



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Zoran Sušić

**GEODINAMIČKA ANALIZA
POMERANJA ZEMLJINE KORE
REGIONALNOG KARAKTERA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2014



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Redni broj, RBR :		
Identifikacioni broj, IBR :		
Tip dokumentacije, TD :	Monografska publikacija	
Tip zapisa, TZ :	Tekstualni štampani material	
Vrsta rada, VR :	Doktorska disertacija	
Autor, AU :	Zoran R. Sušić, dipl.inž.geod.	
Mentor, MN :	Prof. dr Toša Ninkov	
Naslov rada, NR :	GEODINAMIČKA ANALIZA POMERANJA ZEMLJINE KORE REGIONALNOG KARAKTERA	
Jezik publikacije, JP :	Srpski	
Jezik izvoda, JL :	Srpski, Engleski	
Zemlja publikovanja, ZP :	Republika Srbija	
Uže geografsko područje, UGP :	Vojvodina	
Godina, GO :	2014	
Izdavač, IZ :	Autorski reprint	
Mesto i adresa, MA :	21000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6	
Fizički opis rada, FO : (poglavlja/strana/ citata/tabela/slika/grafika/priloga)	9/196/149/17/63/-/4	
Naučna oblast, NO :	Geodezija i geomatika	
Naučna disciplina, ND :	Geodezija i geomatika – Deformaciona analiza i merenja	
Predmetna odrednica/Ključne reči, PO :	Geodezija, geodinamika, geodetska deformaciona analiza, strejn analiza, regionalna pomeranja Zemljine kore, GPS/GNSS	
UDK		
Čuva se, ČU :	U biblioteci Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Republika Srbija,	
Važna napomena, VN :		
Izvod, IZ :	Stanje Zemljine kore određeno je istovremenim i suprotstavljenim uticajem endodinamičkih i egzodinamičkih procesa. Površinski slojevi omotača Zemljine kore su u stalnom pokretu pod dejstvom uticaja, kao što su promena nivoa podzemnih voda, tektonske pojave, klizišta itd. Značajne deformacije mogu se javiti kao posledica niza regionalnih i lokalnih naponskih stanja, posebno u graničnim zonama litosfernih ploča, gde se akumuliraju naponi i javljaju nelinearne interseizmičke deformacije. U disertaciji je prikazano istraživanje pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera sa geodetskog aspekta, na osnovu ponovljenih opažanja metodom satelitskog pozicioniranja, čime je dat doprinos multidisciplinarnom razumevanju stanja Zemljine kore.	
Datum prihvatanja teme, DP :	01.07.2013.	
Datum odbrane, DO :		
Članovi komisije, KO :		
Predsednik:	Prof. dr Miro Govedarica, redovni profesor	
Član:	Prof. dr Boško Pribičević, redovni profesor	
Član:	Doc. dr Vladimir Bulatović, docent	
Član:	Prof. dr Ivan Aleksić, redovni profesor	Potpis mentora
Član, mentor:	Prof. dr Toša Ninkov, redovni profesor	



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Text material, printed
Contents code, CC :	PhD Thesis
Author, AU :	Zoran R. Sušić, MSc geod. eng.
Mentor, MN :	Toša Ninkov, PhD geod. eng, full professor
Title, TI :	A GEODYNAMICAL ANALYSIS OF EARTH'S CRUST MOVEMENTS OF REGIONAL CHARACTER
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian and English
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina
Publication year, PY :	2014
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	9/196/149/17/63/-/4
Scientific field, SF :	Geodesy and geomatics
Scientific discipline, SD :	Geodesy and geomatics – Deformation analysis and measurement
Subject/Key words, S/KW :	Geodesy, geodynamics, geodetic deformation analysis, strain analysis, regional displacement of the Earth' crust, GPS/GNSS
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Republic of Serbia
Note, N :	
Abstract, AB :	The state of the Earth's crust is determined by the simultaneous and opposed influence of the endodynamic and exodynamic processes. The surface layers of the Earth's crust envelope are in the state of permanent moving due to divers influences, such as the level variation of underground waters, tectonic phenomena, landslides, etc. Significant deformations can arise as a consequence of a number of regional and local strain states, especially in the boundary zones of lithosphere plates where strains are accumulated and non-linear interseismic deformations appear. The subject of the thesis is a study of movements of the Earth's crust of regional character from the aspect of geodesy, on the basis of repeated observations by applying the satellite positioning method. In this way a contribution is given to a multidisciplinary concept of the state of the Earth's crust.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	01.07.2013.
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: PhD Miro Govedarica, full professor
	Member: PhD Boško Pribičević, full professor
	Member: PhD Vladimir Bulatović, assistant professor
	Member: PhD Ivan Aleksić, full professor
	Member, Mentor: PhD Toša Ninkov, full professor
	Mentor's sign

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. PREDMET I CILJ NAUČNOG ISTRAŽIVANJA	1
1.2. POLAZNE HIPOTEZE	2
1.3. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA	3
1.4. ORGANIZACIONA STRUKTURA DISERTACIJE	6
2. TEKTONSKA AKTIVNOST I GEOLOŠKI STRUKTURNI ODNOSI	9
2.1. GEODINAMIČKI KONCEPT TEKTONSKIH PLOČA	9
2.2.1. Globalna seizmičnost u geodinamici tektonskih ploča.....	12
2.2.2. Neotektonska aktivnost sa aspekta geoloških i seizmoloških analiza na predmetnoj oblasti istraživanja.....	14
3. AKVIZICIJA PODATAKA ZA ANALIZU DEFORMACIJA PRIMENOM SAVREMENIH TEHNOLOGIJA	19
3.1. RADARSKA INTERFEROMETRIJA	19
3.1.1. Princip radarskog snimanja	19
3.1.2. SAR interferometrija	20
3.1.2.1. Određivanje komponente pomeranja terena	23
3.1.3. PS-InSAR	25
3.2. PRIMENA TEHNOLOGIJE LASERSKOG SKENIRANJA U IDENTIFIKACIJI POMERANJA TERENA	28
3.2.1. Metode LIDAR analize pomeranja iz više epoha.....	31
3.3. DUGOBAZISNA INTERFEROMETRIJA (VLBI)	33
3.3.1. Koncept VLBI	34
3.3.2. Evropska geodetska VLBI mreža.....	35
3.4. PRIMENA GPS/GNSS TEHNOLOGIJE U GEODINAMICI	38
3.4.1. Primeri geodinamičkih mreža u svetu	38
4. GAUS-MARKOVLJEV MODEL IZRAVNANJA I MNK OCENE	43
4.1. TEORIJSKI KONCEPT GAUS-MARKOVLJEVOG MODELA	43
4.2. PROBLEMI DEFINISANJA DATUMA GEODETSKIH MREŽA	45

4.2.1.	Analitičko rešenje problema datuma	47
4.2.2.	Datumski uslovi i MNK ocene nepoznatih parametara.....	49
4.3.	OPŠTA DATUMSKA TRANSFORMACIJA	53
5.	SISTEMATIZACIJA MODELA U DEFORMACIONOJ ANALIZI	56
5.1.	KONVENCIONALNA DEFORMACIONA ANALIZA	59
5.1.1.	Modeli kongruencije.....	59
5.1.1.1.	Transformacija obe epohe u zajednički datum	61
5.1.1.2.	Testiranje podudarnosti datumskih tačaka	62
5.1.1.3.	Lokalizacija deformacija.....	62
5.1.1.4.	Transformacija mreže u novu računsku bazu i test kongruencije na grupi preostalih datumskih tačaka	63
5.1.1.5.	Finalno testiranje deformacija primenom single-point testa.....	64
5.1.2.	Robusne metode	65
5.1.3.	Detekcija pomeranja analizom krutog tela	68
5.1.4.	Analiza pomeranja primenom strejn modela.....	72
5.1.5.	Polinomski deformacioni modeli	77
5.2.	KINEMATIČKI MODELI	79
5.3.	DINAMIČKI MODELI.....	80
5.3.1.	Opis dinamičkog deformacionog procesa	81
6.	MODELI U NAPREDNOJ DEFORMACIONOJ ANALIZI	83
6.1.	SISTEMI IDENTIFIKACIJE PRIMENOM PARAMETARSKIH I NEPARAMETARSKIH MODELA	83
6.1.1.	Parametarski modeli	83
6.1.2.	Neparametarski modeli.....	86
6.2.	FUZZY TEHNOLOGIJA I VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE U DEFORMACIONOJ ANALIZI	87
6.2.1.	Modeliranje deformacionih procesa primenom veštačkih neuronskih mreža	88
6.2.1.1.	Određivanje optimalne strukture mreže.....	89
6.2.2.	Fuzzy pristup u deformacionim procesima	90
6.3.	ALARMNI SISTEMI U OTKRIVANJU DEFORMACIJA	93

7. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA POMERANJA ZEMLJINE KORE REGIONALNOG KARAKTERA	95
7.1. UVOD U GEODINAMIČKA ISTRAŽIVANJA NA PODRUČJU JUGOISTOČNOG DELA PANONSKOG BASENA	95
7.2. REALIZACIJA GPS/GNSS MERENJA U SRBIJI.....	95
7.2.1. Projektovanje i realizacija SREF mreže	96
7.2.1.1. Stabilizacija tačaka SREF mreže	97
7.2.1.2. Realizacija druge GPS/GNSS merne kampanje	98
7.2.1.3. Matematički model obrade merenja vektora u SREF mreži.....	98
7.2.1.4. Zatvaranje poligona	104
7.3. DEFORMACIONI GEODINAMIČKI MODEL	107
7.3.1. Izravnjanje GPS/GNSS merenja i MNK ocene nepoznatih parametara.....	108
7.3.1.1. Rezultati izravnjanja u obe merne epohe.....	109
7.3.1.2. Testiranje homogenosti tačnosti realizovanih opažanja u obe merne epohe.....	114
7.3.2. Deformaciona analiza geodinamičkog modela SREF mreže	115
7.3.2.1. Lokalizacija pomeranja tačaka deformacionog modela.....	120
7.3.2.2. Interpolacija polja pomeranja	127
7.3.3. Geometrijska analiza deformacija primenom mehanike kontinuuma	128
7.3.3.1. Određivanje parametara strejn tenzora iz ponovljenih GPS/GNSS merenja na području jugoistočnog dela Panonskog basena	132
7.3.4. Geostatistička interpolacija brzina pomeranja.....	138
7.3.5. Korelacija parametara geometrijske analize sa neotektonskim istraživanjima	146
8. DISKUSIJA I ZAKLJUČNA RAZMATRANJA.....	151
8.1. PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA	153
9. LITERATURA	155
PRILOG 1. Vektori pomeranja na tačkama formiranog deformacionog modela pasivne referentne mreže.....	168
PRILOG 2. Polje pomeranja na predmetnoj oblasti istraživanja	170
PRILOG 3. Polje parametara strejna na predmetnoj oblasti istraživanja.....	172
PRILOG 4. Komponente parametara strejn tenzora u definisanom gridu.....	174

SPISAK TABELA

Tabela 3.1. Horizontalne i vertikalne brzine pomeranja u jedinicama [mm/god] sa srednjim kvadratnim greškama u [mm] u okviru Evropske geodetske VLBI mreže.....	37
Tabela 4.1. Funkcionalni i stohastički model posrednog izravnjanja.....	43
Tabela 4.2. Parametri datuma u dvodimenzionalnim geodetskim mrežama.....	47
Tabela 5.1. Klasifikacija deformacionih modela (Heunecke & Welsch, 2000).....	58
Tabela 5.2. Geodetsko modeliranje deformacija u prostornom i vremenskom smislu	59
Tabela 7.1. Prosečna standardna odstupanja procesiranih baznih linija SREF za obe kampanje	104
Tabela 7.2. Sumarni podaci o izravnjanju merenja prve merne epohe (minimalno ograničenje)	110
Tabela 7.3. Sumarni podaci o izravnjanju merenja druge merne epohe (minimalno ograničenje)	111
Tabela 7.4. Sumarni podaci o izravnjanju merenja prve merne epohe (parcijalni minimalni trag)	112
Tabela 7.5. Sumarni podaci o izravnjanju merenja druge merne epohe (parcijalni minimalni trag)	113
Tabela 7.6. Preliminarni test kongruencije datumskih tačaka u obe merne epohe.....	116
Tabela 7.7. Sumarni podaci o zajedničkom izravnjanju prve i druge merne epohe, sa parcijalnim minimalnim tragom na pretpostavljene stabilne tačke.....	118
Tabela 7.8. Sumarni podaci o elementima pomeranja sa relativnim elipsama grešaka $1 - \alpha = 0.95$	124
Tabela 7.9. Elementi deformacionih parametara strejn tenzora između dve GPS/GNSS merne kampanje 1998/2002 i 2011/2012.....	135
Tabela 7.10. Statistika interpolacije po metodi obični kriging.....	143
Tabela 7.11. Statistika interpolacije po metodi inverznih rastojanja.....	144
Tabela 7.12. Statistika interpolacije po metodi kokriging.....	145

SPISAK SLIKA

Slika 1.1. Glavne tektonske jedinice u Karpatsko-Panonskom basenu.....	5
Slika 2.1. Podela litosfere na veće i manje tektonske ploče.....	10
Slika 2.2. Granične zone tektonskih ploča, divergentne (levo), konvergentne, kolizione (u sredini) i transformne, klizajuće (desno).....	11
Slika 2.3. Kvantifikovanje kretanja ploča bazirano na GNSS merenjima od strane agencije NASA.....	11
Slika 2.4. Pokretački mehanizmi kretanja tektonskih ploča povezani sa pojavom zemljotresa (©1994 Enciclopaedia Britannica, Inc.).....	13
Slika 2.5. Digitalni model terena Panonskog basena (levo, http://geophysics.elte.hu) sa prostornom dispozicijom tektonskih jedinica (desno, www.sciencedirect.com).....	14
Slika 2.6. Normalni rasedi (levo), reversni rasedi (u sredini) i transkurentni ili klizajući rasedi (desno).....	15
Slika 2.7. Neotektonska karta Republike Srbije (autori: Marović, M., Đoković, I., Toljić, M.)... 16	16
Slika 3.1. Osnovni princip radarskog snimanja površine terena	19
Slika 3.2. Princip snimanja sa geometrijskim parametrima satelitske interferometrije SAR sistema	21
Slika 3.3. Primer interpretacije pomeranja na interferogramu u slučaju kada nema deformacija (levo), kada se radi o blagim deformacijama (u sredini) i u slučaju naglih promena terena (desno).....	24
Slika 3.4. Interferogram dobijen od podataka prikupljenih 13.8.1999. i 17.9.1999. godine korišćenjem ROIPAC softvera (levo), kartirane deformacije zemljine površine pre i posle zemljotresa u pokrajini Izmit (desno) (Aydöner et al., 2004).....	24
Slika 3.5. Različite vrste veštačkih PSInSAR reflektora, mobilni reflektor (levo) i ugaoni reflektori (desno).....	26
Slika 3.6. Gustina radarskih fazno stabilnih meta na urbanom području Holandije (Gehlot et al., 2005)	27
Slika 3.7. PS-InSAR podaci o pomeranjima za područje istočne obale Great Valley (Final technical report, National Earthquake Hazard Reduction Program, Roland Burgman, University of California).....	27

Slika 3.8. Princip laserskog skeniranja sa vazdušnih platformi	28
Slika 3.9. Digitalni model površi (DSM) prvog (levo) i poslednjeg eha (u sredini) i digitalni model terena (DTM) (desno)	29
Slika 3.10. Klizište La Frasse u Švajcarskoj: 3D prikaz osenčenog reljefa klizišta (levo), sa identifikovane tri zone koje se brže pomeraju u odnosu na okruženje, 3D prikaz zapremine identifikovanih zona (desno).....	30
Slika 3.11. Radio teleskop prečnika 100 m u blizini Effelsberg-a u Nemačkoj (levo), principi VLBI dugobazisne interferometrije (desno)	34
Slika 3.12. Raspored evropske VLBI mreže (EVN), žuto-crveni krugovi su postojeće operative stanice, plavi i plavo-crveni krugovi označavaju nove stanice koje još uvek nisu operative, ljubičasti se odnose na stanice koje povremeno učestvuju u opažanjima, a zeleno-braon su stanice na kojima su sprovedeni početni testovi za puštanje u režim rada (http://www.evlbi.org).....	35
Slika 3.13. Vektori horizontalnih (levo) i vertikalnih (desno) pomeranja sa elipsama grešaka u odnosu na stabilnu stanicu Wetzell (Haas et. al., 2000).....	37
Slika 3.14. Primer stabilizacije tačaka mađarske geodinamičke mreže (HGRN)	38
Slika 3.15. Centralno-evropska GPS geodinamička referentna mreža (CEGRN). Na slici je prikazana 31 originalna tačka. Mreža je proširena 1999. godine (CEGRN-2) i udvostručen je broj tačaka, pri čemu su originalne tačke ostale integralni deo CEGRN mreže (Grenerczy, 2000).	39
Slika 3.16. Tektonska karta Karpatskog regiona sa geološkim jedinicama (Horváth, 1993, slika levo), distribucija 6 CEGRN stanica na glavnim tektonskim jedinicama (Dinter & Schmitt, 2001, slika desno).....	41
Slika 5.1. Deformacija kao element dinamičkog procesa	56
Slika 5.2. Hijerarhija sistema u okviru teorije sistema (Heunecke, 1995; Welsch, 1996)	57
Slika 5.3. Hijerarhija modela u geodetskoj deformacionoj analizi (Heunecke, 1995; Welsch, 1996)	58
Slika 5.4. Geometrijska interpretacija parametara homogenog strejna	75
Slika 5.5. Poprečni presek terena sa tendencijom sleganja	78
Slika 5.6. Skica betonske brane sa regularnim deformacijama	78
Slika 5.7. Grafička interpretacija očekivanih deformacija za objekat „Otvoreni kop rudnika mrkog uglja” (Caspary, 2000).....	79
Slika 5.8. Dinamičko modeliranje konstrukcije	80

Slika 6.1. Metode sistema identifikacije (Heunecke, 1995; Welsch 1996).....	83
Slika 6.2. Pregled tehnike Kalmanovog filtriranja (Heunecke, 1995).....	85
Slika 6.3. Višeslojna neuronska mreža.....	88
Slika 6.4. Opis deformacionog procesa primenom fuzzy pravila	91
Slika 6.5. Primer grupisanja tačaka u tzv. klastere, levo, za 2D geodetsku mrežu Delft, desno, sa generisanim granicama između različitih klasa odnosno blokova sa sličnim obrascem kretanja (Fletling, 2008).....	92
Slika 6.6. Alarmni sistem GOCA u postupku monitoringa različitih vrsta objekata (www.goca.info)	94
Slika 7.1. Stabilizacija tačaka SREF mreže (Republički geodetski zavod, Beograd).....	98
Slika 7.2. Primer zatvaranja poligona u okviru pasivne geodetske referentne mreže SREF	105
Slika 7.2a. Proces obrade baznih linija SREF mreže u <i>STAR*NET</i> okruženju.....	106
Slika 7.3. Dispozicija tačaka formiranog deformacionog geodinamičkog modela pasivne referentne mreže, sa geološkim pozicioniranjem većih raseda na predmetnoj oblasti istraživanja (sa generisanim digitalnim modelom terena).....	107
Slika 7.4. Primena relativnih elipsi grešaka u analizi deformacija, nestabilna tačka (levo) i stabilna tačka (desno).....	121
Slika 7.5. Vektori pomeranja tačaka u horizontalnoj ravni sa relativnim elipsama grešaka, nivo poverenja 95 % (sa uvećanjem od 100.000 puta), između prve GPS/GNSS merne epohe [1998-2002] i druge GPS/GNSS merne epohe [2011-2012]	122
Slika 7.6. Vektori pomeranja sa relativnim elipsama poverenja na Neotektonskoj karti Republike Srbije	123
Slika 7.7. Interpolaciono polje pomeranja sa intervalom u gridu od 5 km	127
Slika 7.8. Trougaoni konačni element kao osnovna strejn konfiguracija (levo) i strejn elipsa (desno).....	134
Slika 7.9. Interpolaciono polje parametara strejna na predmetnoj oblasti istraživanja	136
Slika 7.10. Područja sa izraženim dilatacionim i kompresivnim režimom rasedanja terena	137
Slika 7.11. Područja sa prisutnim transkurentnim rasedima lokalnog karakter	137
Slika 7.12. Empirijski modelovani semivariogram (levo) i kovarijansa (desno) primenom metode običnog kriginga.....	142
Slika 7.13. Mapa predikcije brzina pomeranja sa izolinijama na oblasti istraživanja [mm/god], primenom metode običnog kriginga	143
Slika 7.14. Regresiona funkcija prediktovanih i merenih vrednosti metodom obični kriging....	143

Slika 7.15. Mapa predikcije brzina pomeranja sa dispozicijom „merenih” brzina na oblasti istraživanja [mm/god], primenom metode inverznih rastojanja (IDW).....	144
Slika 7.16. Regresiona funkcija prediktovanih i merenih vrednosti metodom inverznih rastojanja	144
Slika 7.17. Mapa predikcije brzina pomeranja sa dispozicijom „merenih” brzina na oblasti istraživanja [mm/god], primenom metode običnog kokriginga (korišćenje reljefa terena).	145
Slika 7.18. Regresiona funkcija prediktovanih i merenih vrednosti metodom kokriging.....	145
Slika 7.19. Anomalijska zona severne i istočne margine Fruške gore	146
Slika 7.20. Greda Beograd-Orlovat na zapadnoj granici Južnobanatskog rova, u severnom produženju Velikomoravskog rova: strukture u korespondenciji sa dilatacionim režimom rasedanja terena na bazi strejn analize u okviru geodetskih istraživanja	147
Slika 7.21. Rased u domenu Severnobačkog praga.....	148
Slika 7.22. Transkurentni rased Opovo-Miletićevo.....	149
Slika 7.23. Lokalna kompresija u oblasti oko reke Tamiš	149
Slika 7.24. Vektori pomeranja na tačkama SREF mreže u široj oblasti oko Vršачkih planina ..	150

SPISAK SKRAĆENICA

AGREF – austrijska geodinamička mreža

AGROS – aktivna geodetska referentna osnova Srbije

APKIM2000 – globalni kinematički model tektonskih ploča (eng. *The Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model 2000*)

CEGRN - centralno-evropska GPS geodinamička referentna mreža (eng. *The Central European GPS Geodynamic Reference Network*)

COMPASS – kineski satelitski navigacioni sistem

CRODYN – geodinamička mreža u Hrvatskoj

DEM – digitalni model visina (eng. *Digital Elevation Model*)

D-InSAR – diferencijalna interferometrija (eng. *Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar*)

DORIS – francuski satelitski sistem za određivanje satelitskih orbita (eng. *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*)

DTM – digitalni model terena (eng. *Digital Terrain Model*)

ETRF – Evropski terestrički referentni sistem (eng. *European Reference Terrestrial Frame*)

ETRS89 – *European Terrestrial Reference System 1989*

EUREF – Evropski referentni koordinatni sistem (eng. *European reference frame*)

GALILEO – globalni navigacioni satelitski sistem pod kontrolom EU i Evropske svemirske agencije

GLONASS – ruski globalni navigacioni satelitski sistem razvijen od strane Ruske svemirske agencije

GNSS – *Global Navigation Satellite System*

GOCA – alarmni sistem za potrebe identifikacije deformacija (eng. *GNSS/LPS/LS-based online Control and Alarm System*)

GPS – globalni pozicioni sistem (eng. *Global Positioning System*)

GRID - metoda generisanja digitalnog modela terena u formi pravilne mreže (grida)

HGRN - mađarska GPS geodinamička referentna mreža (eng. *The Hungarian GPS Geodynamic Reference Network*)

IDW – metoda interpolacije inverznih rastojanja (eng. *Inverse Distance Weighted*)

IGS – međunarodni GPS servis za geodinamiku (eng. *International GPS Service for Geodynamics*)

IMU – inercijalna merna jedinica (eng. *Inertial Measurement Unit*)

InSAR – interferometrijski radar sa sintetičkom blendom (eng. *Interferometric Syntetic Aperture Radar*)

ITRF96 – *International Reference Frame 1996*

IWST – iterativna transformacija sličnosti (eng. *Iterative Weighted Similarity Transformation*)

LIDAR – tehnologija laserskog skeniranja terena (eng. *Light Detection and Ranging*)

MNK – metod najmanjih kvadrata

NASA – Nacionalna vazduhoplovna i svemirska administracija, koja je odgovorna za civilni deo svemirskog programa SAD-a

NAVSTAR - *Navigation Signal Timing and Ranging GPS*

NNR-NUVEL – geofizički kinematički model pomeranja Zemljine kore

PS-InSAR – radarska interferometrija sa fazno stabilnim radarskim metama (eng. *Persistent Scatterer*)

RGB/NIR - *Red-Green-Blue, Near Infra Red*

SAR - radar sa sintetičkom blendom (eng. *Syntetic Aperture Radar*)

SREF – pasivna geodetska referentna osnova Republike Srbije

TIN – metoda generisanja digitalnog modela terena u formi nepravilnih trouglova (eng. *Triangular Irregular Network*)

VLBI – tehnologija dugobasisne interferometrije (eng. *Very Long Baseline Interferometry*)

Rezime

Na osnovu teorije o globalnoj tektonici ploča, Zemljina kora je sastavljena od niza većih ili manjih delova litosfere, koji plutaju po subfluidnoj astenosferi i kreću se određenim brzinama. Površinski sloj Zemlje predstavlja predmet najvišeg stepena istraživanja kada su u pitanju geodinamički procesi, iz razloga pristupačnosti njegovog direktnog proučavanja.

Zone od značaja za geodinamička istraživanja odnose se na međusobne granice tektonskih ploča, koje po karakteru kretanja mogu biti konvergentne, divergentne i transformne. Na osnovu dugotrajnih prikupljanja podataka o recentnoj građi Zemljine kore i pomeranjima njenih specifičnih delova, moguće je rekonstruisati model stvaranja današnjih ploča Zemlje. Regionalna i lokalna naponska stanja su pod uticajem globalnih tektonskih procesa. Tradicionalni zadatak geodetske deformacione analize odnosi se na istraživanje pomeranja površinskog omotača Zemljine kore i svih izgrađenih veštačkih struktura na njoj. Površinski slojevi omotača Zemljine kore su u stalnom pokretu usled različitih uticaja, koji su pre svega endogenog karaktera. Razvojem tehnologije satelitskog pozicioniranja obezbeđuju se uslovi za precizno određivanje geodinamičkih pomeranja, nezavisno od atmosferskih uslova.

Republika Srbija, u globalnom geodinamičkom pogledu, pripada delu Evroazijske ploče, sa severnim delom u okviru Panonskog basena (područje Vojvodine) i centralnim i južnim delom u oblasti Dinarida. Na osnovu brojnih istraživanja na bazi satelitskih merenja i dugobazisne interferometrije, konstatovano je da Jadranska ploča predstavlja glavni pokretač tektonskih procesa i prenosa kompresije između Evroazije i Afrike, što u velikoj meri utiče na tektoniku centralnog evropskog regiona, posebno Panonskog basena.

Predmet naučnog istraživanja u disertaciji zasniva se na određivanju geodinamičkog pomeranja Zemljine kore na području regionalnog karaktera, na osnovu ponovljenih merenja tehnologije satelitskog pozicioniranja. Cilj naučnog istraživanja, saglasno predmetu, jeste da utvrdi karakter kretanja pojedinačnih blokova, na osnovu detekcije signifikantnih pomeranja na tačkama pasivne geodetske referentne mreže, koja pokriva područje jugoistočnog dela Panonskog basena. Na osnovu rezultata geodetske deformacione analize, strejn analize i geostatističke interpolacije dobijenih pomeranja, sprovedena je analiza korespondencije dve nezavisno primenjene metodologije utvrđivanja recentnih tektonskih pomeranja, geodetske i geološke.

Istraživanje primenjeno u disertaciji ima cilj da doprinese boljem razumevanju stanja Zemljine kore i uspostavljanju standardizovane terminologije u okviru multidisciplinarnih geodinamičkih analiza.

Ključne reči: geodezija, geodinamika, geodetska deformaciona analiza, strejn analiza, regionalna pomeranja Zemljine kore, GPS/GNSS.

Summary

On the basis of the theory of global plate tectonics the Earth's crust is composed of a number of larger or smaller lithosphere parts floating on subfluid asthenosphere and moving at certain velocities. The surface level of the Earth appears as the subject of the highest research degree when the geodynamical processes are the topic for reason of accessibility of its direct study.

Zones of interest to geodynamical research concern the boundaries between tectonic plates, which according to their motion can be convergent, divergent and transform. On the basis of the data, gathered over a sufficiently long time, and which concern the recent structure of the Earth's crust, as well as the movements of its specific parts, it is possible to reconstruct the model of formation for the Earth plates existing today. Regional and local strain states are affected by the global tectonic processes. The traditional task of geodetic deformation analysis concerns the study of movements in the surface envelope of the Earth's crust and in all artificial structures on it. The surface layers of the Earth's crust envelope are in the state of permanent moving due to divers influences, which are primarily endogenous. The development of the satellite positioning technology has provided conditions for precise determination of geodynamical movements, independently of atmospheric conditions.

The territory of the Republic of Serbia in the global geodynamic view belongs to a part of the Eurasian plate with its northern part within the Pannonian Basin (Vojvodina region) and the central and southern parts within the Dinarides region. Numerous studies based on satellite measurements and long-base interferometry have indicated the Adriatic plate as the main cause of tectonic processes and compression transfer between Eurasia and Africa which has a significant influence on the tectonics of the Central European Region, especially Pannonian Basin.

The subject of scientific research in the thesis is based on a determination of geodynamic movements of the Earth's crust within a regional area, on the basis of repeated measurements of satellite positioning technology. The objective of scientific research, according to the subject, is to establish the character of moving for individual blocks on the basis of detection of significant movements on the points of the passive geodetic network which covers the area of the southeastern part of the Pannonian Basin. On the basis of the results of the geodetic deformation analysis, strain analysis and geostatistical interpolation of the obtained movements a correspondence analysis concerning two methodologies for establishing recent tectonic movements, geodetic and geological ones applied independently, is carried out.

The study applied in the thesis is aimed at contributing to a better understanding of the Earth's crust state and to introducing a standardised terminology within the framework of multidisciplinary geodynamic analyses.

Key words: geodesy, geodynamics, geodetic deformation analysis, strain analysis, regional movements of the Earth's crust, GPS/GNSS.

Zahvalnica

Zahvaljujem se mentoru prof. dr Toši Ninkovu na nesebičnoj profesionalnoj i stručnoj pomoći pri nastajanju ove doktorske disertacije i savetima koji su značajno unapredili ovaj rad.

Takođe, zahvaljujem se članovima komisije za ocenu disertacije prof. dr Miru Govedarici, prof. dr Bošku Pribičeviću, prof. dr Ivanu Aleksiću i doc. dr Vladimiru Bulatoviću, na korisnim savetima i trudu uloženom u pregled disertacije.

Veliku zahvalnost dugujem prof. dr Marinku Toljiću sa Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu, koautoru Neotektonske karte Republike Srbije, na korisnim savetima, diskusiji i stručnoj pomoći tokom pisanja ove disertacije.

Značajnu pomoć dobio sam od strane predstavnika Republičkog geodetskog zavoda iz Beograda, odnosno Sektora za osnovne geodetske radove. Zahvaljujem se Vladimiru Milenkoviću, pomoćniku direktora, diplomiranim inženjerima geodezije Vanču Božinovu i Aleksandru Matoviću. Takođe, najiskrenije se zahvaljujem svim zaposlenima u ovom sektoru koji su marljivo učestvovali na prikupljanju terenskih podataka korišćenih za potrebe eksperimentalnih istraživanja sprovedenih u ovoj disertaciji.

Želim da se zahvalim kolegama sa Departmana za građevinarstvo i geodeziju Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, kao i kolegama sa Studijskog programa za geodeziju i geomatiku.

Zahvaljujem se kolegama iz privrednog društva GeoGIS Konsultanti iz Beograda na profesionalnoj saradnji i podršci.

Posebnu zahvalnost dugujem supruzi Jeleni na neiscrpnj podršci, ljubavi i razumevanju, kao i sestri Mileni i ocu Radomiru na stalnoj podršci, savetima i velikom doprinosu ovom radu.

Na kraju, želeo bih da posvetim ovaj rad svojoj majci.

1. UVOD

1.1. PREDMET I CILJ NAUČNOG ISTRAŽIVANJA

Primena geodetskih metoda za potrebe određivanja geodinamičkih pomeranja bazira se na ispitivanju vremenske evolucije referentnog sistema, odnosno geodetske referentne mreže, koja je realizovana fizički stabilizovanim tačkama sa određenim trodimenzionalnim koordinatnim vrednostima. Na osnovu preciznosti ponovljenih geodetskih merenja u različitim vremenskim trenucima, mogu se u tektonski aktivnim područjima odrediti pomeranja u prostornom i vremenskom smislu, na milimetarskom nivou tačnosti. Sa geodetskog aspekta, predmet interesovanja za Zemljinu kora bazira se prvenstveno na geometrijskom smislu, što daje doprinos interdisciplinarnom razumevanju prirode i stanja Zemljine kore. Stanje Zemljine kore je određeno istovremenim i suprotstavljenim uticajem endodinamičkih (unutrašnjih) i egzodinamičkih (spoljašnjih) procesa, procesa čije je poreklo u unutrašnjosti Zemlje i raznih spoljašnjih uticaja (luni-solarni uticaj, uticaj ostalih planeta Sunčevog sistema, itd.).

Početu teoriju o tektonici ploča izložio je nemački meteorolog Alfred Wegener 1915. godine. Wegener nije bio prvi koji je primetio izrazitu podudarnost oblika kontinentalnih krajeva zapadne Afrike i istočnih delova južne Amerike (Magelan i drugi istraživači su primetili ovu neobičnost na svojim kartama), ali je jedan od prvih koji je shvatio da se Zemljina površina promenila kroz vreme i da su kontinenti, koji su sada razdvojeni, u prošlosti, u jednom trenutku možda bili spojeni. U to vreme, ova ideja je izazivala izvesnu sumnjičavost, s obzirom na to da nije moglo da se pronađe odgovarajuće objašnjenje zbog čega je došlo do pomeranja kontinenata. Naučne potvrde ove ideje potvrđene su šezdesetih godina dvadesetog veka, na osnovu brojnih geofizičkih metoda istraživanja na većem broju uzoraka vulkanskih stena iz različitih geomagnetskih epoha, određivanja gustine stenskih masa na osnovu brzine prostiranja seizmičkih talasa kroz njih, kao i na bazi geoloških istraživanja i istražnih bušenja. Na osnovu tih rezultata je definisana nova teorija o globalnoj tektonici ploča, koja kaže da je Zemljina kora sastavljena od većeg broja velikih tektonskih ploča, odnosno da je sastavljena od niza većih ili manjih delova litosfere, koji plutaju na subfluidnoj astenosferi i kreću se određenim brzinama. Karakteristična mesta odnose se na međusobne granice ovih ploča, koje mogu biti divergentne (na kojima se ploče razilaze), konvergentne (duž kojih dolazi do njihovog sučeljavanja) i transformne (duž kojih se ploče pomeraju bočno jedna u odnosu na drugu).

Razvojem GPS/GNSS tehnologije omogućeno je određivanje pomeranja u horizontalnom i vertikalnom smislu, istovremeno. Pre razvoja ove tehnologije, realizacija horizontalnih merenja se obavljala triangulaciono-trilateracionim metodama, a u vertikalnom smislu metodama geometrijskog nivelmana, najčešće u okviru trigonometrijskih ili mikrotrigonometrijskih mreža, posebno projektovanih za geodinamičke potrebe. Međutim, geodinamička analiza, u ovom periodu, bila je limitirana činjenicom da se dve vrste podataka nikada nisu prikupljale istovremeno, dok su današnji GPS/GNSS prijemnici prenosivi i rade pod svim atmosferskim uslovima, pri čemu između njih nije neophodna fizička vidljivost. Na teritoriji Republike Srbije, odnosno Vojvodine, do sada nije bilo analiza na osnovu ponovljenih GNSS merenja na regionalnim područjima istraživanja, kako bi se deformacionom analizom utvrdio trend geodinamičkih pomeranja u prostornom i vremenskom smislu. Republički geodetski zavod Republike Srbije je, u okviru projekta realizacije prostornog referentnog sistema, uspostavio pasivnu referentnu mrežu pod nazivom SREF, pri čemu je prva GPS/GNSS kampanja

realizovana u periodu od 1998. do 2002 godine za kompletnu teritoriju Republike Srbije. U cilju osiguranja integriteta i praćenja vremenske evolucije prostornog koordinatnog referentnog sistema, Republički geodetski zavod je realizovao drugu mernu GPS kampanju na tačkama pasivne geodetske referentne mreže tokom 2011. i 2012. godine.

Predmet (problem) naučnog istraživanja disertacije predstavlja određivanje regionalnih geodinamičkih pomeranja Zemljine kore, na osnovu ponovljenih GPS/GNSS merenja na fizički stabilizovanim tačkama pasivne geodetske referentne mreže i istraživanje mogućnosti korišćenja pasivnih geodetskih mreža za potrebe geodinamičke analize pomeranja Zemljine kore. Geodetske metode određivanja geodinamičkih pomeranja Zemljine kore odnose se na interpretaciju upoređenja geodetskih merenja realizovanih u različitim vremenskim epohama, pri čemu se rezultati merenja odnose na površinski sloj omotača Zemljine kore, u kojem su trajno stabilizovane geodetske tačke. Površinski slojevi omotača Zemljine kore su u permanentnom pokretu, usled delovanja različitih uticaja koji se odnose na varijacije lokalnih dešavanja, kao što su: promena nivoa podzemnih voda, tektonske pojave, rasedi sa različitim karakterom kretanja (gravitacioni, reversni i transkurentni), klizišta, itd. Značajne deformacije Zemljine kore mogu se javiti kao posledica čitavog niza regionalnih i lokalnih fenomena, posebno u graničnim zonama litosfernih ploča, gde se akumuliraju naponi i javljaju nelinearne interseizmičke deformacije.

Cilj naučnog istraživanja, saglasno predmetu, jeste da utvrdi da li postoje signifikantna pomeranja na tačkama pasivne referentne mreže koja pokriva područje istraživanja. Uzevši u obzir da se pomeranja na pojedinačnim tačkama manifestuju pravcem i intenzitetom vektora pomeranja, deformacionom analizom je neophodno odrediti karakteristične rasedne linije koje razdvajaju veće neotektonske blokove i zone. Na osnovu računanja parametara strejn analize, identifikovaće se oblasti predmetnog područja koje pripadaju dilatacionom ili kompresivnom režimu rasedanja terena. Na osnovu interpretacije geodetskih pomeranja na jugoistočnom delu Panonskog basena, koji pripada teritoriji Vojvodine, odnosno Republike Srbije, istražiće se korelativna zavisnost sa geološkim modelom pomeranja.

1.2. POLAZNE HIPOTEZE

Primena satelitskog GPS/GNSS pozicioniranja predstavlja trenutno najefikasniju naučnu metodologiju za kvantitativnu ocenu geodinamičkih pomeranja Zemljine kore. Sa razvojem ove tehnologije merenja, znatno je unapređena uloga geodezije i geodetske deformacione analize u interdisciplinarnom pristupu istraživanja neotektonskih pomeranja Zemljine kore.

Eksperimentalni deo istraživanja u disertaciji odnosi se na formiranje deformacionog geodinamičkog modela regionalnog karaktera na teritoriji Vojvodine, na bazi ponovljenih GPS/GNSS merenja. Prethodnim geološkim istraživanjima, na pomenutom području, locirano je više raseda koji razdvajaju veće ili manje neotektonske blokove i zone, što je publikovano u formi Neotektonske karte Republike Srbije. Pasivna referentna osnova SREF projektovana je od strane Republičkog geodetskog zavoda u cilju realizacije prostornog referentnog sistema Republike Srbije. Prostorna rezolucija mreže iznosi približno oko 10 kilometara na kompletnoj teritoriji Republike Srbije. Prva GPS/GNSS merenja su realizovana u periodu između 1998. i 2002. godine, metodom GPS statike, sa vremenskim intervalom zasedanja stanica između 60 i 120 minuta. Merenja su realizovana u sistemu zatvorenih poligona. Druga GPS/GNSS merna kampanja je sprovedena u periodu između 2011. i 2012. godine, po istom planu opažanja, takođe

metodom GPS statike. Ravnomerna prostorna pokrivenost tačaka pasivne referentne mreže, u svakom slučaju, pružiće veliki doprinos budućim geodinamičkim istraživanjima na ovim prostorima i doprineti, geometrijskom interpretacijom vremenske evolucije, boljem interdisciplinarnom naučnom razumevanju stanja Zemljine kore na području istraživanja. U svetskim okvirima, za potrebe geometrijske interpretacije i dokazivanja hipoteze o kretanju velikih litosfernih kontinentalnih ploča, najčešće je primenjivana tehnologija dugobazisne interferometrije i metoda satelitskog pozicioniranja korišćenjem globalne mreže aktivnih permanentnih stanica, dok su za potrebe istraživanja područja regionalnog i lokalnog karaktera, korišćene specijalne geodinamičke GPS/GNSS pasivne mreže. Nепrekidni i dugotrajni monitoring stanja Zemljine kore u geometrijskom smislu, daje veliki doprinos istraživanju seizmičkih mehanizama i prognoziranju zemljotresa. Aktuelni razvoj GPS/GNSS tehnologije je visoko pozicionirao geodetski doprinos u geodinamičkim analizama. Visoko precizna geodinamička istraživanja su se do sada bazirala uglavnom na veoma skupoj tehnologiji dugobazisne interferometrije ili takođe skupoj metodi postavljanja guste mreže aktivnih permanentnih stanica.

Imajući u vidu da na području istraživanja postoje dve realizovane GPS/GNSS kampanje u okviru pasivne referentne mreže, sa vremenskim razmakom od približno deset godina, metodama deformeacione analize sa geodetskog aspekta, potrebno je odrediti relativne intenzitete i azimute pomeranja u svim tačkama pasivne referentne mreže, sa identifikacijom stabilnih blokova u okviru ispitivanog područja. Metodama interpolacije je potrebno sračunati intenzitete i pravce pomeranja u bilo kojoj tački područja istraživanja, koje ima regionalni karakter, s obzirom na veličinu prostiranja. Geodetskom deformeacionom analizom potrebno je locirati pojedinačne karakteristične blokove sa rasednim linijama i pravcem pomeranja, što će suštinski doprineti interdisciplinarnom razumevanju stanja Zemljine kore na tom delu Panonskog basena u okviru Evroazijske ploče. Identifikovane rasedne linije, dobijene na osnovu interpolovanih pomeranja iz dve epohe merenja, predstavljaju kvalitetnu osnovu za dalja istraživanja u geodinamičkom pogledu.

Na osnovu dve različite primenjene metodologije definisanja rasednih linija, koje razdvajaju veće ili manje neotektonske blokove i zone unutar Evroazijske ploče, u okviru dela Panonskog basena, javila se potreba za upoređenjem dobijenog geodetskog modela pomeranja, koji je baziran na visoko preciznom satelitskom pozicioniranju, sa jedne strane, i geološkog modela pomeranja, koji je baziran na geološkim i geomorfološkim analizama, sa druge strane. Geostatističkom obradom pravaca i intenziteta pomeranja na lociranim karakterističnim rasedima, utvrdiće se da li su dve nezavisno realizovane metodologije korespondentne.

1.3. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA

Oblast Dinarida koju formiraju planinski venci u Južnoj Evropi, a koja obuhvata delove delove teritorija Srbije, Crne Gore, Bosne i Hercegovine, Slovenije, Hrvatske i Albanije, kao i oblast koja pripada Jadranskom bloku na jugu i Panonskom basenu na severo-istoku, predstavljaju tektonski i seizmički vrlo aktivnu površinu, što ukazuje na stalnu potrebu interdisciplinarnih istraživanja na tim područjima. Republika Srbija u globalnom geodinamičkom pogledu pripada delu Evroazijske ploče, sa severnim delom u okviru Panonskog basena (područje Vojvodine) i centralnim i južnim delom u oblasti Dinarida. Većina centralno-evropskih i istočnih

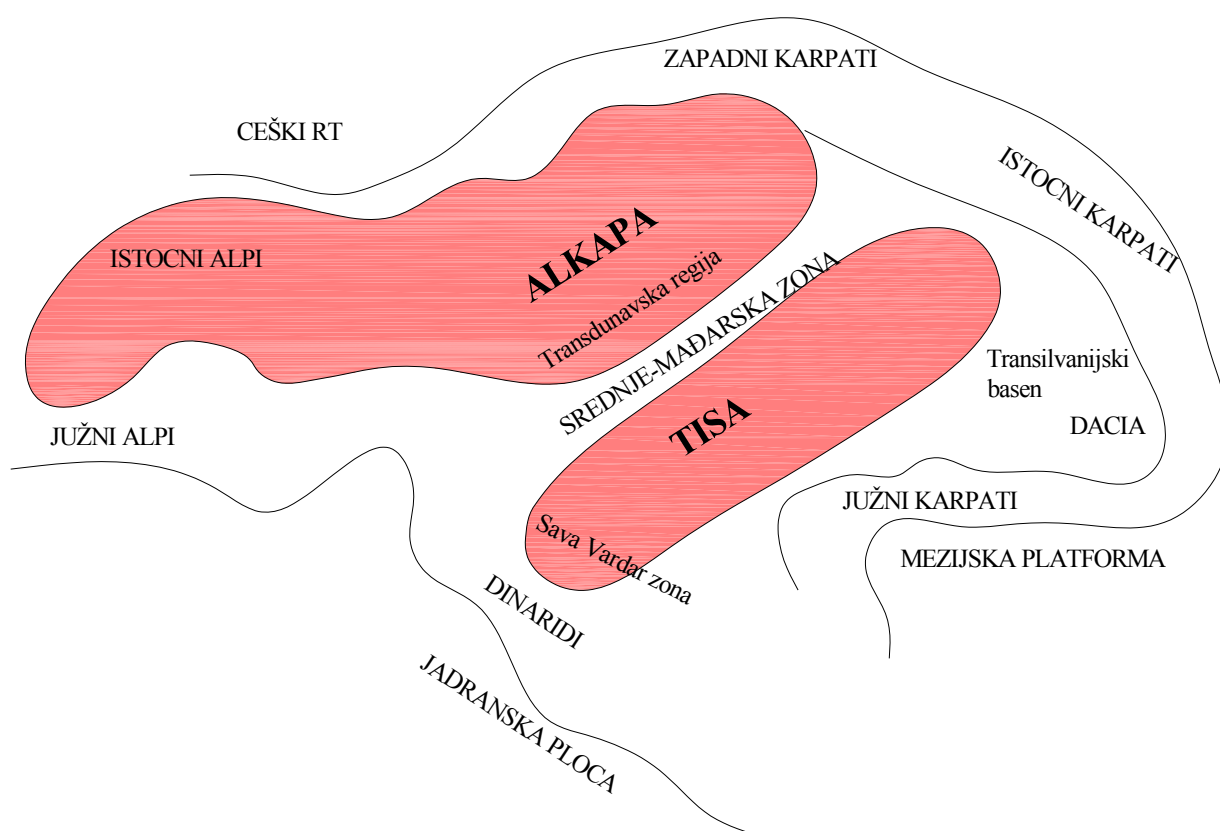
delova Evrope pripada širokom pojasu deformacione zone između Evroazije i Afrike. Granica između ploča Evroazije i Afrike odnosi se na široki pojas deformacione zone koji obuhvata više nezavisnih krutih mikroploča i blokova. Na bazi dosadašnjih istraživanja na osnovu GPS/GNSS merenja, najistočnija Anadoljska mikro-ploča se kreće ka zapadu u odnosu na Evroaziju prosečnom brzinom pomeranja od 2 - 2.3 cm/god (Straub, 1996; Grenerczy, 2000; Tesauro et al., 2006). Egejski blok predstavlja najbrže pokretni blok sa prosečnom brzinom više od 3 cm/god. Afrička ploča se kreće u smeru suprotnom u odnosu na Evroazijsku ploču, što implicira sučeljavanje (koliziju) ploča i pojavu kompresije u okviru njihove granične zone. Prosečna brzina Afričke ploče iznosi 1 cm/god sa azimutom od 355° u odnosu na Anadoljsku mikro-ploču. U odnosu na južni deo Jadranskog bloka, prosečna brzina Afrike je 0.9 cm/god sa azimutom od 348°. Najvažniji blok u širokom pojasu granične zone između Evroazije i Afrike odnosi se na Jadranski blok ili Jadransku mikroploču. Pitanja poput toga da li je Jadranski blok nezavisan od Afričke ploče, da li se radi o mikroploči ili rtu Afričke ploče, predstavljaju dugogodišnji predmet istraživanja. Ipak, mnoga istraživanja ukazuju da se Jadranski blok pomera u pravcu severa i da u velikoj meri utiče na tektoniku centralno-evropskog regiona, posebno Panonskog basena.

Glavna karakteristika Jadranskog bloka je prenos kompresije između Evroazije i Afrike, te stoga predstavlja glavni pokretač tektonskih procesa u Centralnoj Evropi, označen po najvišim seizmičkim zonama aktivnosti duž linije sučeljavanja ploča na spoljašnjim Dinaridima i Južnim Alpima. Uticaj Jadranskog bloka na tektoniku centralno-evropskog dela, a posebno Panonskog basena, evidentan je na osnovu dugogodišnjih GNSS opažanja u okviru centralno-evropske geodinamičke mreže (Grenerczy, 2005). Interpolovane brzine pomeranja severnog dela Jadranske mikroploče se kreću u intervalu od 2.5 do 3.5 mm/god u severnom, severo-istočnom pravcu, a za južni deo iznose od 3.5 do 5 mm/god sa severo-istočnom orijentacijom. Mora se naglasiti da su rezultati dobijeni u odnosu na minimizaciju brzina na stabilnom delu Evrope. Podaci ukazuju na koliziju severnog dela Jadranske mikroploče sa Alpima, pri čemu kretanje severnog dela potpuno apsorbuje Južne Alpe. Dinaridi apsorbuju pomeranja Jadranske ploče, ali ne u potpunosti. Kretanje Jadranske mikroploče istiskuje severnu panonsku jedinicu ALKAPA prema istoku. Kretanje istisnutog bloka apsorbuje centralni deo Panonskog basena što dovodi do povećane seizmičnosti. Region južnog dela Bugarske, a posebno jugozapadna Bugarska i Rodopi, predstavlja veoma aktivnu površinu u tektonskom i seizmotektonskom smislu, kada se ima u vidu da se najjači zemljotres u kontinentalnoj Evropi u protekla dva veka dogodio upravo u ovoj oblasti. Tektonska dešavanja u istočnom Mediteranu iniciraju sudar Arapske i Afričke ploče sa Evroazijskom. Modeli pomeranja ukazuju da se Arapska ploča kreće u pravcu sever-severozapad u odnosu na Evroaziju, sa brzinom pomeranja od 1.8 do 2.5 cm/god.

Predmet istraživanja u disertaciji odnosi se na područje Vojvodine u geodinamičkom smislu, koje predstavlja jugoistočni deo Panonskog basena. Panonski basen se proteže na području između 45–50° severne geografske širine i 15–23° istočne geografske dužine. Panonski basen je pretežno ravničarskog karaktera i okružen je planinskim vencima koji su prosečne nadmorske visine više od 1.000 metara, pri čemu nadmorska visina prelazi 2.500 metara u zapadnim i južnim Karpatima i Dinaridima kao i 3.000 metara u južnim i istočnim Alpima. Prosečna nadmorska visina u Panonskom basenu je oko 150 metara. U tektonskom smislu, Panonski basen leži unutar Evroazijske ploče u severnom delu granične zone pod uticajem konvergencije Afričke i Evroazijske ploče i Jadranskog bloka između njih.

Panonski basen pripada Istočnoj i Centralnoj Evropi i sa okolnim planinskim vencima zahvata delove teritorija devet zemalja: Austrija, Hrvatska, Slovenija, Mađarska, Srbija, Slovačka, Poljska, Rumunija i Ukrajina, pri čemu dominantan deo pripada Mađarskoj. Postoji opšta saglasnost gotovo svih naučnika i istraživača da je širenje litosfere odigralo važnu ulogu u formiranju Panonskog basena i da basen obuhvata područje sa veoma tankom korom i visokim

stepenom litosferskog protoka toplote (Stegena et al., 1975; Szafian et al., 1997; Csontos, 1995). Unutrašnja struktura basena je popunjena gustim sedimentnim slojem koji u najdubljim delovima basena dostiže i do 7-8 kilometara. Panonski basen se sastoji od dva glavna litosferska bloka koje razdvaja srednje-mađarska zona, severne panonske jedinice ALKAPA (akronim od ALpska-KArpartska-PANonska) i južnog bloka Tisa. ALKAPA blok se sastoji od dve veće tercijarne subjedinice: zapadni Karpati na severu, i južni deo kome pripada transdunavska centralna oblast. Tisa blok se proteže od Save na jugu do Dacia bloka na istoku (Slika 1.1). Haas i Péro (2004) su ukazali na odvajanje Tisa bloka od Evropske ploče, i promenu ekstenzionog u kompresivni režim, nastao sredinom perioda Krede. Istovremeno sa Dacia blokom, došlo je do rotacije u smeru kretanja kazaljke na časovniku Tisa bloka u kasnom Tercijaru (Csontos & Nagymarosy, 1998). Pritisak Jadranske ploče u pravcu severa izazvao je istiskivanje ivičnih tektonskih lamela u Alpima (Frisch et al., 1998; Horváth et al., 2006), što je uzrokovalo pomeranja u pravcu istoka i rotaciju ALKAPA i Tisa bloka.



Slika 1.1. Glavne tektonske jedinice u Karpatsko-Panonskom basenu

Širenje ALKAPA jedinice je posledica bočnog ekstrudiranja blokova od istočnih Alpa i Karpatske ploče, koje je započeto u kasnom oligocenu i trajalo je do ranog miocena (Frisch et al., 2000; Matenco & Radivojević, 2012). Pretpostavlja se da je Tisa-Dacia blok bio istisnut od kolizione zone Dinarida pod sličnim geodinamičkim uslovima kao u ALKAPA jedinici (Horváth et al., 2006).

Generalno, Panonski basen karakteriše slaba seizmičnost sa nepravilnom raspodelom epicentara (Horváth & Rumpler, 1984). Sa druge strane, jugoistočni deo Panonskog basena je najaktivnija oblast Republike Srbije u seizmičkom smislu, iako je relativno daleko od kolizionih

zona Jadranske mikroploče i Dinarida, što je glavni uzrok kompresije na ovim prostorima. Međutim, seizmičnost je umerenog intenziteta (Marović et al., 2002). Seizmičnost, kao najbolji pokazatelj recentnih tektonskih pokreta je nejednaka na području Panonskog basena, posebno u njegovim južnim delovima, međutim, u tim delovima magnituda nije prelazila vrednost $M = 4.5$. Izuzetak sa mogućim generisanim zemljotresima magnitude $M = 4.5 - 5$, odnosi se na oblast Fruške gore (mada događaj iz 1739-1741 treba prihvatiti sa određenom rezervom) i region istočnog Banata, koji pripada epicentralnoj zoni Temišvara. Distribucija zemljotresa, izuzev Fruške gore i regiona istočnog Banata, pokazuje nizak stepen linearnosti, tako da je prilično teško locirati seizmički aktivne rasede. Epicentri slabijih zemljotresa su uglavnom rasuti. Uzevši u obzir da je seizmičnost posledica recentnih tektonskih procesa, od velike važnosti je da se utvrdi kada je takav tektonski režim uspostavljen, šta je njegova strukturalna sadržina i karakter naprezanja i koji je uzrok seizmičnosti. Istraživanje koja su sproveli Horváth i Cloetingh (1996) ukazala su na velike promene u tektonskom režimu na površini Panonskog basena i njegovim graničnim zonama, koje su se dogodile s kraja pliocena i početkom kvartara, što znači da je magnituda naprezanja unutar same ploče povećana, što je znatno doprinelo kinematici Panonskog basena i peri-basenskih struktura. Sprovedene analize su pokazale da se takav tektonski režim nastavio sve do holocena i da je glavni uzročnik savremenih tektonskih pokreta a samim tim i seizmičnosti na tim prostorima.

1.4. ORGANIZACIONA STRUKTURA DISERTACIJE

Površinski delovi Zemljine litosfere su u stalnom pokretu, izloženi naprezanjima i tektonskim oblikovanjima, usled različitih uticaja, koji su pre svega endogenog karaktera. Kompleksnost identifikacije aktivnih kontinentalnih deformacija je dobro poznata i donedavno ih je bilo veoma teško kvantifikovati. Kompleksnost problema je evidentna u širokom spektru multidisciplinarnih istraživanja, počev od geoloških karata koje beleže dokaze o prošlosti tektonskih kretanja, do seizmičkih karata koji pokazuju široku distribuciju epicentara zemljotresa. Analiza kvantitativne ocene tektonskih pomeranja je bila veoma složena, jer nije bila dostupna metodologija realizacije preciznih merenja na znatno udaljenim prostorima, koji se karakterišu složenim obrascem kretanja. Metoda geodetskog satelitskog pozicioniranja, VLBI dugobazisna interferometrija i InSAR metoda radarske interferometrije, prevazišle su navedene probleme. Razumevanje prirode i stanja Zemljine kore zahteva stalnu potrebu za istraživanjima u interdisciplinarnom pristupu.

Drugo poglavlje u disertaciji se bavi istorijskim prikazom razvoja teorije tektonskih ploča, sa akcentom na uzročnike njihovih pomeranja. To poglavlje bavi se i geologijom, tektonskim uticajima, rasedima terena i uzročno-posledičnom korelacijom između njih, kao i recentnom tektonskom aktivnošću Panonskog basena u okviru Evroazijske ploče.

Savremene tehnologije akvizicije geo-prostornih podataka za potrebe analize kvantitativne ocene tektonskih pomeranja prikazane su u **trećem** poglavlju. Značaj dugobazisne interferometrije (VLBI) ogleda se u istraživanju različitih geodinamičkih fenomena Zemlje, kao što su: promena Zemljine rotacije, dužine dana, pomeranja polova, nutacija, određivanje parametara plime, itd. VLBI obezbeđuje visoko precizno globalno pozicioniranje, zbog čega ima veoma važnu ulogu u otkrivanju kontinentalnih pomeranja. Metode GPS/GNSS satelitskog pozicioniranja danas imaju ključnu primenu u analizi geodinamičkih pomeranja, počev od mreže

aktivnih permanentnih stanica koje rade u kontinuitetu, pa do pasivnih referentnih GPS/GNSS mreža, koje su karakteristične za lokalna i regionalna geodinamička istraživanja. Radarska interferometrija se zasniva na primeni takozvanih aktivnih senzora i predstavlja jednu od savremenijih tehnika za prikupljanje prostornih podataka za potrebe geodinamičkih analiza. Za potrebe analize dinamike brzopomerajućih terena, kao što su klizišta, značajno mesto primene ima LIDAR tehnologija laserskog skeniranja.

Četvrto poglavlje obrađuje teoriju primene Gaus-Markovljevog modela u izravnanim geodetskih mreža, MNK ocene nepoznatih parametara, probleme definisanja datuma geodetskih mreža i datumske transformacije.

U **petom** poglavlju se daje analiza klasifikacije modela u geodetskoj deformacionoj analizi sa akcentom na konvencionalne i napredne modele analize. Permanentni razvoj tehnika merenja i modeliranja deformacija doprineo je revolucionarnom prelasku puta od konstatacije i opisa deformacija, do analize procesa šta je zapravo uzrok pojavljivanja deformacije. U ovom poglavlju se daju teorijske postavke modela kongruencije, robusnih metoda, polinomskih deformacionih modela, modela kretanja krutih tela, itd. Prikazana je metoda koja predstavlja integrisani deo za suštinsko i interdisciplinarno razumevanje analize deformacija, a odnosi se na strejn analizu, pri čemu se stavlja akcenat na relaciju geodezije, teorije sistema i mehanike kontinuuma. Analiziraju se kinematički modeli, kao dopuna strogo geometrijskim analizama deformacija, kao i dinamički modeli, koji ne razmatraju samo promenu geometrije objekta u prostoru i vremenu, već posvećuju pažnju i uzročnim faktorima (sile koje deluju na objekat, unutrašnja i spoljašnja opterećenja) koji dovode do pojave deformacije.

U **šestom** poglavlju su prikazani napredni modeli deformacione analize, sa posebnim osvrtom na sisteme identifikacije korišćenjem parametarskih i neparametarskih modela, primenu neuronskih mreža i *fuzzy* logike u analizi deformacija. Pažnja je posvećena tehnici Kalmanovog filtriranja, koja predstavlja jedan od najpopularnijih univerzalnih alata za sisteme identifikacije i može biti primenjena na sve vrste modela u skladu sa sprovedenom klasifikacijom koja je opisana u petom poglavlju.

Sedmo poglavlje predstavlja eksperimentalni istraživački deo disertacije koji pripada regionalnoj oblasti geodinamičkih istraživanja, na području dela Panonskog basena koji pripada teritoriji Republike Srbije, odnosno Vojvodine. Dosadašnja istraživanja u geodinamičkom smislu su se uglavnom bazirala na istraživanju geoloških modela pomeranja na osnovu geoloških istraživanja i geomorfoloških analiza metodama daljinske detekcije. Realizacijom GPS/GNSS merenja u dve epohe merenja na pasivnoj referentnoj mreži Republike Srbije, sa desetogodišnjim vremenskim intervalom, prvi put su se stekli uslovi za geometrijsku analizu pomeranja terena na području Vojvodine, primenom metoda geodetske deformacione analize, imajući u vidu dobru prostornu rezoluciju. Prostorni raspored projektovane i realizovane pasivne referentne mreže obezbeđuje ravnomernu pokrivenost područja istraživanja, što je osnovna prednost u odnosu na istraživanja koja se baziraju na mreži aktivnih permanentnih stanica. Podaci koji su korišćeni za analizu ocene pomeranja na teritoriji Vojvodine, preuzeti su od Republičkog geodetskog zavoda Republike Srbije. Procesiranje baznih linija GPS/GNSS merenja, sa importovanim preciznim efemeridama, izvršeno je u okviru programskog paketa *Trimble Total Control*. Izravnana pojedinačnih epoha GPS/GNSS merenja, kao i detekcija pomeranja metodama geodetske deformacione analize, sprovedeni su u okruženju softvera *MicroSurvey STAR*NET*, sa specijalno razvijenim algoritmom za primenu geometrijske analize deformacija. Kanadska kompanija *MicroSurvey* je navedeni softver ustupila na korišćenje Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, odnosno, Departmanu za građevinarstvo i geodeziju. U poglavlju je objašnjen način obrade metodama geodetske deformacione analize na području istraživanja, sa numeričkom i grafičkom interpretacijom pomeranja pojedinih karakterističnih blokova. Na osnovu dobijenih rezultata, analizirane su rasedne linije koje razdvajaju veće neotektonske blokove i zone. Na osnovu

dobijenih geodetskih pomeranja na tačkama pasivne referentne mreže, primenom metoda interpolacije sračunato je polje pomeranja na kompletnom području istraživanja. Parametri strejn analize su sračunati korišćenjem on-lajn aplikacije za geodinamičku analizu Istraživačkog instituta za geodeziju, topografiju i kartografiju iz Praga, a koja se bazira na teoriji mehanike kontinuuma: www.vugtk.cz/~deformace (Talich, 2008). Na osnovu podataka dobijenih u okviru geološkog modela pomeranja, publikovanih u formi Neotektonske karte Republike Srbije, analizirana je podudarnost između dve nezavisno sprovedene metodologije, tj. geodetskog modela pomeranja, koji je baziran na visoko preciznom satelitskom pozicioniranju, sa jedne strane, i geološkog modela pomeranja, koji je baziran na geološkim i geofizičkim istraživanjima, kao i geomorfološkim analizama daljinske detekcije, sa druge strane.

U **osmom** poglavlju data su zaključna razmatranja koja se odnose na sprovedene postupke koji su prikazani u radu, sa istaknutim doprinosom disertacije multidisciplinarnom razumevanju stanja Zemljine kore na regionalnom području istraživanja. Dat je predlog budućih istraživanja, sa posebnim akcentom na značaj permanentnog monitoringa površinskog omotača Zemljine kore, koji je konstantno pod uticajem raznovrsnih tektonskih i drugih procesa. U **devetom** poglavlju prikazana je bibliografija i spisak korišćene literature. U završnom delu disertacije prikazani su posebni numerički i grafički prilozi.

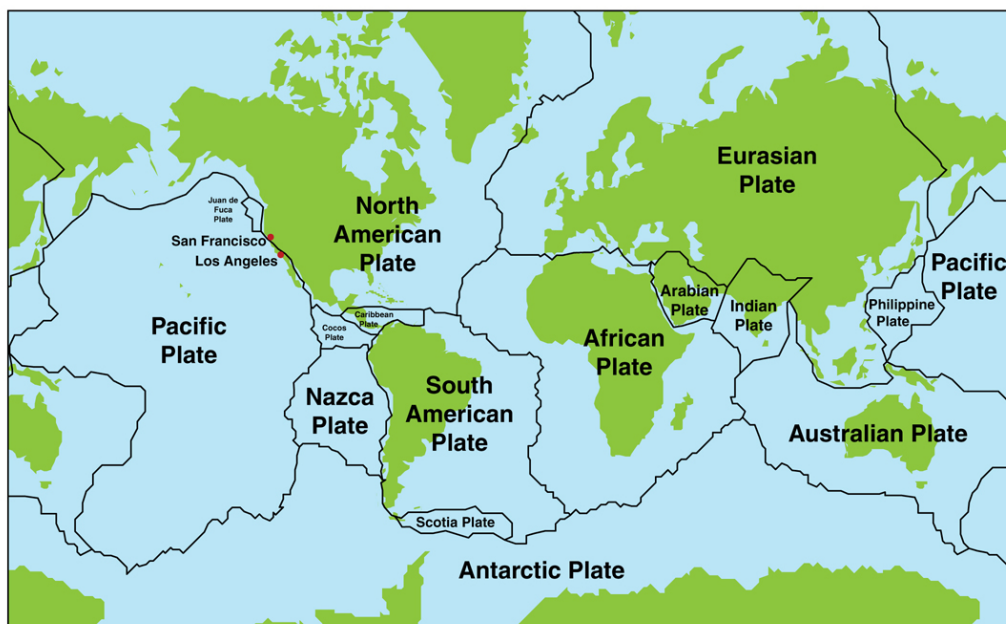
2. TEKTONSKA AKTIVNOST I GEOLOŠKI STRUKTURNI ODNOSI

Zemljina unutrašnjost je na osnovu hemijskog sastava, agregatnog stanja, specifične težine i brzine prostiranja seizmičkih talasa, izdiferencirana na nekoliko slojeva: **Zemljina kora**, **omotač jezgra** i samo **jezgro**. Površinski sloj Zemlje, nazvan Zemljina kora, predstavlja predmet najvišeg stepena istraživanja kada su u pitanju geodinamički procesi, iz razloga pristupačnosti njegovog direktnog proučavanja. Intenzivna istraživanja ovog, relativno tankog sloja, debljine oko 35 kilometara, pokazala su veliku kompleksnost u njegovom sastavu i strukturalnoj građi. Geodinamika i tektonika opisuju i interpretiraju raznovrsne geološke procese koji se odvijaju u Zemljinoj unutrašnjosti, što podrazumeva konceptualni opis fizičkih procesa uzrokovanih tektonskim pokretima, kombinujući termalno-mehaničke opise u cilju integrisane fizičke interpretacije Zemlje. U principu, može se reći da se geodinamički procesi sveobuhvatno opisuju korišćenjem energetskih, kinematičkih, dinamičkih i seizmičkih modela interpretacija. Iako se ovi modeli ne mogu posmatrati odvojeno, svaki od njih koristi neke karakteristične promenljive. Energetski model interpretacije analizira distribuciju toplotne energije primenom promenljivih kao što su toplota ili temperatura. Kinematički modeli koriste parametre kao što su brzina, ubrzanje i strejn, dok se dinamički modeli baziraju na promenljivima kao što su naprezanja i delujuće sile. Primenom dubokog prodiranja seizmičkih talasa (elastičnih deformacija) stvorenih zemljotresima i uspostavljanjem guste mreže veoma osetljivih seizmoloških stanica širom Zemlje, njena unutrašnjost se može razumeti na mnogo bliži način (Glavatović, 2005). Informacije koje su danas na raspolaganju o dubokim prostorima Zemljine unutrašnjosti, dobijene su analiziranjem registrovanih seizmičkih talasa, a u znatno manjem obimu i proučavanjem rezultata gravitacionih i geomagnetskih osmatranja, analize podataka toplotnog toka Zemlje, kao i na osnovu laboratorijskih ispitivanja stena i minerala.

2.1. GEODINAMIČKI KONCEPT TEKTONSKIH PLOČA

Posledica kretanja ploča litosfere, koja se sastoji od gornjeg krutog plašta i kore, manifestuje se različitim deformacijama stena Zemljine kore, posebno u graničnim područjima. Kora može biti okeanskog ili kontinentalnog tipa. Nova teorija o globalnoj tektonici ploča (navedena u uvodnom poglavlju) pretpostavlja podelu litosfere na sedam glavnih ploča: Afrička, Severnoamerička, Južnoamerička, Evroazijska, Australijska, Antarktička i Pacifička. Pored navedenih većih ploča, postoji i nekoliko manjih: Arapska, Nazca, Cocos, Juan-De-Fuca i Filipinska. Ploče se kreću u različitim pravcima i različitim brzinama. Na osnovu dugotrajnih prikupljanja podataka o recentnoj građi Zemljine kore i pomeranjima njenih određenih delova, moguće je rekonstruisati model stvaranja današnjih ploča Zemlje. Najaktivniji su granični prostori između pojedinih ploča. Brzine kojima se pomeraju pojedine ploče Zemlje su različite a mogu se izraziti u jedinici cm/god. Među najbržim pločama ubrajaju se Nazca ploča (17.2 cm/god), pa Cocos ploča (10 cm/god) i Karipska ploča (9.2 cm/god). Pacifička ploča se pomera brzinom od oko 7 cm/god, Indijsko-Australijska ploča brzinom od 3.7 do 7.5 cm/god, a Atlantska ploča brzinom između 1.8 i 4.1 cm/god (Slika 2.1). U graničnoj zoni između ploča ili blokova, na marginama interakcije odvijaju se geološki procesi, kao što su formiranje planinskih pojaseva, zemljotresi, vulkani, itd. Ove granične zone definišu se u zavisnosti od načina kretanja jedne

ploče u odnosu na drugu. Ako se dve ploče kreću jedna prema drugoj, u koliziji su (sučeljavaju se), onda se radi o **konvergentnim** zonama. U slučaju da se ploče razilaze, radi se o **divergentnim** zonama. Ako se ploče ili blokovi kreću horizontalno po vertikalnoj ili subvertikalnoj rasednoj površini, radi se o **transformnim** zonama (Slika 2.2).



Slika 2.1. Podela litosfere na veće i manje tektonske ploče

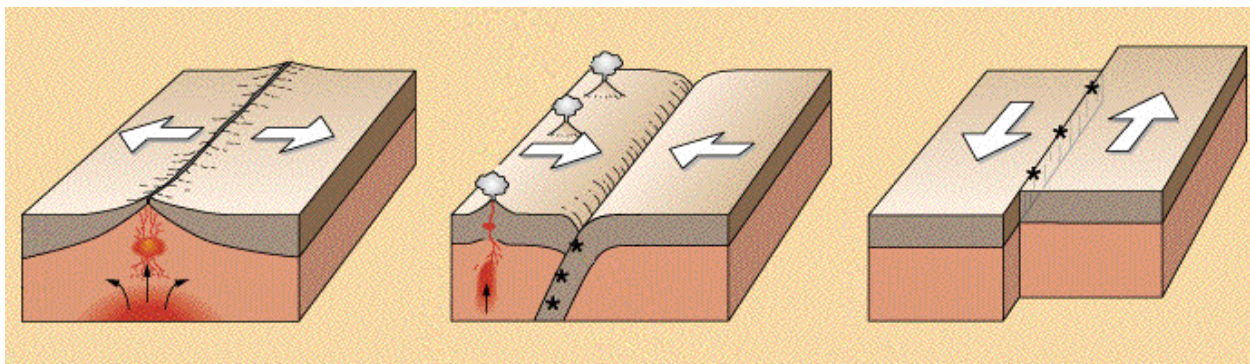
Kolizija (sučeljavanje) ploča može nastupiti u sledećim slučajevima:

- Između okeanske i kontinentalne ploče
- Između dve okeanske ploče
- Između dve kontinentalne ploče

Analizom davne geološke prošlosti, prisutna je hipoteza o postojanju jednog jedinstvenog kontinenta i jedne okeanske celine. Promena toplotnog režima u unutrašnjosti Zemlje (ispod astenosfere) dovela je do konvektionog strujanja materijala astenosfere, pri čemu se stvara uzburkana masa koja nastoji da se probije naviše, vršeci pritisak na čvrste delove gornjeg omotača, kao i na samu Zemljinu koru. Kontinentalna kora se određeno vreme lagano izdiže, a zatim se razlama i tone duž ovakvih sistema pukotina, pri čemu se stvaraju uslovi da se stopljeni materijal probije na površinu i svojim istiskivanjem stvara pritisak koji utiče na razmicanja blokova kore. Rasedi koji se formiraju na ovaj način nazivaju se **riftovi**.

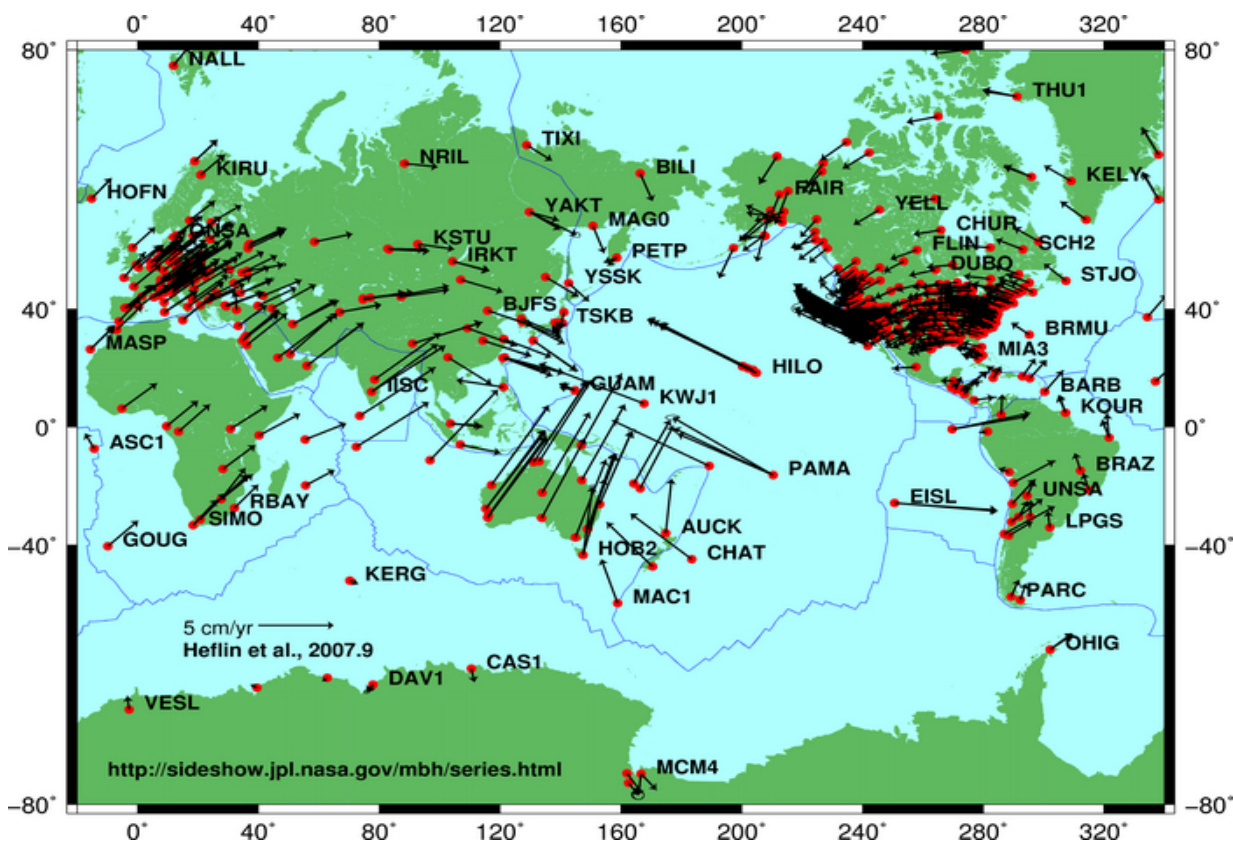
Okeansko-kontinentalna konvergencija je povezana sa kreiranjem rovova dubokih i do 10 kilometara, pri čemu se okeanska ploča podvlači ispod kontinentalne ploče. Taj proces se naziva **subdukcija**. Subdukcija je često povezana sa eruptivnim vulkanskim aktivnostima. Na kontinentalnoj margini, iznad subdukcione zone, dolazi do izdizanja stenskih masa i obrazovanja planinskih venaca, a ispred kontinenta obrazuje se duboki rov koji je paralelan obalskoj liniji. Poniruća okeanska kora se u unutrašnjosti Zemlje ponovo stapa i u obliku magme teži da izbije na površinu tako da je u ovim područjima česta pojava vulkanizma, a samo trenje ploča u zoni subdukcije manifestuje se pojavom zemljotresa. Ukoliko okeanska kora više nije u stanju da izdrži trenje u subdukcionim zonama, onda dolazi do smicanja u delu okeanske kore, pri čemu se jedna okeanska kora podvlači pod drugu, čime se formiraju **ostrvski lukovi**, paralelni

kontinentalnoj granici, i na kojima je česta pojava vulkanizma (Grasemann & Stüwe, 2002; Đorđević et al., 2000; Jovanović & Srećković-Batočanin, 2006).



Slika 2.2. Granične zone tektonskih ploča, divergentne (levo), konvergentne, kolizione (u sredini) i transformne, klizajuće (desno)

Kontinentalno-kontinentalna konvergencija je rezultat sudaranja dve kontinentalne ploče (npr. sudarom Indijske sa Evroazijskom pločom formirani su Himalaji). Ove slučajeve prate snažni zemljotresi, ali ne karakteriše ih pojava vulkanizma. Primer divergentnih zona, u kojima se ploče udaljavaju jedna od druge usled pritiska magme iz unutrašnjosti, odnosi se na Srednjeatlantski greben, koji se proteže celom dužinom Atlantskog okeana. Ovaj slučaj je praćen pojavom vulkanizma na okeanskom dnu. Brzine pomeranja ploča iznose u proseku oko 2.5 cm/god (Slika 2.3). Promene deformacija Zemljine kore mogu se precizno meriti geodetskim metodama (GPS/GNSS, VLBI dugobazisna interferometrija, InSAR, PS InSAR).



Slika 2.3. Kvantifikovanje kretanja ploča bazirano na GNSS merenjima od strane agencije NASA

Karakteristika divergentnih zona, poput Srednjeatlantskog grebena, jeste što divergencija nikada ne počinje kao rasep između dve okeanske ploče, već je uvek prvi uzrok rasepa na strani kontinenta. Ovo se može objasniti žarištima ispod kontinenta kao i razlikama u gravitacionom potencijalu. U slučaju kada se ploče ili blokovi kreću horizontalno po vertikalnoj ili subvertikalnoj površi, tada se radi o transformnim graničnim zonama. Većina transformnih graničnih zona je prisutna u okeanima, tj. u zonama okeanskih grebena, ali se mogu pojaviti i na kontinentu. Najpoznatiji primer transformnih zona odnosi se na San Andreas rased u Kaliforniji, koji povezuje dve divergentne ploče (Casparly, 2000; Grasemann & Stüwe, 2002).

Važno je napomenuti da se kretanje svih ploča, koje su identifikovane na Zemlji, ne odvija po jednostavnim obrascima kretanja koji su opisani u ovom radu, uzevši u obzir promenu kinematike u širokom pojasu graničnih zona u dužem vremenskom periodu. Granične zone podrazumevaju najmanje dve velike ploče ili bloka, kao i više manjih mikroploča u složenim geološkim strukturama (npr. mediteransko-alpski region između Evroazijske i Afričke ploče).

