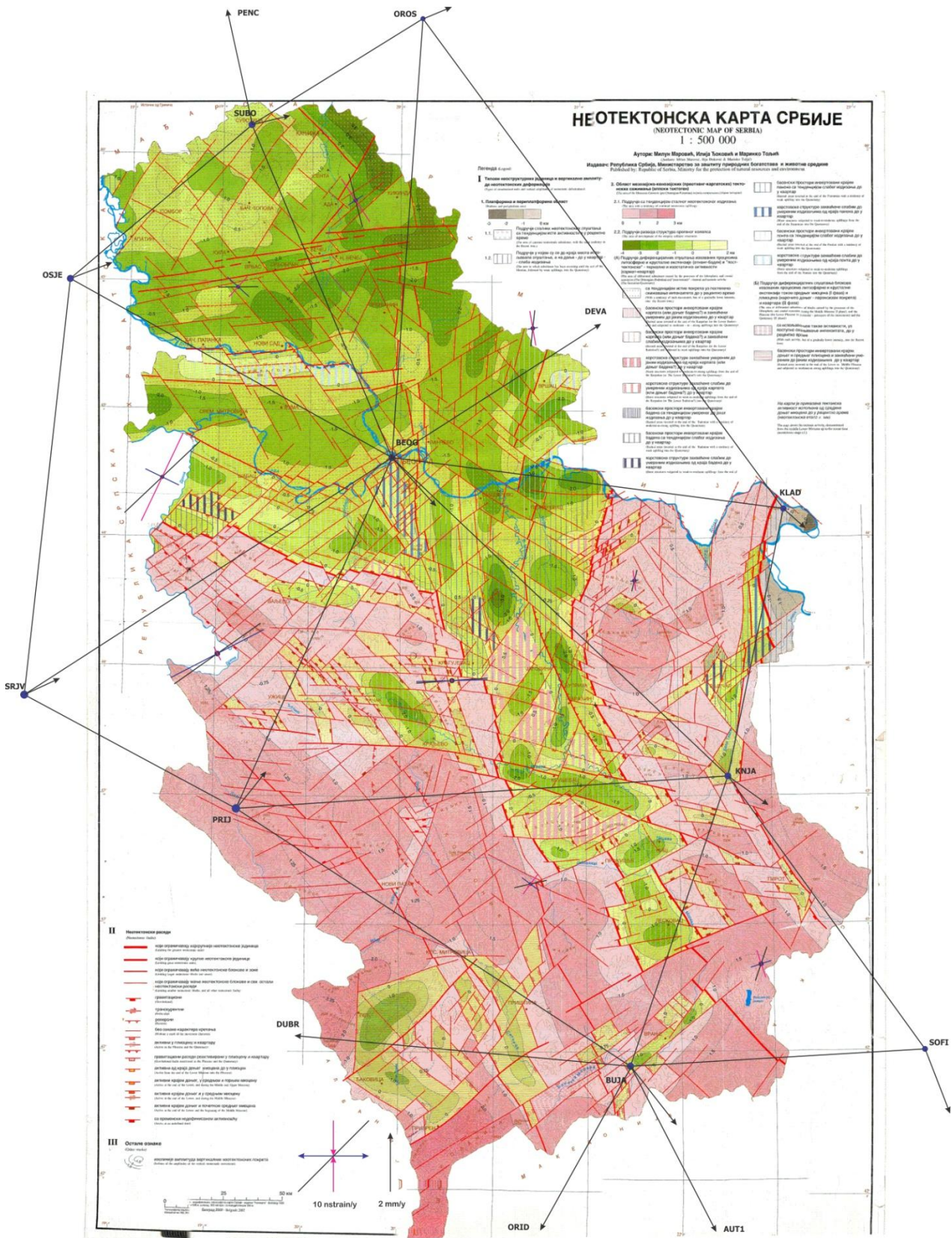
Тежиште троугла 2 SUBO-PENC-OROS такође се налази у суседној држави Мађарској са локалном хоризонталном брзином од 1.1 mm/y у смеру W-NE, слика 10.24. Троугао 2 има приближно три пута већу брзину компресије која износи 1.7 η strain/y од брзине екстензије која износи 0.6 η strain/y и максималну брзину деформације смицања која износи 2.3 η strain/y, слика 10.23.

Троугао 3 - SRJV-OSJE-BEOG (Sarajevo - Osijek - Beograd)

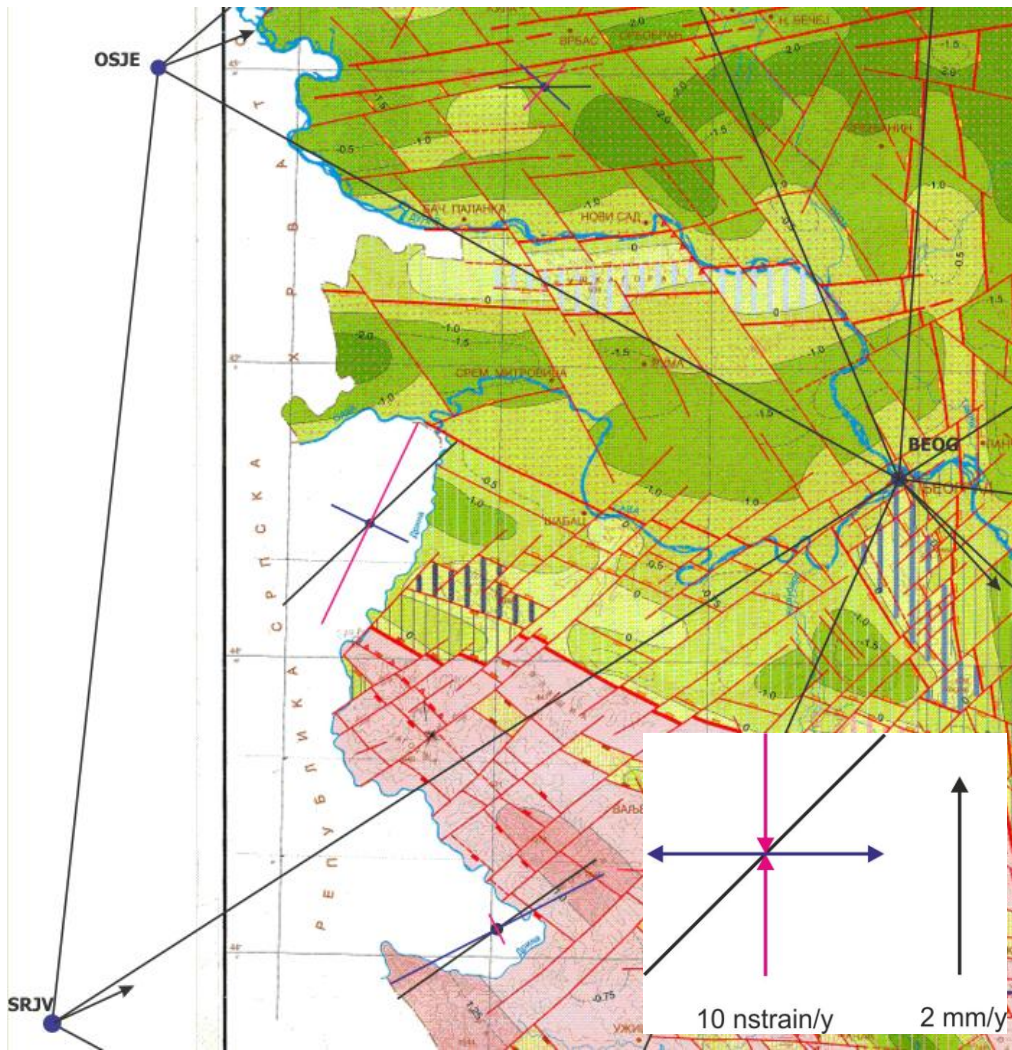
Тежиште троугла 3 SRJV-OSJE-BEOG се налази западно од испитиваног региона у суседној држави Босни и Херцеговини са локалном хоризонталном брзином од 3.0 mm/y у смеру SW-NE, слика 10.24. Троугао 3 има максималну брзину компресије у мрежи Delaunay-евих троуглова, која износи 13.5 η strain/y и брзину екстензије која износи 5.2 η strain/y. Максимална брзина деформације смицања износи 18.7 η strain/y. Максимална брзина деформације која износи 14.4 η strain/y је у правцу који је сагласан са геолошким подацима неотектонских раседа који ограничавају мање неотектонске блокове у граничној области са суседном државом Босном и Херцеговином, слика 10.26.



Слика 10.24. Мрежа троуглова са локалним хоризонталним брзинама тежишта троуглова.



Слика 10.25. Неотектонска карта Републике Србије са мрежом Delaney-евих троуглова.



Слика 10.26. Троугао 3 - SRJV-OSJE-BEOG (Sarajevo - Osijek - Beograd).

Троугао 4 - OSJE-SUBO-BEOG (Osijek - Subotica - Beograd)

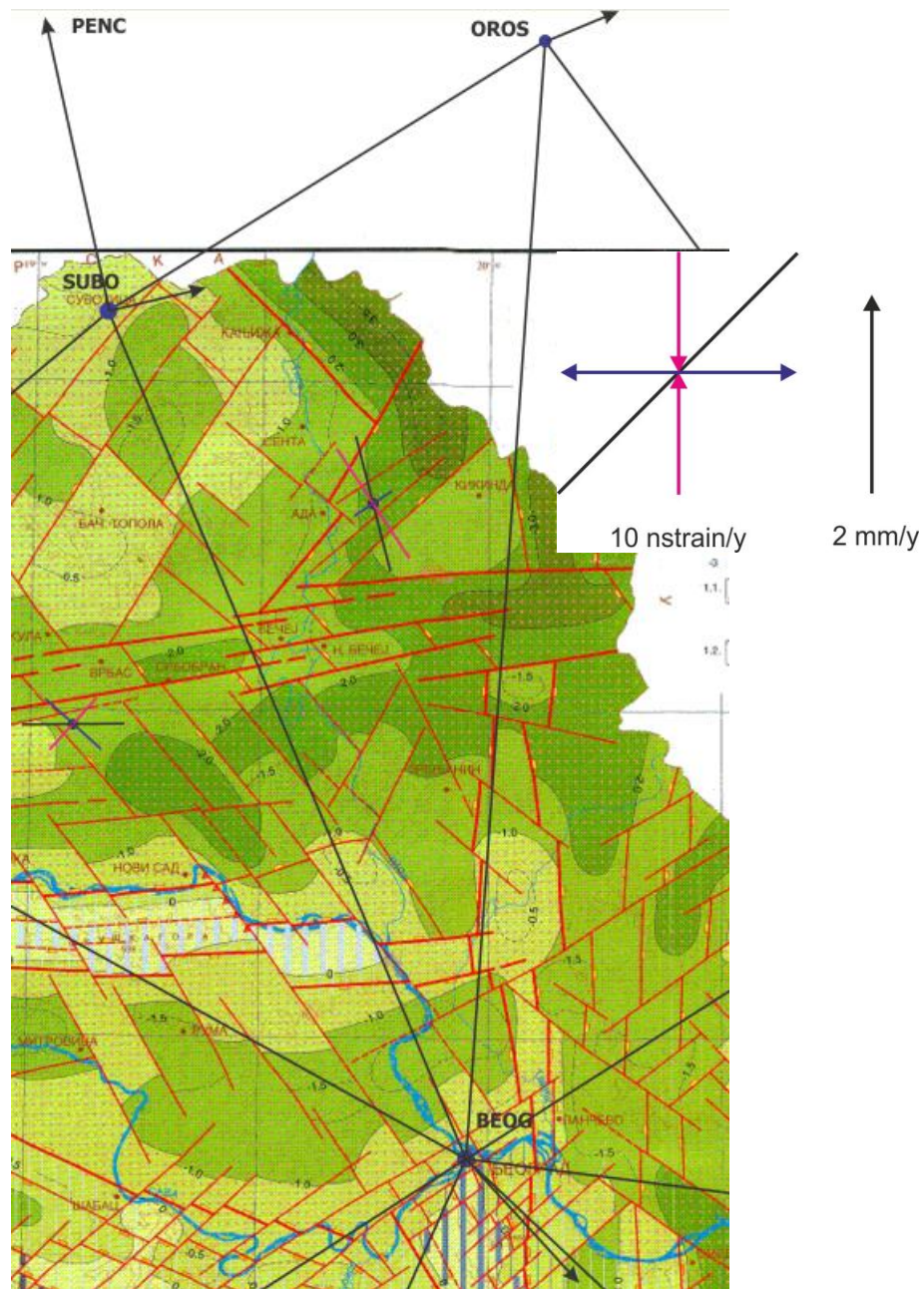
Тежиште троугла 4 OSJE-SUBO-BEOG се налази у северозападном делу Србије јужно од града Врбаса са локалном хоризонталном брзином од 1.4 mm/y у смеру приближно W-E, слика 10.24. Тежиште троугла 4 се налази у подручју развоја структура орогеног колапса. Троугао 4 има приближно једнаке вредности брзине компресионих и екстезионих деформација у износу од око 3.9 η strain/y. Максимална брзина смицања износи 7.8 η strain/y са правцем који је сагласан са геолошким подацима неотектонских раседа који ограничавају крупне неотектонске јединице у овој области, слика 10.27.



Слика 10.27. Троугао 4 - OSJE-SUBO-BEOG (Osijek - Subotica - Beograd).

Троугао 5 - SUBO-OROS-BEOG (Subotica - Oroshaza - Beograd)

Тежиште троугла 5 SUBO-OROS-BEOG се налази у североисточној области Србије источно од града Аде са локалном хоризонталном брзином од 1.3 mm/y у смеру приближно NW-SE, слика 10.24. Тежиште троугла 5 се налази у подручју развоја структура орогеног колапса. Троугао 5 карактерише троструко већа брзина компресионе деформације која износи 7.3 η strain/y од брзине екстензионе деформације која износи 2.4 η strain/y. Главни правци геодетских брзина компресије и екстензије су сагласни са геолошким подацима неотектонских раседа који ограничавају крупне неотектонске јединице и веће неотектонске блокове и зоне у овој области, слика 10.28. Максимална брзина смицања износи 9.7 η strain/y.



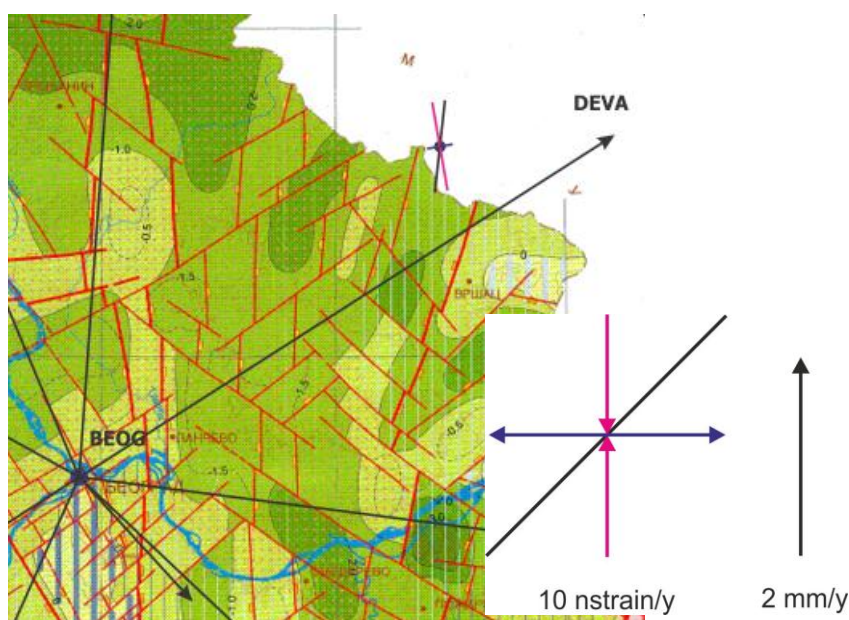
Слика 10.28. Троугао 5 - SUBO-OROS-BEOG (Subotica - Oroshaza - Beograd).

**Троугао 6 - BEOG-OROS-DEVA (Beograd - Oroshaza - Deva),
Троугао 7 - BEOG-DEVA-KLAD (Deva - Beograd - Kladovo)**

Троугао 6 BEOG-OROS-DEVA и троугао 7 BEOG-DEVA-KLAD обухватају део североисточне области Србије и имају тежишта у суседној држави Румунији. Карактеристичне вредности ових троуглова показују веће геодетске брзине компресије које по средњој вредности износе 6.0 η strain/y од геодетских брзина екстензије које по средњој вредности износе 1.4 η strain/y. Просечна максимална брзина смицања за ова два троугла износи 7.4 η strain/y.

Због упоређења са геолошким подацима на основу неотектонске карте Србије генерисан је нови троугао BEOG-OROS-KLAD чије се тежиште налази такође у

суседној држави Румунији али ближе граници са Србијом. Локална хоризонтална брзина тежишта износи 0.6 mm/y у смеру SW-NE, слика 10.24. Вредности брзина деформација овог троугла су: за компресију 4.9 η strain/y и за екстензију 1.4 η strain/y. Правац брзине максималне деформације је сагласан са правцем неотектонских раседа који ограничавају крупне неотектонске јединице у области Србије у близини границе са Румунијом, слика 10.29. Максимална брзина смицања износи 6.3 η strain/y.

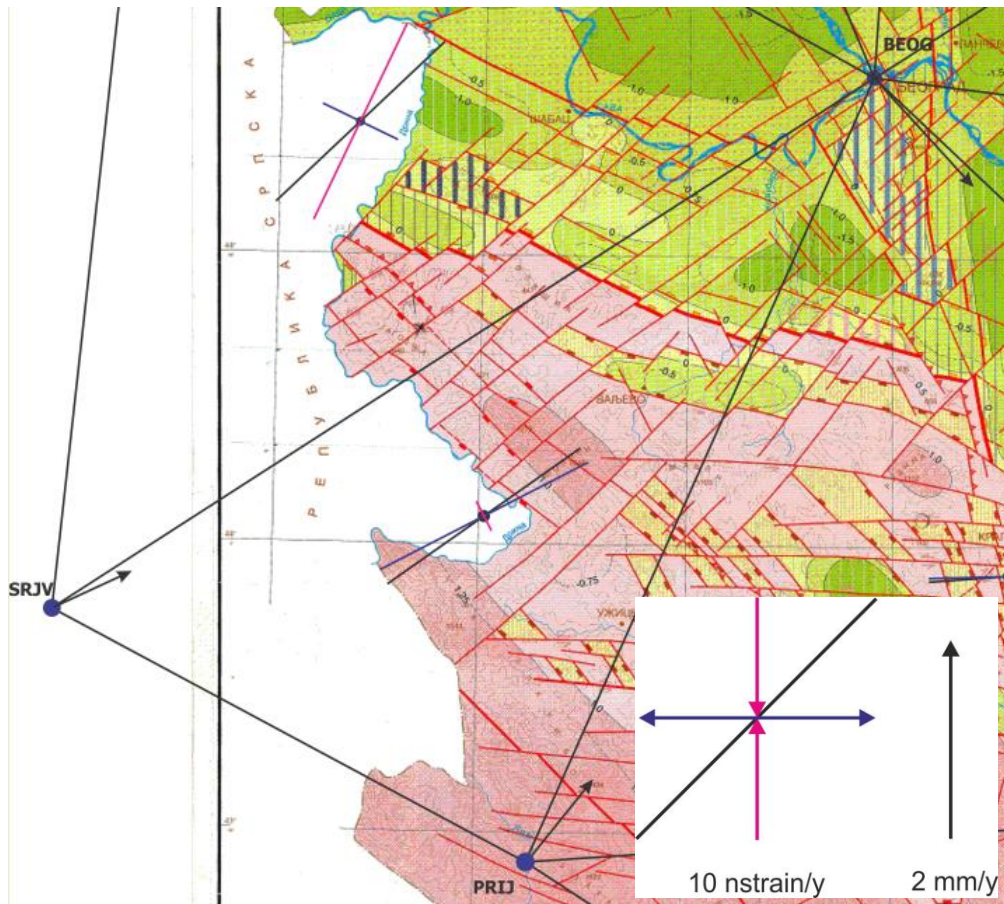


Слика 10.29. Троуглови 6 и 7. BEOG-OROS-KLAD (Beograd - Oroshaza - Kladovo).

Троугао 8 - SRJV-BEOG-PRIJ (Sarajevo - Beograd - Prijepolje)

Троугао 8 SRJV-BEOG-PRIJ обухвата део западне стране испитиване области са тежиштем у суседној држави Босни и Херцеговини. Локална хоризонтална брзина тежишта троугла износи 1.6 mm/y у смеру приближно NW-SE, слика 10.24. Брзина екстензионе деформације овог троугла има максималну вредност у оквиру испитиваних 18 Delaney-евих троуглава од 14.5 η strain/y и брзину компресионе деформације од 2.0 η strain/y. Брзина максималне деформације која износи 14.6 η strain/y има правац југозапад-североисток. Максимална брзина смицања износи 16.5 η strain/y у правцу који је сагласан са геолошким подацима неотектонских раседа који ограничавају веће неотектонске блокове и зоне у области Србије у близини границе са Босном и Херцеговином, слика 10.30.

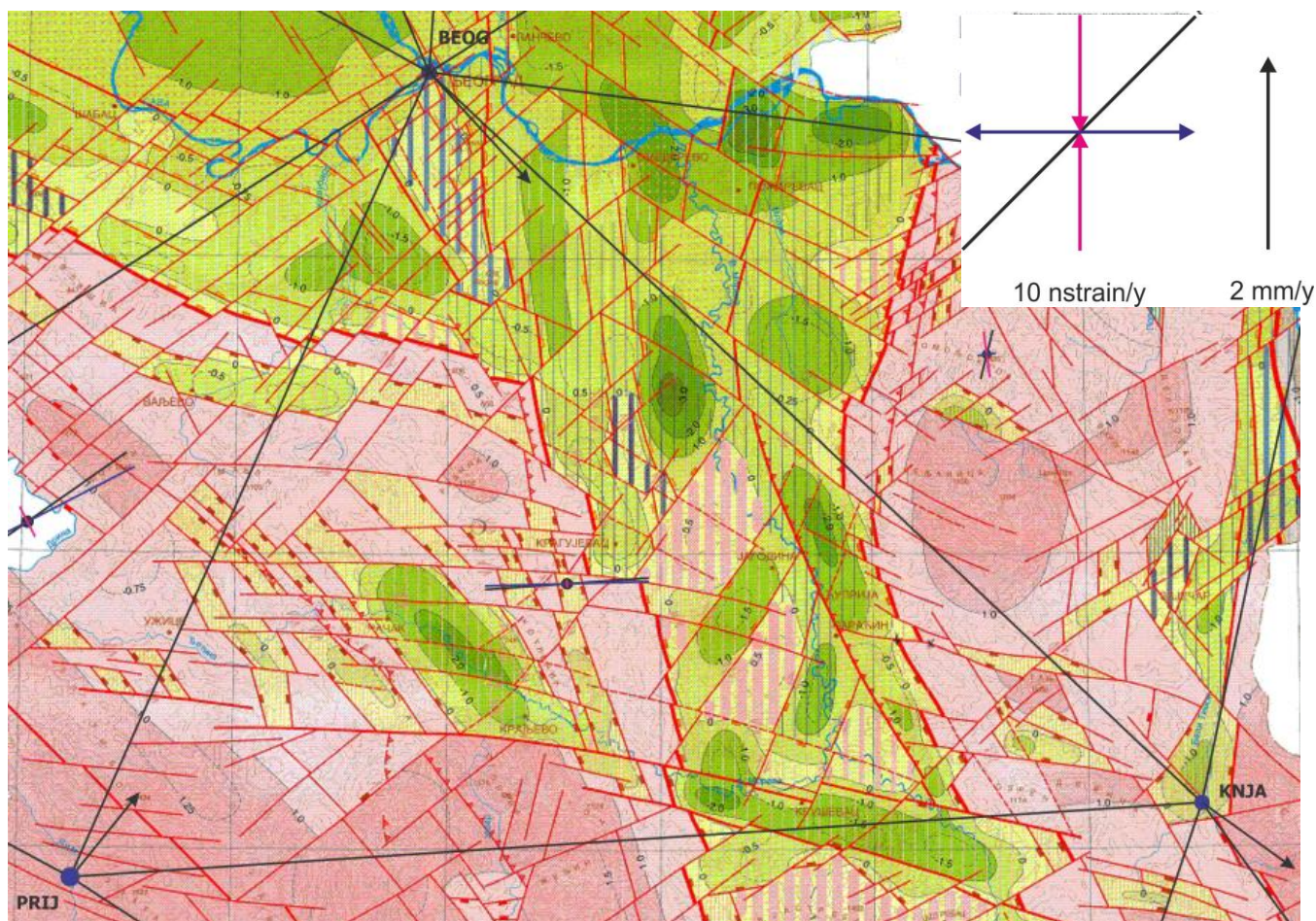
Троугао 8 SRJV-BEOG-PRIJ са максималном брзином екстензионе деформације је суседан са троуглом 3 SRJV-OSJE-BEOG где се појављује максимална брзина компресионе деформације, која износи 13.7 η strain/y. На основу ових резултата се може извести закључак о постојању тектонског раседа који се простире у области између тежишта ова два троугла а што је сагласно са геолошким подацима постојања гравитационих неотектонских раседа који ограничавају крупне неотектонске јединице у овој области.



Слика 10.30. Троугао 8 - SRJV-BEOG-PRIJ (Sarajevo - Beograd - Prijeopolje).