2.2.1. Globalna seizmičnost u geodinamici tektonskih ploča

Pojava zemljotresa je prisutna tokom čitave istorije formiranja i razvoja Zemljine kore. Uzrok nastanka zemljotresa predstavlja predmet proučavanja brojnih istraživača. Razvojem tehnologije u prethodnim decenijama, intenzivno su se razvijali postupci registrovanja zemljotresa i metode za analizu i obradu prikupljenih podataka. Od najznačajnijih seizmologa na području bivše Jugoslavije, značajno mesto zauzima prof. dr Andrija Mohorovičić (1857-1936), koji je, proučavajući hodohrone serije zagrebačkih zemljotresa iz perioda od 1904. do 1909. godine, identifikovao i kvantitativno utvrdio prostorni položaj donje granice Zemljine kore (*Mohorovičićev diskontinuitet*). Takođe je definisao prve hodohrone seizmičkih talasa bliskih zemljotresa i na taj način postavio temelje za proučavanje unutrašnjosti Zemlje na osnovu seizmoloških podataka (Glavatić, 2005).

Prirodni zemljotresi se mogu podeliti u tri grupe:

- Tektonski
- Urvinski
- Vulkanski

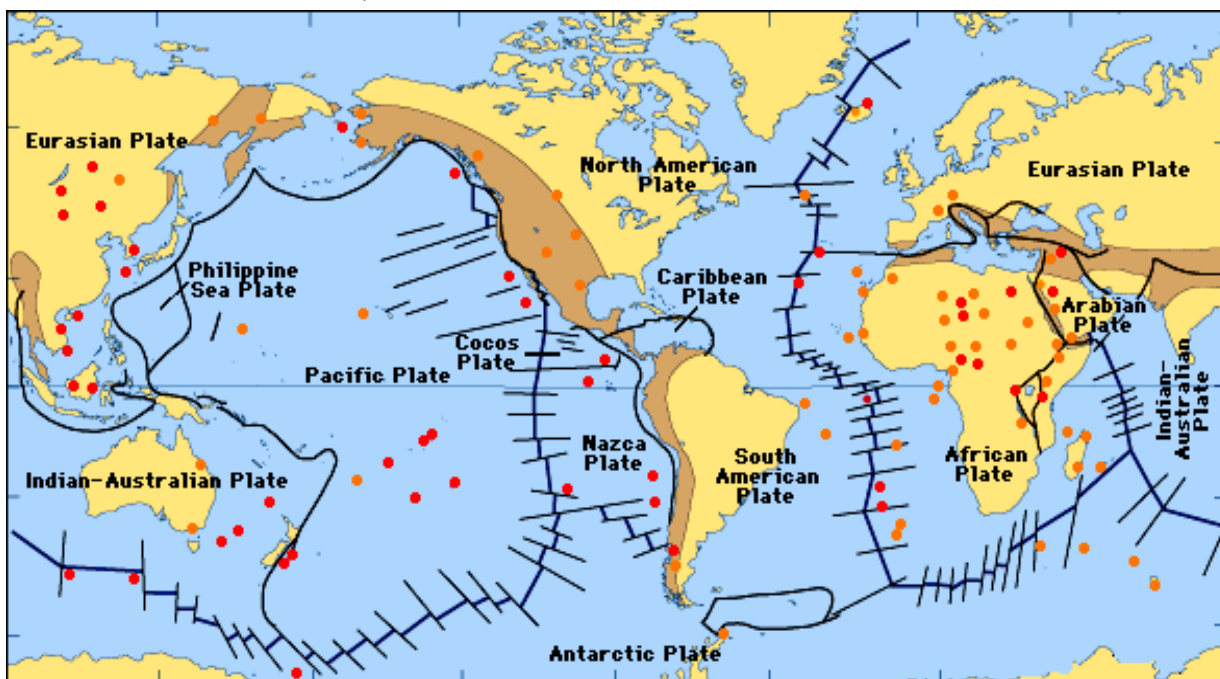
Tektonski zemljotresi predstavljaju dominantnu vrstu zemljotresa. Njihovo nastajanje je povezano sa iznenadnim lomom stenske mase, pod dejstvom velikih pritisaka u stenama, koji su duže vreme akumulirani u široj zoni žarišta zemljotresa. Urvinski zemljotresi nastaju urušavanjem podzemnih kaverni i pećina u stenskim masama površinskih delova Zemljine kore, pod dejstvom erozionih zona podzemnih voda. Vulkanski zemljotresi se javljaju kao posledica mehaničkog delovanja magme tokom kretanja kroz vulkanske kanale. Na području Balkana ne postoje aktivni vulkani, ali u bližoj okolini su prisutni u zoni Vezuva u Italiji, Etne na Siciliji, itd.

Teorija tektonskih ploča objašnjava sledeće vrste seizmičkih zona (Grasemann & Stüwe, 2002):

- Seizmičke zone duž sistema riftova
- Seizmičke zone duž transformnih područja
- Seizmičke zone duž zona subdukcije
- Seizmičke zone izazvane tektonskim sudarima

Prvi tip seizmičkih zona odgovara srednjeokeanskim sistemima riftova koji su povezani sa vulkanskom aktivnošću duž ose grebena. Seizmička aktivnost je generalno niska i dešava se na plitkim dubinama jer je litosfera veoma tanka i slaba na ovim divergentnim graničnim zonama. Drugi tip seizmičkih zona je povezan sa transformnim graničnim zonama ili velikim klizajućim rasedima koji izazivaju trenje između susednih ploča (npr. Severnoanadoljski rased ili San Andreas rased). Zemljotresi su fokusirani u plićim dubinama bez bilo kakve vulkanske aktivnosti. Klizanja blokova se pojavljuju segmentarno, na više delova, i ne javljaju se uvek duž cele granice raseda za vreme pojave zemljotresa.

Treći tip zemljotresa je vezan za subdukcione zone duž konvergentnih graničnih područja. Jedna ploča se podvlači pod drugu, tako da u ovom slučaju, duboko nastaje okeanski rov (npr. rov Peru-Čile, gde se Pacifička ploča podvlači pod Južnoameričku). Zemljotresi koji su povezani sa subdukcionim zonama mogu biti plitki, srednji i duboki, na osnovu pozicioniranja ispod litosfere. Četvrti tip seizmičkih zona povezan je sa kolizijom tektonskih ploča, gde je pojava plitkih zemljotresa uzrokovana intenzivnim skraćanjem i formiranjem visokih planinskih venaca (npr. široki pojas seizmičnosti koji polazi od Burme do Mediterana, prelazi preko Himalaja, Irana, Turske, do Gibraltara).



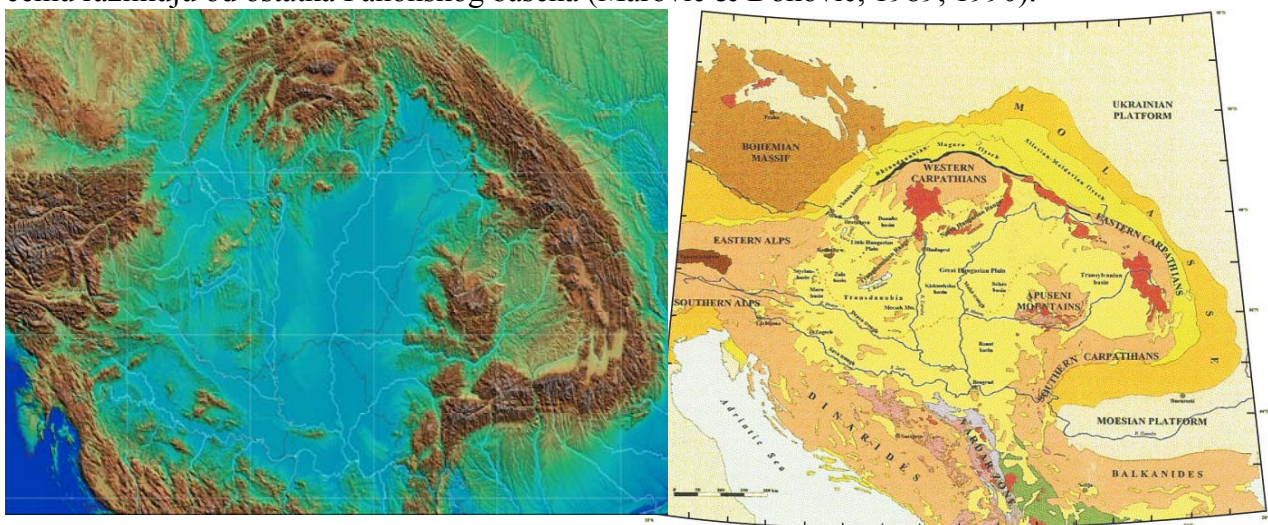
Slika 2.4. Pokretački mehanizmi kretanja tektonskih ploča povezani sa pojavom zemljotresa (©1994 Enciclopaedia Britannica, Inc.)

Brojni procesi, kao što su klimatske promene, zemljotresi, vulkani, erozija, zahtevaju stalni monitoring u cilju očuvanja životne sredine i ljudskih života. Pomeranja tektonskih ploča se kreću u rasponu od nekoliko milimetara do desetinu centimetara godišnje, te se stoga mogu pratiti jedino visoko preciznim geodetskim merenjima (tehnologija satelitskog GPS/GNSS pozicioniranja, VLBI dugobazisna interferometrija). Međutim, nekoliko sekundi zemljotresa ili vulkanske erupcije, mogu osloboditi rafale energije, daleko moćnije od bilo čega što možemo proizvesti. Ipak, pored svih ovih opravdanih opasnosti, ljudi mogu imati velike koristi od snage i posledica izazvanih kretanjem tektonskih ploča (npr. geotermalna energija, proizvodnja prirodnih resursa, itd).

2.2.2. Neotektonska aktivnost sa aspekta geoloških i seizmoloških analiza na predmetnoj oblasti istraživanja

Seizmološkim istraživanjima se proučavaju procesi koji uzrokuju pojavu zemljotresa, kretanja generisanih seizmičkih talasa kroz Zemljinu koru i njenu dublju unutrašnjost, kao i destruktivni efekti dejstva seizmičkih talasa na veštačkim strukturama na Zemljinoj površini. Mehanizam nastanka tektonskih zemljotresa je upravo proporcionalan kretanju tektonskih ploča Zemljine kore. Kretanjem tektonskih ploča inicira se napon u stenama duž linije sučeljavanja ploča. Prilikom sučeljavanja ploča, njihova kinetička energija se transformiše u mehaničku, koja se preko pritiska koncentriše u stenama zone sučeljavanja, sve do trenutka dostizanja maksimuma mehaničke čvrstoće stene i pojave mehaničkog loma stene, raseda i dislociranja stenskih masa duž rasedne ravni (Grasemann & Stüwe, 2002, Glavatović, 2005).

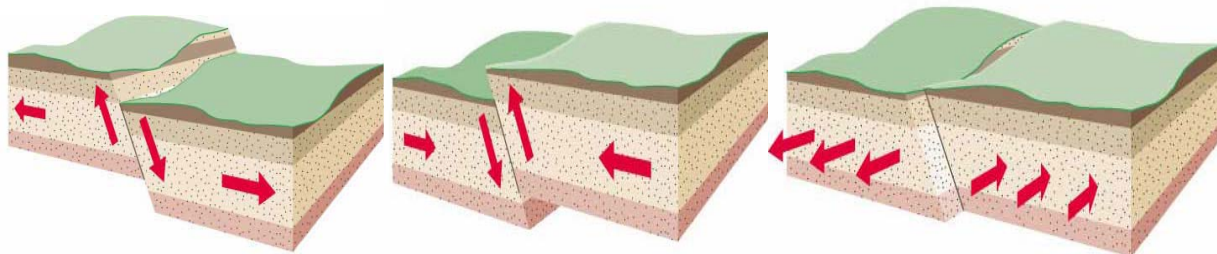
Najjužniji (jugoistočni) deo Panonskog basena na teritoriji Srbije obeležen je relativno prostranom marginom basenskih struktura, koje su genetski vezane za Panonski basen. U celini, radi se o basenskim i peri-basenskim oblastima, koje se protežu ka jugu, duž reke Morave i u oblastima između Dinarida i Kapatsko-Balkanskih morfoloških struktura. Panonski i posebno peri-panonski regioni formiraju relativno uzak pojas koji se odlikuje kompresivnim karakteristikama. Pomeranjima od Neogena i Kvartara formirale su se strukture koje se u mnogo čemu razlikuju od ostatka Panonskog basena (Marović & Đoković, 1989; 1990).



Slika 2.5. Digitalni model terena Panonskog basena (levo, <http://geophysics.elte.hu>) sa prostornom dispozicijom tektonskih jedinica (desno, www.sciencedirect.com)

Panonski basen kao celina, karakterističan je po slaboj i umerenoj seizmičnosti, što se ne odnosi na njegov zapadni i južni obod. Isto važi i za područje Panonskog basena i južni obod na teritoriji Srbije (Gutdeutsch & Aric, 1988; Procházkova & Roth, 1993). Panonski basen karakteriše slaba seizmičnost sa nepravilnom raspodelom epicentara (Horváth & Rumpler, 1984). U južnom delu Panonskog basena je nešto naglašenija seizmičnost, producirana transferom stresa indukovano kretanjem Jadranske ploče u smeru sever-severoistok. Kao što je pomenuto u prvom poglavlju disertacije, postoji opšta saglasnost među gotovo svim naučnicima ovdašnjeg doba, da je ekstenzioni režim litosfere odigrao važnu ulogu u samom formiranju Panonskog basena i da ovaj basen obuhvata područja sa tankom kontinentalnom korom i visokim litosferskim toplotnim protokom (Stegena, 1975; Horváth & Rumpler, 1984; Csontos, 1995). Na osnovu analize seizmičnosti na delu Panonskog basena koji pripada teritoriji naše zemlje, evidentno je da

preovlađuju transkurentni (klizajući) rasedi, ali su takođe prisutni i normalni i reversni rasedi (Marović et al., 2002). Na unutrašnjim južnim marginama dela Panonskog basena koji pripada teritoriji naše zemlje, prisutan je kompresivni režim klizajućih raseda sa horizontalnom osom maksimalnog kompresivnog naprezanja, orijentisanom u smeru jugozapad-severoistok, sa tendencijom okretanja ka istoku.

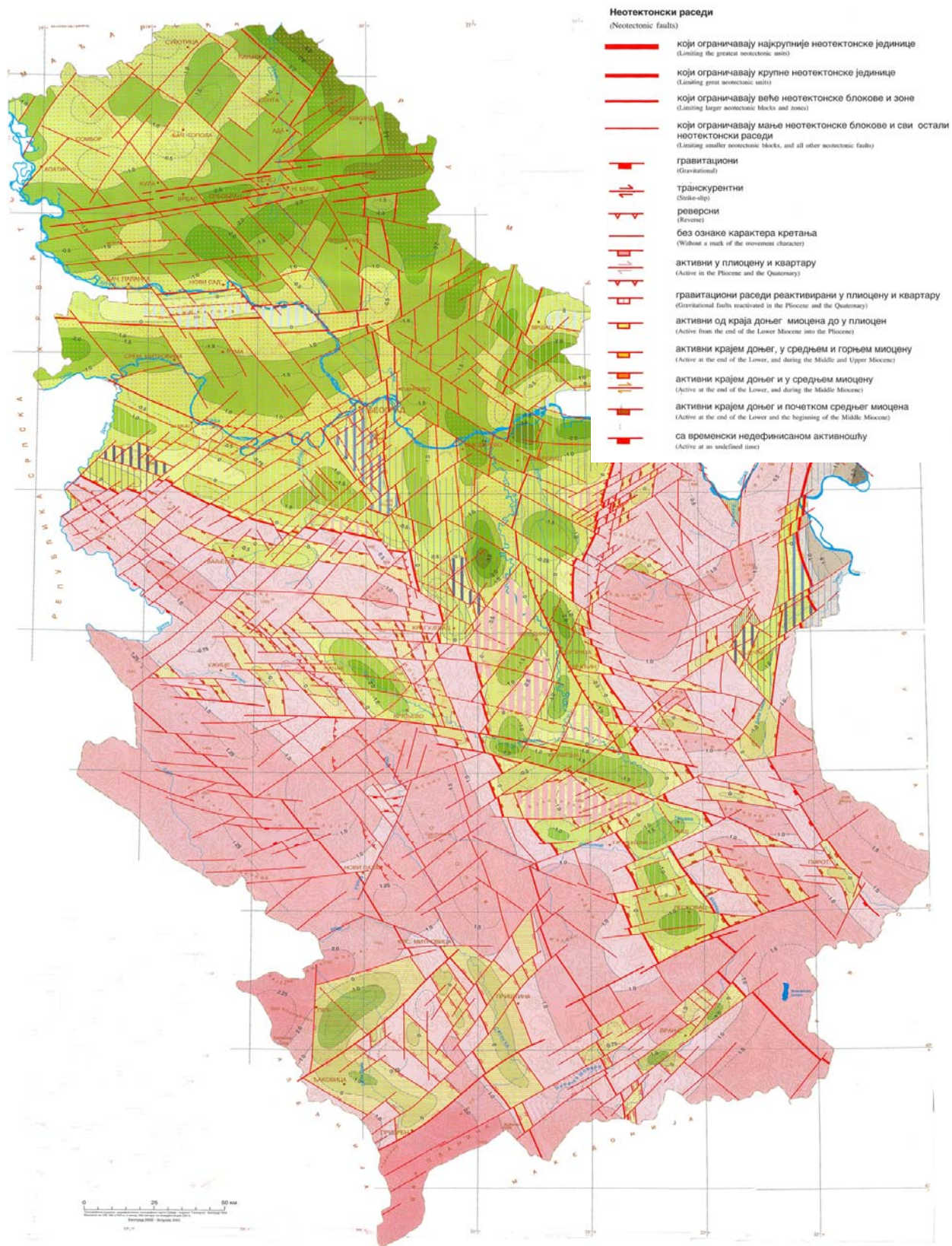


Slika 2.6. Normalni rasedi (levo), reversni rasedi (u sredini) i transkurentni ili klizajući rasedi (desno)

Objedinjavanjem svih relevantnih istraživanja (seizmološki, geološki i drugi), rekonstruisana je geometrija i kinematika aktuelnih raseda na delu Panonskog basena i pokazano je da su ovo bili rasedi koji su se formirali pre kvartara, u brojnim slučajevima i pre neogena, ali njihove kinematičke karakteristike su promenjene i obnovljene pod dejstvom promena naprezanja. Transkurentni rasedi orijentacije sever/severoistok-jug/jugozapad označeni su sa epicentrima u istočnom delu basena na teritoriji naše zemlje. Na najbližem delu južne margine basena, aktuelni rasedi se mogu podeliti u nekoliko sistema, u zavisnosti od karaktera kretanja (klizanja), pri čemu dominiraju rasedi orijentacije istok/jugoistok-zapad/severozapad i severoistok-jugozapad. Snažniji zemljotresi u ovoj oblasti uglavnom su se dogodili u segmentima prvog sistema. Reversna kretanja duž sistema raseda orijentacije sever/severozapad-jug/jugoistok, sa okretanjem u pravcu sever/severoistok-jug/jugozapad, odnose sa na istočni, dok se reversni rasedi orijentacije severozapad-jugoistok odnose na zapadni deo ove zone. Idući jugozapadnim delom granice Panonskog basena na teritoriji naše zemlje, savremenu tektonsku aktivnost označavaju rasedi orijentacije severoistok-jugozapad, istok-zapad i severozapad-jugoistok. U domenu Panonskog basena, a posebno duž njegovog južnog oboda, preovlađuje kompresivni režim rasedanja terena sa transkurentnim tipom raseda. Jedan od glavnih uzročnika kompresivnog režima u ovom regionu jeste rotacija Jadranske mikroploče u smeru suprotnom od kretanja kazaljke na časovniku (Anderson & Jackson, 1987; Gerner et al, 1999; Marović et al., 2002), što je dovelo do pojave kompresije u graničnom pojasu između Jadranske ploče i Dinarida, pri čemu dolazi do oslobađanja velike količine seizmičke energije. Dilatacioni ili ekstenzionni režim rasedanja prema geološkim istraživanjima prisutan je u najjužnijem delu Panonskog basena koji pripada teritoriji naše zemlje, čime se karakteriše i oblast Bugarske i Makedonije. Granična zona između ekstenzionog režima i transkurentnih klizajućih raseda u Srbiji, odnosi se na oblast udaljenih delova južne Panonske margine.

Na slici 2.7. prikazana je Neotektonska karta Republike Srbije, sa prisutnom basenskom strukturom (oblast Vojvodine), horst strukturama unutar basenskih regiona (zapadna Srbija), izdignutim morfostrukturama Dinarida i Karpato-Balkanida, kao i glavnim rasednim jedinicama. Na oblasti istraživanja posebno se izdvajaju sledeće celine: Velika mađarska ploča (severoistočni deo Vojvodine), Severnobački prag (severno od glavnog raseda koji se pruža od Odžaka do Žitišta i Nove Crnje), Kikindska subdepresija u oblasti glavnog raseda, Južnobačka subdepresija (južno od glavnog raseda), Greda Orlovat-Beograd i Fruška gora horst. Za potrebe utvrđivanja kvartarne tektonske aktivnosti na ovom području, korišćeni su raznovrsni geološki,

geomorfološki i geofizički podaci, različitog kvaliteta i različitog nivoa pouzdanosti (Marović et al., 2002).



Slika 2.7. Neotektonska karta Republike Srbije (autori: Marović, M., Đoković, I., Toljić, M.)

Autori Neotektonske karte napominju da mnoge savremene metode istraživanja, koje bi poboljšale razumevanje litosferske strukture (geološka merenja naprezanja, istražna bušenja, itd.) retko ili uopšte nisu korišćene na teritoriji Srbije. Na osnovu tih činjenica, primenjeni su u velikoj meri rezultati istraživanja na Panonskom basenu van teritorije naše zemlje.

Kvartarna tektonska aktivnost dela Panonskog basena kome pripada deo Srbije, a time posledično i seizmičnost, na prvom mestu zavise od kompresivnog naprezanja indukovanog u graničnim zonama Jadranske ploče, Dinarida i Helenidske orogene zone konvergencije, dok u manjoj meri na ovaj proces utiču ekstenzioni procesi indukovani na Egeju. Mehanizam pritiska Jadranske ploče na spoljašnje Dinaride inicira snažne seizmičke aktivnosti, koje se prenose na unutrašnje Dinaride i deo Panonskog basena koji pripada Srbiji, u smeru severoistok-jugozapad. Na osnovu toga, na području jugozapadne Srbije (Kopaonički region), postoji tendencija okretanja kompresivnog naprezanja ka istoku, što ukazuje na tektonski transfer blokova. Interesantno je da udaljene granične zone dela Panonskog basena na teritoriji naše zemlje, odnosno unutrašnji Dinaridi (izuzev Kopaoničkog regiona) i Karpati u Istočnoj Srbiji, pokazuju manju seizmičnost od oblasti blizu konvergentne zone Jadranske ploče i Dinarida. Ovo je razumljivo za Karpate u istočnoj Srbiji, s obzirom na njihovu udaljenost od konvergentne zone Jadranskog bloka i Dinarida, međutim to se teško može objasniti kada su u pitanju Dinaridi, jer su oni bliže izvoru nedavnih kompresivnih naprezanja od južnog oboda Panonskog basena. Objašnjenje treba potražiti u sastavu i međusobnim odnosima tri velike kore: Jadranske ploče, Dinarida i Panonskog basena.

Najjača kvartarna tektonska aktivnost, obeležena jakim stepenom seizmičnosti, upravo se javlja u zoni kontakta između ova tri tektonska entiteta. Prenos kompresije je prisutan u severoistočnom delu od Jadransko/Dinaridske zone konvergencije, u zoni Dinaridi/Panonski basen i zoni kontakta Karpato-Balkanidi/Panonski basen. Zbog tanke litosfere u okviru Panonskog basena, krutosti Dinarida i Karpata, njihove zone kontakta su najpodložnije reakciji na kompresiju, što uzrokuje pojavu dominantnih transkurentnih klizajućih raseda, a što prati i pojava umerenih ali čestih seizmičkih aktivnosti na ovom području. Panonski basen i njegovo poreklo najčešće se razmatraju u odnosu na formiranje Karpatskih zalučnih basena (eng. *back-arc basin*). Pojava formiranja zalučnih basena nastaje kao posledica sučeljavanja Jadranske ploče sa evropskim kontinentom. Južni granični rased Panonskog basena (Fella-Sava-Karlovac) predstavlja prirodnu graničnu zonu između Dinarida i Panonskog basena, tako da su marginalna područja južnog Panonskog basena pod uticajem procesa koji se dešavaju u Dinaridima (Prelogović et al., 1998). Neogeni i kvartarni sedimenti su dominantni u jugozapadnom delu Panonskog basena, koji se graniči sa južnim Alpima na zapadu i Dinaridima na jugu. Tu su prisutne i depresije ispunjene neogenim naslagama, koje se razlikuju po svojim dimenzijama i dubini. Najveće i najdublje depresije u ovom delu Panonskog basena, odnose se na Sava i Drava depresiju, gde su geološke sedimentne strukture dobro poznate zbog istraživanja nafte (Lučić et al., 2001; Saftić et al., 2003).

Tektonsko spuštanje velikih segmenata blokova i formiranje basena u okviru Alpske orogene zone, vezani su za donji miocen. Delovi Panonskog basena, koji su danas ispunjeni debljim sedimentnim slojevima, bili su izloženi konstantnom tektonskom spuštanju još od donjeg miocena. Jedan od tih delova odnosi se na jugoistočni deo Panonskog basena, koji se nalazi na teritoriji Srbije. Na osnovu geoloških istraživanja, definisane su tri osnovne celine na ovom delu Panonskog basena: Tisa-Dacia blok, Vardarska zona i Srpsko-makedonska masa, čiji je severni deo bio karakterističan miocnim ekstenzionim pomeranjima. Dominantne geološke strukture na ovom području su: rovovi, horstovi i depresije. Horstovi predstavljaju entitete koji remete homogenost morfološke strukture Panonskog basena. Sedimentima su prekriveni spuštani blokovi Srpsko-makedonske mase, dok je horst Vršačkih planina njen najseverniji površinski deo. Najseverniji deo Vardarske zone odnosi se na horst Fruške gore, dok Dravski rov deli

Vardarsku zonu od Tisa-Dacia bloka (Prelogović et al., 1998; Čalić et al., 2012). Karakteristični su Moravski rov, kao i rovovi Mlave i Kolubare, koji su uticali na ekstenziju basena južno od Save i Dunava. Savski i Mačvanski rov proširuju granicu basena zapadno i jugozapadno (Marović et al., 2007; Čalić et al., 2012). Kada su u pitanju depresije, karakteristične su Krnješevska, Alibunarska, Itebejska i Južnobačka depresija, pri čemu je morfologija depresija uticala na režim podzemnih i površinskih voda, koji je uslovljen lokalnom topografijom.

Ekstenzionni procesi, prisutni u Egejskoj oblasti tokom pliocena i kvartara, tek su neznatno uticali na kvartarne deformacije Panonskog basena na teritoriji Srbije, uglavnom duž njegovog južnog oboda. Azimut maksimalne dilatacije (severozapad-jugoistok) u ovom regionu identičan je onom u severnoj Grčkoj i Makedoniji (Papazachos & Kiratzi, 1996; Marović et al., 2002). Uticaj ekstenzionnih procesa u okviru ovih regiona, mnogo je slabiji tokom kvartara nego što je bio u pliocenu. Takav zaključak je zasnovan na činjenici da je pliocena basenska struktura održana početkom kvartara. Takva aktivnost je razumljiva ako se uzme u obzir povećanje kompresivnog pritiska, koje potiče od Jadranske ploče i Dinaridsko-Helenidske orogene konvergentne zone početkom kvartara, sa jedne strane, i udaljenost ovih regiona od centra maksimalne ekstenzije (Egejsko more), sa druge strane. U najsevernijem Egejskom regionu, ekstenzionni procesi, iako oslabljeni, uticali su na pojavu normalnih raseda i sleganje pojedinih delova na južnom obodu Panonskog basena (područja Leskovca i Niša), što je praćeno slabijim stepenom seizmičnosti. Ovi mehanizmi iniciraju pojavu klizajućih raseda sa kompresivnim karakteristikama. Teško je verovati da su ekstenzionni procesi na Egeju mogli generisati ovakve pokrete. Objašnjenje se može potražiti u pretpostavci da je relativno tanka Panonska kora (litosfera) na teritoriji Srbije, koja je „stisnuta” između krutih Dinarida na jugozapadnoj strani i Karpato-Balkanida na istoku, podvrgnuta istežanju u smeru severozapad-jugoistok, što prati i pojava normalnih raseda orijentisanih u smeru severoistok-jugozapad (Marović et al., 2002). Međutim, ovaj zaključak nije empirijski potvrđen i mora se dokazati. U graničnim zonama Panonske litosfere sa krutim Dinaridima i Karpatima u Istočnoj Srbiji, kvartarna naprezanja su uzrokovala dominantne transkurentne rasede kinematičkog tipa. To je uzrokovalo pojavu čestih ali umerenih magnituda zemljotresa. Dinaridi, izuzev granične zone sa Jadranskom pločom, kao i Karpato-Balkanidi, iako krute kompaktne celine, nisu bili podložni većim deformacijama tokom kvartara, osim prisutne pojave opšteg uzdizanja. Iz tog razloga, oni se odlikuju niskom seizmičkom aktivnošću. Izuzetak predstavljaju samo oni delovi koji pripadaju zoni uticaja ekstenzionnih procesa na Egeju, gde se javljaju normalni rasedi koji rezultiraju slabom do umerenom seizmičnošću.

3. AKVIZICIJA PODATAKA ZA ANALIZU DEFORMACIJA PRIMENOM SAVREMENIH TEHNOLOGIJA

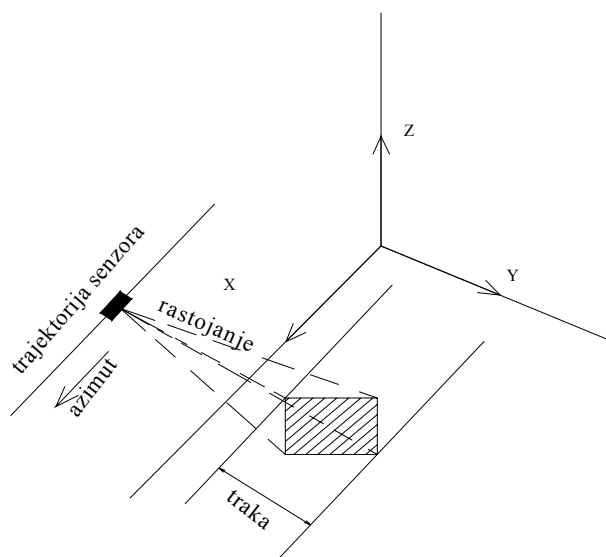
3.1. RADARSKA INTERFEROMETRIJA

Industrijski i vojni razvoj SAR aplikacija, baziranih na vazдушnim platformama, datira od šezdesetih godina prošlog veka. Lansiranjem prvog civilnog SAR satelita SEASAT 1978. godine, omogućeno je mnoštvo informacija za potrebe istraživanja i monitoringa različitih fenomena vezano za Zemljinu površinu, mora i okeane. Radarska metoda se zasniva na primeni takozvanih aktivnih senzora i predstavlja jednu od savremenijih tehnika za prikupljanje prostornih podataka za potrebe geodinamičkih analiza. Osnovna prednost prikupljanja podataka ovom metodom jeste nezavisnost od vremenskih uslova i dnevnog svetla. Trenutno su prisutne sledeće tehnologije radarskog prikupljanja podataka:

- **SAR** (*Syntetic Aperture Radar*) – radar sa sintetičkom blendom
- **InSAR** (*Interferometric Syntetic Aperture Radar*) – SAR interferometrija, tj. interferometrijski radar sa sintetičkom blendom
- **PS-InSAR** (napredna verzija konvencionalne InSAR tehnike koja rešava probleme vremenske i geometrijske dekorelacije)

3.1.1. Princip radarskog snimanja

SAR je tehnika daljinske detekcije u kojoj se mikrotalasni signali emituju od senzora ka predmetnoj površini, reflektuju se od nje i vraćaju ka senzoru. Princip merenja je sličan tehnologiji laserskog skeniranja, pri čemu se ovde koriste zračenja iz dela elektromagnetnog spektra sa dužim talasnim dužinama, jedan izvor zračenja emituje mikrotalasne signale a prijemnik sa antenom registruje signale koji se reflektuju od površine. Na osnovu izmerenog vremena, određuje se rastojanje do površine od koje se reflektuje mnoštvo signala koje karakteriše njihova amplituda i faza (McCandless, 1989; Cvjetinović, 2005; Ferretti et al., 2007).



Slika 3.1. Osnovni princip radarskog snimanja površine terena

Snimanje površine terena kod SAR sistema vrši se bočno u odnosu na trajektoriju kretanja senzora, pri čemu se kao proizvod snimanja dobija dvodimenzionalna slika snimljenog područja visoke rezolucije. Jedna dimenzija se odnosi na azimut (pravac trajektorije senzora) a druga na rastojanje (pravac upravan na trajektoriju senzora). Osnovne jedinice (ćelije) slike su pikseli, koji označavaju stepen refleksije mikrotalasnih signala od površine terena. Svaki piksel nosi informaciju o amplitudi i fazi mikrotalasnog signala koji se reflektuje od te male oblasti zemljine površine koju reprezentuje piksel, tako da se na osnovu amplitude identifikuje struktura površine terena (stene, vegetacija, zgrade). Kada se radi o slikama generisanim ERS satelitima, vezano za veličinu piksela, rezolucija SAR slika iznosi oko 5 metara u pravcu azimuta i oko 9.5 metara u pravcu upravnom na pravac trajektorije senzora. U opštem slučaju, rastojanje između susednih piksela iznosi oko 4 metra u pravcu azimuta i oko 8 metara u pravcu upravnom na pravac trajektorije senzora, tako da je u oba pravca obezbeđen određen preklap. Dakle, SAR slika sadrži za svaki piksel merenja amplitude reflektovanog mikrotalasnog zračenja od površine terena. Amplituda više zavisi od konfiguracije terena (hrapavosti) nego od hemijske strukture. Kada su u pitanju stene i elementi urbanih sredina, radi se o visokim amplitudama, dok glatke i ravne površine (vodeni baseni) pokazuju niske amplitude. Kada se uzme u obzir da se kod snimanja površine terena SAR sistemom mere kosa rastojanja od senzora do površine terena, uloga interferometrije je upravo u transformaciji ovih podataka u odgovarajuću projekciju. Prostorna rezolucija nije direktno zavisna od talasne dužine, već predstavlja funkciju proizvoda procesirane širine signala τ i brzine svetlosti c , podeljenog sa dva.

$$\text{Raspon rezolucije} = \left(\frac{c \cdot \tau}{2} \right) \quad (3.1)$$

Raspon rezolucije je u direktnoj vezi sa brzinom prenosa podataka. Mnogi savremeni radarski sistemi, uključujući i SAR, emituju signal koji je linerano frekventno modulisan. Kada je u pitanju obrada SAR slika, primenjuje se tehnika Furijeove ocene spektra, koja se sprovodi putem *Brzih Furijeovih transformacija*. Sumarno, procesiranje SAR slika zahteva mnogo koraka u okviru same procedure procesiranja i intenzivne računске obrade signala (Curlander & McDonough, 1991).

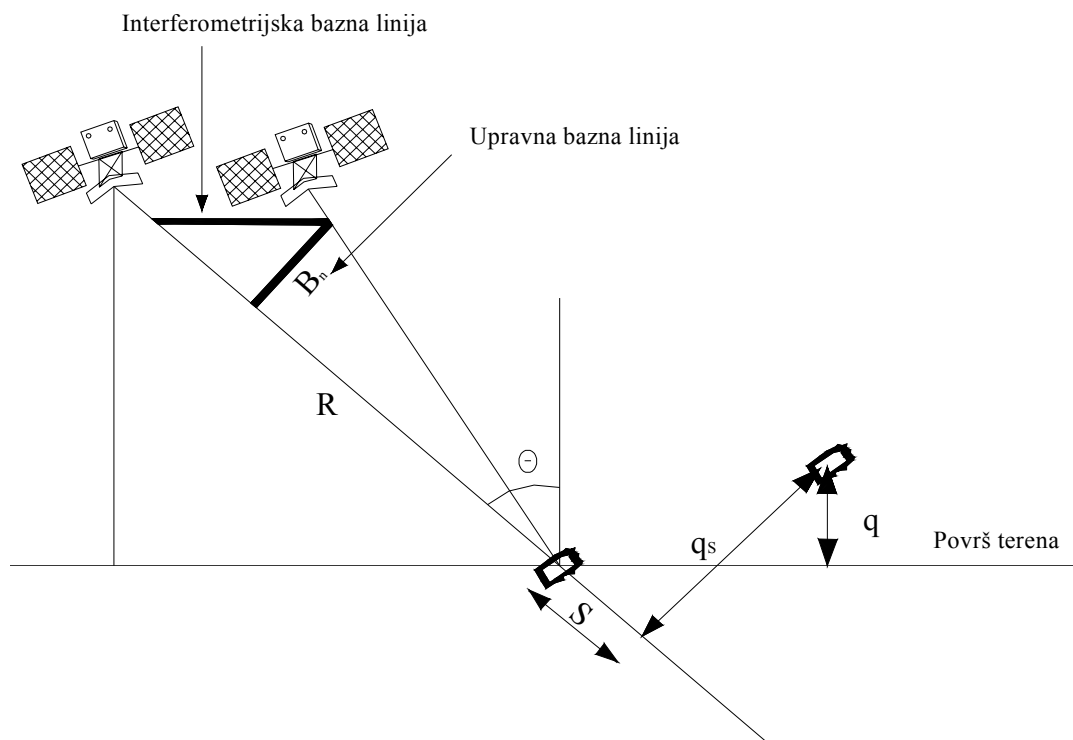
3.1.2. SAR interferometrija

SAR interferometrija, pored dugobazisne interferometrije (eng. *Very Long Base Interferometry*, VLBI) i tehnologije globalnog pozicionog sistema (GPS), predstavlja najaktuelniju metodu određivanja geodinamičkih pomeranja, pri čemu se mogu kombinovati merenja generisana ovim metodama u cilju dobijanja što kvalitetnijih zaključaka o pomeranjima tektonskih ploča u horizontalnom i visinskom smislu.

Satelitska radarska interferometrija InSAR ima primenu u merenju deformacija od početka devedestih godina prošlog veka. Ova tehnologija se zasniva na snimanju površine terena sa dva SAR senzora sa dve vrlo bliske orbite u različitim vremenskim trenucima, pri čemu se generišu slike visoke rezolucije, a na osnovu stereo-para se kreira digitalni model visina za potrebe detektovanja pomeranja terena u visinskom smislu. Dakle, za svaku tačku na snimljenoj površini terena dobijaju se različite vrednosti rastojanja sa dva SAR senzora, tako da isti pikseli za dve slike imaju iste vrednosti amplitude a različite vrednosti faze. Radar satelita (npr. ERA1/2, ENVISAT) emituje monohromatski signal. Mali deo energije signala se rasipa prilikom refleksije od površine terena i natrag dolazi do radarske antene sa određenim zakašnjenjem. Vremensko

kašnjenje se izražava kao fazno pomeranje između originalnog i rasutog signala. Nakon 35 dana, C kanal satelita ENVISAT prelazi isti region snimanja, pri čemu se dobija druga radarska slika zemljine površine. Ako je došlo do pomeranja površine terena usled tektonskih ili drugih uticaja, faza druge slike će biti različita (Heck et al., 2010). Upravo određivanjem fazne razlike, može se doći do vrednosti razlike rastojanja od dva senzora. Princip sinetičke blende zasniva se na kombinaciji signala dobijenih na različitim pozicijama u prostoru, koje detektuje radar tokom procesa snimanja, tako da se na taj način formira jedna veoma dugačka antena.

Primena ove metode je naročito efikasna na područjima na kojima nije moguće prikupiti podatke na drugačiji način. Dosadašnja istraživanja pokazala su da se tačnost digitalnih modela visina, dobijenih klasičnim radarskim snimanjem, u horizontalnom smislu kreće oko 10 metara a u vertikalnom smislu oko nekoliko metara. Međutim, kada je reč o SAR interferometriji, ta tačnost je mnogo veća, za ERS satelite radarska talasna dužina iznosi 5.6 cm, što implicira tačnost određivanja pomeranja od pola centimetra, čime je primena InSAR metode u geodinamičkim merenjima na velikim površinama sasvim opravdana. InSAR jeste veoma efikasna tehnika za merenje deformacija na površini Zemlje, međutim pažnja se mora posvetiti vremenskoj i geometrijskoj dekorelaciji, kao i atmosferskim smetnjama koje mogu u određenoj meri ugroziti tačnost rezultata. Kao primer smanjivanja vremenske dekorelacije prilikom snimanja površi terena između dve vremenske epohe, navodi se satelitska SAR misija ERS1-2 sa dva integrisana satelita (eng. *European remote sensing satellite*, ERS).



Slika 3.2. Princip snimanja sa geometrijskim parametrima satelitske interferometrije SAR sistema

Rastojanje između dve satelitske platforme (orbite) projektovano na ravan, koja je upravna na orbite, naziva se interferometrijska bazna linija. Njena projekcija na tzv. kosi opseg je upravna bazna linija.

Evropska svemirska agencija je odlučila da poveže dva sistema ERS 1 i ERS 2 da rade u tandem misiji od 16. avgusta 1995. do sredine maja 1996. godine, pri čemu su ove dve platforme funkcionisale u geometrijski vrlo bliskim orbitama sa vremenskim intervalom od samo 24 sata, dakle ERS 2 generiše snimke jedan dan nakon ERS 1 satelita. Veliki broj stereo-parova snimaka generisanih iz ove tandem misije se i danas veoma često koriste u istraživanjima. Prednost dve slike koje su generisane sa orbita koje se vrlo malo razlikuju, rezultira stvaranjem relacije između interferograma (fazna razlika između dve slike) i visina površine terena. Generisanje interferograma se izvodi sistemom *piksel po piksel*, tako da se amplituda na interferogramu dobija množenjem amplitude piksela prve slike sa amplitudom korespondentnog piksela na drugoj slici, dok podatak na interferogramu označava vrednost razlike faza između prve i druge slike (Evropska svemirska agencija, februar 2007).

Geometrijski parametri sistema satelitske SAR interferometrije (Slika 3.2) su:

B_n – upravna bazna linija (sračunava se iz preciznih podataka o orbitama)

R – rastojanje od SAR senzora do površine terena

q_s – razlika između rezolucija piksela duž normale (bazne linije) u kosoj projekciji

θ – ugao između mikrotalasnog signala i vertikalne ravni

Razlika rastojanja od dva SAR senzora do terena Δr određuje se na osnovu izraza:

$$\Delta r = -2 \frac{B_n \cdot q_s}{R} \quad (3.2)$$

Interferometrijska razlika faza $\Delta\varphi$ određuje se na osnovu:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta r}{\lambda} = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n q_s}{R} \quad (3.3)$$

Kada se odredi razlika rastojanja Δr i rastojanje do jedne SAR antene R , visina tačke na površini zemlje se može izračunati na osnovu izraza:

$$H = H_a - (R + \Delta r) \cdot \cos \theta$$

pri čemu je H_a - visina antene iznad referentne površi (elipsoid WGS84) (3.4)

Razlika Δr se može odrediti sa tačnošću od nekoliko milimetara, međutim, prethodno se mora pristupiti rešavanju 2π neodređenosti faze. Vrednosti faze na SAR slikama kreću se u opsegu od 0 do 2π , pa je potrebno odrediti ceo broj talasnih dužina i taj postupak se naziva odmotavanje faze (eng. *phase unwrapping*). Kada se završi proces odmotavanja interferometrijske faze, dobija se karta visina sa koordinatama u SAR sistemu, i to je prvi korak ka generisanju definitivnog DEM-a. Karta visina u SAR sistemu se obično izrađuje u WGS84 projekciji na WGS84 elipsoidu i po potrebi se može transformisati u neku drugu projekciju (npr. UTM).

3.1.2.1. Određivanje komponente pomeranja terena

Tokom procesa interferometrijske analize, uzimaju se u obzir sledeći parametri:

- Ugao snimanja
- Geometrijska baza
- Vremenska baza (generisanje slika sa dva SAR sistema)
- Vreme akvizicije podataka
- Ocena koherentnosti
- Meteorološki uslovi

Kada je u pitanju vrednost interferometrijske bazne linije, tj. rastojanja između dva SAR senzora, obično se radi o vrednostima koje se kreću u rasponu od 10 do 500 m. Kao što je već rečeno, neophodno je obezbediti da se dve slike generišu sa vrlo sličnih orbita u geometrijskom smislu. Između dva snimanja ne sme doći do značajnijih promena u geofizičkim svojstvima snimane površine, tj. vremenska baza mora biti dovoljno kratka kako bi se osigurala minimalna distorzija slike (Oštir, 2000; Hanssen, 2005; Đapo, 2009). Ocena koherentnosti se odnosi na ocenu rasipanja mikrotalasnog signala koji se reflektuje od površine terena i vraća do antene prijemnika u okviru SAR sistema. D-InSAR se može uspešno primeniti za merenje deformacija Zemljine površine usled delovanja aktivnih vulkana (Amelung et al., 2000), koseizmičkih pomeranja (Simons et al., 2002), post-seizmičkih pomeranja (Pollitz et al., 2001), rudarstvu i podzemnoj eksploataciji (Amelung et al., 1999).

InSAR metoda koja naročito ima primenu u preciznom određivanju deformacija tla i objekata u rasponu talasne dužine radara, naziva se **diferencijalna interferometrija** (D-InSAR). U tom slučaju, generišu se najmanje tri SAR slike, pri čemu se na osnovu njih upoređuju dva generisana interferograma, a finalni produkt predstavlja diferencijalni interferogram. Ako vrednosti razlika faza na dva interferograma nisu iste, znači da je došlo do deformacije snimljene površine terena između datih vremenskih epoha snimanja.

Pretpostavimo da su se određene tačke na površini Zemlje pomerile između dva SAR snimanja (primer sleganja terena usled klizišta ili zemljotresa). U tom slučaju, fazna razlika će se odrediti na osnovu izraza:

$$\Delta\varphi_d = \frac{4\pi}{\lambda} d \quad (3.5)$$

pri čemu je d pomeranje (razlika piksela) projektovano u kosoj projekciji.

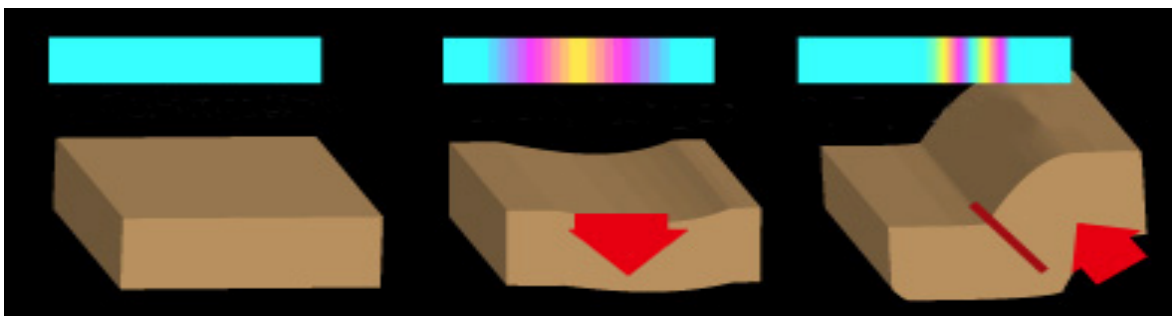
Nakon kreiranja izravnatog interferograma, interferometrijska faza će sadržati i podatke o visini terena i podatke o pomeranjima (Evropska svemirska agencija, februar 2007):

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n q}{R \cdot \sin\theta} + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot d \quad (3.6)$$

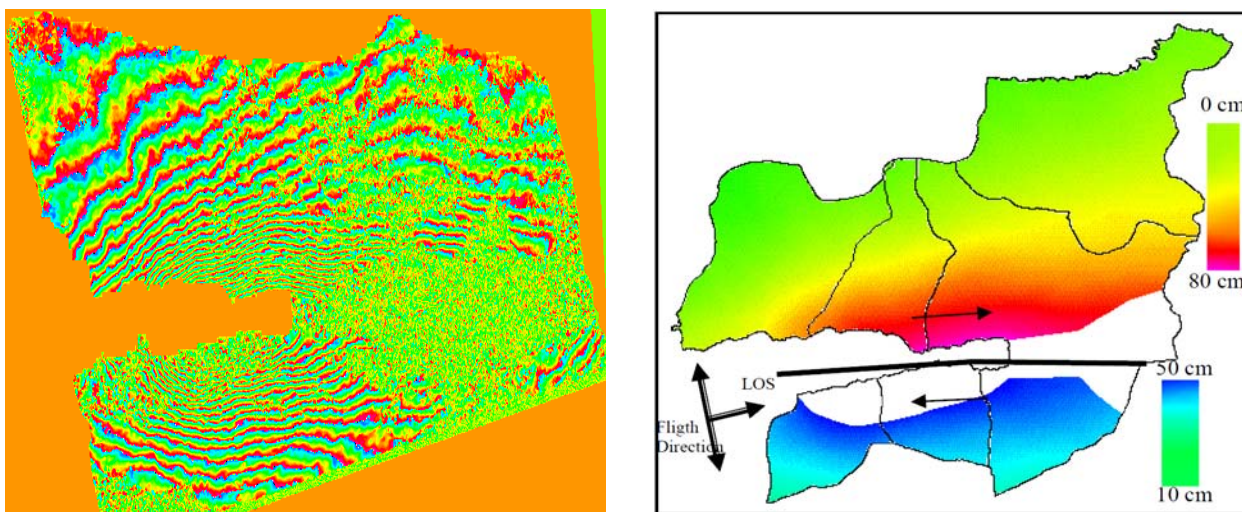
Ako za područje snimanja imamo na raspolaganju digitalni model visina, podaci o visinama se mogu ekstrahovati iz interferometrijske faze (generisanje tzv. diferencijalnog interferograma), tako da ostanu samo podaci o komponentama pomeranja. U slučaju ERS satelita, talasna dužina iznosi 5.6 cm, pod pretpostavkom da upravna bazna linija iznosi oko 150 m, izraz za interferometrijsku fazu glasi:

$$\Delta\varphi = \frac{q}{10} + 225 \cdot d \quad (3.7)$$

Iz ovoga sledi da je osetljivost SAR interferomerije na pomeranja terena veoma velika, ako je komponenta pomeranja u kosoj projekciji 2.8 cm, to će odgovarati interferometrijskoj faznoj razlici od 2π . Deformacije zemljine površine na generisanom interferogramu se izražavaju u vidu promene boja. Manje deformacije su označene blagom promenom boje, dok veće deformacije rezultiraju naglom promenom boje.



Slika 3.3. Primer interpretacije pomeranja na interferogramu u slučaju kada nema deformacija (levo), kada se radi o blagim deformacijama (u sredini) i u slučaju naglih promena terena (desno)



Slika 3.4. Interferogram dobijen od podataka prikupljenih 13.8.1999. i 17.9.1999. godine korišćenjem ROIPAC softvera (levo), kartirane deformacije zemljine površine pre i posle zemljotresa u pokrajini Izmit (desno) (Aydöner et al., 2004)

Deformacije se mogu uočiti kada su pomeranja na površini terena koherentna i proširena na nekoliko susednih piksela. U ovom slučaju se pretpostavlja da se lokacija rasipanja u okviru piksela nije promenila, dok je cela oblast piksela i susednih ćelija pomerena na gore, na dole ili u stranu. Tada može da se sprovede komparacija faza dve slike. Takozvana diferencijalna faza sadrži informacije o promeni u pravcu posmatranja ili u pravcu pogleda antene. Tačnost detektovanih pomeranja koja se može postići diferencijalnom interferometrijom je u rasponu manjem od talasne dužine radarskog signala, a kreće se od nekoliko milimetara do nekoliko centimetara. Visoka preciznost je posledica analize razlika na interferogramu, a ne odnosi se na

direktno upoređenje stvarnih modela visina iz dve epohe. Da bi se postigla tako visoka preciznost detekcije pomeranja, potrebno je dobro znanje o topografiji područja kao i o položaju i azimutu radarske antene. Merenje fazne razlike, zasnovane na dva uzastopna radarska snimka, omogućava definisanje samo jedne komponente vektora pomeranja u prostoru, u pravcu pogleda antene, tj. u pravcu senzor-meta, tako da je to značajan nedostatak ove tehnike. Međutim, ova tehnologija obezbeđuje veliku prostornu pokrivenost, a pomenuti nedostatak se može prevazići kombinacijom radarskih podataka iz uzlaznih i silaznih orbita, kako bi se postiglo definisanje dve komponente pomeranja što je obično dovoljno za dalje analize. Detekcija pomeranja sa radarskom interferometrijom zavisi od prirode pomeranja, pri čemu postoje dva ključna uslova za dobijanje adekvatnih rezultata (Oštir, 2000):

- Promene u toku same akvizicije podataka ne smeju biti prevelike (npr. usled delovanja vulkana ili razornog zemljotresa). Ovo se posebno odnosi na njihov gradijent koji ne treba biti prevelik u okviru jednog piksela.
- Rasipanje u okviru piksela za vreme akvizicije podataka mora biti što je moguće ravnomernije. Preciznije, položaj emitera u posmatranoj rezoluciji ćelije ne treba menjati više od 20% od talasne dužine korišćenog mikrotalasnog zračenja.

Prvi uslov, u principu, nije veliki problem. Ako su se velike promene desile za vreme akvizicije podataka, modeli visina, pre i posle uzrokovanih događaja, jednostavno se oduzimaju, pri čemu se mogu detektovati promene u rasponu od nekoliko metara, ali ograničenje predstavlja produkcija visoko preciznog modela visina. Kada nije ispunjen drugi uslov, radi se o vremenskoj dekorelaciji, što dovodi do toga da je praktično nemoguće uporediti dve faze radarskih slika. Teškoće sa dekorelacijom se mogu prevazići korišćenjem PS-InSAR tehnike, koja uzima u obzir samo ona područja (tačke) koja su koherentna, tj. fazno stabilna.

3.1.3. PS-InSAR

PS-InSAR (eng. *persistent scatterer*) predstavlja nadogradnju konvencionalne InSAR tehnike u smislu rešavanja standardnih problema kod InSAR-a vezano za vremensku i geometrijsku dekorelaciju, pri čemu se atmosferski uticaji mogu filtrirati. PS-InSAR tehnika omogućava sistematsko praćenje pomeranja objekata i urbanih zona, sa određivanjem godišnjih brzina pomeranja sa tačnošću od nekoliko milimetara (Ferreti et al., 2007). Ta tehnika koristi dugoperiodični niz radarskih slika za potrebe otkrivanja potencijalnih deformacija na određenom području zemljine površine. Dakle, postiže se milimetarska tačnost posredstvom fazno stabilnih radarskih meta sa visokom prostornom rezolucijom. U slučaju kada PS radarske mete ostanu koherentne u okviru multitemporalnog radarskog seta podataka, moguće je identifikovati milimetarske varijacije u određenoj vremenskoj epohi, a u smeru senzor-meta, tj. u smeru širenja radarskih talasa. Radarske mete se uglavnom odnose na uslovno stabilne veštačke forme na terenu (brane, mostovi i ostali građevinski objekti) ili prirodne reflektore koje je potrebno identifikovati na područjima od interesa, u cilju određivanja pomeranja. PS mete predstavljaju prirodne geodetske mreže koje služe za precizno praćenje površinskih deformacija Zemljine kore (klizišta, sleganja, vulkanske aktivnosti, itd.). Primena ove tehnologije dobija na značaju u urbanim sredinama zbog same gustine i mogućnosti pronalaženja prirodnih reflektora, međutim u slabo naseljenim područjima je vrlo teško identifikovati koherentne radarske mete. U tom slučaju se koriste specijalno kreirani reflektori (Slika 3.5). Podaci generisani PSInSAR tehnologijom odnose se na skup tačaka određene gustine, u zavisnosti od forme i pokrivenosti površine.



Slika 3.5. Različite vrste veštačkih PSInSAR reflektora, mobilni reflektor (levo) i ugaoni reflektori (desno)

Dva važna pitanja za interpretaciju PS-InSAR rezultata merenja odnose se na:

- Izbor lokacije objekta/terena na kome će se postaviti PS meta?
- Izbor vrste reflektora?

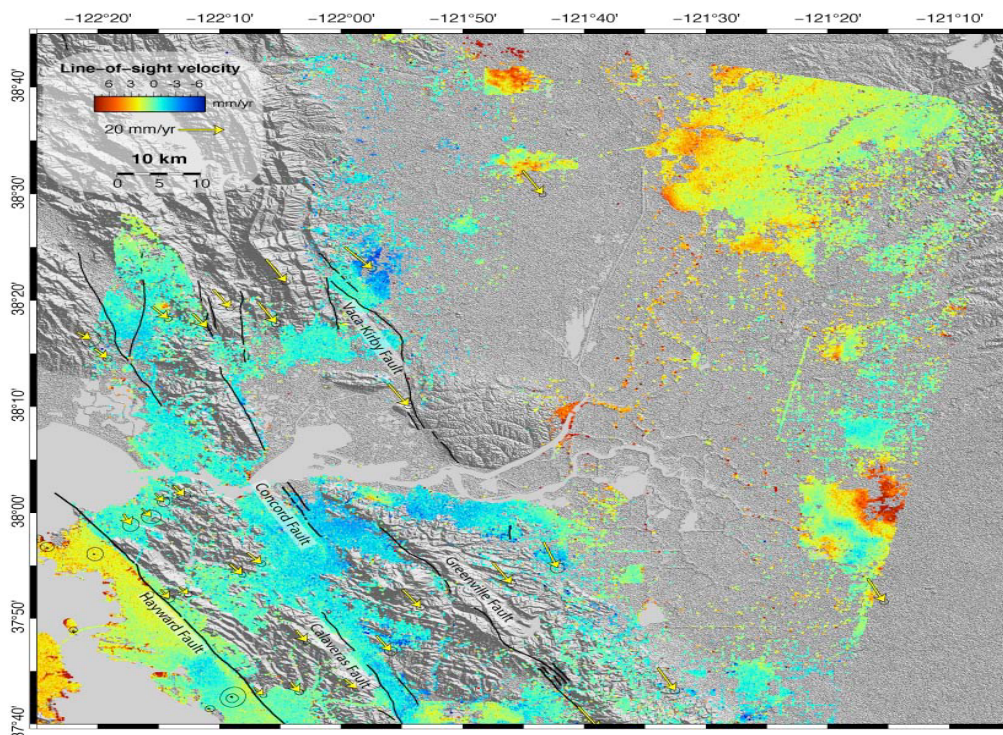
Korišćenjem 3D modela, veoma efikasno se može identifikovati mesto za PS metu na odabranom objektu. U kombinaciji sa fasadnom teksturom objekta, primenom terestričke fotogrametrije i kosih snimaka iz vazduha, izbor PS mete se precizno može identifikovati, čime će PS-InSAR analiza doprineti poboljšanju razumevanja interdisciplinarnog naučnog pristupa u geodinamici. PS-InSAR merenja predstavljaju diferencijalna merenja u odnosu na referentnu radarsku metu (sa poznatim koordinatama) i korespondentnu referentnu epohu. Kombinacijom kretanja satelita (po svojoj orbiti) i kretanja Zemlje oko svoje ose, moguće je snimiti područje od interesa kroz dve geometrije koje se odnose na: **uzlazni mod**, kada se satelit kreće po svojoj orbiti od juga prema severu i osvetljava područje od interesa od zapada ka istoku i **silazni mod**, kada se kreće od severa prema jugu i osvetljava područje od interesa u pravcu od istoka prema zapadu. Određivanje pomeranja odnosi se na smer pogleda radarske antene (eng. *Line of sight*).

Kada su na raspolaganju uzlazni i silazni set podataka, komponente pomeranja je moguće identifikovati i u horizontalnom i u vertikalnom smeru. Iako PS analiza ocenjuje deformacije na prethodno odabranim lokacijama, nije jednostavno prostorno interpretirati ovu deformaciju, uzevši u obzir princip funkcionisanja PS-InSAR sistema. Prethodno je potrebno sve korišćene radarske mete klasifikovati na osnovu njihovih topografskih karakteristika, pri čemu se u analizu uključuju i fizičke osobine u ispitivanom području deformacija. Lokalne deformacije se mogu očekivati u blizini veštačkih prostornih formi kao što su objekti infrastrukture, putevi, pruge, mostovi, itd. Ps-InSAR metoda je naročito precizna u pogledu određivanja pomeranja u vertikalnom smeru, pa je veoma pogodna kao dopunska aplikacija GPS/GNSS tehnologiji, koja obezbeđuje veoma visoku preciznost u horizontalnom položaju. Još jedna prednost PS-InSAR tehnologije je u visokoj prostornoj gustini podataka za razliku od GPS/GNSS tehnologije, gde gustina podataka zavisi od uspostavljenih aktivnih permanentnih stanica ili pasivnih tačaka geodetske osnove na kojima se obavljaju GPS/GNSS merenja.



Slika 3.6. Gustina radarskih fazno stabilnih meta na urbanom području Holandije (Gehlot et al., 2005)

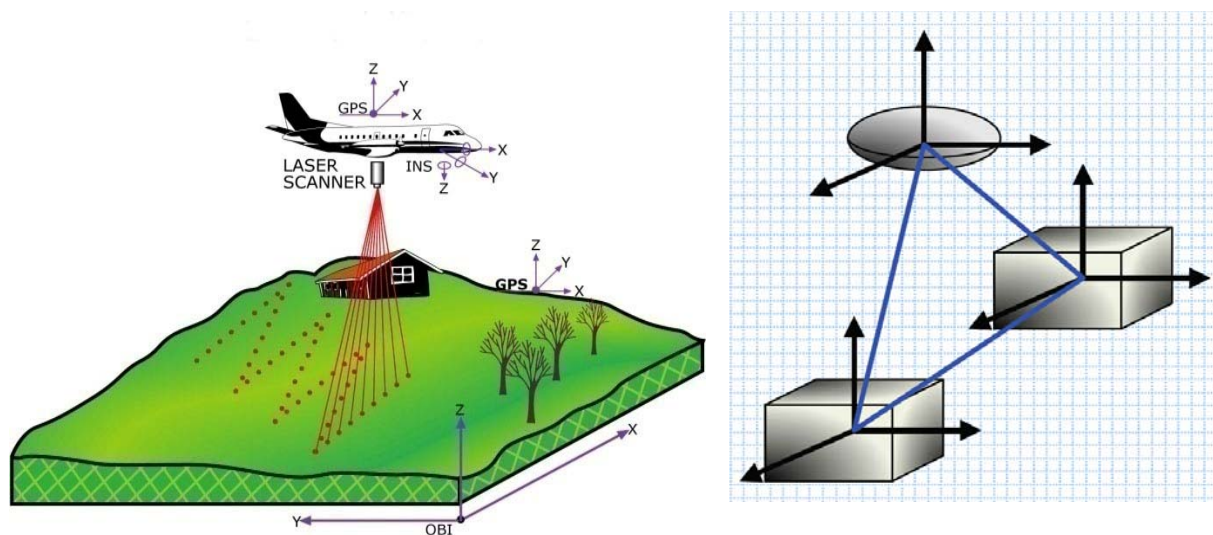
Ako se ima u vidu da PS-InSAR obezbeđuje visoku gustinu prostornih podataka, prilikom analize pomeranja između dve SAR kampanje, nije neophodna prostorna interpolacija. Međutim, za proizvoljan par epoha merenja, može se u cilju analize brzine deformacija, primeniti vremenska interpolacija za sve SAR tačke. Trend u budućnosti, u vidu detekcije pomeranja površinskog omotača Zemljine kore, svakako će predstavljati kombinacija PS-InSAR-a i GPS/GNSS-a, pri čemu neće biti potrebna ni prostorna ni vremenska interpolacija. Aktuelna integracija interneta i GIS tehnologija pruža širok spektar istraživanja, označen kao WEB bazirani GIS, koji obezbeđuje komunikaciju heterogenih sistema i servera sa podacima. Web bazirani GIS može da odigra ključnu ulogu u prikupljanju i širenju informacija u okviru različitih faza PS-InSAR analize podataka.



Slika 3.7. PS-InSAR podaci o pomeranjima za područje istočne obale *Great Valley* (Final technical report, National Earthquake Hazard Reduction Program, Roland Burgman, University of California)

3.2. PRIMENA TEHNOLOGIJE LASERSKOG SKENIRANJA U IDENTIFIKACIJI POMERANJA TERENA

Savremene tehnološke mogućnosti masovnog prikupljanja prostornih podataka sa visokim nivoom tačnosti i visokom prostornom rezolucijom otvaraju nov pristup u istraživanju pomeranja terena usled pojave raseda, klizišta i drugih prirodnih fenomena. U tom cilju profilisale su se tehnologije daljinske detekcije sa revolucionarnim razvojem elektronike senzora. Pored radarske interferometrije, u upotrebi je tehnologija LIDAR (eng. *Light detection and ranging*). LIDAR predstavlja tehnologiju laserskog skeniranja koja obezbeđuje oblak tačaka visoke rezolucije topografije i sadrži širok spektar primene, počev od kartiranja (Ardizzone et al., 2007; Jaboyedoff et al., 2008) do monitoringa deformacija (Gordon & Lichti, 2007), istraživanja klizišta ili raseda terena (Teza et al., 2007; Oppikofer et al., 2008; Abellan et al., 2010). LIDAR tehnologija se bazira na prikupljanju tri različita seta podataka. Pozicija senzora se određuje primenom globalnog pozicionog sistema (GPS), koristeći fazna merenja u režimu relativne kinematike, dok se upotrebom inercijalnog navigacionog sistema (u originalu: *Inertial Measurement Unit*, IMU), određuje orijentacija. Najvažnija integralna komponenta je laserski skener. Laser šalje infracrveni zrak prema zemlji koji se reflektuje do senzora. Vreme proteklo od emitovanja do prijema signala, uz poznavanje pozicije senzora i orijentacije, omogućava sračunavanje trodimenzionalne koordinate na površini terena.



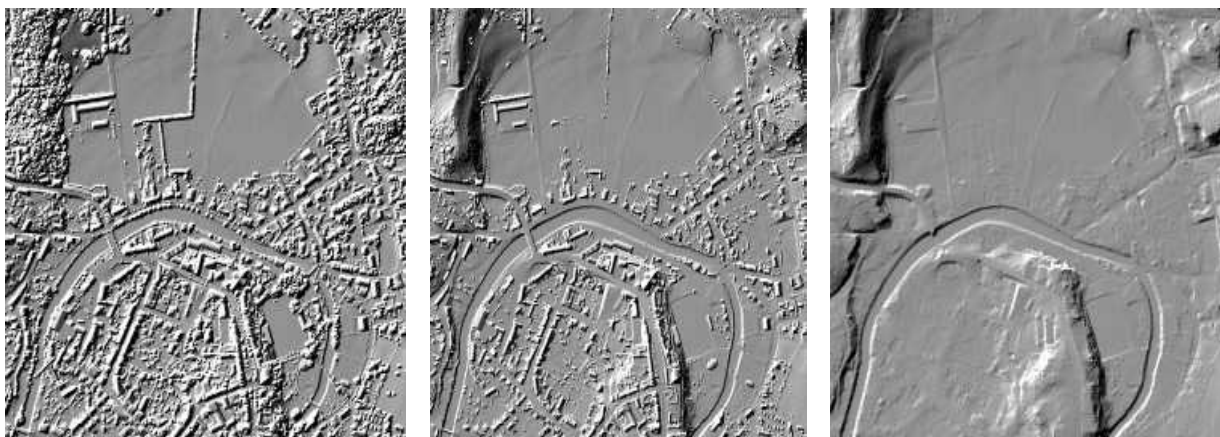
Slika 3.8. Princip laserskog skeniranja sa vazdušnih platformi

Kada su u pitanju veće površine, LIDAR se obično koristi za istraživanje klizišta i pojava raseda terena i u tom cilju se kreira tačan i precizan digitalni model visina (DEM) u rasterskom GRID ili TIN formatu, koji predstavlja 2.5D reprezentaciju topografije ili 3D oblak tačaka sa visokom gustinom prostornih informacija. Gustina uglavnom zavisi od pozicije senzora, tj. govorimo o metarskoj ili decimetarskoj rezoluciji kada je u pitanju skeniranje sa vazdušne platforme ili centimetarskoj i milimetarskoj rezoluciji kada je u pitanju terestričko (stacionarno)

lasersko skeniranje. Kada su pitanju vazdušne platforme, bitno je naglasiti da LIDAR montiran na helikopteru može obezbediti bolju rezoluciju nego kada se radi o avionu, a pri tome je omogućeno usmeravanje skenera u svim pravcima. Pri brzini leta od oko 250 km/h i visini od oko 1 km sa standardnim karakteristikama senzora (130000 emisija/sekundi), prikupljaju se podaci o položaju tačaka na zemlji sa gustinom i do 100 tačaka/m². Aktuelni LIDAR sistemi, pored GPS-a, IMU i laserskog skenera, integrišu i RGB/NIR (Red-Green-Blue, Near Infra Red) kamere visoke rezolucije koje omogućavaju izradu kvalitetnih ortofoto planova rezolucije i do 2 cm (u zavisnosti od visine preleta). Prikupljanje prostornih podataka LIDAR-om vrši se iz pokreta i sistem se može montirati na vozilo u cilju skeniranja koridora kao što su putevi ili slični linijski objekti, ili na letelicu za skeniranje ostalih prostornih formi iz vazduha. LIDAR ima veoma jednostavan princip merenja. Skener se sastoji od transmitera/risivera laserskog zraka i uređaja za skeniranje. Transmitter emituje impulse sa visokom frekvencijom, koji se reflektuju od površi nazad do risivera. Ogledalo unutar laserskog transmitera se pomera rotirajući upravno na pravac letenja čime se omogućuje merenje u širem pojasu. Vreme proteklo od emisije do povratka svakog impulsa i ugao otklona od vertikalne ose instrumenta, koriste se za određivanje relativne pozicije svake merene tačke. Apsolutna pozicija senzora se određuje GPS-om svake sekunde, dok IMU obezbeđuje orijentaciju (Jaboyedoff et al., 2008; Sušić et al., 2009; Ninkov et al., 2010). Koordinate oblaka tačaka ($x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z$) su ocenjene sa tačnošću od oko 15 cm (1σ) korišćenjem kontrolnih tačaka na površini terena. Proces georeferenciranja oblaka tačaka se takođe sprovodi sa kontrolnim tačkama na površini terena.

Podaci laserskog skeniranja se kombinuju sa pozicijom skenera i orijentacijom u cilju dobijanja trodimenzionalne koordinate laserskog otiska na površi terena. Emitovani zrak može imati višestruku refleksiju, što uzrokuje da određena tačka ima iste koordinate, ali različitu visinu. Prva refleksija može poticati od vegetacije ili ivice objekta, voda ili sličnog, dok poslednja najverovatnije potiče od površi Zemlje ili neke veštačke prostorne forme. Ukoliko je prvi impuls skoro jednak poslednjem najčešće se radi o površi Zemlje. Nakon obrade GPS vektora od baznih stanica do svake merene pozicije senzora, orijentacije i određivanja relativnih pozicija na zemlji u odnosu na senzor, generišu se:

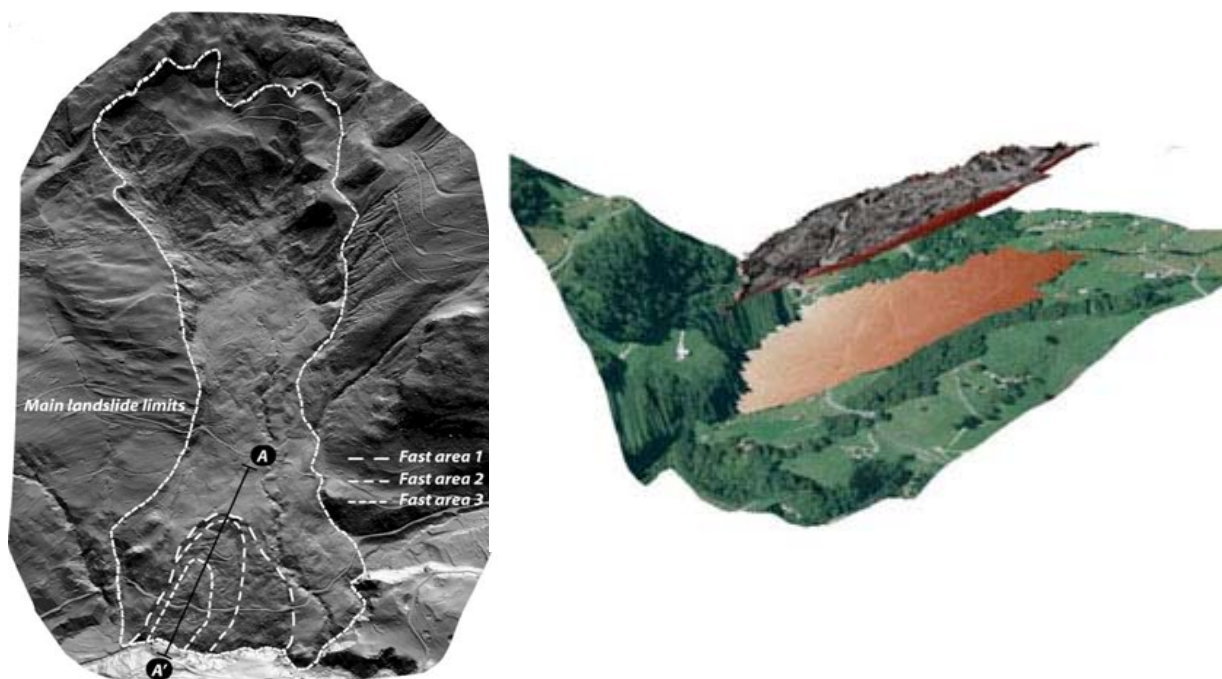
- Oblak tačaka prvog i poslednjeg eha
- Digitalni model površi (DSM) prvi i poslednji eho
- RGB i NIR snimak
- Digitalni model terena (DTM)



Slika 3.9. Digitalni model površi (DSM) prvog (levo) i poslednjeg eha (u sredini) i digitalni model terena (DTM) (desno)

Kompletan pregled principa rada i tačnosti laserskih skenera sa vazdušnih platformi (LIDAR) može se pronaći kod sledećih autora (Wehr & Lohr, 1999; Baltsavias, 1999).

Tačnost koju obezbeđuje terestrički laserski instrument, kada se radi o maksimalnim dužinama od 800 do 1.000 m, iznosi ± 1.5 cm. Ipak, tačnost instrumenta je niža u praktičnim primenama u zavisnosti od konkretnih uslova kao što su: slaba refleksija od hrapave površine terena, neodgovarajući ugao skeniranja, loši atmosferski uslovi (kiša, vetar, magla), veoma svetli ambijentalni uslovi prilikom snimanja, itd. Terestrički laserski sistemi i LIDAR sistemi bazirani na vazdušnim platformama imaju primenu u procesu monitoringa klizišta, odrona i raseda terena, gde se direktnim preklapanjem površi generisane na osnovu oblaka tačaka iz dve epohe snimanja, detektuju pomereni delovi terena. Proces istraživanja se može podeliti na četiri faze: detekcija klizišta i karakterizacija, procena hazarda i osetljivih zona, modeliranje i monitoring (Jaboyedoff et al., 2008). Naravno, ovaj metod identifikacije pomeranja delova terena ne zamenjuje u potpunosti ostale terestričke metode prikupljanja podataka, već samo predstavlja dopunski deo analize. Identifikacija pomerenih delova može se sprovesti direktnim upoređenjem prostornih koordinata iz oblaka tačaka ili određenim automatskim procedurama gde se računaju elementi kao što su krivina ili hrapavost topografije, na osnovu kojih je moguće klasifikovati i prediktovati različite vrste klizišta (Furijeova analiza reljefa). Ipak, postoji dosta ograničavajućih faktora pri korišćenju geomorfoloških kriterijuma analize, kada se ima u vidu da prisustvo vegetacije može da degradira kvalitet DEM-a. Detaljna morfologija terena, koja je obezbeđena generisanjem DEM-a iz oblaka tačaka, zajedno sa geološkim informacijama može da bude inicijalni uslov za kvalitetnu prognozu osetljivih zona.



Slika 3.10. Klizište La Frasse u Švajcarskoj: 3D prikaz osenčenog reljefa klizišta (levo), sa identifikovane tri zone koje se brže pomeraju u odnosu na okruženje, 3D prikaz zapremine identifikovanih zona (desno)

Pre pojave tehnologija daljinske detekcije kao što su LIDAR, RADAR i fotogrametrija, praćenje pomeranja klizišta je realizovano primenom merenja trodimenzionalnih pozicija karakterističnih tačaka korišćenjem totalnih stanica i GPS prijemnika. Za razumevanje mehanizma i brzine pomeranja klizišta, od velikog je značaja imati guste prostorne podatke za

kompletno područje u pojasu oko klizišta. Analiza pomeranja primenom tehnologije laserskog skeniranja se zasniva na komparaciji dve epohe akvizicije podataka DEM-a. Rezultat analize predstavljaju vektori razlika između dve tačke ili najkraće udaljenosti između dve generisane površine. Na osnovu ovih podataka moguće je sračunati i zapreminu razlika. Standardna devijacija merenja između dve epohe može biti prilično visoka, u zavisnosti od više faktora kao što su: kvalitet podataka skeniranja, gustina tačaka, prisustvo vegetacije, hrapavost površine snimanja, kvalitet trase između skeniranja, relativna i apsolutna pozicija senzora i varijacije površine terena između dve epohe snimanja. Kada je u pitanju terestričko lasersko skeniranje, ove vrednosti se kreću u opsegu od 1.5 do 5 cm u zavisnosti od udaljenosti skenera i predmeta snimanja, kao i gustine tačaka. Poznati su primeri dobijanja rezultata na brzopomerajućim klizištima kao što je *Super-Sauze* u Francuskoj, gde je bilo moguće izmeriti brzine pomeranja od 3.2 cm/dan (Travelletti et al., 2008). Zbog niže tačnosti, kada su u pitanju standardne devijacije merenja između dve epohe ($1\sigma \sim 15$ cm), manje se koriste tehnologije bazirane na vazдушnim platformama u odnosu na terestričke platforme ($1\sigma \sim 1.5$ cm). Objektivnost rezultata koji se odnose na ocenu pomeranja zahteva duži period između dve epohe snimanja. Monitoring površinskih pomeranja kada je u pitanju odron stena je na neki način jednostavniji nego kada se radi o zemljištu, jer se pomeranja mogu smatrati kao pomeranja krutog tela. Analiza pomeranja primenom modela transformacije krutog tela u kombinaciji sa strukturnom analizom terena obezbeđuje identifikaciju mogućih mehanizama kretanja klizišta.

Glavne prednosti tehnologije laserskog skeniranja za potrebe detekcije pomeranja terena odnose se na veoma brzu i masovnu akviziciju prostornih podataka, prilično lako instaliranje opreme i portabilnost, posebno kada se radi o terestričkim platformama. Nedostaci se uglavnom odnose na postojanje senki izazvanih hrapavošću topografije, teže manipulisanje ogromnom količinom podataka i potrebom za naknadnim *post-processing* tehnikama za filtriranje i usaglašavanje različitih skupova podataka u vidu georeferenciranja u okviru jedinstvenog koordinatnog sistema, itd. Pored prostornih podataka, uz pomoć LIDAR tehnologije generišu se i informacije o RGB intenzitetu i strukturi terena ali i pored toga ostaje težak zadatak klasifikacije materijala, usled različitih stepena refleksije i intenziteta varijacija. Trend istraživanja u budućnosti predstavljaće integracija laserskih sistema baziranih na analizi površinskih merenja iz više epoha sa sistemima za rana upozorenja opasnosti.

3.2.1. Metode LIDAR analize pomeranja iz više epoha

Analiza pomeranja terena primenom tehnologije laserskog skeniranja, sastoji se iz više faza, kao što su: prikupljanje podataka, filtriranje, registracija i georeferenciranje više oblaka tačaka, izrada 3D modela, računanje zapremina i karakterističnih preseka i strukturalna analiza, na osnovu kojih se mogu detektovati eventualne promene. Nivo detektovanih promena obično zavisi od tačnosti obrade oblaka tačaka. Kada se radi o pomeranjima terena u većem obimu, sposobnost njihovog detektovanja ne predstavlja izazov čak i u samoj fazi georeferenciranja oblaka tačaka, ali kada su pomeranja mala, neophodno je razviti posebne algoritme za detekciju, koji će sistematski proceniti interval poverenja za svaku tačku, uzevši u obzir i hrapavost površine snimanja i greške samog merenja.