Троугао 9 - PRIJ-BEOG-KNJA (Prijeopolje - Beograd - Knjaževac)

Троугао 9 PRIJ-BEOG-KNJA просторно обухвата централни део области Србије са тежиштем у близини Гледићких планина са локалном хоризонталном брзином тежишта троугла која износи 1.4 mm/y у смеру приближно NW-SE, слика 10.24. Тежиште троугла 9 се налази у подручју развоја структура орогеног колапса. Троугао карактерише доминантна брзина екстензионе деформације од 10.0 η strain/y у односу на брзину компресионе деформације од 0.2 η strain/y. Максимална брзина смицања износи 10.2 η strain/y. Правац максималне брзине деформације исток-запад, која износи 10.0 η strain/y је у сагласности са геолошким подацима неотектонских раседа који ограничавају веће неотектонске блокове и зоне у овој области, слика 10.31.



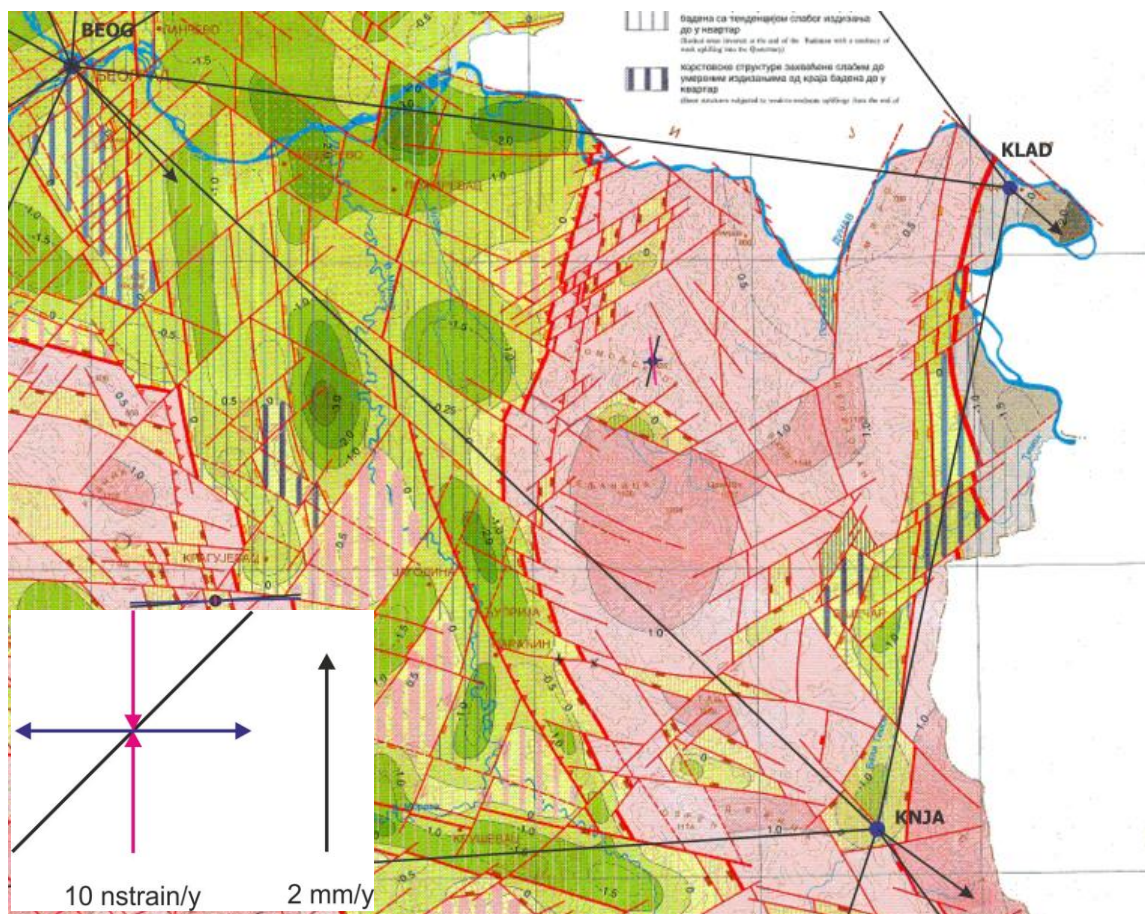
Слика 10.31. Троугао 9 - PRIJ-BEOG-KNJA (Prijepolje - Beograd - Knjaževac).

Троугао 10 - BEOG-KLAD-KNJA (Beograd - Kladovo - Knjaževac)

Троугао 10 BEOG-KLAD-KNJA просторно обухвата источни део области Србије са тежиштем у близини Хомољских планина са локалном хоризонталном брзином тежишта троугла која износи 1.7 mm/y у смеру NW-SE, слика 10.24. Тежиште троугла 10 се налази у подручју са тенденцијом сталног неотектонског издицања. Карактеристичне вредности су: за брзину компресионе деформације 2.8 η strain/y и за брзину екстензионе деформације 1.2 η strain/y. Максимална брзина смицања износи 4.0 η strain/y.

Правац максималне брзине деформације у смеру приближно SE-NW је у сагласности са геолошким подацима неотектонских раседа који ограничавају крупне неотектонске јединице ове области и приближно исте оријентације као и правци максималних брзина деформација у областима које обухватају троуглови 6 и 7.

Троугао 10 BEOG-KNJA-KLAD са максималном брзином деформације у смеру приближно SW-NE од 3.0 η strain/y је суседан са троуглом 9 PRIJ-BEOG-KNJA где максимална брзина деформације у правцу исток-запад износи 10.0 η strain/y. На основу ових резултата се може извести закључак о постојању тектонског раседа који се простира у области између тежишта ова два троугла а што је сагласно са геолошким подацима постојања реверсних односно гравитационих неотектонских раседа који ограничавају крупне неотектонске јединице у овој области, слика 10.32.



Слика 10.32. Троугао 10 - BEOG- KLAD-KNJA (Beograd - Knjaževac - Kladovo).

Троугао 11 - DUBR-SRJV-PRIJ (Dubrovnik - Sarajevo - Prijepolje)
Троугао 12 - DUBR-PRIJ-BUJA (Dubrovnik - Prijepolje - Bujanovac)

Троуглови 11 DUBR-SRJV-PRIJ и 12 DUBR-PRIJ-BUJA обухватају мањи део југозападне области Србије са тежиштима у суседним државама Босни и Херцеговини и Црној Гори, респективно. Оба троугла обухватају области са приближно једнаким вредностима брзина екстензионих деформација са просечном вредношћу од 11.7 η strain/y и просечном вредношћу брзина компресионих деформација од 1.2 η strain/y. У троуглу 11 максимална брзина деформација која износи 12.0 η strain/y има правац југозапад-североисток док је код области троугла 12 правац максималне брзине деформација од 11.6 η strain/y приближно запад-исток.

У односу на правац и интензитет брзина деформације у области коју покривају троуглови 11 и 8 може се закључити да су деформације сличне, што је карактеристично и за троуглове 12 и 9. Такође у сва четири троугла доминирају брзине екстензионих деформација, слика 10.23.

Троугао 13 - PRIJ-KNJA-BUJA (Prijeapolje - Knjaževac - Bujanovac)

Троугао 13 PRIJ-KNJA-BUJA обухвата јужни део области Србије са тежиштем које се налази са источне стране Копаоника са локалном хоризонталном брзином тежишта троугла која износи 1.4 mm/y у смеру NW-SE, слика 10.24. Тежиште троугла 13 се налази у подручју са тенденцијом сталног неотектонског издизања. Вредности хоризонталних брзина деформација су приближно једнаке и износе: брзина компресије 3.4 η strain/y и брзина екстензије 3.0 η strain/y. Главни правци брзина деформација компресије и екстензије показују сагласност са геолошким подацима неотектонских раседа који ограничавају мање неотектонске блокове, слика 10.33. Максимална брзина смицања износи 6.4 η strain/y а максимална брзина деформација износи 4.6 η strain/y.

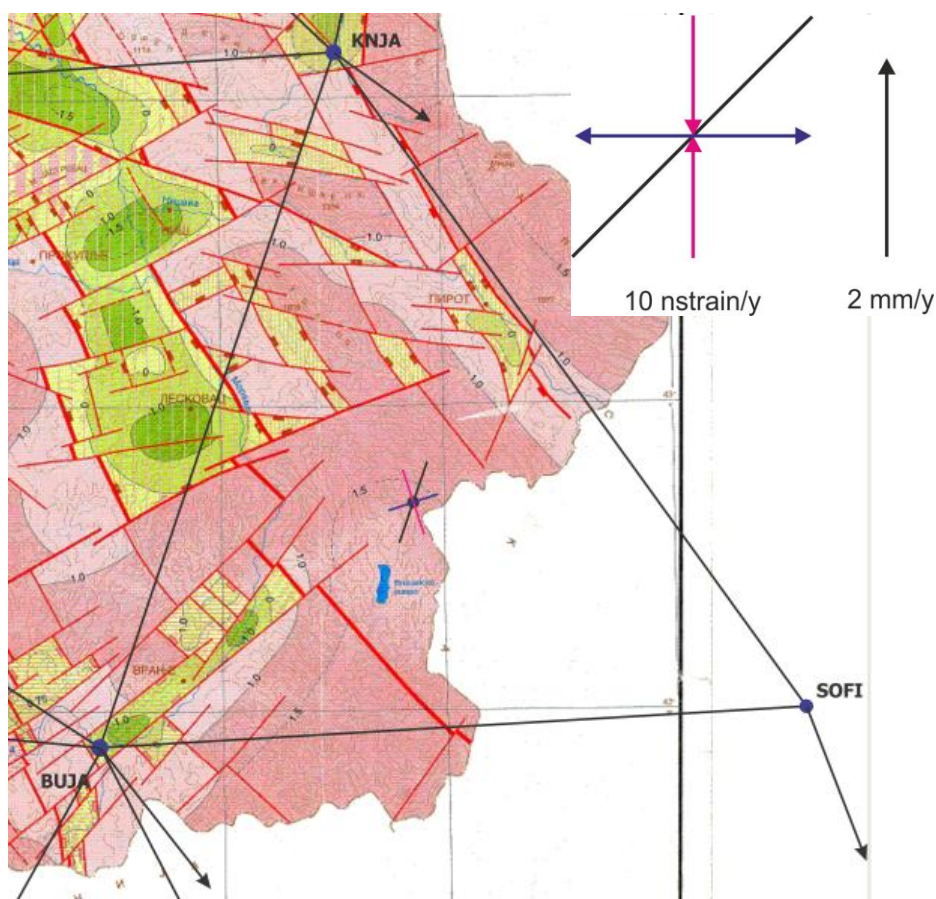


Слика 10.33. Троугао 13 - PRIJ-KNJA-BUJA (Prijeapolje - Knjaževac - Bujanovac).

Троугао 14 - BUJA-KNJA-SOFI (Bujanovac - Knjaževac - Sofija)

Тежиште троугла 14 BUJA-KNJA-SOFI се налази у близини Власинског језера у југоисточној области Србије са локалном хоризонталном брзином од 2.1 mm/y у смеру NW-SE, слика 10.24. Тежиште троугла 14 се налази у подручју са тенденцијом сталног неотектонског издизања. Вредности брзина деформације износе за брзину компресије 4.0 η strain/y и за брзину екстензије 3.0 η strain/y. Главни правци брзина деформација компресије и екстензије су приближно сагласни са геолошким подацима неотектонских раседа који ограничавају веће неотектонске блокове и зоне

у овој области, слика 10.34. Максимална брзина смицања износи $6.9 \eta\text{strain}/\text{y}$ и максимална брзина деформација је $5.0 \eta\text{strain}/\text{y}$.



Слика 10.34. Троугао 14 - BUJA-KNJA-SOFI (Bujanovac - Knjaževac - Sofija).

Троугао 15 - KNJA-KLAD-SOFI (Knjaževac - Kladovo - Sofija)

Троугао 15 KNJA-KLAD-SOFI обухвата мањи део источне области Србије са тежиштем у суседној држави Бугарској. Локална хоризонтална брзина тежишта троугла је $1.6 \text{ mm}/\text{y}$ у смеру NW-SE, слика 10.24. Вредности брзина деформације износе: за брзину компресије $3.3 \eta\text{strain}/\text{y}$ и за брзину екстензије $6.4 \eta\text{strain}/\text{y}$. Максимална брзина смицања износи $9.7 \eta\text{strain}/\text{y}$ и максимална брзина деформација је $7.2 \eta\text{strain}/\text{y}$, табела 10.8.

За упоређење и анализу главних праваца брзина деформација у овој области потребни су геолошки подаци.

Троугао 16 - DUBR-BUJA-ORID (Dubrovnik - Bujanovac - Ohrid)

Троугао 16 DUBR-BUJA-ORID обухвата област југозападно од Бујановца и јужни део области Косова са тежиштем које се налази у суседној држави Албанији. Локална хоризонтална брзина тежишта троугла износи $1.2 \text{ mm}/\text{y}$ у смеру приближно NW-SE. Вредности брзина деформације износе: за брзину компресије $4.2 \eta\text{strain}/\text{y}$ и

за брзину екстензије 4.8 η strain/у. Максимална брзина смицања износи 9.1 η strain/у и максимална брзина деформација је 6.4 η strain/у, табела 10.8.