Za određene nivoe obrade, georeferencirani oblak tačaka predstavlja krajnji proizvod koji služi za analizu pomeranja terena. Na osnovu upoređenja dve „identične” tačke iz dva oblaka tačaka, rastojanja između njih, kao i geoloških osobina terena (npr. posebnih karakteristika stenske mase, kao što su prelomi ili sedla), može se rekonstruisati model dinamike pomeranja

terena. Za druge nivoe obrade, izrađuje se topografski 3D model površi terena na osnovu oblaka tačaka, pri čemu se na osnovu karakterističnih poprečnih preseka i promene zapremine između dve epohe snimanja za određenu površinu, donosi sud o intenzitetu i pravcu pomeranja.

Postojeće metode upoređenja podataka laserskog skeniranja terena mogu se klasifikovati u tri grupe:

- I. Razlika u visini dva gridna DEM-a generisana iz oblaka tačaka (karakteristična za približno ravne površine, npr. korita reka)
- II. 3D komparacija dva oblaka generisanih u dve vremenske epohe, na osnovu direktnog upoređenja najbližih tačaka
- III. 3D upoređenje pojedine tačke iz oblaka tačaka sa generisanom mrežom (*mesh*) ili 3D modelom

Grid DEM u vidu pravilne mreže predstavlja najjednostavniji način za predstavljanje površi terena. Gridna prezentacija se zasniva na predstavi terena preko skupa tačaka sa poznatim visinama, koje su uređene u formu pravilne mreže. Osnovna stvar koja određuje gridni DEM jeste veličina ćelije grida. Na osnovu razvijenih algoritama, za određeno područje, može se izabrati optimalna rezolucija grida. Koncept modela DEM-a u formi grida je sličan digitalnoj rasterskoj arhitekturi kod slika, gde se površ terena predstavlja preko kvadratnih elemenata, tj. piksela. Ovaj način detekcije je uglavnom pogodan za pretežno ravne terene, dok za površine koje se odlikuju promenljivom konfiguracijom terena i hrapavošću, nije efikasan u svim varijantama (npr. u slučajevima litica i naglih lomova terena).

Slučaj II predstavlja efikasnu metodu direktnog 3D poređenja oblaka tačaka jer ne zahteva generisanje gridnog DEM-a ili mreže iz oblaka tačaka (eng. *mesh*). Za svaku tačku drugog oblaka tačaka može se definisati najbliža tačka u prvom oblaku tačaka. U svojoj najjednostavnijoj verziji, promena površine se procenjuje kao rastojanje između dve tačke. Poboljšanje se može postići primenom lokalnog modela referentne površi ili korišćenjem lokalne kvadratne funkcije visina (Lague et al., 2012). Ova tehnika je veoma pogodna za slučajeve detekcije promena terena koji se odlikuju naglom promenom konfiguracije.

Slučaj III se odnosi na tehniku računanja rastojanja od tačke oblaka do referentne 3D mreže (*mesh*) ili teorijskog 3D modela. Ovaj pristup je efikasan za jednostavne površine snimanja. Međutim, generisanje površi u vidu mreže (eng. *mesh*) na neravnim i hrapavim površinama, na kojima nedostaju prostorni podaci, veoma je komplikovano. Interpolacija preko površina sa nedostajućim podacima dovodi do nejasnoća koje je veoma teško kvantifikovati. Konstrukcija mreže trouglova dovodi do glačanja površi, što utiče na nivo detalja koji mogu biti važni za procenu lokalnih svojstava hrapavosti površine i procene intervala poverenja prostornih promenljivih.

Moć identifikacije vidljivih promena terena zavisi od tačnosti obrade oblaka tačaka, a kada su promene velike, sposobnost detekcije promena je u ređim slučajevima limitirana metodama registracije i georeferenciranja. Međutim, kod malih promena terena, moraju se primeniti posebno razvijeni algoritmi za detekciju promena. Vidljiviji rezultati se postižu u slučaju fiksne LIDAR platforme, tj. kada laserski skener ne menja poziciju između dva nezavisno realizovana merenja (Gordon & Lichti, 2007).

3.3. DUGOBAZISNA INTERFEROMETRIJA (VLBI)

Izvori podataka dugobazisne interferometrije (eng. *Very Long Baseline Interferometry*, VLBI) su radio signali emitovane od strane kvazara ili drugih kompaktnih radio-izvora, opažanih radio-teleskopima. Primena VLBI tehnologije datira od 1967. godine, kada je prvi put upotrebljena u astronomske svrhe studija vangalaktičkih radio izvora.

Međutim, ispostavilo se da je VLBI idealna tehnika za istraživanje geodinamičkih fenomena Zemlje, kao što su promene Zemljine rotacije, dužine dana, pomeranje polova, nutacija, određivanje parametara plime, itd. VLBI obezbeđuje visoko precizno globalno pozicioniranje, zbog čega ima veoma važnu ulogu u otkrivanju kontinentalnih pomeranja.

Osnovni princip VLBI pozicioniranja odnosi se na simultanu detekciju signala više radio-izvora primenom nekoliko radio-teleskopa i postupak računanja vremenskog kašnjenja signala kros-korelacijom između različitih stanica. VLBI je u osnovi geometrijska metoda određivanja rastojanja i orijentacije veoma duge bazne linije, merenjem razlike vremena dolaska talasnog fronta na dve VLBI radio-antene na krajevima baze. Dakle, talasni front ne dolazi istovremeno na obe VLBI radio-antene, pa je osnovna opažana veličina vremensko kašnjenje koje je proteklo od trenutka prijema talasnog fronta radio izvora na jednoj anteni do trenutka prijema istog talasnog fronta na drugoj anteni bazne linije.

Kašnjenje radio-signala se može izraziti kao funkcija geometrijskog, satnog, troposferskog i jonosferskog zaostajanja. Uz pretpostavku da su stanice bez grešaka, instrumenti sinhronizovani, a opažački talas radio izvora prolazi kroz potpun vakuum, interferometrijsko zaostajanje je tada geometrijsko, i nije više od 20 ms, sa promenama od 3.1 ms po sekundi, uzrokovano Zemljinom rotacijom. Geometrijska komponenta kašnjenja je najveća komponenta opažanog kašnjenja. Satno zaostajanje zavisi od stabilnosti sata na stanicama i može kasniti ili brzati i do 0.19 ms. Troposfersko zaostajanje je uzrokovano suvom i vlažnom komponentom troposfere i iznosi oko 6.6 ns. Za normalnu jonosferu, zaostajanje približno iznosi od 0.1 do 0.2 ns. Razvoj preciznih časovnika i frekvencijskih standarda, kao i mogućnost posednog zapisivanja radio-signala, omogućio je razvoj VLBI tehnologije. Primljeni radio-signali se, zajedno sa vremenom, pojedinačno zapisuju na svakoj anteni i skladište na magnetne trake, a kasnije se transferuju u centralnu korelatorsku stanicu, gde se dalje procesiraju. Fizička veza između antena ne postoji, a dužina bazne linije je limitirana samo jednim zahtevom, a to je da radio-izvor istovremeno bude dovoljno dugo vremena „vidljiv” od strane dva radio-teleskopa.

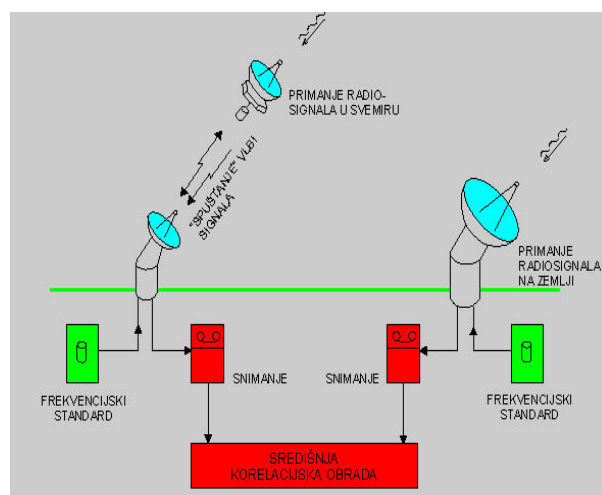
Korišćenjem VLBI opažanja određuju se položaji antena na Zemlji i položaji kvazara na nebu sa veoma visokom tačnošću, tako da ova tehnologija obezbeđuje definisanje terestričkog (zemaljskog) i nebeskog inercijalnog referentnog sistema, kao i njihovo povezivanje. Međunarodna astronomska unija (eng. *International Astronomical Union*) je, na osnovu VLBI merenja, prihvatila nekoliko stotina izvangalaktičkih radio-izvora (najčešće kvazara), kao definisane objekte nebeskog referentnog sistema. Trenutna tačnost položaja antena se kreće u rasponu od nekoliko milimetara, a položaji kvazara su određeni sa tačnošću od nekoliko desetihiljaditih delova uglovne sekunde.

3.3.1. Koncept VLBI

Početak devedesetih godina dvadesetog veka, u Zemljinu orbitu su lansirani radio-teleskopi koji su sinhronizovano radili sa zemaljskom VLBI mrežom. Najjednostavnija forma VLBI opažanja sastoji se od jedne kosmičke VLBI orbitalne stanice i jednog zemaljskog radio-teleskopa. U tom slučaju, kosmički radio-teleskop će opažati neki radio izvor u konjunktiji sa mrežom antena na Zemlji, i nakon toga proslediti primljene signale do telemetrijske stanice na Zemlji.

Koncept dugobazisne interferometrije čine sledeće komponente:

- zemaljski VLBI
- zemaljsko-kosmički VLBI
- kosmički VLBI



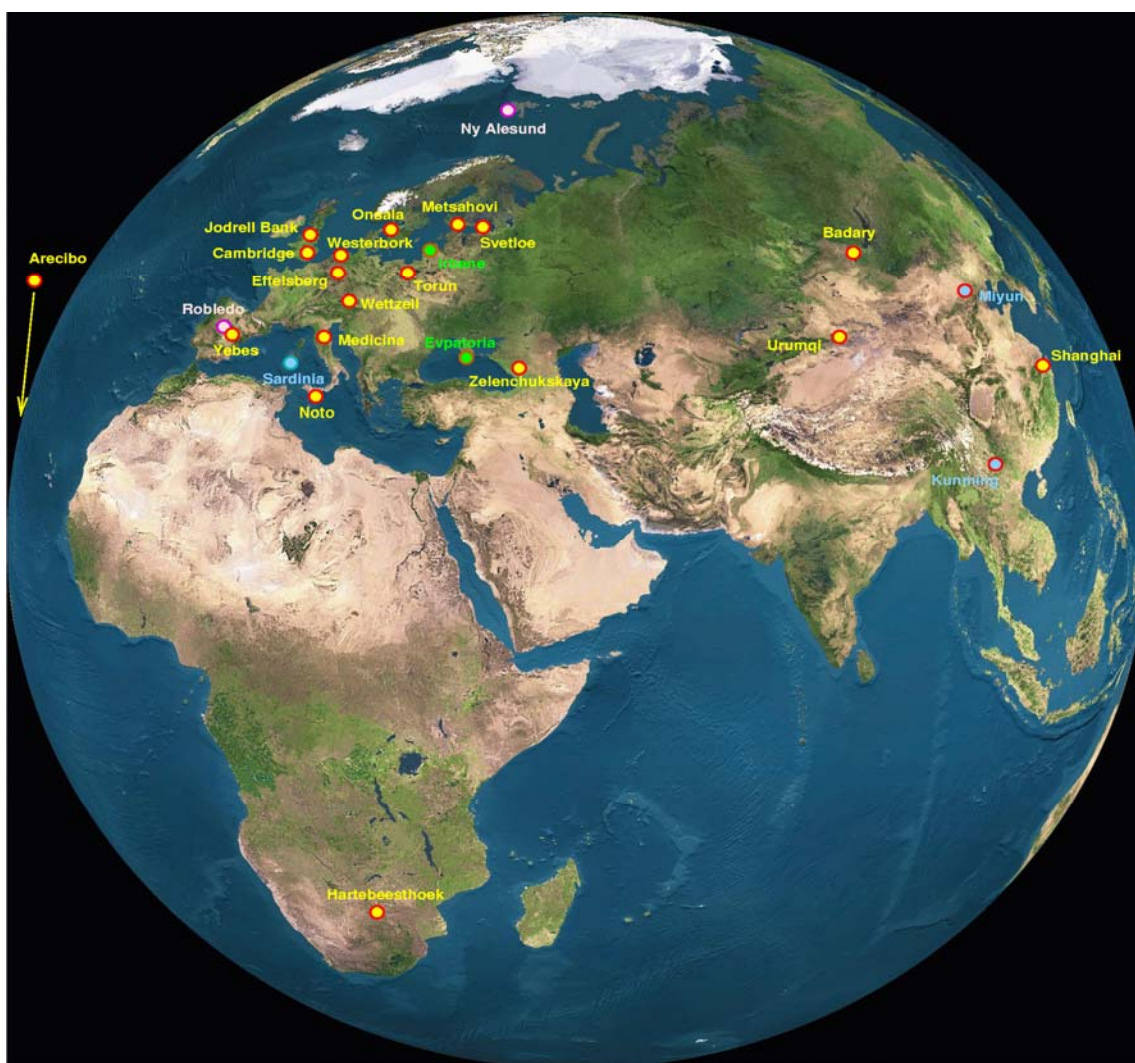
Slika 3.11. Radio teleskop prečnika 100 m u blizini Effelsberg-a u Nemačkoj (levo), principi VLBI dugobazisne interferometrije (desno)

Pozicioniranje opreme radio-teleskopa je izuzetno složen, zahtevan i skup zadatak. Iako su projektovane i realizovane mobilne stanice, one nikada nisu postale široko primenjive (Gordon et al., 1993; Grenerczy, 2000). Veoma mali broj zemaljskih VLBI stanica postoji u Centralnoj Evropi. Nekoliko permanentnih VLBI stanica je postavljeno u Italiji i Nemačkoj, duž linije sever-jug u zapadnom delu Centralne Evrope.

Zbog veoma retkog rasporeda VLBI stanica, informacije koje se odnose geodinamička istraživanja Zemljine kore su veoma limitirana. Uprkoj visokoj tačnosti pozicioniranja koji obezbeđuju VLBI stanice, u bližem okruženju Republike Srbije i Panonskom basenu ne postoje instalirani ovi uređaji zbog veoma visokih troškova instaliranja i održavanja.

3.3.2. Evropska geodetska VLBI mreža

Evropska VLBI mreža predstavlja zajednički poduhvat evropskih, kineskih, južnoafričkih i drugih radio-astronomskih instituta, finansiranih od strane svojih nacionalnih istraživačkih saveta. Januara 1990. godine je u okviru Evropske geodetske VLBI grupe formiran program za realizaciju projekta VLBI opažanja za geodetske potrebe. U periodu između 1990. i 2000. godine, realizovane su 52 sesije opažanja. Cilj projekta je bio da se odrede pomeranja Zemljine kore na teritoriji Evrope kao i da se obezbedi stabilna referentna mreža za ostala geodetska opažanja, recimo primenom GNSS-a. Program opažanja je koordinirao Institut za geodeziju Univerziteta u Bonu, u saradnji sa *Max-Planck* institutom za radio-astronomiju iz Bona.



Slika 3.12. Raspored evropske VLBI mreže (EVN), žuto-crveni krugovi su postojeće operativne stanice, plavi i plavo-crveni krugovi označavaju nove stanice koje još uvek nisu operativne, ljubičasti se odnose na stanice koje povremeno učestvuju u opažanjima, a zeleno-braon su stanice na kojima su sprovedeni početni testovi za puštanje u režim rada (<http://www.evlbi.org>)

Sprovođenje ovog multinacionalnog istraživačkog projekta zahtevalo je velike operativne troškove, van redovnih budžeta institucija uključenih u projekat, za koordinaciju, planiranje, isporuku magnetnih traka, obradu podataka i slično, pri čemu je veliki deo sredstava finansiran od strane Evropske Unije (Campbell, 1996). Na području Evrope, od devedesetih godina operativno je 10 fiksnih stanica Evropske geodetske VLBI mreže: *Onsala* (Švedska), *Wettzell* (Nemačka), *Madrid* (Španija), *Medicina* (Italija), *Matera* (Italija), *Noto* (Italija), *Effelsberg* (Nemačka), *Simeiz* (Ukrajina), *Ny Alesund* (Norveška) and *Yebes* (Španija). Prva evropska opažanja su realizovana 1990. godine na stanicama *Onsala*, *Wettzell*, *Madrid*, *Medicina*, *Matera* i *Noto*. VLBI stanica *Effelsberg* je 1991. godine opremljena potrebnim hardverom za permanentna opažanja. Dve VLBI stanice *Simeiz* i *Ny Alesund* su postale operativne od 1994. godine i omogućile su proširenje VLBI mreže na istok i sever. Druga VLBI stanica u Španiji, *Yebes*, u režimu rada je od 1995. godine. U prve dve godine projekta Evropske geodetske VLBI mreže, za potrebe geodetskih opažanja su realizovane samo tri sesije godišnje. U narednim godinama je realizovano šest sesija po godini. Zbog velike primene za astronomske svrhe, navodi se primer radio-teleskopa *Effelsberg*, koji za potrebe geodezije može vršiti opažanja jednom ili dva puta godišnje. Kasnije je broj VLBI stanica na teritoriji Evrope povećan, a u planu je i realizacija novih lokacija za radio-teleskope (Slika 3.12). Često se realizuju VLBI opažanja radio-teleskopa u Evropi u konjunkciji sa radio-teleskopima na području SAD-a.

Površina koju pokriva EVN mreža može se u geodinamičkom smislu podeliti u tri celine, severnu, centralnu i južnu. Severni deo je u dalekoj prošlosti bio pokriven značajnim količinama leda. Procenjuje se da je pre oko 10.000 godina nestao ledeni štit. Pored očiglednog vertikalnog pomeranja, horizontalna pomeranja se pojavljuju na periferiji nekadašnjeg ledenog štita. Na osnovu VLBI opažanja u periodu od 1990. do 1999. godine, ustanovljeno je da stabilni deo Evrope predstavlja centralni deo EVN mreže, koji obuhvataju stanice *Wettzell* i *Effelsberg*, obe stanice su u Nemačkoj (Haas et al., 2000), dok se Jadranska mikroploča kreće u severoistočnom smeru ka Dinaridima u smislu kretanja krutog tela (Grenerczy, 2000), na osnovu približno istih godišnjih brzina na stanicama lociranim na Apeninskom poluostvu (2-3 mm/god). U Mediteranskom delu su detektovana najveća horizontalna pomeranja.

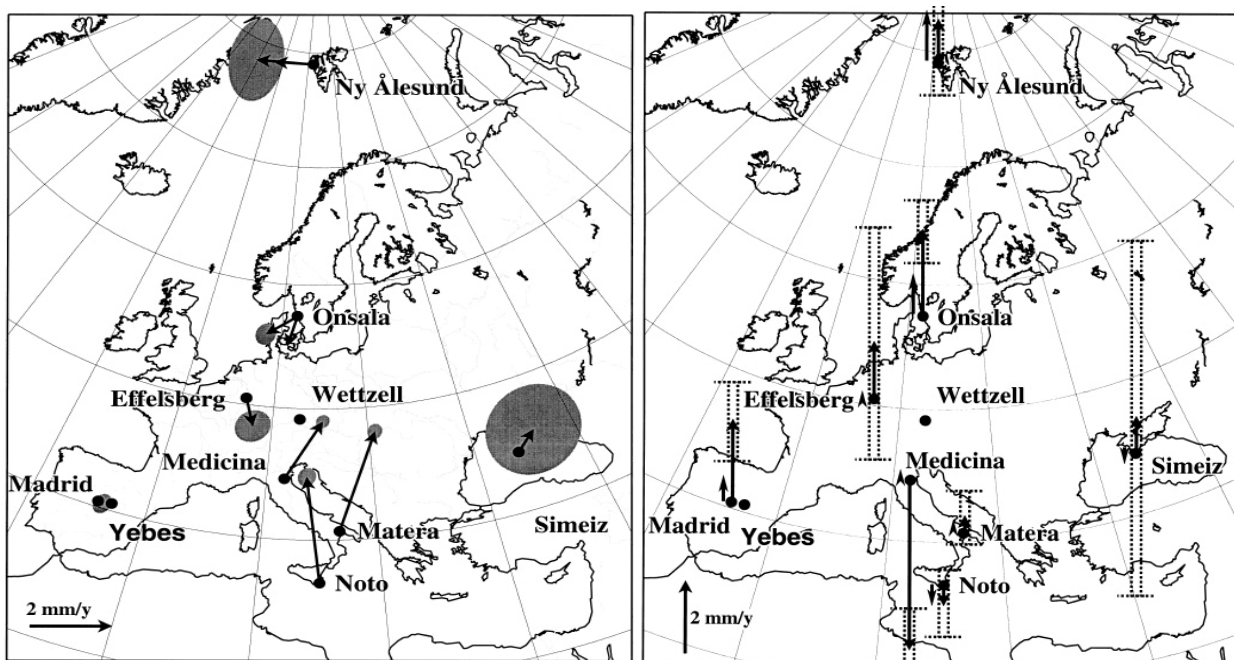
Italijanske stanice *Matera*, *Medicina* i *Noto* pokazuju tri različita geodinamička slučaja. Stanica *Matera* jasno ukazuje na pomeranje Jadranske ploče u pravcu severa i blago istočnom smeru u odnosu na *Wettzell*, sa prosečnom godišnjom brzinom od 2.8 mm/god. Horizontalna pomeranja stanica *Effelsberg* i *Madrid* u odnosu na fiksnu stanicu *Wettzell*, pokazuju da ovi delovi Evrope ne ispoljavaju značajna tektonska kretanja. Takođe, VLBI stanica *Simeiz* u Ukrajini ne pokazuje signifikantna horizontalna pomeranja. Stanica *Medicina* je locirana na prednjoj strani Apenina i rezultate pomeranja je malo teže protumačiti u odnosu na prethodni slučaj. Merenja ukazuju na pomeranja u pravcu severa sa prosečnom godišnjom brzinom od 1.7 mm/god, dok se blago pomeranje u pravcu istoka može uporediti sa onim u *Materi*. Najjužnija stanica *Noto* daje potpuno drugačije rezultate. Tu se primećuje snažan uticaj Afričke ploče, gde se pomeranja kreću više od 3 mm/god u pravcu severa i blago u pravcu zapada, u odnosu na stanicu *Wettzell*. U tabeli 3.1. prikazane su brzine pomeranja u svim pravcima za ostale stanice, u odnosu na stabilni deo mreže, tj. stanicu *Wettzell*.

Kada su u pitanju vertikalna pomeranja, rezultati ukazuju na izdizanja stanica *Ny Alesund* u Norveškoj i *Onsala* u Švedskoj sa prosečnim brzinama $+1.1 \pm 2.1$ mm i $+2.3 \pm 0.9$ mm, respektivno, u odnosu na stanicu *Wettzell*. Stanice *Effelsberg* (Nemačka) i *Simeiz* (Ukrajina) ne pokazuju signifikantna vertikalna pomeranja. Uzdizanje koje pokazuje stanica u Madridu ne može se objasniti geotektonskim uticajima, već lokalnim postglacijalnim propratnim efektom izvan prednje ispupčene oblasti (Haas et al., 2000).

Tabela 3.1. Horizontalne i vertikalne brzine pomeranja u jedinicama [mm/god] sa srednjim kvadratnim greškama u [mm] u okviru Evropske geodetske VLBI mreže

VLBI stanica	Brzine pomeranja [mm/god] Y	Srednja kvadr. greška [mm]	Brzine pomeranja [mm/god] X	Srednja kvadr. greška [mm]	Brzine pomeranja [mm/god] Z	Srednja kvadr. greška [mm]
Effelsberg	+0.3 ± 0.3	1.7	-0.8 ± 0.3	2.2	+1.6 ± 3.3	9.4
Madrid	+0.1 ± 0.2	2.3	-0.0 ± 0.2	1.9	+2.3 ± 1.1	12.5
Matera	+1.0 ± 0.1	1.5	+2.8 ± 0.1	2.1	+0.4 ± 0.8	12.2
Medicina	+0.9 ± 0.1	1.6	+1.7 ± 0.1	1.5	-4.8 ± 1.1	8.0
Noto	-0.3 ± 0.2	2.0	+3.1 ± 0.2	2.2	-0.5 ± 1.0	9.8
Ny Alesund	-1.5 ± 0.5	2.2	+0.1 ± 0.8	5.7	+1.1 ± 2.1	11.4
Onsala	-0.8 ± 0.2	1.7	-0.5 ± 0.2	2.9	+2.3 ± 0.9	14.4
Simeiz	+0.6 ± 0.9	4.8	+0.5 ± 0.9	2.2	+0.9 ± 5.1	44.1

Detektovana sleganja na stanici *Medicina* u Italiji mogu se objasniti uticajem podzemnih voda i gasa u dolini *Po* (Tomasi et al., 1997). Ostale stanice *Noto* i *Matera* u Italiji ne pokazuju signifikantna vertikalna pomeranja. Dakle, ovde se mora napomenuti da su sva pomeranja na preostalim stanicama dobijena relativno u odnosu na fiksnu stanicu *Wetzell*. Za potrebe daljih istraživanja za merenja realizovana u navedenom periodu, primenjena je strejn analiza formiranjem trouglova kao konačnih elemenata između najbližih VLBI stanica. Više o tome se može pronaći u radu koji je publikovao Altiner, 1996. godine.

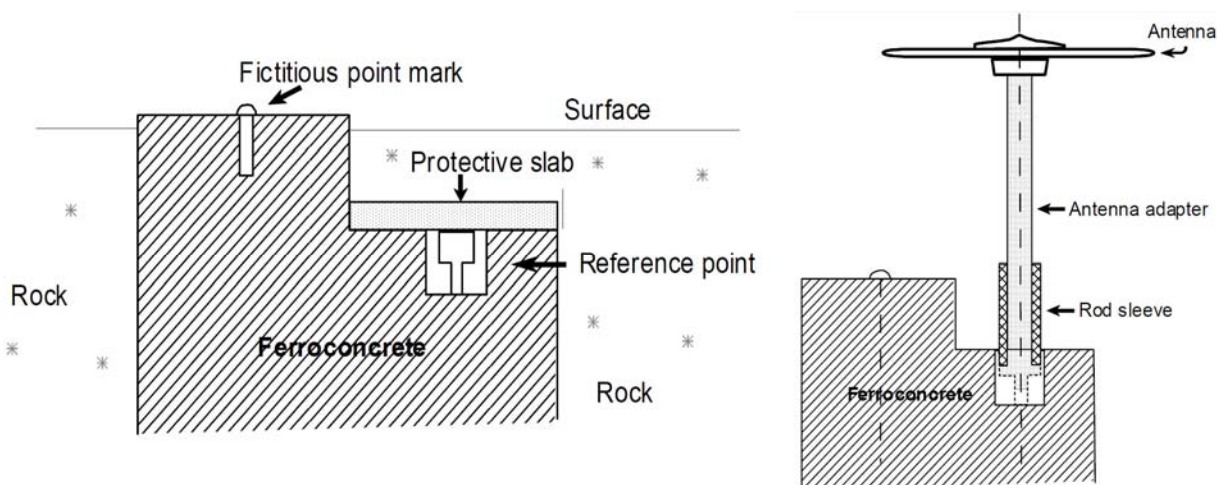
Slika 3.13. Vektori horizontalnih (levo) i vertikalnih (desno) pomeranja sa elipsama grešaka u odnosu na stabilnu stanicu *Wetzell* (Haas et al., 2000)

3.4. PRIMENA GPS/GNSS TEHNOLOGIJE U GEODINAMICI

NAVSTAR globalni pozicioni sistem (GPS), projektovan od strane Ministarstva za odbranu SAD-a za vojnu i civilnu navigaciju i pozicioniranje, postao je ključna geodetska alatka za širok spektar studija koje se bave geodinamičkim i geofizičkim fenomenima. Iako postoji više projektovanih i operativnih sistema za pozicioniranje, kao što je francuski DORIS, ruski GLONASS, evropski GALILEO i slično, skraćeni GPS predstavlja sinonim za satelitski sistem NAVSTAR. Globalni navigacioni sistem (GLONASS), kojim upravlja ruska armija, predstavlja ruski pandan GPS-u, i razlikuje se od GPS-a u kontrolnom i kosmičkom segmentu, kao i u vidu strukture emitovanog signala. GNSS tehnologija podrazumeva aktuelne sisteme pozicioniranja kao što su GPS i GLONASS, kao i buduće sisteme kao što je GALILEO (evropski doprinos budućem GNSS-u) i COMPASS (kineski sistem u razvoju). GNSS sateliti, u suštini, obezbeđuju platformu sa atomskim časovnicima, radio-prijemnicima i raznom pomoćnom opremom koja se koristi za upravljanje sistemom. Signali koje emituju sateliti omogućavaju korisniku da izmeri pseudorastojanje do satelita, pri čemu svaki satelit emituje poruku koja omogućava korisniku da utvrdi prostorni položaj satelita u proizvoljnom trenutku. Korisnički GPS prijemnici i antene predstavljaju kompleksne elektronske uređaje, čije metrološke karakteristike moraju biti poznate u cilju obezbeđenja kvaliteta merenja.

3.4.1. Primeri geodinamičkih mreža u svetu

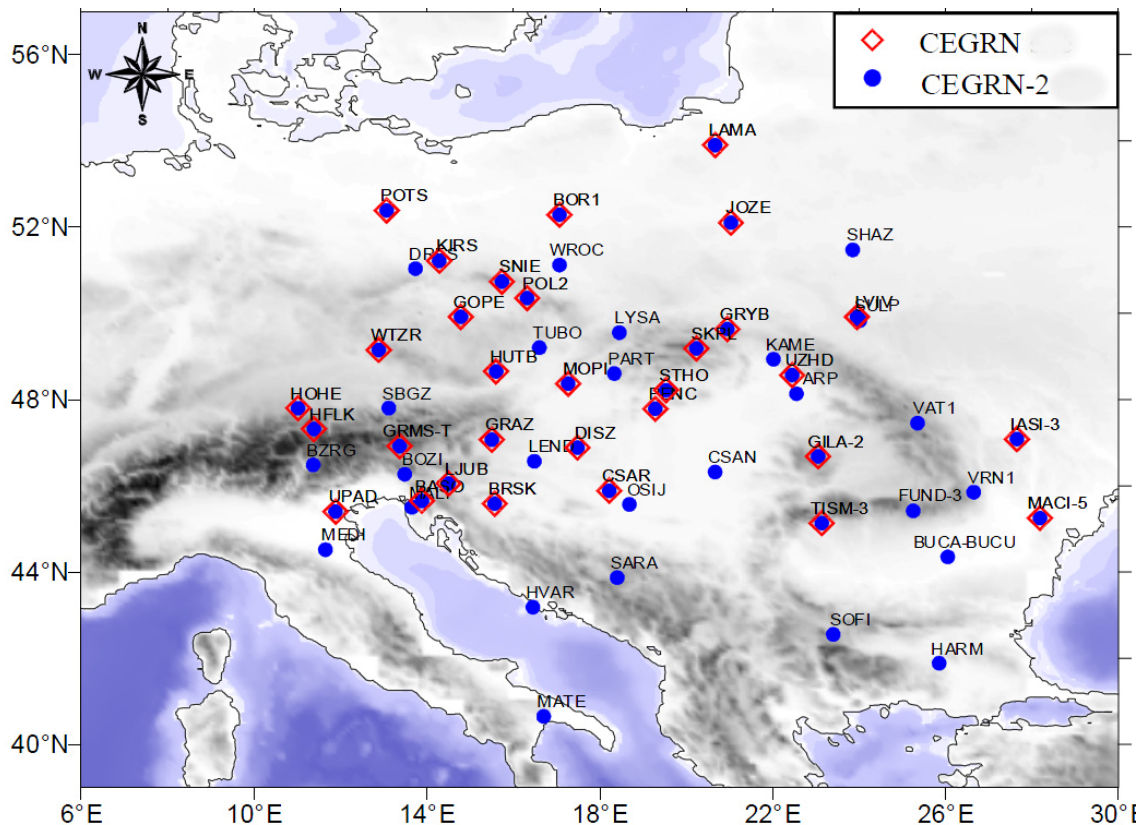
Najčešće korišćena metoda za određivanje pomeranja tektonskih ploča, kao i za potrebe deformacionih studija u zonama aktivnim raseda i vulkana, jesu ponovljena GPS merenja, kako bi se u određenim vremenskim intervalima dobili statistički signifikantni podaci u tektonski aktivnim područjima, koji se mogu kretati od 1 mm/god do nekoliko cm/god. GPS/GNSS geodinamika se odnosi na lokalna, regionalna ili čak kontinentalna istraživanja u zavisnosti od veličine područja od interesa. Analiza deformacija podrazumeva komparaciju bilo koje dve ili više epoha u kojima su realizovana merenja. Intenzitet realizacije merenja zavisi od tektonske aktivnosti ispitivanog područja.



Slika 3.14. Primer stabilizacije tačaka mađarske geodinamičke mreže (HGRN)

U zavisnosti od gustine tačaka geodinamičke mreže, moguće je izvršiti prostornu interpolaciju u cilju određivanja polja brzina pomeranja, kao i računanja deformacionog gradijenta matrice u bilo kojoj tački unutar ispitivanog područja. Na području Srbije ne postoji specijalizovana geodinamička mreža, već su se dosadašnja istraživanja bazirala na ispitivanju modela transformacije GPS merenja u okviru postojeće trigonometrijske mreže (Perović et al., 2006). Primeri geodinamičkih mreža mogu se naći u većini evropskih zemalja. Primer jedne takve mreže je mađarska GPS geodinamička referentna mreža (HGRN) koja je projektovana i realizovana od strane Satelitske geodetske opservatorije, locirane blizu mesta Penc koji je udaljen oko 50 km od Budimpešte (Slika 3.14). Najbitniji segment u cilju obezbeđenja kvaliteta merenja i postignute tačnosti jeste stabilizacija tačaka. U ovom slučaju, tačke su stabilizovane armirano-betonskim stubovima sa cementiranom strukturom u čvstom temelju. Prikazani način stabilizacije obezbeđuje postavljanje antene pomoću specijalnog mesinganog adaptera, na takav način da je visinu moguće izmeriti submilimetarskom preciznošću. Mreža je uspostavljena u periodu između 1990. i 1991. godine i sastoji se od 13 tačaka, od kojih je jedna postavljena na krov zgrade Satelitske geodetske opservatorije, a ujedno predstavlja IGS i EUREF permanentnu stanicu. Merenja se od 1991. godine realizuju svake druge godine tri puta po 24 sata dugim kampanjama (Grenerczy, 2000). Sličan način stabilizacije i montiranja GPS antena, primenjen je i u geodinamičkim mrežama u Slovačkoj, Rumuniji, Ukrajini, Italiji i Belgiji. HGRN geodinamička mreža se prostire unutar Panonskog basena, na prostoru od istočnih Alpa do severnih Karpata, prateći transdunavsku centralnu i severnu mađarsku regiju.

Centralno-evropska GPS geodinamička referentna mreža (CEGRN) je uspostavljena od strane centralno-evropskog regionalnog geodinamičkog projekta (CERGOP) u cilju dugoročnog monitoringa recentnih tektonskih procesa u Centralnoj Evropi.



Slika 3.15. Centralno-evropska GPS geodinamička referentna mreža (CEGRN). Na slici je prikazana 31 originalna tačka. Mreža je proširena 1999. godine (CEGRN-2) i udvostručen je broj tačaka, pri čemu su originalne tačke ostale integralni deo CEGRN mreže (Grenerczy, 2000).

Projekat CEGRN je pokrenut 1993. godine od strane mađarskih i poljskih naučnika, sa podrškom centralno-evropske inicijative i uz učešće 11 zemalja. Ovo je predstavljalo prvu međunarodnu saradnju u oblasti geodinamičkih istraživanja u Centralnoj Evropi, sa ciljem integracije istraživanja u širem regionu i uspostavljanja stabilnog referentnog okvira za realizaciju deformacionih studija. U okviru projekta učestvuju sledeće države: Austrija, Hrvatska, Češka, Nemačka, Mađarska, Italija, Rumunija, Poljska, Slovačka, Slovenija i Ukrajina. Kao pridruženi član, projektu se priključuje Bugarska 1996. godine, a kasnije i Albanija i Bosna i Hercegovina, tako da se broj tačaka mreže povećao sa 31 na 63. Republika Srbija, nakon formiranja mreže aktivnih permanentnih stanica AGROS, učestvuje u projektu CEGRN sa svojih 5 tačaka iz AGROS mreže od 2011. godine, a planirano je da u mernim kampanjama 2013. godine učestvuje sa devet tačaka.

CEGRN mreža se proteže od juga granične zone Evroazijsko-Afričke ploče do Istočno-evropske Prekambrijske platforme na severoistoku, pri čemu obuhvata sve velike tektonske jedinice u regionu: Južne i Istočne Alpe, Severozapadne Dinaride, Panonski basen, Karpatski luk i Češki masiv, kao i Jadranski blok. Tačke CGRN mreže uglavnom predstavljaju istovremeno i permanentne stanice, koje služe za definisanje globalnog referentnog sistema, i one su uglavnom stabilizovane na krovovima zgrada geodetskih institucija.

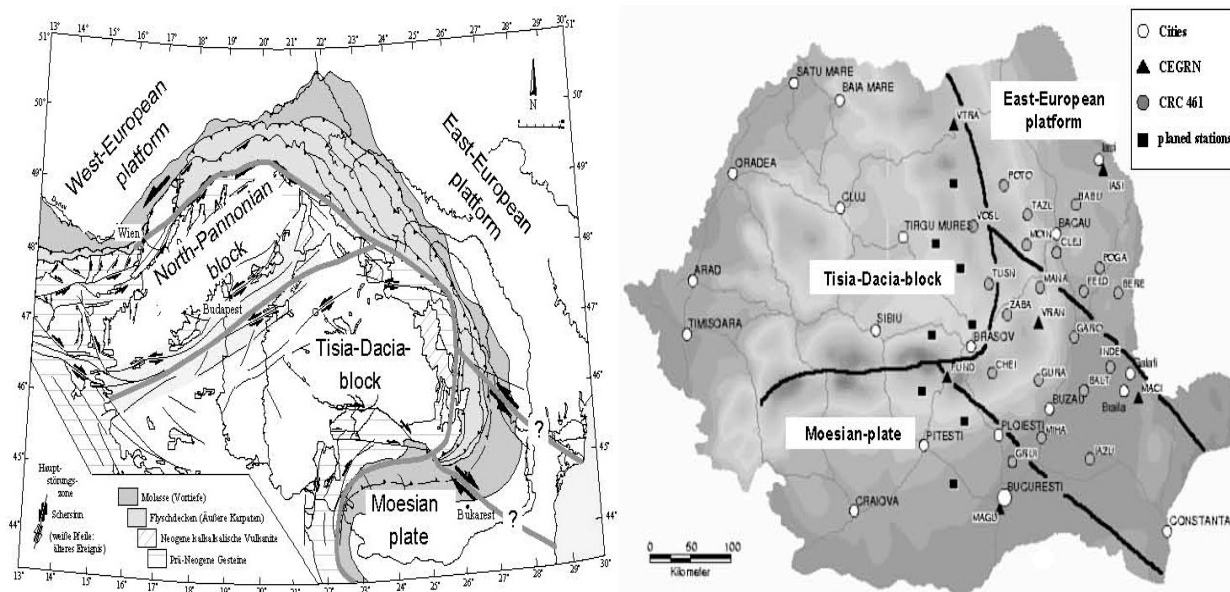
Primer geodinamičkih mreža zasnovanih na ponovljenim satelitskim opažanjima odnosi se na CRODYN mrežu u Hrvatskoj, kod koje su merenja realizovana na svim tačkama simultano 1994., 1996., i 1998. godine. U ovoj mreži, na osnovu rezultata merenja dobijene su brzine pomeranja tačaka, a na osnovu njih je sračunato polje brzina na području istraživanja (Altiner et al., 1999; Čolić et al., 1999). Kada je broj tačaka na kojima se realizuju merenja globalnim pozicioniranjem, manji od broja raspoloživih prijemnika, pojedini segmenti mreže se sekvencijalno opažaju sve dok se ne pokrije predmetno područje istraživanja. Ponavljanje ove procedure merenja u različitim intervalima (npr. svake godine), daje potrebne kinematičke informacije za određivanje polja deformacija. Pored prostorne, radi se i vremenska interpolacija u cilju dobijanja koordinata u referentnoj epohi i vrednosti brzina. Primer jedne ovakve mreže odnosi se na lokalnu geodinamičku mrežu grada Zagreba (Medak & Pribičević, 2002; Pribičević et al., 2007; Đapo, 2009).

Kao jedna od prvih geodinamičkih mreža, poznata je austrijska mreža AGREF. U Bugarskoj se nacionalna GPS mreža koristi za proučavanje recentnih geodinamičkih procesa i seizmičkog hazarda, iz razloga što je istočni Mediteran veoma tektonski i seizmotektonski aktivno područje, pri čemu horizontalna pomeranja dostižu i do 3.5 cm/god. Region južnog dela Bugarske, a posebno jugozapadna Bugarska i Rodopi, predstavlja najaktivniju površinu u tektonskom i seizmotektonskom smislu, uzevši u obzir da je najjači zemljotres koji se dogodio u kontinentalnoj Evropi u poslednja dva veka, magnitude 7.8 stepeni po Rihterovoj skali, došao upravo iz ove oblasti, tj. iz Krupnik-Kresna regiona. Poznate su lokalne geodinamičke mreže u okolini Sofije i oblasti Krupnik-Kresna, gde su u periodu od 1993. do 2007. realizovane i analizirane 33 GPS kampanje. Na osnovu saradnje Bugarske i Francuske, a u kooperaciji sa Makedonijom, Severnom Grčkom i Albanijom, sprovedena je opsežna geodinamička studija na osnovu GPS merenja na ukupno 100 tačaka prikupljenih u periodu od 1996. do 2009. godine. Poljska geodinamička mreža je uspostavljena u periodu od 1991. do 1996. godine, i sastojala se od 33 tačke ravnomerno raspoređene na čitavoj teritoriji, pri čemu su lokacije tačaka izabrane tako da pokrivaju sve karakteristične geološke strukturne blokove.

Kada su u pitanju lokalne geodinamičke mreže, odnosno mreže koje su pozicionirane na manjim lokalnim područjima, izdvaja se mreža postavljena oko lokalnog raseda Tuzla, kod Izmira u Turskoj. Način stabilizacije mreže, kao i sama realizacija merenja, veoma je slična lokalnoj geodinamičkoj mreži grada Zagreba (Pribičević et al., 2007, Haliciogly & Ozener, 2008; Đapo, 2009). Veoma je važno napomenuti da se kod ovakve vrste mreža mora voditi računa o

preciznom centrisanju prijelnika iznad tačaka. Uzevši u obzir da je nemoguće postaviti antenu prijelnika na identičnu poziciju u svim kampanjama merenja i da sistematska greška može iznositi nekoliko milimetara, potrebno je koristiti specijalne adaptere za GPS antenu, tako da se greška centrisanja eliminiše, a samo se mora voditi računa o merenju visine instrumenta. Ovakav način stabilizacije tačaka je primenjen u prethodno navedenim postupcima kod mađarske geodinamičke mreže (HGRN) i lokalne geodinamičke mreže grada Zagreba.

Geodinamička istraživanja koja su sprovedena u Rumuniji, posebno u oblasti Vrancea, od strane predstavnika Univerziteta u Karlsrueru, finansirana su od Nemačke istraživačke fondacije u cilju detektovanja i kvantifikacije trodimenzionalnih pomeranja i identifikacije rasednih linija između glavnih tektonskih jedinica na ovom području (Dinter & Schmitt, 2001). Ova oblast je veoma interesantna zbog geografske i tematske bliskosti sa predmetnom oblašću istraživanja u ovoj disertaciji, uzevši u obzir da se radi o delu Panonskog basena, pri čemu je osnovni naučni doprinos istraživanja uticaj tektonskih uzroka na pojavu dubinskih zemljotresa u ovom regionu. Tri glavne tektonske jedinice, koje se graniče na ovom području su: Istočnoevropska platforma, Mezijska ploča i Tisa-Dacia blok (Slika 3.16).



Slika 3.16. Tektonska karta Karpatskog regiona sa geološkim jedinicama (Horváth, 1993, slika levo), distribucija 6 CEGRN stanica na glavnim tektonskim jedinicama (Dinter & Schmitt, 2001, slika desno)

Pojas između Mezijske ploče i Istočnoevropske platforme karakterišu dve velike rasedne zone, u jugozapadnom i severoistočnom delu Rumunije. Slabe seizmičke aktivnosti su ukazale na nedavne tektonske pokrete duž tih zona. Istočna granica Tisa-Dacia bloka je karakteristična po preneogenim stenskim strukturama unutrašnjih Karpata. Geodinamička istraživanja sa geodetskog aspekta se zasnivaju na ponovljenim GPS/GNSS merenjima na uspostavljenoj GPS/GNSS referentnoj mreži, koja se sastoji od 26 tačaka ravnomerno raspoređenih na celoj teritoriji zemlje, sa većom gustom u okviru oblasti Vrancea, koja predstavlja centralnu oblast Rumunije. Dotadašnja istraživanja tektonskih pomeranja su se uglavnom bazirala na geološkim i seizmološkim studijama. Model geodetske deformacione analize iz ponovljenih merenja satelitskog pozicioniranja, primenjen u ovim istraživanjima, baziran je na Karlsruer pristupu i primeni relativnih elipsi poverenja. Geodetska merenja upotpunjuju sveukupno sagledavanje

kinematičkog modela tektonskih jedinica u ovoj oblasti. Doprinosi se boljoj proceni stanja Zemljine kore, kao i utvrđivanju fizičkih izvora i proceni maksimalne magnitude zemljotresa, na osnovu kojih se analizira kvalitet izgrađenih objekata sa aspekta seizmičnosti. Predlaže se razvoj inženjerskih mera monitoringa, kao i fleksibilnih sistema za upravljanje vanrednim situacijama, a u cilju ublažavanja rizika koji prate zemljotrese.

Problemi prilikom realizacije GPS/GNSS merenja u geodinamičkim analizama, najčešće se odnose na upotrebu različitih vrsta prijemnika. Bez obzira na činjenicu da se varijacije faznog centra uzimaju u obzir tokom obrade merenja, tačnost određivanja modela faznog centra zavisi od vrste antene, što može dovesti do greške u određivanju modela (Hofmann – Wellenhof et al., 1994; Blagojević, 2003). Takođe, ponovljena GPS/GNSS merenja odnose se na konkretne tačke i najčešće ne obezbeđuju dovoljno gust uzorak za istraživanje geoloških fenomena. Iz tog razloga se na osetljivim lokacijama koje su pod konstantnim uticajima (klizišta, vulkani, itd.) obezbeđuje kontinualni monitoring u cilju potpunog prostornog i vremenskog pokrivanja područja istraživanja.

4. GAUS-MARKOVLJEV MODEL IZRAVNANJA I MNK OCENE

4.1. TEORIJSKI KONCEPT GAUS-MARKOVLJEVOG MODELA

Za potrebe izravnjanja geodetskih mreža po metodi najmanjih kvadrata koristi se Gaus-Markovljev model posrednog izravnjanja koji predstavlja linearan matematički model, koji se odnosi na funkcionalni i stohastički deo i definiše relacije između stohastički realizovanih opažanja i nepoznatih parametara geodetskih mreža. Ocenjivanje funkcionalnih parametara u linearnim ili linearizovanim modelima merenja, vrši se metodom najmanjih kvadrata.

Tabela 4.1. Funkcionalni i stohastički model posrednog izravnjanja

Funkcionalni model	Stohastički model
$V = Ax + f$ ili	$M[V] = 0$
$l + V = Ax$	$M[VV^T] = K_1 = \sigma^2 Q_1, \quad (P = Q_1^{-1})$
$M(f) = -Ax; \quad r(A) = r \leq u$	

gde je:

- $A_{n,u}$ - matrica poznatih koeficijenata (matrica dizajna),
- $x_{u,1}$ - u-dimenzionalni vektor nepoznatih parametara,
- $f_{n,1} = l_0 - l$ - vektor slobodnih članova,
- $l_{n,1}$ - n-dimenzionalni vektor merenih veličina,
- $l_{0, n \times 1}$ - vektor približnih vrednosti merenih veličina,
- $V_{n,1}$ - vektor popravaka merenih veličina
- σ_0^2 - *a priori* disperzioni faktor,
- $K_1_{n,n}$ - kovarijaciona matrica merenih veličina,
- $Q_1_{n,n}$ - kofaktorska matrica merenih veličina
- $P_{n,n}$ - matrica težina merenih veličina

Matrica A je dimenzija $n \times u$, pri čemu rang je rang matrice $r(A) = r \leq u$.

Jednačine popravaka merenih elemenata mreže su nelinearne (Ninkov, 1989; Caspary, 2000). Nelinearni oblik funkcija zavisi od vrste opažanja, što se može predstaviti sledećim izrazom:

$$\begin{aligned}
 \text{dužine } M(l) &= \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} + c_d \\
 \text{azimut } M(l) &= \arctan \frac{\Delta y}{\Delta x} + c_a \\
 \text{pravac } M(l) &= \arctan \frac{\Delta y}{\Delta x} + c_b
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Za dobijanje linearne forme koju zahteva Gaus-Markovljev model, vrši se linearizacija razvijanjem ovih funkcija u Tejlorov red u okolini približnih vrednosti nepoznatih parametara. Približne vrednosti l_1, l_2, \dots, l_n merenih veličina L_1, L_2, \dots, L_n , dobijene kao rezultati merenja, omogućavaju da odredimo približne vrednosti $X_{10}, X_{20}, \dots, X_{u0}$ traženih veličina. Na taj način nam je omogućena linearizacija zadržavanjem samo prvih (linearnih) članova pri razvijanju u *Taylorov* red u okolini približnih vrednosti nepoznatih parametara ($X_{10}, X_{20}, \dots, X_{u0}$). Na osnovu prethodno navedenog dobijamo sledeće:

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{l}_{i0} + \Delta \mathbf{l}_i = a_{i1} \Delta x_1 + a_{i2} \Delta x_2 + \dots + a_{iu} \Delta x_u, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.2)$$

gde se koeficijenti dobijaju diferenciranjem jednačine popravaka po nepoznatim parametrima:

$$\mathbf{A} = \left[\frac{\mathbf{F}(\mathbf{x})}{\mathbf{x}} \right]_0 = [\mathbf{a}_{ij}]_{n,u}; \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, u \quad (4.3)$$

pri čemu se podrazumeva da su orijentacione nepoznate o i korekcionni parametri c eliminisani iz procesa izravnjanja.

$\Delta x_j = X_j - X_{j0}$ je diferencijalno mala veličina.

Popravljenе (tačne) vrednosti merenih veličina dobijamo u obliku:

$$\mathbf{L}_i = \mathbf{l}_i - \Delta_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.4)$$

gde su l_i - rezultati **merenja** tih veličina, a Δ_i - odgovarajuće **greške**.

$$-\Delta_i = a_{i1} \Delta x_1 + a_{i2} \Delta x_2 + \dots + a_{iu} \Delta x_u + f_i, \quad f_i = L_{i0} - l_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.5)$$

U matričnom obliku se može napisati jednačina veze popravaka u datoj mreži:

$$-\Delta = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{f} \quad (4.6)$$

Sistem (4.5), odnosno (4.6), sadrži $n \cdot u$ nepoznatih veličina, a ukupan broj jednakosti u tom sistemu iznosi n . Prema tome, sistem (4.6), posmatran kao sistem jednačina sa nepoznatima $-\Delta$ i $\Delta \mathbf{x}$, neće imati jedinstveno rešenje, te stoga umesto jednakosti (4.6) mi ćemo razmatrati neodređeni sistem jednačina:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{f}, \quad (\mathbf{V} \equiv -\Delta) \quad (4.7)$$

koje nazivamo **jednačinama popravaka**. Da bismo dobili sva moguća rešenja, neophodno je davati vektoru \mathbf{x} sve moguće vrednosti. Pri tom, saglasno (4.6), samo kada je $\mathbf{x} = \Delta \mathbf{x}$, imaćemo $\mathbf{v} \equiv -\Delta$. Za sve druge vrednosti \mathbf{x} (a $\Delta \mathbf{x}$ nam je nepoznato) elementi vektora \mathbf{v} mogu biti samo manje ili više bliski vektoru $-\Delta$. Dakle, sistem (4.7) je saglasan jer proističe iz sistema veza popravaka (4.6) koji je uvek saglasan (Perović, 2011).

Sušтина metode najmanjih kvadrata sastoji se u izboru takvog vektora $\hat{\mathbf{x}}$, pri kom vektor $\hat{\mathbf{V}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{f}$, uzet u svojstvu ocene vektora $-\Delta$, dovodi do najmanjeg rizika da će se mnogo razlikovati u poređenju sa bilo kojim drugim vektorom (4.7).

Matrica težina merenja se određuje na osnovu sledećeg izraza:

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{Q}_i^{-1} = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2} \quad (4.7a)$$

gde je σ_i^2 a priori varijansa opažanja l_i . Korelacija između merenja postoji ali se obično izostavlja zbog njihovih najčešće nedovoljno realnih procena.

Kada su u pitanju realne geodetske mreže i relacije u njima, broj merenja n je obično veći od broja nepoznatih parametara u u Gauss-Markovljevom modelu. Metod najmanjih kvadrata (MNK) podrazumeva minimizaciju sume kvadrata odstupanja \mathbf{l} od očekivane vrednosti $\mathbf{M}(\mathbf{l})$ u nekoj pogodno izabranoj metrici (Perović, 2005).

4.2. PROBLEMI DEFINISANJA DATUMA GEODETSKIH MREŽA

Datum geodetske mreže čine potrebni parametri da bi mreža bila definisana po obliku, položaju i veličini. Može se dati sledeća matematička formulacija (Drozdov, 1972):

- Treba odrediti brojne vrednosti nepoznatih parametara $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_u$ (koordinate, orijentacioni uglovi, visine i dr.)
- U tom cilju mogu biti zadate neke od ranije poznate veličine $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_p$, tj. date veličine

Za potrebe određivanja nepoznatih parametara, pored datih veličina, potrebno je na osnovu realizovanih merenja, definisati skup merenih veličina $\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \dots, \mathbf{l}_n$, pri čemu mora biti ispunjen uslov da je broj merenja veći od broja nepoznatih parametara, tj. $n > u$.

Skup traženih, datih i merenih veličina nazivamo mrežom, ako:

Prvo, među merenim veličinama l_i ($i = 1, 2, \dots, n$) možemo naći i takvih, neka to budu l_1, l_2, \dots, l_u , čije bi poznavanje tačnih vrednosti zajedno sa datim veličinama bilo neophodno i dovoljno za određivanje nepoznatih parametara.:

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i(\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \dots, \mathbf{l}_u), \quad i = 1, 2, \dots, u \quad (4.8)$$

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{l}_i(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_u), \quad i = 1, 2, \dots, u \quad (4.9)$$

Tih u veličina nazivamo neophodnim veličinama.

Drugo, ako se bilo koja od ostalih merenih veličina $\mathbf{l}_{u+1}, \mathbf{l}_{u+2}, \dots, \mathbf{l}_n$ (njih je $r = n - u$ i nazivamo ih suvišnim) može izraziti u funkciji neophodnih veličina, tj. ako je:

$$\mathbf{l}_{u+i} = \mathbf{f}_{u+i}(\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \dots, \mathbf{l}_u), \quad i = 1, 2, \dots, r = n - u. \quad (4.10)$$

Za svaku mrežu, funkcije (4.8) i funkcije (4.9), posle zamene (4.8) u (4.9), predstavljaju n izraza oblika:

$$\mathbf{l}_i = f_i(X_1, X_2, \dots, X_u), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.11)$$

i nazivamo ih **funkcijama veze**, jer povezuju nepoznate parametre sa merenim veličinama.

Matematički izrazi (4.8) i (4.9) zadovoljavaju uslove obostranog jednoznačnog preslikavanja, međutim, uslovi iz definicije mreže mogu se ostvariti u tzv. državnim geodetskim (neslobodnim) mrežama, gde su parametri datuma već definisani merenjem, i u nekim specifičnim slučajevima, dok se u određenim praktičnim zadacima ne mogu ostvariti. U tom cilju, uopštenija definicija geodetske mreže glasi (Perović, 2011):

*Skup geodetskih tačaka/repera, datih i traženih, sa skupom L_1, L_2, \dots, L_n merenih veličina, koje mogu biti raznorodne, nazvaćemo **geodetskom mrežom**, ako između ovih n merenih veličina možemo naći q ($q \leq u < n$) nezavisnih - koje ćemo zvati neophodnim, takvih da bilo koji element (veličinu) u mreži, čija vrsta pripada vrsti merenih veličina, možemo izraziti pomoću tih q neophodnih veličina.*

Ako su poznati parametri koji definišu koordinatni sistem u kome je određen položaj geodetske mreže, onda ti parametri predstavljaju *date veličine* u geodetskim mrežama. U zavisnosti od načina na koji određujemo parametre datuma, razlikujemo dve vrste geodetskih mreža:

- **Slobodne** mreže – parametre datuma biramo proizvoljno
- **Neslobodne** mreže – parametre datuma određujemo merenjem

Kada su u pitanju nacionalne geodetske mreže, parametri datuma definisani su merenjem, i sve mreže koje se postepeno razvijaju u okviru njih, moraju biti uklopljenje u okviru fiksnih tačaka postojećih mreža, pri čemu je prisutan efekat uticaja grešaka datih veličina. U tom slučaju linearni model je sa potpunim rangom i problem datuma ne postoji, za razliku od slobodnih geodetskih mreža, gde dolazi do pojave **defekta** ranga, koji možemo otkloniti uvođenjem informacija o koordinatnom sistemu, tj. definisanjem geodetskog datuma.

Pojedini autori su osporavali ovakav koncept uklapanja mreža i zalagali su se za takozvane dinamičke mreže u okviru kojih bi se pri svakom novom proglašavanju geodetskih mreža menjao i datum mreže. Međutim, iz praktičnih razloga, to nije bilo moguće sprovesti.

Kod neslobodnih mreža, matrica dizajna A ima potpun rang kolona, pa je njen rang jednak broju nepoznatih parametara $r(\mathbf{A}) = r = u$, tj. matrica N je regularna ($\det N \neq 0$), dok kod slobodnih mreža matrica dizajna A ima nepotpun rang kolona, pa u tom slučaju figuriše **defekt** mreže, tj. matrica N je singularna ($\det N = 0$).

Kada je u pitanju definisanje referentnih sistema, neki parametri se mogu eliminisati. Broj tih parametara odgovara defektu datuma (Caspary, 2000).

Kada su u pitanju **1D mreže**, površ istog potencijala je referentna. To se postiže uvođenjem proizvoljne visine za jednu tačku koja je fiksna. Razmera po visini je definisana

merenjem visinskih razlika. Ako se razmera želi smatrati fiksnim parametrom, jedna visinska razlika se uzima fiksno a to se postiže uvođenjem dodatne fiksne tačke. To se javlja često kod izravnjanja podataka na bazi (sva merenja su duž jedne linije) a ukupna dužina se uzima da je fiksna. Definisane parametara datuma kod **2D mreža** (u Dekartovom koordinatnom sistemu) odnosi se na sledeće elemente: translacija t_x , translacija t_y , rotacija u ravni XOY (oko Z ose) r_z i razmera s . To se postiže fiksiranjem jedne tačke sa koordinatama i poznatim nagibom ka drugoj tački. Ako dužine nisu uključene, ili ako se razmera ne može regulisati linearnim merenjima, jedna dužina dodatno mora biti fiksirana. U najčešćem slučaju se fiksiraju kao datum četiri koordinate dveju tačaka. U **3D mrežama**, Dekartov pravougli sistem je definisan fiksiranjem tri koordinate jedne tačke, jednim nagibom i dva zenitna ugla. Ako je razmera datumski parametar, tada se mora fiksirati jedna dužina. U drugom slučaju, referentni sistem će biti definisan sa 6 koordinata dveju tačaka i jednim dodatnim parametrom za razmeru mreže.

Za potrebe analize geodinamičkih pomeranja na područjima sa izraženim geotektonskim aktivnostima, koriste se permanentno prikupljeni podaci u različitim vremenskim intervalima, u geodetskim mrežama koje su invarijantne od definisanja datuma (Capra et al., 2007). Dakle, definisanje datuma ne sme imati uticaj na geometriju mreže, tj. međusobni položaj tačaka može biti određen isključivo geodetskim merenjima, pri čemu datum ne sme dovesti do naprezanja mreže. U sledećoj tabeli je dat prikaz potrebnih parametara za definisanje datuma u zavisnosti od vrste merenih veličina, kada se radi o 2D geodetskim mrežama.

Tabela 4.2. Parametri datuma u dvodimenzionalnim geodetskim mrežama

Merene veličine u mreži	Parametri datuma 2D geodetske mreže			
	t_x	t_y	r_z	s
Horizontalni pravci	–	–	–	–
Dužine	–	–	–	+
Azimut	–	–	+	–
Položaj (astronomski, GPS)	+	+	+	+
Razlike položaja (GPS, inercijalne)	–	–	+	+

4.2.1. Analitičko rešenje problema datuma

Iz uslova minimizacije kvadratne forme:

$$\mathbf{R}(\mathbf{x}) = \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = (\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{f})^T \mathbf{P} (\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{f}) \quad (4.12)$$

po \mathbf{x} , dobijaju se normalne jednačine:

$$\mathbf{N} \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (4.13)$$

pri čemu je kod slobodnih geodetskih mreža $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$ singularna matrica sa $r(\mathbf{N}) = r(\mathbf{A}) = r < u$, gde je $r = r(\mathbf{A})$ rang linearnog funkcionalnih modela, a veličina $d = u - r$ predstavlja defekt funkcionalnog modela.

Ako vektor \mathbf{x} podelimo na dva dela \mathbf{x}_1 i \mathbf{x}_2 , na način da u \mathbf{x}_2 budu parametri datuma, a saglasno tome i matricu \mathbf{A} , sa rangom $r(\mathbf{A}) = r(\mathbf{A}_1) = r$, formiramo u obliku $[\mathbf{A}_1 \ \mathbf{A}_2]$, tada će vektor popravaka biti određen sledećim izrazom:

$$\mathbf{V} = [\mathbf{A}_1 \ \mathbf{A}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} + \mathbf{f}, \text{ sa } r(\mathbf{A}_1) = r - \text{potpun rang kolona.} \quad (4.14)$$

Kolone matrice \mathbf{A}_2 su tada, linearne kombinacije kolona matrice \mathbf{A}_1 , što upućuje na to da postoji matrica \mathbf{L} tako da važi sledeća relacija:

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{L} = \mathbf{A}_2 \ (\Rightarrow \ \mathbf{A}_1 \mathbf{L} - \mathbf{A}_2 = [\mathbf{A}_1 \ \mathbf{A}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{L} \\ -\mathbf{E}_d \end{bmatrix} = \mathbf{0}), \ \mathbf{E}_d - \text{jedinična } n \times n \text{ matrica} \quad (4.15)$$

MNK rešenje sistema (4.14) zavisi od načina određivanja parametara datuma, koje smo dodelili vektoru \mathbf{x}_2 , što zavisi od toga da li se radi o slobodnoj ili neslobodnoj mreži. S obzirom da se za potrebe analiza geodinamičkih pomeranja sa aspekta geodetskih mreža, primenjuju uglavnom slobodne geodetske mreže, problem rešavanja datuma će biti prikazan samo za njih.

Kod slobodnih mreža, minimiziranjem kvadratne forme $\mathbf{v}^T \mathbf{p} \mathbf{v}$ (Perović, 2011), sa \mathbf{v} iz (4.14), dobijaju se normalne jednačine:

$\mathbf{N} \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{n} = \mathbf{0}$, koje možemo napisati u obliku:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{cc} \mathbf{N}_{11} & \mathbf{N}_{11} \mathbf{L} \\ \mathbf{L}^T \mathbf{N}_{11} & \mathbf{L}^T \mathbf{N}_{11} \mathbf{L} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}_1 \\ \tilde{\mathbf{x}}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{L}^T \mathbf{n}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \left. \begin{array}{l} \mathbf{N}_{11} = \mathbf{A}_1^T \mathbf{P} \mathbf{A}_1, \ \mathbf{n}_1 = \mathbf{A}_1^T \mathbf{P} \mathbf{f} \\ \mathbf{N}_{12} = \mathbf{N}_{11} \mathbf{L}, \ \mathbf{r}(\mathbf{N}_{11}) = r \end{array} \right\} \quad (4.16)$$

i koje su **uvek saglasne**. Uz korišćenje reflektivne simetrične G-inverzije $\mathbf{N}_{1r}^- = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_{11}^- & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$, opšte rešenje sistema (4.16), glasi:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}_1 \\ \tilde{\mathbf{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{N}_{11}^- \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\mathbf{L} \\ \mathbf{E}_d \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}_2, \ (\tilde{\mathbf{x}}_2 - \text{proizvoljno}), \quad (4.17)$$

pri čemu je \mathbf{x}_2 proizvoljan vektor

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{N}_{11}^- \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = -\mathbf{N}_{1r}^- \begin{bmatrix} \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{L}^T \mathbf{n}_1 \end{bmatrix} = \mathbf{x}_0. \quad (4.18)$$

partikularno rešenje sistema $\mathbf{N} \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{n} = \mathbf{0}$, a sledeća matrica

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -\mathbf{L} \\ \mathbf{E}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{N}_{11}^- \\ \mathbf{E}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\mathbf{A}_1^T \mathbf{P} \mathbf{A}_1)^{-1} \mathbf{A}_1^T \mathbf{P} \mathbf{A}_2 \\ \mathbf{E}_d \end{bmatrix}, \quad (4.19)$$

sa $N_{12} = N_{11}L$ predstavlja *fundamentalnu matricu* rešenja sistema $N\tilde{x} + n = 0$. Za $\tilde{x}_2 = 0$ sledi dobro poznato *klasično rešenje* :

$$\left. \begin{aligned} \tilde{x}_1 &= -N_{11}^{-1}A_1^T P f, & \tilde{x}_2 &= 0, & (N_{11} &= A_1^T P A_1), \text{ sa} \\ Q_{\tilde{x}_1} &= N_{11}^{-1}, & Q_{\tilde{x}_2} &= 0 \text{ i } Q_{\tilde{x}_1\tilde{x}_2} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

za šta je od matrice A dovoljno formirati samo njen deo A_1 .

Kofaktorske matrice Q_{x_1} , Q_{x_2} i $Q_{x_1x_2}$ ne zavise od izbora vrednosti za \tilde{x}_2 , već zavise od izbora tačaka mreže koje definišu datum. Naravno kovarijanse su strogo zavisne od izabranih tačaka čije koordinate daju dopunske parametre. Te tačke se ponekad nazivaju *računskom bazom nulte varijanse* tog modela. Svi elementi kovarijacione matrice $\Sigma \hat{x}_1$ će biti razmatrane kao relativne varijanse u odnosu na računsku bazu (Ninkov, 1989; Caspary, 2000; Perović, 2011).

4.2.2. Datumski uslovi i MNK ocene nepoznatih parametara

Kada je u pitanju izravnanje slobodnih geodetskih mreža, postoji više načina za određivanje pseudoinverzije $N^+ = Q_{\hat{x}}$ ($N^- = Q_{\hat{x}}$) singularne matrice koeficijenata normalnih jednačina N , primenom sledećih postupaka:

- Transformacije sličnosti (S-transformacije)
- Generalizovane inverzije
- Regularne inverzije proširene singularne matrice

U slobodnim geodetskim mrežama, uvek je pre izravnanja poznat defekt datuma mreže, tj. razlog nastanka singulariteta. Opšti postupak rešavanja datuma odnosi se na ortogonalno oivičenje Gaus-Markovljevog modela sa onoliko uslovnih jednačina koliko iznosi defekt datuma d . Ovakav način rešavanja datuma se naziva **metodom pseudomerenja** (Caspary, 2000; Perović, 2011), gde se pojavljuje pomoćna *G-inverzija* $(N + RR^T)^{-1}$, tako da se matrice N^- i R^- (matrica datumskih uslova) dobijaju na osnovu sledećeg izraza:

$$N^- = (N + RR^T)^{-1} N (N + RR^T)^{-1} = Q_{\hat{x}} \text{ i } (R^-)^T = (N + RR^T)^{-1} R \quad (4.21)$$

pri čemu se datum može definisati na sledeće načine:

- **Klasičan način definisanja datuma**, fiksiranjem koordinata jedne tačke i jedne koordinate druge tačke, uz definisanu razmeru, merenjem bar jedne dužine. U sledećem primeru geodetske mreže koja se sastoji od n tačaka, usvojili smo za nepromenjive (tačne) koordinate tačke 2 (Y_2 i X_2) i jednu koordinatu tačke 3 (Y_3). Na taj način su definisane dve translacije i rotacija. Pod pretpostavkom da se u mreži pored pravaca mere i dužine,

definisana je i razmera. Kada se na ovakav način formira datum, standardi nepoznatih parametara se povećavaju kako se udaljavamo tačaka koje definišu datum. Matrica datumskih uslova je sledećeg oblika:

$$\mathbf{R}^T = \begin{bmatrix} Y_1 & X_1 & Y_2 & X_2 & Y_3 & \dots & \dots & Y_n & X_n & Z_1 & Z_2 & \dots & Z_n \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{Y translacija} \\ \text{X translacija} \\ \text{rotacija} \end{array} \quad (4.22)$$

Dakle, može se postaviti onoliko datumskih uslova koliko iznosi defekt mreže. Matrica \mathbf{N} je singularna sa rangom $r(\mathbf{N}) = r = r(\mathbf{A})$, međutim, kada se uzme u obzir nezavisnost kolona matrice \mathbf{R} od vrsta matrice \mathbf{A} , sledi nezavisnost vrsta matrice \mathbf{N} od kolona matrice \mathbf{R} .

Inverzija \mathbf{N}^{-} dobija se proširenjem matrice normalnih jednačina \mathbf{N} sa matricom datumskih \mathbf{R}^T i u tom slučaju dobijamo regularnu matricu:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} & \mathbf{R} \\ \mathbf{R}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}^{-} & (\mathbf{R}^{-})^T \\ \mathbf{R}^{-} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

- **Datum definisan minimalnim tragom kovarijacione matrice na sve tačke mreže.** Ovde sve tačke imaju jednaku težinu, tačnije uvodi se referentna tačka u mreži, tj. težište, jer su u tom slučaju elipse grešaka najmanje. Kada se na ovakav način formira datum, standardi nepoznatih parametara se povećavaju kako se udaljavamo od težišta mreže. U ovom slučaju umesto matrice \mathbf{R} figuriraju matrica datumskih uslova \mathbf{B} .

Matrica datumskih uslova je sledećeg oblika:

$$\mathbf{B}^T = \begin{bmatrix} Y_1 & X_1 & Y_2 & X_2 & \dots & \dots & Y_n & X_n & Z_1 & Z_2 & \dots & Z_n \\ \frac{1}{\sqrt{\mu}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{\mu}} & 0 & \dots & \dots & \frac{1}{\sqrt{\mu}} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{\mu}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{\mu}} & \dots & \dots & 0 & \frac{1}{\sqrt{\mu}} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -\xi_1 & \eta_1 & -\xi_2 & \eta_2 & \dots & \dots & -\xi_n & \eta_n & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{Y translacija} \\ \text{X translacija} \\ \text{rotacija} \end{array} \quad (4.24)$$

pri čemu je n – broj tačaka mreže, a $\mu = \sqrt{n}$.

Koeficijenti ξ i η prikazuju uticaj na koordinate u zavisnosti od udaljenosti tačke mreže od referentne tačke, tj. težišta, pri čemu ih određujemo na osnovu sledećih izraza:

$$\xi_i = \frac{X_i - \bar{X}_0}{g} \quad \text{i} \quad \eta_i = \frac{Y_i - \bar{Y}_0}{g}, \quad \text{pri čemu je } i = 1, \dots, n \quad (4.25)$$

gde su Y_i, X_i - približne koordinate tačaka mreže.

Koordinate referentne tačke u okviru mreže, tj. težišta određujemo na osnovu:

$$\bar{Y}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad \text{i} \quad \bar{X}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (4.26)$$

gde je $g = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Y_{j,0} - \bar{Y}_0)^2 + \sum_{j=1}^n (X_{j,0} - \bar{X}_0)^2}$.

Pseudoniverzija \mathbf{N}^+ se može odrediti na sledeći način (Koch, 1987; Caspary, 2000):

$$\mathbf{N}^+ = (\mathbf{N} + \mathbf{B}\mathbf{B}^T)^{-1} - \mathbf{B}\mathbf{B}^T = \mathbf{Q}_{\hat{x}}, \quad (4.27)$$

pa dobijamo proširenu matricu koja postaje regularna:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}^+ & (\mathbf{B}^+)^T \\ \mathbf{B}^+ & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Nakon inverzije matrice normalnih jednačina, u zavisnosti od proširenja matrice \mathbf{N} matricom datumskih uslova, dobija se kofaktorska matrica $\mathbf{Q}_{\hat{x}} = \mathbf{N}^+$.

U ovom slučaju posmatramo trag kovarijacione matrice kao meru sveobuhvatne preciznosti.

$$\text{tr} \mathbf{K}_{\hat{x}} = \sigma_0^2 \text{tr} \mathbf{Q}_{\hat{x}} = \text{minimum} \quad (4.29)$$

Sa minimalnim tragom od $\mathbf{Q}_{\hat{x}}$ dobijamo da je suma disperzija koordinata minimalna, tj. važi sledeća relacija:

$$\sum_1^u \sigma_{\hat{x}_i}^2 = \sigma_0^2 \sum_1^u \mathbf{Q}_{\hat{x}_i} = \text{minimum} \quad (4.30)$$

U tom slučaju dobijamo jedinstvenu reprezentativnu vrednost za prosečnu srednju disperziju koordinata:

$$\sigma_{\hat{x}}^2 = \frac{\sigma_0^2 \text{tr} \mathbf{Q}_{\hat{x}}}{u} \quad (4.31)$$

kao i srednju standardnu položajnu grešku:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_p &= \sigma_{\hat{x}} && \text{- za 1D mrežu,} \\ \sigma_p &= \sigma_{\hat{x}} \sqrt{2} && \text{- za 2D mrežu,} \\ \sigma_p &= \sigma_{\hat{x}} \sqrt{3} && \text{- za 3D mrežu.} \end{aligned} \right\} \quad (4.31.a)$$

- **Datum definisan minimalnim tragom kovarijacione matrice za deo tačaka mreže.** Pored slučaja za sve tačke, datum se može definisati sa minimalnim tragom za deo tačaka mreže (za tačke geodetske mreže koje su postavljene van zone očekivanih deformacija, kada na osnovu određenih geoloških i geofizičkih istraživanja imamo saznanja o tome).

U ovom slučaju tražimo trag kovarijacione matrice za deo vektora \mathbf{x} , tj. za deo tačaka mreže. Označićemo taj broj tačaka sa s , pri čemu je $s < m$ (ukupan broj tačaka u mreži), i postavimo ih tako da to budu prvih s' tačaka. Broj nepoznatih parametara za ovaj deo tačaka biće: $u'_1 = s$ za 1D mrežu, $u'_1 = 2s$ za 2D mrežu i $u'_1 = 3s$ za 3D mrežu. **Uslov minimalnog traga** tada će glasiti: $\text{tr}\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_s'} = \text{minimum}$.

Na osnovu toga će se dobiti uslovi datuma za minimalni trag za s' tačaka

$$\mathbf{R}'^T \mathbf{x} = \mathbf{0}, \text{ sa } \mathbf{R}'^T = \begin{bmatrix} \mathbf{R}'_s^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Rešenje $\hat{\mathbf{x}}_s$ sa minimalnim tragom za s' tačaka će se dobiti iz zajedničkog sistema:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} & \mathbf{R}' \\ \mathbf{R}'^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{s'} \\ \hat{\mathbf{k}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{n} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \Rightarrow \hat{\mathbf{x}}_{s'} = -\mathbf{N}'_s^+ \mathbf{n} \quad (4.33)$$

, gde se G inverzija \mathbf{N}'_s^- dobija iz inverzije:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} & \mathbf{R}' \\ \mathbf{R}'^T & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}'_s^+ & (\mathbf{R}'^-)^T \\ \mathbf{R}'^- & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Kao rezultat MNK ocenjivanja, dobićemo ocenu vektora nepoznatih parametara sa kovarijacionom matricom:

$$\tilde{\mathbf{x}} = -\mathbf{N}^- \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{f}, \text{ sa } \mathbf{K}(\tilde{\mathbf{x}}) = \sigma^2 \cdot \mathbf{N}^- \text{ za datum definisan na klasičan način} \quad (4.35)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = -\mathbf{N}^+ \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{f}, \text{ sa } \mathbf{K}(\hat{\mathbf{x}}) = \sigma^2 \cdot \mathbf{N}^+ \text{ za datum definisan minimalnim tragom} \quad (4.36)$$

Ocena popravaka $\hat{\mathbf{V}}$ određuje se na osnovu sledećeg izraza:

$$\hat{\mathbf{V}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{f} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{f}, \text{ sa } \mathbf{M}(\hat{\mathbf{V}}) = \mathbf{0}, \mathbf{K}(\hat{\mathbf{V}}) = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{V}}} \quad (4.37)$$

pri čemu je kofaktorska matrica ocena popravaka $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{V}}}$ određena sledećim izrazom:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{V}}} = \mathbf{P}^{-1} - \mathbf{A} \mathbf{N}^- \mathbf{A}^T, \text{ za datum definisan na klasičan način} \quad (4.38)$$

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{V}}} = \mathbf{P}^{-1} - \mathbf{A} \mathbf{N}^+ \mathbf{A}^T, \text{ za datum definisan minimalnim tragom} \quad (4.39)$$

Koeficijente unutrašnje pouzdanosti dobijamo na osnovu:

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{Q}_{\hat{v}_i} \cdot \mathbf{P}_i \quad (4.40)$$

Ocena očekivane vrednosti opažanja je :

$$\mathbf{M}(\mathbf{l}) = \hat{\mathbf{l}} = \mathbf{l} + \hat{\mathbf{V}}, \text{ sa } \mathbf{K}(\hat{\mathbf{l}}) = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{Q}_i \quad (4.41)$$

gde je kofaktorska matrica ocena opažanja:

$$\mathbf{Q}_i = \mathbf{A}\mathbf{N}^{-1}\mathbf{A}^T, \mathbf{Q}_i = \mathbf{A}\mathbf{N}^+\mathbf{A}^T \quad (4.42)$$

Eksperimentalna standardna devijacija (*a posteriori* koeficijent) se dobija na osnovu:

$$\hat{\sigma}_0 = \hat{\mathbf{m}}_0 = \sqrt{\frac{\hat{\mathbf{V}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{V}}}{\mathbf{f}}}, \text{ sa } \mathbf{f} = \mathbf{n} - \mathbf{r}(\mathbf{A}) \text{ stepeni slobode} \quad (4.43)$$

pri čemu je važno naglasiti da su ocene $\hat{\mathbf{x}}(\hat{\mathbf{x}})$ i \mathbf{m}_0 nezavisne.

4.3. OPŠTA DATUMSKA TRANSFORMACIJA

Kod konvencionalne datumske transformacije, ukazano je da transformacija sličnosti, sa \mathbf{d} propisno izabranih parametara, ne deformiše oblik mreže, tako da je na taj način pogodna za promenu referentnog sistema. Ovo potpoglavlje se bavi transformacijom iz jednog datuma, tj. seta datumskih uslova (ograničenja), recimo $\mathbf{R}_1^T \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$ u drugi, $\mathbf{R}_2^T \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$. Linearna transformacija, nazvana **S-transformacija** će biti uspostavljena da bi omogućila datumsku transformaciju bez potrebe za ponavljanjem inverzije $\mathbf{u} \mathbf{x} \mathbf{u}$ normalne matrice.