За упоређење и анализу главних праваца брзина деформација у овој области потребни су геолошки подаци.

Троугао 17 - ORID-BUJA-AUT1 (Ohrid - Bujanovac - Tesaloniki)

Троугао 17 ORID-BUJA-AUT1 који обухвата област јужно од града Бујановца има тежиште које се налази у суседној држави БЈР Македонији. Локална хоризонтална брзина тежишта троугла је максимална у оквиру Delaney-еве триангулације и износи 4.2 mm/у у смеру приближно NW-SE. Вредности брзина деформације износе: за брзину компресије 7.0 η strain/у и за брзину екстензије 5.8 η strain/у. Максимална брзина смицања износи 12.8 η strain/у и максимална брзина деформација је 9.1 η strain/у, табела 10.8.

За упоређење и анализу главних праваца брзина деформација у овој области потребни су геолошки подаци.

Троугао 18 BUJA-SOFI-AUT1 (Bujanovac - Sofija - Tesaloniki)

Троугао 18 BUJA-SOFI-AUT1 који обухвата област југоисточно од града Бујановца има тежиште које се налази у суседној држави БЈР Македонији. Локална хоризонтална брзина тежишта троугла износи 4.0 mm/у у смеру приближно NW-SE. Вредности брзина деформације износе: за брзину компресије 12.2 η strain/у и за брзину екстензије 3.9 η strain/у. Максимална брзина смицања износи 16.2 η strain/у и максимална брзина деформација је 12.9 η strain/у, табела 10.8.

За упоређење и анализу главних праваца брзина деформација у овој области потребни су геолошки подаци.

10.5.4 Зоне брзина деформација Земљине коре за област територије Србије

На основу добијених вредности максималних брзина деформације за 18 троуглова извршена је подела у четири зоне: 0-5 η strain/у, 5-10 η strain/у, 10-12 η strain/у и 12-15 η strain/у.

0-5 η strain/у

У северном подручју Србије, које просторно покривају троуглови 1 (Osijek - Pencil - Subotica) и 2 (Subotica - Pencil - Oroshaza), максималне брзине деформација су величине до 2 η strain/у. Подручје које покрива троугао 10 (Beograd - Kladovo - Knjaževac) се налази под утицајем брзине деформације од 3 η strain/у. У јужном подручју Србије које покрива троугао 13 (Prijeopolje - Knjaževac - Bujanovac), максимална брзина деформација износи 4.7 η strain/у а у југоисточном делу који покрива троугао 14 (Bujanovac - Knjaževac - Sofija) максимална брзина деформација износи 4.9 η strain/у, слика 10.35.

5-10 η strain/y

Северно и североисточно подручје Србије покривено троугловима 4 (Osijek - Subotica - Beograd), 5 (Subotica - Oroshaza - Beograd), 6 (Beograd - Oroshaza - Deva) и 7 (Deva - Beograd - Kladovo) се налази у зони деформација земљине коре брзине 5-10 η strain/y као и источни део области Србије који покрива троугао 15 (Knjaževac - Kladovo - Sofija). Ова подручја Србије припадају трећој зони која је под утицајем рефлектоване компресије Мисиске платформе и одговарајућих вертикалних кретања блокова. Јужно подручје Србије које покривају троуглови 16 (Dubrovnik - Вујановас - Ohrid) и 17 (Ohrid - Вујановас - Tesaloniki) се налази у зони деформација земљине коре брзине 5-10 η strain/y и припада великом крусталном блоку Метохија, слике 10.13, 10.35.

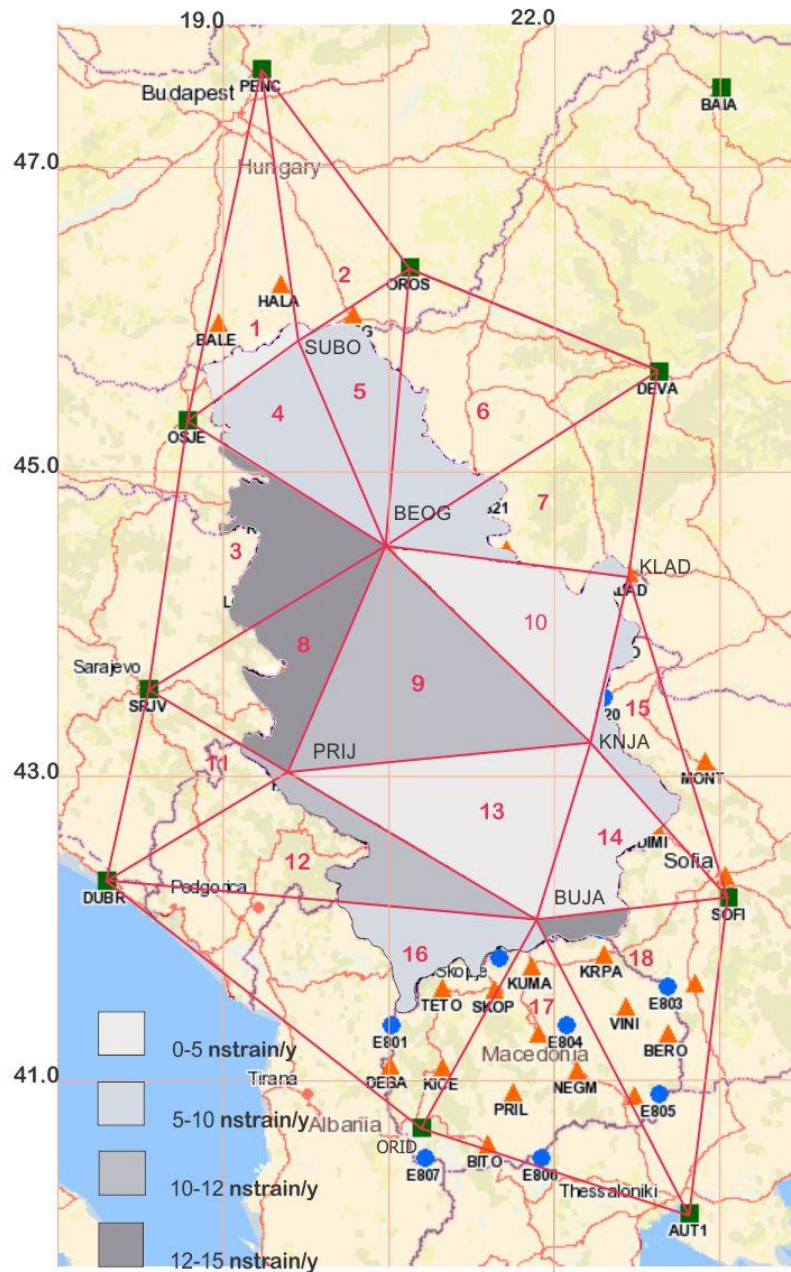
10-12 η strain/y

Централно подручје Србије које покрива троугао 9 (Пријеролје - Beograd - Knjaževac) где доминира екстензиона деформација у правцу исток - запад, налази се у зони деформација земљине коре чија је брзина 10-12 η strain/y. Припада великом крусталном блоку Централни Динариди и највећом површином припада другој зони тектонских напона која је под утицајем интеракције компресија и плиматских утицаја горњих делова астеносфере. Део подручја југозападне Србије коју покривају троугао 11 (Dubrovnik - Sarajevo - Пријеролје) и троугао 12 (Dubrovnik - Пријеролје - Вујановас) са доминантним екстензионим деформацијама припада тзв. првој зони компресије тектонских напона изазваних колизионим примарним контактом Евроазијске и Афричке плоче дуж Јадранске обале (Сикошек, 1987), слике 10.12, 10.13, 10.35.

12-15 η strain/y

Западно подручје Србије које покрива троугао 3 (Sarajevo - Osijek - Beograd) који има максималну брзину компресије у Delaney-евој мрежи и троугао 8 (Sarajevo - Beograd - Пријеролје) који има максималну брзину екстензионе деформације у Delaney-евој мрежи, у Србији припада зони највећих деформација земљине коре са брзином од 12-15 η strain/y. Између тежишта ова два троугла налази се један од праваца главних сеизмотектонских разлома на територији Србије. Ово подручје Србије је под највећим утицајем колизионог контакта Евроазијске и Афричке плоче.

Део југозападног подручја Србије које покрива троугао 18 (Вујановас - Sofija - Tesaloniki) са доминантним компресионим деформацијама, према брзини крусталних деформација налази се на нивоу од 12-15 η strain/y. Кроз ову област пролази један крак главног сеизмотектонског разлома на територији Србије и налази се под утицајем северно Анатолијског раседног система, слике 10.6, 10.11, 10.35.



Слика 10.35. Зоне брзина крусталних деформација за област Србије.

10.5.5 Зоне брзине дилатације у области територије Србије

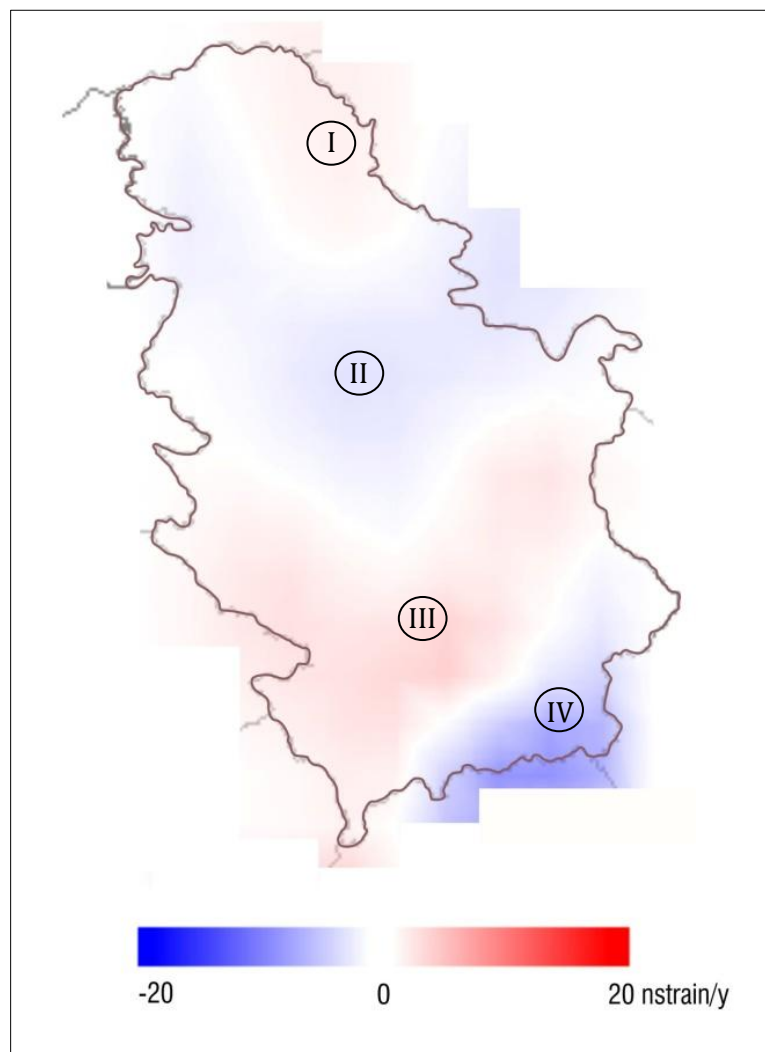
Мапа брзине дилатације области територије Србије урађена је коришћењем програма за деформациону анализу Чешког института за геодезију, топографију и картографију VUGTK "Deformation Analysis". Подаци коришћени за одређивање брзине дилатације за област Србије обухватају мерења свих станица мреже перманентних GPS станица са циљем добијања што је могуће више информација.

На основу срачунатих вредности брзина деформације и мапе брзине дилатације област истраживања се може поделити у четири зоне посматрано у односу на магнитуду брзине дилатације и њен предзнак, односно да ли је у тој зони

доминантна деформација екстензије или деформација компресије. Посматрано од севера ка југу Србије четири зоне су:

- I зона - доминира екстензиона деформација до 1 nstrain/y ,
- II зона - доминира компресиона деформација до 5 nstrain/y ,
- III зона - доминира екстензиона деформација до 15 nstrain/y и
- IV зона - доминира компресиона деформација до 10 nstrain/y .

Максимална позитивна вредност брзине дилатације износи 12.5 nstrain/y у троуглу 8 (Sarajevo - Beograd - Prijeopolje) где доминира деформација екстензије и налази се у трећој зони. Максимална негативна вредност брзине дилатације износи -8.3 nstrain/y у у троуглу 18 (Vučanjovac - Sofija - Tesaloniki) са доминантном деформацијом компресије и припада четвртој зони, табела 10.8, слика 10.36.