Neka je $\mathbf{R}_1 = \mathbf{B}_1 \mathbf{S}$ i $\mathbf{R}_2 = \mathbf{B}_2 \mathbf{S}$, gde je $\mathbf{A} \mathbf{S} = \mathbf{0}$ i $\mathbf{S}^T \mathbf{S} = \mathbf{I}_d$. Dalje, neka \mathbf{B}_1 i \mathbf{B}_2 budu izabrane matrice koje su dijagonalne i imaju koeficijente +1 ili 0 sa najmanje \mathbf{d} elemenata koji su +1. \mathbf{B} je očigledno popunjena nulama u onim redovima od \mathbf{S} koje su korespondentne sa nulama od \mathbf{B} i zadržava sve druge redove vodeći ka posebnoj strukturi matrice \mathbf{R} . Tako da se jednostavnom promenom matrice \mathbf{B} postižu različiti uslovi:

1. $\mathbf{B} = \mathbf{I} \Rightarrow \mathbf{R} = \mathbf{S} \Rightarrow$ minimalna norma MNK rešenja
2. $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \\ & \mathbf{I}_d \end{pmatrix} \Rightarrow$ konvencionalni datum sa poslednjih \mathbf{d} koordinata koje služe kao nulta varijansa računске baze

$$3. \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & & \\ & \mathbf{I}_k & \\ & & \mathbf{0} \end{pmatrix}, \mathbf{k} > \mathbf{d} \Rightarrow \text{rešenje koje minimizira parcijalnu normu } \|\hat{\mathbf{x}}_k\| \text{ koja se}$$

sastoji od tih \mathbf{k} nepoznatih, koje su označene sa blok matricom \mathbf{I}_k od \mathbf{B} . U isto vreme suma odgovarajućih \mathbf{k} varijansi, tj. parcijalni trag kofaktorske matrice, postiže **minimum**.

Sa odgovarajućim dizajniranjem matrice \mathbf{B} , moguće je definisati bilo koji razuman datum za izravnanje mreže. Ocena parametara $\hat{\mathbf{x}}_1$ koja odgovara datumskim ograničenjima $\mathbf{R}_1^T \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$ odnosi se na kofaktorsku matricu:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_1} = (\mathbf{N} + \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_1^T)^{-1} \mathbf{N} (\mathbf{N} + \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_1^T)^{-1} \quad (4.44)$$

Drugi set datumskih uslova, npr. $\mathbf{R}_2^T \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$ odnosi se na novi vektor parametara $\hat{\mathbf{x}}_2$ sa kofaktorskom matricom $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_2}$. Ova dva rešenja se mogu povezati na osnovu relacije $\mathbf{N} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_2} \mathbf{N} = \mathbf{N}$, koja je korektna za bilo koju matricu $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}}$:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_1} = (\mathbf{N} + \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_1^T)^{-1} \mathbf{N} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_2} \mathbf{N} (\mathbf{N} + \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_1^T)^{-1} \quad (4.45)$$

S obzirom da su \mathbf{N} i $(\mathbf{N} + \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_1^T)^{-1}$ simetrične matrice, jednačina (4.45) može biti napisana kao:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_1} = \mathbf{K}_1 \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_2} \mathbf{K}_1^T \quad (4.46)$$

sa zamenom:

$$\mathbf{K}_1 = (\mathbf{N} + \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_1^T)^{-1} \mathbf{N} \quad (4.47)$$

Jednačina (4.46) podseća na rezultate opšteg zakona prenosa varijansi ako se primeni na linearne funkcije:

$$\hat{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{K}_1 \hat{\mathbf{x}}_2 \quad (4.48)$$

U osnovi, može se dokazati da veza postoji. Da bi se pokazalo da je jednačina (4.48) održiva, dovoljno je pokazati da je:

$$\hat{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{I} = \mathbf{K}_1 \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_2} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{I} \quad (4.49)$$

jednačina validna za bilo koji vektor opažanja \mathbf{I} . Ako se uzme u obzir da je \mathbf{P} regularna matrica, jednačina (4.49) je ekvivalentna sa:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_1} \mathbf{A}^T = \mathbf{K}_1 \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_2} \mathbf{A}^T \quad (4.50)$$

Ako se jednačina (4.50) prethodno pomnoži sa $(\mathbf{N} + \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_1^T)$ i ako se uzmu u obzir relacije $\mathbf{R}_1 = \mathbf{B}_1 \mathbf{S}$ i $\mathbf{S}^T \mathbf{A}^T = \mathbf{0}$, onda sledeći izraz:

$$\mathbf{N} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_1} \mathbf{A}^T = \mathbf{N} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_2} \mathbf{A}^T \quad (4.51)$$

predstavlja rezultat koji je odgovarajući za bilo koju matricu $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{Q}_{11}$ (Caspary, 2000). Tako je uspostavljena **S-transformacija** koja se može upotrebiti za transformaciju bilo kojeg rešenja $\hat{\mathbf{x}}$, $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}}$ opšteg Gauss-Markovljevog modela u drugo rešenje bazirano na matrici datumskih uslova $\mathbf{R}_1 = \mathbf{B}_1 \mathbf{S}$. Nije neophodno poznavati uslove koji su iskorišćeni u originalnom rešenju. Ali, oni moraju biti tipa $\mathbf{R} = \mathbf{B} \mathbf{S}$, kao što je predstavljeno u uvodu ovog potpoglavlja. Dalje, imamo sledeće jednačine:

$$\hat{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{K}_1 \hat{\mathbf{x}} \quad (4.52)$$

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_1} = \mathbf{K}_1 \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}} \mathbf{K}_1^T \quad (4.53)$$

gde je:

$$\mathbf{K}_1 = (\mathbf{N} + \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_1^T)^{-1} \mathbf{N} = \mathbf{I} - \mathbf{S} (\mathbf{R}_1^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{R}_1^T \quad (4.54)$$

Drugo rešenje za \mathbf{K}_1 na desnoj strani jednačine (4.54) je računski mnogo pogodnije nego prvo. Samo je uključena inverzija $d \times d$ matrice dok je matrica $\mathbf{N} + \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_1^T$ ($u \times u$) invertovana u drugom slučaju.

U slučaju kada se zahteva druga promena datuma sa poznavanjem novog seta datumskih uslova (npr. $\mathbf{R}_2^T \mathbf{x} = \mathbf{0}$, $\mathbf{R}_2 = \mathbf{B}_2 \mathbf{S}$), dovoljno je sračunati novu matricu transformacije \mathbf{K}_2 i primenjujući izraze (4.52) i (4.53) na $\hat{\mathbf{x}}_1$ ili na $\hat{\mathbf{x}}$, dolazi se do istog rezultata:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_2 &= \mathbf{K}_2 \hat{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{K}_2 \hat{\mathbf{x}} \\ \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_2} &= \mathbf{K}_2 \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_1} \mathbf{K}_2^T = \mathbf{K}_2 \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}} \mathbf{K}_2^T \end{aligned} \quad (4.55)$$

Ovaj ishod je posledica opšte relacije:

$$\mathbf{K}_i \mathbf{K}_j = \mathbf{K}_i \quad (4.56)$$

pri čemu se za bilo koje \mathbf{K}_i i \mathbf{K}_j može lako dokazati primena izraza (4.54).

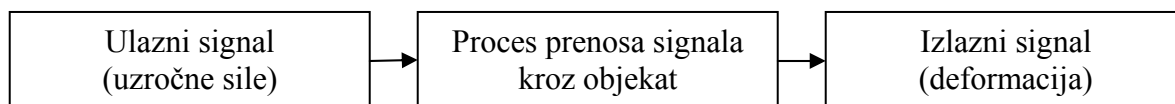
5. SISTEMATIZACIJA MODELA U DEFORMACIONOJ ANALIZI

Tradicionalni zadatak deformacione analize u oblasti geodezije odnosi se na istraživanje pomeranja površinskog omotača Zemljine kore i svih izgrađenih veštačkih struktura od značaja (mostovi, brane, visoke zgrade) u vremenu i prostoru (Sušić et al., 2008, Ninkov et al., 2011; 2012). Površinski slojevi omotača Zemljine kore su usled različitih uticaja, kao što su promena nivoa podzemnih voda, tektonske pojave, klizišta itd., u stalnom pokretu. Razvoj tehnologija merenja i modeliranja kao i interdisciplinarni pristup u rešavanju ove oblasti, prelazi revolucionarni put od konstatacije i opisa deformacija do analize procesa šta je zapravo uzrok pojavljivanja deformacije. Cilj analize je generisanje relacije između uzročno posledičnih sila i fizičkih svojstava predmeta ispitivanja (u daljem tekstu objekta). Interdisciplinarni pristup podrazumeva uspostavljanje standardizovane terminologije i razumevanje dinamike procesa, kada se radi o suštinskom razumevanju geodetske deformacione analize sa ostalim naučnim i tehničkim disciplinama kao što je mehanika, građevinarstvo i teorija sistema. Teorija sistema obezbeđuje opšte prihvaćene uslove u cilju standardizacije tehničkih termina u oblasti deformacione analize.

Deformaciona analiza se primenjuje na sledeće predmete ispitivanja:

- Pomeranja Zemljine kore (pomeranje krupnijih neotektonskih blokova i zona, tektonskih ploča, itd.)
- Klizišta, odroni
- Građevinski objekti i konstrukcije sa neposrednim okruženjem
- Monitoring zona sa permanentnim opasnostima, predikcija zemljotresa, vulkanskih erupcija, itd.

U teoriji dinamičkih sistema, objekat se može posmatrati kao dinamički sistem izložen uticaju spoljnih sila (interna i eksterna opterećenja) koje dovode do geometrijskih promena (pomeranja i distorzije). Sistem je definisan ulaznim signalom (uzrokom pojavljivanja deformacija), procesom prenosa signala kroz sistem i izlaznim signalom, kao posledicom (Heunecke & Welsch, 2000).



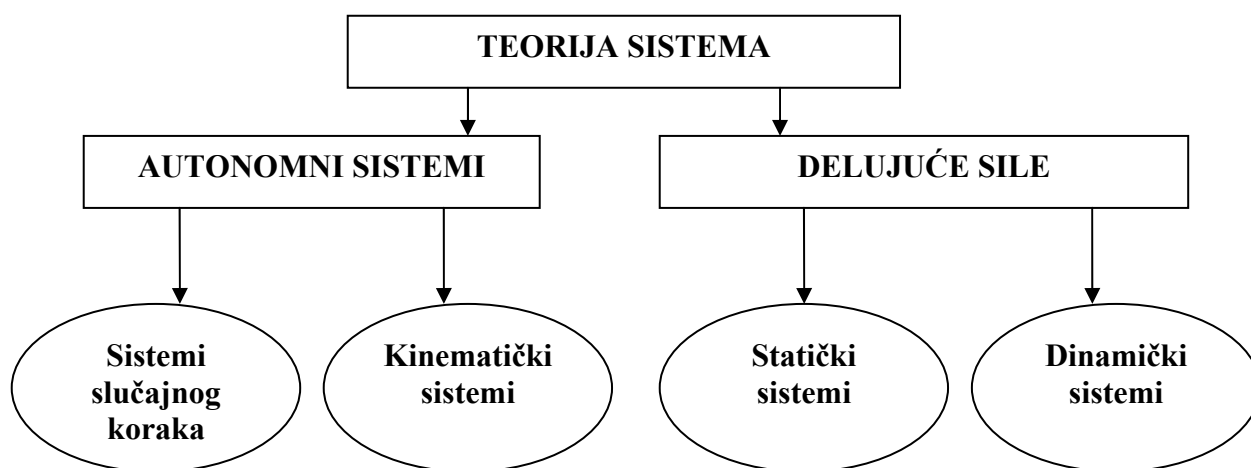
Slika 5.1. Deformacija kao element dinamičkog procesa

Promena ulaznih signala utiče na vremenski zavisani proces adaptacije sistema, što dovodi do kašnjenja izlaznog signala (deformacije), tj. dinamički sistem ima memoriju. Ovde se radi o opštem slučaju, dok se posebni slučajevi odnose na sledeće:

- **Dinamički sistemi** - Ulazni signali kreiraju dinamički proces u gore pomenutom smislu. Razlika u dinamičkim sistemima odnosi se na vremenski faktor, pa tako imamo dve kategorije dinamičkih sistema:

- Dinamički sistemi koji reaguju identično kao u opštem slučaju, tj. deformacija kao izlazni signal je funkcija vremena i (promenljivih) opterećenja.
 - Statički sistemi su u stanju ravnoteže. Oni trenutno reaguju na promene uzročnih sila, tako da se novo stanje ravnoteže postiže bez vremenskog odlaganja. U ovom slučaju, deformacije su funkcije isključivo promene opterećenja.
- **Autonomni sistemi** – su sistemi koji ne zavise od ulaznih sila. Ovi sistemi ipak mogu biti u pokretu. Postoje dve vrste autonomnih sistema:
- Kinematički sistemi koji su u pokretu, ali pokret može biti opisan kao funkcija vremena.
 - Sistemi slučajnog koraka, koji su takođe u pokretu, ali je kretanje slučajnog karaktera, pa se funkcija vremena ne može uspostaviti.

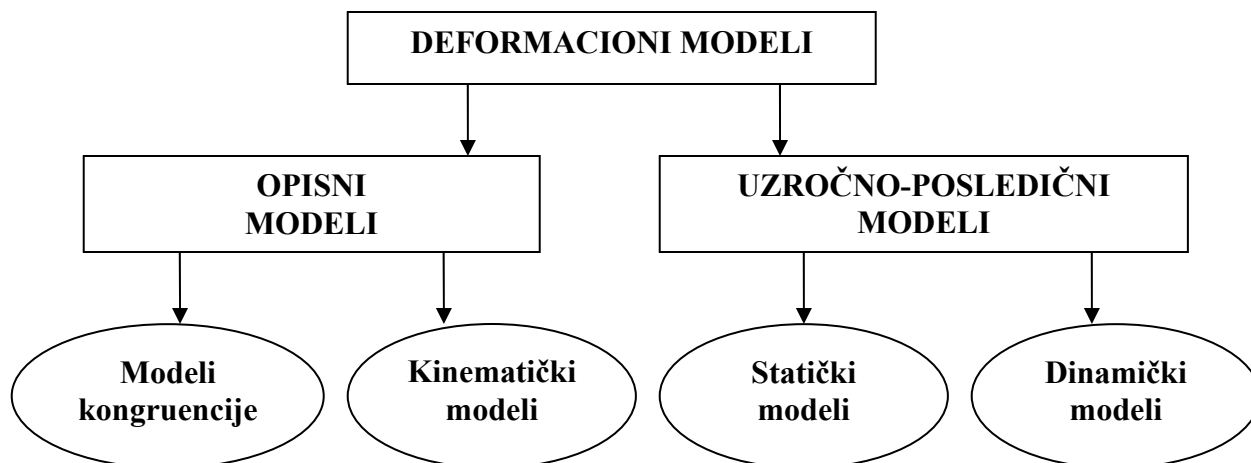
Osnovni cilj teorije sistema jeste da pronade relevantni matematički opis ponašanja sistema. Ako se problem posmatra sa geodetske tačke gledišta, cilj je opravdan ako se proces deformacione analize sprovodi na osnovu geodetskih opažanja. Analogija hijerarhije sistema i modela je očigledna (Slika 5.2).



Slika 5.2. Hijerarhija sistema u okviru teorije sistema (Heunecke, 1995; Welsch, 1996)

Modeli kongruencije ili podudarnosti deo su tradicionalnog geodetskog pristupa u analizi deformacija koji se bazira na strogo geometrijskoj komparaciji objekta u prostoru, koji je interpretiran sa „dovoljnim” brojem tačaka, u dve nezavisne epohe merenja, pri čemu se vreme i ulazne sile ne uzimaju eksplicitno. Prvi korak analize, kao što smo videli u prethodnim poglavljima, jeste da ispita geometrijsku podudarnost u dve epohe na osnovu statističkih testova. Otkrivene deformacije se dalje analiziraju na lokalnom, regionalnom ili globalnom nivou. Lokalne deformacije se u mnogim slučajevima odnose na pomeranja pojedinačnih tačaka, regionalne ili globalne deformacije mogu se generalizovati i opisati kao pomeranja krutog tela, afine distorzije ili koristeći druge aproksimativne funkcije.

U skladu sa prethodno navedenim činjenicama, odnoseći se na teoriju sistema i različite varijante dinamičkih sistema, generalno postoje četiri kategorije modela za procenu i identifikaciju deformacija (Slika 5.3):



Slika 5.3. Hijerarhija modela u geodetskoj deformacionoj analizi (Heunecke, 1995; Welsch, 1996)

Kinematički modeli imaju zadatak da pronađu odgovarajući opis kretanja tačke u funkciji vremena, bez uticaja uzročnih sila. Tu se najčešće primenjuje polinomski pristup, posebno brzine i ubrzanja, kao i harmonijske funkcije.

Statički modeli opisuju funkcionalnu vezu između opterećenja pod dejstvom uzročnih sila i geometrijske reakcije nekog objekta, ne uzimajući u obzir vremenski aspekt. Objekat mora da bude dovoljno dugo u stanju ravnoteže tokom realizacije opažanja po epohama, pre i posle opterećenja. Ponašanje objekta u vremenskom intervalu između epoha ostaje nepoznato i nije od značaja kada su u pitanju statički modeli. Pomeranja i distorzije objekta se izražavaju kroz funkciju opterećenja, ne i vremena. Za statičke modele, fizička i geometrijska struktura, parametri materijala i drugi kvantitativni parametri objekta treba da budu poznati i formulisani u smislu diferencijalnih jednačina koje izražavaju odnos pritisak/naprezanje. Statički modeli se često primenjuju kada se vrše testiranja opterećenja objekata poput mostova, pilona, itd.

Predmet **dinamičkog modeliranja** odnosi se na odgovarajući opis ponašanja objekta u odnosu na vreme i sile koje deluju na objekat. Dinamički modeli integrišu mogućnosti statičkih i kinematičkih modela.

U narednoj tabeli su prikazane karakteristike modelovanja za četiri kategorije deformacionih modela, uzimajući u obzir faktor **vremena** i **opterećenja**:

Tabela 5.1. Klasifikacija deformacionih modela (Heunecke & Welsch, 2000)

Deformacioni model	Model kongruencije	Kinematički model	Statički model	Dinamički model
Vreme	Nema modelovanja	Pomeranje kao funkcija vremena	Nema modelovanja	Pomeranje kao funkcija vremena i opterećenja
Delujuće sile	Nema modelovanja	Nema modelovanja	Deformacije kao funkcija opterećenja	
Stanje objekta	Dovoljno dugo u stanju ravnoteže	Konstantno u pokretu	Dovoljno dugo u stanju ravnoteže pod opterećenjem	Konstantno u pokretu

5.1. KONVENCIONALNA DEFORMACIONA ANALIZA

Konvencionalni pristup u geodetskoj analizi deformacija podrazumeva kvalitetnu prostornu interpretaciju predmeta analize karakterističnim tačkama i definisanje vremenskog perioda opažanja. Konvencionalno modeliranje deformacionog procesa geodetskim merenjima podrazumeva opažanje tačaka u tačno utvrđenim vremenskim intervalima kako bi se pratila vremenska evolucija pokreta. U ovom slučaju modelira se geometrija u datom vremenskom trenutku opažanja, s obzirom da dobijena pomeranja tačaka reprezentuju pomeranja i distorziju objekta ili površine koja se analizira. Shodno tome, deformacije objekta su opisane isključivo na fenomenološki način.

Tabela 5.2. Geodetsko modeliranje deformacija u prostornom i vremenskom smislu

Domen	Realan objekat	Modelovanje objekta
Geometrijski	Objekat je kontinualna figura	Interpretacija objekta karakterističnim tačkama
Vremenski	Objekat je (manje ili više) permanentno u pokretu	Monitoring objekta u određenim vremenskim intervalima

Za navedenu prostorno-vremensku analizu postoje dve vrste modela. Modeli koji testiraju podudarnost geometrijskih karakteristika objekta u dve vremenske epohe nazivaju se **modeli kongruencije**. Vremenski aspekt se uzima implicitno. Modeli koji opisuju deformaciju na osnovu date ili pretpostavljene funkcije vremena, odnosno brzine, ubrzanja itd., nazivaju se **kinematički modeli**.

5.1.1. Modeli kongruencije

Deformaciona analiza, kako je prethodno navedeno, zasniva se na strogo geometrijskom upoređivanju objekta, interpretiranog sa skupom karakterističnih tačaka u geodetskoj mreži, u dve ili više epohe. Model analize ne razmatra eksplicitno vremenski interval između realizovanih epoha kao ni uzročne sile koje su prouzrokovale deformaciju. Međutim, implicitno se mogu koristiti određene pretpostavke o verovatnoći ponašanja objekta u tom intervalu. Dakle, ulazne veličine koje se koriste za vrednovanje modela su isključivo geodetska opažanja l_i , dok su izlazne veličine predstavljene koordinatama tačaka u tačno utvrđenom vremenskom trenutku. Statistička istraživanja teorije podudarnosti koordinata tačaka u nultoj i kontrolnim epohama datiraju od 1960. godine.

Nezavisnim izravnanjem opažanja u dve vremenski različite epohe, na osnovu (4.27), (4.36) i (4.43), dobijamo ocene vektora diferencijalnih priraštaja \hat{x}_i i kofaktorske matrice $\mathbf{Q}_{\hat{x}_i}$ koje su zavisne od izbora datuma. Ocene popravaka \hat{V} , kofaktorska matrica ocena popravaka $\mathbf{Q}_{\hat{V}}$, kofaktorska matrica ocena opažanja \mathbf{Q}_i , *a posteriori* disperzioni koeficijent σ_0^2 i ocene vrednosti opažanja \hat{I} su datumski invarijantne.

Takođe, veoma važan aspekt pre same analize mora biti uzet u obzir tokom procesa posrednog izravnjanja po MNK metodi a odnosi se na: globalni test (*Chi-Square*), lokalni test (*Data-Snooping*), preciznost, tačnost i pouzdanost (Setan & Singh, 2001). Inicijalna provera ulaznih podataka je važna da bi obezbedila upotrebu istih približnih koordinata zajedničkih tačaka u obe epohe. Ako broj tačaka u obe epohe nije isti, deformaciona analiza se sprovodi samo za tačke koje su zajedničke u obe epohe. To se lako postiže ekstrakcijom zajedničkih tačaka iz obe epohe. Broj defekta datuma zavisi od unije datumskog defekta iz obe epohe (Chen, 1983; Chen et al., 1990; Setan & Singh, 2001). Recimo, ako prva epoha opažanja predstavlja trilateracionu mrežu gde je defekt datuma 3 (dve translacije i rotacija), dok se druga epoha odnosi na triangulacionu mrežu sa defektom datuma 4 (dve translacije, rotacija i razmera), onda je unija defekta datuma jednaka defektu datuma u drugoj epohi, tj. defekt datuma je 4.

Homogenost tačnosti u dve epohe se testira hipotezom o jednakosti *a posteriori* disperzionih koeficijenata:

$$H_0: \hat{\sigma}_{0_1}^2 = \hat{\sigma}_{0_2}^2 \quad (5.1)$$

Alternativna hipoteza glasi:

$$H_a: \hat{\sigma}_{0_1}^2 > \hat{\sigma}_{0_2}^2 \text{ ili } \hat{\sigma}_{0_2}^2 > \hat{\sigma}_{0_1}^2 \quad (5.2)$$

pri čemu $\hat{\sigma}_{0_1}^2$ i $\hat{\sigma}_{0_2}^2$ označavaju *a posteriori* disperzione koeficijente u prvoj i drugoj epohi.

Test statistika je:

$$T = \frac{\sigma_{0_j}^2}{\sigma_{0_i}^2} \sim F_{1-\alpha, f_j, f_i} \quad (5.3)$$

gde **j** i **i** predstavljaju veći i manji faktor disperzije, F je Fišerova raspodela sa nivoom značajnosti α (obično se koristi vrednost $\alpha = 0.05$), f_i i f_j predstavljaju brojeve stepeni slobode za epohe **i** i **j**, respektivno.

Test se prihvata ako je $T < F_{1-\alpha, f_j, f_i}$. U slučaju da važi $T > F_{1-\alpha, f_j, f_i}$, test se odbacuje i svaku dalju analizu treba zaustaviti u ovoj fazi. Razlog odbacivanja testa može biti u nekompatibilnim težinama između epoha. Ako je nulta hipoteza prihvaćena, računa se objedinjeni disperzioni faktor za obe epohe :

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{f_1 \cdot \hat{\sigma}_{0_1}^2 + f_2 \cdot \hat{\sigma}_{0_2}^2}{f}, \text{ sa } f = f_1 + f_2 \text{ stepeni slobode} \quad (5.4)$$

Nakon testiranja jednakosti disperzija u dve epohe i prihvatanja nulte hipoteze o jednakosti disperzija, određuje se vektor pomeranja (koordinatnih razlika) i korespondentna kofaktorska matrica :

$$d = \hat{x}_2 - \hat{x}_1 \quad (5.5)$$

$$\mathbf{Q}_d = \mathbf{Q}_{\hat{x}_1} + \mathbf{Q}_{\hat{x}_2} \quad (5.6)$$

pri čemu su \hat{x}_1 i \hat{x}_2 ocene koordinata zajedničkih tačaka u prvoj i drugoj epohi, respektivno (sa istim definisanim datumom u obe epohe), $\mathbf{Q}_{\hat{x}_1}$ i $\mathbf{Q}_{\hat{x}_2}$ su kofaktorske matrice ocena koordinata \hat{x}_1 i \hat{x}_2 , dok je \mathbf{d} vektor pomeranja sa korespondentnom kofaktorskom matricom \mathbf{Q}_d .

Procedura primene modela kongruencije se zasniva na sledećim principima (Fraser & Gruendig, 1985; Setan & Singh, 2001):

- Transformacija vektora pomeranja \mathbf{d} i korespondentne kofaktorske matrice \mathbf{Q}_d respektivno, za obe epohe u isti datum ili računsku bazu.
- Određivanje stabilnih tačaka koje definišu datum geodetske mreže primenom testa podudarnosti.
- Lokalizacija deformacija primenom *single-point* testa, S-transformacije i testa podudarnosti.
- Finalno testiranje deformacija primenom *single-point* testa.

5.1.1.1. Transformacija obe epohe u zajednički datum

Kada je reč o primeni modela kongruencije u deformacionoj analizi geodetskih mreža, veoma je važno da se vektor pomeranja \mathbf{d} i korespondentna kofaktorska matrica \mathbf{Q}_d odnose na isti datum ili računsku bazu, kako bi se dobila objektivna i nepristrasna ocena o pomeranju tačaka geodetske mreže. Datum mreže se obično definiše u onim tačkama za koje već posedujemo određene *a priori* informacije o njihovoj stabilnosti, na osnovu različitih vrsta istraživanja (geološka, geofizička, itd).

Kao jedan od primera transformacije matrica \mathbf{d} i \mathbf{Q}_d u zajednički datum, koristi se **S-transformacija**, pri čemu se koristi rešenje sa minimalnim tragom kofaktorske matrice na sve tačke ili parcijalnim minimalnim tragom (Cooper, 1987; Fraser & Gruendig, 1985; Caspary, 2000; Setan & Singh, 2001).

$$\mathbf{d}_1 = \mathbf{S} \cdot \mathbf{d} \quad (5.7)$$

$$\mathbf{Q}_{d_1} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{Q}_d \cdot \mathbf{S}^T \quad (5.8)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{I} - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W} \quad (5.9)$$

pri čemu su \mathbf{d}_1 i \mathbf{Q}_{d_1} vektor pomeranja i korespondentna kofaktorska matrica, respektivno, koji se odnose na novi datum ili računsku bazu, \mathbf{G} predstavlja matricu datumskih uslova koja se odnosi na uniju defekta datuma iz obe epohe odnoseći se na zajedničke tačke (4.22 i 4.24). Matrica \mathbf{W} se odnosi na matricu težina sa dijagonalnim vrednostima 1 za tačke koje definišu datum i 0 za ostalo. Matrica \mathbf{S} je simetrična samo u slučaju kada se koristi rešenje sa minimalnim tragom na sve tačke.

Sledeći korak se odnosi na testiranje stabilnosti tačaka koje definišu datum geodetske mreže.

5.1.1.2. Testiranje podudarnosti datumskih tačaka

U ovom slučaju testira se podudarnost između grupe tačaka koje definišu datum. Nulta i alternativna hipoteza za test podudarnosti datumskih tačaka glasi (Fraser and Gruendig, 1985; Cooper, 1987; Setan & Singh, 2001):

$H_0: E(d'_1) = 0$, u grupi tačaka koje definišu datum nema nestabilnih tačaka

$H_a: E(d'_1) \neq 0$, u grupi tačaka koje definišu datum ima nestabilnih tačaka

Test statistika je datumski invarijantna i računa se na osnovu sledećeg izraza:

$$T = \frac{d_1'^T Q_{d_1}'^+ d_1'}{h \sigma_0^2} \sim F_{1-\alpha}(h, f) \quad (5.10)$$

pri čemu se d_1' i Q_{d_1}' odnose na vektor pomeranja i korespondentnu kofaktorsku matricu, respektivno, za grupu zajedničkih tačaka koje definišu datum.

$h = \text{rang}(Q_{d_1}') = 2n - d$, za 2D mrežu sa brojem zajedničkih datumskih tačaka n i defektom datuma d

Matrica Q_{d_1}' je singularna ($\det(Q_{d_1}') = 0$), pa se primenjuje pseudoinverzija na osnovu (4.23) i (4.28).

Nulta hipoteza se prihvata sa nivoom značajnosti α ako važi sledeća relacija:

$$T < F_{1-\alpha}(h, f) \quad (5.11)$$

Odbacivanje nulte hipoteze ukazuje na postojanje deformacija u okviru grupe tačaka koje definišu datum, tj. prihvata se alternativna hipoteza. Odbacivanje testa predstavlja uvod u lokalizaciju nestabilnih tačaka koje su uzrokovale postojanje deformacija u mreži. Nakon otkrivanja i eliminacije istih, mreža se mora transformisati u novu računsku bazu, odnosno datum mreže će definisati preostale tačke. Postupak lokalizacije nestabilnih tačaka u okviru datumskih tačaka nastavlja se sve dok se testom kongruencije ne verifikuje stabilnost preostalih datumskih tačaka (5.11).

5.1.1.3. Lokalizacija deformacija

Ako je test kongruencije (5.10) pokazao da u mreži postoje deformacije, primenjuje se lokalizacija deformacija u cilju eliminisanja nestabilnih tačaka iz grupe tačaka koje definišu datum.

U prvom koraku se primenjuje *single-point* test na datumskim tačkama u cilju eliminacije istih iz grupe tačaka koje definišu datum. *Single-point* test za 2D mrežu (s obzirom da se

eksperimentalni deo disertacije prevashodno bavi analizom dvodimenzionalnih pomeranja), zanemarujući korelaciju između datumskih tačaka, glasi:

$$\mathbf{T}_j = \frac{\mathbf{d}'_{1j} \mathbf{Q}'_{d1} \mathbf{d}'_{1j}}{2\sigma_0^2} \quad (5.12)$$

gde su \mathbf{d}'_{1j} i \mathbf{Q}'_{d1} respektivno, vektor pomeranja i korespondentna kofaktorska matrica za svaku datumsku tačku j , a $\hat{\sigma}_0^2$ predstavlja objedinjeni faktor disperzije (5.4). Za datumsku tačku sa najvećom vrednošću test statistike \mathbf{T}_j (5.11) se pretpostavlja da je uzrok pojave deformacije u okviru mreže i ta tačka se eliminiše iz računске baze. Mreža se nakon toga prevodi u novu računsku bazu pri čemu je datum definisan preostalim tačkama.

5.1.1.4. Transformacija mreže u novu računsku bazu i test kongruencije na grupi preostalih datumskih tačaka

U ovom slučaju se takođe koristi S-transformacija u cilju transformacije \mathbf{d}_1 i \mathbf{Q}_{d1} u novu računsku bazu, nakon čega dobijamo vektor pomeranja \mathbf{d}_2 i korespondentnu kofaktorsku matricu \mathbf{Q}_{d2} za novu definiciju datuma, pri čemu je \mathbf{W} matrica težina (sa dijagonalnim vrednostima 1 za tačke koje definišu datum i 0 za ostalo).

$$\mathbf{d}_2 = \mathbf{S} \cdot \mathbf{d}_1 \quad (5.13)$$

$$\mathbf{Q}_{d2} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{Q}_{d1} \cdot \mathbf{S}^T \quad (5.14)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{I} - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W} \quad (5.15)$$

Za stabilnost preostalih datumskih tačaka, primenjuje se test kongruencije. Nulta hipoteza glasi:

$$\mathbf{H}_0: \mathbf{E}(\mathbf{d}'_2) = \mathbf{0}, \text{ u grupi preostalih tačaka koje definišu datum nema nestabilnih tačaka}$$

protiv alternativne hipoteze koja glasi:

$$\mathbf{H}_a: \mathbf{E}(\mathbf{d}'_2) \neq \mathbf{0}, \text{ u grupi preostalih tačaka koje definišu datum ima nestabilnih tačaka}$$

Test statistika se određuje na osnovu sledećeg izraza:

$$\mathbf{T} = \frac{\mathbf{d}'_2 \mathbf{Q}'_{d2} \mathbf{d}'_2}{(\mathbf{h}-2\mathbf{k})\sigma_0^2} \sim F_{1-\alpha}(\mathbf{h}-2\mathbf{k}, \mathbf{f}) \quad (5.16)$$

gde su \mathbf{d}'_2 i \mathbf{Q}'_{d2} vektor pomeranja i korespondentna kofaktorska matrica, respektivno, za grupu preostalih zajedničkih tačaka koje definišu datum, a \mathbf{k} predstavlja broj tačaka koje su eliminisane iz definisanja datuma.

Ako je nulta hipoteza odbijena sa nivoom značajnosti α , važi sledeća relacija:

$$\mathbf{T} > \mathbf{F}_{1-\alpha}(\mathbf{h}-2\mathbf{k},\mathbf{f}) \quad (5.17)$$

postupak lokalizacije se ponavlja sve dok nulta hipoteza ne bude prihvaćena:

$$\mathbf{T} < \mathbf{F}_{1-\alpha}(\mathbf{h}-2\mathbf{k},\mathbf{f}) \quad (5.18)$$

To znači da su sve preostale tačke, koje definišu datum geodetske mreže, stabilne.

5.1.1.5. Finalno testiranje deformacija primenom *single-point* testa

Kada test (5.16) pokaže da u preostalim datumskim tačkama nema nestabilnih, primenjuje se *single-point* test na sve zajedničke tačke u geodetskoj mreži, sa nivoom značajnosti α .

Nulta hipoteza glasi:

$$\mathbf{H}_0: \mathbf{d}_{2j} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{x_{2j}} & \mathbf{d}_{y_{2j}} \end{bmatrix}^T = \mathbf{0}, \text{ sve zajedničke tačke u obe epohe su podudarne}$$

Alternativna hipoteza glasi:

$$\mathbf{H}_a: \mathbf{d}_{2j} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{x_{2j}} & \mathbf{d}_{y_{2j}} \end{bmatrix}^T \neq \mathbf{0}, \text{ postoje zajedničke tačke koje nisu podudarne u obe epohe}$$

Test statistika se određuje na osnovu:

$$\mathbf{T}_j = \frac{\mathbf{d}_{2j}^T \mathbf{Q}_{\mathbf{d}_{2j}}^{-1} \mathbf{d}_{2j}}{2\sigma_0^2} \sim \mathbf{F}_{1-\alpha}(\mathbf{2},\mathbf{f}) \quad (5.18)$$

Test je prošao ako se prihvati nulta hipoteza, sa nivoom značajnosti α (obično se koristi $\alpha = 0.05$):

$$\mathbf{T}_j < \mathbf{F}_{1-\alpha}(\mathbf{2},\mathbf{f}) \quad (5.19)$$

pri čemu se u tom slučaju tačka \mathbf{j} može smatrati stabilnom (vektor pomeranja ulazi u oblast poverenja). U suprotnom, odbacivanje nulte hipoteze ukazuje na to da je tačka \mathbf{j} signifikantno pomerenjena (vektor pomeranja izlazi iz oblasti poverenja).

Dakle, kao što je već rečeno, sve datumske tačke moraju *single-point* testom biti verifikovane kao stabilne. Ako postoji neka nestabilna tačka u grupi datumskih tačaka, ona se mora eliminisati i postupak lokalizacije mora biti ponovljen. Pored računске verifikacije i otkrivanja nestabilnih tačaka *single-point* testom, veoma je korisno izvršiti i grafičku verifikaciju računanjem elemenata standardne elipse grešaka za svaku tačku, pri čemu se vizuelno može utvrditi da li vektor pomeranja leži u okviru elipse grešaka, odnosno oblasti poverenja.

Neki autori (Pelzer, 1971; Fraser & Gruendig, 1985; Caspary, 2000) umesto *single-point* testa primenjuju dekompoziciju kvadratne forme, kako bi se utvrdilo koje su datumske tačke signifikantno nestabilne. Nulta hipoteza je takođe formulisana tako da su koordinate u dve epohe podudarne. Nulta hipoteza je uključena u Gaus-Markovljev model metode najmanjih kvadrata:

$$\begin{aligned} E\{\mathbf{l}\} &= \mathbf{A} \mathbf{x} \\ \mathbf{H}_0: \mathbf{H} \mathbf{x} &= \mathbf{0} \\ \text{Cov}\{\mathbf{l}\} &= \sigma_0^2 \mathbf{Q} = \sigma_0^2 \mathbf{P}^{-1} \end{aligned} \quad (5.20)$$

Ključni aspekt predstavlja statistika tzv. srednjeg neuklapanja Θ (globalni test podudarnosti):

$$\theta = \sqrt{\frac{\hat{\mathbf{d}}^T \mathbf{Q}_d^+ \mathbf{d}}{\mathbf{h}}}, \quad \mathbf{h} = \text{rang}(\mathbf{Q}_d) = 2n - d \quad (5.21)$$

pri čemu je \mathbf{d} vektor koordinatnih razlika sa kofaktorskom matricom \mathbf{Q}_d , i važi sledeća relacija:

$$\mathbf{P}\left\{\frac{\theta^2}{\sigma_0^2} \leq F_{h, f, 1-\alpha} \mid \mathbf{H}_0\right\} = 1 - \alpha \quad (5.22)$$

U suštini je testirana diferencijalna jednačina $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$ (Pelcer, 1971).

Dakle, globalni test otkriva da li postoje značajne razlike u koordinatama tačaka iz dve epohe. Ako postoje, sledeći korak je identifikacija tačaka koje su uzrokovale deformacije u mreži. Moguće je takođe generalizovati tačke u figure ili klustere tako da predstavljaju kruto telo, pa na tim figurama analizirati pomeranja ili tzv. naprezanja u deformacionom modelu. Rezultati pomeranja tačaka predstavljaju model deformacija. Kada se ima u vidu da se radi o strogo geometrijskoj analizi deformacija (Chrzanovski et al., 1990) koja je zasnovana na hipotezi (5.20), deformacioni model je nazvan **model kongruencije** ili model podudarnosti.

Pored modela kongruencije, koji se koristi za potrebe lokalizacije deformacija u geodetskim mrežama, primenjujuju se i tzv. **robustne metode**. Robustne metode i modeli kongruencije predstavljaju veoma važne alatke za potrebe određivanja trenda pomeranja svih zajedničkih tačaka u različitim epohama u mreži, i one predstavljaju osnovu za preliminarnu identifikaciju deformacionih modela za potrebe procesa modeliranja deformacija (Setan & Singh, 2001).

5.1.2. Robustne metode

Termin **robustnost** koristi se od 1953. godine (uveo ga je *Box G. E. P.*) za potrebe razdvajanja klase statističkih procedura malo osetljivih na nevelika odstupanja od polaznih pretpostavki. Pored ovog termina, neki autori koriste i termin **stabilnost**, koji je ipak u manjoj meri u upotrebi. S obzirom da se često koriste pretpostavke o normalnosti rasporeda opažanja, važno je istaći da se normalnost ne može postići uvek, pa je i Gaus isticao da je osnovni razlog kojim se rukovodio, dok je uvodio metod najmanjih kvadrata, jednostavnost računskog postupka.

Međutim, poznato je da je MNK veoma nestabilan u odnosu na narušavanje osnovnih pretpostavki, jer ne uzima u obzir mogućnost pojave opažanja sa grubim greškama. Mnogi istraživači koji su se bavili ovom problematikom, znali su za opasnosti koje proizvode dugački krajevi funkcija rasporeda grešaka, pa su predlagali i modele rasporeda grubih grešaka i kreirali **robusne varijante standardnih ocena**. Kao primer navedenog, ruski geodeti su pri izravnanju prvih triangulacionih mreža za opažanja (pravaca) koja nisu mnogo odstupala, koristili dva puta manje težine (Perović, 2005).

Detaljno objašnjenje za tri najpoznatije robusne metode za ocenu trenda pomeranja, Danska, robusna metoda M-ocena (*Huber P. J.*) i metoda sume apsolutnih minimuma (eng. *Least Absolute Sum, LAS*), dali su *Caspary i Borruta* 1987. godine. *Chen* je 1983. godine predložio robusnu metodu poznatu kao Iterativna težinska transformacija sličnosti (eng. *Iterative Weighted Similarity Transformation, IWST*). Ova robusna metoda je razvijena na Univerzitetu u Brunsviku, u Kanadi. Navedene metode se mogu koristiti za ocenu trenda pomeranja tačaka u geodetskim mrežama i imaju veliku primenu u detekciji deformacija. *LAS* i *IWST* metode su bazirane na S transformaciji (transformaciji sličnosti ili Helmertovoj transformaciji).

$$\mathbf{d}^{k+1} = \mathbf{S}^{(k)} \cdot \mathbf{d}^{(k)} = \left[\mathbf{I} - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{P}^{(k)} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{P}^{(k)} \right] \cdot \mathbf{d}^{(k)} \quad (5.23)$$

pri čemu je:

- \mathbf{I} – jedinična matrica
- k – broj iteracija transformacije
- \mathbf{d} – vektor pomeranja (5.5)
- \mathbf{S} – matrica S transformacije
- \mathbf{P} – matrica težina

Matrica datumskih uslova se, pored toga što se može odrediti na osnovu (4.22) i (4.23), može predstaviti i na osnovu sledećeg izraza:

$$\mathbf{G}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 \\ y_1^0 & -x_1^0 & y_2^0 & -x_2^0 & \dots & y_m^0 & -x_m^0 \\ x_1^0 & y_1^0 & x_2^0 & y_2^0 & \dots & x_2^0 & y_2^0 \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

gde su x_i^0 i y_i^0 koordinate tačke \mathbf{P}_i koje su svedene na težište mreže:

$$x_i^0 = x_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^m x_i \right)}{m} \quad (5.25)$$

$$y_i^0 = y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^m y_i \right)}{m} \quad (5.26)$$

dok su x_i i y_i približne koordinate tačke \mathbf{P}_i , a m je broj zajedničkih tačaka u mreži.

Prva dva reda matrice datumskih uslova (\mathbf{G}^T) odnose se na translaciju u pravcu x odnosno y ose, dok se treći red odnosi na rotaciju oko vertikalne (z) ose, a četvrti red definiše razmeru mreže (Chen et al., 1990; Caspary, 2000; Setan & Singh, 2001).

Osnovna razlika između robusnih metoda *LAS* i *IWST* jeste u formiranju matrice težina \mathbf{P} . U prvoj iteraciji transformacije ($\mathbf{k} = \mathbf{1}$), matrica težina se uzima kao jedinična matrica ($\mathbf{P}^{(k)} = \mathbf{I}$) za sve zajedničke tačke, a zatim se u ($\mathbf{k} + \mathbf{1}$) transformaciji matrica težina definiše na osnovu sledećih izraza.

Kod metode transformacije sličnosti *IWST*, težine određujemo na osnovu:

$$\mathbf{P}^{(k)} = \text{diag} \left\{ \frac{\mathbf{1}}{|\mathbf{d}_i^{(k)}|} \right\} \quad (5.27)$$

Kada se radi o *LAS* metodi, matrica težina se određuje na osnovu sledećeg izraza:

$$\mathbf{P}^{(k)} = \text{diag} \left\{ \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{(\mathbf{d}_{x_i}^{(k)})^2 + (\mathbf{d}_{y_i}^{(k)})^2}} \right\} \quad (5.28)$$

U izrazu (5.27) \mathbf{d} predstavlja vektor pomeranja koji se određuje na osnovu izraza (5.5) i (5.23). Međutim, u izrazu (5.28) \mathbf{d}_{x_i} i \mathbf{d}_{y_i} odnose se na komponente pomeranja u pravcu x i y ose, respektivno. Važno je napomenuti da se težine određene na osnovu izraza (5.27) i (5.28) odnose isključivo na zajedničke datumske tačke u referentnoj mreži ili na grupu tačaka u bloku stabilnih tačaka u relativnoj mreži, dok su težine za ostale tačke i tačke na objektu $\mathbf{P}^{(k)} = \mathbf{0}$. Iterativni postupak se nastavlja sve dok apsolutne razlike između uzastopno transformisanih vektora pomeranja na svim zajedničkim tačkama $|\mathbf{d}^{(k+1)} - \mathbf{d}^{(k)}|$ ne budu manje od vrednosti tolerancije δ (na primer 0.0001 [m]). Može se desiti tokom iterativnog postupka da $\mathbf{d}_i^{(k)}$ (ili \mathbf{d}_{x_i} \mathbf{d}_{y_i}) mogu biti bliski 0, uzrokujući numeričku nestabilnost pri određivanju $\mathbf{P}^{(k)}$ na osnovu izraza (5.27) i (5.28).

Problem se može rešiti na dva načina:

- Definisanjem donje granične vrednosti (na primer 0.0001 [m]). Ako je $\mathbf{d}_i^{(k)}$ manje od donje granične vrednosti, težina je jednaka 0, ili
- Izmenom izraza (5.27) i (5.28) na sledeći način:

$$\mathbf{P}^{(k)} = \text{diag} \left\{ \frac{\mathbf{1}}{|\mathbf{d}_i^{(k)}| + \delta} \right\} \quad (5.29)$$

$$\mathbf{P}^{(k)} = \text{diag} \left\{ \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{(\mathbf{d}_{x_i}^{(k)} + \delta)^2 + (\mathbf{d}_{y_i}^{(k)} + \delta)^2}} \right\} \quad (5.30)$$

U izrazu (5.30) vrednost tolerancije δ je dodata samo onim komponentama pomeranja koje su manje od donje granične vrednosti.

Dakle, *LAS* metoda minimalizuje sumu intenziteta pomeranja ($\sum \sqrt{(\mathbf{d}_{x_i})^2 + (\mathbf{d}_{y_i})^2} \Rightarrow \mathbf{minimum}$), dok *IWST* metoda minimalizuje konačnu sumu apsolutnih vrednosti komponenti pomeranja ($\sum |\mathbf{d}_i| \Rightarrow \mathbf{minimum}$).

U završnoj iteraciji, kofaktorska matrica pomeranja se određuje na sledeći način:

$$\mathbf{Q}_d^{(k+1)} = \mathbf{S}^{(k)} \mathbf{Q}_d (\mathbf{S}^{(k)})^T \quad (5.31)$$

Informacije o stabilnosti zajedničkih tačaka \mathbf{j} mogu biti određene primenom *single-point* testa (Setan & Singh, 2001):

$$\mathbf{T}_j = \frac{(\mathbf{d}_j^{(k+1)})^T (\mathbf{Q}_{d_j}^{(k+1)})^{-1} \mathbf{d}_j^{(k+1)}}{2\sigma_0^2} \sim F_{1-\alpha}(2, \mathbf{f}) \quad (5.32)$$

gde su \mathbf{d}_j i \mathbf{Q}_{d_j} vektor pomeranja i korespondentna kofaktorska matrica, respektivno, a $\hat{\sigma}_0^2$ objedinjeni *a posteriori* disperzioni faktor sa $\mathbf{f} = \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2$ stepeni slobode, najčešće se uzima $\alpha = 0.05$ nivo značajnosti.

Ako je test (5.32) prošao ($\mathbf{T}_j < F_{1-\alpha}(2, \mathbf{f})$), može se smatrati da su tačke stabilne sa nivoom značajnosti 0.05. U suprotnom ($\mathbf{T}_j > F_{1-\alpha}(2, \mathbf{f})$), pretpostavlja se da među tačkama ima značajno pomeranih.

Detaljnija objašnjenja u vezi sa robusnim metodama mogu se pronaći kod sledećih autora (Chen, 1983; Caspary, 2000; Perović, 2005; Berber, 2006).

5.1.3. Detekcija pomeranja analizom krutog tela

Nakon lokalizacije tačaka na kojima su identifikovane pojedinačne deformacije koje nisu u skladu sa ponašanjem okruženja, potrebno je uzeti u obzir tri različita slučaja za dalju analizu u zavisnosti od tipa predmeta koji se istražuje (Caspary, 2000):

- I. Stabilnost tačaka referentnog bloka (tačke koje definišu datum mreže) mora biti verifikovana. Za ove tačke se ocenjuje samo jedan set koordinata. Vektori deformacija između dve epohe se u ovom slučaju odnose na relativna pomeranja ostalih tačaka (recimo tačke na objektu) u odnosu na tačke referentnog bloka.
- II. Mreža se sastoji od dva ili više blokova, koji su odvojeni geološkim rasedom ili drugim tipom strukturnih linija kao što su pukotine. Tačke koje ukazuju na prisutnost netipičnih deformacija eliminišu se iz oba bloka. Jedan od blokova je odabran kao referentni blok i igra istu ulogu kao referentna mreža iz prethodnog slučaja I.

- III. Nije definisan referentni blok. Sve tačke u mreži imaju ravnopravan tretman. Potrebno je lokalizovati sve tačke koje ukazuju na neke netipične deformacije. Vektori deformacija se prikazuju na svim tačkama. Datum se može definisati na način kako je to objašnjeno u poglavlju 4.

Kada je u pitanju detekcija pomeranja karakterističnih tačaka analizom krutog tela, važno je napomenuti da se ova pomeranja mogu modelovati samo u relativnom smislu. Dakle, za slučaj I pomeranja ostalih tačaka (tačaka na objektu) se ocenjuju u odnosu na referentni blok. Slično, za slučaj II, pomeranja celokupnog bloka se mogu modelovati i oceniti u odnosu na referentni blok. U slučaju III, pomeranja krutog tela ne mogu biti određena.

Model krutog tela za određivanje pomeranja je sličan transformaciji sličnosti (podpoglavlje 5.1.2.). Ovaj model se može predstaviti na osnovu sledećeg izraza:

$$\Delta + \delta = \mathbf{H}\mathbf{t}, \quad \sum_{\Delta} = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{\Delta} \quad (5.33)$$

Vektor Δ sadrži „opažanja”, tj. koordinatne razlike \mathbf{m} tačaka dela mreže koji se ispituje. Ostatak modela čini vektor δ . Vektor parametara obuhvata dve nepoznate translacije \mathbf{t}_x i \mathbf{t}_y , rotaciju \mathbf{r}_z i parametar razmere \mathbf{s} .

$$\mathbf{t} = (\mathbf{t}_x \quad \mathbf{t}_y \quad \mathbf{r}_z \quad \mathbf{s}) \quad (5.34)$$

Treba napomenuti da su mnogi autori odbacili primenu parametra razmere kod upoređivanja dve epohe, njena uloga je zaista diskutabilna. Matrica dizajna, slično kao kod datumske transformacije može se izraziti na sledeći način:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 \\ -\bar{Y}_1 & \bar{X}_1 & -\bar{Y}_2 & \bar{X}_2 & \dots & -\bar{Y}_m & \bar{X}_m \\ \bar{X}_1 & \bar{Y}_1 & \bar{X}_2 & \bar{Y}_2 & \dots & \bar{X}_m & \bar{Y}_m \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

Kovarijaciona matrica \sum_{Δ} može se odrediti iz prethodnog zajedničkog izravnjanja dve epohe (\mathbf{i} i \mathbf{j}).

$$\mathbf{Q}_{\Delta} = \mathbf{Q}_{\hat{x}_i}^0 + \mathbf{Q}_{\hat{x}_j}^0 - \mathbf{Q}_{\hat{x}_i \hat{x}_j}^0 - \mathbf{Q}_{\hat{x}_j \hat{x}_i}^0 \quad (5.36)$$

Eksponent „0” odnosi se na tačke objekta (ostale tačke) nasuprot referentnim tačkama koje su označene eksponentom „r”.

Vektor parametara se ocenjuje metodom najmanjih kvadrata:

$$\hat{\mathbf{t}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{Q}_{\Delta}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Q}_{\Delta}^{-1} \Delta \quad (5.37)$$

Alternativno, ocena $\hat{\mathbf{t}}$ može biti integrisana u zajedničko izravnjanje koje sledi nakon analiza pojedinačnih epoha. Zajedničko izravnjanje dve epohe je neophodno samo u slučaju kada

egzistira korelacija između epoha. Iz mnogih praktičnih razloga i iskustva, podržana je pretpostavka korelacije između epoha. Međutim, nijedan metod koji bi pružio adekvatnu ocenu takve korelacije, do sada nije bio u primeni (Caspary, 2000). Dakle, u opštem slučaju se korelacija ne uzima u obzir.

Ako je $\mathbf{l}_i + \mathbf{V}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i$, $\sum_i \mathbf{l}_j + \mathbf{V}_j = \mathbf{A}_j \mathbf{x}_j$, \sum_j predstavlja Gaus-Markovljev model epoha \mathbf{i} i \mathbf{j} , respektivno. Tada se može model zajedničkog izravnjanja izraziti na sledeći način:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{l}_i \\ \mathbf{l}_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{V}_i \\ \mathbf{V}_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_i \\ \mathbf{x}_j \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \sum_i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \sum_j \end{pmatrix} = \sigma_0^2 \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Q}_j \end{pmatrix} \quad (5.38)$$

ili u kraćoj formi:

$$\mathbf{l} + \mathbf{V} = \mathbf{A} \mathbf{x}, \sum = \sigma_0^2 \mathbf{Q} \quad (5.39)$$

Jedina razlika u odnosu na pojedinačno izravnjanje jedne epohe je ta da se koristi zajednički disperzioni faktor za obe epohe σ_0^2 . Ocena ovog disperzionog faktora može se izračunati iz dva pojedinačna izravnjanja obe epohe pod uslovom istog *a priori* disperzionog faktora, ili preciznije, ocene imaju isto očekivanje:

$$\mathbf{E}(\sigma_{0i}^2) = \mathbf{E}(\sigma_{0j}^2) = \sigma_0^2 \quad (5.40)$$

Ovo može biti verifikovano korišćenjem F-testa. Ako je ocena komponenti disperzija primenjena na pojedinačne epohe, onda se može garantovati jednakost disperzionih faktora. Zajednička ili objedinjena disperzija se može sračunati na osnovu izraza (5.4):

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{f}_i \cdot \hat{\sigma}_{0i}^2 + \mathbf{f}_j \cdot \hat{\sigma}_{0j}^2}{\mathbf{f}_i + \mathbf{f}_j} = \frac{\mathbf{q}}{\mathbf{f}} \quad (5.41)$$

$$\mathbf{q} = (\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V})_i + (\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V})_j; \mathbf{f} = \mathbf{f}_i + \mathbf{f}_j$$

gde su $\mathbf{f}_i, \mathbf{f}_j$ i \mathbf{f} brojevi stepeni slobode pojedinačnih epoha i zajedničkog izravnjanja, respektivno.

Dodatna dva preduslova, kada je u pitanju upoređenje epoha, odnose se na sledeće:

- i. oba modela su zasnovana na istom geodetskom datumu i**
- ii. koriste se iste približne koordinate za zajedničke tačke.**

Dok je drugi uslov očigledan i lako ispunjiv u procesu linearizacije nelinearnih funkcija razvijanjem u Tejlorov red, prvi uslov zahteva objašnjenje. Ishod provere podudarnosti epoha ne zavisi od izbora datuma. Računska baza nulte varijanse i datum definisan sa minimalnim tragom su podjednako odgovarajući (Caspary, 2000). Jedini uslov je da su parametri tačaka, koji su

uključeni u definisanje datuma, prisutni u obe epohe. Modeli koji su inicijalno inkompatibilni se lako transformišu u zajednički datum postupkom datumske transformacije.

Kod analize krutog tela, izraz (5.38) može biti modifikovan na sledeći način:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{I}_i \\ \mathbf{I}_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{V}_i \\ \mathbf{V}_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_i^r & \mathbf{A}_i^o & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_j^r & \mathbf{A}_j^o & -\mathbf{A}_j^o \mathbf{H} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}}^r \\ \hat{\mathbf{x}}^o \\ \hat{\mathbf{t}} \end{pmatrix} \quad (5.42)$$

U slučaju kada je model proširen sa tri ili više parametara sa različitim setom parametara $\hat{\mathbf{t}}$, postavlja se pitanje da li je ili ne vektor parametara $\hat{\mathbf{t}}$ značajan. Odgovor se može bazirati na korišćenju \mathbf{F} testa.

Testiramo nultu hipotezu:

$$\mathbf{H}_0: \mathbf{E}(\hat{\mathbf{t}}) = \mathbf{t} = \mathbf{0} \quad (5.43)$$

da su parametri beznačajni i pod pretpostavkom normalnog rasporeda „opažanja” Δ koje sledi teoremu da kvadratna forma (Caspary, 2000):

$$\mathbf{q}_i = \hat{\mathbf{t}} \mathbf{Q}_i^{-1} \hat{\mathbf{t}} \sim \sigma_0^2 \chi^2(4) \quad (5.44)$$

ima centralnu χ^2 raspodelu sa četiri stepena slobode.

Dok je \mathbf{q}_i nezavisna od kvadratne forme \mathbf{q} (5.41), test statistika:

$$\mathbf{T} = \frac{0.25 \mathbf{q}_i}{\mathbf{q}/f} \sim \mathbf{F}(4, f) \quad (5.45)$$

podleže zakonu F raspodele.

Verovatnoća da test statistika prekorači kritičnu vrednost $\mathbf{F}_\alpha(4, f)$ je α . Po završetku ocene pomeranja analizom krutog tela, korisno je proveriti šta treba uraditi sa preostalim i još nemodeliranim vektorom deformacija u cilju donošenja odluke u narednim koracima analize. Da bi se odgovorilo na pitanje da li je primenjeni model dovoljan za proveru, testira se dodatna hipoteza.

Nulta hipoteza glasi:

$$\mathbf{H}_0: \text{Sve deformacije koje nisu modelirane su beznačajne}$$

Za testiranje ove hipoteze, koristi se sledeća test statistika:

$$\mathbf{T} = \frac{\mathbf{q}_\Delta/f_\Delta}{\mathbf{q}/f} \sim \mathbf{F}(f_\Delta, f) \quad (5.46)$$

Brojilac u okviru test statistike se može izračunati iz modela jednačina (5.42) ili (5.33). Jednačina (5.42) može se posmatrati kao model koji uključuje hipotezu da su sve tačke nedeformisani deo krutog tela bloka.

Stoga, kvadratna forma reziduala ovog modela prati izraz (5.47):

$$\mathbf{q}_H = \mathbf{V}_H^T \mathbf{P} \mathbf{V}_H \sim \sigma_0^2 \chi^2(\mathbf{f}_H); \quad \mathbf{f}_H = \mathbf{f} + \mathbf{f}_\Lambda \quad (5.47)$$

pri čemu je $\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j = \mathbf{H}^T \mathbf{x}$.

Pridruženi model bez primene hipoteza dat je sledećim izrazom:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{I}_i \\ \mathbf{I}_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{V}_i \\ \mathbf{V}_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_i^r & \mathbf{A}_i^o & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_j^r & \mathbf{0} & \mathbf{A}_j^o \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}^r \\ \mathbf{x}_i^o \\ \mathbf{x}_j^o \end{pmatrix} \quad (5.48)$$

Kvadratna forma \mathbf{q}_H ovog modela ima:

$$\mathbf{f}_H = \mathbf{f}_i + \mathbf{f}_j + \mathbf{f}_\Lambda \quad (5.49)$$

stepeni slobode, gde je \mathbf{f}_Λ jednak broju elemenata od \mathbf{x}^r minus defekt datuma.

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_\Lambda &= \mathbf{q}_{(5.42)} - \mathbf{q}_{(5.48)} \\ \mathbf{f}_\Lambda &= \mathbf{f}_{(5.42)} - \mathbf{f}_{(5.48)} \end{aligned} \quad (5.50)$$

Sa druge strane, \mathbf{q}_Λ može biti sračunata iz (5.33) primenom izraza:

$$\mathbf{q}_\Lambda = \boldsymbol{\delta}^T \mathbf{Q}_\Lambda^{-1} \boldsymbol{\delta}, \quad \mathbf{f}_\Lambda = 2\mathbf{m} - 4 \quad (5.51)$$

Imenilac iz izraza (5.46) sledi iz izraza (5.41).

Treba istaći da brojni testovi koji su primenjivani do sada, nisu nezavisni. Na žalost, ne postoji rigorozna statistička metoda da reši ovaj problem, tako da rezultati ovih testova ne treba da budu precegnjeni. Odluka za daljim analizama treba da bude bazirana na iskustvenoj i pažljivoj proceni iskartiranih polja vektora pomeranja (Caspary, 2000).

5.1.4. Analiza pomeranja primenom strejn modela

U numeričkim primenama deformacione analize, a naročito kada su u pitanju analize pomeranja Zemljine kore, krajnji cilj je reprezentacija deformacija u smislu parametara strejna (eng. *strain* – naprezanje, dilatacija) na osnovu geodetskih opažanja.

Osnovni principi strejn analize su razvijeni u teoriji elastičnosti i mehanici kontinuuma, dok se u geodeziji primenjuje za potrebe interpretacije deformacija Zemljine kore. Principi strejn analize su primenjivi ako je područje posmatranja ili objekat pokriven deformacionim modelom (geodetskom mrežom) koja se može posmatrati kao kontinualna deformacija pod opterećenjem. Po definiciji, deformacija je kontinualna. Poznato je da su opažanja realizovana samo na karakterističnim tačkama geodetske mreže, međutim, deformacije se mogu interpolovati tokom celog područja koje se istražuje. To se može postići upotrebom položajno zavisne kontinualne funkcije, koja je fitovana na opažanja MNK metodom, ili lokalnom kontinualnom funkcijom kao što je prava linija ili *splajn* koja povezuje opažane tačke (Caspary, 2000).

Pod uticajem raznih faktora i spoljnih sila, tela se deformišu i menjaju svoj oblik i zapreminu. Određivanjem pomeranja svih karakterističnih tačaka, imamo uvid u promenu oblika i zapremine tela, tj. deformaciju. U opštem slučaju, pomeranja pojedinih tačaka su različita i mogu nastati:

- i. usled pomeranja tela tretiranog kao kruto telo (translacija i rotacija) i
- ii. pomeranja usled čiste deformacije tela.

Pomeranje tela tretiranog kao kruto telo (objašnjeno u prethodnom poglavlju), ne znači da je i ono deformisano, tj. da je promenilo svoj oblik i zapreminu. Iz tog razloga, pored translacije i rotacije, kojima se definiše kretanje tela, potrebno je odrediti i distorziju.

Upravo se strejn analiza bavi određivanjem svih komponenata deformacije: translacije, rotacije i distorzije.

Kada se radi o 2D mrežama, može se napisati sledeći izraz:

$$\hat{\mathbf{x}}_i - \hat{\mathbf{x}}_j = \Delta = \mathbf{Ht} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \quad (5.52)$$

gde je \mathbf{Ht} pomeranje krutog tela ali bez nepoznatog parametra razmere, dok funkcija $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ modelira stvarne deformacije. U najčešćem slučaju geodetskih primena, deformacije su male u poređenju sa veličinom mreže, čim se eliminišu pomeranja krutog tela. Tako da se deformacije mogu modelirati različitim relacijama u neposrednoj okolini tačaka mreže:

$$\Delta = \mathbf{Ht} + \mathbf{E}d\mathbf{x} \quad (5.53)$$

gde je :

$$\mathbf{E} = \frac{\partial \Delta}{\partial \mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \Delta_x}{\partial x} & \frac{\partial \Delta_x}{\partial y} \\ \frac{\partial \Delta_y}{\partial x} & \frac{\partial \Delta_y}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{xx} & \mathbf{e}_{xy} \\ \mathbf{e}_{yx} & \mathbf{e}_{yy} \end{pmatrix} \quad (5.54)$$

infinitesimalni **deformacioni tenzor** sa Δ_x, Δ_y komponentama vektora deformacija Δ .

Izraz (5.53) je strogo validan samo u diferencijalnoj okolini tačke. U cilju primene tenzora na celo područje istraživanja, neophodna je pretpostavka homogenosti deformacija, tj. da je $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ linearno po \mathbf{x} . U principu, ovo je vrlo tesno ograničenje koje čini strejn analizu nepodesnom u mnogim problemima deformacione analize. Na sreću, u praksi je moguće malo „relaksirati” ovo ograničenje podelom mreže na **konačne elemente**. Da bi se došlo do rešenja izraza (5.53) potrebne su samo tri tačke, stoga se mreža može dekomponovati na trougaone elemente. U tom slučaju, **uslov homogenosti je ograničen na unutrašnjost trougla**.

Nesimetrična matrica \mathbf{E} se obično dekomponuje na sumu simetrične matrice $\boldsymbol{\varepsilon}$ i koso simetrične matrice $\boldsymbol{\omega}$:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2}(\mathbf{E} + \mathbf{E}^T) + \frac{1}{2}(\mathbf{E} - \mathbf{E}^T) = \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\omega} \quad (5.55)$$

gde je:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{xx} & \frac{(\mathbf{e}_{xy} + \mathbf{e}_{yx})}{2} \\ \frac{(\mathbf{e}_{xy} + \mathbf{e}_{yx})}{2} & \mathbf{e}_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{xx} & \boldsymbol{\varepsilon}_{xy} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{yx} & \boldsymbol{\varepsilon}_{yy} \end{pmatrix} \quad (5.56)$$

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \frac{(\mathbf{e}_{xy} - \mathbf{e}_{yx})}{2} \\ \frac{(\mathbf{e}_{yx} - \mathbf{e}_{xy})}{2} & \mathbf{0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \boldsymbol{\omega}_{xy} \\ \boldsymbol{\omega}_{yx} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (5.57)$$

Matrica $\boldsymbol{\varepsilon}$ predstavlja takozvani **strejn tenzor**. Dijagonalni elementi od matrice $\boldsymbol{\varepsilon}$ daju **ekstenzioni strejn** (proširenje) u \mathbf{x} i \mathbf{y} pravcu, respektivno. Izraz $\mathbf{1} + \boldsymbol{\varepsilon}_{xx}$ ($\mathbf{1} + \boldsymbol{\varepsilon}_{yy}$) predstavlja faktor razmere u svim pravcima paralelnim \mathbf{x} , odnosno \mathbf{y} osi. Elementi sa obe strane dijagonale $2\boldsymbol{\varepsilon}_{xy} = 2\boldsymbol{\varepsilon}_{yx}$ su ekvivalentni uglovnoj distorziji pravog ugla koji je prvobitno bio paralelan sa osama koordinatnog sistema. Ovaj slučaj je nazvan **strejn smicanja**.

Homogenost znači da prava linija ostaje prava i paralelna linija ostaje paralelna, primenom deformacionog modela. Strejn tenzor je nezavisan od translacije ali se njegovi elementi odnose na izabrani koordinatni sistem.

Rotacija krutog tela je data sa uglom $\boldsymbol{\omega}_{xy}$ (5.57). Uzevši u obzir da se u disertaciji prvenstveno analiziraju pomeranja u horizontalnoj ravni, sledeća slika upravo pokazuje geometrijsku interpretaciju parametara diferencijalnog homogenog strejna u dvodimenzionalnom koordinatnom sistemu.

$$\delta = \mathbf{R}_\varphi \bar{\Delta} = \mathbf{R}_\varphi \mathbf{E} d\mathbf{x} \quad (5.60)$$

Diferenciranjem izraza $\xi = \mathbf{R}_\varphi \mathbf{x}$ dobijamo $d\xi = \mathbf{R}_\varphi d\mathbf{x}$. S obzirom da je \mathbf{R} ortogonalna, tj. $\mathbf{R}_\varphi^T \mathbf{R}_\varphi = \mathbf{R}_\varphi \mathbf{R}_\varphi^T = \mathbf{I}$, prethodni izraz (5.60) se može napisati u obliku:

$$\delta = \mathbf{R}_\varphi \mathbf{E} \mathbf{R}_\varphi^T d\xi = \mathbf{E}_\varphi d\xi, \text{ sa } \mathbf{E}_\varphi = \mathbf{R}_\varphi \mathbf{E} \mathbf{R}_\varphi^T \quad (5.61)$$

Opšta relacija je stoga uspostavljena, pri čemu je \mathbf{E}_φ **deformacioni tenzor** u novom sistemu nakon rotacije po uglu φ . Za bilo koju simetričnu matricu \mathbf{A} , dekompozicija sopstvenih vrednosti se može napisati u sledećem obliku (Caspary, 2000):

$$\mathbf{A} = \mathbf{S} \mathbf{\Lambda} \mathbf{S}^T, \quad \mathbf{S}^T \mathbf{A} \mathbf{S} = \mathbf{\Lambda} \quad (5.62)$$

sa:

$$\mathbf{\Lambda} = \text{diag} (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \quad (5.63)$$

kao dijagonalnom matricom sopstvenih vrednosti i pridruženom matricom sopstvenih vektora \mathbf{S} (matrica rotacije). Zamenom (5.62) u (5.61) dobija se:

$$\mathbf{E}_\varphi = \mathbf{R}_\varphi \mathbf{S} \mathbf{\Lambda} \mathbf{S}^T \mathbf{R}_\varphi^T \quad (5.64)$$

Ovo pokazuje da vandijagonalni elementi matrice \mathbf{E} nestaju, dok se dijagonalni elementi poklapaju sa sopstvenim vrednostima, ako je korišćena relacija $\mathbf{R}_\varphi = \mathbf{S}^T$, tj. rotacija po uglu Θ , kao što je data dekompozicija sopstvenih vrednosti od \mathbf{E} :

$$\mathbf{E}_\Theta = \mathbf{\Lambda} = \mathbf{R}_\Theta \mathbf{E} \mathbf{R}_\Theta^T \quad (5.65)$$

Ova transformacija od \mathbf{E} u svoje glavne ose određuje poluose i orijentaciju **strejn elipse**, koja se može grafički interpretirati kao elipsa grešaka. Ose su ortogonalne i daju maksimum i minimum ekstenzionog strejna. Strejn elipsa ima orijentaciju, tj. azimut Θ odnoseći se na originalni koordinatni sistem. S obzirom da je strejn smicanja jednak nuli u sistemu rotiranom po Θ , pravi ugao sa stranama paralelnim osama strejn elipse ostaje nedistorziran u ovom modelu.

Linearni deformacioni model (5.53), koji se obično primenjuje za ocenu računanja parametara homogenog strejna, može se primeniti na tački \mathbf{P}_k , nakon odvajanja bloka koji označava kruto telo.

$$\Delta_k - \mathbf{H}_k \mathbf{t} = \bar{\Delta}_k = \begin{pmatrix} \bar{\Delta}_x \\ \bar{\Delta}_y \end{pmatrix}_k = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_1 & \mathbf{a}_2 \\ \mathbf{b}_1 & \mathbf{b}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \end{pmatrix}_k \quad (5.66)$$

Zamenom (5.55) dolazi se do sledećeg izraza:

$$\Delta_k = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \mathbf{x}_k + \varepsilon_{xy} \mathbf{y}_k - \omega \mathbf{y}_k \\ \varepsilon_{xy} \mathbf{x}_k + \varepsilon_{yy} \mathbf{y}_k - \omega \mathbf{x}_k \end{pmatrix} \quad (5.67)$$

Ako se pomeranja krutog tela mogu sračunati simultano sa parametrima strejna, onda se dva elementa rotacije mogu integrisati, tako da izraz (5.67) zahteva proširenje samo sa dva nepoznata parametra translacije \mathbf{t}_x i \mathbf{t}_y . Ovo je opšti pristup modeliranja deformacija u uslovima homogenog strejna, gde se određuje šest parametara ($\epsilon_{xx}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yy}, \omega, \mathbf{t}_x, \mathbf{t}_y$) pri čemu je potrebno imati minimum tri tačke.

Zavisno od prirode područja (objekta) koje se ispituje i strukture polja deformacija, podesno je sračunati ili jedan set parametara za čitavu mrežu, jedan set za svaki blok ili jedan set za svaki trougaoni konačni element. Obično, rezultat je transformisan u sistem glavnih osa na osnovu izraza (5.65), i strejn elipse ili njihove ose se kartiraju na planu mreže. Ako se računa više od jednog seta parametara, važno je napomenuti da su setovi parametara korelisani u tačkama na granicama između blokova ili između elemenata u području dva ili više računanja. Prilikom primene statističkih testiranja, ova se činjenica mora uzeti u obzir.

5.1.5. Polinomski deformacioni modeli

Uopštavanjem modela krutog tela i strejn modela, može se doći do polinomskog pristupa u deformacionoj analizi. Polinomski model za određenu tačku \mathbf{P}_k ima sledeći oblik:

$$\Delta_k = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}_k = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 x_k + \mathbf{a}_2 y_k + \mathbf{a}_3 x_k^2 + \mathbf{a}_4 x_k y_k + \mathbf{a}_5 y_k^2 + \dots \\ \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 x_k + \mathbf{b}_2 y_k + \mathbf{b}_3 x_k^2 + \mathbf{b}_4 x_k y_k + \mathbf{b}_5 y_k^2 + \dots \end{pmatrix} \quad (5.68)$$

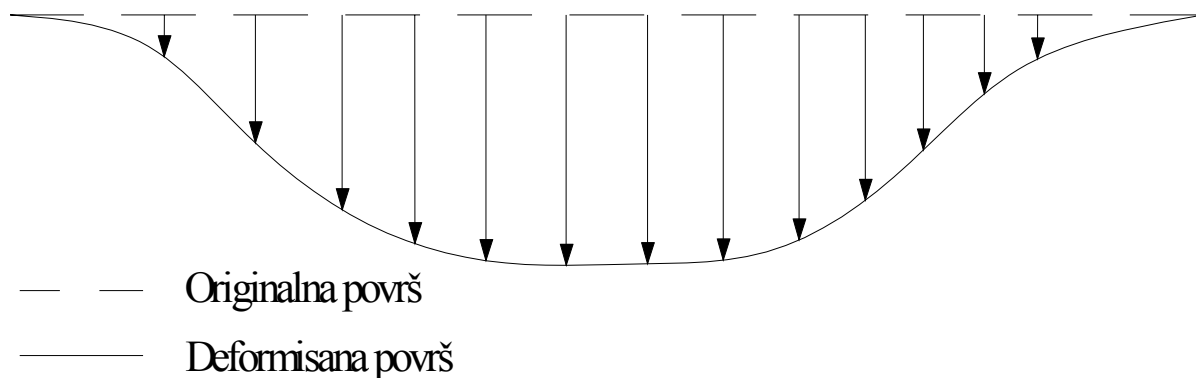
Za $\mathbf{a}_0 = \mathbf{t}_x, \mathbf{b}_0 = \mathbf{t}_y, \mathbf{a}_1 = \mathbf{b}_2 = \mathbf{s}, \mathbf{b}_1 = -\mathbf{a}_2 = \mathbf{r}_z, \mathbf{a}_i = \mathbf{b}_i = \mathbf{0}$ za svako $i > 2$, ovaj model odgovara **modelu krutog tela** definisanog izrazom (5.33). Ako se parametri izaberu na sledeći način: $\mathbf{a}_0 = \mathbf{t}_x, \mathbf{b}_0 = \mathbf{t}_y, \mathbf{a}_1 = \mathbf{e}_{xx}, \mathbf{b}_1 = \mathbf{e}_{yx}, \mathbf{a}_2 = \mathbf{e}_{xy}, \mathbf{b}_2 = \mathbf{e}_{yy}, \mathbf{a}_i = \mathbf{b}_i = \mathbf{0}$ za svako $i > 2$, onda se dobija **strejn model**.

Za ocenu parametara u polinomskom modelu (5.68) obično se primenjuje **metod najmanjih kvadrata**. Po pravilu, primena polinomskih modela drugog i viših redova jeste pod znakom pitanja, jer parametri nemaju jasno fizičko značenje. Ovo može dovesti do toga da interpretacija dobijenih rezultata ne odgovara stvarnom stanju i da bude nerazumljiva za opisivanje ponašanja predmeta koji se istražuje. Primena ovakvih modela je u kontradikciji osnovnom pravilu u deformacionoj analizi da se uvek identifikuje i primeni najjednostavniji mogući model. Osim toga, u prilog ovoj tvrdnji ide i činjenica da su polinomi viših redova karakteristični po određenim nedostacima kao što su numerička nestabilnost i neželjene oscilacije između podataka.

Uprkos navedenim nedostacima, primena polinomskih modela u različitim aplikacijama može biti veoma korisna (Caspary, 2000; Bulatović et al., 2012). Kada se sve uzme u obzir, ovi modeli, koji se uspešno primenjuju, čak su i u većini. Treba imati u vidu da se deformaciona analiza obično bavi posebnim slučajevima uprkos opštem pristupu. Model koji se koristi u deformacionoj analizi mora da bude prilagođen konkretnom problemu.

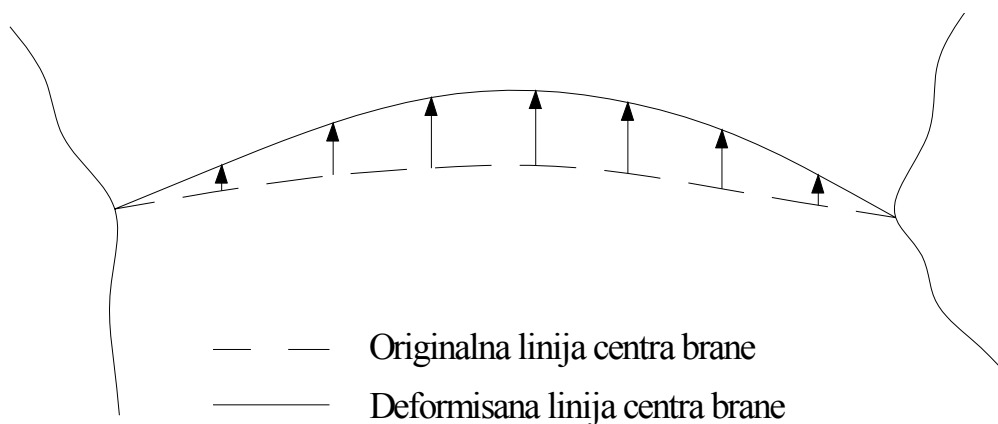
Tendencija kretanja tla u područjima u kojima dominira rudarska industrija i površinska eksploatacija, gde se eksploatišu nafta, gas, voda itd., pokazuje veoma slične karakteristike.

Poprečni presek kroz takva područja ima oblik korita (Slika 5.5). Linije jednakih deformacija su sličnog oblika i podsećaju na izohipse. Promene u visini su obično veće u odnosu na horizontalni položaj. U ovom slučaju polinom drugog ili čak višeg reda u odgovarajuće izabranom koordinatnom sistemu može predstavljati najadekvatnije rešenje.



Slika 5.5. Poprečni presek terena sa tendencijom sleganja

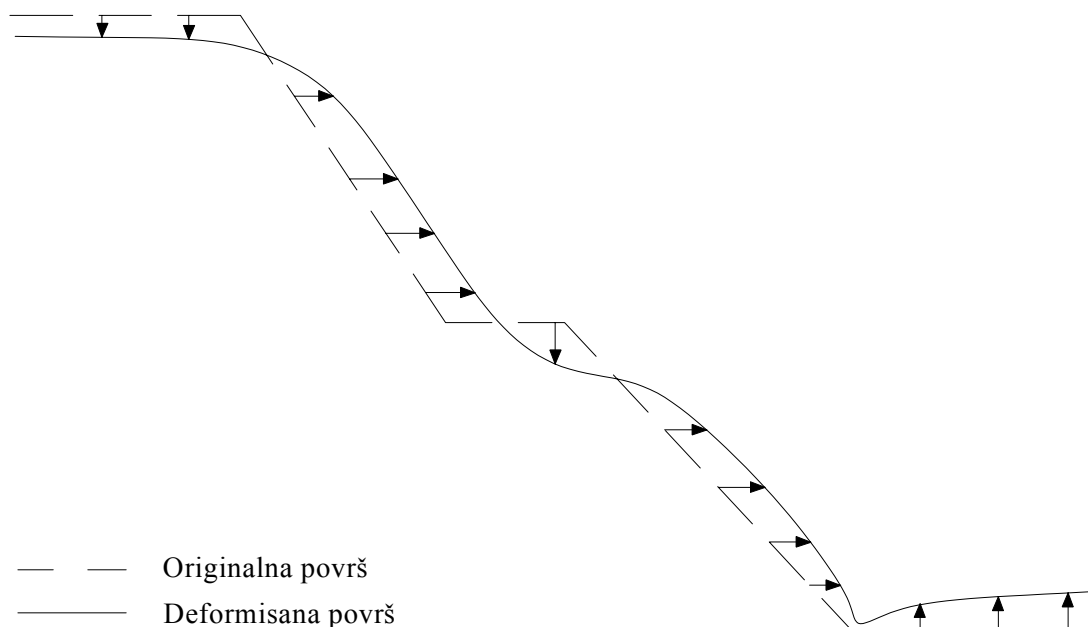
Primer primene ovih vrsta modela odnosi se na velike betonske brane lučnog oblika sa temeljima na oba kraja. Promene u nivou vode kao i temperaturne promene, uzrok su regularnih deformacija koje se mogu aproksimirati parabolom. Izabrani deformacioni model mora ovo uzeti u obzir. Od interesa su samo deformacije koje odstupaju od prediktovanih vrednosti. Kritični uslovi se mogu pojaviti samo u slučaju velikih odstupanja.