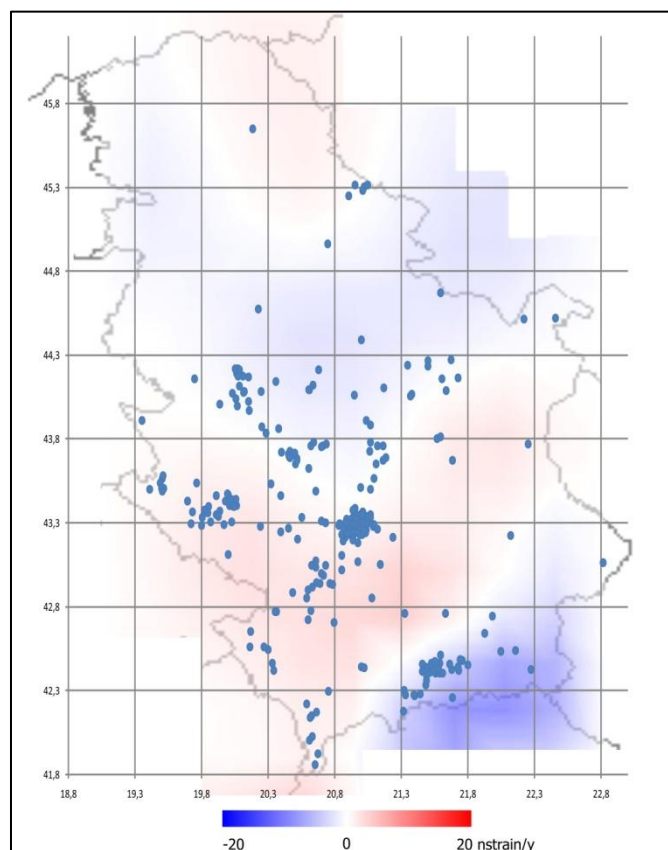


Слика 10.36. Зоне брзине дилатације у области Србије.

На слици 10.37 приказани су положаји догођених земљотреса магнитуде веће од 4 степена Рихтерове скале у периоду 1975-2010. године са мапом зона дилатације у области коју обухвата територија Републике Србије.

Подаци о догођеним земљотресима добијени су из базе података Немачког истраживачког центра геонаука, GFZ, Потсдам и програма CASMO, The World Stress Map Project - A Service for Earth System Management.

На основу претходно усвојених зона брзине дилатације одређених на основу геодетских мерења и положаја епицентара догођених земљотреса из базе података Немачког центра GFZ, визуелном анализом може се извести закључак да постоји сагласност положаја епицентара догођених земљотреса и граничних подручја зона дилатације као и сагласност положаја епицентара са оцењеним максималним вредностима брзине дилатације. Такође, на основу базе података Немачког центра GFZ положаји епицентара догођених земљотреса се налазе у близини граница главних сеизмогених блокова који припадају сеизмогеним системима 6, 7, 8 и 9 Динарског сеизмогеног региона и у близини граница главних сеизмогених блокова који припадају сеизмогеним системима 1 и 2 Српско - Македонског сеизмогеног региона, табела 10.3, слика 10.13.



Слика 10.37. Карта догођених земљотреса магнитуде веће од 4 степена Рихтерове скале у периоду од 1975-2010. год. у области Србије.

Добијени резултати деформација Земљине коре потврђују чињеницу да главни извор геометријских информација представљају мерења извршена просторним геодетским техникама. Заједно са геолошким и сеизмолошким методама геодетске методе деформационе анализе Земљине коре чине потпун приступ за квантификовање потенцијалне сеизмичке активности и истраживања догађања земљотреса. Оцењени параметри компоненти сопствених вредности тензора деформације, главне компоненте и главни правци, срачунати на основу резултата опажања просторним геодетским техникама су посебно значајни у интерпретацији сеизмичких деформација на регионалном и глобалном нивоу.

11 Закључак и препоруке

Како се дефинитивно налазимо у ери временских серија положаја станица које отварају пут вишеструким применама и истраживања, глобални и секуларни терестрички референтни оквир ITRF је постао неопходност. Кључна чињеница је потреба за референтним стандардом као еталоном, за упоређење и изражавање резултата за различите примене у геонаукама. Поред тога, ITRF није само научни референтни оквир, већ такође као референтни стандард омогућава откривање некохерентности између просторних техника и процењивања њихових граница. Према томе, стабилност и одржање дугорочности терестричког референтног оквира ITRF представља један од најзначајнијих задатака геодетске научне заједнице.

За реализацију ITRF у Републици Србији усвојена је стратегија која обухвата две етапе. У првој етапи извршена је комбинација индивидуалних GPS недељних серија координата станица чиме је добијена реализација терестричког референтног система названа ITRF2008_SRB_UoB. У другој етапи је извршено упоређење решења терестричког референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB са терестричким референтним оквиром EPN_SRB_UoB који је срачунат у овој етапи у циљу верификације и провере резултата рачунања.

Мрежа перманентних GNSS станица у Републици Србији (АГРОС) садржи укупно 32 станице са пројектованим положајима станица на међусобним разалинама од око 60 km и на тај начин покрива целу државну територију. Као улазни подаци за изравнање и оцену положаја и брзина станица коришћене су индивидуалне недељне серије координата GPS станица АГРОС мреже.

Дефинисање датума референтног оквира под називом ITRF2008_SRB_UoB извршено је увођењем једначина минималних услова у математичком моделу CATREF софтвера које се примењују се на вектор положаја и брзина станица екстерног терестричког референтног оквира ITRF2008. На тај начин је постигнуто изражавање референтног оквира Србије у Међународном терестричком референтном оквиру ITRF2008. За дефинисање датума коришћено је 8 станица глобалног решења ITRF2008 које припадају Европској тектонској плочи и својим просторним распоредом окружују мрежу Србије. Након искључења грубих грешака, детекције офсета, дисконтинуитета и периодичних сигнала у временским серијама координата станица добијено је решење референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB. За 19 станица перманентне мреже Србије и 20 EPN станица просечно стандардно одступање по координатама X и Z износи 0.27 mm и 0.18 mm по координати Y, док стандардна одступања компоненти брзина V_X и V_Z износе 0.20 mm/y и 0.10 mm/y за V_Y . Оцењена вредност σ_0 јединице тежине износи 1.03.

Поље брзина и поступак изабора станица које су изабране за даљу анализу одређен је на основу временског периода мерења и оцењених вредности несигурности брзина. Вредност стандардног одступања хоризонталних брзина станица глобалног ITRF2008 решења износи 0.1 mm/y. Максималне вредности стандарда компоненти брзина станица Србије износе од 0.15 mm/y за станицу ВЕОГ до 0.44 mm/y за станицу ГРОС. Пољем хоризонталних брзина станица глобалног референтног оквира ITRF2008 описује се кретање јужног дела региона Европске плоче коме припада област Србије. Правац хоризонталних брзина станица које припадају тзв. "стабилном" делу Европске плоче је југозапад-североисток са просечном вредношћу хоризонталних брзина осам датумских станица од 2.71 cm/y. Поље хоризонталних брзина станица референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB, које

описује област Србије је конзистентно и хомогено са брзинама усмереним од југозапада према североистоку са просечном вредношћу од 2.75 cm/у.

Код вертикалних брзина станица максимална брзина уздизања износи 3.20 cm/у за станицу BUCU у Румунији а максимално слегање износи -3.09 cm/ у за станицу BUJA у Србији. Неколико оцењених вертикалних брзина станица нису конзистентне са брзинама околних станица што може указивати на присуство неких локалних ефеката што је потребно истражити а такође треба имати у виду и то да антене станица перманентне мреже Србије немају примењен модел апсолутне или релативне калибрације.

Решење референтног оквира EPN08_SRB_UoB добијено је по истом математичком моделу као и решење референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB примењујући принцип минималних услова на трансформационе параметре оквира са екстерним референтним оквиrom EUREF реализација EPN_A_IGb08. Просечна вредност стандардних одступања по координатама X, Y и Z износе 0.26 mm, 0.18 mm и 0.25 mm, респективно, док просечна вредност стандардних одступања компоненти брзина V_x , V_y и V_z износе 0.19 mm/у, 0.09 mm/у и 0.18 mm/у, респективно. Добијена оцена вредности σ_0 јединице тежине износи 1.03. У циљу верификације и провере резултата рачунања извршено је упоређење оквира ITRF2008_SRB_UoB и EPN08_SRB_UoB. Добијене су следеће вредности разлика транслационих параметара: -0.7 mm, 1.4 mm и -0.6 mm по X, Y и Z оси, респективно. Брзине транслационих параметара износе 0.0 mm/у, 0.3 mm/у и 0.1 mm/у по X, Y и Z оси. На основу упоређења два референтна оквира може се извести закључак да имају сагласност бољу од 1 mm по X и Z оси и 1.5 mm по Y оси. WRMS вредности разлика положаја у епохи 10.317 и WRMS вредности разлика брзина за 145 заједничких тачака између два референтна оквира по положају су испод 1 mm и 0.1 mm/у, респективно за све три компоненте.

Захваљујући континуираним побољшањем улазних података и стратегијом за реализацију терестричког референтног оквира ITRF2008 представља последње решење (у време писања овог текста) у низу унапређених решења ITRF. Процена квалитета терестричког референтног оквира изводи се на основу његових унутрашњих карактеристика, почетка, размере, оријентације и његове еволуције у времену. Почетак терестричког референтног оквира ITRF2008 дефинисан је параметрима транслације чије су вредности једнаке нули у епохи 2005.0 и параметрима брзине транслације чије су вредности једнаке нули у односу на ILRS SLR временске серије. Разлике компоненти транслације између референтних оквира ITRF2008 и ITRF2005 указују да је сагласност почетка између два референтна оквира на нивоу или боља од једног центиметра и сматра се нивоом тачности почетка терестричког референтног оквира ITRF2008.

Терестричког референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB изражен је у екстерном референтном оквиру ITRF2008 у епохи 2010.317. По дефиницији су трансформациони параметри између ова два оквира једнаки нули. На основу вредности несигурности параметара транслације закључено је да је тачност реализације почетка референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB у односу на глобални референтни оквира ITRF2008 на нивоу од два центиметра. Такође, на основу средњих вредности параметара транслације индивидуалних оквира у односу на решење референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB за период 3.87 год. може се извести закључак да је тачност почетка индивидуалног референтног оквира у односу на референтни оквира ITRF2008_SRB_UoB на нивоу од два центиметра.

Размера терестричког референтног оквира ITRF2008 дефинисана је фактором размере који је једнак нули у епохи 2005.0 и брзином размере чија је вредност

једнака нули у односу на средњу размеру и брзину размере VLBI и SLR временских серија. Размера оквира ITRF2008 је дефинисана средњом вредношћу решења VLBI и SLR технике, а максимална разлика размере између ове две технике износи 1.2 ppb (8 mm на екватору), што се сматра нивоом тачности размере остварене данас.

Размера терестричког референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB дефинисана је фактором размере који је једнак нули у епохи 2010.317 и брзином размере чија је вредност једнака нули у односу на брзину размере терестричког референтног оквира ITRF2008. На основу вредности несигурности параметра размере закључено је да је тачност размере референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB у односу на глобални референтни оквир ITRF2008 око 1.8 ppb што је приближно 8 mm за географску ширину Србије. На основу добијених вредности параметара размере појединачних оквира у односу на решење референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB може се закључити да је тачност размере индивидуалног референтног оквира у односу на референтни оквир ITRF2008_SRB_UoB око 0.6 ppb што је приближно 2.7 mm за географску ширину Србије.

Оријентација терестричког референтног оквира ITRF2008 је дефинисана параметрима ротације чије су вредности једнаке нули у епохи 2005.0 и параметрима брзине ротације чије су вредности једнаке нули између оквира ITRF2008 и ITRF2005. ITRF2008 обезбеђује конзистентну серију кретања пола и његових дневних промена, универзално време (UT1-UTC) и дужину дана (LOD) одређену VLBI техником. Анализа конзистентности EOP параметара између решења четири технике на основу резидуала кретања пола је показала да GPS техника доминира у односу на остале три технике.

Оријентација терестричког референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB дефинисана је параметрима ротације чије су вредности једнаке нули у епохи 2010.317 и параметрима брзине ротације чије су вредности једнаке нули у односу на глобални терестрички референтни оквир ITRF2008. На основу вредности несигурности параметара ротације може се закључити да је тачност оријентације терестричког референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB у односу на глобални терестрички референтни оквир ITRF2008 нивоа до 3'. На основу средњих вредности параметара ротације индивидуалних оквира у односу на решење референтног оквира ITRF2008_SRB_UoB за период од 3.87 год. може се закључити да је тачност ротације индивидуалног референтног оквира у односу на референтни оквир ITRF2008_SRB_UoB нивоа 1.7'.