Slika 5.6. Skica betonske brane sa regularnim deformacijama

Sve veštačke strukture na nagibima, brane, rezervoari za vodu, velike rudarske jame, planinski putevi, često su izloženi prirodnim opasnostima, klizištima, itd., tako da zahtevaju permanentni monitoring. Deformacije koje su očekivane, tj. prate poznate obrasce ponašanja, nisu kritične. Opšti obrazac očekivanih sleganja kao što je prikazano na slici 5.7 sličan je obrascu sleganja prikazanom na slici 5.5. Horizontalne deformacije odgovaraju slučaju koji je prikazan na slici 5.6.

Kao što se vidi iz prethodno navedenih primera, polinomski deformacioni modeli mogu biti pogodni za opisivanje modela ponašanja karakterističnih objekata.



Slika 5.7. Grafička interpretacija očekivanih deformacija za objekat „Otvoreni kop rudnika mrkog uglja” (Caspary, 2000)

5.2. KINEMATIČKI MODELI

Sa razvojem automatizacije mernih tehnologija za prikupljanje podataka, vremenski tok procesa deformacije se sve više smatra bitnim faktorom u modelima procene. Ako su ovi modeli ograničeni na istraživanje opisa pomeranja i distorzija objekata u vremenu i prostoru, radi se o kinematičkim modelima koji dopunjuju strogo geometrijske analize deformacija, koje su odlika modela kongruencije. Dakle, kao što je već pomenuto, osnovni cilj kinematičkih modela je identifikacija opisa pomeranja tačke u funkciji vremena bez razmatranja uticaja uzročnih sila.

Odnos prostorno-vremenske koordinate \mathbf{x}_1 sa vremenskom epohom \mathbf{t}_1 i koordinate \mathbf{x}_2 sa korespondentnom vremenskom epohom \mathbf{t}_2 , može se opisati sledećom vremenski zavisnom relacijom:

$$\mathbf{x}_2 = \mathbf{x}_1 + \frac{d\mathbf{x}}{dt}(\mathbf{t}_2 - \mathbf{t}_1) + \frac{1}{2} \frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2}(\mathbf{t}_2 - \mathbf{t}_1)^2 + \dots = \mathbf{x}_1 + \dot{\mathbf{x}}\Delta\mathbf{t} + \frac{1}{2}\ddot{\mathbf{x}}\Delta\mathbf{t}^2 + \dots \quad (5.69)$$

gde su $\dot{\mathbf{x}}$ i $\ddot{\mathbf{x}}$ srednja brzina i ubrzanje tačaka u vremenskom intervalu $\Delta\mathbf{t}$. Brzina i ubrzanje predstavljaju nepoznate parametre koji se moraju oceniti. Ovi parametri su relevantni za procenu procesa. Korespondentna linearizovana jednačina opažanja glasi:

$$\mathbf{I} + \mathbf{V} = \begin{vmatrix} \mathbf{a}^T & \mathbf{a}^T\Delta\mathbf{t} & \frac{1}{2}\mathbf{a}^T\Delta\mathbf{t}^2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{x}} \\ \ddot{\mathbf{x}} \end{vmatrix} \quad (5.70)$$

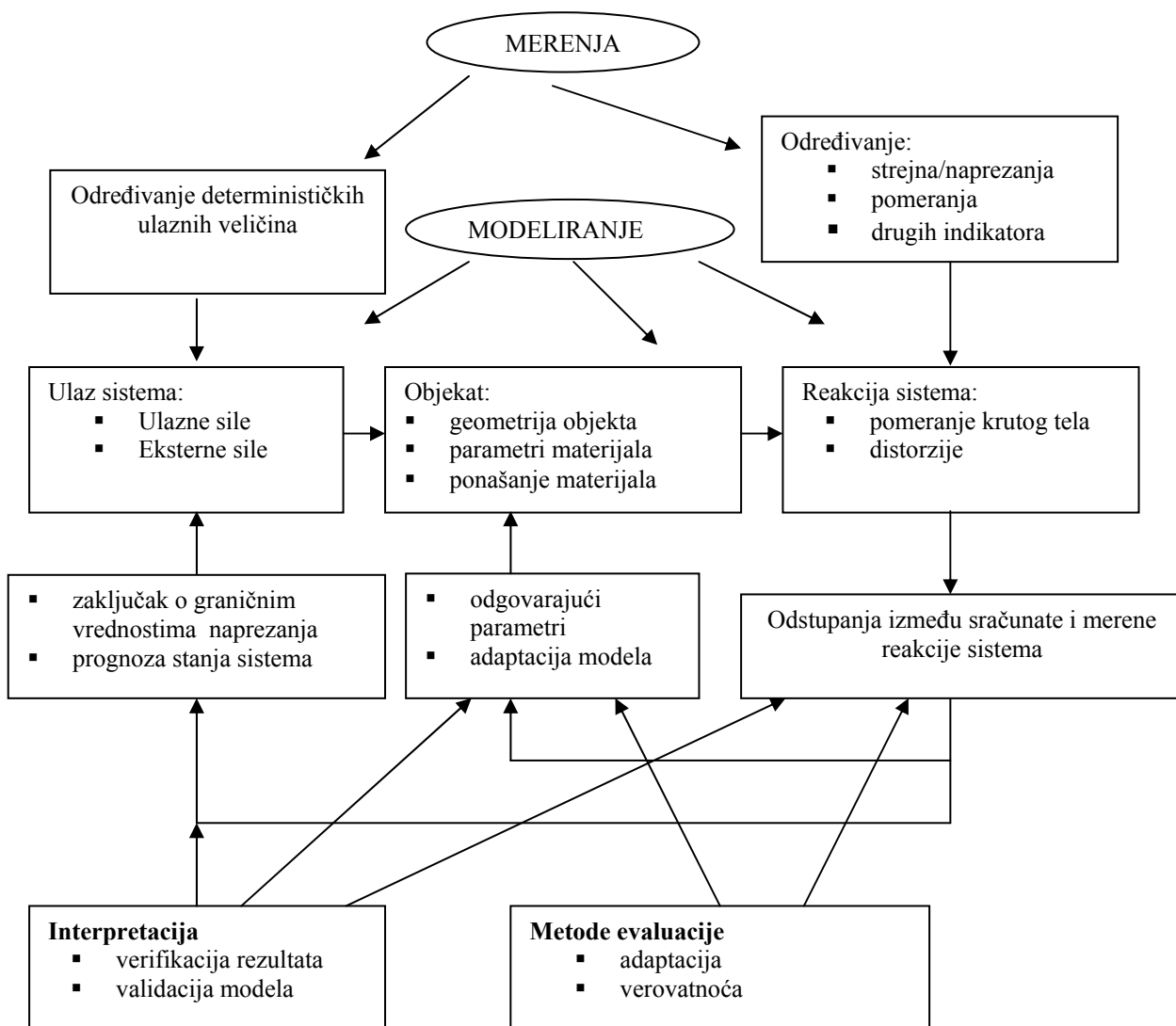
Dakle, kinematički modeli se baziraju na metodama regresione analize. U proširenju osnove regresione analize, sledeći podesni algoritmi, kao važan matematički alat, odnose se na

tehniku Kalmanovog filtriranja, čija je funkcija da na osnovu uzastopnih opažanja ažuriraju i prediktuju stanje procesa koji se posmatra.

5.3. DINAMIČKI MODELI

Dinamički modeli, kao napredni modeli za ocenu analize deformacija, ne razmatraju samo promenu geometrije objekta u prostoru i vremenu, već posvećuju pažnju i uzročnim faktorima (sile koje deluju na objekat, unutrašnja i spoljašnja opterećenja) koji dovode do pojave deformacije. Takođe, uzimaju se u obzir i fizičke osobine objekta (parametri materijala), koji su u određenoj meri odgovorni za reakciju objekta na delujuće sile.

Tri ključna elementa, delujuće sile kao ulazni signal, transmisija kroz objekat kao transfer procesa i reakcija objekta kao izlazni signal, formiraju uzročni lanac ili, u skladu sa terminologijom teorije sistema, **dinamički proces** ili **dinamički sistem** (Slika 5.8).



Slika 5.8. Dinamičko modeliranje konstrukcije

Sistem konstrukcije objekta je podložan delujućim silama, raznim vrstama opterećenja (uticaj saobraćaja, udar vetra, pritisak, temperatura, itd). Svi ovi takozvani ulazni signali moraju se odrediti merenjima. Reakcija sistema predstavlja deformaciju (kruto telo, strejn). Model (računanje, predikcija) podrazumeva da reakcija sistema, kao i transmisija kroz objekat (transfer funkcija) moraju biti modelirani na odgovarajući način. Takođe, parametri koje treba uzeti u obzir odnose se na geometriju objekta, parametre materijala i procenu o ponašanju materijala. Ako su dva elementa, ulazni signal i transfer funkcija poznati, dinamički proces može da se modelira i reakcija sistema može da se kvantitativno prediktuje (pri tom se kao matematički alat može koristiti **metoda konačnih elemenata**). Ove vrste dinamičkog modela se mogu smatrati kao deterministički (Chrzanowski et al., 1990), mehanički ili računski model. Shodno tome, prenos grešaka se mora uzeti u obzir (Kuang, 1993). Ako je, pored navedenog, reakcija sistema određena na osnovu geodetskih opažanja, očigledan je pun potencijal dinamičkog modela (integrisani model).

Poređenje prediktovanih sa deformacijama dobijenim iz opažanja, može da ukaže na određene devijacije, koje su nazvane „inovacije” (Welsch & Heunecke, 2001). Inovacija predstavlja osnovni element tehnike Kalmanovog filtriranja. Na slici 5.8 su naglašene komponente istraživanja i procene procesa: modeliranje procesa (teorija), realizacija merenja ulaznih i izlaznih veličina, ocena funkcionalnih i stohastičkih relacija i na kraju, procena rezultata verifikacijom i validacijom. Na ovaj način se može izvršiti kalibracija modela i identifikacija dinamičkog procesa.

Primena geodetskog inženjerstva u mnogim aplikacijama doprinosi određivanju, ne samo vremenskog i prostornog domena deformacija, već čitavog lanca dinamičkog procesa, odnosno određivanja uzročnih sila koje deluju na objekat i fizičke i geometrijske osobine samog objekta. Današnja tehnologija inicira mogućnost merenja i evidentiranja ulaznih i izlaznih signala dinamičkog procesa, sa računarskim performansama koje su dovoljne da obezbede potrebna algoritamska izračunavanja.

Dinamički modeli su u poređenju sa ostalim navedenim deformacionim modelima sveobuhvatniji, jer imaju za cilj da se u potpunosti opiše realnost dinamičkih sistema. Pokreti i distorzije objekata se posmatraju u funkciji i opterećenja i vremena. To podrazumeva različit spektar opterećenja i različite vremenske reakcije. Za razliku od statičkog modela, objekat je konstantno u pokretu. Praćenje takve situacije zahteva primenu permanentnih i automatskih procedura opažanja.

Kategorizacija dinamičkih modela je izvršena na **parametarske** i **neparametarske** modele. Kada su u pitanju neparametarski modeli, radi se o statističkim, eksperimentalnim ili empirijskim modelima. Vrednovanje primene neparametarskih modela se može nazvati operativni pristup. Kada su u pitanju geodetske analize dinamičkih procesa, ne postoje parametarski dinamički modeli (ili se oni veoma retko koriste), barem ne u slučajevima kada imamo situacije raznorodnih ulazno-izlaznih signala. Skoro svi dinamički modeli koji se primenjuju u geodetskoj deformacionoj analizi su neparametarski.

5.3.1. Opis dinamičkog deformacionog procesa

Modeliranje deformacionih procesa zahteva razmatranje ne samo geometrijskih promena objekta koji se prati, već i fizičkih osobina objekta kao i različitih spoljnih uticaja na objekat. Pri

tome, mora se imati u vidu da objekat koji se prati, ima memoriju. Stoga je deformacioni proces **dinamičan**. To znači da promene ulaznih veličina utiču na vremenski zavisani proces adaptacije sistema, a time i vremenskog kašnjenja deformacije signala.

U opštem slučaju, dinamički deformacioni proces može se predstaviti na sledeći način:

$$y(k\Delta t) = f(x(k\Delta t), x([k-1]\Delta t), \dots, x([k-m]\Delta t), z(k\Delta t)) \quad (5.71)$$

gde je:

$z(k\Delta t)$ - vrednost količine deformacije u trenutku vremena $k\Delta t$

$x(k\Delta t), x([k-1]\Delta t), \dots, x([k-m]\Delta t)$ - vrednost uticaja deformacije u trenutku vremena $k\Delta t$ i prethodnim vremenskim periodima $x([k-l]\Delta t)$, gde je $l = 1 \dots m$.

$z(k\Delta t)$ - količina poremećaja

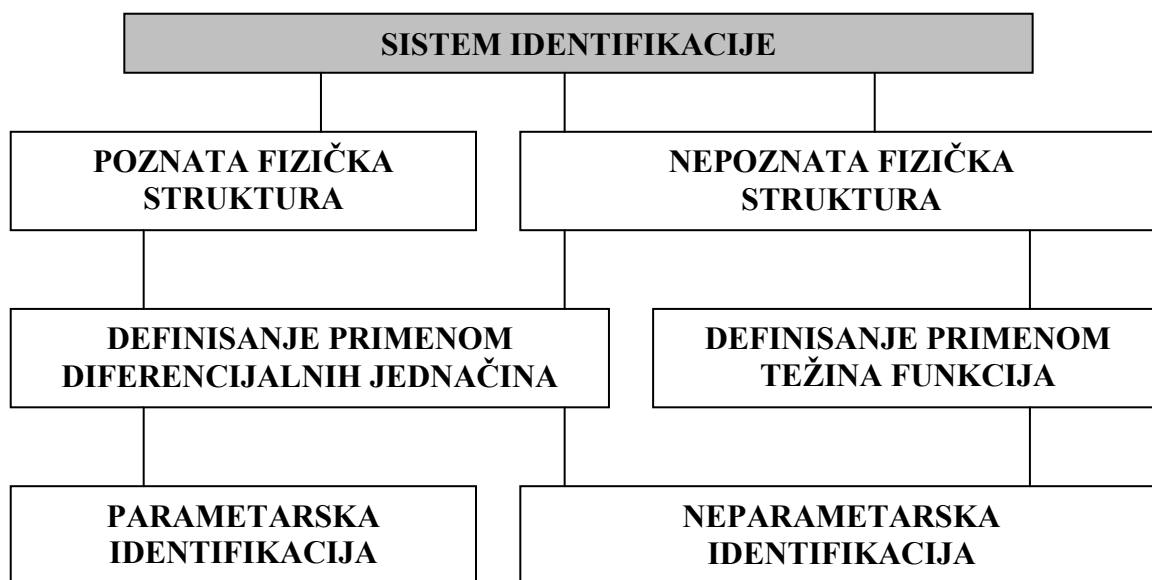
Relacija (5.71) se može opisati na nekoliko načina, primenom parametarskih ili neparametarskih modela. Parametarski modeli mogu biti opisani primenom sistema diferencijalnih jednačina, dok se neparametarski modeli rešavaju primenom višestruke regresione analize (Heunecke et al., 1998; Reitere & Egly, 2008).

Opis deformacionih procesa primenom parametarskih modela predstavlja najobimniji i veoma precizan postupak. Međutim, pretpostavlja se da su prirodni zakoni i pravila koja određuju proces i fizičku strukturu sistema, poznati. U praksi, ovo stanje često nije realizovano ili je realizovano samo delimično, tako da se modelovanje procesa može izvršiti primenom tzv. metoda eksperimentalne analize. Ovaj metod omogućava opis procesnih relacija merenjem vremenskih serija ulaznih i izlaznih podataka i izravnanjem koeficijenata posebnih jednačina modelovanja, npr. regresione funkcije ili funkcije težina. Za potrebe opisa relacija ulazno-izlaznih modela, neophodno je uvesti normalne pretpostavke o opštem karakteru, posebno o stepenu funkcionalne veze. Traganje za pogodnom formulacijom modela može biti veoma teško, posebno u slučajevima nelinearnosti višeg stepena i složenim procesima. Veštačke neuronske mreže, koje će biti predstavljene u sledećem poglavlju, mogu predstavljati alternativu klasičnim „ulaz-izlaz” modelima. Između parametarskih i neparametarskih procesa identifikacije, uzročno-posledična veza u deformacionim procesima može se modelovati primenom *fuzzy* pristupa, što je takođe predmet narednog poglavlja.

6. MODELI U NAPREDNOJ DEFORMACIONOJ ANALIZI

6.1. SISTEMI IDENTIFIKACIJE PRIMENOM PARAMETARSKIH I NEPARAMETARSKIH MODELA

Sistem identifikacije u teoriji sistema označava definisanje odgovarajuće matematičko-fizičke prezentacije transfer funkcije dinamičkog sistema. Sistem identifikacije može biti postignut ako su kao merene veličine dostupni ulazni i izlazni signali. U zavisnosti od toga na koji način će model za transfer funkciju biti definisan, razlikujemo **parametarske** i **neparametarske** sisteme identifikacije.



Slika 6.1. Metode sistema identifikacije (Heunecke, 1995; Welsch 1996)

6.1.1. Parametarski modeli

Ako se pretpostavi da je fizički odnos poznat između ulaznih i izlaznih signala, odnosno transmisija ili transfer procesa signala kroz objekat, tj. transformacija ulaznih u izlazne signale, onda se proces može opisati diferencijalnim jednačinama i ti modeli se nazivaju **parametarskim** modelima (ili strukturnim modelima). Identifikacija sistema se sprovodi u tzv. *white-box* modelima. Naravno, *white-box* modeli su idealizacija realnog stanja stvari.

Fundamentalna jednačina svakog dinamičkog modela sistema (Welsch & Heunecke, 2001) je diferencijalna jednačina linearne dinamičke elastičnosti:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{D} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \ddot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{y}(t) \quad (6.1)$$

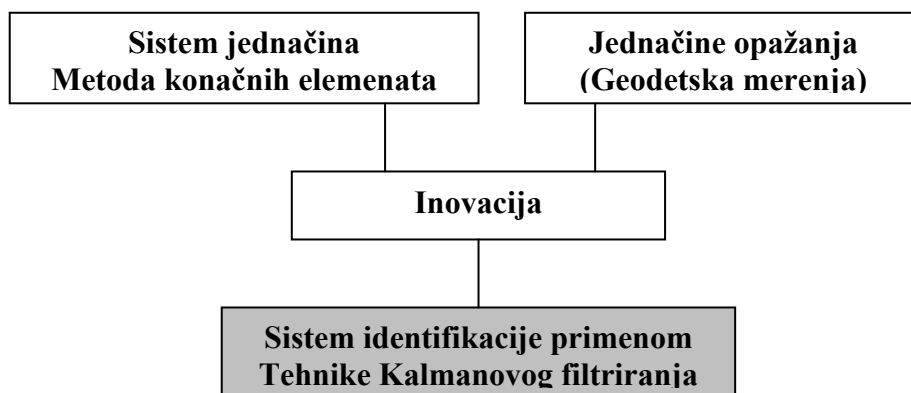
gde $\mathbf{y}(t)$ predstavlja uzročne sile koje predstavljaju ulazne signale, $\mathbf{x}(t)$ su izlazni signali (mogu biti određeni na osnovu geodetskih opažanja), matrice \mathbf{K} , \mathbf{D} i \mathbf{M} sadrže parametre materijala koji se odnose na krutost, prigušenje i masu konstrukcije objekta. Zavisno od konkretnog slučaja, nabrojani pojedinačni parametri mogu biti izostavljeni, recimo, kod ispitivanja oscilacija, matrica prigušenja se može zanemariti ili masa, kada su u pitanju spori pokreti (Heunecke, 1995, Jäger et al., 1997). Statički modeli (Welsch & Heunecke, 2001) mogu se posmatrati u kontekstu primene specijalnog slučaja dinamičkih modela:

$$\mathbf{K} \mathbf{x}(t) = \mathbf{y}(t) \quad (6.2)$$

Statički sistemi su karakteristični po tome što su nakon delovanja opterećenja u novom stanju ravnoteže: $\mathbf{y}(t) = \mathbf{const}$. Uobičajen izraz $\mathbf{x}(t) = \mathbf{const}$ je od posebnog značaja, jer obuhvata modele kongruencije, odnosno najčešću metodu monitoringa deformacija primenom geodetskih mreža.

Kada su u pitanju parametarski ili strukturni modeli, od posebnog značaja je koordinatni ili referentni sistem objekta. Osim koordinata koje predstavljaju posredne parametre za procenu i opis stanja sistema, mogu se koristiti i drugi fizički parametri, koji formiraju stanje prostora. Istraživanje dinamičkog procesa uz pomoć parametarskih modela, zasnovano je upravo na analizi stanja prostora. Ako parametarski sistem identifikacije podrazumeva samo vremensku zavisnost, ne i lokalne varijacije procesa, sistem se može definisati „spojenim parametrima”, i u tom slučaju su dovoljne za opis obične diferencijalne jednačine. Ako parametarski sistem identifikacije osim vremenske zavisnosti podrazumeva i lokalne varijacije parametara, onda sistem mora biti definisan „distribuiranim parametrima”, što dovodi do primene parcijalnih diferencijalnih jednačina. Ako su diferencijalne jednačine postavljene samo za ograničene oblasti, parcijalne diferencijalne jednačine mogu biti zamenjene običnim diferencijalnim jednačinama koje su primenjive samo u okviru tih ograničenih oblasti (lokalna diskretizacija). Rešenje se nalazi u pridruživanju nezavisnih pojedinačnih oblasti, vodeći računa da se na graničnim delovima ostvari „glatka veza” između oblasti. Rezultat se odnosi na aproksimativno rešenje originalnih diferencijalnih jednačina. Numerička procedura je data u vidu **metode konačnih elemenata**, koja danas predstavlja standardni matematički alat za sve vrste strukturnih problema u građevinarstvu i drugim inženjerskim naukama.

Kalmanovo filtriranje je jedan od najpopularnijih univerzalnih alata za sisteme identifikacije i može biti primenjen na sve vrste modela (Tabela 5.2, Slika 5.3). Suštinski se može dati objašnjenje na sledeći način. Sa jedne strane postoji teorija modelovanja objekta primenom diferencijalnih jednačina, pri čemu one formiraju tzv. sistem jednačina. Sa druge strane postoje merenja zasnovana na monitoringu realnog stanja objekta, formulisana kao tzv. jednačine opažanja. Tehnika Kalmanovog filtriranja kombinuje obe vrste jednačina primenom izravnjanja metodom najmanjih kvadrata u cilju postepenog poboljšanja identifikacije sistema. Od suštinskog značaja je „inovacija”, tj. razlika između prediktovane i merene reakcije objekta.



Slika 6.2. Pregled tehnike Kalmanovog filtriranja (Heunecke, 1995)

Ulazna veličina \mathbf{Y} u procesu Kalmanovog filtriranja odnosi se na prethodni vektor stanja \mathbf{x}_k u trenutku \mathbf{t}_k , determinističke ulazne veličine \mathbf{u}_k (delujuće sile), faktor poremećaja \mathbf{w}_k i opažanja iz procesa monitoringa \mathbf{l}_{k+1} uključujući odgovarajuću kovarijacionu matricu:

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_k \\ \mathbf{u}_k \\ \mathbf{w}_k \\ \mathbf{l}_{k+1} \end{pmatrix}; \quad \Sigma_{YY} = \begin{pmatrix} \Sigma_{xx,k} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_{uu,k} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Sigma_{ww,k} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Sigma_{ll,k+1} \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

Veličina \mathbf{X} odnosi se na već spomenutu „inovaciju” \mathbf{d}_{k+1} , dok $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}$ predstavlja ocenu vektora stanja sa rezidualima $\mathbf{V}_{\bar{x},k+1}$ i $\mathbf{V}_{l,k+1}$. Ove veličine mogu se odrediti na osnovu izraza (6.4) u odnosu na prediktovani vektor stanja $\bar{\mathbf{x}}_{k+1}$ i opažanja \mathbf{l}_{k+1} ; \mathbf{K}_{k+1} , pri čemu je \mathbf{D}_{k+1} kovarijaciona matrica inovacije:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{d}_{k+1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k+1} \\ \mathbf{v}_{\bar{x},k+1} \\ \mathbf{v}_{l,k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mathbf{A}_{k+1} & \mathbf{I} \\ \mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{A}_{k+1} & \mathbf{K}_{k+1} \\ -\mathbf{K}_{k+1} \mathbf{A}_{k+1} & \mathbf{K}_{k+1} \\ \sum_{ll,k+1} \mathbf{D}_{k+1}^{-1} \mathbf{A}_{k+1} & -\sum_{ll,k+1} \mathbf{D}_{k+1}^{-1} \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

Algoritam se može primeniti uvek kada je moguće uspostaviti sistem jednačina. Kod modela kongruencije, sistem jednačina se ne generiše kod testiranja podudarnih koordinata, determinističke ulazne veličine \mathbf{u}_k se ne modeluju. Kod kinematičkih modela, vektor stanja sadrži koordinate, brzine i ubrzanja. Kalmanovo filtriranje u deformacionoj analizi se uglavnom primenjuje kod statičkih i dinamičkih modela sa sistemom jednačina koje se postavljaju metodom konačnih elemenata.

6.1.2. Neparametarski modeli

U slučaju kada ne postoji način da se modeliraju geometrijske i fizičke strukture sistema, odnos između ulaznih i izlaznih signala se može formulirati samo u vidu regresije odnosno korelacione analize (model ponašanja), tako da je u ovom slučaju analiza vremenskih serija primenjiva. Sistem identifikacije podrazumeva određivanje (ocenu) koeficijenata regresije/korelacije. Ovi koeficijenti nisu fizički parametri već samo uspostavljaju odnos između ulaznih i izlaznih signala bez nekog fizičkog značaja. Zbog toga se ovi neparametarski modeli nazivaju *black-box* modelima koji su zasnovani na merenjima.

Opšti opis neparametarskih modela je predstavljen nizom parcijalnih diferencijalnih jednačina.

Kada imamo model koji se sastoji od jednog ulaza i jednog izlaza, to se može predstaviti sa običnom diferencijalnom jednačinom (Ellmer, 1987; Welsch, 1996):

$$a_q \frac{d^q x}{dt^q} + a_{q-1} \frac{d^{q-1} x}{dt^{q-1}} + \dots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = b_p \frac{d^p y}{dt^p} + a_{p-1} \frac{d^{p-1} y}{dt^{p-1}} + \dots + b_1 \frac{dy}{dt} + b_0 y \quad (6.5)$$

Ako se polazi od diferenciranja diferencijalnih jednačina, model je takođe poznat kao *ARMA* model (autoregresivni pokretni prosek):

$$x_k = a_1 x_{k-1} + a_2 x_{k-2} + \dots + a_q x_{k-q} + b_0 y_k + b_1 y_{k-1} + \dots + b_p y_{k-p} \quad (6.6)$$

Nepoznati koeficijenti a_k i b_k su parametri koji se ocenjuju u proceduri identifikacije. Granične vrednosti q i p predstavljaju nastavak memorije, u vremenskom trenutku t_k model ponovo prikuplja sve ulazne i izlazne signale unutar definisanih granica. Karakteristika za sve elementarne neparametarske modele je činjenica da za $q > 3$ i $p > 0$ fizička struktura modela nestaje, mada se koeficijenti moraju smatrati kao funkcije materijala i dizajna parametara sistema. Za $q \leq 3$ i $p = 0$, međutim, parametri mogu fizički da se interpretiraju. U drugom slučaju, modeli su nazvani *gray-box*. Razlika između različitih vrsta modela odnosi se na različitu procenu termina kao što su „parametar” i „fizička struktura”.

ARMA model se sastoji od rekurzivnog i nerekurzivnog dela:

$$x_k = \sum_{i=1}^q a_i x_{k-i} + \sum_{j=0}^p b_j x_{k-j} = R_k(x) + N_k(y) \quad (6.7)$$

Za $p = 0$ model je autoregresivni, aktuelno opažanje x_k smatra se linearnom kombinacijom prethodnih opažanja i ulazne veličine postojećeg sistema y_k . Za $q = 0$ model postaje nerekurzivni, aktuelni izlaz sistema predstavlja linearnu kombinaciju sadašnjeg i prošlog sistemskog ulaza. Koeficijenti b_j se mogu smatrati faktorima regresione analize.

U slučaju kontinuiranih opažanja, nerekurzivni (linearni) model može se predstaviti sledećim integralom:

$$\mathbf{x}(t) = \int_0^{\infty} \mathbf{g}(\tau) \mathbf{y}(t-\tau) d\tau \quad (6.8)$$

gde je $\mathbf{g}(\tau)$ funkcija težina koja igra ulogu parametara regresione analize.

Za rešavanje nelinearnih nestrukturnih problema, primenjuje se tzv. *Volterra* model (Wernstedt, 1989):

$$\mathbf{x}(t) = \int_0^{\infty} \mathbf{g}_1(\tau_1) \mathbf{y}(t-\tau_1) d\tau_1 + \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \mathbf{g}_2(\tau_1, \tau_2) \mathbf{y}(t-\tau_1) \mathbf{y}(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \text{uslovi višeg reda} \quad (6.9)$$

U pojedinim slučajevima ovi modeli mogu se predstaviti u obliku sumiranja ili višestrukih sumiranja jednačina (Pfeuffer, 1993; Welsch & Heunecke, 2001). Neparametarski modeli mogu se primeniti za potrebe širokog raspona sistema i procedura. Analiza vremenskih serija, kao još jedan metod identifikacije, često se primenjuje u okviru neparametarskih modela. Upoređenjem ulazne i izlazne vremenske serije sa sračunatom kros-kovarijacionom funkcijom, dobijaju se informacije o korelaciji dve vremenske serije kao i informacije o tome da li reakcija sistema kasni u odnosu na ulazni signal. Furijeove transformacije mogu se primeniti u cilju transfera iz vremenskog u frekvencijski domen tako da se karakteristične frekvencije procesa mogu detektovati. Izlazni signal se sastoji od frekvencija koje su takođe prisutne i u ulaznom signalu. Ako se desi da u izlaznom signalu postoje frekvencije kojih nema u ulaznom signalu, to može ukazati na činjenicu da postoji više faktora koji utiču na sistem. Analiza vremenskih serija ima širok spektar primene u geodetskoj deformacionoj analizi (Kuhlmann, 1996). Takođe, veliku primenu u procesu postavljanja modela za identifikaciju ulazno-izlaznih sistema imaju novije tehnike analize kao što su neuronske mreže i *fuzzy* logika (Heine, 1999).

6.2. FUZZY TEHNOLOGIJA I VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE U DEFORMACIONOJ ANALIZI

Monitoring i analiza kratkoperiodičnih i dugoperiodičnih deformacionih signala omotača Zemljine kore (lokalni i regionalni geodinamički procesi) i velikih veštačkih formi (brane, mostovi, tuneli, itd.) predstavlja centralni zadatak geodetskih primena u praćenju i očuvanju životne sredine. To jeste bitan preduslov za razvoj pouzdanih sistema monitoringa, kao što su alarmni sistemi u cilju prevencije ljudske i materijalne štete.

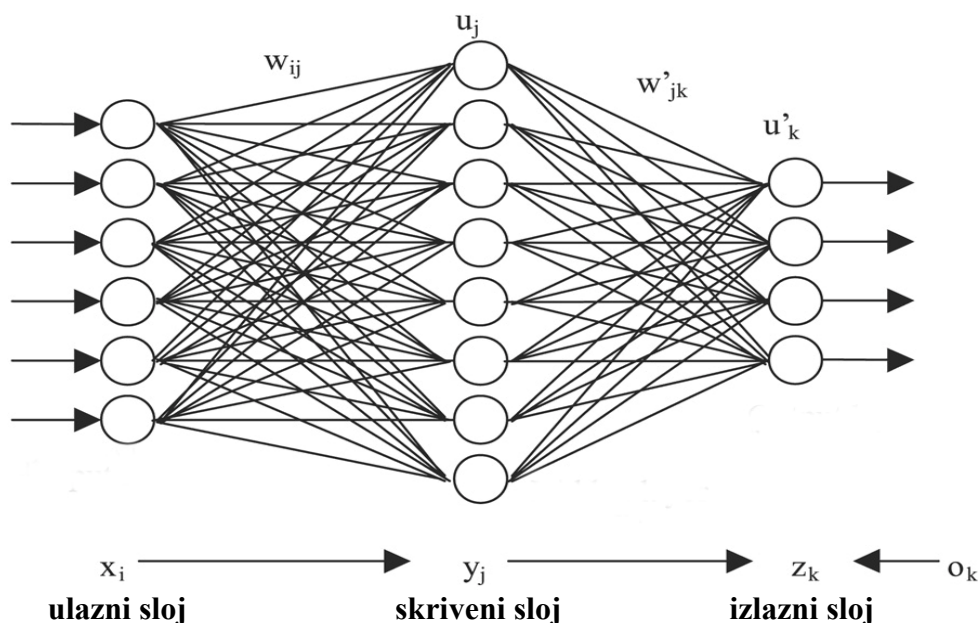
U toku poslednjih godina, došlo je do fundamentalnih promena u pristupu procesima geodetske deformacione analize i korišćenih metodologija:

- **Senzorske mreže** visoke osetljivosti koje omogućavaju široko pokrivenu instalaciju mreža za monitoring. Podaci se koriste kao input za *real-time* operativni alarmni sistem (npr. u tunelima).

- Razvijanje **novih metoda** za modelovanje grešaka merenja. Klasični stohastički pristup je dopunjen **fuzzy** pristupima koji kvantifikuju preostalu nesigurnost u intervalu poverenja greške (npr. opažanje nepreciznosti). *Fuzzy* pristup omogućava nove koncepte u zakonu prenosa grešaka i primeni statističkih testova.
- Postepeni prelaz strogo geometrijske analize i kinematike polja pomeranja sa **uzročno-posledičnim** pristupom, koji razmatra dodatne signale, kao što su: saobraćajna opterećenja, temperatura, vetar, itd. Glavni izazov predstavlja izbor parametarskih ili neparametarskih deformacionih transfer funkcija koje kombinuju različite količine uticaja sa deformacionim signalima, pri čemu se lokalizuje deformacija. U tom smislu, primenjuju se metode veštačke inteligencije, kao što su **neuronske mreže**. Zadatak neuronskih mreža jeste da opišu proces konekcije signala bez pretpostavke o vrsti konekcije. Ostale aplikacije se baziraju na već spomenutoj tehnici **Kalmanovog filtriranja**.

6.2.1. Modeliranje deformacionih procesa primenom veštačkih neuronskih mreža

Primena veštačkih neuronskim mreža u geodetskom deformacionom modelovanju, odnosi se na obezbeđenje efikasnih alata za kreiranje neparametarskih modela. Oni se koriste za kreiranje *višestruki ulaz/ višestruki izlaz* sistema. Tipični ulazni podaci su: temperatura, pritisak, varijacija nivoa vode, obim saobraćaja, itd. Izlazni podaci se odnose na kvantifikaciju pomeranja materijalizovanih tačaka.



Slika 6.3. Višeslojna neuronska mreža

Za potrebe modelovanja procesa relacije date u izrazu (5.71) primenom klasične regresione funkcije, uvode se pretpostavke o stepenu nelinearnosti i uslovima memorije sistema. Veštačke neuronske mreže su u stanju da nauče ovu vrstu procesa relacije iz primera datih (ulaznih) i izlaznih podataka. Neuronske mreže se sastoje od nezavisnih procesorskih jedinica

(neurona) na osnovu kojih se simulira obrada principa bioloških mreža, kao što je ljudski mozak. One se karakterišu visokim stepenom računanja i u isto vreme visokim stepenom robusnosti i tolerancije neuspeha. Neuroni su raspoređeni u slojevima (lejerima) pri čemu su neuroni jednog sloja povezani sa neuronima u narednom sloju putem tzv. ponderisanih veza. Postoji nekoliko vrsta topologije neuronskih mreža. Najpoznatije i najčešće korišćene su višeslojne neuronske mreže (Slika 6.3). Višeslojna neuronska mreža se sastoji od ulaznog sloja, jednog ili više skrivenih slojeva i izlaznog sloja. Dakle, neuronska mreža može da se opiše kao „crna kutija” (u originalu *black-box*) koja preslikava domen ulaznog prostora na domen izlaznog prostora. Model ili funkcija mapiranja se u suštini definiše sa izravnatom matricom težina na kraju procesa obučavanja, pri čemu je model uporediv sa parametrima regresione funkcije.

Dinamički deformacioni modeli, na osnovu izraza (5.71) mogu biti predstavljeni primenom višeslojnih neuronskih mreža na sledeći način. Neuroni u ulaznom sloju karakterišu se uticajima različitih signala i njihovim vremenskim kašnjenjima, dok izlazni sloj sadrži samo jedan ili više neurona za deformaciju. Proces prenosa od ulaznih do izlaznog signala može se predstaviti na sledeći način, svi neuroni iz sloja su povezani u skladu sa njihovim težinama sa ulaznom funkcijom (Heine, 2008):

$$s_j = \mathbf{T}(\omega_{1j} \cdot x_1, \omega_{2j} \cdot x_2, \omega_{3j} \cdot x_3, \dots, \omega_{nj} \cdot x_n) \quad (6.10)$$

gde je T operator (npr. maksimum, minimum, zbir, proizvod).

Linearna ili nelinearna aktivaciona funkcija se definiše sledećim izrazom:

$$s_j = f(s_j - \omega_0) \quad (6.11)$$

gde je ω_0 takozvani prag (u originalu „*threshold*”) koji određuje izlaz odgovarajućeg neurona u narednom sloju. Na osnovu toga, vrednosti izlaznih neurona su funkcija g ulaznog vektora x^p i matrice težina, koja je nelinearna ako je aktivaciona funkcija nelinearna. Obično, aktivaciona funkcija izlaznog sloja je linearna, dok je za skriveni sloj nelinearna (Sigmoid-transfer funkcija, Gausova funkcija). Proces određivanja težina smatra se procesom obučavanja neuronske mreže. Veoma popularan algoritam za obučavanje višeslojnih neuronskih mreža jeste algoritam povratnog prenosa. Greška računanja željenog i postignutog izlaza mreže prostire se unazad kroz slojeve u cilju ažuriranja težina, kada se postavlja svaki ulazni vektor.

Detaljan opis ovog algoritma može se naći u standardnoj literaturi (Patterson, 1996; Heine, 2008).

6.2.1.1. Određivanje optimalne strukture mreže

Broj ulaznih i izlaznih signala korespondira broju neurona u ulaznom i izlaznom sloju. Međutim, nije jednostavno rešiti koji je idealan broj skrivenih slojeva i skrivenih neurona. Iako ne postoji strogo definisano pravilo za određivanje ovog broja, korisne instrukcije za izbor optimalne arhitekture mreže, mogu se pronaći u odgovarajućoj literaturi (Otto, 1995; Patterson, 1996). Iz teoreme Kolmogorova, može se otkriti, sa teoretskog aspekta, da jedan skriveni sloj i

$2n+1$ skrivenih neurona mogu uspešno ostvariti svaku funkciju preslikavanja iz n -dimenzionalnog u m -dimenzionalni domen prostora.

Otto predlaže sledeće pravilo za određivanje maksimalnog broja (Otto, 1995):

$$m = \frac{p}{5 \cdot (n+s)} \quad (6.12)$$

gde je:

p – broj vrednosti u postupku obučavanja

n – broj ulaznih neurona

s – broj izlaznih neurona

Određivanje broja skrivenih neurona ne predstavlja veliki problem sa aspekta vremena računanja, ali je potrebno pažljivo pratiti šta se dešava sa kvalitetom preslikavanja i sposobnošću generalizacije. Ako skriveni sloj sadrži mali broj neurona, onda to dovodi do visokog stepena statističke pristrasnosti i mogućnosti greške. Obrnuti efekat, kada ima previše neurona, uporediv je sa primenom polinoma sa previše koeficijenata. Iako je greška obučavanja mala, greška generalizacije je visoka. Da bi se uspešno realizovao proces, set podataka se generalno strogo mora podeliti na set za obučavanje i set za validaciju rezultata, pri čemu se ti podaci koji se koriste za validaciju, ne koriste i za obučavanje. Ipak, preporučuje se da se uvek testira više mreža sa različitim arhitekturama, pa da se tek onda izabere najbolja.

Na osnovu prethodno navedenog, implicira se zaključak da broj neurona treba da bude visok koliko je potrebno, ali da bude što je moguće manji.

6.2.2. *Fuzzy* pristup u deformacionim procesima

Alternativa konvencionalnoj analizi deformacija, koja daje prilično isključiv odgovor da li je neka tačka pomerena ili ne, statističkim testiranjem dve ocenjene vrednosti, predstavlja primena *fuzzy* modela. Opravdanost njihove primene leži u činjenici da se prirodni i tehnički procesi dešavaju pod određenim stepenom neizvesnosti. Dakle, kada se radi o konvencionalnoj deformacionoj analizi, obično se postavljaju sledeća pitanja:

- Koje tačke su pomerene?
- Na koji način su se tačke pomerile?
- Da li identifikovani obrasci pomeranja mogu da opišu kretanja pojediničanih tačaka ili grupe tačaka?

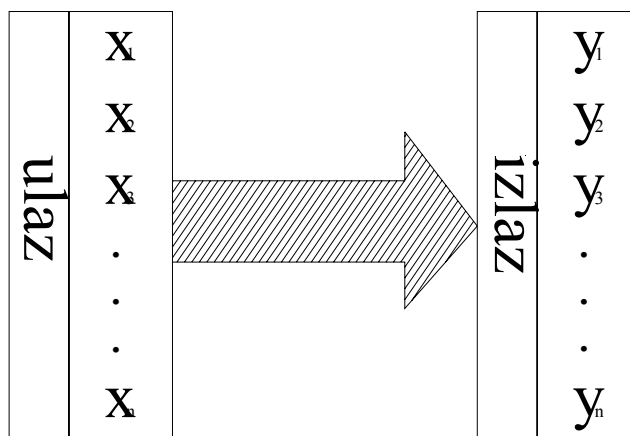
Bez obzira da li se radi o pojedinačnoj tački ili o sličnom obrascu kretanja za grupu tačaka, teško je precizno definisati granice pomeranja. Kada se radi o razmatranju svih uticaja koji mogu biti uzročnici pomeranja, važno je napomenuti da nije moguće obuhvatiti sve uticaje

prilikom formiranja modela, jer količine nekih uticaja nisu merljive, ne uočavaju se ili čak ne mogu biti identifikovani. Recimo, iregularne varijacije pod dejstvom saobraćajnog opterećenja, ne mogu biti adekvatno predstavljene numeričkom vrednošću. Izmereni intenziteti nisu uvek identični ulaznim silama, već ih oni predstavljaju što je moguće tačnije. Relacije procesa mogu biti veoma kompleksne, tako da je veoma teško ili čak nemoguće ih je izraziti eksplicitnim izrazima i matematičkim formulama.

Skup *fuzzy* teorija predstavlja proširenje klasične teorije skupova (Zadeh, 1965). Osnovna ideja podrazumeva da pripadnost nekog elementa skupu ne može da preuzme samo dve vrednosti „da” ili „ne”, ali može da se izrazi postepenom gradacijom funkcije u rasponu od „0” do „1”, u slučaju potpunog stepena pripadnosti. Ova vrsta interpretacije bolje odgovara stvarnom svetu i ljudskoj predstavi i tome, uzevši u obzir da ne možemo da vidimo samo dve boje, crnu i belu, već pored toga i proizvoljno mnogo boja u nijansama sive. *Fuzzy* logika omogućava računanje sa *fuzzy* skupovima, što predstavlja osnovu *fuzzy* zaključivanja i *fuzzy* pravila. *Fuzzy* pravila su implikacije ($A \Rightarrow B$), koje određuju koji se zaključak može izvesti ako se ostvare određeni uslovi. Na primer: *ako* x_1 *odgovara* A_1 *i* x_2 *odgovara* A_2 *i ... onda* y *odgovara* B .

Teorija *fuzzy* skupova i *fuzzy* logike je objašnjena u odgovarajućem literaturi (Zimmermann, 1996; Seising, 1999).

Uzročno-posledične relacije u deformacionim procesima mogu se modelirati po *fuzzy* pravilima. *Fuzzy* pravila se veoma efikasno mogu primeniti u tzv. sistemima zasnovanim na poznavanju promena ponašanja terena ili objekta, gde informacije ne mogu biti predstavljene samo jednačinama i algoritmima kao u klasičnoj obradi podataka, već i u slobodnoj formi u vidu pravila, ograničenja i mreža. Takvi modeli mogu biti **parametarski**, **neparametarski** ili **hibridni**.



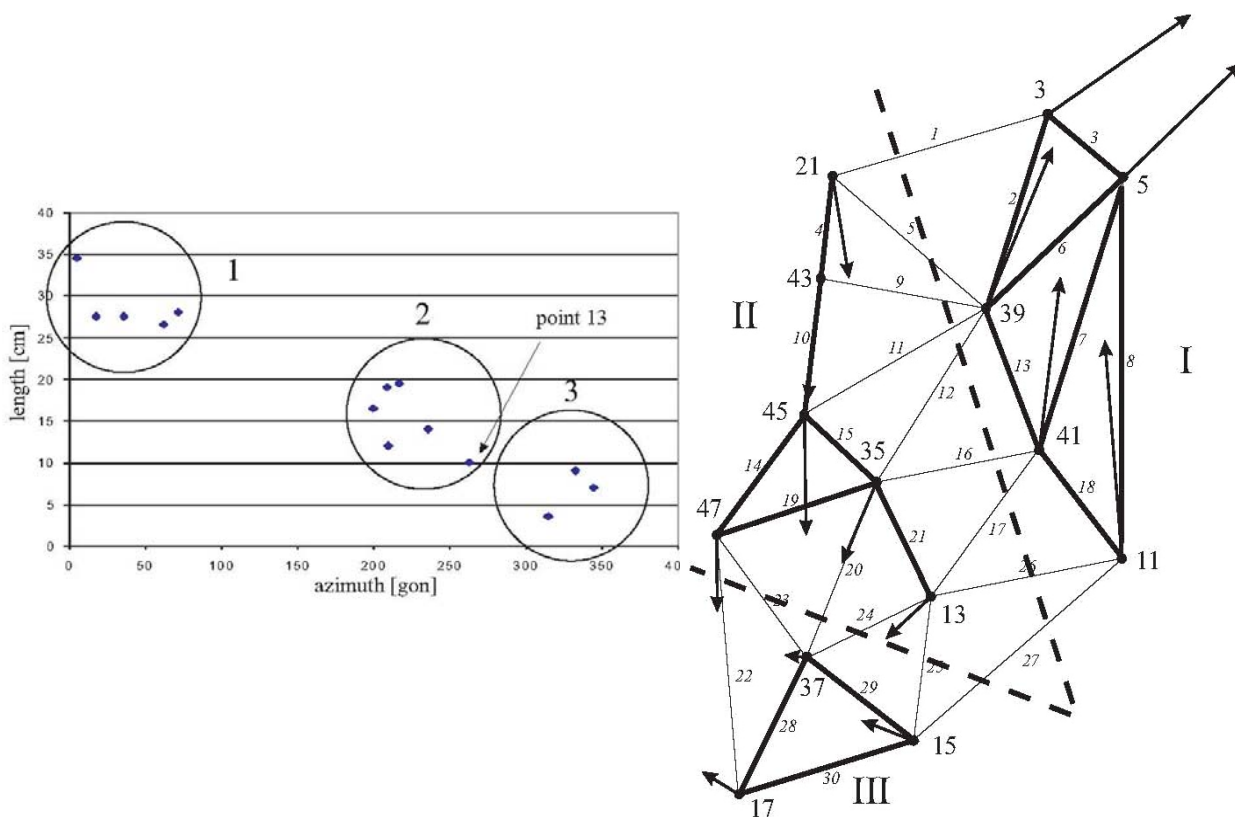
Slika 6.4. Opis deformacionog procesa primenom *fuzzy* pravila

Na osnovu prethodno objašnjenih postavki, može se zaključiti da se *fuzzy* modeli sastoje od *fuzzy* skupova i *fuzzy* pravila koja se moraju postaviti. Ovo se može sprovesti na osnovu poznavanja i iskustva, iz merenih podataka ili iz hibridne baze. Ekstrakcija *fuzzy* pravila iz merenih podataka, realizuje se primenom različitih metoda (Heine, 2008; Fletling, 2008):

- **Algoritam induktivnog mašinskog učenja:** Takozvani ID3 algoritam predstavlja algoritam induktivnog učenja, koji uspostavlja tzv. **stablo odluka**. Kriterijum ovog algoritma jeste uslovna entropija. Centralna postavka deformacionih procesa zasnovanih

na *fuzzy* pravilima jeste akvizicija *fuzzy* pravila primenom algoritma mašinskog učenja iz skupa podataka uticaja i intenziteta deformacija. ID3 je induktivni algoritam jer iz pojedinačnih slučajeva (primeri, podaci) ostvaruje opšti zaključak (*ako-onda-pravila*). **Čvorovi stabla** sadrže podgrupe primera učenja, koje se sastoje od **vrednosti** (npr. vrlo mali, mali, srednji, veliki, veoma veliki) **atributa** (uticaj količine uključujući vremenski pomak) i **vrednosti odluke** (deformacija).

- **Klastering** (grupisanje) predstavlja značajan metod za pronalaženje zajedničkih prirodnih karakteristika i grupisanja podataka iz velikog skupa podataka. Metode klasteringa (grupisanja) koje pripadaju metodama klasifikacije, imaju široku primenu u problemima prepoznavanja oblika. Ove metode klasifikuju podatke u homogene grupe ili klase, na osnovu formalnih kriterijuma i procedura. Podaci u klasama treba da budu veoma slični kada se radi o određenim pitanjima od interesa, dok se podaci u različitim klasama razlikuju jedni od drugih. Metode klasteringa rešavaju probleme prepoznavanja oblika tako što pronalaze nepoznate strukture u velikim skupovima podataka ili označavaju nove podatke u okviru poznatih struktura. Primer grupisanja podataka, tj. identifikacije sličnih obrazaca kretanja u pojedinim klasterima, primenjen je u dvodimenzionalnoj mreži Delft koja je publikovana u časopisu „Deformationsanalysen 83”. (Welsch, 1983). Optimalan broj klastera, koji je ovom prilikom određen, iznosi 3 (Fletling, 2008). Dakle, u ovoj mreži postoje tri bloka koji pokazuju sličan obrazac kretanja. Tačke u mreži su povezane u formu nepravilnih trouglova po principima Delanijeve triangulacije (TIN). Ako je sračunata vrednost stepena pripadnosti određenoj klasi, za obe krajnje tačke linije visoka, onda i linija koja spaja te tačke pripada istom klasteru. Niža vrednost ukazuje na **presek linije sa granicom dve klase** (Slika 6.5).



Slika 6.5. Primer grupisanja tačaka u tzv. klasterne, levo, za 2D geodetsku mrežu Delft, desno, sa generisanim granicama između različitih klasa odnosno blokova sa sličnim obrascem kretanja (Fletling, 2008)

Imajući u vidu da se geodetska merenja realizuju u više epoha, rezultati se mogu interpretirati standardnim načinima numeričke i grafičke interpretacije. Manuelnom ekspertizom grafičke interpretacije podataka i analizom vremenskih serija, relativno lako se može doneti zaključak o karakterističnim obrascima kretanja za određene tačke ili grupe tačaka. Međutim, kad je broj tačaka na primer veći od 1.000, potrebno je uložiti veliki trud da bi se ovi podaci mogli manuelno analizirati. Na osnovu toga, javlja se potreba za uvođenjem automatskih procedura klasifikovanja sličnih obrazaca kretanja (bez pomeranja, linearno pomeranje, ubrzano pomeranje, itd.) primenom *fuzzy* pravila.

- **Neuro-Fuzzy sistemi:** Postoji nekoliko metoda za postavljanje *fuzzy* setova podataka i *fuzzy* pravila primenom veštačkih neuronskih mreža (Wang, 1994; Nelles, 2001). Prednost veštačkih neuronskih mreža jeste da se ne razmatraju fizičke informacije pre samog postupka modeliranja. Ako se složenost sistema povećava, neuronskoj mreži je potrebno mnogo više projekcionog kapaciteta, te i sama postaje složena. Primenom *fuzzy* pravila u znatnoj meri je relaksiran ovaj problem.

Navedene metode u okviru ovog poglavlja predstavljaju nov pristup u okviru problematike deformacionih procesa. Iako je tačnost modelovanja primenom veštačkih neuronskih mreža veća nego kod *fuzzy* pravila, to ne znači da je ta vrsta modeliranja bolja. Nezavisno od toga, mnogi istraživači daju prednost modeliranju na osnovu *fuzzy* pravila u odnosu na modeliranje primenom veštačkih neuronskih mreža. Ipak, odluka koji metod izabрати, zavisi od same svrhe modeliranja. Ako se zahteva da bude postignuta visoka tačnost modeliranja, na primer modela predikcije, veštačke neuronske mreže u tom slučaju mogu dati bolje rezultate. Sa druge strane, ako je potrebno detektovati procesne relacije ili potvrditi proračunom ocenu teorijske pretpostavke, odgovarajući pristup se zasniva na *fuzzy* pravilima. Pristupi kao što su veštačke neuronske mreže i algoritam induktivnog učenja (ID3) predstavljaju metode učenja na osnovu primera. U tom cilju je važno da bude ispunjen određeni uslov. Mora da postoji dovoljno primera na raspolaganju, pri čemu je značajno da primeri što verodostojnije predstavljaju ponašanje celog sistema, što znači da ulazne količine treba da pokriju ceo mogući domen ulaznog prostora.

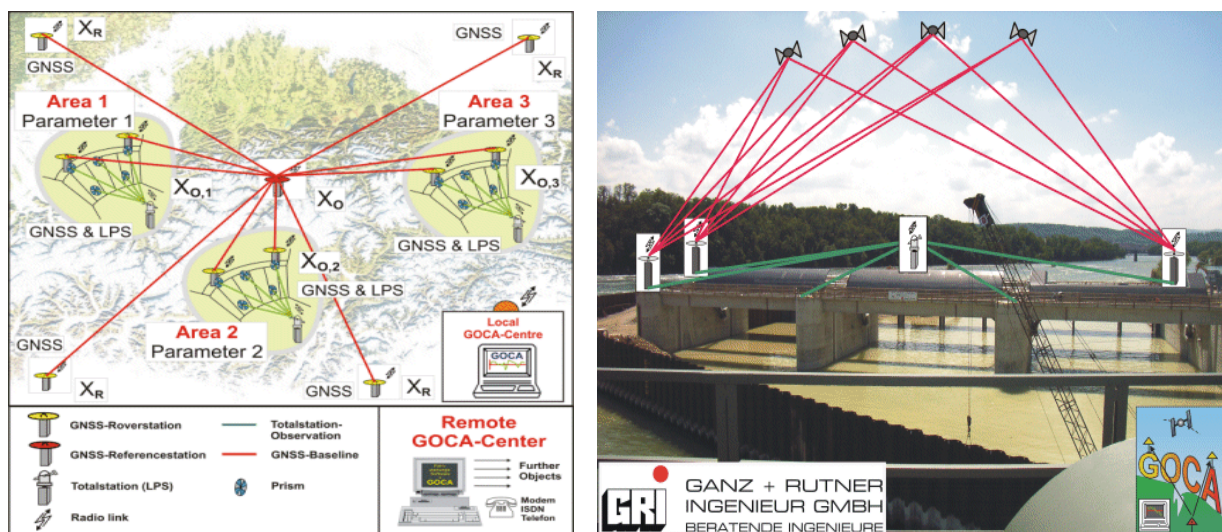
6.3. ALARMNI SISTEMI U OTKRIVANJU DEFORMACIJA

Kada se radi o intenzivnijim pomeranjima terena (klizišta, odroni), sistem monitoringa pored geodetskih metoda, uključuje i geološka istraživanja, hidrometrijska i meteorološka merenja količinskih uticaja (npr. nivoa vodene površine, padavina), geofizička merenja, itd. Integracijom svih merenja i primenom modeliranja podataka *fuzzy* postupcima i veštačkim neuronskim mrežama, moguće je precizno identifikovati graničnu liniju klizanja u odnosu na stabilnu stensku masu.

Za potrebe monitoringa velikih objekata, kao što su tuneli, brane ili mostovi, lokalnim i regionalnim geomehaničkim procesima (naselja u rudarstvu, klizišta) aktuelno je projektovanje **alarmnih sistema**, koji se sastoje od geodetskih GNSS senzora, robotizovanih totalnih stanica i geotehničkih senzora, kao što su ekstenziometri, inklinometri bušotina, senzori za temperaturu i ubrzanja. U kontrolnom centru kod ovakvih sistema, merenim vremenskim serijama detektuju se kritična mesta. Uobičajeni pokazatelji su relativne promene kubature sa pridruženim brzinama

i/ili ubrzanjima. Ako ove količine pređu granicu definisane tolerancije, upozorenja u vidu alarmnih poruka se pojavljuju na ekranu korisnika sistema.

Reprezentativan primer praćenja trenutnog stanja geodetskim monitoringom i alarmnim sistemom jeste sistem **GOCA** (eng. *GNSS/LPS/LS-based online Control and Alarm System*). Sistem monitoringa, koji se sastoji od GPS baznih i rover prijemnika, instalira se na području predmeta osmatranja i prenosi merne signale lokalnom centru za kontrolu. Centar za kontrolu obrađuje i analizira podatke, detektuje odstupanja i signalne trendove u odnosu na unapred definisane tolerancije i automatski dostavlja alarmne poruke korisniku. Stručnjaci koji prate situaciju moraju da donesu odluku da li je alarm opravdan ili ne. Daljinsko upravljanje i održavanje sistema može se realizovati putem interneta (Eichorn, 2007).



Slika 6.6. Alarmni sistem GOCA u postupku monitoringa različitih vrsta objekata (www.goca.info)

Osnovni problemi u analizi i interpretaciji podataka monitoringa su sledeći:

- pravilno razumevanje sistematskih i slučajnih grešaka merenja (u suprotnom, može izazvati lažnu uzbunu)
- povećanje autokorelacije kao rezultat merenja visokih frekvencija (do 10 Hz sa GPS prijemnicima ili robotizovanim totalnim stanicama u kinematičkom modu)
- ograničena reprezentativnost podataka monitoringa

Rezultati monitoringa i alarmni nivo zahtevaju kompleksnu stručnu ekspertizu u cilju pravilnog tumačenja mehanizama deformacionog procesa. Centralni deo sistema predstavlja komunikacioni softver, koji je odgovoran za kontrolu i komunikaciju senzora. Izbor vrste senzora zavisi od amplitude očekivanih pomeranja. Hardversko-softverska kontrola obezbeđuje prenos senzorskih opažanja u definisanom GKA formatu, koji je sličan sa NMEA. Matematičko modeliranje obavlja se u više koraka: izravnjanje opažanja primenom MNK metode, kontrola stabilnosti izabranog referentnog sistema i tačaka na objektu, on-lajn deformaciona analiza primenom tehnike Kalmanovog filtriranja i tehnika robusnih ocena.

Dakle, metod najmanjih kvadrata i tehnike robusnih ocena primenjuju se u postupku deformacione analize, što omogućava pouzdano podešavanje alarma statističkim testiranjem, u slučaju da se dostigne kritična tolerancija. Evaluacija kontinualnih vremenskih serija polja pomeranja otvara nove perspektive u deformacionoj analizi (Jäger et al., 2006).

7. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA POMERANJA ZEMLJINE KORE REGIONALNOG KARAKTERA

7.1. UVOD U GEODINAMIČKA ISTRAŽIVANJA NA PODRUČJU JUGOISTOČNOG DELA PANONSKOG BASENA

Kao što je pomenuto u prvom poglavlju, Republika Srbija u globalnom geodinamičkom pogledu pripada delu Evroazijske ploče, sa severnim delom u okviru Panonskog basena (područje Vojvodine) i centralnim i južnim delom u oblasti Dinarida. Na osnovu brojnih istraživanja na bazi satelitskih merenja i dugobazisne interferometrije, ukazano je na pomeranje Jadranskog bloka u pravcu severa, što u velikoj meri utiče na tektoniku centralno-evropskog regiona, posebno Panonskog basena. Glavna karakteristika Jadranskog bloka je prenos kompresije između Evroazije i Afrike, te stoga predstavlja glavni pokretač tektonskih procesa u Centralnoj Evropi, označen po najvišim seizmičkim zonama aktivnosti duž linije sučeljavanja ploča na spoljašnjim Dinaridima i Južnim Alpima. Uticaj Jadranskog bloka na tektoniku centralno-evropskog dela, a posebno Panonskog basena, evidentan je na osnovu dugogodišnjih GNSS opažanja u okviru centralno-evropske geodinamičke mreže (Grenerczy, 2005).

Glavne odlike Panonskog basena iniciraju opšti problem u smislu precizne identifikacije ekstenzionih i kompresivnih procesa, s obzirom na prisutno značajno diferencijalno istanjenje litosfere na tom području i formiranje pasivnih riftova u ekstenzionom režimu.

Kada su u pitanju geološki dinamički modeli, Panonski basen još uvek predstavlja enigm. Mnogi autori su pokušavali da objasne glavne karakteristike Panonskog basena, na osnovu modela pasivnih riftova u ekstenzionom režimu, međutim, to je bilo moguće samo delimično. Tektonski procesi, kao što su jako diferencijalno istezanje, plašt vezan za vulkansku aktivnost, formiranje savremenih ekstenzionih riftova, kao i pojava kompresije u pravcu istočnih Karpata, ne mogu se objasniti samo pomoću jednostavnih modela riftova (Huisman et al., 2001).

S obzirom da su površinski slojevi omotača Zemljine kore u stalnom pokretu, usled različitih uticaja kao što su promena nivoa podzemnih voda, tektonske pojave, klizišta, rasedi sa različitim karakterom kretanja, multidisciplinarna istraživanja su od suštinskog značaja za bolje razumevanje stanja Zemljine kore na području istraživanja. Na ovaj način, definisan pristup pretpostavlja uspostavljanje standardizovane terminologije i razumevanje dinamike procesa, kada se radi o generisanju relacija geodezije sa ostalim naučnim i tehničkim disciplinama kao što su geologija, neotektonika, mehanika kontinuuma, građevinarstvo i teorija sistema.

7.2. REALIZACIJA GPS/GNSS MERENJA U SRBIJI

Najefikasnija i najpreciznija tehnologija prikupljanja podataka za identifikaciju tektonskih pomeranja u zonama aktivnih raseda, jesu ponovljena GPS/GNSS merenja, kako bi se u određenim vremenskim intervalima dobili statistički signifikantna pomeranja, koja se mogu kretati od 1 mm/god do nekoliko cm/god.

Geodinamika zasnovana na satelitskom pozicioniranju odnosi se na lokalna, regionalna ili čak kontinentalna istraživanja u zavisnosti od veličine područja od interesa. Analiza deformacija podrazumeva komparaciju bilo koje dve ili više epoha u kojima su realizovana merenja, pri čemu intenzitet realizacije merenja zavisi od tektonske aktivnosti ispitivanog područja.

Na teritoriji Vojvodine, koja pripada jugoistočnom delu Panonskog basena, do sada nije bilo analize pomeranja terena, bazirane na satelitskom pozicioniranju. Razvoj GNSS-a u Republici Srbiji datira od 1998. godine, kada je realizovana EUREF GPS merna kampanja u okviru internacionalne kampanje merenja pod nazivom BALKAN 98, kada je Republika Srbija zvanično uključena u EUREF koordinatni okvir (u originalu *EUropean REference Frame*). Na teritoriji Srbije određeno je 7 tačaka (dok je 1 tačka bila u graničnom području između Srbije i Crne Gore), i one su u skladu sa tadašnjom administracijom nazvane YUREF tačke.

Merenja su realizovana u periodu od 4. do 9. septembra 1998. godine primenom metode GPS statike. Za sve tačke je izvršeno 5 mernih sesija, koje su trajale 24 časa, sa intervalom registracije podataka od 15 sekundi. Obrada podataka je realizovana od strane Državnog zavoda za kartografiju i geodeziju Federalne Republike Nemačke u Frankfurtu, korišćenjem preciznih CODE (eng. *Center for Orbit Determination in Europe*) satelitskih efemerida i softvera za obradu podataka Bernese 4.0. Mreža je definisana sa EPN stanicama: *Wetzell-1202* (Nemačka), *Matera* (Italija), *Graz-Lustbuehel* (Austrija) i *Zimmerwald* (Švajcarska) u ITRF96 (*International Reference Frame 1996*) koordinatnom sistemu, epoha 98.7. Standardna devijacija koordinata određenih u kampanji za horizontalnu komponentu iznosi $\sigma_{x,y} = 2 \text{ mm}$, dok je za elipsoidnu visinu standard $\sigma_z = 6.5 \text{ mm}$.

Zbog nepostojanja odgovarajućih sporazuma, rezultati, tj. koordinate novoodređenih tačaka u ETRS89 sistemu, nisu publikovane (Blagojević, 2003; Odalović et al., 2011).

7.2.1. Projektovanje i realizacija SREF mreže

Republički geodetski zavod iz Beograda je u periodu od 1998. do 2003. godine projektovao i realizovao prostornu referentnu mrežu Republike Srbije, pod nazivom SREF, a koju čini skup trajno stabilizovanih i pristupačnih geodetskih tačaka, ravnomerno raspoređenih po celoj teritoriji Republike Srbije sa prosečnom prostornom rezolucijom od 10 kilometara. SREF mreža je uspostavljena u cilju definisanja prostornog referentnog sistema Republike Srbije.

Pasivna referentna mreža Republike Srbije sastoji se od 838 trajno stabilizovanih tačaka, ravnomerno raspoređenih po čitavoj teritoriji države. U okviru mreže, pored novopostavljenih projektovanih tačaka, uključene su i tačke postojeće trigonometrijske mreže svih redova, koje su zadovoljile projektovane kriterijume, prvenstveno u smislu prostornog rasporeda.

Prilikom projektovanja i realizacije tačaka SREF mreže, vodilo se računa o sledećim uslovima (Milenković et al., 2013):

- **Tačke ravnomerno pokrivaju područje države sa prostornom rezolucijom od približno 10 kilometara.**

- **Mesta za stabilizaciju tačaka su lako dostupna i oslobođena fizičkih prepreka, reflektujućih površina i izvora jakog elektromagnetnog zračenja, koja bi uticala na kvalitet merenja.**
- **Plan merenja GPS vektora u mreži je sproveden u formi zatvorenih poligona, tako da se na svakoj tački susište najmanje tri vektora.**

Merenja u pasivnoj referentnoj mreži realizovale su stručne službe Republičkog geodetskog zavoda (75.3%) i ekipe Vojske Jugoslavije (24.7%). Za potrebe merenja korišćeni su dvofrekventni prijemnici *Trimble 4000 CCE*, *Trimble 4400* i *Trimble 4800*, pri čemu je na raspolaganju bilo 14 prijemnika. Mreža je određena na osnovu relevantnih GPS statičkih merenja. Ukupno su određena 1.662 nezavisna GPS vektora u mreži, sa mernim sesijama koje su trajale od 60 do 120 minuta, doje je zajedničko vreme trajanja GPS merenja iznosilo 90 minuta. Geometrija GPS mreže vektora definisana je kao sistem zatvorenih poligona sa prosečnom dužinom od 10 kilometara. U cilju uklapanja pasivne referentne mreže u državni koordinatni sistem, pristupilo se određivanju koordinata tačaka izravanjem po MNK metodi, sa fiksiranim koordinatama 7 YUREF tačaka u ITRF96 koordinatnom sistemu, epoha 98.7. Projektovanje referentne mreže YUREF sprovedeno je od strane Instituta za geodeziju Građevinskog fakulteta u Beogradu. Prosečne vrednosti standarda novoodređenih koordinata tačaka su $\sigma_{x,y} = 6 \text{ mm}$ po položaju i $\sigma_z = 10 \text{ mm}$ po visini.

Od 2001. do 2005. godine, uporedo sa radovima na pasivnoj referentnoj osnovi, uspostavljena je aktivna mreža permanentnih stanica Srbije, pod nazivom AGROS (Popović, 2010; Odalović et al., 2011). Na teritoriji Vojvodine je od 2004. godine počelo sa radom 6 permanentnih stanica, u eksperimentalnoj fazi (Sombor, Kikinda, Srbobran, Žitište, Novi Sad i Indija). U kasnijem periodu, stanice koje su postale operativne, sa povremenim prekidima u radu, odnose se na Suboticu, Vršac, Šid i Zrenjanin. Permanentna stanica u Novom Sadu je postavljena na zgradi Fakulteta tehničkih nauka. Republički geodetski zavod je pristupio realizaciji merne kampanje EUREF2010 u avgustu 2010. godine. U delu ove kampanje, realizovana su merenja na 12 tačaka EUREF i SREF mreže, sa ciljem provere da li je bilo promena u pozicijama tačaka sa aspekta praktične značajnosti.

Od strane relevantnih internacionalnih organizacija, referentni sistem ETRF2000 je preporučen kao novi konvencionalni okvir za teritoriju Republike Srbije. Na osnovu člana 33. Pravilnika za osnovne geodetske radove, položaji tačaka i objekata, u referentnom sistemu u ravni projekcije, izražavaju se dvodimenzionalnim, pravouglim, pravolinijskim koordinatama u ravni konformne UTM projekcije elipsoida GRS80. Sve koordinate su ponovo sračunate u novom sistemu ETRS89 – ETRF2000, i one su u zvaničnoj upotrebi od 1. januara 2011.

7.2.1.1. Stabilizacija tačaka SREF mreže

Novopostavljene tačke pasivne referentne mreže SREF stabilizovane su standardnim tipom nadzemne betonske belege, odnosno stubom visine 30 cm, sa ugrađenom metalnom bolcnom. Tačke postojeće geodetske osnove (trigonometrijska mreža) koje su uključene u SREF, zadržale su prvobitni način stabilizacije.



Slika 7.1. Stabilizacija tačaka SREF mreže (Republički geodetski zavod, Beograd)

7.2.1.2. Realizacija druge GPS/GNSS merne kampanje

Republički geodetski zavod Republike Srbije je, u cilju osiguranja integriteta i praćenja vremenske evolucije prostornog koordinatnog referentnog sistema, realizovao drugu mernu kampanju pod nazivom „Prostorna referentna mreža Republike Srbije – Epoha 2011-2012”. Kampanja je obuhvatila realizaciju merenja vektora na tačkama Prostorne referentne mreže u periodu od 10. maja do 25. oktobra 2011. godine i u periodu od 19. aprila do 20. septembra 2012. godine. Ukupan broj tačaka na kojima su realizovana merenja iznosi 838, od čega su 43 tačke obnovljene i prenumerisane. Ukupno je izmereno 1.662 vektora, identično kao i u prvoj mernoj kampanji. Datum prostorne referentne mreže Republike Srbije - Epoha 2011-2012, definišu koordinate dvanaest tačaka osnovne prostorne referentne mreže EUREF-SRBIJA. Koordinate ovih tačaka sračunate su u datumu ETRF2000.

7.2.1.3. Matematički model obrade merenja vektora u SREF mreži

Osnovne veličine koje se mere GPS/GNSS prijemnicima su faze kodova (C/A, P) i faze nosećih talasa (L1, L2). Korišćenjem ovih merenih veličina, generišu se tzv. pseudorastojanja, koja predstavljaju rastojanja od satelita do prijemnika, i koje su pod dejstvom različitih sistematskih uticaja. Princip faznih merenja sastoji se u upoređenju faze primljenog nosećeg

talasa sa fazom talasa koji je generisan u prijemniku. Merenje koje je izvršeno u prijemniku može se izraziti u sledećem obliku (Landau, 1988; Blagojević, 2005):

$$\Psi_{Fm}^j(t_i) = \varphi_{Fm}(t_m) - \varphi_F^j(t^j) + N_{Fm}^j + \varepsilon_{Fm}^j(t_i) \quad (7.1)$$

gde su:

- t_i - planirana epoha merenja u sistemu GPS vremena
- $\Psi_{Fm}^j(t_i)$ - fazno merenje u ciklusima, pri čemu je m indeks prijemnika, j indeks satelita, a F indeks frekvencije (1 ili 2)
- $\varphi_{Fm}(t_m)$ - faza oscilatora prijemnika u trenutku prijema signala t_m (očitanje časovnika prijemnika)
- $\varphi_F^j(t^j)$ - faza oscilatora satelita u trenutku emitovanja signala t^j (očitanje časovnika satelita)
- N_{Fm}^j - fazna neodređenost ili nepoznati celi broj faznih ciklusa
- $\varepsilon_{Fm}^j(t_i)$ - slučajna greška izvršenog faznog merenja (merni šum)

Model pseudorastojanja primenom faznih merenja može se predstaviti u sledećem obliku:

$$PR = R + c\delta t^S - s\delta t_r - c\delta t_A + \varepsilon_R + N\lambda \quad (7.2)$$

gde su:

- R - geometrijsko rastojanje od satelita do prijemnika
- $c\delta t^S$ - greška časovnika u satelitu
- $s\delta t_r$ - greška časovnika u prijemniku
- $c\delta t_A$ - atmosferski uticaj
- ε_R - slučajne greške
- N - ceo broj talasnih dužina
- λ - talasna dužina

Najvažniji segment pri obradi faznih merenja predstavlja određivanje celog broja talasnih dužina, primenom geometrijske metode ili korišćenjem P koda.

Geometrijsko rastojanje od satelita do prijemnika može se izraziti kao:

$$R = \sqrt{(X_r - X^S)^2 + (Y_r - Y^S)^2 + (Z_r - Z^S)^2} \quad (7.3)$$

pri čemu su X_r, Y_r, Z_r koordinate stanice na kojoj je postavljen prijemnik, a X^S, Y^S, Z^S koordinate satelita koje se računaju primenom preciznih efemerida. Na osnovu toga izraz (7.2) može se napisati u sledećem obliku:

$$PR = \sqrt{(X_r - X^S)^2 + (Y_r - Y^S)^2 + (Z_r - Z^S)^2} + c\delta t^S - s\delta t_r - c\delta t_A + \varepsilon_R + N\lambda \quad (7.4)$$

Na tačnost rezultata satelitskog pozicioniranja utiču sledeći faktori:

- Faktor konstelacije satelita
- Greške satelitskih orbita
- Greške satelitskih časovnika
- Greške prostiranja signala
 - Jonosferska refrakcija
 - Troposferska refrakcija
 - Višestruka refleksija
- Greške zbog svojstava prijemnika
 - Slučajna greška prijemnika
 - Različito vreme kašnjenja u pojedinim kanalima
 - Varijacije u vremenu kašnjenja u istom kanalu
 - Pomeranja faznog centra antene
 - Fazni skokovi
 - Nestabilnost oscilatora

Konstelacija satelita, odnosno geometrijski raspored, utiče na tačnost prostornih koordinata stajališta na kome je pozicioniran prijemnik. Ocena geometrije se može predstaviti na sledeći način:

$$\mathbf{K}_{\hat{x}} = \sigma_R^2 \cdot \mathbf{Q}_{\hat{x}} \quad (7.5)$$

pri čemu je σ_R - standard određivanja pseudorastojanja, a $\mathbf{Q}_{\hat{x}}$ kofaktorska matrica.

Standardi nepoznatih parametara mogu se odrediti na osnovu sledećih izraza:

$$\begin{aligned} \sigma_P &= \sigma_R \sqrt{Q_{xx} + Q_{yy} + Q_{zz}} = \sigma_R \text{PDOP} \\ \sigma_H &= \sigma_R \sqrt{Q_{xx} + Q_{yy}} = \sigma_R \text{HDOP} \\ \sigma_V &= \sigma_R \sqrt{Q_{zz}} = \sigma_R \text{VDOP} \\ \sigma_T &= \sigma_R \sqrt{Q_{tt}} = \sigma_R \text{TDOP} \end{aligned} \quad (7.6)$$

gde su:

- σ_P - standard prostornog položaja stajališta
- σ_H - standard položaja stajališta u horizontalnoj ravni

σ_V - standard visine stajališta

σ_T - standard određivanja vremena

Elementi Q_{xx} , Q_{yy} , Q_{zz} i Q_{tt} označavaju članove sa glavne dijagonale kofaktorske matrice $Q_{\hat{x}}$, dok se pojedinačni DOP faktori odnose na preciznost prostornog položaja, preciznost položaja u horizontalnoj ravni, preciznost visine i preciznost vremena, respektivno.

Greške satelitskih orbita je potrebno uzimati u obzir, posebno u geodinamičkim istraživanjima, kada je neophodno koristiti precizne efemeride. Aktuelni GPS/GNSS prijemnici autonomno određuju odstupanje sopstvenog vremena od sistemskog GPS/GNSS vremena, čime se sinhronizacija časovnika obezbeđuje apsolutnim pozicioniranjem.

Modeliranje odstupanja časovnika se realizuje primenom polinomskih koeficijenata koje satelit šalje u okviru svoje navigacione poruke. **Jonosfera** pripada delu atmosferskog omotača koji se karakteriše jonizacijom gasova pod uticajem ultraljubičastog Sunčevog zračenja, sa koncentracijom slobodnih elektrona. Gustina jonosfere je u direktnoj vezi sa Sunčevim zračenjem, čime se njen uticaj smanjuje noću. Uticaj jonosfere se otklanja uvođenjem popravaka koje se računaju na osnovu koeficijenata iz navigacione poruke, posebno kada se raspolaže dvofrekventnim prijemnicima (sa L1 i L2 nosećim talasima) i formiranjem odgovarajuće linearne kombinacije. U slučaju upotrebe jednofrekventnih prijemnika, računanje popravaka se sprovodi primenom standardnih modela atmosfere.

Troposferska refrakcija predstavlja veoma ozbiljan faktor kod očekivanih preciznih merenja. Uticaj troposfere zavisi isključivo od atmosferskog pritiska, temperature i vlažnosti vazduha. Troposfera nije disperzivna sredina, zbog toga pravac i brzina kretanja elektromagnetnih talasa zavise isključivo od atmosferskih parametara. Troposferska refrakcija se najčešće eliminiše računanjem popravaka primenom brojnih troposferskih modela, gde se atmosferski parametri mere ili određuju iz modela standardne atmosfere.

Višestruka refleksija utiče na smanjenje tačnosti merenja razlika faza, kada dolazi do pojave refleksije signala od glatkih vodenih, metalnih ili drugih površina u blizini stajališta na koje je postavljen prijemnik. Interferencija odbijenih talasa i talasa koje antena prijemnika neposredno prima, rezultira kombinovanim signalom sa faznim pomakom $\Delta\varphi_m$, čiji se intenzitet može odrediti na osnovu sledećeg izraza (Hofmann - Wellenhof et al., 1994):

$$\Delta\varphi_m = \frac{\beta \sin\Delta\varphi}{1 + \beta \cos\Delta\varphi} \quad (7.7)$$

pri čemu je $\Delta\varphi$ razlika faza direktnog i reflektovanog talasa, dok je β koeficijent koji predstavlja odnos jačine odbijenog i direktnog signala. Uticaj višestruke refleksije se može kontrolisati pažljivim izborom stajališta na kome će biti postavljen prijemnik, sa odgovarajućom zaštitom od nekog apsorpcionog materijala u neposrednoj blizini antene prijemnika, uzevši u obzir da ne postoji opšti matematički model kojim se ovaj efekat može prediktovati.

Greške zbog svojstava prijemnika direktno su vezane za hardverske komponente samog prijemnika. Pojedini uticaji se mogu znatno umanjiti ili u potpunosti otkloniti, u postupku samog procesiranja merenja. Posebno je značajno identifikovati i detektovati fazne skokove (eng. *cycle slips*) ili prekide prijema signala usled neke fizičke prepreke, uticaja Sunca, poremećaja u jonosferi, itd.

Eliminacija ili značajna redukcija sistematskih uticaja sprovodi se formiranjem linearnih kombinacija merenja. Prijemnici kojima se mere kodna i fazna rastojanja na oba noseća talasa obezbeđuju mogućnost formiranja dvofrekventnih linearnih kombinacija. Takođe se mogu

formirati modeli razlika merenja iz razloga prostorne ili vremenske korelisanosti, u cilju eliminacije ili znatnog umanjenja određenih izvora grešaka. Princip formiranja razlika podjednako važi kako za originalna pseudorastojanja, tako i za njihove dvofrekventne linearne kombinacije.