За примену NNR No-Net-Rotation услова за опажачке станице потребно је испуњавање минималних критеријума, као и објективан избор сваког елемента области који је придружен свакој станици која би требала да репрезентује своје геофизичко окружење. Примена кинематичког модела Земљине коре који испуњава услов глобалне не-ротације подразумева дискретизацију Земљине коре и интерполацију поља брзина ITRF станица због њихове недовољне густине на Земљиној површини. У првој фази почев од поља брзина ITRF2008 добија се оцена модела апсолутног кретања Земљине коре са половима ротације плоча. У другом кораку се врши интерполација поља брзина оцењених у првој фази на сферну регуларну мрежу. Коначно, у трећем кораку се експлицитно примењује услов не-ротације на поље брзина интерполовано сферном мрежом.

За деформациону анализу Земљине коре потребно је познавање поља померања или поља брзина материјалних тачака, где се померања разматрају се као ефекат вискозно- еластичних деформација Земље као одговор на временски променљива површинска оптерећења и друге узроке. Земљина кора је састављена од

литосферских плоча са просечном густином 2.67 g/cm^3 и дебљином у распону од 10 до 80 km. Због кретања плоча долази до акумулирања енергије еластичних деформација у граничним зонама која се после одређеног времена, зависно од различитих фактора изненада реализује у облику земљотреса.

Док брзине станица рефлектују релативна померања у оквиру самих станица, брзине деформације приказују ситуацију у одређеној области и вредност промене концентрације напона која је директно повезана са локалном вредношћу концентрације напона и могућим потенцијалним сеизмичким хазардом.

Метод коначних елемената као снажна и широко коришћена нумеричка техника користи се за добијање приближних нумеричких решења за апстрактне једначине које предвиђају одговор физичких система изложених спољним утицајима. Помоћу метода коначних елемената решавају се задаци у техничким областима који подразумевају анализу сложених структура, анализу сложене геометрије, оптерећења и својства материјала где није могуће добити аналитичко математичко решење. Дискретизацијом се моделира систем који се дели на еквивалентан систем мањих делова или јединица или коначних елемената. Коначни елементи су повезани заједничким тачкама и граничним линијама или површинама и на тај начин репрезентују систем који може имати најмање два елемента. Постоје два директна приступа који се примењују за решавање проблема сложених структура. У раду је примењен приступ код кога су непознати параметри система померања у чворовима, односно приступ одржања крутости система. Примењени су услови компатибилности система а одговарајуће једначине изражене су у односу на померања у чворовима. Оптимално генерисање коначних елемената извршено је методом Delaunay триангулације између петнаест GPS станица које су испуниле критеријуме геодетског квалитета. За оптимално генерисање мреже троуглова поштована су правила Delaunay триангулације.

Мрежу Delaunay триангулације, која покрива област територије Србије, чини укупно 21 троугао од којих је 18 троуглова целом површином или једним делом у области Србије док су три троугла изван области. За сваки троугао тежиште представља референтну тачку за коју је директним начином срачунат градијент тензора брзина. На основу три вектора брзина темена троугла - чворова елемента, проблем је решен инвертовањем система линеарних једначина са шест непознатих, чиме су добијене четири непознате компоненте тензора брзина и две компоненте брзине тежишта троугла.

За одређивање брзине деформације Земљине коре потребне су брзине које се одређују из оцењеног модела брзина ITRF које се затим конвертују у локалне брзине у односу на Евроазијску фиксну плочу на тај начин што се одузима круто кретање Евроазијске плоче које је обрачунато вектором угаоне брзине Евроазијске плоче у ITRF2008 апсолутном моделу кретања плоча.

На основу Delaunay-евих троуглова чија су темена GPS станице са оцењеним брзинама које рефлектују померања у оквиру области самих станица, формирана је мрежа у којој су срачунате брзине деформације сваког троугла које репрезентују ту област и карактеришу се сложеном просторном расподелом компресионих и тензионих догађаја. Са посебним физичким значењем, оцењене одговарајуће компоненте брзине деформације имају значајну улогу у графичком приказу просторних варијација поља тензора деформације. Просторни изглед компоненти деформација олакшава физичку интерпретацију и процену информација садржаних у пољу тензора деформација, посебно упоређењем података са геодинамичким и сеизмичким мапама испитиваног подручја.

Упоређењем са геолошким подацима може се закључити да су главни правци геодетских брзина компресије и екстензије сагласни са геолошким подацима неотектонских раседа који ограничавају крупне неотектонске јединице и веће неотектонске блокове и зоне или ограничавају мање неотектонске блокове у области истраживања.

Троугао 8 SRJV-BEOG-PRIJ има максималну брзину екстензионе деформације и суседан је са троуглом 3 SRJV-OSJE-BEOG где се појављује максимална брзина компресионе деформације, на основу чега се може извести закључак о постојању тектонског раседа који се простире у области између тежишта ова два троугла а што је сагласно са геолошким подацима постојања гравитационих неотектонских раседа који ограничавају крупне неотектонске јединице у овој области. Троугао 10 BEOG-KNJA-KLAD са максималном брзином деформације у смеру приближно SW-NE је суседан са троуглом 9 PRIJ-BEOG-KNJA где је максимална брзина деформације у правцу исток-запад, на основу чега се може извести закључак о постојању тектонског раседа који се простире у области између тежишта ова два троугла а што је сагласно са геолошким подацима постојања реверсних односно гравитационих неотектонских раседа који ограничавају крупне неотектонске јединице у овој области.

На основу добијених вредности максималних брзина деформације за 18 Delaney-евих троуглова извршена је подела у четири зоне са максималном вредношћу од 15 η strain/y. Такође, на основу срачунатих вредности брзина деформације и мапе брзине дилатације област истраживања се може поделити у четири зоне посматрано у односу на магнитуду брзине дилатације и њен предзнак, односно да ли је у тој зони доминантна деформација екстензије или деформација компресије. Максималне вредности компресионих деформација износе до 10 η strain/y а максималне вредности екстензионих деформација износе до 15 η strain/y.

На основу претходно усвојених зона брзине дилатације одређених на основу геодетских мерења и положаја епицентара догођених земљотреса, визуелном анализом може се извести закључак да постоји сагласност положаја епицентара догођених земљотреса и граничних подручја зона дилатације као и сагласност положаја епицентара са оцењеним максималним вредностима брзине дилатације. Такође, положаји епицентара догођених земљотреса се налазе у близини граница главних сеизмогених блокова који припадају сеизмогеним системима 6, 7, 8 и 9 Динарског сеизмогеног региона и у близини граница главних сеизмогених блокова који припадају сеизмогеним системима 1 и 2 Српско - Македонског сеизмогеног региона.

Највећи извори грешака у оцени брзина станица су ефекти скривених офсета или дисконтинуитета положаја и несигурност дефиниције Међународног терестричког референтног оквира ITRF. Због тога је важно пажљиво истажити сваку временску серију положаја станица како би се детектовали, оценили и уклонили колико је то могуће сви значајни офсети и дисконтинуитети брзина. Такође, сезонски сигнали су узрок појављивања значајне разлике брзина иако имају мали ефекат за станице са дугим временским серијама (више од 4.5 год.). Будућа истраживања треба свакако усмерити у правцу унапређења метода оцене брзина у смислу конзистентности оцене амплитуда офсета и сезонских сигнала. Разумевање сезонских сигнала је веома важно јер могу настати као резултат физичке деформације Земљине коре али и постојања систематских грешака у самим мерењима. Први корак је разумевање

резидуала детерминистичких сигнала присутних у временским серијама положаја станица.

Поље брзина станица је повезано са референтним оквиром у којем су оцењене брзине, односно поље брзина је оцењено у односу на почетак дефинисан референтним оквиром ITRF. Оцена брзина станица као репрезентата дела Земљине коре са тачношћу бољом од 1 mm/y значи према томе познавање временске еволуције почетка оквира (актуелног центра масе Земље) са истим захтевом тачности. Поред тога, за брзине станица је такође потребно прецизно познавање тзв. секуларне размере ITRF. Тренутно, конзервативна тачност дефиниције ITRF2008 оцењена је са вредношћу мањом од 0.5 mm/y за брзину почетка по свакој компоненти и са грешком у брзини размере мањом од 0.2 mm/y.

Један од кључних фактора за стабилност терестричког референтног оквира је свакако одржање дугорочности референтног оквира. Главни циљеви будућих истраживања за одржање дугорочности референтног оквира имајући у виду доступност континуираних временских серија координата станица су:

- Осигурање конзистентности рутине за обезбеђење дугорочности референтног оквира,
- Одржавање реализације референтног система у регуларном маниру преко кумулативних недељних решења што посебно доприноси стабилности почетка и размере,
- Спајање два претходна циља и извођење решења по математичком моделу изравнања CATREF софтвера.

У истраживањима догађања земљотреса главни извор геометријских информација о деформацијама Земљине коре представљају мерења извршена просторним геодетским техникама. Геодетским мерењима се могу квантификовати потенцијалне сеизмичке активности и на раседима који су непознати или који споро клизе или се налазе сувише дубоко у кори да би могли да се проучавају конвенционалним геолошким или сеизмолошким методама.

Компоненте тензора деформације одређене помоћу брзина позиција опажачких станица даље могу да се користе за израчунавање компоненти тензора напона, узимајући у обзир особине материјала стена у оквиру области истраживања.

Оцењене вредности брзина деформације, односно брзине дилатације области истраживања описују један сложени систем напонских стања за чије разумевање је потребно мултидисциплинарно истраживање померања и деформација Земљине коре шире области. Таква истраживања би допринела разумевању механизма померања структурних целина и њихових међусобних реакција које резултирају деформацијама Земљине коре и догађањем земљотреса.

Коначно, геодетске мреже и мерни инструменти са којима се врше опажања као и постизање стабилности референтног оквира на милиметарком нивоу захтева њихово одржавање и континуирано технолошко унапређење, што наравно захтева улагање од стране националних институција и подршку у међународним научним истраживањима.

Литература

- Altamimi, (2013). Mathematically rigorous data processing with CATREF software, Specialization at the l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), Laboratoire de Recherche en Géodésie (LAREG), Paris, (private autor's copy).
- Altamimi et al., (2011). ITRF2008: An improved Solution of the International Terrestrial Reference Frame. *Journal of Geodesy*, Springer, Vol. 85.
- Altamimi et al., (2011). ITRF2008 Plate Motion Model, EGU2011-4750, Viena, Austria.
- Altamimi and Dermanis, (2009). The choice of reference system in ITRF formulation (private autor's copy).
- Altamimi et al., (2008). Rigorous combination to ensure ITRF and EOP consistency, *Systemes de Référence Spatio-Temporels: the celestial reference frame for the future*, Observatoire de Paris.
- Altamimi et al., (2007). Accuracy assessment of the ITRF datum definition, VI Hotine-Marussi Symposium of Theoretical and Computational Geodesy: Challenge and Role of Modern Geodesy, International Association of Geodesy.
- Altamimi et al., (2007). ITRF2005: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, *J. Geophys. Res.* 112.
- Altamimi et al., (2006). CATREF Software, Combination and Analysis of Terrestrial Reference Frames, Laboratoire de Recherche en Géodésie (LAREG), Institut National de l'Information Géographique et Forestière, IGN.
- Altamimi et al., (2003). The impact of a No-Net-Rotation Condition on ITRF2000, *Geophysical Research Letters*, Vol. 30.
- Altamimi, (2003). Discussion on How to Express a Regional GPS Solution in the ITRF. EUREF Publication No. 12, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- Altamimi et al., (2002a). New trends for the reactualization of the International Terrestrial Reference System, *Adv. Space Res.*, 30(2).
- Altiner et al., (2006). The Adria microplate: GPS Geodesy, Tectonics and Hazards. Springer-Verlag, pp. 257–268.
- Amiri-Simkooei et al., (2007). Assessment of noise in GPS coordinate time series: Methodology and results, *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, B07413.
- Argus (2007). Defining the translational velocity of the reference frame of Earth, *Geophys. J. Int.* 169.
- Argus et al., (1989). Closure of the Africa-Eurasia-North America Plate Motion Circuit and Tectonics of the Gloria Fault, *Jornal of Geophysical Research*, Vol. 94.