Na osnovu navedenog, uobičajeno je formiranje:

- **Prostih ili jednostrukih razlika**
- **Dvostrukih razlika**
- **Trostrukih razlika**

Prosta razlika nije opterećena uticajem grešaka satelitskog časovnika, kašnjenjem signala pri prolasku kroz hardver satelita, jonosferski i troposferski uticaji su prostorno korelisani, zbog čega im je intenzitet znatno redukovan, za razliku od uticaja višestruke refleksije signala i kašnjenjem signala pri prolasku kroz hardver prijemnika.

U **dvostrukim razlikama** elimiše se uticaji vezano za greške časovnika prijemnika, kao i kašnjenje signala pri prolasku kroz hardver prijemnika. Ostali uticaji, izuzev višestruke refleksije, dodatno su redukovani u poređenju sa jednostrukim razlikama. Iz tog razloga, dvostruke razlike su označene kao najpogodnije merene veličine u satelitskom pozicioniranju.

Kada su u pitanju **trostruke razlike**, ono što ih razlikuje od dvostrukih odnosi se na konstantnu faznu neodređenost tokom vremena. Ako u procesu merenja dođe do faznog skoka (eng. *cycle slips*) ili prekida prijema signala, greška će opteretiti samo jednu trostruku razliku, dok će ista situacija uzrokovati konstantnu grešku za sve naredne dvostruke razlike. Kod njih se može eliminisati i uticaj jonosferske refrakcije, linearnim kombinacijama dve noseće faze L1 i L2, pri čemu je za to neophodno koristiti dvofrekventne prijemnike. Zbog niže tačnosti se trostruke razlike ne koriste u geodetskom pozicioniranju, kao i proste razlike zbog prisutnih grešaka časovnika prijemnika i satelita, koje zahtevaju dodatno modeliranje. Više o prethodno navedenom može se pronaći u literaturi (Wells et al., 1986; Blagojević, 2005).

Preliminarna procesiranja vektora u SREF mreži su sukcesivno obavljena u okviru Republičkog geodetskog zavoda, neposredno po završetku svakog dana opažanja. U preliminarnoj obradi korišćene su komercijalne efemeride koje su u sastavu satelitskih navigacionih poruka. Procesiranje GPS vektora iz prve merne kampanje izvršeno je komercijalnim softverom *GPS Survey V.2.0*, dok je procesiranje vektora druge merne kampanje sprovedeno softverom *Trimble Total Control V.2.73*. Definitivna procesiranja su realizovana korišćenjem preciznih efemerida. Softver *Trimble Total Control* putem ftp protokola automatski pretražuje bazu podataka prikupljenih na mreži permanentnih stanica Internacionalnog GNSS servisa (IGS). IGS predstavlja sporazumnu organizaciju više od 200 agencija širom sveta koje udružuju resurse i generišu precizne podatke sa permanentnih GPS i GLONASS stanica. IGS je posvećen obezbeđenju proizvoda najvišeg kvaliteta i predstavlja standard za globalni navigacioni satelitski sistem (GNSS) kao podrška naučnim istraživanjima planete Zemlje, multidisciplinarnim aplikacijama i obrazovanju. Trenutno, IGS uključuje dva dobro poznata satelitska sistema, GPS i GLONASS, sa namerom pridruživanja budućih GNSS sistema, tako da predstavlja najprecizniji civilni satelitski sistem međunarodne zajednice.

GPS precizne orbite su sračunate koristeći dvadesetčetvorosatne segmente iz globalne GPS mreže koju koordinira međunarodni servis za geodinamiku (IGS). Takođe, putem ftp protokola preuzet je model jonosfere za vremenski interval realizovanih opažanja, od strane provajdera kao što je Univerzitet u Bernu. Prilikom obrade vektora u SREF mreži uziman je u obzir uticaj troposferske refrakcije, pri čemu je korišćen Hopfieldov model bez nepoznatih

parametara, kada je u pitanju prva kampanja, dok je pri procesiranju druge kampanje korišćen model *Good & Goodman (Fixed Values)*.

S obzirom da je područje istraživanja regionalnog karaktera, putanje satelita su dobijene iz preciznih efemerida sa kašnjenjem od nekoliko sedmica, iz razloga što finalne orbite nastaju kao kombinacija nekoliko svetskih centara za proračun orbita. Referentni okvir koji se koristi u računanjima je ITRF (*International Earth Rotation Service Terrestrial Reference Frame*). Regionalni centri za obradu podataka obezbeđuju dnevna ili nedeljna rešenja koja se kombinuju za generisanje finalnih orbita, korekciju časovnika i produkciju raznih drugih geodinamičkih parametara, kao što su tektonska pomeranja, koordinate polova, parametri Zemljine rotacije, promena dužine dana, itd.

Softverski paket *Trimble Total Control* radi u potpuno interaktivnom okruženju i obezbeđuje kompletnu kontrolu procesiranih podataka, pregled i editovanje pojedinačnih procesiranih baznih linija, minimalni ugao elevacije, potrebno rešenje fazne neodređenosti za obe frekvencije, eliminisanje uticaja jonosferske refrakcije, testiranje koeficijenata pouzdanosti, itd.

Procesiranje vektora je realizovano u sistemima zatvorenih poligona, pri čemu su uzeti u obzir samo linearno nezavisni vektori.

Bazne linije su određene formiranjem linearnih kombinacija faznih opažanja, pri čemu je primenjen funkcionalni model dvostrukih faznih razlika:

$$\Delta\nabla\mathbf{L} = \Delta\nabla\mathbf{R} + \mathbf{f}(\mathbf{z})\Delta\nabla\mathbf{T} + \mathbf{f}(\Delta\nabla\mathbf{N}_1\lambda_1, \Delta\nabla\mathbf{N}_2\lambda_2) + \boldsymbol{\varepsilon}_{\Delta\nabla\mathbf{L}} \quad (7.8)$$

gde su $\Delta\nabla\mathbf{L}$ operator dvostrukih razlika, \mathbf{R} pseudorastojanje do satelita, $\mathbf{f}(\mathbf{z})$ redukciona funkcija troposfere u funkciji od zenitnog ugla satelita \mathbf{z} , $\Delta\nabla\mathbf{T}$ rezidual troposferskog kašnjenja signala i $\boldsymbol{\varepsilon}_{\Delta\nabla\mathbf{L}}$ merni reziduali dvostrukih faznih razlika. U postupku modelovanja dvostrukih faznih razlika, rešene su fazne neodređenosti. Raznim kombinacijama dve osnovne frekvencije, sabiranjem, oduzimanjem, značajno su redukovani uticaji grešaka koji zavise od frekvencije signala (šum signala, uticaj jonosfere i troposfere), kao i rešavanje celobrojne neodređenosti.

Kao reprezentivi tačnosti kontrole kvaliteta baznih linija, korišćeni su sledeći parametri:

- odnos signal/šum
- koeficijent konstelacije satelita
- srednja kvadratna greška procesirane linije
- standardi koordinatnih razlika

Kontrola kvaliteta merenja i sam postupak procesiranja zahtevaju posebnu pažnju i u tom cilju je potrebno sprovesti odgovarajuće testove u cilju otkrivanja i eliminisanja izvora grešaka, kao što su: uticaj refleksije, pogrešno uneta visina prijemnika, pogrešno unesen broj tačke, itd. Metodom relativnog statičkog pozicioniranja se veliki broj sistematskih grešaka značajno smanjuje a neke se u potpunosti eliminišu, iz tog razloga ova metoda se ubraja u najtačnije metode merenja.

Procesiranjem GPS/GNSS vektora sa importovanim preciznim efemeridama, modelom jonosfere i modelom troposferske refrakcije, dobijene su koordinatne razlike Δx_i^j , Δy_i^j , Δz_i^j , koje se u modelu posrednog izravnjanja po MNK metodi, smatraju merenim veličinama, sa korespondentnom kovarijacionom matricom, tj. ocenama komponenti baznih linija. Dakle,

procesiranje podataka je relizovano u cilju dobijanja komponenti baznog vektora između dve tačke, na osnovu suvišno merenih faznih razlika, primenom postupaka relativnog pozicioniranja, pri čemu je u cilju eliminacije i značajne redukcije uticaja pojedinih grešaka merenja, primenjen model dvostrukih faznih razlika.

Sistem jednačina sa komponentama baznih vektora između dve tačke, kao nepoznatim parametrima, rešava se primenom MNK metode (Hofmann-Wallenhof et al., 1994).

Prosečna standardna odstupanja procesiranih baznih linija SREF mreže na teritoriji jugoistočnog dela Panonskog basena, za obe merne kampanje, za sve tri ose, data su u tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Prosečna standardna odstupanja procesiranih baznih linija SREF za obe kampanje

Merna kampanja	Statistika	$\sigma_{\Delta x}$ [mm]	$\sigma_{\Delta y}$ [mm]	$\sigma_{\Delta z}$ [mm]
1998-2002	min	0.5	0.3	0.6
	max	7.2	5.4	9.0
	avg	1.3	0.7	1.3
2011-2012	min	0.6	0.4	0.6
	max	4.2	2.8	3.9
	avg	1.3	0.9	1.1

7.2.1.4. Zatvaranje poligona

Nakon procesiranja baznih linija, sprovedeno je zatvaranje poligona (trouglovi i četvorouglovi), koji su obuhvatili sve merene vektore u mreži.

Kvalitet realizovanih merenja je verifikovan, ako je zatvaranje poligona sastavljenih od tri ili više vektora zadovoljilo sledeći uslov (Slika 7.2):

$$|S| = \rho_{R838 - R833} + \rho_{R833 - R827} + \rho_{R827 - R826} + \rho_{R826 - R838} < \Delta\rho \quad (7.9)$$

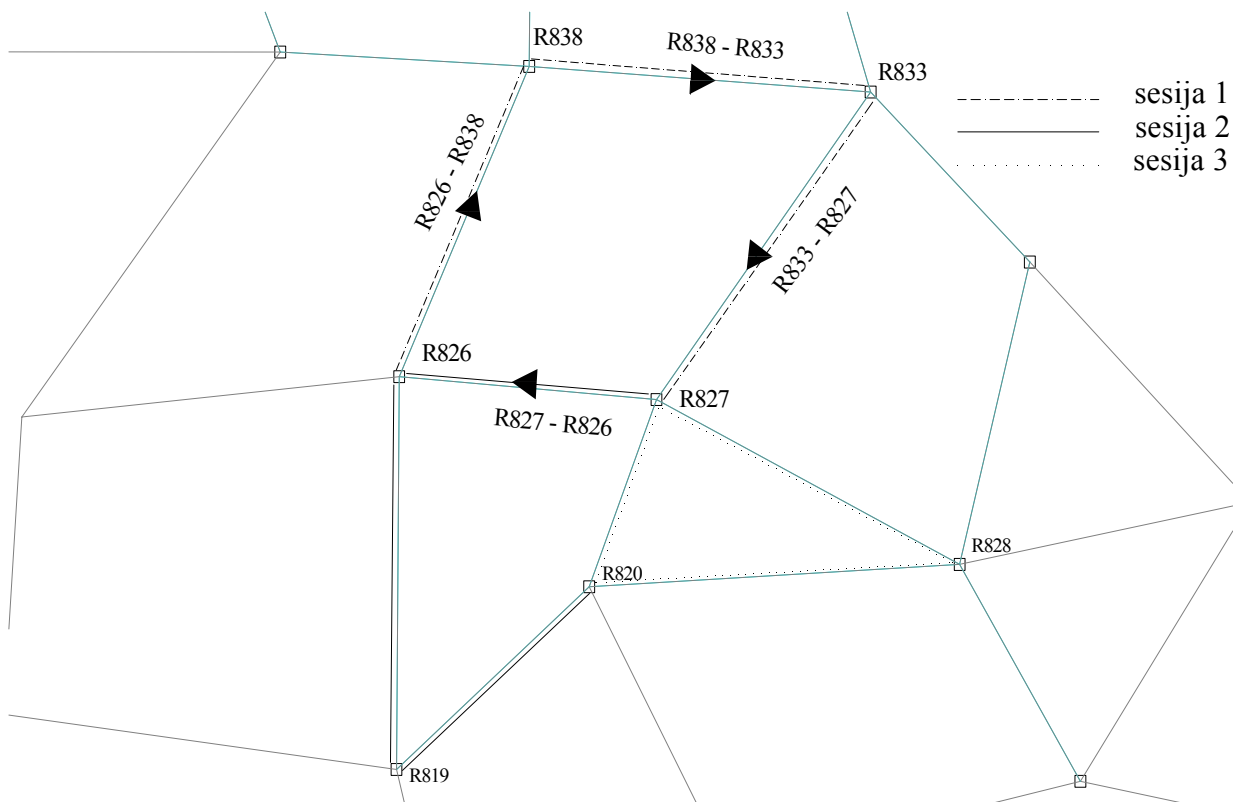
pri čemu je:

- S – vrednost zatvaranja poligona (trougao ili četvorougao) koja je izražena u jedinicama $\frac{\text{mm}}{\text{km}}$,
- ρ_{i-j} – GPS/GNSS rešenje za pojedine vektore
- $\Delta\rho$ – dozvoljeno odstupanje (2 ppm)

Zatvaranje poligona može se predstaviti sledećim izrazom:

$$\Delta X_{zp} = \sum_{i=1}^n \Delta x_{i,i+1}, \Delta Y_{zp} = \sum_{i=1}^n \Delta y_{i,i+1}, \Delta Z_{zp} = \sum_{i=1}^n \Delta z_{i,i+1} \quad (7.10)$$

pri čemu su $\Delta x_{i,i+1}$, $\Delta y_{i,i+1}$ i $\Delta z_{i,i+1}$ merene koordinatne razlike, a ΔX_{zp} , ΔY_{zp} i ΔZ_{zp} zatvaranja poligona, odnosno odstupanja od uslova (0) za sve tri ose.



Slika 7.2. Primer zatvaranja poligona u okviru pasivne geodetske referentne mreže SREF

Zatvaranje se takođe može izraziti po jedinici dužine:

$$\Delta X_{zp \text{ ppm}} = \frac{\Delta X_{zp}}{S} \cdot 10^6, \Delta Y_{zp \text{ ppm}} = \frac{\Delta Y_{zp}}{S} \cdot 10^6, \Delta Z_{zp \text{ ppm}} = \frac{\Delta Z_{zp}}{S} \cdot 10^6 \quad (7.11)$$

gde je S ukupna dužina poligona.

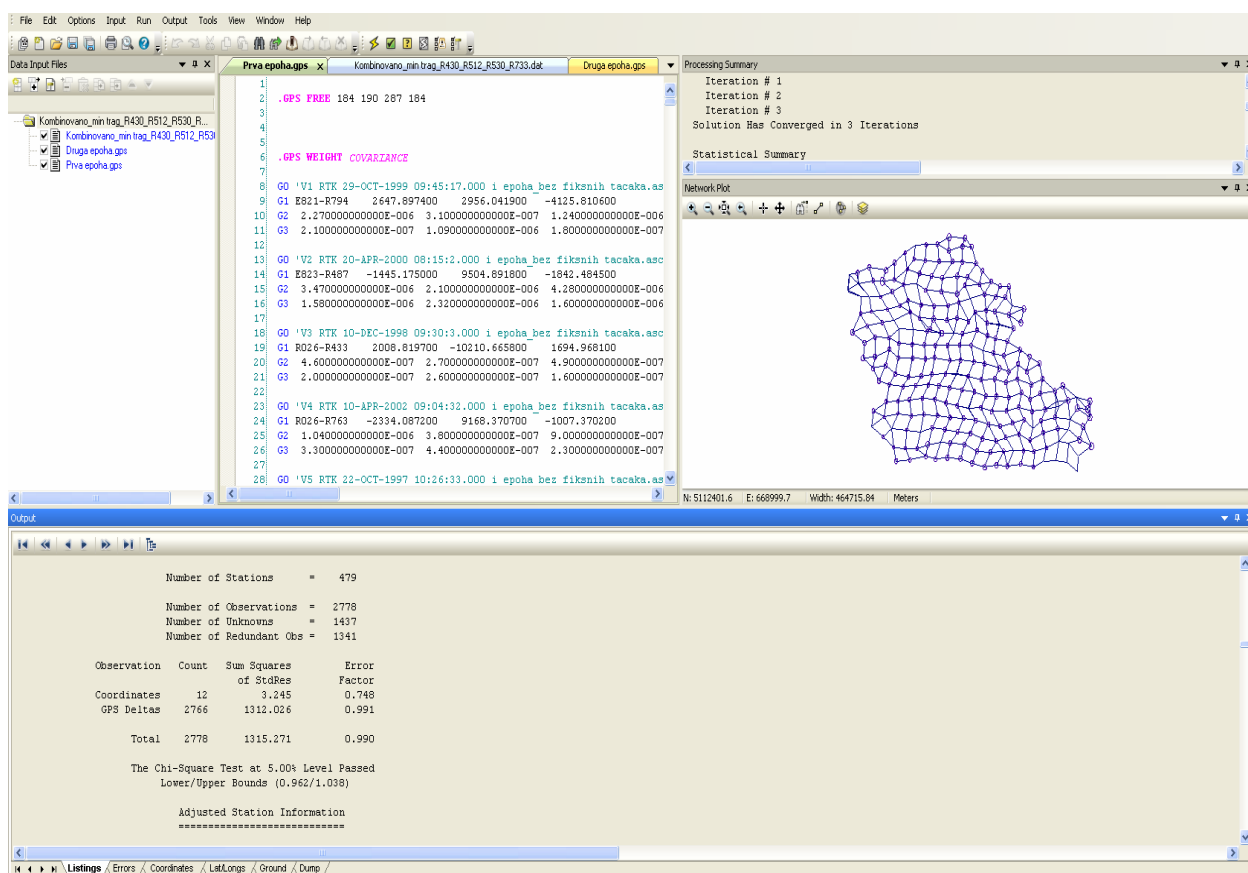
Ukupno odstupanje po jedinici dužine je:

$$\Delta S_{\text{ppm}} = \frac{\sqrt{\Delta X_{zp}^2 + \Delta Y_{zp}^2 + \Delta Z_{zp}^2}}{S} \cdot 10^6 \quad (7.12)$$

Za sve poligone u prvoj i drugoj kampanji merenja u okviru SREF mreže, sračunata su nezatvaranja, koja su bila ispod granice dozvoljenih odstupanja $\Delta S_{\text{ppm}} = 2 \text{ ppm}$. Zatvaranje poligona je sprovedeno u okviru modula *GPS Loop Check* u okruženju programskog paketa *MicroSurvey STAR*NET*, verzija *PRO 7.2.2.7.*, koji je kanadska kompanija *MicroSurvey* ustupila

na korišćenje Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Radi se o veoma moćnom Windows-orijentisanom softveru za izravnjanje raznovrsnih merenja u 1D, 2D i 3D geodetskim mrežama, po principima metode najmanjih kvadrata. Moguće je u postupku izravnjanja kombinovati konvencionalna merenja (horizontalni i vertikalni pravci, kose dužine, zenitna odstojanja) sa GPS/GNSS vektorima, sa preko 10.000 merenja i nepoznatih parametara. *STAR*NET* može koristiti procesirane bazne linije u različitim formatima komercijalnih i nekomercijalnih softvera za obradu GPS/GNSS merenja (*Leica, Trimble Geomatics Office, Trimble Total Control, Astech, Blue Book Gfile, Bernese*, itd). Geodetska mreža se može definisati u lokalnom ili globalnom datumu (UTM/GRS80, NAD27, NAD83, itd.). Postoji više modula u okviru ovog softverskog paketa, kao što su *Data Check, Blunder Detect, Preanalysis, Level Loop Check, GPS Loop Check*.

Za potrebe primene deformacione analize, *STAR*NET* obezbeđuje generisanje varijans-kovarijans matrice u specijalnom *.dmp fajlu i računanje relativnih elipsi poverenja za svaku tačku između dve epohe merenja (Setan & Mohd, 2003). Pored numeričkih pokazatelja kvaliteta izravnatih merenja, softver obezbeđuje interaktivnu grafičku interpretaciju nepoznatih parametara, sa apsolutnim i relativnim elipsama poverenja u izabranoj razmeri.



Slika 7.2a. Proces obrade baznih linija SREF mreže u *STAR*NET* okruženju

7.3. DEFORMACIONI GEODINAMIČKI MODEL

Dosadašnja istraživanja na teritoriji Vojvodine u geodinamičkom smislu, u većoj meri su se bazirala na primeni geoloških modela pomeranja na osnovu prethodnih geoloških istraživanja i geomorfološke analize metodama daljinske detekcije, što je publikovano u formi Neotektonske karte Republike Srbije. S obzirom da su se realizacijom aktivne mreže permanentnih stanica od 2004. godine na predmetnoj oblasti istraživanja, kao i pasivne geodetske referentne mreže u periodu od 1998. do 2012. godine, u kojoj su sprovedena nezavisna GNSS merenja u dve epohe, prikupili geodetski podaci za potrebe geodinamičke analize pomeranja, inicirana je ideja koja se bazira na utvrđivanju stepena korespondencije dve nezavisno sprovedene metodologije, tj. geodetskog modela pomeranja, koji je baziran na visoko preciznom satelitskom pozicioniranju, sa jedne strane, i geološkog modela pomeranja, koji je baziran na geološkim istražnim radovima i geomorfološkim analizama daljinske detekcije, sa druge strane (Sušić et al., 2012). U tom cilju, formiran je deformacioni geodinamički model koji se sastoji od tačaka pasivne geodetske referentne mreže SREF, sa prostornom rezolucijom od približno 10 kilometara, koja obezbeđuje ravnomerno pokrivanje oblasti istraživanja (Slika 7.3).



Slika 7.3. Dispozicija tačaka formiranog deformacionog geodinamičkog modela pasivne referentne mreže, sa geološkim pozicioniranjem većih raseda na predmetnoj oblasti istraživanja (sa generisanim digitalnim modelom terena)

7.3.1. Izravnjanje GPS/GNSS merenja i MNK ocene nepoznatih parametara

Postupkom procesiranja podataka koji se odnose na pasivnu geodetsku referentnu mrežu, tj. formirani deformacioni model koji ravnomerno pokriva jugoistočni deo Panonskog basena, obezbeđene su **merene veličine** za postupak izravnjanja, odnosno prostorne koordinatne razlike $(\Delta x_i^j, \Delta y_i^j, \Delta z_i^j)$ sa korespondentnom kovarijacionom matricom. **Nepoznati parametri** se odnose na prostorne koordinate (X_i, Y_i, Z_i) svih tačaka formiranog deformacionog modela (Slika 7.3).

Izravnjanje merenja u okviru deformacionog geodinamičkog modela sprovodi se primenom opštih matematičkih modela metode najmanjih kvadrata, pri čemu se koriste funkcionalni i stohastički modeli posrednog izravnjanja. Metod najmanjih kvadrata odnosi se na *minimizaciju sume kvadrata normiranih odstupanja opažanja I od njihove prave vrednosti L, koja predstavlja funkciju nepoznatih parametara, u nekoj pogodno izabranoj metrici*. Uzevši u obzir da je $\mathbf{M}[\mathbf{I}] = \mathbf{L}$, neki autori definišu MNK kao: *minimiziranje sume kvadrata normiranih odstupanja opažanja I od njihovog matematičkog očekivanja M[I]* (Perović, 2005). Funkcionalne veze između merenih veličina i nepoznatih parametara dve tačke u okviru deformacionog geodinamičkog modela, dobijaju se na osnovu sledećeg izraza:

$$\begin{aligned}\Delta \hat{x}_i^j &= \Delta x_i^j + v_{\Delta x_i^j} = \hat{X}_j - \hat{X}_i = F_1(\hat{X}_i, \hat{X}_j) \\ \Delta \hat{y}_i^j &= \Delta y_i^j + v_{\Delta y_i^j} = \hat{Y}_j - \hat{Y}_i = F_1(\hat{Y}_i, \hat{Y}_j) \\ \Delta \hat{z}_i^j &= \Delta z_i^j + v_{\Delta z_i^j} = \hat{Z}_j - \hat{Z}_i = F_1(\hat{Z}_i, \hat{Z}_j)\end{aligned}\quad (7.13)$$

gde se izravnate vrednosti dobijaju dodavanjem popravaka na rezultate merenja.

Jednačine popravaka se mogu napisati u vidu linearnog funkcionalnog modela:

$$\boxed{\mathbf{V} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{f}}$$

$$\begin{pmatrix} v_{\Delta x_1} \\ v_{\Delta y_1} \\ v_{\Delta z_1} \\ \dots \\ v_{\Delta x_n} \\ v_{\Delta y_n} \\ v_{\Delta z_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & \dots & u_1 \\ a_2 & b_2 & \dots & u_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_n & b_n & \dots & u_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{Y}_1 \\ \hat{Z}_1 \\ \dots \\ \hat{X}_m \\ \hat{Y}_m \\ \hat{Z}_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\Delta x_1 \\ -\Delta y_1 \\ -\Delta z_1 \\ \dots \\ -\Delta x_n \\ -\Delta y_n \\ -\Delta z_n \end{pmatrix}\quad (7.14)$$

pri čemu je n broj merenih veličina, a u broj nepoznatih parametara, \mathbf{V} vektor popravaka, \mathbf{A} matrica dizajna, $\hat{\mathbf{x}}$ vektor nepoznatih parametara, a \mathbf{f} vektor slobodnih članova.

Stohastički model je određen izrazom:

$$\mathbf{K}_1 = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{Q}_1 \quad (7.15)$$

U stohastičkom modelu kovarijaciona matrica \mathbf{K}_1 definiše tačnost i stohastičku zavisnost merenih veličina. Vektor merenih veličina \mathbf{l} i kovarijaciona matrica \mathbf{K}_1 , kada su u pitanju nezavisno mereni vektori u mreži, mogu se napisati u sledećem obliku:

$$\mathbf{l} = \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta z_1 \\ \dots \\ \Delta x_n \\ \Delta y_n \\ \Delta z_n \end{pmatrix}, \quad \mathbf{K}_1 = \begin{pmatrix} \sigma_{\Delta x_1}^2 & \sigma_{\Delta x_1 \Delta y_1}^2 & \sigma_{\Delta x_1 \Delta z_1}^2 & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \sigma_{\Delta y_1 \Delta x_1}^2 & \sigma_{\Delta y_1}^2 & \sigma_{\Delta y_1 \Delta z_1}^2 & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \sigma_{\Delta z_1 \Delta x_1}^2 & \sigma_{\Delta z_1 \Delta y_1}^2 & \sigma_{\Delta z_1}^2 & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \sigma_{\Delta x_n}^2 & \sigma_{\Delta x_n \Delta y_n}^2 & \sigma_{\Delta x_n \Delta z_n}^2 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \sigma_{\Delta y_n \Delta x_n}^2 & \sigma_{\Delta y_n}^2 & \sigma_{\Delta y_n \Delta z_n}^2 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \sigma_{\Delta z_n \Delta x_n}^2 & \sigma_{\Delta z_n \Delta y_n}^2 & \sigma_{\Delta z_n}^2 \end{pmatrix} \quad (7.16)$$

gde su $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ merene koordinatne razlike.

Kovarijaciona matrica se sastoji od submatrica koje definišu tačnost i stohastičku zavisnost koordinatnih razlika baznih vektora. Ako se uzme u obzir da se u postupku procesiranja koordinatne razlike dobijaju kao funkcije merenja razlike faze, sledi da su one uvek stohastički zavisne, pri čemu je neophodno odrediti stohastičku zavisnost kako bi se matrica \mathbf{K}_1 na odgovarajući način koristila u postupku izravnjanja. Dakle, u slučaju da postoje zavisni mereni vektori u mreži, potrebno je odrediti stohastičku zavisnost između koordinatnih razlika, a odgovarajuće submatrice u okviru \mathbf{K}_1 biće različite od nule. Kako su merene veličine u GPS/GNSS mrežama stohastički zavisne, primenom uopštenog MNK za funkcionalni i stohastički model, može se napisati (Mihailović & Aleksić, 2008):

$$\begin{aligned} \mathbf{V}^T \cdot \mathbf{K}_1^{-1} \cdot \mathbf{V} &= \mathbf{min}, \text{ za neslobodne geodetske mreže, odnosno} \\ \mathbf{V}^T \cdot \mathbf{K}_1^{-1} \cdot \mathbf{V} &= \mathbf{min}, \text{ za slobodne geodetske mreže} \\ \hat{\mathbf{x}}^T \cdot \hat{\mathbf{x}} &= \mathbf{min} \end{aligned} \quad (7.17)$$

Opšta teorija vezano za Gaus-Markovljev model posrednog izravnjanja geodetskih mreža i MNK ocene, koja je predstavljena u četvrtom poglavlju, ima primenu i kod izravnjanja GPS/GNSS mreža, međutim, bitno je napomenuti da se u ovom slučaju uvek koristi matrica \mathbf{K}_1 , koja definiše stohastičku zavisnost između merenja umesto matrice težina \mathbf{P}_1 , kada su merenja stohastički nezavisna.

7.3.1.1. Rezultati izravnjanja u obe merne epohe

U narednim tabelama prikazani su sumarni podaci o izravnjanju i MNK ocenama u okviru deformacionog geodinamičkog modela pasivne SREF mreže za obe epohe merenja. Izravnjanje je realizovano u okruženju programskog paketa *MicroSurvey STAR*NET*, verzija 7.2.2.7. U prvom koraku sprovedeno je izravnjanje merenja po MNK metodi sa minimalnim ograničenjem, tj. jednom fiksiranom tačkom. U sledećoj fazi je sprovedeno izravnjanje sa minimalizacijom traga kofaktorske matrice na pretpostavljene stabilne tačke.

Tabela 7.2. Sumarni podaci o izravnanju merenja prve merne epohe (minimalno ograničenje)

Prva GPS/GNSS merna kampanja (1998-2002)	
Tip izravnanja	3D
Koordinatni sistem	UTM34N
Elipsoid	GRS80
Datum	Minimalno ograničenje, parcijalno fiksirana jedna tačka (R523)
Podaci o modelu	
Broj tačaka	244
Broj iteracija izravnanja	3
Broj opažanja n	1419
Rang mreže r (broj nepoznatih minus defekt mreže)	732
Broj stepeni slobode f = n - r	687
Suma kvadrata standardnih reziduala $\Omega_1 = (\mathbf{V}^T \mathbf{Q}_1^{-1} \mathbf{V})_1 =$	625.397
<i>A posteriori</i> koeficijent	0.958
Nivo značajnosti	$\alpha = 0.05$
Prosečni standardi koordinata [mm]	$\sigma_x = 6.8$ $\sigma_y = 5.1$ $\sigma_h = 13.9$
Prosečne vrednosti elemenata apsolutnih elipsi grešaka [mm]	A = 16.7 B = 12.5
Prosečne vrednosti elemenata relativnih elipsi grešaka [mm]	A = 7.8 B = 5.5

Test adekvatnosti modela:

Testiramo nultu hipotezu $\mathbf{H}_0: \hat{\sigma}_0^2 = \sigma_0^2$ protiv $\mathbf{H}_a: \hat{\sigma}_0^2 \neq \sigma_0^2$

$$\frac{\chi_{f,\alpha/2}^2 \cdot \sigma_0^2}{f} < \hat{\sigma}_0^2 < \frac{\chi_{f,1-\alpha/2}^2 \cdot \sigma_0^2}{f} \quad (7.18)$$

$$0.947 < \hat{\sigma}_0 < 1.053$$

⇒ prihvatamo nultu hipotezu o jednakosti *a posteriori* i *a priori* disperzionog koeficijenta, **model je adekvatan.**

Tabela 7.3. Sumarni podaci o izravnanju merenja druge merne epohe (minimalno ograničenje)

Prva GPS/GNSS merna kampanja (2011-2012)	
Tip izravnanja	3D
Koordinatni sistem	UTM34N
Elipsoid	GRS80
Datum	Minimalno ograničenje, parcijalno fiksirana jedna tačka (R523)
Podaci o modelu	
Broj tačaka	239
Broj iteracija izravnanja	3
Broj opažanja n	1353
Rang mreže r (broj nepoznatih minus defekt mreže)	717
Broj stepeni slobode f = n - r	636
Suma kvadrata standardnih reziduala $\Omega_1 = (\mathbf{V}^T \mathbf{Q}_1^{-1} \mathbf{V})_1 =$	662.575
<i>A posteriori</i> koeficijent	1.021
Nivo značajnosti	$\alpha = 0.05$
Prosečni standardi koordinata [mm]	$\sigma_x = 8.6$ $\sigma_y = 6.9$ $\sigma_h = 15.1$
Prosečne vrednosti elemenata apsolutnih elipsi grešaka [mm]	A = 21.0 B = 16.6
Prosečne vrednosti elemenata relativnih elipsi grešaka [mm]	$A_{rel} = 10.4$ $B_{rel} = 8.1$

Test adekvatnosti modela:

Testiramo nultu hipotezu $\mathbf{H}_0: \hat{\sigma}_0^2 = \sigma_0^2$ protiv $\mathbf{H}_a: \hat{\sigma}_0^2 \neq \sigma_0^2$

$$\frac{\chi_{f, \alpha/2}^2 \cdot \sigma_0^2}{f} < \hat{\sigma}_0^2 < \frac{\chi_{f, 1-\alpha/2}^2 \cdot \sigma_0^2}{f} \quad (7.19)$$

$$0.945 < \hat{\sigma}_0 < 1.055$$

⇒ prihvatamo nultu hipotezu o jednakosti *a posteriori* i *a priori* disperzionog koeficijenta, **model je adekvatan.**

Tabela 7.4. Sumarni podaci o izravnanju merenja prve merne epohe (parcijalni minimalni trag)

Prva GPS/GNSS merna kampanja (1998-2002)	
Tip izravnanja	3D
Koordinatni sistem	UTM34N
Elipsoid	GRS80
Datum	Parcijalno fiksirane tačke (R430, R512, R530 i R733)
Podaci o modelu	
Broj tačaka	244
Broj iteracija izravnanja	3
Broj opažanja n	1428
Rang mreže r (broj nepoznatih minus defekt mreže)	732
Broj stepeni slobode f = n - r	696
Suma kvadrata standardnih reziduala $\Omega_1 = (\mathbf{V}^T \mathbf{Q}_1^{-1} \mathbf{V})_1 =$	632.252
<i>A posteriori</i> koeficijent	0.953
Nivo značajnosti	$\alpha = 0.05$
Prosečni standardi koordinata [mm]	$\sigma_x = 5.1$ $\sigma_y = 3.8$ $\sigma_h = 10.6$
Prosečne vrednosti elemenata apsolutnih elipsi grešaka [mm]	A = 12.6 B = 9.4
Prosečne vrednosti elemenata relativnih elipsi grešaka [mm]	A = 7.8 B = 5.5

Test adekvatnosti modela:

Testiramo nultu hipotezu $\mathbf{H}_0: \hat{\sigma}_0^2 = \sigma_0^2$ protiv $\mathbf{H}_a: \hat{\sigma}_0^2 \neq \sigma_0^2$

$$\frac{\chi_{f, \alpha/2}^2 \cdot \sigma_0^2}{f} < \hat{\sigma}_0^2 < \frac{\chi_{f, 1-\alpha/2}^2 \cdot \sigma_0^2}{f} \quad (7.20)$$

$$0.947 < \hat{\sigma}_0 < 1.053$$

⇒ prihvatamo nultu hipotezu o jednakosti *a posteriori* i *a priori* disperzionog koeficijenta, **model je adekvatan.**

Tabela 7.5. Sumarni podaci o izravnanju merenja druge merne epohe (parcijalni minimalni trag)

Prva GPS/GNSS merna kampanja (2011-2012)	
Tip izravnanja	3D
Koordinatni sistem	UTM34N
Elipsoid	GRS80
Datum	Parcijalno fiksirane tačke (R430, R512, R530 i R733)
Podaci o modelu	
Broj tačaka	239
Broj iteracija izravnanja	3
Broj opažanja n	1362
Rang mreže r (broj nepoznatih minus defekt mreže)	717
Broj stepeni slobode f = n - r	645
Suma kvadrata standardnih reziduala $\Omega_1 = (\mathbf{V}^T \mathbf{Q}_1^{-1} \mathbf{V})_1 =$	664.860
<i>A posteriori</i> koeficijent	1.015
Nivo značajnosti	$\alpha = 0.05$
Prosečni standardi koordinata [mm]	$\sigma_x = 6.2$ $\sigma_y = 4.9$ $\sigma_h = 11.6$
Prosečne vrednosti elemenata apsolutnih elipsi grešaka [mm]	A = 15.2 B = 11.9
Prosečne vrednosti elemenata relativnih elipsi grešaka [mm]	A_{rel} = 10.4 B_{rel} = 8.1

Test adekvatnosti modela:

Testiramo nultu hipotezu $\mathbf{H}_0: \hat{\sigma}_0^2 = \sigma_0^2$ protiv $\mathbf{H}_a: \hat{\sigma}_0^2 \neq \sigma_0^2$

$$\frac{\chi_{f, \alpha/2}^2 \cdot \sigma_0^2}{f} < \hat{\sigma}_0^2 < \frac{\chi_{f, 1-\alpha/2}^2 \cdot \sigma_0^2}{f} \quad (7.21)$$

$$0.945 < \hat{\sigma}_0 < 1.055$$

⇒ prihvatamo nultu hipotezu o jednakosti *a posteriori* i *a priori* disperzionog koeficijenta, **model je adekvatan.**

7.3.1.2. Testiranje homogenosti tačnosti realizovanih opažanja u obe merne epohe

Na osnovu podataka iz modela izravnjanja sa minimalizacijom traga kofaktorske matrice na pretpostavljene stabilne tačke, iz obe epohe, dobijeni su *a posteriori* disperzioni koeficijenti $(\hat{\sigma}_0^2)_1$ i $(\hat{\sigma}_0^2)_2$, pa je na osnovu toga potrebno sa odgovarajućom verovatnoćom utvrditi njihovu jednakost u cilju dobijanja saznanja da li merenja u obe epohe imaju homogenu tačnost.

U tom cilju postavljaju se nulta i alternativna hipoteza:

$$\mathbf{H}_0 : \mathbf{M}[(\hat{\sigma}_0^2)_1] = \mathbf{M}[(\hat{\sigma}_0^2)_2] = \hat{\sigma}_0^2$$

$$\mathbf{H}_a : \mathbf{M}[(\hat{\sigma}_0^2)_1] \neq \mathbf{M}[(\hat{\sigma}_0^2)_2] \neq \hat{\sigma}_0^2$$

Prihvatanje nulte hipoteze \mathbf{H}_0 ukazuje na homogenu tačnost, dok odbacivanje nulte hipoteze pretpostavlja da nije ostvarena homogena tačnost merenja u obe merne epohe.

Test statistiku određujemo na sledeći način:

$$\mathbf{T} = \frac{(\hat{\sigma}_0^2)_2}{(\hat{\sigma}_0^2)_1} = 1.134 \quad (7.22)$$

pri čemu je broj stepeni slobode u prvoj epohi $\mathbf{f}_1 = 696$, a u drugoj epohi $\mathbf{f}_2 = 645$.

Na osnovu (7.20) i $\mathbf{T} < \mathbf{F}_{1-\alpha; 696, 645} = 1.136$, prihvatamo nultu hipotezu, može se zaključiti da su realizovana opažanja u obe epohe homogene tačnosti, tj. test statistika \mathbf{T} sledi Fišerovu centralnu raspodelu $\mathbf{F}_{\mathbf{f}_2, \mathbf{f}_1}$.

Kada se uzme u obzir da je prihvaćena nulta hipoteza o homogenosti tačnosti merenja u obe epohe, kao i na osnovu (5.4), računamo objedinjenu eksperimentalnu varijansu, odnosno jedinstveni *a posteriori* disperzioni koeficijent:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{f}_1 \cdot (\hat{\sigma}_0^2)_1 + \mathbf{f}_2 \cdot (\hat{\sigma}_0^2)_2}{\mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2} = 0.967 \quad (7.23)$$

7.3.2. Deformaciona analiza geodinamičkog modela SREF mreže

Metodologija utvrđivanja stabilnih tačaka u ovom slučaju, bazira se na istovremenom izravanju rezultata merenja baznih vektora u obe epohe, na osnovu prethodno usvojenih uslovno stabilnih tačaka. Ova metoda je razvijena na Univerzitetu u Karlsrueru i njena originalnost datira još od 1975. godine, stoga je poznata kao Karlsruhe metod. Za savremenu primenu, ovaj metod su razvili Heck B. i Kunz E., 1977., Koch K., 1980., Heck B., 1983. i drugi.

Prva faza se bazira na nezavisnom izravanju vektora SREF mreže pojedinih epoha po MNK metodi (poglavlje 7.3.1.1). Izravanja pojedinačnih epoha sprovedena su sa minimizacijom traga kofaktorske matrice na pretpostavljene stabilne tačke.

U **drugoј fazi** se obavlja kombinovano (zajedničko) izravanje obe epohe, pod pretpostavkom podudarnosti osnovnih tačaka (tačaka koje definišu datum) i iste razmere mreže u obe epohe, sa minimalizacijom traga kofaktorske matrice na pretpostavljene stabilne tačke. Skup osnovnih tačaka, koji je usvojen kao skup uslovno stabilnih tačaka odnosi se na datumske tačke, koje ravnomerno pokrivaju oblast istraživanja.

Preliminarna provera podudarnosti položajnih koordinata uslovno stabilnih tačaka u obe epohe i određivanje razmere mreže, sprovedeni su primenom Helmertove transformacije koordinata osnovnih tačaka druge na prvu epohu, primenom Gausovog uslova minimuma (Mihailović & Aleksić, 2008):

$$\mathbf{V}'^T \mathbf{V} = \sum_{i=1}^n (\mathbf{v}_{x'_i}^2 + \mathbf{v}_{y'_i}^2) = \min \quad (7.24)$$

Jednačine popravaka mogu se predstaviti u sledećem obliku:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{x'_i} &= \mathbf{x}_i d\mathbf{q} - \mathbf{y}_i d\mathbf{j} + \mathbf{c}_x + \mathbf{x}_i - \mathbf{x}'_i \\ \mathbf{V}_{y'_i} &= \mathbf{y}_i d\mathbf{q} + \mathbf{x}_i d\mathbf{j} + \mathbf{c}_y + \mathbf{y}_i - \mathbf{y}'_i \\ \mathbf{V}' &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{t} + \mathbf{f} \end{aligned} \quad (7.25)$$

gde \mathbf{t} označava vektor transformacionih parametara iz druge u prvu epohu u horizontalnoj ravni:

$$\mathbf{t}^T = \begin{bmatrix} dq \\ d\varphi \\ c_x \\ c_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000000 \\ -2.779E-08 \\ -0.112939 \\ 0.360008 \end{bmatrix} \quad (7.26)$$

gde su: dq - promena razmere po obe ose, $d\varphi$ - ugao rotacije, c_x i c_y - translacije po x, odnosno y osi.

Eksperimentalna standardna devijacija je:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_{x_i}^2 + v_{y_i}^2)}{2n - 4}} = 0.0019 \text{ m} \quad (7.27)$$

Sračunati parametri transformacije i eksperimentalna standardna devijacija potvrđuju preliminarnu podudarnost položajnih koordinata i jednakost razmere.

Takođe, **test kongruencije** na datumskim tačkama potvrdio je preliminarnu podudarnost istih u obe epohe merenja. Na osnovu (5.10), (5.12) i (5.18) dobijeni su sledeći rezultati (Tabela 7.6):

Tabela 7.6. Preliminarni test kongruencije datumskih tačaka u obe merne epohe

Tačka	$T_j = \frac{\mathbf{d}_{2j}^T \mathbf{Q}_{d_{2j}}^{-1} \mathbf{d}_{2j}}{2\sigma_0^2}$	$F_{0.95} (2, 1341)$	Status
R430	0.038 <	3.002	stabilna
R512	0.120 <		stabilna
R530	1.135 <		stabilna
R733	1.983 <		stabilna

a) Nezavisno izravnjanje pojedinih epoha merenja

Primenjen je metod posrednog izravnjanja, nezavisno za obe epohe merenja, sa funkcionalnim modelom:

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{A}\mathbf{x}_i + \mathbf{f}_i, \quad i=1, 2, \dots, k \quad (7.28)$$

gde je ***k*** - broj epoha. Dakle, u ovom slučaju ***k*** = 2. Iz izravnjanja obe epohe, pojedinačno se određuju kvadratne forme:

$$\Omega_1 = (\mathbf{V}^T \mathbf{K}_1^{-1} \mathbf{V})_1 = 632.252 \quad (7.29)$$

$$\Omega_2 = (\mathbf{V}^T \mathbf{K}_1^{-1} \mathbf{V})_2 = 664.860$$

Kvadratna forma koja sadrži informaciju samo o greškama merenja, može se predstaviti kao suma pojedinačnih kvadratnih formi:

$$\Omega_0 = \sum_{i=1}^2 \Omega_i = (\mathbf{V}^T \mathbf{K}_1^{-1} \mathbf{V})_1 + (\mathbf{V}^T \mathbf{K}_1^{-1} \mathbf{V})_2 = 1297.112 \quad (7.30)$$

sa brojem stepeni slobode \mathbf{b} :

$$\mathbf{b} = \sum_{i=1}^2 \mathbf{b}_i = 1341 \quad (7.31)$$

gde je : $\mathbf{b}_i = \mathbf{n}_i - r(\mathbf{A}_i)$, ($i = 1, 2, \dots, k$).

Pojedinačna izravnjenja po epohama se sprovode u cilju identifikacije i eliminisanja eventualnih grubih grešaka iz rezultata merenja (globalni test, *data snooping*), testiranje homogenosti merenja, jednakost razmera i slično.

b) Kombinovano (zajedničko) izravnjanje merenja vektora sa ispitivanjem podudarnosti stabilnih tačaka

S obzirom da se stabilnost pretpostavljenih stabilnih tačaka usvaja na osnovu prethodnih geoloških i geofizičkih istraživanja terena u kom su stabilizovane, kao i na osnovu preliminarnog utvrđivanja stabilnosti Helmertovom transformacijom koordinata tačaka iz sistema druge u sistem prve epohe, neophodno je navedene činjenice dodatno verifikovati, kako bi bili sigurni da je skup osnovnih tačaka, tj. tačaka koje definišu datum geodetske mreže, stabilan.

Pri zajedničkom izravnjanju, vektor nepoznatih koordinata deli se na tri subvektora:

$$\mathbf{X}^T = [\mathbf{Z}^T \quad \mathbf{X}_1^T \quad \mathbf{X}_2^T] \quad (7.32)$$

gde je :

- \mathbf{Z} - subvektor osnovnih tačaka za koje se uzima kao da su uslovno stabilne u obe epohe,
- \mathbf{X}_1 i \mathbf{X}_2 - subvektori tačaka za koje se pretpostavlja da su uslovno nestabilne (pomerene)

Subvektor uslovno stabilnih tačaka \mathbf{Z} ima iste nepoznate parametre u obe epohe, dok subvektori \mathbf{X}_1 i \mathbf{X}_2 imaju dvostruke koordinate.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_1^T &= [\mathbf{X}_1^1 \quad \mathbf{X}_2^1 \quad \dots \quad \mathbf{X}_n^1] \\ \mathbf{X}_2^T &= [\mathbf{X}_1^2 \quad \mathbf{X}_2^2 \quad \dots \quad \mathbf{X}_n^2] \end{aligned} \quad (7.33)$$

U tabeli 7.7. navedeni su sumarni podaci o zajedničkom izravnjanju merenja prve i druge epohe, sa parcijalnim minimalnim tragom na pretpostavljene stabilne tačke. Zajedničko izravnjanje sprovodi se primenom metode posrednih merenja, u skladu sa teorijskom postavkom koja je predstavljena u četvrtom poglavlju. Naknadnom analizom potrebno je verifikovati preliminarnu proveru stabilnosti datumskih tačaka.

Tabela 7.7. Sumarni podaci o zajedničkom izravanju prve i druge merne epohe, sa parcijalnim minimalnim tragom na pretpostavljene stabilne tačke

Zajedničko (kombinovano) izravanje prve merne epohe (1998-2002) i druge merne epohe (2011-2012)	
Tip izravanja	3D
Koordinatni sistem	UTM34N
Elipsoid	GRS80
Datum	Parcijalno fiksirane tačke (R430, R512, R530 i R733)
Podaci o modelu	
Broj tačaka	479
Broj iteracija izravanja	3
Broj opažanja n	2778
Rang mreže r (broj nepoznatih minus defekt mreže)	1437
Broj stepeni slobode f = n - r	1341
Suma kvadrata standardnih reziduala $\Omega_1 = (\mathbf{V}^T \mathbf{Q}_1^{-1} \mathbf{V})_1 =$	1315.271
<i>A posteriori</i> koeficijent	0.990
Nivo značajnosti	$\alpha = 0.05$
Prosečni standardi koordinata [mm]	$\sigma_x = 5.6$ $\sigma_y = 4.3$ $\sigma_h = 11.1$
Prosečne vrednosti elemenata apsolutnih elipsi grešaka [mm]	A = 13.7 B = 10.5
Prosečne vrednosti elemenata relativnih elipsi grešaka merenja [mm]	A_{rel} = 9.0 B_{rel} = 6.7

Test adekvatnosti modela:

Testiramo nultu hipotezu $\mathbf{H}_0: \hat{\sigma}_0^2 = \sigma_0^2$ protiv $\mathbf{H}_a: \hat{\sigma}_0^2 \neq \sigma_0^2$

$$\frac{\chi_{f,\alpha/2}^2 \cdot \sigma_0^2}{f} < \hat{\sigma}_0^2 < \frac{\chi_{f,1-\alpha/2}^2 \cdot \sigma_0^2}{f} \quad (7.34)$$

$$0.962 < \hat{\sigma}_0^2 < 1.038$$

⇒ prihvatamo nultu hipotezu o jednakosti *a posteriori* i *a priori* disperzionog koeficijenta, **model je adekvatan.**

Na osnovu zajedničkog izravnjanja sračunata je kvadratna forma $\mathbf{v}_Z^T \mathbf{P} \mathbf{v}_Z$, koja sadrži informacije o greškama merenja i pomeranju nestabilnih tačaka, a zatim se formira *nova* kvadratna forma Ω_H :

$$\Omega_H = \Omega_Z - \Omega_o = \mathbf{v}_Z^T \mathbf{P} \mathbf{v}_Z - \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = 18.159 \quad (7.35)$$

koja sadrži informacije samo o **pomeranju nestabilnih tačaka**.

Dokazano je da se kvadratna forma Ω_H može sračunati i na sledeći način (Heck, 1983):

$$\Omega_H = (\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1)^T \mathbf{Q}_X^{-1} (\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1) \quad (7.36)$$

gde je:

$$\mathbf{Q}_X^{-1} = \mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_1^{-1} \mathbf{A} \quad (7.37)$$

Kvadratna forma ima f stepeni slobode:

$$\mathbf{f} = (\mathbf{k} - 1) \cdot \mathbf{m} \cdot \mathbf{p}_o - \mathbf{d} \quad (7.38)$$

gde su:

- \mathbf{k} - broj epoha u zajedničkom izravnjanju,
- \mathbf{m} - dimenzija mreže ($m = 3$, za 3D mreže),
- \mathbf{P}_o - broj osnovnih tačaka,
- \mathbf{d} - defekt mreže.

Identifikacija stabilnih osnovnih tačaka sprovodi se primenom testiranja opštih linearnih hipoteza, nakon izravnjanja pojedinačnih epoha i zajedničkog izravnjanja mreže:

Testiramo nultu i alternativnu hipotezu:

$$\mathbf{H}_0: \begin{matrix} \mathbf{E}[\mathbf{l}] = \hat{\mathbf{l}} = \mathbf{A}\mathbf{x} \\ \mathbf{B}\mathbf{x} = \mathbf{d} = \mathbf{0} \end{matrix} \quad \text{protiv} \quad \mathbf{H}_a: \begin{matrix} \mathbf{E}[\mathbf{l}] = \hat{\mathbf{l}} = \mathbf{A}\mathbf{x} \\ \mathbf{B}\mathbf{x} = \mathbf{d} \neq \mathbf{0} \end{matrix} \quad (7.39)$$

Prilikom testiranja ovih hipoteza, uključeni su i matematički uslovi koje treba da ispune nepoznati parametri, tj. $\mathbf{B}\mathbf{x} = \mathbf{d}$. Ovim matematičkim uslovima definiše se da razlika koordinata dobijenih iz izravnjanja prve i druge epohe za pretpostavljene stabilne tačke, treba da je jednaka nuli, a za pretpostavljene nestabilne tačke različita od nule.

Uzevši u obzir da razlike koordinata dveju epoha nisu jednake nuli, pomoću statističkih testova treba konstatovati da li su ove razlike nastale kao posledica grešaka merenja ili zbog grešaka merenja i pomeranja tačaka. U prvom slučaju, smatra se da su osnovne tačke stabilne, dok se u drugom smatra da su nestabilne.

Za testiranje podudarnosti osnovnih tačaka, test statistika glasi:

$$\mathbf{T} = \frac{\Omega_H / \mathbf{f}}{\Omega_o / \mathbf{b}} \Big|_{\mathbf{H}_0} \sim F_{0.95; \mathbf{f}, \mathbf{b}} \quad (7.40)$$

$$\mathbf{T} = 1.5644 < F_{1-\alpha, 12, 1341} = 1.7594$$

Na osnovu dobijenih rezultata, **prihvata se hipoteza \mathbf{H}_0 o nepomerivosti (stabilnosti) datumskih tačaka**. Uzevši u obzir da je $\mathbf{T} < F_{1-\alpha, \mathbf{f}, \mathbf{b}}$, test statistika \mathbf{T} sledi Fišerovu centralnu raspodelu.

7.3.2.1. Lokalizacija pomeranja tačaka deformacionog modela

Na osnovu sprovedenog zajedničkog izravnjanja (Tabela 7.6), dobijene su ocene $\hat{\mathbf{Z}}$, $\hat{\mathbf{X}}_1$, $\hat{\mathbf{X}}_2$, $\hat{\boldsymbol{\sigma}}^2$ i matrica kofaktora:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{Z}}\hat{\mathbf{Z}}} & \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{Z}}\hat{\mathbf{X}}_1} & \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{Z}}\hat{\mathbf{X}}_2} \\ \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}_1\hat{\mathbf{Z}}} & \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}_1\hat{\mathbf{X}}_1} & \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}_1\hat{\mathbf{X}}_2} \\ \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}_2\hat{\mathbf{Z}}} & \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}_2\hat{\mathbf{X}}_1} & \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}_2\hat{\mathbf{X}}_2} \end{bmatrix} \quad (7.41)$$

Testiraju se hipoteze:

$$\mathbf{H}_0: \mathbf{M}(\hat{\mathbf{X}}_1 - \hat{\mathbf{X}}_2) = \mathbf{M}(\hat{\mathbf{d}}) = \mathbf{0} \quad \text{protiv} \quad \mathbf{H}_a: \mathbf{M}(\hat{\mathbf{X}}_1 - \hat{\mathbf{X}}_2) = \mathbf{M}(\hat{\mathbf{d}}) \neq \mathbf{0} \quad (7.42)$$

gde je:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}} = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}_1\hat{\mathbf{X}}_1} + \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}_2\hat{\mathbf{X}}_2} - \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}_1\hat{\mathbf{X}}_2} - \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}_2\hat{\mathbf{X}}_1}^T \quad (7.43)$$

Ukoliko je test statistika:

$$\mathbf{T} \leq \mathbf{F}_{1-\alpha, f, n-u+d} \quad (7.44)$$

prihvatao hipotezu o nepomerivosti ostalih tačaka. U suprotnom, prihvatamo alternativnu hipotezu, na osnovu čega se dalje sprovodi pojedinačna lokalizacija pomeranja svih tačaka.

U tom cilju, za svaku pojedinačnu tačku, testiraju se hipoteze:

$$\mathbf{H}_0: \hat{\mathbf{d}}_i = \mathbf{0} \quad \text{protiv} \quad \mathbf{H}_a: \hat{\mathbf{d}}_i \neq \mathbf{0} \quad (7.45)$$

pri čemu je:

$$\hat{\mathbf{d}}_i = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{y}}_{i,1} - \hat{\mathbf{y}}_{i,2} \\ \hat{\mathbf{x}}_{i,1} - \hat{\mathbf{x}}_{i,2} \end{bmatrix} \quad (7.46)$$

a matrica $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}_i}$ se računa za svaku pojedinačnu tačku:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}_i} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{d,yy} & \mathbf{q}_{d,yx} \\ \mathbf{q}_{d,xy} & \mathbf{q}_{d,xx} \end{bmatrix} \quad (7.47)$$

gde figurišu odgovarajući članovi kofaktorske matrice $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}}$ (7.41) za svaku pojedinačnu tačku:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_{d,yy} &= \mathbf{q}_{y_i y_i}^{11} + \mathbf{q}_{y_i y_i}^{22} - 2\mathbf{q}_{y_i y_i}^{12} \\ \mathbf{q}_{d,xx} &= \mathbf{q}_{x_i x_i}^{11} + \mathbf{q}_{x_i x_i}^{22} - 2\mathbf{q}_{x_i x_i}^{12} \\ \mathbf{q}_{d,xy} &= \mathbf{q}_{x_i y_i} = \mathbf{q}_{y_i x_i}^{11} + \mathbf{q}_{y_i x_i}^{22} - \mathbf{q}_{y_i x_i}^{12} - \mathbf{q}_{y_i x_i}^{21} \end{aligned} \quad (7.48)$$

Test statistika se računa na osnovu sledećeg izraza:

$$T|_{H_0} = \frac{\hat{\mathbf{d}}_i^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}_i}^{-1} \hat{\mathbf{d}}_i / h}{\hat{\sigma}_0^2 / f} |_{H_0} \sim F_{h,f} \quad (7.49)$$

pri čemu je $h = \text{rang } \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}_i}$.

Ako važi $T < F_{1-\alpha, h, f}$, prihvata se hipoteza o nepomerivosti (stabilnosti) tačke. U suprotnom, tačka je pomerena.

Mogu se napisati jednačine **relativnih elipsi grešaka**, koje predstavljaju oblast poverenja položajne podudarnosti tačaka iz obe epohe merenja, na osnovu sledećeg izraza:

$$\hat{\mathbf{d}}_i^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}_i}^{-1} \mathbf{d}_i = 2\hat{\sigma}_0^2 F_{1-\alpha, 2, f} \quad (7.50)$$

gde se poluose određuju na osnovu:

$$A_j = \sqrt{\hat{\sigma}_0^2 \cdot 2 \cdot F_{1-\alpha, 2, f} \cdot \lambda_j}, \quad (j=1, 2) \quad (7.51)$$

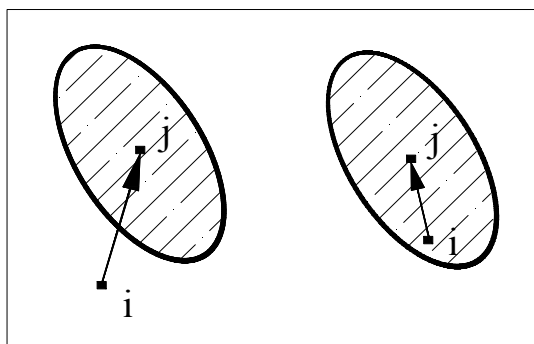
a λ_j predstavljaju sopstvene vrednosti matrice $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}_i}$ iz (7.47), koje se računaju na sledeći način:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{1}{2} (\mathbf{q}_{xxd} + \mathbf{q}_{yyd} + \mathbf{k}) \\ \lambda_2 &= \frac{1}{2} (\mathbf{q}_{xxd} + \mathbf{q}_{yyd} - \mathbf{k}) \\ \mathbf{k} &= \sqrt{(\mathbf{q}_{xxd} - \mathbf{q}_{yyd})^2 + 4\mathbf{q}_{yxd}^2} \end{aligned} \quad (7.52)$$

Pravac θ , koji predstavlja orijentaciju relativne elipse za svaku pojedinačnu tačku, predstavlja ugao između velike poluose A i pozitivnog smera X koordinatne ose, računa se na osnovu :

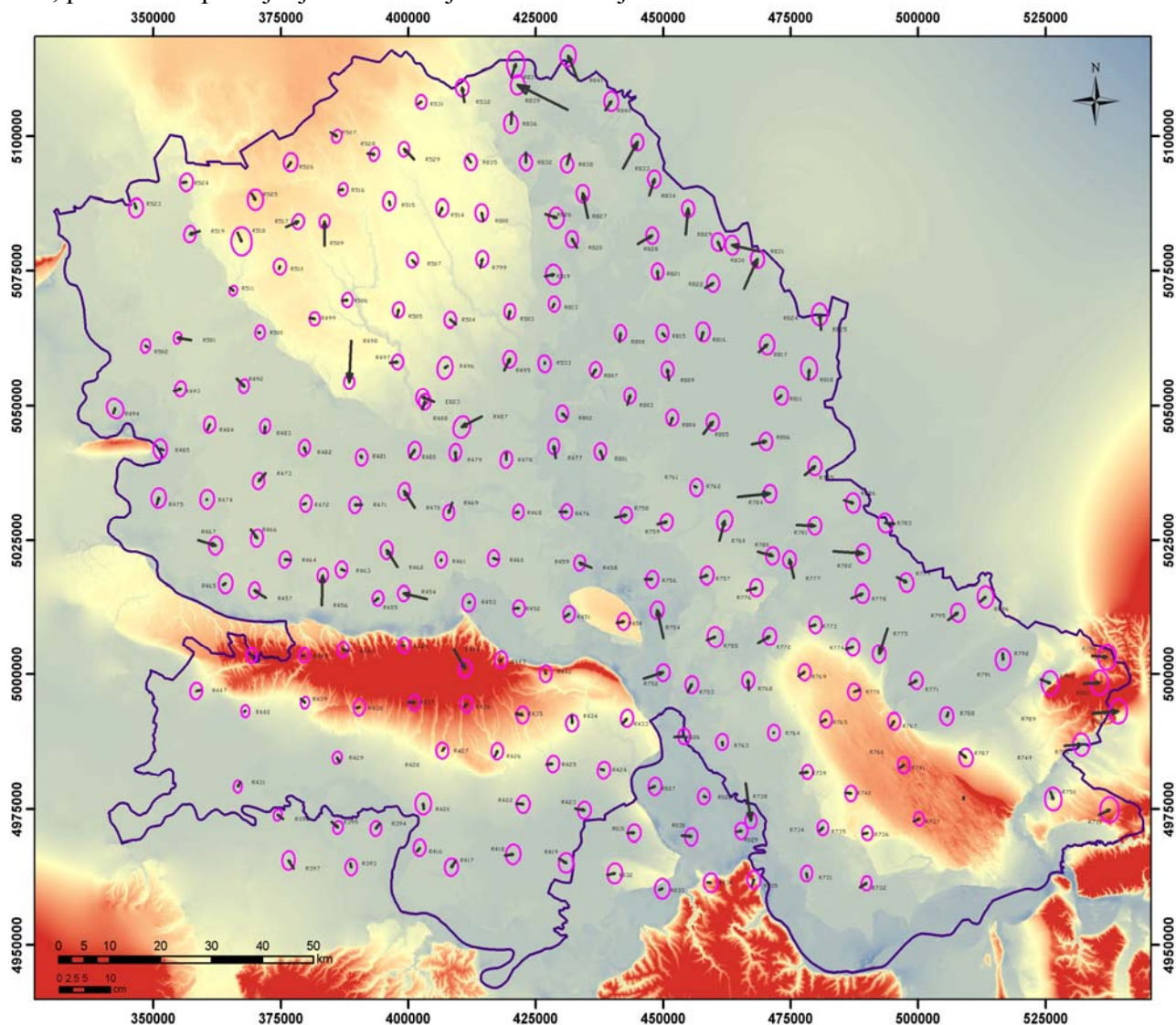
$$\text{tg } 2\theta = \frac{2\mathbf{q}_{xyd}}{\mathbf{q}_{xxd} - \mathbf{q}_{yyd}} \quad (7.53)$$

Poluose relativne elipse grešaka pomnožene su faktorom $\sqrt{2 \cdot F_{1-\alpha, 2, f}}$, pa površina elipse grešaka odgovara oblasti poverenja sa verovatnoćom $1 - \alpha = 0.95$.



Slika 7.4. Primena relativnih elipsi grešaka u analizi deformacija, nestabilna tačka (levo) i stabilna tačka (desno)

Na slici 7.5. prikazani su vektori pomeranja u horizontalnoj ravni sa relativnim elipsama poverenja, za verovatnoću $1 - \alpha = 0.95$ i moć kriterijuma $1 - \beta = 80\%$. Radi bolje grafičke interpretacije i analize deformacija, vektori pomeranja i relativne elipse grešaka uvećani su 100.000 puta. Središte relativne elipse je postavljeno u centar tačke iz druge epohe, dok su vektori pomeranja orijentisani u smeru od tačke prve ka tački druge epohe. Ako se vektor pomeranja nalazi van površine elipse, odbacuje se nulta hipoteza, odnosno sa verovatnoćom od 0.95, prihvata se postojanje deformacije na određenoj tački.

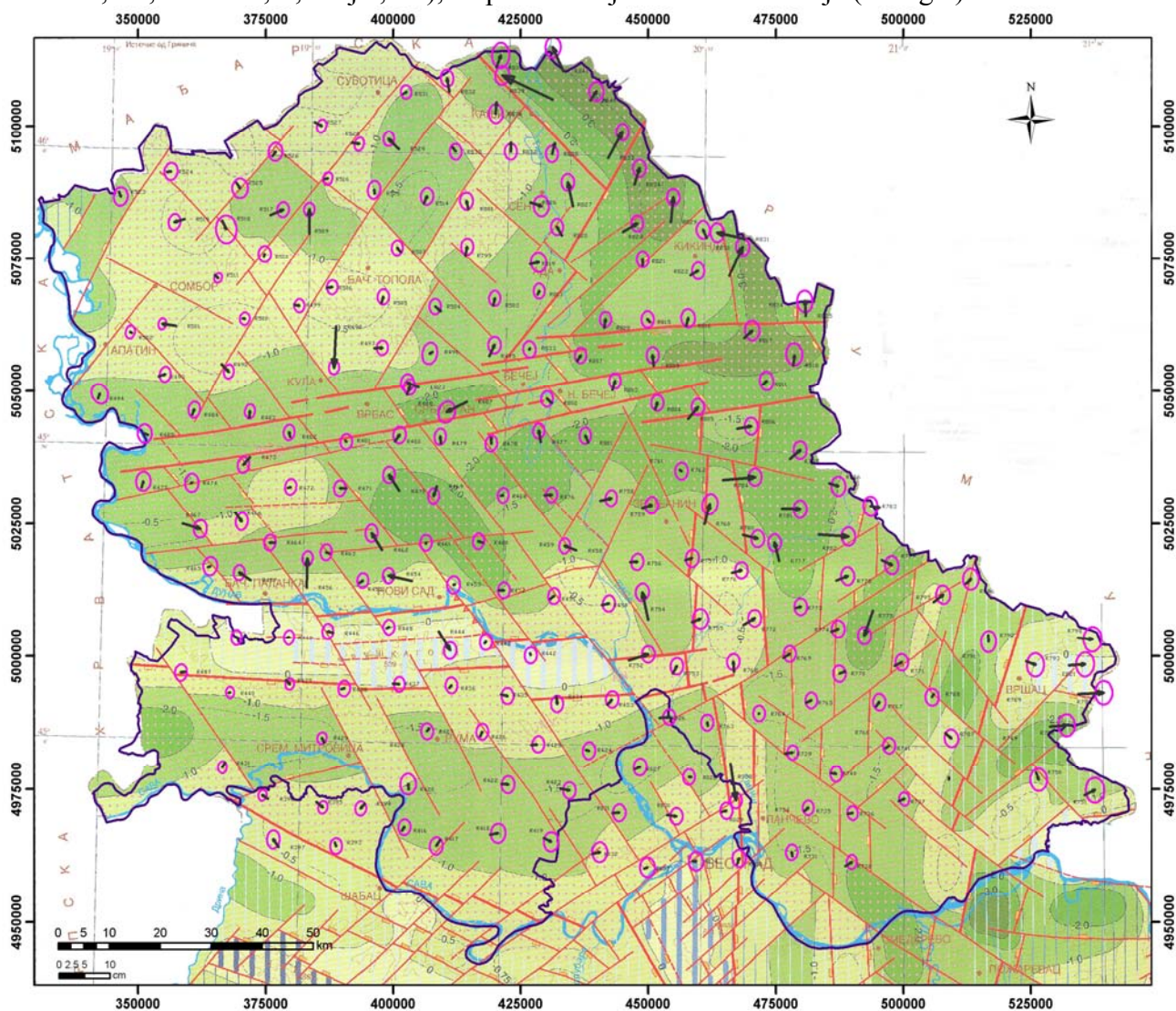


Slika 7.5. Vektori pomeranja tačaka u horizontalnoj ravni sa relativnim elipsama grešaka, nivo poverenja 95 % (sa uvećanjem od 100.000 puta), između prve GPS/GNSS merne epohe [1998-2002] i druge GPS/GNSS merne epohe [2011-2012]

Kao što se može videti iz dobijenih rezultata, u oblasti južno od Fruške gore nisu detektovana signifikantna pomeranja na tačkama pasivne referentne mreže, tako da se može konstatovati da se radi o stabilnom bloku. Na području severno i severozapadno od Novog Sada i pojasa oko Fruške gore, detektovana su signifikantna pomeranja na tačkama R454, R452, R462 i R470, što korespondira identifikovanim rasednim linijama i istraživanjima sprovedenim u okviru geološkog modela pomeranja. Na severoistočnom delu oblasti istraživanja, detektovana su signifikantna pomeranja na više tačaka, sa preovlađujućim trendom koji je orijentisan smerom jugozapad-severoistok sa tendencijom okretanja ka istoku (oblast ispod geološkog raseda

Kikindske subdepresije), što odgovara globalnim analizama istraživanja uticaja Jadranskog bloka na tektoniku Panonskog basena, koje je sproveo Grenerczy, 2005. Karakterističan je i blok koji pripada oblasti istočno od Zrenjanina, pri čemu su na više tačaka detektovana pomeranja sa trendom orijentisanim zapad-istok, što je i identičan slučaj sa blokom u regionu Vršca, pri čemu dobijeni rezultati korespondiraju geološkim i geomorfološkim istraživanjima, odnoseći se na celine kao što su Fruška gora i Vršачke planine. Kada su u pitanju geomorfološka istraživanja na predmetnoj oblasti, Fruška gora predstavlja tektonski izdignut blok Vardarske zone (horst), i uključujući Vršачke planine (izdignut blok Srpsko-makedonske mase), izdvojeni su iz prostora nizije i predstavljaju zasebne pozitivne morfostrukture (Dimitrijević, 1992; Čalić et al, 2012), pri čemu je važno napomenuti da su morfostrukture po definiciji, reljefne celine nastale kombinacijom tektonske aktivnosti i egzogenih procesa. U oblasti severno i južno od Bačke Topole, na tačkama R509 i R498, prisutna su pomeranja neobično većeg intenziteta sa suprotno orijentisanim smerovima, pri čemu treba u kasnijim epohama merenja obratiti pažnju na ovo područje, u cilju sigurne detekcije transtenzionog obrasca aktiviranja raseda u ovoj oblasti.

Na slici 7.6. prikazani su vektori pomeranja tačaka deformacionog geodinamičkog modela sa relativnim elipsama poverenja, na Neotektonskoj karti Republike Srbije (autori: Marović, M., Đoković, I., Toljić, M.), na predmetnoj oblasti istraživanja (Prilog 1).