- Arsovski i dr., (1973). Tectonic map of Yugoslavia. UNDP/UNESCO Survey of the Seismicity of the Yugoslavia.
- Astrodynamics – Propagation Specifications, Technical Definitions, and Recommended Practices, American National Standards Institute, 2010.
- Bähr et al., (2007). Variance component estimation for combination of terrestrial reference frames. Universität Karlsruhe, ISBN:978-3-86644-206-1.
- Bašić, (2007). Introduction and implementation of ETRS in Croatia, *Geodetski vestnik*, 51 (4), p. 751-762.
- Beckley et al., (2007). A reassessment of TOPEX and Jason-1 altimetry based on revised reference frame and orbits, *Geophys. Res. Lett.* 34.
- Bernhardt et al., (2006). Ionospheric applications of the scintillation and tomography receiver in space (CITRIS) mission when used with the DORIS radio beacon network. *J. Geod.* 80.
- BIPM, (2011). The proposed redefinition of Coordinated Universal Time, UTC, BIPM.
- Blagojević, (2014). Uvod u satelitsku geodeziju, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, ISBN 978-86-7518-167-5.
- Blagojević and Vasilić, (2013). The First Insight into Station Velocities in Republic of Serbia, Reference Frame for Applications in Geosciences, International Association of Geodesy Symposia Vol.138, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.
- Blagojević et al., (2012). Assessment of Reference Frame Stability through offset detection in GPS coordinate time series, General Assembly of European Geosciences Union, Austria.
- Blagojević, (2003). Mogućnosti globalnog pozicionog sistema za uspostavljanje geodetske referentne osnove u gradovima, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija.
- Blagojević (1993). Određivanje savremenih pomeranja zemljine kore lokalnog i regionalnog karaktera geodetskim metodama, magistarska teza, Građevinski fakultet, Beograd.
- Blaha, (1971). Inner adjustment constraints with emphasis on range observations, Department of Geodetic Science, Report 148, The Ohio State University, Columbus.
- Blewitt and Lavallée, (2002). Effect of annual signals on geodetic velocity, *J. Geophys. Res.*, Vol. 107.
- Blewitt et al., (1994). Constraining the IGS Polyhedron by Distributed Processing, Densification of ITRF through Regional GPS Networks, JPL.
- Böhm et al., (2011). The new Vienna VLBI Software VieVS. Proceedings of the 2009 IAG Symposium, Vol. 136, International Association of Geodesy Symposia.
- Böhm et al., (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, *Geophysical Research Letters*, 33(7).
- Boucher, (2001) Terrestrial coordinate systems and frames, *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, V.1, Nature Publishing Group.

- Boucher and Altamimi (1993). Development of a conventional terrestrial reference frame, in Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Earth Dynamics, Geodyn. Ser., Vol. 24.
- Boucher et al., (1992). ITRF91 and its associated velocity field. IERS Technical Note No. 12, Observatoire de Paris.
- Boucher and Altamimi, (1990). IERS Technical Note 4, Central Bureau of IERS - Observatoire de Paris, France.
- Bruyninx et al., (2010). Guidelines for EUREF Densifications, <ftp://epncb.oma.be/pub/>.
- Bruyninx et al., (2009). A dense global velocity field based on GNSS observations: preliminary results, Geodesy for Planet Earth, International Association of Geodesy Symposia, Vol. 136.
- Vasilic and Blagojevic, (2015). Expression of the Local GPS Solution in the Regional Reference Frame ETRF2000. Eds.: Chris Rizos, Pascal Willis. IAG 150 YEARS. Vol. 143, Springer-Verlag Berlin Heidelberg / International Association of Geodesy Symposia.
- Василић, (2009). Метролошко обезбеђење геодетских ГПС пријемника и антена, Магистарска теза, Грађевински факултет у Београду, Универзитет у Београду, Србија.
- Васковић (2012). Основи Теоријске Петрологије, Интерна предавања, Рударско-геолошки факултет, Београд.
- Вељковић, (2012). Недељна решења координата станица АГРОС мреже, Сектор за геодетске радове, Републички геодетски завод Србије.
- Veljković and Lazić, (2011). EUREF Serbia 2010 – final report. XIXth EUREF symposium, Chisinau, Moldova.
- Višnjić, (2012). Geodetsko određivanje savremenih vertikalnih pomeranja zemljine kore regionalnog karaktera, doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Beograd.
- Cai and Grafarend, (2007). Statistical analysis of the eigenspace components of the two-dimensional, symmetric rank-two strain rate tensor derived from the space geodetic measurements (ITRF92-ITRF2000 data sets) in central Mediterranean and Western Europe, Geophys. J. Int. 168.
- Canet (2015). Earth's Core and the Geodynamo, ETH Zurich.
- Capitaine N. et al. (2012) Evaluation of the accuracy of the 2006/2000 precession-nutation, Space-time reference systems for future research, 28th IAU GA, Beijing.
- Caporali et al., (2003). Average strain rate in the Italian crust inferred from a permanent GPS network – II. Strain rate versus seismicity and structural geology. Geophys. J. Int. Vol. 155.
- Collilieux and Schmid, (2013). Evaluation of the ITRF2008 GPS vertical velocities using satellite antenna z-offsets, GPS Solutions, Vol. 17(2).
- Collilieux et al., (2012). Strategies to mitigate aliasing of loading signals while estimating GPS frame parameters, Journal of Geodesy, Vol. 86(1).
- Collilieux, (2010). CATREF analysis of offsets and discontinuity in coordinate time series, LAREG, Paris.

- Collilieux et al., (2011). Quality assessment of GPS reprocessed terrestrial reference frame, *GPS Solution*, Vol. 15.
- Combrinck, (2010). *Satellite Laser Ranging, Sciences of Geodesy*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
- Gazeaux et al., (2013). Detecting offsets in GPS time series: First results from the detection of offsets in GPS experiment, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 118.
- Gambis, (2015). Report of the Working Group on Coordinated Universal Time (UTC), EOP PC.
- Gessner et al., (2007). Significance of strain localization in the lower crust for structural evolution and thermal history of metamorphic core complexes, *Tectonics*, Vol. 26.
- Glumac (2006). *Klasična mehanika - uvod*, Sveučilište u Osijeku, Osijek.
- Guohua and Prescott, (1986). Discussion on displacement analysis: detection of crustal deformation, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91.
- Gučević et al., (2010). Optimum Resolution and Size of DTM during Modelling Topographic Effect, *Geodetski list*, Vol.64 (87), No.3.
- Grafarend and Awange, (2012). *Applications of Linear and Nonlinear Models: Fixed Effects, Random Effects, and Total Least Squares*, Springer Science and Business Media.
- Grafarend and Voosoghi, (2003). Intrinsic deformation analysis of the Earth's surface based on displacement fields derived from space geodetic measurements, case studies: Present day deformation patterns of Europe and of the Mediterranean area (ITRF data sets), *Journal of Geodesy*, Vol. 77.
- Grafarend, (2000). *Lecture Notes on Adjustment and Statistics III, Part 1, WS 2000/2001, Rev. 1.5*, Geodaetisches Institut, Universitaet Stuttgart, Germany.
- Davies, (2011). *The Finite Element Method: An Introduction with Partial Differential Equations*, Oxford University Press.
- Davies J. and Davies D. (2010), Earth's surface heat flux, *Solid Earth*, 1, 5–24.
- Delaunay, (1934). Sur la sphère vide. A la mémoire de Georges Voronoï, *Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS, Classe des sciences mathématiques et naturelles*, No. 6.
- DeMets et al., (1994). Effect of recent revisions of the geomagnetic reversal timescale on estimates of current plate motions, *Geophysical Research Letters*, Vol. 21.
- Dermanis, (2010). *Basic Concepts of Reference Systems in Geodesy, Astronomy and Geophysics*, Department of Geodesy and Surveying, Faculty of Engineering, The Aristotle University of Thessaloniki, Greece.
- Dermanis, (2010). ITRF determination and the datum problem, *Lecture Notes, IAG School on Reference Frames*, Greece.
- Dermanis, (2000). Establishing Global Reference Frames. Nonlinear, Temporal, Geophysical and Stochastic Aspects, In: *Gravity, Geoid and Geodynamics 2000, IAG Symposium Vol. 123*.
- Dermanis and Livieratos (1983). Applications of Deformation Analysis in Geodesy and Geodynamics, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, vol. 21.

- Devoti et al., (2011). Evidence of large scale deformation patterns from GPS data in the Italian subduction boundary, *Earth and Planetary Science Letters* 311.
- Devoti et al., (2002a). Geophysical interpretation of geodetic deformations in the central Mediterranean area, In *Plate boundary zones, Geodyn. Ser. Vol.30*.
- Devoti et al. (2002b). Geophysical interpretation of the tectonic movements in the western Mediterranean area estimated by combining geodetic results, *Tectonophysics*.
- Doerflinger, (1997). Utilisation de la méthode de positionnement satellitaire GPS pour la détermination précise des altitudes relatives et absolues. Thèse de doctorat. L'Université des Sciences et des Techniques, France.
- Dorđević (2012), Geohemijska analiza tragova metala Riblje gline sa lokaliteta Kirkevig (Stevns Klint, Danska), Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za hemiju.
- Feigl, (2002). Measurement of coseismic deformation by satellite geodesy, *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, vol. 81A, IASPEI, Academic Press.
- Fey et al., (2009). The second realization of the international celestial reference frame by very long baseline interferometry. Frankfurt am Main, IERS/IVS Working Group.
- Francisco, (1999). Stress, strain and fault patterns, *Journal of Structural Geology* 21.
- Hadžijevski i dr., (1988). Seizmičko zoniranje i problem određivanja maksimalne magnitude očekivanih potresa, *Geofizika*, Vol. 5.
- Heidbach and Höhne, (2008). CASMI - a tool for the visualization of the World Stress Map data base. *Computers and Geosciences*, 34(7).
- Heidbach, (2004). *Theory of the Finite Element Method*, Munchen.
- Hofmann-Wellenhof et al., (2007). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*, Springer, ISBN 9783211730171.
- Jackson et al., (1994). The horizontal velocity field in the deforming Aegean Sea region determined from the moment tensors of earthquakes. *J. Geophys. Res.* 135.
- Jaeger and Cook (1969). *Fundamentals of rock mechanics*, Barnes and Noble, New York, N.Y. and Methuen, London.
- Jovanović (1971). Određivanje savremenih vertikalnih pomeranja zemljine kore u Jugoslaviji. (na ruskom) XV Generalna skupština Međunarodne geodetske i geofizičke unije, Međunarodna geodetska asocijacija, Moskva, SSSR.
- Kahle et al., (1995). The strain field in NW Greece and the Ionian islands: results inferred from GPS measurements. *Tectonophysics* 249, 41-52.
- Kakkuri, (1997). Postglacial Deformation of the Fennoscandian Crust, *Geophysica*, 33(1), Finnish Geodetic Institute, Finland.
- Kattenhorn, (2013). *Advanced Structural Geology*, Department of Geological Sciences, University of Idaho.

- Karamata, (2006). The geological development of the Balkan Peninsula related to the approach, collision and compression of Gondwanan and Eurasian units. Tectonic Development of the Eastern Mediterranean Region. Geological Society, London, Special Publications, 260.
- Kelly (2013). Foundations of Continuum Mechanics, Department of Engineering Science, University of Auckland.
- King, (2002). Ph. D. Thesis: The dynamics of the Amery ice shelf from a combination of terrestrial and space geodetic data, Centre for Spatial Information Science, University of Tasmania.
- Koch, (1988). Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Kovalevsky J., Mueller I., Kolaczek B., (1989). Reference Frames in Astronomy and Geophysics, Astrophysics and Space Science Library, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Kouba, (2009). A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products, Technical report, Geodetic Survey Division, Natural Resources Canada.
- Langley, (1996). GPS Receivers and the Observables. In Teunisson G. J. P. and Kleusberg A. (eds.): GPS for Geodesy. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Lee et al., 2002, International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Vol. 81A, Int. Assoc. of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI).
- Lelović (2012). Konstitutivne jednačine za pesak i njihova primena u numeričkoj analizi ponašanja trakastog temelja, doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.
- Lemoine et al., (2006). 13 Years of TOPEX/Poseidon precision orbit determination and the 10-fold improvement in expected orbit accuracy, AIAA Astrodynamics Conference.
- Logan, (2012). Finite Element Method, Fifth Edition, USA.
- Luzum and Brian, (2013). The Role of the IERS in the Leap Second.
- Ma C., and al., (1998) The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry, Astronomical Journal, 116(1), pp. 516-546.
- Mader and Czopek, (2008). GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. NGS's National Geodetic Survey, NOS, NOAA, Silver Spring, USA.
- Maksimović (2008). Mehanika tla, IV izdanje, AGM knjiga doo.
- Mao et al., (1999). Noise in GPS coordinate time series. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 104. 2797.
- Marović et al., (2007): Neoalpine Tectonics of Serbia, Belgrade, Serbian Geological Society.
- Маровић, М., Ђоковић, И., Тољић, М. (2002). Неотектонска карта Србије. Министарство за заштиту природних богатстава и животне средине. Република Србија.
- Mayer-Guerr, (2007). ITG-Grace03s: The latest GRACE gravity field solution computed in Bonn, GRACE Science Team Meeting, Potsdam, Germany.