Slika 7.6. Vektori pomeranja sa relativnim elipsama poverenja na Neotektonskoj karti Republike Srbije

Tabela 7.8. Sumarni podaci o elementima pomeranja sa relativnim elipsama grešaka $1 - \alpha = 0.95$

Tačka	Δ_x [cm]	Δ_y [cm]	A_{rel} [cm]	B_{rel} [cm]	θ_{rel} ° - '	Tačka	Δ_x [cm]	Δ_y [cm]	A_{rel} [cm]	B_{rel} [cm]	θ_{rel} ° - '
E821	0.19	3.13	2.25	1.75	2-44	R447	-0.12	-0.83	1.56	1.17	7-26
E823	0.84	-2.20	1.59	1.25	5-26	R448	0.28	-0.23	1.42	1.01	4-40
R026	0.16	1.88	1.48	1.18	1-02	R449	0.11	0.46	1.33	0.99	6-49
R027	0.38	1.01	1.60	1.27	6-54	R450	0.30	1.37	1.56	1.18	7-24
R028	0.10	-0.45	1.47	1.16	2-55	R451	0.51	0.76	1.50	1.14	5-57
R029	0.20	0.91	1.53	1.22	179-22	R452	0.02	0.94	1.50	1.15	2-45
R030	-0.19	1.85	1.57	1.24	4-02	R453	-0.15	-0.24	1.65	1.25	4-16
R031	0.03	1.30	1.59	1.26	2-34	R454	1.04	-4.54	1.43	1.13	3-26
R032	0.32	1.46	1.86	1.46	3-59	R455	0.51	0.64	1.40	1.08	6-14
R033	0.25	0.63	1.85	1.45	0-11	R456	5.48	0.20	1.38	1.03	7-59
R034	-0.05	0.73	1.75	1.38	179-41	R457	1.43	-2.24	1.45	1.07	7-28
R035	1.10	0.38	1.61	1.28	177-08	R458	0.88	-2.25	1.44	1.09	6-40
R393	-0.67	0.20	1.51	1.15	2-10	R460	0.27	-0.83	1.50	1.11	5-38
R394	-0.92	-0.80	1.38	1.07	6-57	R461	0.23	0.09	1.50	1.12	3-18
R395	-0.99	1.24	1.20	0.92	15-42	R462	3.19	-2.07	1.66	1.20	3-40
R396	0.72	-1.08	1.05	0.80	14-38	R463	0.24	-0.59	1.51	1.11	6-43
R397	1.47	-1.02	1.72	1.23	2-53	R464	0.05	-1.03	1.52	1.10	9-21
R416	0.65	0.49	1.51	1.18	4-51	R465	0.22	0.49	1.75	1.36	7-27
R417	-1.09	-0.76	1.63	1.29	4-26	R466	-1.60	1.21	1.65	1.17	7-59
R418	0.25	1.56	1.83	1.42	3-52	R467	-1.01	3.41	1.67	1.28	5-15
R419	-0.71	1.38	1.83	1.45	3-22	R468	0.07	0.51	1.43	1.06	8-40
R420	0.99	-0.10	1.95	1.53	0-10	R469	-1.84	-0.64	1.46	1.06	8-29
R422	-0.07	1.31	1.62	1.27	2-32	R470	3.02	-2.02	1.58	1.15	7-37
R423	-0.30	1.79	1.58	1.26	1-57	R471	-0.03	-1.30	1.49	1.15	6-00
R424	-0.15	0.63	1.59	1.24	8-07	R472	0.19	0.58	1.51	1.10	10-10
R425	0.10	1.08	1.54	1.17	6-34	R473	-1.45	-1.28	1.51	1.12	9-51
R426	0.90	0.46	1.51	1.15	3-32	R474	0.06	0.13	1.75	1.33	2-56
R427	0.53	0.39	1.49	1.17	176-57	R475	1.18	0.34	1.81	1.42	3-46
R429	-0.79	0.45	1.13	0.89	15-34	R476	0.04	1.36	1.41	1.08	7-31
R431	-0.83	-0.49	1.11	0.84	2-15	R477	2.09	-0.40	1.45	1.10	6-05
R433	0.92	0.86	1.54	1.22	4-28	R478	1.16	-0.02	1.50	1.12	11-20
R434	-1.35	0.10	1.54	1.19	3-51	R479	1.28	-0.10	1.53	1.13	9-27
R435	-0.25	1.22	1.52	1.18	0-35	R480	1.20	0.90	1.58	1.23	7-35
R436	0.51	0.43	1.50	1.16	176-40	R481	-0.24	0.17	1.47	1.15	5-53
R437	-0.10	1.24	1.40	1.07	0-16	R482	0.82	-0.25	1.46	1.08	10-36
R438	0.15	0.59	1.47	1.14	9-01	R483	1.21	0.09	1.36	0.99	9-45
R439	-0.72	0.80	1.08	0.84	12-06	R484	0.99	0.40	1.52	1.14	8-33
R440	0.14	0.25	1.07	0.82	0-47	R485	0.25	-0.62	1.75	1.37	178-55
R442	-0.37	0.11	1.53	1.19	4-03	R487	-1.95	-3.87	2.04	1.59	18-59
R443	0.33	0.29	1.54	1.21	5-09	R488	1.42	0.51	1.46	1.14	4-57
R444	-3.57	2.24	1.58	1.23	3-35	R492	-1.37	1.40	1.33	0.95	9-44
R445	0.20	0.46	1.41	1.09	1-57	R493	0.40	1.28	1.45	1.07	9-32
R446	0.29	-1.01	1.45	1.06	5-44	R494	0.92	0.34	1.88	1.54	150-25

Tačka	Δ_x [cm]	Δ_y [cm]	A_{rel} [cm]	B_{rel} [cm]	θ_{rel} ° - '	Tačka	Δ_x [cm]	Δ_y [cm]	A_{rel} [cm]	B_{rel} [cm]	θ_{rel} ° - '
R495	2.05	1.05	1.58	1.24	1-34	R752	1.14	3.77	1.56	1.26	3-22
R496	-0.31	-0.56	2.06	1.46	12-10	R753	1.37	0.81	1.57	1.26	4-33
R497	0.12	1.52	1.39	1.10	4-03	R754	5.21	-1.19	1.64	1.29	8-53
R498	-7.70	-0.40	1.29	1.01	3-36	R755	0.62	1.63	1.87	1.49	177-53
R499	-0.14	0.98	1.26	1.01	1-52	R756	0.05	1.41	1.56	1.18	9-00
R500	-0.02	0.36	1.21	0.96	6-15	R757	0.38	1.36	1.65	1.28	5-41
R501	0.39	-2.64	1.09	0.74	12-50	R758	0.48	2.12	1.48	1.13	7-52
R502	0.16	-0.34	1.26	0.90	11-14	R759	0.47	1.77	1.58	1.20	6-52
R503	1.32	0.27	1.43	1.10	2-10	R760	3.70	1.00	1.96	1.45	15-49
R504	-0.87	1.11	1.46	1.13	3-57	R762	-0.23	0.39	1.60	1.23	1-13
R505	1.15	0.31	1.44	1.13	5-09	R763	0.63	-0.06	1.51	1.19	2-09
R506	0.11	1.00	1.34	1.05	4-08	R764	0.05	0.04	1.47	1.16	0-05
R507	0.73	-0.61	1.41	1.10	4-06	R765	0.44	0.96	1.48	1.17	1-17
R509	4.46	0.00	1.28	1.01	8-54	R767	0.83	0.62	1.55	1.23	176-56
R510	0.43	0.18	1.49	1.24	178-53	R768	1.88	-0.12	1.51	1.20	2-46
R511	-0.51	0.64	0.93	0.74	21-50	R769	0.75	1.20	1.49	1.19	0-57
R514	1.31	0.62	1.59	1.22	2-43	R770	0.38	1.10	1.53	1.23	175-49
R515	0.67	-0.12	1.68	1.22	9-06	R771	0.70	1.37	1.55	1.24	176-39
R516	0.10	0.68	1.23	0.91	14-34	R772	1.27	2.22	1.58	1.28	0-14
R517	1.02	2.41	1.40	1.13	9-12	R773	0.23	0.96	1.57	1.24	179-20
R518	-1.57	0.75	2.63	1.99	177-56	R774	0.45	1.38	1.59	1.25	179-08
R519	-0.59	-1.87	1.55	1.14	8-05	R775	-4.72	-1.62	1.61	1.28	179-00
R523	-0.85	0.27	1.75	1.36	9-08	R776	0.47	1.83	1.56	1.24	2-11
R524	0.09	0.77	1.65	1.27	6-57	R777	3.46	-0.90	1.62	1.25	2-14
R525	-1.00	0.71	1.85	1.51	179-03	R778	0.81	2.16	1.68	1.30	176-29
R526	0.81	0.61	1.72	1.35	4-45	R779	-0.94	1.91	1.69	1.32	175-02
R527	-0.71	1.29	1.27	0.91	18-01	R780	-0.71	2.87	1.62	1.27	2-50
R528	-0.15	1.36	1.28	0.92	16-52	R781	-0.13	3.55	1.63	1.27	1-16
R529	1.92	-1.96	1.34	1.05	3-59	R782	-0.37	5.85	1.73	1.34	178-00
R531	0.35	0.58	1.29	1.05	174-30	R783	-0.19	1.74	1.80	1.41	175-02
R532	2.58	-0.43	1.58	1.26	174-43	R784	0.60	6.28	1.64	1.26	0-41
R533	-0.22	-0.05	1.57	1.22	172-37	R785	1.68	1.95	1.65	1.29	178-41
R731	0.77	-0.13	1.48	1.12	6-11	R786	-0.53	1.78	1.80	1.39	178-14
R732	0.80	1.27	1.33	1.00	3-52	R787	-0.99	1.14	1.66	1.34	171-53
R735	0.63	0.68	1.37	1.09	1-03	R788	-0.56	-0.31	1.60	1.29	176-26
R736	0.16	0.92	1.30	1.05	175-38	R790	0.27	3.27	2.08	1.61	176-19
R737	0.47	1.08	1.26	0.99	170-52	R792	-1.18	0.08	1.95	1.48	2-00
R738	-6.90	1.05	1.43	1.13	2-10	R793	-0.65	1.80	2.21	1.65	1-23
R739	0.19	1.46	1.36	1.07	1-40	R794	0.28	4.97	2.19	1.69	1-36
R740	-0.10	1.04	1.46	1.14	2-20	R795	1.38	1.84	1.72	1.35	171-25
R741	0.49	0.73	1.50	1.20	176-22	R796	0.89	0.98	2.00	1.53	0-07
R750	-1.39	0.52	2.12	1.63	176-17	R798	-0.21	2.89	2.30	1.75	2-15
R751	0.95	2.01	2.35	1.83	179-45	R799	1.62	0.38	1.53	1.19	2-16

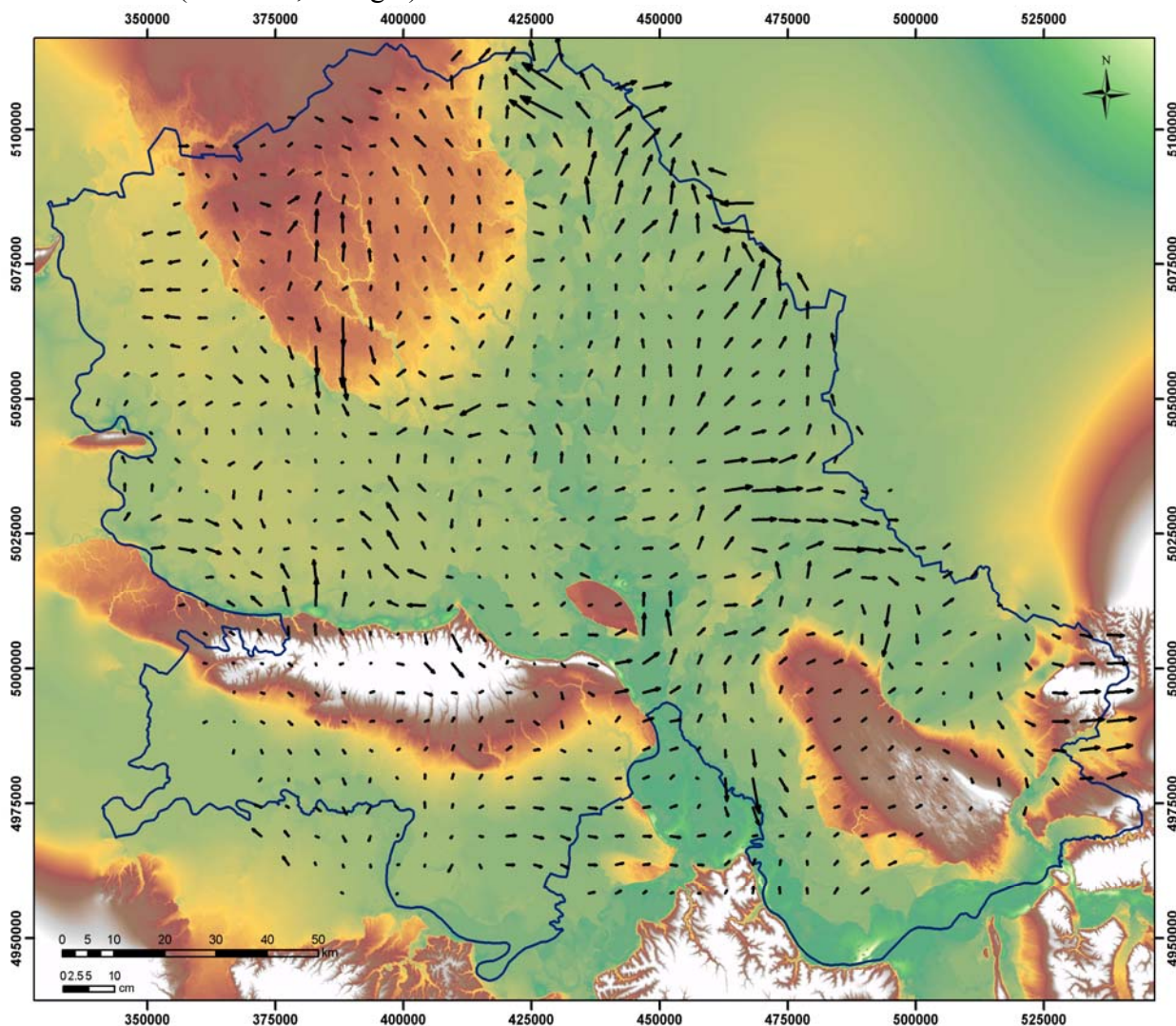
Tačka	Δ_x [cm]	Δ_y [cm]	A_{rel} [cm]	B_{rel} [cm]	θ_{rel} ° - '	Tačka	Δ_x [cm]	Δ_y [cm]	A_{rel} [cm]	B_{rel} [cm]	θ_{rel} ° - '
R800	1.46	-0.34	1.61	1.26	179-33	R822	0.85	1.53	1.59	1.22	178-45
R801	1.32	-0.55	1.52	1.14	5-15	R823	5.49	2.61	1.71	1.30	177-18
R802	0.82	-0.91	1.50	1.15	1-47	R825	2.72	-0.21	2.04	1.52	177-21
R803	1.73	0.49	1.45	1.13	2-37	R826	-0.67	2.11	1.92	1.47	176-59
R804	1.29	0.40	1.50	1.18	179-33	R827	4.46	-1.00	1.57	1.23	179-04
R805	2.24	1.87	1.57	1.21	176-47	R828	1.58	2.80	1.51	1.19	178-36
R806	0.52	2.75	1.62	1.26	179-05	R829	4.72	0.47	1.56	1.21	178-09
R807	1.03	0.68	1.45	1.12	1-28	R830	1.51	-0.68	1.66	1.28	177-57
R808	1.59	0.21	1.42	1.11	1-44	R831	1.16	-5.26	1.78	1.35	176-06
R809	1.97	-0.25	1.53	1.19	0-12	R832	1.75	-0.02	1.52	1.20	178-17
R811	0.62	0.67	1.72	1.32	173-38	R833	4.89	2.78	1.53	1.21	178-07
R813	0.61	0.29	1.42	1.10	179-48	R834	3.05	0.96	1.61	1.26	179-15
R815	0.54	-0.48	1.53	1.19	178-45	R835	0.82	-0.64	1.51	1.17	177-35
R816	1.42	0.39	1.70	1.34	175-29	R836	2.13	0.16	1.76	1.37	178-10
R817	1.41	1.56	1.85	1.40	176-41	R837	2.24	0.82	2.38	1.67	2-13
R818	1.83	0.20	2.08	1.57	175-29	R838	1.98	0.54	1.53	1.21	177-47
R819	0.30	1.69	1.85	1.50	173-54	R839	4.56	-9.82	1.78	1.38	5-23
R820	1.58	-0.95	1.53	1.21	178-38	R840	1.67	1.15	1.79	1.40	179-43
R821	1.26	-0.02	1.50	1.17	178-32	R841	4.42	-1.94	1.97	1.48	4-22

, gde su:

- Δ_x - element vektora pomeranja u pravcu X ose
- Δ_y - element vektora pomeranja u pravcu Y ose
- A_{rel} - vrednost velike poluose relativne elipse poverenja između dve epohe
- B_{rel} - vrednost male poluose relativne elipse poverenja između dve epohe
- θ_{rel} - azimut velike poluose ili orijentacija relativne elipse poverenja

7.3.2.2. Interpolacija polja pomeranja

Metoda triangulacije sa linearnom interpolacijom primenjena je za potrebe određivanja polja pomeranja na predmetnoj oblasti istraživanja. U cilju interpretacije deformacionih parametara u ravni, polje pomeranja se računa primenom polinoma i metode inverznih rastojanja. Rezultat predstavljaju trougaone facete postavljene u gridu koji ravnomerno pokriva oblast istraživanja. Svaki trougao definiše ravan preko mrežnih čvorova koji leže unutar trougla i koji su određeni na osnovu podataka tri date tačke. Za svaku tačku grida, računa se rastojanje do datih tačaka. Ako je to rastojanje u granicama definisane maksimalne udaljenosti, interpolovana vrednost se označava kao „poverljiva”. Metoda triangulacije sa linearnom interpolacijom daje najbolje rezultate kada su date tačke ravnomerno raspoređene na predmetnoj oblasti istraživanja. To je upravo slučaj sa pasivnom referentnom mrežom čija je približna prostorna rezolucija oko 10 kilometara (Slika 7.7, Prilog 2).



Slika 7.7. Interpolaciono polje pomeranja sa intervalom u gridu od 5 km

Kao što se može videti na slici 7.7, karakteristični blokovi se odnose na: oblast Vrščkih planina (smer pomeranja zapad-istok), što može da implicira korelaciju sa gravitacionim rasedom Drmno-Zagajica-Plandište (Matenco & Radivojević, 2012), severoistočni deo Vojvodine (trend pomeranja jugozapad-severoistok), rasednu liniju na severnom delu Fruške gore, zatim blok ispod Kikindske subdepresije (trend pomeranja zapad-istok) i oblast Severnobačkog praga.

7.3.3. Geometrijska analiza deformacija primenom mehanike kontinuuma

Identifikacija promena oblika Zemlje predstavlja problem od najvećeg interesa u okviru multidisciplinarnih istraživanja tektonskih aktivnosti, koji su pokretači raznih mehanizama, posebno zemljotresa. Primena geodezije u ovoj problematici prisutna je dugo vremena, čak i od trenutka kada preciznost geodetskih opažanja nije mogla da obezbedi pouzdane procene pomeranja Zemljine kore u kratkom vremenskom intervalu, kao što je danas slučaj. Primena satelitskog pozicioniranja predstavlja novu eru u implementaciji različitih geodetskih metodoloških pristupa u istraživanjima pomeranja Zemljine kore.

Geodezija pruža informacije diskretnog karaktera, u vidu pomeranja ili brzina kontrolnih tačaka, dok deformacija predstavlja prostorno kontinualni fenomen. **Deformacija**, u slobodnoj interpretaciji, predstavlja promenu veličine i oblika tela i istorijski je povezana sa proučavanjima deformabilnih materijalnih tela u okviru teorije elastičnosti, a kasnije i u mehanici kontinuuma (Malvern, 1969; Eringen, 1980; Dermanis & Livieratos, 1983). Glavni kriterijum za klasifikaciju različitih pristupa odnosi se na eksplicitni ili implicitni metod prostorne interpolacije pomeranja ili brzina pomeranja. Takođe, važan aspekt odnosi se na interpretaciju pomeranja, tj. da li se ona odnose na „stvarne” trodimenzionalne deformacije ili njihove dvodimenzionalne projekcije. Dvodimenzionalna interpretacija je neophodna iz razloga što se opažanja obavljaju na površini Zemlje, kao i zbog činjenice da se geofizičko poreklo horizontalnih deformacija (sekularna kretanja tektonskih ploča) razlikuje od vertikalnih (deformacije usled periodičnih efekata vezanih za godišnje varijacije u ciklusu podzemnih voda ili sekularna pomeranja vezana za postglacijalna izdizanja). Iz tog razloga, tradicionalni pristup geodeta ne odnosi se na istraživanje deformacija lako dostupnih prirodnoj zemljinoj površi, već njihovih projekcija na horizontalnu površ, kartografsku projekciju u ravni, sferu ili referentni elipsoid.

Dakle, u geodetskom metodološkom pristupu, uglavnom se odvojeno analiziraju pomeranja u horizontalnoj i vertikalnoj projekciji. Bitno je spomenuti alternativni pristup pod nazivom **integrisani geodetski pristup**, gde su geometrijske informacije povezane sa pratećim promenama gravitacije, pri čemu su te promene pretežno posledica vertikalnih pomeranja (Dermanis & Kotsakis, 2006). Značajna karakteristika u odvajanju horizontalnih od vertikalnih pomeranja odnosi se na različit tretman referentnog datuma za dve vrste pomeranja. Polje teže obezbeđuje visinski datum, dok horizontalni datum uopšte ne zavisi od njega. Kao i vertikalni podaci, i idealni horizontalni podaci treba da budu površinski i kontinualni u vremenu. Iako su horizontalna pomeranja, u opštem slučaju, mnogo veća od vertikalnih, njihovo određivanje je složenije od određivanja vertikalnih pomeranja (Vaniček & Krakiwsky, 1982).

U najjednostavnijem obliku, deformacija u ravni se može opisati funkcijom $\mathbf{x}' = \mathbf{f}(\mathbf{x})$, koja odgovara Dekartovim koordinatama \mathbf{x} bilo koje tačke \mathbf{P} u inicijalnoj epohi t i koordinatama \mathbf{x}' u kasnijoj epohi t' . Funkcija \mathbf{f} predstavlja njenu lokalnu linearnu aproksimaciju, deformacioni gradijent $\mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} = \frac{\partial \mathbf{x}'}{\partial \mathbf{x}}$. U nekim slučajevima može se uvesti zamena sa gradijentom pomeranja

$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} = \frac{\partial (\mathbf{x}' - \mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{F} - \mathbf{I}$, gde je $\mathbf{u} = \mathbf{x}' - \mathbf{x}$ vektor pomeranja tačke. Umesto \mathbf{F} ili \mathbf{J} , može se upotrebiti **strejn tenzor** \mathbf{E} , koji se odnosi na varijacije dužine elementa iz ds sa t u ds' sa t' , preko $ds'^2 - ds^2 = 2d\mathbf{x}^T \mathbf{E} d\mathbf{x}$, i od $d\mathbf{x}' = \mathbf{F} d\mathbf{x}$, $ds^2 = d\mathbf{x}^T d\mathbf{x}$, $ds'^2 = d\mathbf{x}'^T d\mathbf{x}'$, sledi da je:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2}(\mathbf{F}^T\mathbf{F} - \mathbf{I}) = \frac{1}{2}(\mathbf{J} + \mathbf{J}^T + \mathbf{J}^T\mathbf{J}) \quad (7.54)$$

Zanemarivanjem članova drugog reda za malu vrednost \mathbf{J} , infinitezimalni strejn tenzor može se predstaviti u sledećem obliku:

$$\mathbf{E}_{\text{inf}} = \frac{1}{2}(\mathbf{J} + \mathbf{J}^T) \approx \mathbf{E} \quad (7.55)$$

U odnosu na elemente \mathbf{E}_{inf} , strejn parametri su invarijantni u odnosu na određene promene referentnog sistema (Malvern, 1969; Dermanis & Livieratos, 1983, Caspary, 2000).

Primena geodetskih metoda u istraživanju pomeranja na deformacionom geodinamičkom modelu na jugoistočnom delu Panonskog basena, bazirana je na ponovljenim GPS/GNSS merenjima i upoređenju rezultata merenja u dve epohe.

Vektor pomeranja tačaka može se izraziti kao funkcija koordinata:

$$\mathbf{x}_1^0 - \mathbf{x}_1^t = \mathbf{d}_1 = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3)_1^T = \mathbf{u}(\mathbf{x}) = (\mathbf{u}_1(\mathbf{x}), \mathbf{u}_2(\mathbf{x}), \mathbf{u}_3(\mathbf{x}))^T, \mathbf{x} = (\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})^T \quad (7.56)$$

gde je:

\mathbf{x}_1^0 - vektor koordinata tačke \mathbf{P}_1 u nultoj epohi merenja,

\mathbf{x}_1^t - vektor koordinata tačke \mathbf{P}_1 u kontrolnoj epohi merenja (u vremenskom intervalu t).

Strejn tenzor u tački \mathbf{P}_1 je definisan kao gradijent funkcije u ovoj tački:

$$\mathbf{E}_i = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} = \mathbf{grad}(\mathbf{d}_i) = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial \mathbf{y}} & \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial \mathbf{z}} \\ \frac{\partial \mathbf{u}_2}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{u}_2}{\partial \mathbf{y}} & \frac{\partial \mathbf{u}_2}{\partial \mathbf{z}} \\ \frac{\partial \mathbf{u}_3}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{u}_3}{\partial \mathbf{y}} & \frac{\partial \mathbf{u}_3}{\partial \mathbf{z}} \end{pmatrix}_i \quad (7.57)$$

U slučaju projekcije pomeranja u horizontalnu ravan lokalnog koordinatnog sistema (kao što je i objašnjeno u poglavlju 5.1.4), pri čemu je potrebno imati najmanje tri tačke sa vektorom pomeranja, dobijaju se sledeći strejn parametri: **dilatacija** Δ , **komponente smicanja** γ_1, γ_2 i **rotacija** ω , koji se odnose na elemente \mathbf{E}_{inf} kroz:

$$\mathbf{E}_{\text{inf}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Delta + \gamma_1 & \gamma_2 \\ \gamma_2 & \Delta - \gamma_1 \end{bmatrix} \quad (7.58)$$

Strejn parametri se mogu predstaviti sledećim izrazima:

$$\Delta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} - \text{ukupna dilatacija} \quad (7.59)$$

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \varepsilon_{11} - \varepsilon_{22} \\ \gamma_2 &= 2\varepsilon_{12} \end{aligned} - \text{komponente strejna smicanja} \quad (7.60)$$

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} - \text{ukupno smicanje} \quad (7.61)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2}(\Delta + \gamma) - \text{osa maksimalnog strejna} \quad (7.62)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2}(\Delta - \gamma) - \text{osa minimalnog strejna} \quad (7.63)$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right) - \text{azimut ose maksimalnog strejna} \quad (7.64)$$

$$\psi = \varphi + \frac{1}{4}\pi, \text{ za } \omega_{12} > 0 - \text{azimut strejna smicanja} \quad (7.65)$$

$$\psi = \varphi - \frac{1}{4}\pi, \text{ za } \omega_{12} < 0 - \text{azimut strejna smicanja} \quad (7.66)$$

Gradijent pomeranja se može analizirati u simetričnom i nesimetričnom delu:

$$\mathbf{J} = \frac{1}{2}(\mathbf{J} + \mathbf{J}^T) + \frac{1}{2}(\mathbf{J} - \mathbf{J}^T) = \mathbf{E}_{\text{inf}} + \mathbf{\Omega} = \quad (7.67)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \boldsymbol{\omega} \\ -\boldsymbol{\omega} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Delta + \gamma_1 & \gamma_2 \\ \gamma_2 & \Delta - \gamma_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \boldsymbol{\omega} \\ -\boldsymbol{\omega} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

gde je:

$$\Delta = \mathbf{J}_{11} + \mathbf{J}_{22}, \gamma_1 = \mathbf{J}_{11} - \mathbf{J}_{22}, \gamma_2 = \mathbf{J}_{12} + \mathbf{J}_{21} \text{ i } \boldsymbol{\omega} = \frac{1}{2}(\mathbf{J}_{12} - \mathbf{J}_{21}) \quad (7.68)$$

Tako četiri parametra $\Delta, \gamma_1, \gamma_2$ i $\boldsymbol{\omega}$ predstavljaju ekvivalentan set parametara elementima \mathbf{J} . Komponente smicanja γ_1, γ_2 su zamenjene sa invarijantnim maksimalnim strejnom smicanja

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \text{ i pridruženim azimutom ose maksimalnog strejna } \varphi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right).$$

U pojedinim slučajevima, glavni pravac kontrakcije može se predstaviti u sledećem obliku: $\psi = \varphi + 45^\circ = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{-\gamma_2}{\gamma_1}\right)$. U literaturi je označen kao „azimut ukupnog smicanja γ ”.

Da bi se oslobodili određenog vremenskog intervala $\Delta t = t' - t$, parametri strejna su podeljeni po Δt u cilju dobijanja odgovarajućih vremenskih komponenti $\dot{\Lambda}$, $\dot{\gamma}_1$, $\dot{\gamma}_2$, $\dot{\omega}$ (parametri brzine strejna). Tako se implicitno uvodi pretpostavka da ako je gradijent pomeranja linearna funkcija vremena $\mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + t\dot{\mathbf{J}}$, tada su njegova komponenta $\dot{\mathbf{J}}$ i parametri brzine strejna, konstantni u odnosu na vreme. U ovom slučaju γ se zamenjuje invarijantnim parametrom $\dot{\gamma}$.

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\gamma}_1^2 + \dot{\gamma}_2^2} \neq \frac{d\gamma}{dt} = \gamma^{-1} (\gamma_1 \dot{\gamma}_1 + \gamma_2 \dot{\gamma}_2) \quad (7.69)$$

Drugi set parametara strejna koji proizilazi iz dijagonale matrice strejna $\mathbf{E} = \mathbf{R}(-\boldsymbol{\theta})\boldsymbol{\Lambda}\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})$, odnosi se na maksimalni i minimalni glavni strejn, $\mathbf{e}_{\max} = \boldsymbol{\Lambda}_{11}$ i $\mathbf{e}_{\min} = \boldsymbol{\Lambda}_{22}$, respektivno, i azimut $\boldsymbol{\theta}$ od \mathbf{e}_{\max} , koji su obično zamenjeni njihovim infinitezimalnim korespondentima na dijagonali matrice $\mathbf{E}_{\text{inf}} = \mathbf{R}(-\boldsymbol{\theta}_{\text{inf}})\boldsymbol{\Lambda}_{\text{inf}}\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta}_{\text{inf}})$.

Zapravo, važi sledeća relacija:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Lambda} &= \mathbf{e}_{\max} + \mathbf{e}_{\min} \\ \boldsymbol{\gamma} &= \mathbf{e}_{\max} - \mathbf{e}_{\min} \end{aligned} \quad (7.70)$$

Kao stroga alternativa pristupu infinitezimalnog strejna, mogu se uvesti jedinstvene vrednosti λ_{\max} i λ_{\min} deformacija gradijenta matrice \mathbf{F} , kao fundamentalni parametri iz kojih se mogu izvesti ostali parametri strejna (Biagi & Dermanis, 2006). To su pozitivni koreni sopstvenih vrednosti od $\mathbf{F}^T\mathbf{F} = \mathbf{R}(-\boldsymbol{\theta})\boldsymbol{\Lambda}^2\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})$ i $\mathbf{F}\mathbf{F}^T = \mathbf{R}(-\boldsymbol{\theta}')\boldsymbol{\Lambda}^2\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta}')$ i dijagonalni elementi dijagonalne matrice $\boldsymbol{\Lambda}$ koji se pojavljuju u vidu dekompozicije singularnih vrednosti $\mathbf{F} = \mathbf{R}(-\boldsymbol{\theta})\boldsymbol{\Lambda}\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})$. Dodatni parametri su azimuti glavnog pravca, $\boldsymbol{\theta}$ u originalnoj i $\boldsymbol{\theta}'$ u drugoj epohi referentnog sistema.

Elementi glavnog strejna su:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{\max} &= \frac{(\lambda_{\max}^2 - 1)}{2} \\ \mathbf{e}_{\min} &= \frac{(\lambda_{\min}^2 - 1)}{2} \end{aligned} \quad (7.71)$$

Dilatacija se može predstaviti sledećim izrazom:

$$\boldsymbol{\Lambda} = \lambda_{\max}\lambda_{\min} - 1 \quad (7.72)$$

Maksimalni strejn smicanja je:

$$\gamma = \frac{(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})}{\sqrt{\lambda_{\max} \lambda_{\min}}} \quad (7.73)$$

dok je azimut:

$$\varphi = \theta - \delta \quad (7.74)$$

gde je δ pomoćni ugao određen sa:

$$\sin \delta = \sqrt{\frac{1}{2}(1 + \gamma/\sqrt{\gamma^2 + 4})} \quad \text{i} \quad \cos \delta = \sqrt{\frac{1}{2}(1 - \gamma/\sqrt{\gamma^2 + 4})} \quad (7.75)$$

pri čemu razlika $\Delta\theta = \theta' - \theta$ zamenjuje ugao rotacije ω kod infinitezimalnog pristupa.

U cilju interpretacije deformacionih parametara u ravni, računa se polje pomeranja, primenom polinoma. Nakon rešavanja potrebnih jednačina sledećeg tipa:

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{A}_i + \mathbf{B}_i \mathbf{x} + \mathbf{C}_i \mathbf{y} + \mathbf{D}_i \mathbf{x}\mathbf{y} + \mathbf{E}_i \mathbf{x}^2 + \mathbf{F}_i \mathbf{y}^2 + \dots \quad (7.76)$$

gde se vrednosti \mathbf{e}_{ij} određuju kao izvodi f-ije \mathbf{u}_i po promenljivima, tj. po koordinatama, respektivno.

Nakon potpune obrade, parametri strejn tenzora se prikazuju u definisanom pravougaonom gridu (Slika 7.9).

Velika prednost strejn analize u odnosu na konvencionalnu deformacionu analizu, kod koje dobijamo pomeranja u zavisnosti od izabranog koordinatnog sistema, odnosi se na sledeće:

- Svi deformacioni parametri (**strejn tenzor**) su invarijantni u odnosu na izabrani koordinatni sistem i neosetljivi su na translaciju i skoro neosetljivi na rotaciju koordinatnog sistema (Vaniček & Krakiwsky, 1982; Dermanis & Livieratos, 1983, Talich & Havrlant, 2008; Talich, 2007; 2008; 2012). Kada je u pitanju neodredivost razmere, bitno je napomenuti da ona utiče na strejn tenzor na isti način kao i na pomeranja.

7.3.3.1. Određivanje parametara strejn tenzora iz ponovljenih GPS/GNSS merenja na području jugoistočnog dela Panonskog basena

Kao što je napomenuto u prethodnim poglavljima, iako su horizontalna pomeranja u opštem slučaju mnogo veća od vertikalnih, njihovo određivanje je teže od određivanja vertikalnih pomeranja. Postoji više modela horizontalnih pomeranja, od kojih je najčešće u primeni model ponovo premerenih geodetskih mreža, pri čemu mreže moraju biti dizajnirane za potrebe

određivanja pomeranja. Pored modela ponovljenih određivanja horizontalnih položaja, postoji i model direktnog pristupa pomeranjima (Vaniček & Krakiwsky, 1982), čiji je nedostatak što opažanja, koja nisu ponovljena u kasnijoj epohi, ne mogu da se uključe u model. Međutim, ovi modeli nisu oslobođeni neodredivosti koja je uvek prisutna kao posledica činjenice da pomeranja nisu najprirodnije veličine koje treba određivati. Način prevazilaženja neodredivosti da se traže druge veličine koje opisuju horizontalna pomeranja, a direktnije su vezane za merene veličine, jeste upravo određivanje parametara **strejn tenzora**.

S obzirom da na području istraživanja imamo dve nezavisno realizovane GPS/GNSS merne kampanje, algoritam određivanja parametara strejn tenzora će se predstaviti kroz dva osnovna koraka:

- Prvi korak predstavlja tradicionalni zadatak u kome se određuju pomeranja na svim tačkama deformacionog geodinamičkog modela, odnosno pasivne referentne mreže na oblasti istraživanja.
- Drugi korak podrazumeva određivanje deformacionih parametara geometrijskom **analizom mehanike kontinuuma (strejn analiza)**, pri čemu se primenjuju sledeća dva postupka:
 - Podela geodetske mreže na konačne elemente (trouglove) i računanje parametara strejn tenzora u okviru svakog trougla (sa postavljanjem hipoteze o homogenosti strejna u okviru svakog trougla).
 - Računanje polja globalnog strejna na području istraživanja (sa postavljanjem hipoteze o homogenosti strejna u okviru kompletnog područja istraživanja).

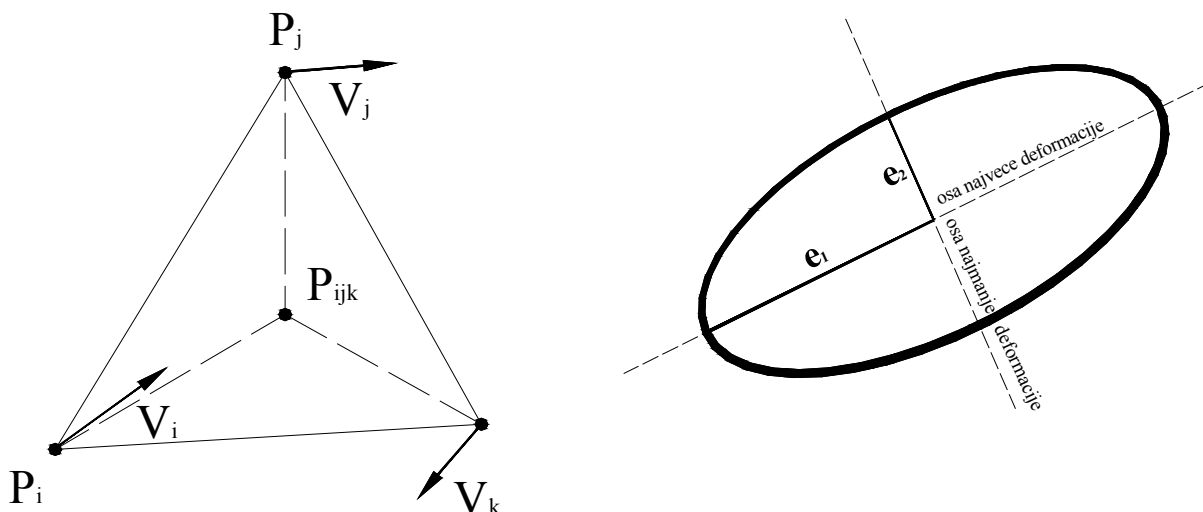
Rezultat karaktera pomeranja zavisi od uslova ograničenja geodetske mreže, odnosno od definisanog koordinatnog okvira. Dakle, obe epohe su prvo izravnate sa minimalnim ograničenjem, tj. parcijalno fiksiranom jednom tačkom (Tabela 7.2 i Tabela 7.3), pa su identifikovane četiri stabilne tačke na području istraživanja, pri čemu je sprovedeno izravnaje sa parcijalnim minimalnim tragom na pretpostavljene stabilne tačke (Tabela 7.4 i Tabela 7.5). Međutim, da bi se dalji proračun sprovodio nezavisno od sprovedene hipoteze o stabilnosti datumskih tačaka, za računanje parametara strejn tenzora će se koristiti podaci iz izravnaja epoha sa minimalnim ograničenjima.

Kao što je već rečeno, svi parametri strejn tenzora, izuzev azimuta ψ i φ , invarijantni su u odnosu na izabrani koordinatni sistem i neosetljivi na translaciju i rotaciju koordinatnog sistema. To podrazumeva da samo deformacije predstavljaju objektivnu meru za detektovanje aktuelnih geodinamičkih trendova na području istraživanja. Iz tog razloga je opravdano računanje parametara strejn tenzora i njegova praktična primena se bazira na eliminisanju grešaka zbog eventualno pogrešno postavljene hipoteze o stabilnosti datumskih tačaka, za ponovljena merenja.

Važno je napomenuti da nije neophodno sprovoditi transformaciju pomeranja iz različitih koordinatnih sistema, npr. ITRF \Leftrightarrow ETRF. Takođe, nije potrebno redukovati pomeranja u ITRF-u primenom geodinamičkih modela kretanja tektonskih ploča, kao što su APKIM2000 ili NNR-NUVEL, s obzirom da se ovde radi o geodetskim mrežama regionalnog karaktera. Na osnovu navedenih činjenica, može se zaključiti da su stvarne geodinamičke aktivnosti zasnovane na utvrđenim deformacionim parametrima, što će doprineti kvalitetnom lociranju raseda u okviru oblasti istraživanja.

Za potrebe računanja parametara strejn tenzora na području jugoistočnog dela Panonskog basena, korišćena je aplikacija Istraživačkog insituta za geodeziju, topografiju i kartografiju iz Praga (www.vugtk.cz/~deformace), na osnovu GPS/GNSS merenja, koja su realizovana na području istraživanja u periodu od 1998. do 2012. godine. Strejn tenzor je dobijen iz opažanih GPS/GNSS vektora između tačaka pasivne referentne mreže na oblasti straživanja.

U prvom koraku su sračunati vektori pomeranja za sve tačke u mreži na osnovu podataka dva puta premerene mreže. Iz pomeranja susednih tačaka, numerički su određeni parcijalni izvodi koji čine strejn tenzor. Kao što je već rečeno, u prvom koraku je deformacioni geodinamički model na oblasti istraživanja dekomponovan na trougaone konačne elemente, pri čemu je uslov homogenosti ograničen u okviru svakog trougla (Slika 7.8).



Slika 7.8. Trougaoni konačni element kao osnovna strejn konfiguracija (levo) i strejn elipsa (desno)

Pored trougla kao konačnog elementa, moguća je upotreba svih tačaka povezanih sa tačkom interesovanja P_i opažanjima, pri čemu se, u tom slučaju, karakteristične vrednosti parcijalnih izvoda strejn tenzora dobijaju MNK ocenjivanjem (Vaniček & Krakiwsky, 1982). Razlika između ova dva pristupa analogna je razlici između konačnih elemenata i konačnih razlika u numeričkom rešavanju problema graničnih vrednosti.

U drugom koraku računa se polje globalnog strejna, pri čemu je uslov homogenosti ostvaren na kompletnom području istraživanja. Podaci o elementima deformacionih parametara strejn tenzora i elementima strejn elipsi dobijeni su za grid sa prosečnom rezolucijom od 5.4 km na predmetnoj oblasti istraživanja.

Komponente i vrednosti svih deformacionih parametara strejn tenzora, koje se odnose na zadati grid na predmetnoj oblasti istraživanja, prezentirane su u prilogu 4. U tabeli 7.9 navedene su statističke vrednosti, pri čemu su svi deformacioni parametri strejn tenzora sračunati u jedinicama [mm/km], izuzev azimuta ose maksimalnog strejna (u stepenima).

Tabela 7.9. Elementi deformacionih parametara strejn tenzora između dve GPS/GNSS merne kampanje 1998/2002 i 2011/2012

Epoha 1998/2002 i 2011/2012			
Koordinatni sistem: UTM34N/WGS84			
x max	5112900.37 m	y max	536468.17 m
x min	4955586.88 m	y min	341182.46 m
dx	157313.49 m	dy	195285.71 m
Rezolucija grida: 5424.60 m			
e_x [mm/km]	min	-3.93	φ [°]
	max	5.94	
	average	-0.08	
e_y [mm/km]	min	-5.59	Δ [mm/km]
	max	7.94	
	average	0.01	
e_{xy} [mm/km]	min	-7.44	γ [mm/km]
	max	5.51	
	average	-0.04	
e_1 [mm/km]	min	-1.28	Ω [mm/km]
	max	7.98	
	average	0.93	
e_2 [mm/km]	min	-7.08	
	max	2.08	
	average	-1.00	

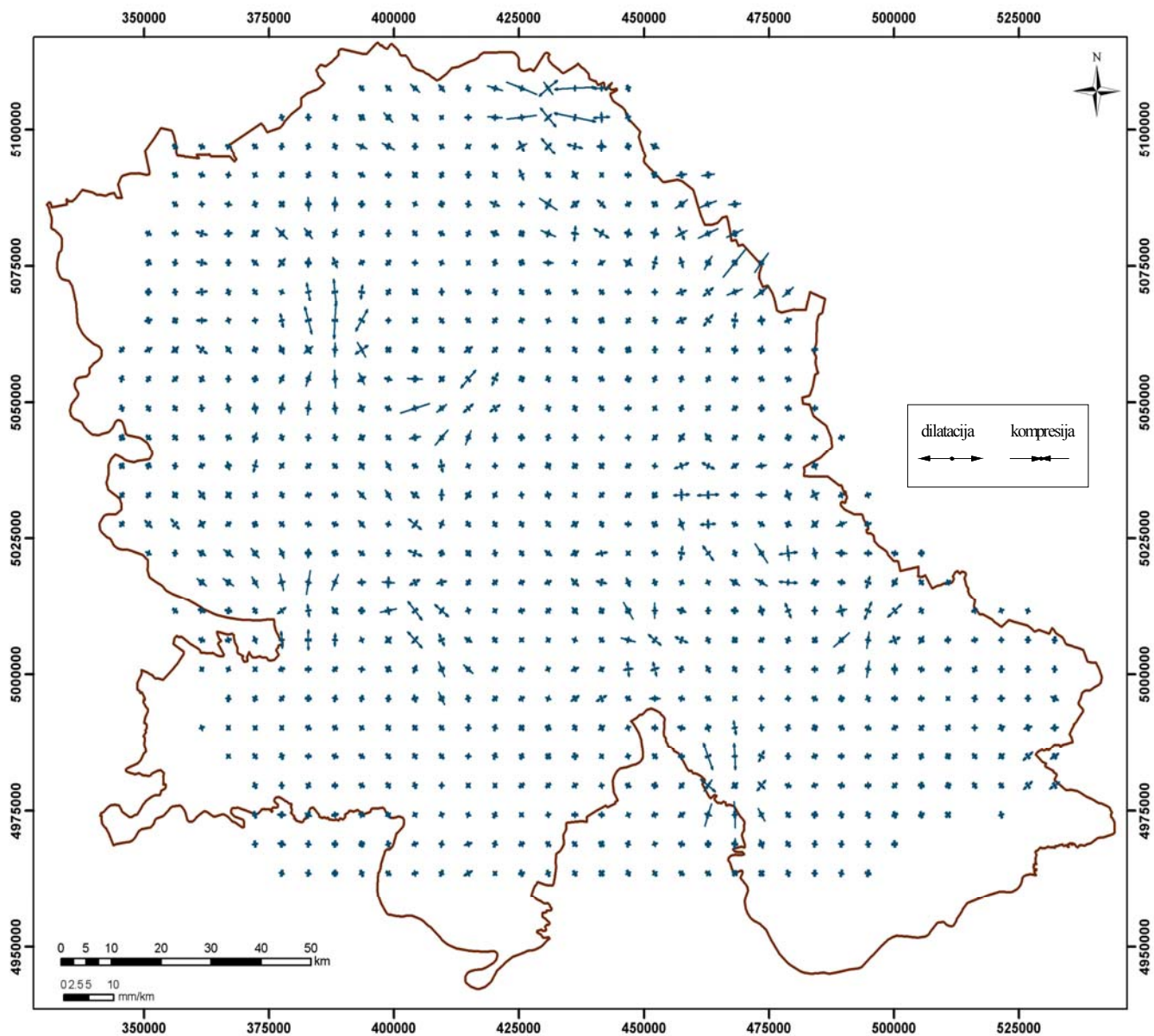
Analizom generisanih parametara strejn analize na osnovu GPS/GNSS merenja, sa približno desetogodišnjim vremenskim intervalom, na području jugoistočnog dela Panonskog basena, odnosno Vojvodine, može se zaključiti da je prisutan i dilatacioni i kompresivni režim kinematike savremenih raseda terena (Slika 7.9, 7.10 i 7.11, Prilog 3).

Područja sa izraženim **kompresivnim** režimom odnose se na oblast u okruženju Srbobrana u pravcu ka Feketiću, sa dominantnom orijentacijom jugozapad-severoistok, što u potpunosti korespondira istraživanjima koja su publikovana u formi Neotektonske karte Republike Srbije, gde je geološkim istraživanjima lociran najveći rased na predmetnoj oblasti istraživanja, koji deli Vojvodinu na severni i južni deo, a proteže se od Odžaka sa zapadne strane do Nove Crnje i Žitišta, sa istočne strane. Manje izražena kompresija prisutna je u područjima severoistočno od Bačke Palanke, jugozapadno od Bajmoka, jugoistočno od Subotice, na području Vrdnika, Perleza, delu oblasti između Sente, Ade i Mola (severozapad-jugoistok), predela reke Tamiš u okviru Pančeva, kao i u graničnom pojasu severoistočnog dela Vojvodine iznad Kikinde (Slika 7.10).

Dilatacioni režim označen je u oblastima južno od dela Bačke Palanke (sever-jug) i Novog Sada (severozapad-jugoistok) u pojasu Dunava, što takođe odgovara detektovanim neotektonskim aktivnostima sa aspekta geoloških istraživanja. Dilatacioni karakter naprezanja terena izražen je u oblasti Beočina, Torde, jugoistočnog dela Zrenjanina, oblasti između Botoša, Tomaševca i Jarkovca, područja jugoistočno od Sente i severoistočnom delu basena oko Horgoša (istok-zapad). Takođe, dilatacija je prisutna u oblasti Bačke Topole (što odgovara oblasti koja je u neotektonskim istraživanjima označena kao Severnobačka visoravan), uz napomenu da su na malom broju tačaka pasivne referentne mreže otkrivena pomeranja većeg intenziteta, pri čemu je

neophodno u nekim kasnijim epohama merenja obratiti pažnju na ovo područje. Na osnovu sračunatih komponenti strejn tenzora, ovaj deo ima karakter transkurentnih raseda (Slika 7.10).

Strejn smicanja (eng. *share strain*) sa karakterom transkurentnih raseda terena, prisutan je u oblasti koja pripada severoistočnom delu Bačke Palanke, na području Novog Sada i Beočina, Srbobrana, Sente, oblasti između Kisača, Siriga i Temerina, oblasti severno od Kikinde, području Zrenjanina, kao i oblastima u okruženju Srpske Crnje i Sutjeske (Slika 7.11).



Slika 7.9. Interpolaciono polje parametara strejna na predmetnoj oblasti istraživanja

7.3.4. Geostatistička interpolacija brzina pomeranja

Interpolacioni algoritmi predstavljaju pogodan način za generisanje vrednosti određene prostorne promenljive (u ovom slučaju, brzine pomeranja) na oblasti na kojoj ne postoje realizovana merenja, na osnovu podataka merenja iste promenljive na unapred određenim lokacijama (pozicije tačaka deformacionog geodinamičkog modela). Metodama interpolacije se prediktuju vrednosti brzine pomeranja na osnovu podataka merenja na konkretnim mernim pozicijama.

Osnovna kategorizacija metoda interpolacija podrazumeva **determinističke** i **geostatističke** metode interpolacije (Clark, 1979). Determinističkim metodama interpolacije se vrši ocena tačnosti odnosa prediktovane i merene vrednosti primenom odgovarajućih statističkih pokazatelja, kao što su srednja vrednost i varijansa. Međutim, njihova primena je opravdana samo u slučaju kada su vrednosti koje se modeliraju, slučajne i nekorelisane. Kada su u pitanju prostorni podaci, kao što su pomeranja ili brzine pomeranja tačaka na Zemljinoj površi, to ne mora biti slučaj. Promene koordinata ili brzine pomeranja se ne smeju tretirati samo kao skalarnе vrednosti, ne uzimajući u obzir prostornu distribuciju podataka. Najčešće korišćena deterministička metoda je **metoda inverznih rastojanja** (IDW, eng. *Inverse Distance Weighted*), kod koje uticaj vrednosti atributa opada sa povećanjem udaljenosti od tačke u kojoj se izvodi interpolacija.

Nasuprot njima, geostatističke metode interpolacije se zasnivaju na prostornoj analizi grešaka modela. Dva primarna pokazatelja su **variogram** i **kovariogram** (kovarijansa), koji se koriste za karakterizaciju slučajnog polja, pod pretpostavkom prostorne korelacije između predviđenih rezultata. Variogram opisuje varijacije varijanse između elemenata u okviru polja, dok kovariogram opisuje korelaciju između datih podataka.

S obzirom da su u prethodnim potpoglavljima pomeranja interpretirana azimutima vektora pomeranja na konkretnim tačkama i u interpolacionom gridu, izabran je podesniji način za interpretaciju intenziteta pomeranja. Intenzitet pomeranja, kao osrednjena brzina pomeranja (mm/god) u vremenskom intervalu između dve merne kampanje, prostorno će se ocenjivati metodama geostatističke interpolacije.

Postoji više razvijenih algoritama interpolacije, kao što su: **Metoda inverznih rastojanja** (IDW, Kane et al., 1982), **Kriging** (Matheron, 1963), **Spline** (Ahlberg et al., 1967), **Interpolacija lokalnim polinomima**, **Kolokacija**, tj. linearna predikcija po MNK (Moritz, 1972), itd.

Kriging interpolacija je razvijena od strane Matherona, a naziv metode potiče od *D. G. Krige*-a, koji je uveo primenu pokretnih sredina u rudarstvu. Metoda je zasnovana na tretmanu interpolacione površi u skladu sa regionalizovanom promenljivom. Matematički model je veoma blizak sa regresionom analizom, kada se ima u vidu da obe metode koriste Gaus-Markovljev model za dokazivanje nezavisnosti procene i greške.

Pretpostavka od koje se polazi odnosi se na to da se površ koja se modelira, može predstaviti u sledećem obliku:

$$z(\mathbf{s}) = \mu(\mathbf{s}) + \varepsilon(\mathbf{s}) \quad (7.77)$$

pri čemu je $z(\mathbf{s})$ posmatrana promenljiva, $\mu(\mathbf{s})$ **trend** površi, dok je $\varepsilon(\mathbf{s})$ površ koja je rezultat slučajnog procesa. Simbol \mathbf{s} označava lokaciju (npr. koordinate).

U standardnoj statistici opažanja se smatraju međusobno nezavisnim, dok se u geostatistici mogućnost računanja udaljenosti između lokacija koristi za modeliranje autokorelacije kao funkcije udaljenosti.

Ocenjena vrednost promenljive u interpoliranoj tački predstavlja sumu proizvoda težina λ_i i vrednosti merenja u konkretnim tačkama v_i :

$$V = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot v_i \quad (7.78)$$

pri čemu je ocena nepristrasna ako važi: $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$.

Težine se računaju iz sledeće jednačine Kriginga:

$$\lambda = A^{-1} \cdot b \quad (7.79)$$

gde je A:

$$A = \begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{d}_{1,1}) & \gamma(\mathbf{d}_{1,2}) & \dots & \gamma(\mathbf{d}_{1,n}) & \mathbf{1} \\ \gamma(\mathbf{d}_{2,1}) & \gamma(\mathbf{d}_{2,2}) & \dots & \gamma(\mathbf{d}_{2,n}) & \mathbf{1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma(\mathbf{d}_{n,1}) & \gamma(\mathbf{d}_{n,2}) & \dots & \gamma(\mathbf{d}_{n,n}) & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} & \dots & \mathbf{1} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (7.80)$$

matrica **semivarijansi** koje zavise od rastojanja između merenja tačaka.

Vektor težina je λ i vektor semivarijansi b (koji zavisi od rastojanja između interpoliranih tačaka i merenja), mogu se napisati u sledećem obliku :

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \\ \psi \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{d}_{i,1}) \\ \gamma(\mathbf{d}_{i,2}) \\ \dots \\ \gamma(\mathbf{d}_{i,n}) \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (7.81)$$

gde je ψ Lagranžov multiplikator.

Funkcija semivarijanse $\gamma(\mathbf{d}_i)$ se dobija na osnovu empirijskih vrednosti semivarijanse, sračunatih iz ulaznih podataka.

Sve varijante Kriginga implementirane su u okviru softverskog modula *ArcGIS Geostatistical Analyst*, koji je korišćen za potrebe prostornog ocenjivanja brzina pomeranja na području jugoistočnog dela Panonskog basena.

Rezultat svakog geostatističkog modela predikcije obično se odnosi na dve generisane karte, prediktovane brzine pomeranja i varijanse ocena brzina pomeranja. Kriging interpolacija ima sposobnost generalizacije i predikcije trendova brzina pomeranja a samim tim i uklanjanja lokalnih efekata koji nisu povezani sa tektonskim pomeranjima. Osetljivost metode zavisi od parametara koji se unose u više faza modelovanja.

U početnoj fazi empirijske selekcije odgovarajućeg semivariograma, semivarijansa se računa na osnovu optimalnog intervala (eng. *lag size*) i maksimalnog rastojanja (eng. *number of lags*). Grumen odsecanja (eng. *nugget*) se može pripisati greškama merenja ili prostornoj varijaciji na udaljenostima manjim od intervala uzorkovanja. Teoretski, na nultom rastojanju (*lag* = 0), vrednost semivariograma je 0. Međutim, na beskonačno maloj udaljenosti, semivariogram često ispoljava efekat grumena odsecanja, koji predstavlja neku vrednost veću od nule.

Semivarijansa ukazuje na stepen sličnosti između vrednosti tačaka na datom rastojanju **h**, a računa se iz skupa vrednosti, na osnovu sledeće jednačine:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (V(\mathbf{x}_i) - V(\mathbf{x}_{i+h})) \quad (7.84)$$

gde je **n** broj uzoraka, dok su $V(\mathbf{x}_i)$ i $V(\mathbf{x}_{i+h})$ merene vrednosti na rastojanju **h**.

Funkcija kovarijanse se definiše sledećim izrazom:

$$C(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_j) = \text{cov}(Z(\mathbf{S}_i), Z(\mathbf{S}_j)) \quad (7.85)$$

gde je **cov** kovarijansa. Kovarijansa predstavlja skaliranu verziju korelacije. Dakle, kada su dve lokacije \mathbf{S}_i i \mathbf{S}_j bliske jedna drugoj, od njih očekujemo da budu slične, dok će njihova kovarijansa (korelacija) biti velika. Sa povećanjem udaljenosti, kovarijansa teži nuli.

Nakon računanja eksperimentalnog variograma, on se može modelirati primenom nekog od modela variograma, kao što su: linearni, sferični, eksponencijalni, kružni, Gausov, Beselov itd. Modeliranje variograma se vrši primenom MNK ocenjivanja sa ponovo definisanim težinama, koje se određuju na osnovu broja parova tačaka ili na osnovu udaljenosti. Teoretski model semivariograma koji najbolje odgovara empirijskim podacima, bira se na osnovu procedure kros-validacije, na osnovu koje se procenjuje tačnost modela (Webster & Oliver, 2007).

Postupak ocenjivanja modela variograma sprovodi se primenom tri statistike:

➤ **Srednja greška** (eng. *the mean error*):

$$\mathbf{ME} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V(\mathbf{x}_i) - \hat{V}(\mathbf{x}_i)) \quad (7.86)$$

- **Srednja kvadratna greška** (eng. *the mean squared error*):

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(V(x_i) - \hat{V}(x_i) \right)^2 \quad (7.87)$$

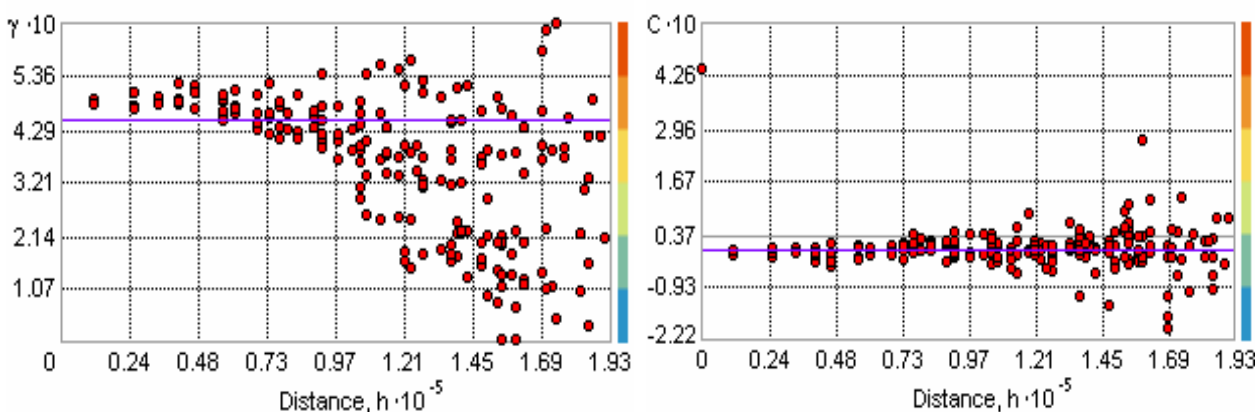
- **Odnos srednjih kvadratnih grešaka** (eng. *the mean squared deviation error*):

$$\text{MSDR} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\left(V(x_i) - \hat{V}(x_i) \right)^2}{\hat{\sigma}^2(x_i)} \quad (7.88)$$

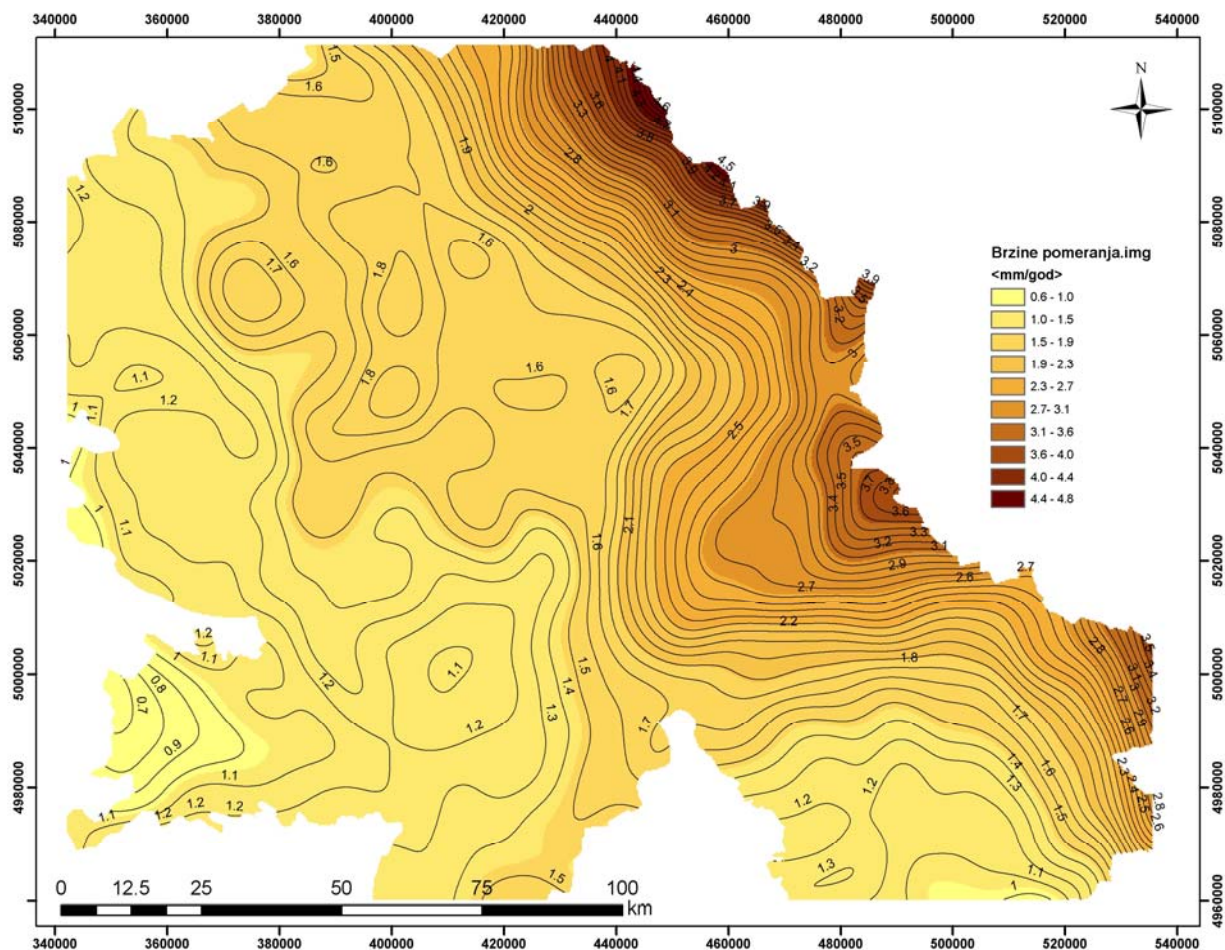
U cilju geostatističke procene brzine pomeranja na predmetnoj oblasti istraživanja, sa približno desetogodišnjim vremenskim intervalom između dve GPS/GNSS merne kampanje, korišćen je *Geostatistical Analyst* modul u okruženju *ArcGIS verzije 9.3* softvera kompanije *ESRI*. *Geostatistical Analyst* predstavlja veoma moćan alat za najbolje modeliranje funkcija variograma i kovariograma, neophodnih za geostatističku interpolaciju. U okviru ovog modula postoji mogućnost obrade i determinističkih i geostatističkih metoda obrade podataka. Od determinističkih metoda, kako je i navedeno u prethodnom tekstu, treba istaći metodu inverznih rastojanja, kod koje uticaj vrednosti atributa opada sa povećanjem udaljenosti od tačke u kojoj se izvodi interpolacija. Dakle, ova metoda predstavlja egzaktni interpolator, tj. rezultat je osetljiv na gomilanje podataka (eng. *clustering*) i ekstremne vrednosti (Slika 7.15).

Za potrebe geostatističkih analiza na predmetnoj oblasti istraživanja, primenjene su metode običnog kriginga (Slika 7.13), metoda inverznih rastojanja (Slika 7.15) i metoda običnog kokriginga, uz korišćenje digitalnog modela terena (Slika 7.17).

Osnovni uslov upotrebe geostatističkih sekvencijalnih simulacija jeste da podaci budu normalno raspoređeni, tako da se može primeniti neka od metoda transformacije. Empirijski model semivariograma i kovarijansa prikazan je oblakom tačaka kroz koje prolazi kriva teorijskog modelovanog variograma. Za potrebe modelovanja korišćen je **Gausov** variogram (model odsecanja ili grumena 0.44698). Uklanjanje trenda izvršeno je kvadratnim polinomom.



Slika 7.12. Empirijski modelovani semivariogram (levo) i kovarijansa (desno) primenom metode običnog kriginga

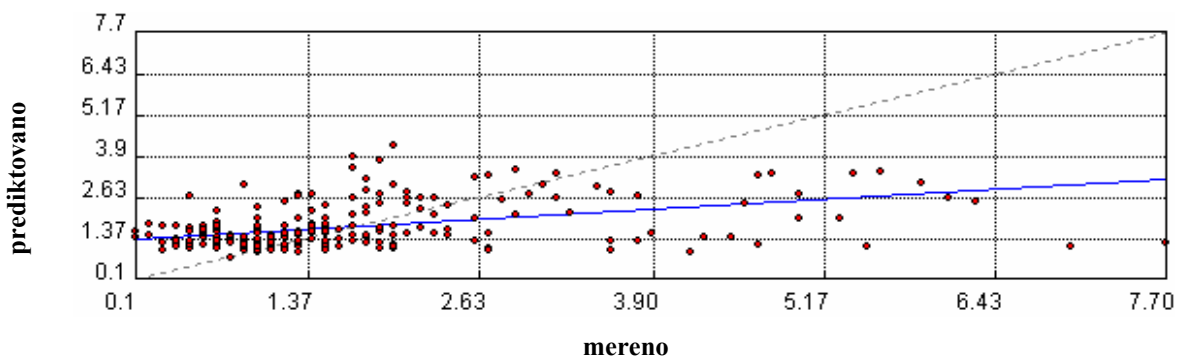


Slika 7.13. Mapa predikcije brzina pomeranja sa izolinijama na oblasti istraživanja [mm/god], primenom metode običnog kriginga

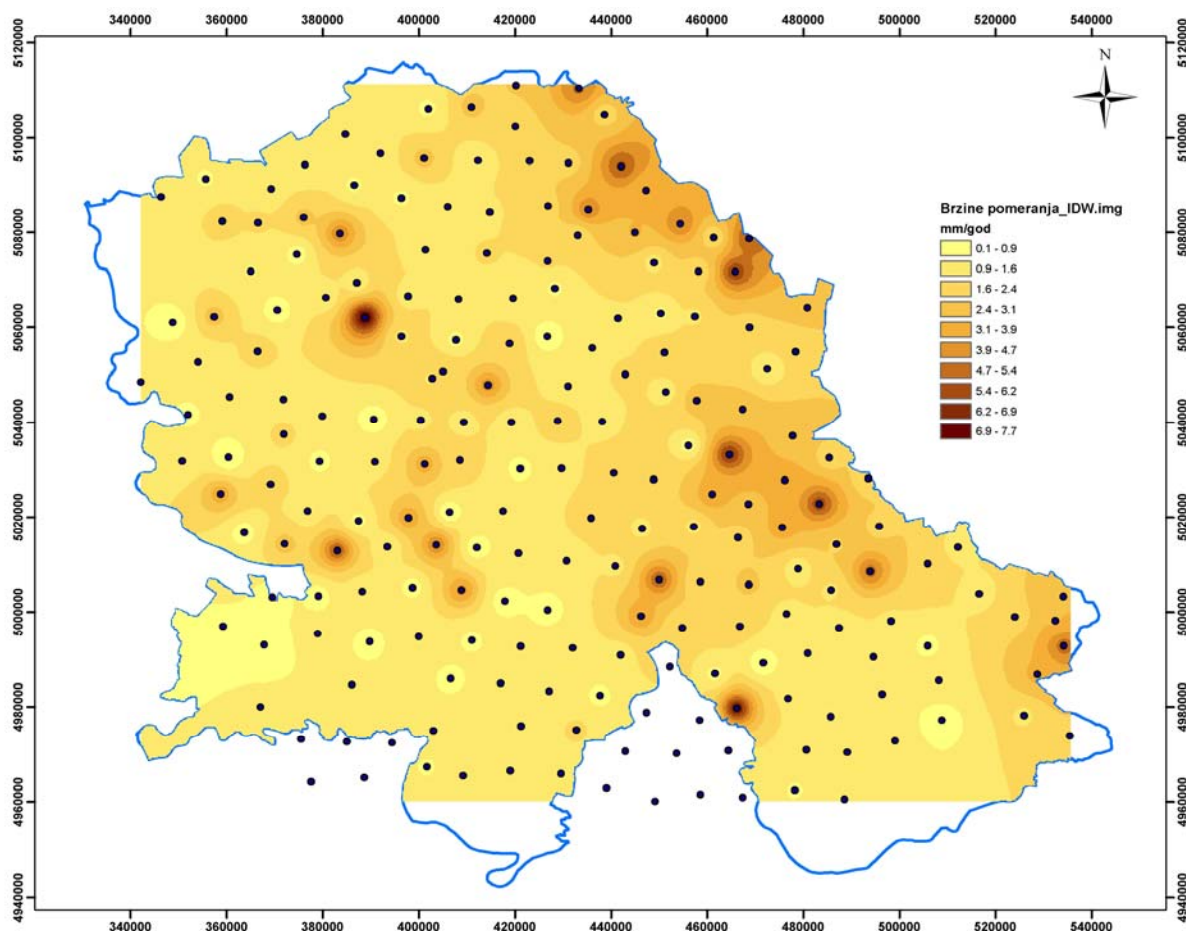
Tabela 7.10. Statistika interpolacije po metodi obični kriging

Obični kriging [uklanjanje trenda kvadratnim polinomom]	
Sredina	0.03053
Srednja kvadratna greška	1.289
Prosečna standardna greška	1.533
Srednja kvadratna standardizovana greška	1.075

Regresiona funkcija: $0.238 \cdot x + 1.339$



Slika 7.14. Regresiona funkcija prediktovanih i merenih vrednosti metodom obični kriging



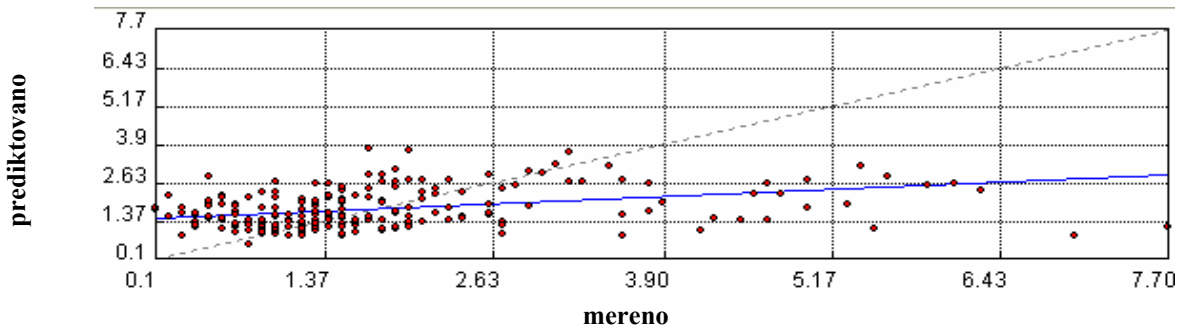
Slika 7.15. Mapa predikcije brzina pomeranja sa dispozicijom „merenih” brzina na oblasti istraživanja [mm/god], primenom metode inverznih rastojanja (*IDW*)

Kao što je već pomenuto, kod **metode inverznih rastojanja** uticaj vrednosti atributa opada sa povećanjem udaljenosti od tačke u kojoj se izvodi interpolacija (Slika 7.15).

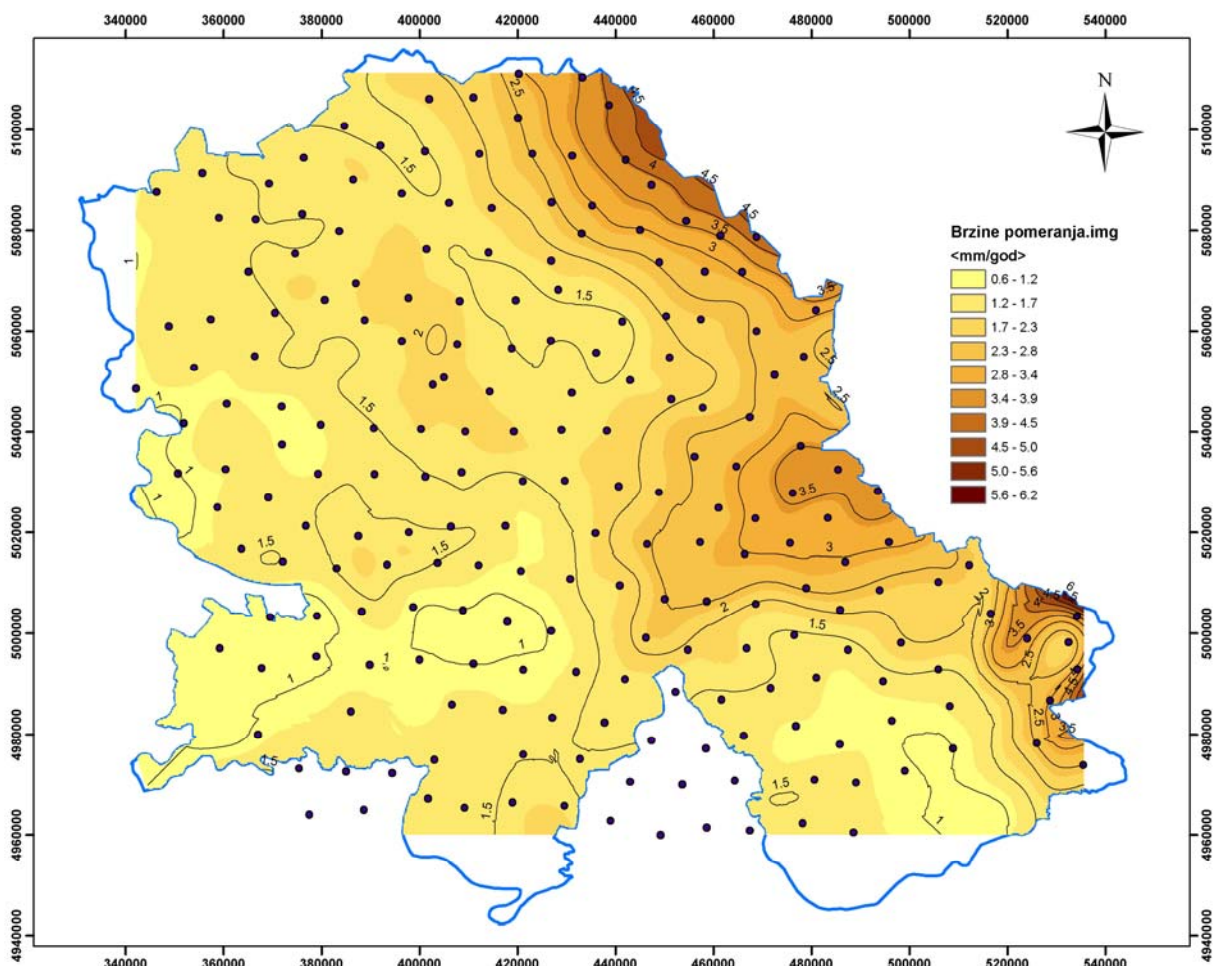
Tabela 7.11. Statistika interpolacije po metodi inverznih rastojanja

Metoda inverznih rastojanja	
Sredina	0.02118
Srednja kvadratna greška	1.324

Regresiona funkcija: $0.192 \cdot x + 1.417$



Slika 7.16. Regresiona funkcija prediktovanih i merenih vrednosti metodom inverznih rastojanja

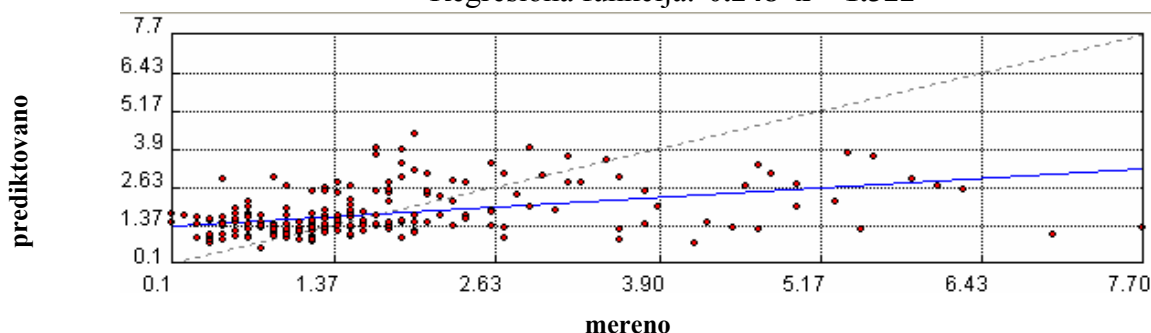


Slika 7.17. Mapa predikcije brzina pomeranja sa dispozicijom „merenih” brzina na oblasti istraživanja [mm/god], primenom metode običnog kokriginga (korišćenje reljefa terena)

Tabela 7.12. Statistika interpolacije po metodi kokriging

Kokriging [uklanjanje trenda kvadratnim polinomom]	
Sredina	0.03912
Srednja kvadratna greška	1.301
Prosečna standardna greška	1.622
Srednja kvadratna standardizovana greška	1.115

Regresiona funkcija: $0.248 \cdot x + 1.322$



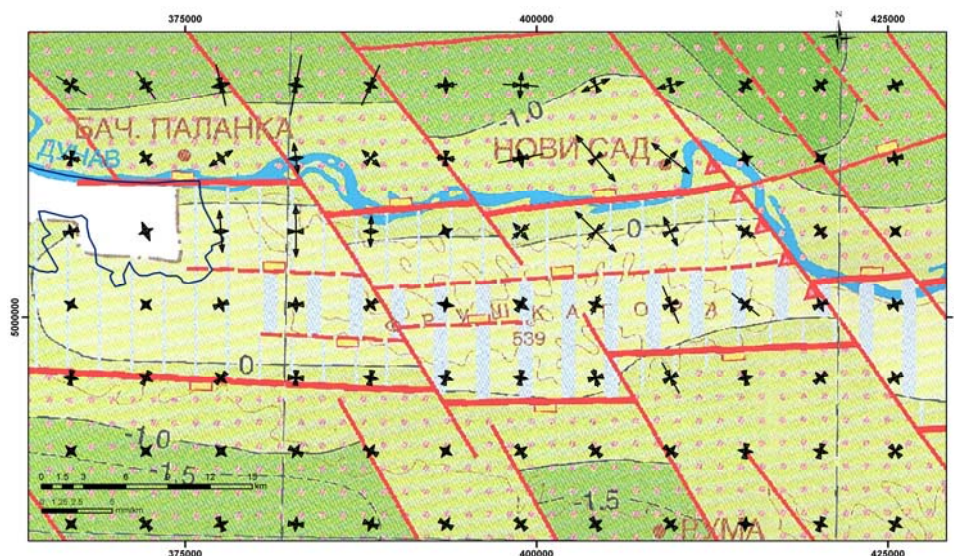
Slika 7.18. Regresiona funkcija prediktovanih i merenih vrednosti metodom kokriging

7.3.5. Korelacija parametara geometrijske analize sa neotektonskim istraživanjima

Na osnovu istraživanja geodinamičkih aktivnosti, sa geodetskog aspekta, na jugoistočnom delu Panonskog basena, koja su uključila određivanja vektora i intenziteta pomeranja, polja pomeranja, elemenata strejn tenzora i geostatističke interpolacije, javila se potreba za upoređenjem rezultata geodetskih istraživanja sa sprovedenim geološkim istraživanjima publikovanim u Neotektonskoj karti Republike Srbije (Marović et al., 2002). Uzevši u obzir da na predmetnoj oblasti istraživanja ne postoje konkretni podaci o geološkim azimutima pomeranja, kako bi se empirijski istražila korelacija, analiza korespondencije dve primenjene metodologije će se sprovesti na osnovu definisanih rasednih linija i utvrđenog regionalnog i lokalnog naponskog stanja na predmetnoj oblasti.

Korelacijom generisanih vektora pomeranja, polja pomeranja i podataka strejn analize, područje istraživanja je diferencirano na više karakterističnih blokova ili anomalijских zona, sa aspekta analize geoloških strukturnih celina:

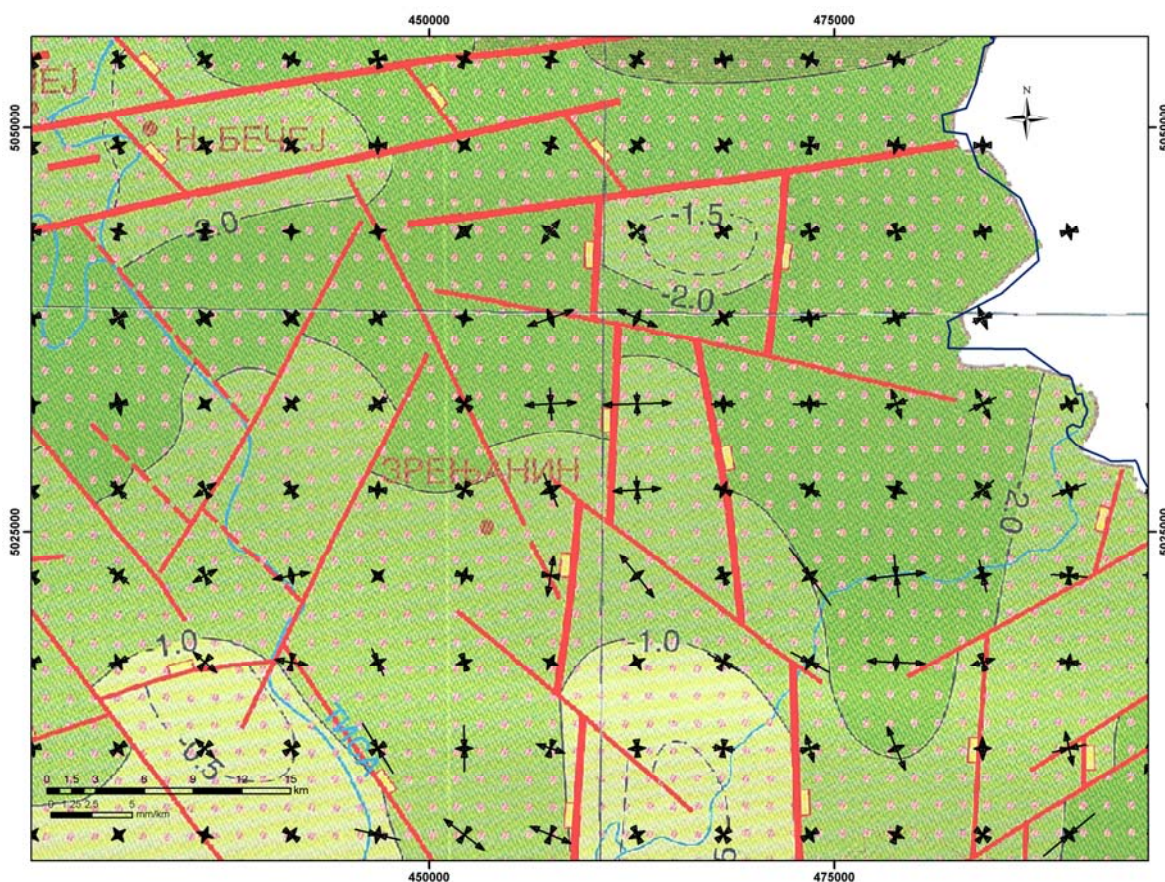
- **Anomalijска zona severne padine Fruške gore.** Područje na severnoj rasednoj oblasti Fruške gore karakteriše tenzija po pravcu sever-jug (područje jugoistočno od Bačke Palanke), koja rezultira gravitacionim spuštanjem severnog, odnosno relativnim izdizanjem južnog bloka ovog raseda. Ukupna dilatacija iznosi $\Delta = 3.3$ mm/km. Dakle, ovde se radi o starim nasleđenim kretanjima, koja su dokazana geološkim, seizmološkim i geofizičkim istraživanjima.
- **Anomalijска zona istočnog dela Fruške gore.** Ova zona se nalazi jugoistočno od Novog Sada. Područje karakteriše prisustvo transkurentno desnih raseda. Distribuciju lokalnih vrednosti naponskog polja kontrolišu lokalne rasedne strukture. Azimut ose maksimalnog strejna empirijski potvrđuje ekstenziju po pravcu severozapad-jugoistok. Ukupna dilatacija iznosi $\Delta = 3.9$ mm/km. Komponenta ukupnog smicanja iznosi $\gamma = 5.24$ mm/km. Numerički podaci strejn analize i dobijene vrednosti strejn elipsi ukazuju na visoku korelaciju sa rezultatima istraživanjima, koji su publikovani u formi Neotektonske karte Republike Srbije (Slika 7.19).



Slika 7.19. Anomalijска zona severne i istočne margine Fruške gore

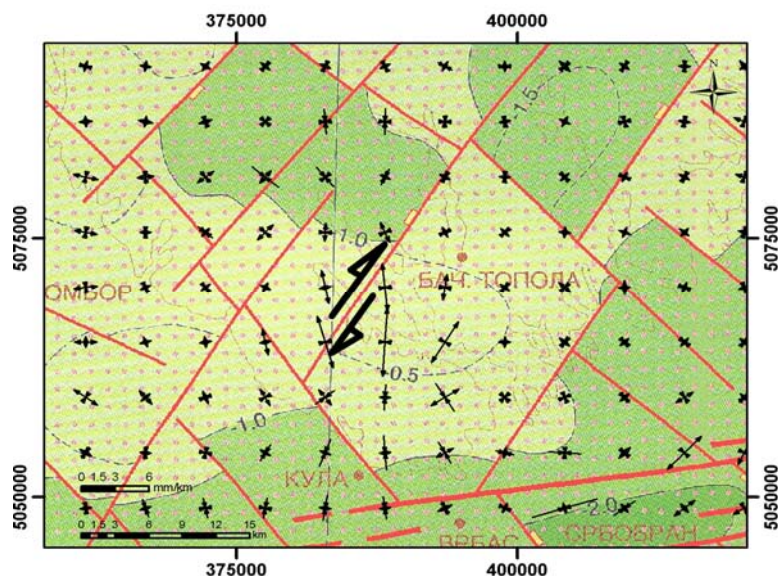
- **Područje istočno od reke Tise.** Ovo područje karakteriše gravitaciono kretanje istočnih blokova rasednih struktura, što potvrđuju azimuti pomeranja istočne orijentacije sledećih blokova: oblasti severoistočno od Zrenjanina, tj. ispod Kikindske sub-depresije, oblast horsta Vršačkih planina, kao i područje severno od Kikinde, a istočno od Subotice. U ovom delu je posebno markantna struktura Greda Beograd – Orlovat, koja gradi zapadnu periferiju Južnobanatskog rova, a koji se dalje nalazi u severnom produženju Velikomoravskog rova. Navedeni strukturni sadržaji su kontrolisani rasedima pružanja sever-jug, koji imaju duboko gravitaciono spuštene istočne blokove. Geostatistička interpolacija metodom običnog kriginga na oblasti istraživanja korespondira sa navedenim zaključcima, uzevši u obzir prostornu distribuciju prediktovanih brzina pomeranja (Slika 7.13 i 7.17). Oblast južno od horsta Vršačkih planina karakteriše vrednost dilatacije od $\Delta = 2.2$ mm/km, sa orijentacijom vektora pomeranja zapad-istok. Oblast severoistočno od Zrenjanina i južno od Kikindske subdepresije nalazi se u domenu tenzionog naponskog polja orijentisanog po istom pravcu. Vrednost ukupne dilatacije iznosi $\Delta = 4.2$ mm/km.