- Means, (1990). Kinematics, stress, deformation and material behavior, *Journal of Structural Geology*, Vol.12, 1990.
- McCarthy, (2000). IERS Conventions (2000). IERS Technical Note, International Earth Rotation Service.
- McCarthy et al., (2008). The Physical Basis of the Leap Second, *Astronomical Journal* 136.
- McCarthy and Petit, (2003). IERS Technical Note No. 32, IERS Conventions 2003, Frankfurt am Main, Germany.
- Means, (1976). *Stress and Strain: Basic Concepts of Continuum Mechanics for Geologists*, Springer-Verlag New York Inc.
- Mendes and Pavlis, (2004). High-accuracy Zenith delay prediction at optical wavelengths. *Geophys. Res. Lett.*, 31.
- Milovanović V., Solarić M. (1980). Seminar: Primjena Dopplerovih opažanja za geodinamičke probleme, *Geodetski list*, Zagreb, 1-3.
- Milovanović i dr. (1994). Multidisciplinarna izučavanja savremenih pomeranja zemljine kore u regionu Jugoslavija, Savezno ministarstvo za nauku, tehnologiju i razvoj, projekat od 1994.
- Milovanović i dr. (2013). *Minerali stena*, Beograd, ISBN 978-86-905531-2-9.
- Milovanovic, D. & Boev, B., in 2001. *Earth, plate tectonics and magmatism* (p. 174).
- Milovanović, D., (1989). Metamorphism of the Serbo-Macedonian massif. *Procc. 28 Inter. Geol. Congr., Abstracts*, 2, 439-441, Washington.
- Moritz, (1984). Geodetic Reference System 1984, *Bulletin Geodesique*, Volume 58, No. 3, The Geodesists Handbook 1984.
- Mueller et al., (1993). Crust–mantle evolution, structure and dynamics of the Alpine Mediterranean region, in *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Crustal dynamics*, Vol. 23, pp. 249–298.
- Naerlović –Veljković, (1990). *Mehanika II*, Naučna knjiga, Građevinski fakultet, Beograd, ISBN 86-23-21061-1.
- NGA National Geospatial-Intelligence Agency, (2014). Standardization Document Department of Defense, World Geodetic System 1984, Its definition and relationships with local geodetic systems, USA.
- Nelson, (2012). *Physical Geology*, Tulane University.
- NIMA, National Imagery and Mapping Agency, (2000). *World Geodetic System 1984, Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*, USA.
- Niell et al., (2006). VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems. *IVS Memorandum* 2006-008v01.
- Nocquet, (2012). Present-day kinematics of the Mediterranean: A comprehensive overview of GPS results, *Tectonophysics*, pp. 220-242.

- Odalović, (2006). Geoid Determination in Serbia, The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics and Hazards, Springer, Netherlands.
- Pavlis et al. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), J. Geophys. Res., Vol.117.
- Pearlman et al., (2007). The international laser ranging service, Adv. Space Res., 30.
- Petit and Luzum, (2010). IERS Technical Note No. 36, URL: www.iers.org.
- Petrović et al., (2015). A new geophysical model of the Serbian part of the East Vardar ophiolite: Implications for its geodynamic evolution, Journal of Geodynamics 90 (2015).
- Peltier, (2004). Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: the ICE-5G (VM2) model and GRACE, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 32.
- Перовић, (2005). Метод најмањих квадрата. Монографија 1, Грађевински факултет, Универзитет у Београду, Србија.
- Perry (2007), Thermal structure of continental lithosphere from heat flow and seismic constraints: Implications for upper mantle composition and geodynamic models, GEOTOP-UQAM-McGill, Montreal, Canada.
- Петровић, (1998). Атлас карата сеизмичког хазарда Републике Србије. Рударско - геолошки факултет, Универзитет у Београду.
- Pichon et al. (1988), Plate kinematics and tectonics leading to the Alpine belt formation; A new analysis. In Processes in Continental Lithospheric Deformation, Special Paper 218, Geological Society of America.
- Pinter et al., (2006). Recent advances in peri-Adriatic geodynamics and future research directions, Springer-Verlag, NATO Advanced Research Workshop Series, Vol. IV/61.
- Pollard and Fletche (2005). Fundamentals of Structural Geology, Cambridge University Press.
- Radovanović (2014) .Teorijska mehanika, Lagranževa i Hamiltonova mehanika, Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.
- Ray et al., (2008). Anomalous harmonics in the spectra of GPS position estimates, GPS Solution, Vol. 12(1).
- Ray, (1999). IERS analysis campaign to investigate motions of the geocenter, IERS Technical Note 25, Observatoire de Paris, Paris.
- Rebischung et al., (2015). The IGS contribution to ITRF2014, 26th IUGG General Assembly, Prague, 28 June 2015.
- Resolutions of the XIXth EUREF Symposium (2011). Chisinau, Moldova. <http://www.euref.eu/>.
- Riedesel and Jordan (1989), Display and assessment of seismic moment tensors. Bulletin of Seismic Society America 79.
- Rummel et al., (2005). Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS), Science rationale. J. Geodyn. 40.

- Sandiford and R. Powell (1990). Some isostatic and thermal consequences of the vertical strain geometry in convergent orogens, *Earth and Planetary Science Letters*, 98 (1990) 154-165.
- Seeber, (2003). *Satellite Geodesy*, Walter de Gruyter, Berlin, New York 2003.
- Schneider, (1982). PhD Thesis: The complex strain approximation in space and time applied to the kinematical analysis of relative horizontal crustal movements, The University of New Brunswick.
- Sikošek and Petrović, (1991). Seismotectonic position and seismic hazard for the territory of Serbia. *Acta Seismologica Yugoslavia*, No. 17.
- Sikošek, (1988). Značaj seizmotektonskih izučavanja za seizmičku rejonizaciju, *Geofizika*, Vol. 5.
- Sillard and Boucher, (2001) A review of algebraic constraints in terrestrial reference frame datum definition, *Journal of Geodesy*, vol. 75.
- Sledzinski et al., (2007). Report presented at the General Assembly of the International Association of Geodesy "Geodynamics of the central Europe", Italy.
- Sovers et al., (1998). Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 70.
- Smith and Dunn, (1980). Long term evolution of the LAGEOS orbit. *J. Geophys. Res. Lett.*, 7.
- Stein and Friedrich, (2014). How much can we clear the crystal ball?, *Astronomy and Geophysics*, 55.
- Stein, S. and C. Stein, (1996). Thermo-mechanical evolution of oceanic lithosphere: implications for the subduction process and deep earthquakes, *Subduction: Top to Bottom*, Geophysical Monograph 96, Am. Geophys. Un., Washington.
- Sušić (2014). Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- Tapley et al., (1993). LAGEOS laser ranging contributions to geodynamics, geodesy, and orbital dynamics, in contributions of space geodesy to geodynamics: Earth dynamics. *Geodyn. Ser.*, 24.
- Teunissen and Kleusberg, (1998). *Quality Control and GPS*, GPS for Geodesy, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Turcotte and Schubert (2002), *Geodynamics*, Second Edition, Cambridge University Press.
- Van Dam et al., (2001). Crustal displacements due to continental water loading, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 28.
- Vaniček, P., 2011. Geoid undulations, interpretations, *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, edited by H. Gupta, Springer, Heidelberg. 1526 pp., ISBN: 978-90-481-8710-0. B
- Vaniček, et al. (2012), Geoid versus quasigeoid: a case of physics versus geometry, *Contributions to Geophysics and Geodesy*, Vol. 42/1.
- Vaniček and Krakiwsky, (1986). *Geodesy: The Concepts*, 2nd edn., North Holland/Elsevier, Amsterdam.

- Walker, (1984). Satellite constellations, *Journal of the British Interplanetary Society*, Vol. 37.
- Webster, (1993). A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System. TR166, University of New Brunswick, Canada.
- Welsch and Zhang, (1983). Einige Methoden zur Untersuchung kongruenter und Affiner Beziehungen in Geodatischen Unberwacungsnetzen zur Ermittlung von Deformationen, Schriftenreihe, Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen, Muenchen, Germany.
- Wells et al., (1986). Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates, Fredericton, N. B., Canada.
- Wessel, (2012). Advanced Plate Tectonics Seminar, Department of Geology and Geophysics, University of Hawai'i at Manoa.
- Wessel and Müller, (2007). Plate Tectonics, in *Treatise on Geophysics*, edited by G. Schubert, pp. 49-98, Elsevier Ltd., Oxford, UK.
- Williams, (2003a). Offsets in Global Positioning System time series, *Journal Geophysical Research*, Vol.108(B6).
- Willis, (2007). Analysis of a future degradation in the DORIS geodetic results related to changes in the satellite constellation. *Adv. Space Res.* 39.
- Willis et al., (2006a). DORIS, from altimetric missions orbit determination to geodesy. *CR Geosci.* 338.
- Wu et al., (2011). Accuracy of the International Terrestrial Reference Frame origin and Earth expansion, *Geophysical Research Letter*, Vol. 38 (L13304).
- Wyllie (1988). Magma Genesis, Plate Tectonics, and Chemical Differentiation of the Earth, *Reviews of Geophysics*, Vol. 26, No. 3, p. 370-404.
- Xu, (2007). *GPS: Theory, Algorithms and Applications*. Springer, ISBN- 9783540727156.
- Закон о државном премеру и катастру, Министарство грађевине и просторног планирања, Република Србија, Службени гласник РС, бр. 72/2009, 18/2010, 65/2013.
- Zlokolica-Mandic, (1998). Structural-Tectonic Elements as a Factor in Cave Development. *Speleological Atlas of Serbia*, Serbian Academy of Sciences and Arts, Belgrade.
- Zoback et al., (1989). Global patterns of tectonic stress, *Nature*, 341 (6240), 291-298.
- <http://www.vugtk.cz/~deformace/pgm/>
- <http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/>
- <http://www.soest.hawaii.edu/wessel/>

Кратка биографија

Рођена сам 21.08.1968. год. у Брусу, Република Србија. Основну и средњу школу завршила сам у Брусу и Београду са одличним успехом. Године 1987. уписала сам Грађевински факултет у Београду, Одсек за геодезију, и све предвиђене испите положила сам са просечном оценом 8.28. Дипломски рад под насловом “Примена програмских пакета COGO-PC Plus, AutoCAD, Surfer и Windows апликација Excel и Word у инжењерској геодезији” одбранила сам 1994. год. са оценом 10. Последиломске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду, смер Референтне геодетске мреже, уписала сам 1994. год. и прописане испите положила са средњом оценом 9.78. Магистарски рад под називом “Анализа могућности метролошког обезбеђења геодетских GPS пријемника” одбранила сам у априлу 2009. год., чиме сам стекла звање магистра техничких наука.

На одсеку за геодезију Грађевинског факултета запослена сам од 1995. године, прво у својству инжењера сарадника, потом као стручни сарадник, а 2003. године изабрана сам у звање асистента приправника за уже научне области Геодетске референтне мреже, Геодетска метрологија и Менаџмент и технологија геодетских радова. Године 2007. изабрана сам у звање асистента приправника на Грађевинском факултету Универзитета у Београду за уже научне области Референтне геодетске мреже и Геодетска метрологија. Од октобра 2009. год. изабрана сам у звање асистента на Грађевинском факултету за уже научне области Референтне геодетске мреже и Геодетска метрологија, са поновним избором 2012. год. за исте научне области.

Током свог досадашњег ангажмана на Грађевинском факултету Универзитета у Београду одржавала сам вежбања из више предмета: Виша геодезија, Геодетска метрологија, Основе геодетских референтних мрежа, Практична настава из геодезије, Теорија сателитског позиционирања, Геодетска астрономија, Мерне методе физичке геодезије, Обезбеђење квалитета геодетских мерења, Рачун изравнања 1 и Рачун изравнања 2, као и из више изборних предмета. У периоду од 2003. год. до 2006. год., одржавала сам и вежбања из предмета: Рачун изравнања 1, Рачун изравнања 2 и Рачун изравнања 3 на Одсеку за геодезију Грађевинског факултета у Подгорици.

Учествовала сам до сада у научно-истраживачком раду у оквиру више домаћих пројеката реализованих у сарадњи са Републичким министарством просвете, науке и технолошког развоја, Савезним министарством за привреду и Републичким геодетским заводом. Учествовала сам на два међународна пројекта у оквиру COST акција. 2013. остварила сам сарадњу са француским институтом IGN, добијајући стипендију Француске амбасаде и Француског института у Србији намењене српским истраживачима за научна истраживања у лабораторијама у Француској.

У оквиру SIDA пројекта са Републичким геодетским заводом била сам члан групе за успостављање Контролног центра GPS референтне мреже Србије. У раду користим све стандардне рачунарске програмске пакете, као и софтвере BERNESI и SATREF за изравнање референтних геодетских мрежа.

Аутор сам или коаутор више научних и стручних радова публикованих у научним часописима и зборницима радова скупова одржаних у земљи и иностранству.

Користим енглески и француски језик.

Удата сам и имам двоје деце.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Виолета М. Василић

број индекса

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Моделирање регионалних деформација Земљине коре и стабилности референтног система

- 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, 11.10.2015.

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Виолета М. Василић

Број индекса

Студијски програм: Геодезија

Наслов рада: Моделирање регионалних деформација Земљине коре и стабилности референтног система

Ментор: Проф. Др Драган Благојевић, дипл.инж.геод.

Потписани/а: Виолета М. Василић

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, 11.10.2015.

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Моделирање регионалних деформација Земљине коре и стабилности референтног система

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, 11.10.2015.

1. Ауторство - Дозвољавање умножавања, 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. Дозвољавање умножавања, 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. Дозвољавање умножавања, 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. Дозвољавање умножавања, 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. Дозвољавање умножавања, 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. Дозвољавање умножавања, 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.