Signifikantne vrednosti ukupne dilatacije u ovoj oblasti i pravac tenzionog strejna orijentisanog pravcem zapad-istok, empirijski potvrđuju prisustvo sistema normalnih raseda, detektovanih tokom ranije izvedenih istraživanja neotektonskih struktura u domenu Panonskog basena. (Slika 7.20).



Slika 7.20. Greda Beograd-Orlovat na zapadnoj granici Južnobanatskog rova, u severnom produženju Velikomoravskog rova: strukture u korespondenciji sa dilatacionim režimom rasedanja terena na bazi strejna analize u okviru geodetskih istraživanja

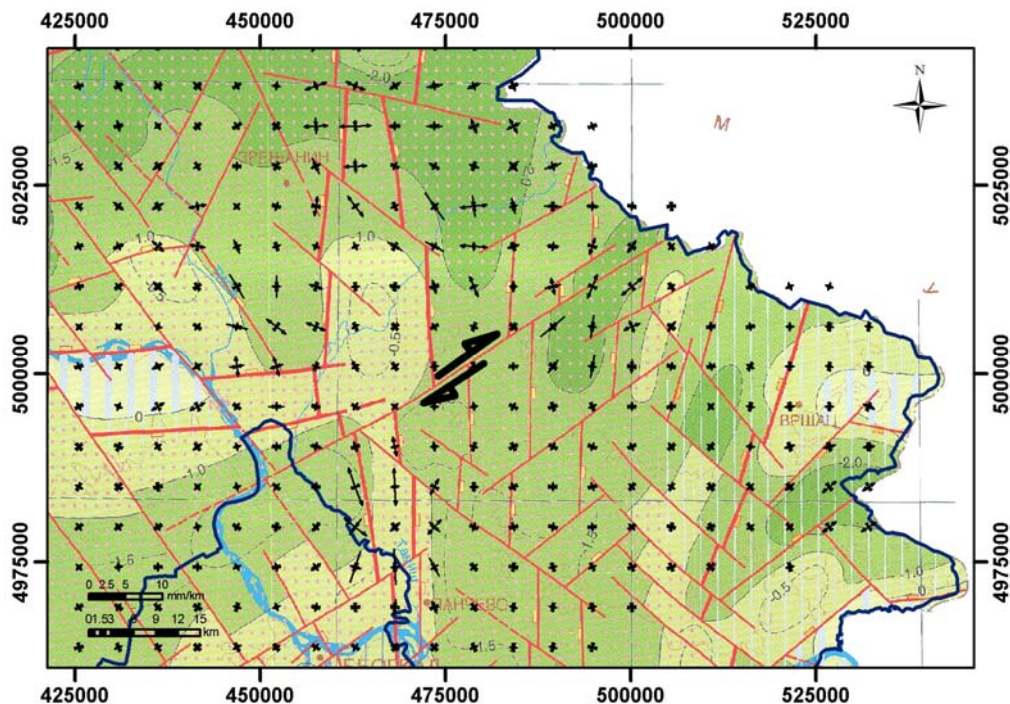
- **Oblast Severnobačkog praga.** Geodetska israživanja korespondiraju neotektonskim istraživanjima i potvrđuju prisustvo transkurentno desnog raseda u prostoru severozapadno od Bačke Topole. Rased deli dublje spušten deo basena na severozapadnom bloku raseda od uzvišenja koje je situirano na jugoistočnoj margini rasedne strukture. U ovom delu sračunata je signifikantna vrednost ukupne dilatacije $\Delta = 7.1$ mm/km. U poglavlju 7.3.2.1 naglašeno je da u kasnijim epohama merenja treba obratiti pažnju na ovo područje, kako bi se sa sigurnošću konstatovao transtenzioni obrazac aktiviranja raseda u ovoj oblasti.



Slika 7.21. Rased u domenu Severnobačkog praga

- **Severoistočni deo Vojvodine** (oblast severno od Kinkinde a istočno od Subotice). Geodinamiku ovog bloka je potrebno sagledati u kontekstu evolucije Mako depresije, koja se nalazi većim delom na području Mađarske. Debljina terciarnih sedimenata u Mako depresiji iznosi od 7 do 8 kilometara, što korespondira sa intenzivnom subsidencijom ovog područja tokom neogena. Međutim, izvedena istraživanja recentnog naponskog polja upućuju na kompresione deformacije. Na osnovu istraživanja strejtnog polja iz dva puta premerene SREF mreže GPS/GNSS statičkom metodom, konstatovana je lokalna kompresija u ovoj oblasti, koja može biti posledica relativno blisko postavljene rigidne Karpatske litosfere, kao pozitivnog morfostrukturnog sadržaja. Ona se može prepoznati kao plitko pozicioniran deo osnove Panonskog basena, koji kao rigidan blok, u interakciji sa savremenim regionalnim naponskim poljem, produkuje lokalnu kompresiju u jugoistočnim delovima Mako depresije (Matenko & Radivojević, 2012). Važno je napomenuti da su naponska stanja kompresivnog karaktera u okviru Panonskog basena, uspostavljena na granici pliocena i kvartara. Jedan od glavnih uzročnika kompresivnog režima u ovom regionu jeste rotacija Jadranske mikroploče u smeru suprotnom od kretanja kazaljke na časovniku (Anderson & Jackson, 1987; Gerner et al, 1999; Marović et al., 2002), što je dovelo do pojave kompresije u graničnom pojasu između Jadranske ploče i Dinarida, pri čemu dolazi do oslobađanja velike količine seizmičke energije. Tenziono naponsko polje konstatovano je u oblasti severoistočno od Kanjiže, što odgovara globalnim neotektonskim istraživanjima, posebno u susednoj Mađarskoj, kada se radi o Segedinskoj depresiji.

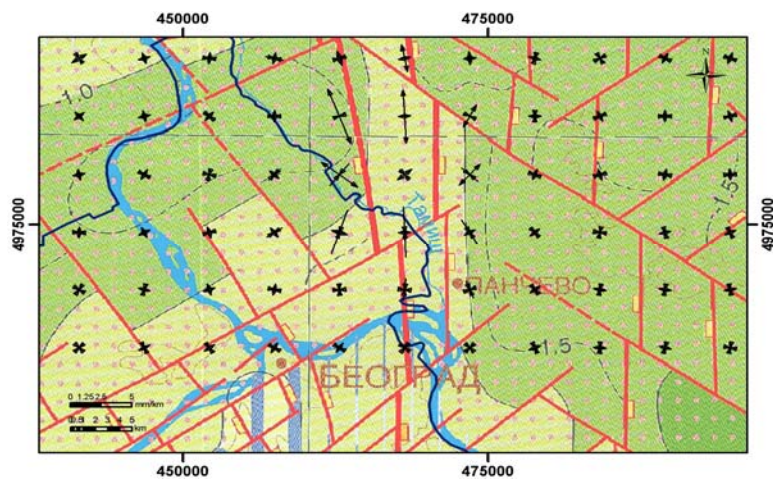
- **Transkurentni rased Opovo-Miletićevo.** Dve geološke strukturne celine (duboki baseni) specifične su po značajnim pomeranjima u jugoistočnoj oblasti Vojvodine, kao posledica propagacije Velikomoravskog rova i njegove severne prolongacije. Ove celine pripadaju tzv. peri-panonskim strukturama, pri čemu su sistemi normalnih raseda u dubini povezani u jedinstvenu strukturu (Marović et al., 2002; Matenco & Radivojević, 2012).



Slika 7.22. Transkurentni rased Opovo-Miletićevo

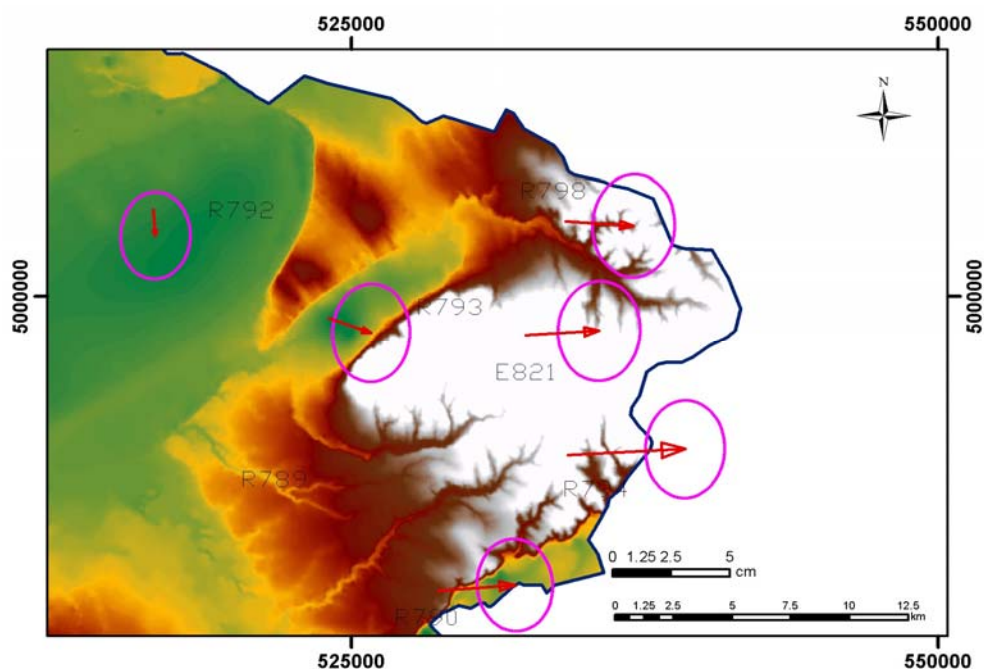
Ti duboki baseni pružaju se pravcem sever-jug. Kontrolisani su normalnim rasedima razvijenim po zapadnom obodu depresija, pri čemu ovi rasedi padaju ka istoku (Pančevo depresija i Drmno/Zagajica/Plandište depresija). Na osnovu sračunatih parametara strejn tenzora i signifikantnih vrednosti ukupne dilatacije, u ovom području se posebno ističe transkurentno desni rased, koji se pruža od Opova (severoistočno od Pančeva) ka Miletićevu (severoistočno od Plandišta), što korespondira neotektonskim istraživanjima u ovom delu (Slika 7.22).

U pojasu oko reke Tamiš, parametri strejn analize definišu osu maksimalnog strejna orijentisanu pravcem jugozapad-severoistok, što je korelativno sa kinematikom neotektonski aktivnih struktura (Marović et al., 2002). Distribuciju lokalnih naponskih stanja ovde takođe kontrolišu lokalne rasedne strukture (Slika 7.23).



Slika 7.23. Lokalna kompresija u oblasti oko reke Tamiš

- **Oblast Vršačkih planina.** U domenu uticaja sistema normalnih raseda, a posebno raseda Drmno/Zagajica/Plandište, generisan je lokalni subbasen u blizini Vršačkih planina (Zagajica depresija), zapunjen debelim paketom aluvijalno-jezerskih, sinriftnih sedimenata. Oblast južno od horsta Vršačkih planina karakteriše ukupna vrednost dilatacije od $\Delta = 2.2$ mm/km, sa osom maksimalnog strejna orijentacije jugozapad-severoistok. Na određenom broju tačaka deformacionog geodinamičkog modela, na osnovu deformacione analize po metodu Karlsruhe, otkrivena su signifikantna pomeranja sa orijentacijom vektora zapad – istok.



Slika 7.24. Vektori pomeranja na tačkama SREF mreže u široj oblasti oko Vršačkih planina

Kao što je već pomenuto, jedinstven stav brojnih istraživača jeste da je upravo širenje litosfere odigralo značajnu ulogu u formiranju Panonskog basena. Veoma tanka kora i visok stepen litosferskog protoka toplote, mogu biti uzroci pojave transkurentnih raseda, što je empirijski potvrđeno geološkim i geodetskim istraživanjima na jugoistočnom delu basena. Regionalna naponska stanja su posledica strukture i međusobnih odnosa Jadranske ploče, Dinarida, Panonskog basena i Karpata.

Mehanizam pritiska Jadranske ploče na spoljašnje Dinaride inicira snažne seizmičke aktivnosti, koje se prenose na unutrašnje Dinaride i Panonski basen. Zbog tanke litosfere u okviru Panonskog basena, kruto postavljenih Dinarida i Karpata, njihove granične zone su najpodložnije reakciji na kompresiju, što uzrokuje pojavu dominantnih transkurentnih ili klizajućih raseda. Na osnovu ovih tektonskih transfera blokova, formiraju se lokalne rasedne strukture, koje su opisane u ovoj disertaciji i koje se u znatnoj meri uklapaju u regionalna naponska stanja.

8. DISKUSIJA I ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Istraživanja zasnovana na geodetskoj deformacionoj analizi i strejn analizi dva puta premerene SREF mreže na predmetnoj oblasti (jugoistočni deo Panonskog basena, teritorija Vojvodine), metodom GPS/GNSS relativnog statičkog pozicioniranja, **korespondentna** su sa regionalnim naponskim stanjima, istraživanim u dužem vremenskom intervalu, na bazi geoloških, geofizičkih i geomorfoloških analiza. Na osnovu vektora pomeranja pojedinačnih tačaka deformacionog modela, kao i računanja polja pomeranja u izabranom gridu, vizuelnom inspekcijom identifikovani su karakteristični obrasci kretanja pojedinačnih blokova, koji se mogu objasniti recentnim tektonskim procesima, koji se dešavaju u neposrednom okruženju predmetne oblasti istraživanja.

Analiza dobijenih rezultata na bazi geodetskih istraživanja, uključila je sledeće faze:

- **Geodetska deformaciona analiza geodinamičkog modela na osnovu Karlsruhe postupka**
 - Interpretacija dobijenih azimuta pomeranja na svim tačkama SREF mreže
 - Računanje intenziteta pomeranja na svim tačkama SREF mreže
 - Interpolacija polja pomeranja u definisanom gridu

- **Strejn analiza po principima mehanike kontinuuma na osnovu ponovljenih GPS/GNSS merenja**
 - Računanje komponenti strejna smicanja, ukupne dilatacije i azimuta ose maksimalnog strejna
 - Grafička interpretacija parametara strejna sa definisanim dilatacionim i kompresivnim karakterom kretanja terena

- **Geostatistička interpolacija brzina pomeranja između dve GPS/GNSS merne kampanje**
 - Kreiranje mape predikcije brzina pomeranja na predmetnoj oblasti primenom metode inverznih rastojanja
 - Kreiranje mape predikcije brzina pomeranja na predmetnoj oblasti primenom metode obični kriging
 - Kreiranje mape predikcije brzina pomeranja na predmetnoj oblasti primenom metode obični kokriging (korišćenje reljefa terena)

Geološki model pomeranja terena na jugoistočnom delu Panonskog basena zasnovan je na istraživanjima, koja su publikovana u formi Neotektonske karte Republike Srbije, kao i u vidu brojnih stručnih radova koji su se bavili geodinamičkom problematikom na predmetnoj oblasti istraživanja (Marović & Đoković, 1989; Horváth & Cloetingh, 1996; Marović et al., 2002; Horváth et al., 2006; Cloetingh et al., 2006; Matenko & Radivojević, 2012; Toljić, 2013). Evolucija Panonskog basena je generalno vezana za subdukcione i kolizione procese na

spoljašnjim marginama Karpatskog lanca (Cloething et al., 2006; Horváth et al., 2006). U studiji, koju su sprovedli Matenco i Radivojević, pokazano je da je proces otvaranja Panonskog basena podržan pojavom transkurentnih kretanja ekstenzivnih mehanizama.

Geodetska istraživanja su bazirana na dobijenim rezultatima intenziteta i vektora pomeranja pojedinačnih tačaka geodinamičkog deformacionog modela, a zavisno od toga i na osnovu generisanja interpolacionog polja vektora pomeranja. Na osnovu sračunatog intenziteta pomeranja u svakoj tački deformacionog geodinamičkog modela, primenjena je geostatistička interpolacija, na osnovu koje su generisane mape predikcija osrednjenih brzina pomeranja u približno desetogodišnjem vremenskom intervalu.

Kao dopuna strogo geometrijskoj analizi deformacija na jugoistočnom delu Panonskog basena, primenjena je strejn analiza po principima mehanike kontinuuma, na osnovu koje je definisan karakter kretanja pojedinačnih blokova na predmetnoj oblasti istraživanja. Strejn analizom su sračunate linearne promene po jedinici dužine, u pravcu X, odnosno Y ose (e_{xx} , e_{yy}), strejn smicanja (e_{xy} , e_{yx}) i rotacija (ω). Bolja interpretacija je postignuta transformacijom u sistem osa maksimalnog strejna, odnosno generisanjem strejn elipsi. Elementi strejn elipsi (poluose e_1 , e_2 i azimut maksimalnog strejna φ) sračunati su iz komponenti strejna, analogno računanju elemenata standardne elipse grešaka za svaku tačku geodetske mreže. Kada se globalno analizira područje istraživanja, može se zaključiti da su dve nezavisno primenjene metodologije pomeranja terena, geodetska i geološka, veoma korespondentne. Međutim, važno je napomenuti da postoje i zone lokalnih odstupanja od regionalnih naponskih stanja, koje su posledica reaktivizacije sadržaja lokalnih struktura.

Područje istraživanja diferencirano je na više karakterističnih blokova ili anomalijskih zona, sa aspekta analize geoloških strukturnih celina:

- **Anomalijaska zona severne padine Fruške gore**
- **Anomalijaska zona istočnog dela Fruške gore**
- **Područje istočno od reke Tise**
- **Oblast Severnobačkog praga**
- **Severoistočni deo Vojvodine**
- **Transkurentni rased Opovo-Miletićevo**

Područje na severnoj rasednoj oblasti Fruške gore karakteriše ekstenzivni režim kretanja terena sa dominantnim pravcem sever – jug (jugoistočni deo Bačke Palanke). Na osnovu brojnih geoloških, geofizičkih i seizmoloških istraživanja, konstatovano je da se radi o starim nasleđenim kretanjima.

Istočni deo Fruške gore odnosi se na dilatacioni karakter kretanja terena, pri čemu distribuciju lokalnih naponskih polja diktiraju lokalne rasedne strukture. Numerički podaci strejn analize (gradijent brzine ili gradijent pomeranja) i dobijene vrednosti strejn elipsi, ukazuju na visoku podudarnost sa istraživanjima koja su publikovana u formi Neotektonske karte Republike Srbije.

Oblast koja se nalazi u severnom produženju Velikomoravskog rova karakteriše gravitaciono kretanje istočnih blokova rasednih struktura, što potvrđuju azimuti pomeranja istočne orijentacije sledećih blokova: oblasti severoistočno od Zrenjanina, tj. ispod Kikindske subdepresije, oblast horsta Vršačkih planina, kao i područje severno od Kikinde, a istočno od Subotice. Prostorna distribucija prediktovanih brzina pomeranja ide u prilog ovoj konstataciji.

U domenu Severnobačke visoravni uočen je rased dilatacionog karaktera, koji odgovara transkurentno desnom rasedu na Neotektonskoj karti, čiji je pravac pružanja severoistok – jugozapad, a koji se nalazi severno od glavnog rasednog sistema koji odvaja Severnobačku visoravan od Južnobačke subdepresije.

Geodinamika severoistočnog dela Vojvodine je u relaciji sa razvojem Mako depresije, koja je većim delom pozicionirana u Mađarskoj. Na osnovu istraživanja parametara strejn tenzora, uočena je lokalna kompresija u ovoj oblasti, koja može biti posledica relativno blisko postavljene rigidne Karpatske litosfere, kao pozitivne morfostrukture. Takođe, tu se nalazi plitko pozicioniran deo osnove Panonskog basena, koji kao rigidan blok u savremenom naponskom polju, produkuje lokalnu kompresiju u jugoistočnim delovima Mako depresije. Kako je i navedeno u disertaciji, naponska stanja kompresivnog karaktera u okviru Panonskog basena, uspostavljena su na granici pliocena i kvartara. Jedan od ključnih faktora kompresije na ovom delu jeste rotacija Jadranske mikroploče u smeru suprotnom od smera kretanja kazaljke na časovniku, što u velikoj meri utiče na tektoniku celog Panonskog basena.

Na osnovu sračunatih parametara strejn tenzora i signifikantnih vrednosti ukupne dilatacije, detektovan je transkurentno desni rased, koji se pruža od oblasti severoistočno od Pančeva do oblasti severoistočno od Plandišta, gde je prisutan sistem normalnih raseda. Zbog geografske odrednice i blizine naseljenih mesta, rased je nazvan Opovo-Miletićevo.

Geološka istraživanja ukazuju da je mehanizam ekstenzije u okviru jugoistočnog dela Panonskog basena fundamentalno asimetričan u pogledu geometrije, sa propagacijom deformacija kroz čitav basen. Na osnovu geoloških, seizmoloških i biostratigrafskih istraživanja, još uvek je prilično neizvesno odrediti apsolutne vremenske raspone kretanja geoloških strukturnih celina. Seizmička ispitivanja ukazuju na prisustvo nelinearnih seizmičkih deformacija u tranzicionim zonama između Karpata i Dinarida (planinski pojasevi Fruška gora, Bukulja i Cer), oblasti kontakta Srpsko-makedonske i Jadar-Kopaonik oblasti (blizina Moravske doline), kao i u zoni kontakta Dinarida i Panonskog basena (Bukulja i planina Cer, u centralnoj i zapadnoj Srbiji). Panonski basen je otvoren u zoni interferencije uticaja Dinarida i Karpato-Balkanida. Mehanizmi od značaja za njegovu evoluciju su tonjenje subdukovane Karpatske ploče (eng. *roll-back*) sa jedne strane i sever-severoistočna propagacija Jadranske ploče, kao drugi važan činilac. Tehnologija satelitskog pozicioniranja, u cilju detektovanja tektonski aktivnih oblasti, opravdana je sa aspekta postignute tačnosti određivanja signifikantnih pomeranja tačaka stabilizovanih u površinskom omotaču Zemljine kore. Geodetska istraživanja ovim daju veoma značajan doprinos multidisciplinarnim istraživanjima u cilju jasnijeg razumevanja stanja Zemljine kore, na području regionalnog karaktera.

8.1. PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

Promena nivoa podzemnih voda, tektonske pojave, rasedanja terena, klizišta, samo su neki od velikog broja uzroka koji iniciraju permanentna pomeranja površinskog omotača Zemljine kore. Istraživanje pomeranja geoloških struktura na jugoistočnom delu Panonskog basena, postalo je opravdano sa geodetskog aspekta razvojem tehnologije satelitskog pozicioniranja. Iako se prvobitna namena dve nezavisno realizovane merne GPS/GNSS kampanje, koje je realizovao Republički geodetski zavod, odnosila na prostornu evoluciju koordinatnog referentnog okvira u Republici Srbiji, prvi put su se stekli uslovi za primenu analize pomeranja na oblasti regionalnog karaktera i utvrđivanje korespondentnosti sa neotektonskim geološkim istraživanjima.

Pravci daljih istraživanja, u cilju jasnijeg razumevanja stanja Zemljine kore na predmetnoj oblasti istraživanja, odnose se na sledeće:

- Kada se ima u vidu verifikacija prostorne evolucije koordinatnog referentnog sistema u predstojećem periodu, opravdano je analizu geodetskih merenja u narednim kampanjama usmeriti u pravcu formiranja kinematičkog deformacionog modela, kako bi se dobili jasniji i sveobuhvatniji zaključci o razumevanju regionalnih pomeranja Zemljine kore. U disertaciji je sprovedena analiza na osnovu dve realizovane merne epohe sa približno desetogodišnjim vremenskim razmakom, čime su dobijene osrednjene interpolirane vrednosti pomeranja. U cilju dobijanja verodostojnijeg prikaza geodinamičkih aktivnosti na predmetnoj oblasti, neophodno je opažanja realizovati u češćim vremenskim intervalima.
- Kao alternativna metoda za određivanje geodinamičkih pomeranja na predmetnoj oblasti istraživanja, može se koristiti aktivna geodetska referentna osnova Republike Srbije (AGROS). Prednost aktivnih permanentnih stanica odnosi se na obezbeđenje kontinualnih podataka o poziciji tokom dužeg vremenskog intervala, stabilnost same stanice i eliminaciju izvora grešaka prisutnih kod ponovljenih merenja na pasivnoj referentnoj osnovi. Iako je obezbeđena visoka vremenska rezolucija, nedostatak se odnosi na nisku prostornu rezoluciju, te je stoga analizu na aktivnim mrežama potrebno sprovesti kao podršku ponovljenim merenjima na pasivnoj geodetskoj referentnoj osnovi.
- U tom cilju, potrebno je projektovati i realizovati specijalizovanu geodinamičku mrežu za precizni kontinuirani monitoring karakterističnih rasednih oblasti od interesa na jugoistočnom delu Panonskog basena. U skladu sa tim, neophodno je u kooperaciji sa predstavnicima ostalih naučnih disciplina, kao što su geofizika, neotektonika, inženjerska seizmologija i građevinarstvo, definisati prioritetna područja i dinamiku realizacije za kontinuirani monitoring. Ovo će doprineti razumevanju mehanizma pomeranja jedne strukturne celine i posledične reakcije druge strukturne celine u narednoj epohi merenja, a sve u cilju stvaranja kompletnije slike dinamike strukturnog sklopa jugoistočnog dela Panonskog basena. Mrežu koja bi bila specijalno projektovana i realizovana za geodinamička visoko precizna merenja, potrebno je opažati jednom godišnje, u cilju eliminisanja potrebe za vremenskom interpolacijom.
- Na osnovu dobijenih rezultata u disertaciji, koji se odnose prvenstveno na generisanje polja vektora pomeranja i polja elemenata strejn tenzora u formi pravilnog grida, moguće je vizuelnom inspekcijom identifikovati slične obrasce kretanja za pojedine blokove, što stručnjacima iz oblasti ove problematike ne predstavlja problem. Ipak, javlja se potreba za automatizacijom tumačenja vektora pomeranja, kada se radi o osmatranju specifičnih oblasti terena, kao što su veći planinski pojasevi (oblast Fruške gore i horst Vršackih planina), rasedi u domenu Severnobačkog praga i strukturni sadržaji u severnom produženju Velikomoravskog rova. Na osnovu navedenih činjenica u disertaciji, korisno je razmotriti primenu monitoringa sa alarmnim sistemom, koji može da funkcioniše bez ljudskog osoblja, korišćenjem modela napredne deformacione analize, kao što su fuzzy modeli i veštačke neuronske mreže.
- Naredna istraživanja na predmetnoj oblasti mogla bi uključiti i tehnologiju radarske interferometrije (posebno PSInSAR) u cilju pogašćavanja modela pomeranja, kao i njenu integraciju sa metodama satelitskog pozicioniranja. PS-InSAR metoda je veoma efikasna kada je u pitanju identifikacija pomeranja u vertikalnoj ravni, dok bi se za određivanja horizontalnih pomeranja koristila GPS/GNSS merenja u aktivnoj i pasivnoj mreži Republike Srbije.

9. LITERATURA

- [1] Abellan A, Vilaplana JM, Calvet J, Blanchard J, (2010): Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanning modelling. *Geomorphology* 119:162–171. doi:10.1016/j.geomorph. 2010.03.016.
- [2] Ahlberg, J.H., Nilson, E.W., Walsh, J.L., (1967): *The Theory of Splines and its Applications*. Academic Press, New York 280 pp.
- [3] Altiner, Y. (1996): *Geometrische Modellierung innerer und äußerer Deformationen der Erdoberfläche*, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C: Dissertationen, 462, 1996.
- [4] Altiner, Y., Cigrovski-Detelić, B., Čolić, K., Seeger, H. (1998): Present Crustal Deformations in the Adriatic Sea Area on the Basis of GPS observations. In Čolić K. (Ed.), *Geodynamics of the Alps-Adria Area by means of Terrestrial and Satellite Methods* (p. 37-47). Dubrovnik.
- [5] Amelung, F., Galloway, D. L., Bell, J. W., Zebker, H. A., and Lacznia, R. J. (1999): Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer system deformation. *Geology*, 27(6), 483–486.
- [6] Amelung, F., Jónsson, S., Zebker, H., and Segall, P.(2000): Widespread uplift and trapdoor faulting on Galapagos volcanoes observed with radar interferometry. *Nature*, 407(6807), 993–996.
- [7] Anderson, H., Jackson, J., (1987): Active tectonics of the Adriatic region. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 91, pp 937-983.
- [8] Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., (2007): Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne Lidar. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 7:637–650. doi:10.5194/nhess-7-637-2007.
- [9] Aydoğan, C., Maktav, D. , Alparslan, E., (2004): Ground deformation mapping using InSAR, *Proceedings, ISPRS congress, Istanbul, Turkey*.
- [10] Baltsavias EP, (1999): Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 54:199–214. doi:10.1016/S0924-2716(99)00015-5.
- [11] Berber, M., (2006): *Robustness Analysis of Geodetic Networks*. Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Technical Report No. 242,

University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 121 pp.

- [12] Biagi, L., Dermanis, A., (2006): The treatment of time-continuous GPS observations for the determination of regional deformation parameters. In: F. Sanso, A.J. Gil (Eds.), 2006, Geodetic deformation monitoring: from geophysical to geodetic roles, IAG Symposia, Vol. 131, pp. 83-94, Springer, Berlin, 2006.
- [13] Blagojević, D. (2003): Nova državna referentna mreža republike Srbije, Savetovanje: Osnovni geodetski radovi – stanje i perspektiva Arandelovac 21-23.02.2003, CD izdanje, Republički Geodetski Zavod Beograd.
- [14] Blagojević, D., (2005): Mogućnosti globalnog pozicionog sistema za uspostavljanje geodetske referentne osnove u gradovima, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet.
- [15] Bulatović, V., Sušić, Z., Ninkov, T. (2012): Estimate of the ASTER GDEM regional systematic errors and their removal, International Journal of Remote Sensing, Publisher: Taylor & Francis, <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2012.676744>, Volume: 33, Issue: 18, 11.04.2012, ISSN: 0143-1161, pp 5915-5926.
- [16] Campbell, J., (1996): Measurement of Vertical Motion in Europe by VLBI—Further Support of the European Geodetic VLBI network by the European Union, Proc. of the 11th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Chalmers Research Report 177, 227–231, Onsala, Sweden.
- [17] Capra A., Mancini, F., Negusini, M., (2007): GPS as a geodetic tool for geodynamics in northern Victoria Land, Antarctica, Antarctic Science 19 (1), 107–114 (2007) © Antarctic Science Ltd Printed in the UK, DOI: 10.1017/S0954102007000156.
- [18] Caspary, W.F., (2000): Concepts of networks and deformation analysis, Monograph, University of New South Wales, 3rd corr. impression.
- [19] Chen, Y., Q., (1983): Analysis of Deformation Surveys - a Generalised Method. (Ph.D. Dissertation) Technical report No. 94, Dept. of Surveying Eng., University of New Brunswick, 262 p.
- [20] Chen, Y.Q., A. Chrzanowski, Secord., J. M., (1990): A strategy for the analysis of the stability of reference points in deformation surveys, CISM JOURNAL ACSGC, Vol. 44, No. 2, pp. 141-149.
- [21] Chrzanowski, A., Chen, Y., Q., Szostak-Chrzanowski, A., Secord, J., M., (1990): Combination of Geometrical Analysis with Physical Interpretation for the Enhancement of Deformation Modelling. XIX. FIG Congress, Helsinki 1990,

Proceedings, Com. 6, pp. 326-341.

- [22] Clark, I., (1979): Practical Geostatistics, Elsevier Applied Science Publisher, London and New York.
- [23] Cloetingh, S., G. Bada, L. Matenco, A. Lankreijer, F. Horváth, and C. Dinu, (2006): Modes of basin (de)formation, lithospheric strength and vertical motions in the Pannonian-Carpathian system: Inferences from thermomechanical modelling, in European Lithosphere Dynamics, edited by D. G. Gee and R. A. Stephenson, Geol. Soc. Mem., 32(1), 207–221, doi:10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.12.
- [24] Cooper, M.A.R., (1987): Control Surveys in Civil Engineering, William Collins Sons & Co. Ltd., London.
- [25] Csontos, L., (1995): Tertiary tectonic evolution of the Intra-Carpathian area: a review. Acta Vulcan., 7, 1–13.
- [26] Csontos, L., Nagymarosy, A., (1998): The Mid-Hungarian line: a zone of repeated tectonic inversions. Tectonophysics 297, 51–71.
- [27] Curlander, J., C., McDonough, R., N., (1991): Synthetic Aperture Radar: System and Signal Processing, John Wiley and Sons, 647 pp.
- [28] Cvjetinović, Ž., (2005): Razvoj metodologije i tehnoloških postupaka za formiranje digitalnog modela terena za teritoriju države, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Beograd.
- [29] Čolić, K., Prelogović, E., Pribičević, B., Svehla, D., (1999): Hrvatski geodinamički projekt CRODYN i GPS mreža Grada Zagreba. In A. Bajić (Ed.), Znanstveni skup Andrija Mohorovičić - 140. obljetnica rođenja: zbornik radova (p. 141-152). Zagreb: Državni hidrometeorološki zavod.
- [30] Čalić, J., Milošević, M., Gaudenji, T., Štrbac, D., Milivojević, M., (2012): Panonska nizija kao morfostrukturna jedinica Srbije, Glasnik Srpskog geografskog društva, sveska XCII – Бр. 1, UDC: 911.2:551.4.032(497.113), DOI: 10.2298/GSGD1201047C.
- [31] Dermanis, A., Kotsakis, C., (2006): Estimating crustal deformation parameters from geodetic data: Review of existing methodologies, open problems and new challenges. In: F. Sanso, A.J. Gil (Eds.), 2006, Geodetic deformation monitoring: from geophysical to geodetic roles, IAG Symposia, Vol. 131, pp. 7-18, Springer, Berlin.
- [32] Dermanis, A., Livieratos, E., (1983): Applications of Deformation Analysis in Geodesy

and Geodynamics. Reviews of Geophysics and Space Physics, 21, 41-50.

- [33] Dimitrijević, M., (1992): Geološki atlas Srbije 1:2.000.000, Beograd.
- [34] Dinter, G., Schmitt, G., (2001): Three Dimensional plate Kinematics in Romania, Natural Hazards 23: 389–406, 2001. © 2001 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
- [35] Drozdov, N.D., (1972): Линейная алгебра в теории уравнивания измерений, Nauka, Moskva.
- [36] Đapo, A., (2009): Korelacija geodetskog i geološkog modela tektonskih pomaka na primjeru šireg područja grada Zagreba, doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet.
- [37] Đorđević, P., Jovanović, V., Cvetković, V., (2000): Primjenjena geologija, Univerzitetška štampa, Beograd
- [38] Eichorn, A., (2007): Tasks and newest trends in geodetic deformation analysis: A tutorial, 15th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2007), Poznan, Poland, September 3-7, 2007, copyright by EURASIP.
- [39] Ellmer, W., (1987): Untersuchung temperaturinduzierter Höhenänderung eines Großturbinentisches. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, No. 26, Neubiberg.
- [40] Eringen, A., C., 1980. Mechanics of Continua. John Wiley & Sons, Inc, pp. 15–19.
- [41] Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., (2007): Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 45, NO. 5, MAY 2007.
- [42] Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., (2007): InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry, Processing and Interpretation, European Space Agency, ESA Publications ESTEC, The Netherlands, February 2007.
- [43] Fletling, R., (2008): Application of Fuzzy Clustering in Deformation Analysis, AIEG 2008 – First Workshop on Application of Artificial Intelligence in Engineering Geodesy, pp 26-41.
- [44] Fraser, C. S., Gruendig, L., (1985): The analysis of photogrammetric deformation measurements on turtle mountain, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 51, No. 2, pp. 207-216.
- [45] Frisch, W., Kuhlemann, J., Dunkl, I., Brügel, A., (1998): Palinspastic reconstruction and

- topographic evolution of the Eastern Alps during late Tertiary tectonic extrusion. *Tectonophysics* 297, 1–15.
- [46] Frisch, W., I. Dunkl, and J. Kuhlemann, (2000): Post-collisional orogen-parallel large-scale extension in the Eastern Alps, *Tectonophysics*, 327, 239-265.
- [47] Gehlot, S., Ketelaar V., B., H., Verbree E., Hanssen R., F., (2005): Conceptual Framework for PS-InSAR Interpretation Assisted by Geo-information Technology, In ISPRS Workshop on "High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information", Hannover, Germany, 17-20 May 2005.
- [48] Gerner, P., Bada, G., Dóvényi, P., Müller, B., Onescu, M. C., Cloetingh, S. A. P. L., and Horváth, F., (1999): Recent tectonic stress and crustal deformation in and around the Pannonian basin: data and models, in: Durand, B., Jolivet, L., Horváth, F., and Séranne, M. (Eds.): *The Mediterranean basins: Tertiary extension within the Alpine orogen*. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, 156, pp 269–294.
- [49] Glavatović, B., (2005): *Osnovi geonauka, Seizmološki zavod Crne Gore, Podgorica*
- [50] Gordon, D., Ma, C., Ryan, J., W., (1993): Results from the CDP Mobile VLBI Program in the Western United States, *Contribution of Space Geodesy to Geodynamics: Crustal Dynamics*, edited by D. E. Smith and D.L Turcotte, AGU Geodynamics Series, (23), p. 131.
- [51] Gordon, S.J., Lichti, D.D., (2007): Modeling terrestrial laser scanner data for precise structural deformation measurement, *Jour. Surv. Eng.*, 133, p. 72-80.
- [52] Grasemann, B., Stüwe, K., (2002): *GEOLOGY – Vol. I - Tectonics and Geodynamics - Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*
- [53] Grenerczy, G., (2000): Present-day tectonics of the Pannonian basin and its surroundings inferred from space geodesy, Ph.D. Dissertation, November 2000, Geophysics Department of Loránd Eötvös University of Sciences, Budapest, Hungary.
- [54] Grenerczy, G., Sella, G., Stein, S., Kenyeres, A., (2005): Tectonic implications of the GPS velocity field in the northern Adriatic region, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 32, L16311, doi:10.1029/2005GL022947.
- [55] Gutdeutsch, R., Aric, K., (1988): Seismicity and neotectonics of the East Alpine-Carpathian and Pannonian area, in: Royden, L. H. and Horv'ath, F. (Eds.): *The Pannonian Basin, a Study in Basin Evolution*. *Am. Assoc. Pet. Geol. Mem.*, 45, 183–194.
- [56] Haas, R., Gueguen, E., Scherneck, H., Nothnagel, A., Campbell, J., (2000): Crustal motion

- results derived from observations in the European geodetic VLBI network, *Earth Planets Space*, 52, 759–764.
- [57] Haas, J., Péro, C., (2004): Mesozoic evolution of the Tisza Mega-unit. *Int. J. Earth Sci.* 39, 297–313.
- [58] Halicioglu, K. & Ozener, H., (2008): Geodetic Network Design and Optimization on the Active Tuzla Fault (Izmir, Turkey) for Disaster Management, *Sensors*, pp 4742-4757.
- [59] Hanssen, R., (2005): Satellite radar interferometry for deformation monitoring: a priori assessment of feasibility and accuracy, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6 , pp 253-260.
- [60] Heck, B., (1983): Das Analyseverfahren des geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe Stand 1983, *Deformationsanalysen '83*, Schriftenreihe HSBw, Heft 9, München.
- [61] Heck, B., Mayer, M., Westerhaus, M., , K., (2010): Karlsruhe Integrated Displacement Analysis Approach Towards a rigorous combination of different geodetic methods, *FIG Congress 2010*, Sydney, Australia.
- [62] Heine, K., (1999): Beschreibung von Deformationsprozessen durch Volterraund Fuzzy-Modelle sowie Neuronale Netze. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C No. 516, München.
- [63] Heine, K., (2008): Fuzzy Technology and ANN for Analysis of Deformation processes, *AIEG 2008 – First Workshop on Application of Artificial Intelligence in Engineering Geodesy*, pp 9-25.
- [64] Heunecke, O., (1995): Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver Kalman-Filterung (Hannoversches Filter). *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover*, No. 208.
- [65] Heunecke, O., Pelzer, H., Welsch, W., (1998): On the Classification of Deformation Models and Identification Methods in Engineering Surveying. *XXI. FIG-Congress 1998*, Brighton. *Proceedings*, Com. 6, pp 230-245.
- [66] Heunecke, O., Welsch, W., (2000): A Contribution to Terminology and Classification of Deformation Models in Engineering Surveys. *Journal of Geospatial Engineering*, vol. 2. No. 1, pp. 35-44, Hong Kong.
- [67] Hofmann - Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J., (1994): *GPS – Theory and Practice*. Wien, New York: Springer-Verlag.

- [68] Horváth, F., Rumpler, J., (1984): The Pannonian basement: extension and subsidence of an Alpine orogen, *Acta Geol. Hung.*, 27, 229–235.
- [69] Horváth, F., (1993): Towards a mechanical model for the formation of the Pannonian Basin, *Tectonophysics* 226, 333–357.
- [70] Horváth, F., Cloetingh, S. A. P. L., (1996): Stress-induced late-stage subsidence anomalies in the Pannonian basin. *Tectonophysics*, 266, 287–300.
- [71] Horváth, F., Bada, G., Szafian, P., Tari, G., Adam, A., Cloetingh, S., (2006): Formation and deformation of the Pannonian Basin: Constraints from observational data, in *European Lithosphere Dynamics*, edited by D. G. Gee and R. A. Stephenson, *Geol. Soc. Mem.*, 32(1), 191–206, doi:10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.11.
- [72] Huismans, R. S., Podladchikov, Y.Y., Cloething, S. A. P. L., (2001): The Pannonian basin: Dynamic modelling of the transition from passive to active rifting, *EGU Stephan Mueller Special Publication Series*, 3, 41–63, European Geosciences Union, 2002.
- [73] Jaboyedoff, M., Pedrazzini, A., Horton, P., Loye, A., Surace, I., (2008): Preliminary slope mass movements susceptibility mapping using LIDAR DEM. In: *Proceedings of 61th Canadian geotechnical conference*, pp 419–426.
- [74] Jäger, R., Haas, U., Weber, A., (1997): Ein ISO 9000 Handbuch für Überwachungsmessungen.
- [75] Jäger, R., Kälber, S., Oswald, M., (2006): GNSS/GPS/LPS based Online Control and Alarm System (GOCA) - Mathematical Models and Technical Realisation of a System for Natural and Geotechnical Deformation Monitoring and Analysis, *GEOS 2006*.
- [76] Jovanović, V., Srećković-Batočanin, D., (2006): *Osnovi geologije*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd
- [77] Kane, V.E., Begovich, C.L., Butz, T.R., Myers, D.E., (1982): Interpretation of regional geochemistry using optimal interpolation parameters. *Computers & Geosciences* 8, pp 117–135.
- [78] Koch, K. R., (1987): *Parameter Estimation and Hypothesis testing in Linear Models*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- [79] Kuang, S., (1993): *A Methodology for the Accuracy Analysis of the Finite Element Computations Applied to Structural Deformation Studies*, *Allgemeine Vermessungsnachrichten, International Edition*, vol. 10, pp. 1-14.

- [80] Kuhlmann, H., (1996): Ein Beitrag zur Überwachung von Brückenbauwerken mit kontinuierlich registrierten Messungen. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, No. 218.
- [81] Lague, D., Brodu, N., Leroux, J., (2012): A new method for high precision 3D deformation measurement of complex topography with terrestrial laser scanner : application to the Rangitikei canyon (N-Z), ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing.
- [82] Landau, H., (1988): Zur Nutzung des Global Positioning Systems in Geodäsie und Geodynamik: Modellbildung, Software-Entwicklung und Analyse. Schriftenreihe Heft 36, Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr, München.
- [83] Lučić, D., Saftić, B., Krizmanić, K., Prelogović, E., Britvić, V., Mesić, I., Tadej, J., (2001): The Neogene evolution and hydrocarbon potential of the Pannonian Basin in Croatia. *Mar. Pet. Geol.* 18, 133–147.
- [84] Malvern, L.E., (1969): *Introduction to Mechanics of a Continuous Medium*, Prentice, New Jersey.
- [85] Marović, M., Đoković, I., (1990): General neotectonic features of the Velika Morava Trough (SE part of the Pannonian Basin). *Bull. INQUA Neotec. Commiss.* 13, p. 32.
- [86] Marović, M., Đoković, I., (1989): Neotectonic Activity in Mačva, Pocerina and Kolubara-Tamnava Basin. *Ann. Géol. Penins. Balk.*, 53, 189–197.
- [87] Marović, M., Đoković, I., Pešić, L., Radovanović, S., Toljić, M., Gerzina, N., (2002): Neotectonics and seismicity of the southern margin of the Pannonian basin in Serbia, *EGU Stephan Mueller Special Publication Series*, 3, 277–295.
- [88] Marović, M., Toljić, M., Rundić, Lj., Milivojević, J., (2007): *Neoalpine Tectonics of Serbia*, Belgrade, Serbian Geological Society.
- [89] Matenco, L., Radivojević, D., (2012): On the formation and evolution of the Pannonian Basin: constraints derived from the structure of the junction area between the Carpathians and Dinarides, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 14, EGU2012-6939, EGU General Assembly.
- [90] Matheron, G., (1963): Principles of geostatistics, *Economic Geology* 58, pp. 1246–1266.
- [91] McCandless, S.W., (1989): SAR in Space – The theory, design, engineering and application of a space based SAR system, *Space Based Radar Handbook*, L. Cantafio, Ed., Artech House, pp. 121-166.
- [92] Medak, D., Pribičević, B., (2002): Geodinamička mreža Grada Zagreba, In T. Bašić (Ed.),

- Zbornik Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu povodom 40. obljetnice samostalnog djelovanja 1962-2002, pp. 145-156, Zagreb.
- [93] Mihailović, K., Aleksić, I., (2008): Koncepti mreža u geodetskom premeru, Monografija, Privredno društvo za kartografiju Geokarta d.o.o., Beograd.
- [94] Milenković, V., Božinov, V., Matović, A., Ognjanović, K., (2013): Prostorna referentna mreža Republike Srbije SREF, Geodetska služba, vol. 42, br. 116, pp. 16-23, Beograd.
- [95] Moritz, H., (1972): Advanced Least Squares Methods, Reports of the Department of Geodetic Science, Report No. 175.
- [96] Nelles, O., (2001): Nonlinear System Identification. Springer, Berlin.
- [97] Ninkov, T., (1989): Optimizacija projektovanja geodetskih mreža, Monografija, Građevinski fakultet Beograd, Naučna knjiga.
- [98] Ninkov, T., Bulatović, V., Sušić, Z., Vasić, D., (2010): Application of laser scanning technology for civil engineering projects in Serbia, International Congress 2010, Sydney, Australia – FIG internacionalni kongres geodeta, 11-16 April 2010.
- [99] Ninkov, T., Bulatović, V., Sušić, Z., Vasić, D., (2011): Modern methods of dynamic setting out in engineering surveying, PROCEEDINGS: International Scientific Conference - FIRST SERBIAN GEODETIC CONGRESS, ISSN 978-86-459-0401-3, pp 251-258, UDK 528(082), COBISS SR-ID: 187813644.
- [100] Ninkov, T., Bulatović, V., Sušić, Z., Vasić, D., (2012): Monitoring u visokogradnji sa aspekta dinamičkih merenja i obeležavanja, ZBORNIK RADOVA: Četvrti internacionalni naučno-stručni skup *Građevinarstvo, nauka, praksa*, pp 1295 – 1301, ISSN 978-86-82707-21-9, COBISS.CG-ID 19893008, – Žabljak, Crna Gora, 20-24. februar 2012.
- [101] Odalović, O., Grekulović, S., Aleksić, I., Todorović, M., Popović, J., (2011): GNSS Application Aiming to Establish a New Reference System of Serbia for Needs of Real Estate Cadastre. INGEO 2001, 5th International Conference on Engineering Surveying, Brijuni, Croatia, September 22 - 24, 2011.
- [102] Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Keusen, H.R., (2008): Collapse at the eastern Eiger flank in the Swiss Alps. *Nat Geosci* 1:531–535. doi:10.1038/ngeo258.
- [103] Otto, P., (1995): Identifikation nichtlinearer Systeme mit Künstlichen Neuronalen Netzen. *at – Automatisierungstechnik* 43 (1995) 2, pp. 62-68. R. Oldenbourg Verlag, München.

- [104] Oštir, K., (2000): Analiza vpliva združevanja radarskih interferogramov na natančnost modelov visin in premikov zemeljskega površja. Doktorska disertacija. Ljubljana: Univerza v Ljubljani.
- [105] Papazachos, C. B., Kiratzi, A. A., (1996): A detailed study of the active crustal deformation in the Aegean and surrounding area. *Tectonophysics*, 253, pp. 129–153.
- [106] Patterson, D. W., (1996): *Artificial neural networks*. Prentice Hall, Singapore.
- [107] Pelzer, H., (1971): *Zur Analyse geodätischer Deformationsmessungen*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, No. 164, München.
- [108] Perović, G., (2005): *Metod Najmanjih Kvadrata*, Monografija, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- [109] Perović, G., Sušić, Z., Đurović, R., Todorović, M., (2006): *Pergeltor* method of integrating GPS measurements and trigonometric networks, International Symposium “Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields”, Union of surveyors and land managers in Bulgaria, Sofia, Exhibition papers ISBN: 80-903478-3-5, 38-44 str. broj 8, November 2006.
- [110] Perović, G., Sušić, Z., Anđić, D., Đurović, R., (2006): *Pergeltoraf* method of integrating GPS measurements and trigonometric networks, International Symposium “Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields”, Union of surveyors and land managers in Bulgaria, Sofia, Exhibition papers ISBN: 80-903478-3-5, 38-44 str. broj 8, November 2006.
- [111] Perović, G., (2011): *Geodetske mreže – teorija i primene*, Monografija 3 (u pripremi).
- [112] Pfeufer, A., (1993): *Analyse und Interpretation von Überwachungsmessungen - Terminologie und Klassifikation*. *Zeitschrift für Vermessungswesen* 118, pp. 470-476.
- [113] Pollitz, F. F., Wicks, C., Thatcher, W., (2001): Mantle flow beneath a continental strike-slip fault: postseismic deformation after the 1999 hector mine earthquake. *Science*, 293(5536), pp. 1814–1818.
- [114] Popović, J., (2010): *Primena Aktivne geodetske referentne osnove u premeru nepokretnosti*, Magistarska teza, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Odsek za geodeziju i geoinformatiku.
- [115] Prelogović, E., Saftić, B., Kuk, V., Velić, J., Dragaš, M., Lučić, D., (1998): Tectonic activity in the Croatian part of the Pannonian basin, *Tectonophysics* 297, pp. 283–293.

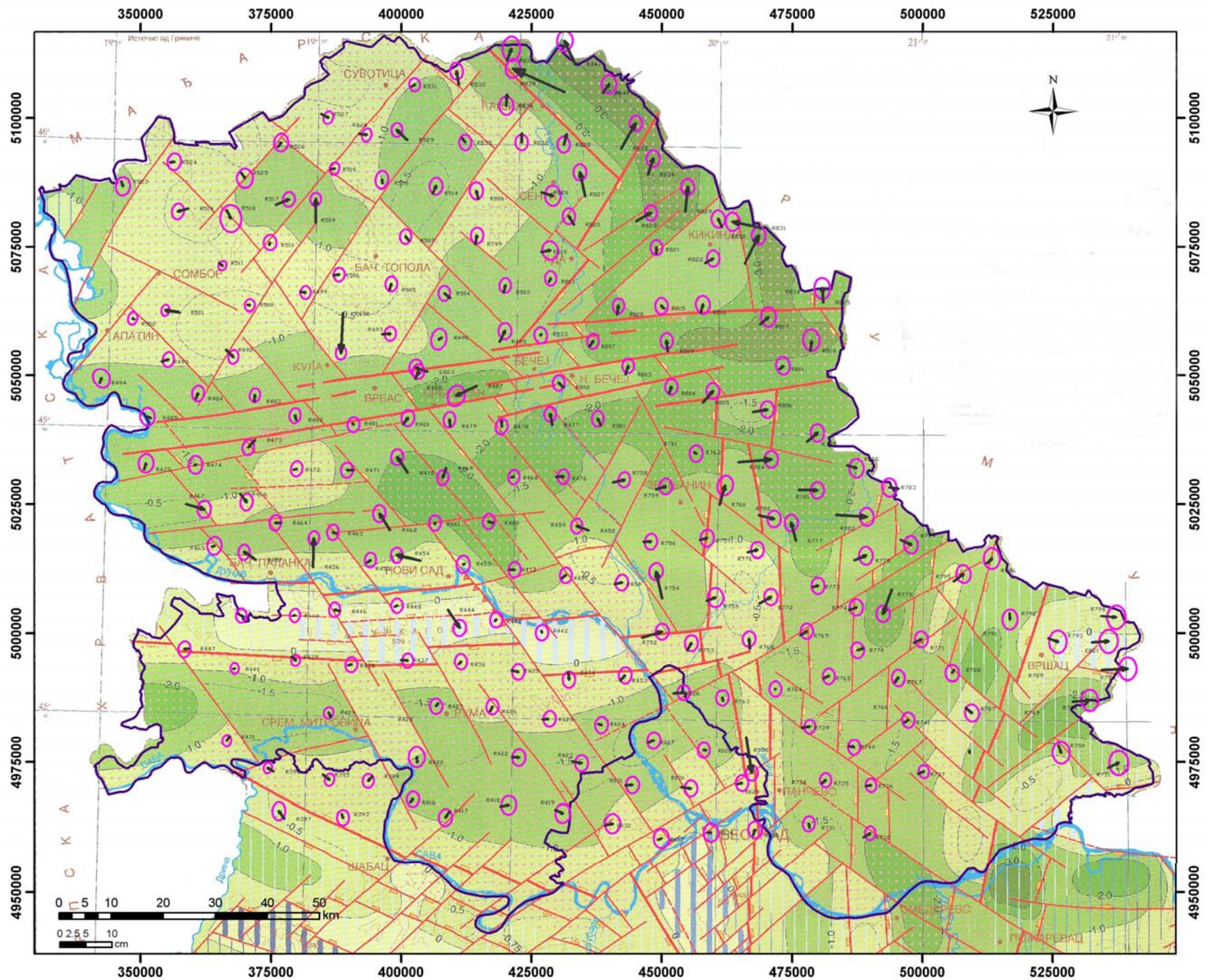
- [116] Pribičević, B., Medak, D., Prelogović, E., & Đapo, A., (2007): Geodinamika prostora Grada Zagreba, Zagreb, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Znanstvena monografija.
- [117] Procházková, D., Roth, Z., (1993): Seismotectonics of central Europe. *Contr. Geophys. Inst. Slov. Acad. Sci.*, 23, pp. 79–103.
- [118] Reitere, A., Egly, U., (2008): Application of Artificial Intelligence in Engineering Geodesy, First International Workshop, Vienna, Austria, December 2008, Proceedings.
- [119] Saftić, B., Velić, J., Sztano, O., Juhasz, G., Ivković, Ž., (2003): Tertiary subsurface facies, source rocks and hydrocarbon reservoirs in the SW part of the Pannonian basin (Northern Croatia and Southwestern Hungary). *Geol. Croat.* 56, pp. 101–122.
- [120] Seising, R., (1999): *Fuzzy Theorie und Stochastik*. Vieweg, Braunschweig.
- [121] Setan, H., Singh, R., (2001): Deformation analysis of a geodetic monitoring network, *Geomatica*, Vol. 55, No. 3.
- [122] Setan, H., Mohd, S., I., (2003): Procedure for deformation detection using *STAR*NET*, Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece.
- [123] Simons, M., Fialko, Y., Rivera, L., (2002): Coseismic deformation from the 1999 msubw 7.1 hector mine, california, earthquake as inferred from InSAR and GPS observations. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92(4), pp. 1390–1402.
- [124] Stegena, L., Géczy, B., Horváth, F., (1975): Late Cenozoic evolution of the Pannonian Basin. *Tectonophysics*, 26, 71–90.
- [125] Straub, Ch.S., (1996): Recent Crustal Deformation and Strain in the Marmara Sea Region, NW Anatolia Inferred from GPS Measurements, Ph.D. Dissertation, ETH Zurich.
- [126] Sušić, Z., Vasić, D., Bulatović, V., Ninkov, T., (2008): Geodetski monitoring građevinskih objekata korišćenjem konvencionalnih i savremenih tehnologija, Drugi internacionalni naučno-stručni skup *Građevinarstvo Nauka Praksa*, Zbornik ISBN 978-86-82707-15-8, 1167-1172 str., Žabljak, Crna Gora, Mart 2008.
- [127] Sušić, Z., Ninkov, T., Bulatović, V., (2009): Primena tehnologije laserskog skeniranja u procesima procene stanja, sanacija i održavanja građevinskih objekata, Zbornik radova, ISBN 978-86-7892-221-3, iNDiS Novi Sad.
- [128] Sušić, Z., Ninkov, T., Bulatović, V., Vasić, D., (2012): Deformation models in geodynamic analysis of the movements in the Earth's crust, *PROCEEDINGS:*

- iNDiS Novi Sad, 12th International scientific conference on planning, design, construction and building renewal, ISBN 978-867892-453-8, November 28 - 30, 2012.
- [129] Szafian, P., Horváth, F., Cloetingh, S., (1997): Gravity constraints on the crustal structure and slab evolution along a transcarpathian transect, *Tectonophysics* 272, pp. 233-247.
- [130] Talich, M., (2007): Geometrical Analysis of Deformation Measurement using Continuum Mechanics by Web Application, FIG Working Week, Hong Kong SAR, China, 13-17 May 2007.
- [131] Talich, M., (2012): Creation of strain maps from velocity field of deformation by on-line tools, Space Geodesy and Earth System, August 18-21, 2012, Shanghai, China.
- [132] Talich, M., Havrlant, J., (2008): Application of deformation analysis and its new possibilities. In: Measuring the changes - joint symposia of 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis and 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, LNEC, Lisbon, Portugal, May 12-15. 2008. (http://www.fig.net/commission6/lisbon_2008/papers/pst02/pst02_05_talich_mc057.pdf).
- [133] Talich, M., (2008): Practical advantages of using the mechanics of continuum to analyse deformations obtained from geodetic survey. In: Measuring the changes - joint symposia of 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis and 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, LNEC, Lisbon, Portugal, May 12-15., 2008. (http://www.fig.net/commission6/lisbon_2008/papers/pas07/pas07_03_talich_mc056.pdf).
- [134] Tesauro, M., Hollenstein, C., Egli, R., Geiger, A., Kahle, H.G., (2006): Analysis of central western Europe deformation using GPS and seismic data, *Journal of Geodynamics* 42 (2006) 194–209.
- [135] Teza, G., Galgaro A., Zaltron N., Genevois R., (2007): Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach. *Int J Remote Sens* 28:3425–3446. doi:10.1080/01431160601024234.
- [136] Toljić, M., (2013): Privatna komunikacija, Rudarsko geološki fakultet, Beograd.
- [137] Tomasi, P., Mantovani, F., Negusini, M., Orfei, A., Sarti, P., (1997): Activities and recent results in Geodynamics, Proc. of the 12th Working Meeting on European VLBI for

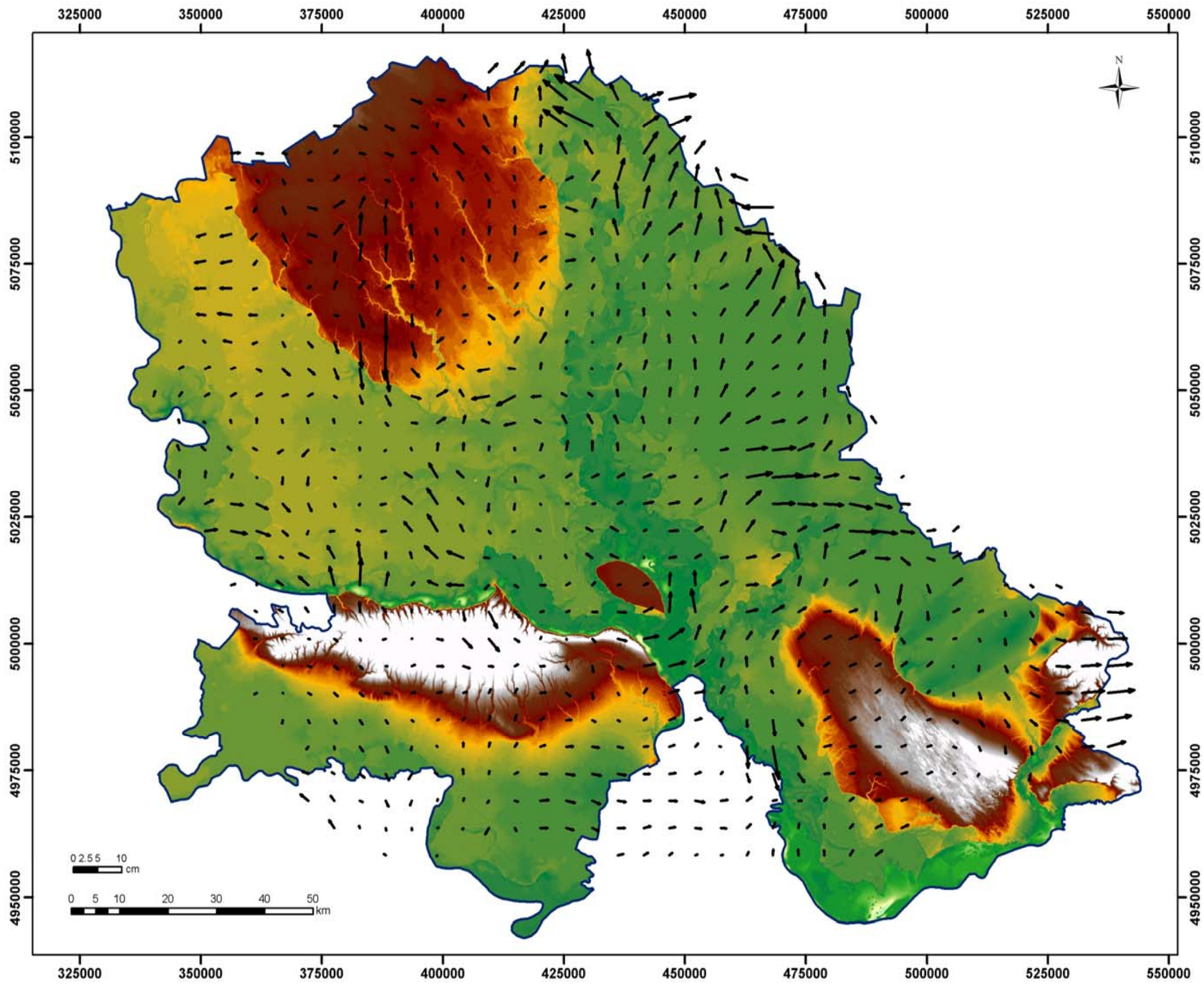
Geodesy and Astrometry, pp. 102–110, Hønefoss, Norway.

- [138] Travelletti, J., Oppikofer, T., Delacourt, C., Malet, J., Jaboyedoff, M., (2008): Monitoring landslide displacements during a controlled rain experiment using a long-range terrestrial laser scanning (TLS). *Int Arch Photogramm Remote Sens* 37(B5), pp. 485–490.
- [139] Vaniček, P., Krakiwsky, J., E., (1982): *Geodezija: Koncepti*, Elsevier Science B.V., Sara Burgerhartstraat 25, P.O. Box 211, 1000 AE Amsterdam, The Netherlands, prevod na srpski jezik: Blagojević, D., 1999, Beograd, 1999.
- [140] Wang, L.X., (1994): *Adaptive fuzzy systems and control*. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- [141] Webster, R., Oliver, M., A., (2007): *Geostatistics for Enviromental Scientist*, Wiley & Son, Ltd.
- [142] Wehr, A., Lohr, U., (1999): Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 54, pp. 68–82, doi:10.1016/S0924-2716(99)00011-8.
- [143] Wells, D., Beck, N., Delikaraoglou, D., Kleusberg, A., Krakiwsky, J. E., Lachapelle, G., Langley, B.,R., Nakiboglu, M., Schwarz, K.,P., Tranquilla, M.,J., Vaniček, P., (1986): *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS Associates, Fredericton, N. B., Canada.
- [144] Welsch, W., (1983): *Deformationsanalysen '83. Beiträge zum Geodätischen Seminar* 22. April 1983. Schriftenreihe Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen Hochschule der Bundeswehr München, Heft 9. München.
- [145] Welsch, W., (1996): *Geodetic Analysis of Dynamic Processes: Classification and Terminology*. 8th International FIG-Symposium on Deformation Measurements, Hong Kong, 25.- 28.06.1996. Proceedings, pp. 147-156.
- [146] Welsch, W., Heunecke, O., (2001): *Models and terminology for the analysis of geodetic monitoring observations*, Official Report of the Ad-Hoc Committee of FIG Working Group 6.1, The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, California, USA, 19-22 March 2001.
- [147] Wernstedt, J., (1989): *Experimentelle Prozeßanalyse*, R. Oldenbourg Verlag, München-Wien
- [148] Zadeh, L. A., (1965): Fuzzy sets. In: *Information and Control* 8, pp. 338-353.
- [149] Zimmermann, H. J., (1996): *Fuzzy Set Theory - and its Applications*. Kluwer, Boston.

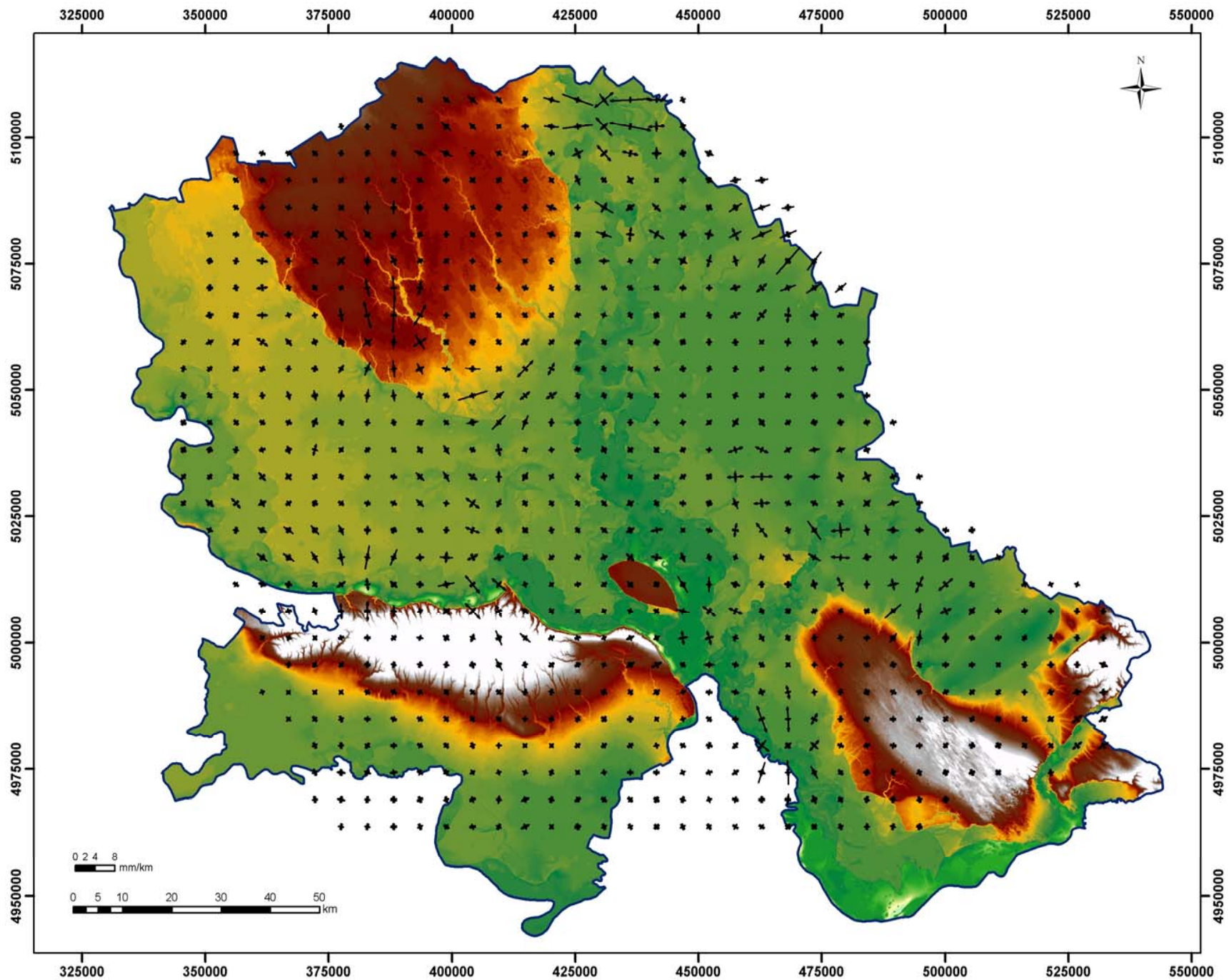
PRILOG 1. Vektori pomeranja na tačkama formiranog deformacionog modela pasivne referentne mreže



PRILOG 2. Polje pomeranja na predmetnoj oblasti istraživanja



**PRILOG 3. Polje parametara strejna na predmetnoj oblasti
istraživanja**



PRILOG 4. Komponente parametara strejn tenzora u definisanom gridu

Xmin = 4955586.88 m, Xmax = 5112900.36 m, dx = 157313.49 m
 Ymin = 341182.46 m, Ymax = 536468.17 m, dy = 195285.71 m, veličina grida 5424.60 m
 Program KHD + (interpolacija sračunatih deformacionih parametara u gridu)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-

Y

Vrednosti komponenti parametara strejn tenzora na predmetnoj oblasti istraživanja

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
2	2	-0.05	-0.34	0.90	0.27	-0.67	36.14	-0.39	0.94	0.95
2	3	-0.05	-0.48	0.81	0.19	-0.73	30.98	-0.53	0.92	0.98
2	4	-0.05	-0.64	0.82	0.16	-0.85	27.06	-0.69	1.02	1.03
2	5	-0.10	-0.66	0.98	0.18	-0.95	30.01	-0.76	1.13	1.05
2	6	-0.24	-0.47	1.13	0.22	-0.93	39.14	-0.71	1.15	1.08
2	7	-0.36	-0.14	1.01	0.26	-0.77	51.12	-0.50	1.03	1.17
2	8	-0.33	0.18	0.79	0.40	-0.54	61.54	-0.15	0.94	1.22
2	9	-0.25	0.28	1.02	0.59	-0.56	58.72	0.03	1.15	0.94
2	10	-0.31	-0.29	1.88	0.64	-1.24	45.38	-0.60	1.88	0.57
2	11	-0.53	-1.16	2.95	0.66	-2.35	39.00	-1.69	3.01	0.43
2	12	-0.63	-1.41	4.06	1.05	-3.09	39.54	-2.04	4.13	0.37
2	13	-0.46	-0.61	4.21	1.57	-2.65	43.97	-1.07	4.22	0.42
2	14	-0.17	0.67	2.69	1.65	-1.16	53.63	0.50	2.81	0.72
2	15	0.05	-1.27	2.36	0.74	-1.96	30.36	-1.23	2.70	0.65
2	16	0.20	-5.59	4.60	1.01	-6.40	19.22	-5.39	7.40	0.51
2	17	0.38	-2.46	5.51	2.06	-4.14	31.35	-2.08	6.20	1.61
2	18	0.45	6.59	2.87	6.91	0.13	77.47	7.04	6.79	3.08
2	19	0.09	7.94	1.05	7.98	0.06	86.18	8.03	7.92	2.83
2	20	-0.45	2.77	0.93	2.84	-0.52	81.99	2.32	3.35	1.62
2	21	-0.89	-0.82	1.19	-0.26	-1.45	46.53	-1.71	1.19	1.52
2	22	-0.93	-2.53	1.52	-0.63	-2.84	21.78	-3.46	2.21	1.83
2	23	-0.79	-3.18	1.85	-0.48	-3.50	18.86	-3.97	3.02	2.10
2	24	-0.61	-3.16	2.18	-0.21	-3.56	20.28	-3.77	3.36	2.23
2	25	-0.46	-2.69	2.50	0.10	-3.25	24.11	-3.15	3.35	2.20
2	26	-0.40	-2.01	2.69	0.36	-2.77	29.53	-2.41	3.14	2.04
2	27	-0.41	-1.32	2.71	0.56	-2.29	35.71	-1.73	2.86	1.81
2	28	-0.47	-0.74	2.57	0.69	-1.89	41.99	-1.20	2.58	1.56
2	29	-0.53	-0.29	2.34	0.76	-1.59	47.90	-0.82	2.35	1.34
2	30	-0.58	0.03	2.08	0.81	-1.36	53.19	-0.55	2.17	1.15
2	31	-0.62	0.26	1.84	0.84	-1.20	57.76	-0.35	2.04	1.00
2	32	-0.63	0.43	1.63	0.87	-1.07	61.64	-0.20	1.94	0.89
2	33	-0.64	0.56	1.44	0.90	-0.98	64.90	-0.08	1.87	0.80
2	34	-0.63	0.66	1.28	0.93	-0.90	67.64	0.03	1.82	0.72
2	35	-0.62	0.74	1.15	0.95	-0.83	69.96	0.12	1.78	0.66
2	36	-0.60	0.81	1.03	0.98	-0.77	71.93	0.21	1.75	0.61
3	2	0.08	-0.28	0.94	0.40	-0.60	34.43	-0.20	1.00	0.97
3	3	0.11	-0.44	0.75	0.30	-0.63	26.83	-0.32	0.93	0.99
3	4	0.19	-0.69	0.65	0.29	-0.80	18.22	-0.50	1.09	1.00
3	5	0.19	-0.73	0.83	0.34	-0.89	20.99	-0.55	1.24	0.92
3	6	-0.07	-0.47	1.12	0.32	-0.86	35.21	-0.54	1.19	0.75
3	7	-0.43	-0.06	0.83	0.21	-0.70	57.07	-0.49	0.91	0.80
3	8	-0.59	0.33	0.12	0.34	-0.59	86.40	-0.25	0.93	1.00
3	9	-0.53	0.48	0.27	0.49	-0.55	82.57	-0.06	1.04	0.72
3	10	-0.62	-0.52	1.59	0.23	-1.37	46.65	-1.14	1.59	0.18

Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
3	11	-1.02	-1.99	3.04	0.09	-3.10	36.12	-3.02	3.19	0.08
3	12	-0.93	-1.70	3.41	0.43	-3.06	38.65	-2.63	3.49	0.26
3	13	-0.11	-0.08	2.54	1.17	-1.37	45.38	-0.19	2.54	0.41
3	14	0.74	1.23	1.11	1.59	0.38	57.03	1.97	1.21	0.34
3	15	1.08	-0.78	0.41	1.10	-0.80	6.25	0.30	1.90	-0.36
3	16	1.31	-5.09	-0.62	1.33	-5.11	-2.78	-3.78	6.44	-1.75
3	17	1.44	-2.52	-2.71	1.86	-2.94	-17.19	-1.08	4.79	-2.31
3	18	0.52	6.02	-3.82	6.62	-0.08	-72.62	6.55	6.70	-1.28
3	19	-1.04	7.47	-2.05	7.59	-1.16	-83.22	6.44	8.75	0.07
3	20	-2.07	2.22	0.46	2.23	-2.08	86.97	0.15	4.32	1.13
3	21	-1.93	-1.39	1.20	-1.00	-2.31	56.99	-3.32	1.31	1.73
3	22	-1.45	-2.93	1.60	-1.10	-3.28	23.59	-4.37	2.18	2.06
3	23	-1.09	-3.50	1.73	-0.81	-3.78	17.78	-4.59	2.97	2.31
3	24	-0.77	-3.36	1.98	-0.43	-3.70	18.65	-4.13	3.27	2.38
3	25	-0.54	-2.68	2.34	-0.02	-3.20	23.82	-3.22	3.17	2.25
3	26	-0.48	-1.78	2.56	0.31	-2.56	31.52	-2.25	2.87	1.97
3	27	-0.52	-0.96	2.51	0.53	-2.01	40.07	-1.48	2.55	1.64
3	28	-0.61	-0.35	2.28	0.67	-1.62	48.19	-0.96	2.29	1.34
3	29	-0.68	0.05	1.97	0.74	-1.37	55.17	-0.63	2.10	1.10
3	30	-0.72	0.32	1.68	0.79	-1.19	60.82	-0.41	1.98	0.92
3	31	-0.74	0.49	1.44	0.82	-1.07	65.25	-0.25	1.89	0.79
3	32	-0.74	0.61	1.24	0.85	-0.98	68.70	-0.12	1.83	0.70
3	33	-0.72	0.71	1.08	0.89	-0.90	71.41	-0.01	1.79	0.63
3	34	-0.70	0.78	0.95	0.92	-0.84	73.59	0.08	1.76	0.58
3	35	-0.67	0.85	0.85	0.96	-0.78	75.37	0.17	1.74	0.53
3	36	-0.64	0.90	0.76	0.99	-0.73	76.86	0.25	1.72	0.50
4	2	0.27	-0.26	1.14	0.64	-0.62	32.50	0.01	1.26	1.09
4	3	0.36	-0.34	0.91	0.58	-0.56	26.30	0.02	1.14	1.15
4	4	0.54	-0.58	0.59	0.61	-0.65	13.79	-0.04	1.26	1.15
4	5	0.70	-0.53	0.58	0.77	-0.60	12.64	0.17	1.36	0.86
4	6	0.51	-0.11	0.92	0.75	-0.36	28.04	0.39	1.11	0.24
4	7	-0.06	0.19	0.54	0.36	-0.23	57.42	0.13	0.59	0.03
4	8	-0.58	0.26	-0.57	0.35	-0.66	-73.02	-0.31	1.01	0.50
4	9	-0.73	0.29	-0.26	0.30	-0.74	-82.91	-0.44	1.05	0.60
4	10	-0.60	-0.73	1.40	0.04	-1.37	42.32	-1.34	1.41	0.04
4	11	-0.52	-2.21	2.36	0.09	-2.81	27.22	-2.72	2.91	-0.43
4	12	-0.27	-1.42	1.47	0.09	-1.78	25.98	-1.69	1.87	-0.36
4	13	0.21	0.45	0.02	0.45	0.21	87.93	0.67	0.24	0.04
4	14	0.73	1.40	-0.25	1.43	0.71	-79.97	2.13	0.72	0.11
4	15	1.27	0.27	-0.43	1.31	0.22	-11.73	1.53	1.09	-0.56
4	16	1.80	-2.36	-2.51	2.15	-2.71	-15.56	-0.57	4.86	-2.06
4	17	1.58	-1.39	-4.33	2.72	-2.53	-27.74	0.19	5.25	-3.46
4	18	0.17	3.37	-3.61	4.18	-0.64	-65.77	3.54	4.82	-3.16
4	19	-1.34	4.50	-1.51	4.60	-1.44	-82.75	3.16	6.04	-0.98
4	20	-1.93	0.97	0.29	0.98	-1.93	87.09	-0.95	2.91	1.25
4	21	-1.67	-1.80	1.13	-1.17	-2.31	41.73	-3.48	1.14	1.88
4	22	-1.43	-3.06	1.31	-1.20	-3.29	19.41	-4.48	2.09	2.03

Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
4	23	-1.21	-3.75	0.90	-1.14	-3.83	9.79	-4.97	2.70	2.32
4	24	-0.81	-3.58	1.20	-0.69	-3.71	11.68	-4.39	3.02	2.36
4	25	-0.56	-2.60	1.83	-0.22	-2.95	20.91	-3.17	2.74	2.08
4	26	-0.57	-1.40	2.14	0.16	-2.13	34.34	-1.98	2.29	1.68
4	27	-0.70	-0.48	2.01	0.42	-1.60	48.05	-1.18	2.02	1.27
4	28	-0.81	0.08	1.68	0.58	-1.32	58.97	-0.73	1.90	0.96
4	29	-0.87	0.39	1.34	0.68	-1.16	66.60	-0.49	1.84	0.74
4	30	-0.89	0.56	1.08	0.74	-1.07	71.66	-0.33	1.80	0.61
4	31	-0.87	0.66	0.88	0.78	-0.99	75.03	-0.21	1.77	0.53
4	32	-0.84	0.74	0.75	0.82	-0.92	77.33	-0.10	1.75	0.48
4	33	-0.80	0.80	0.65	0.87	-0.86	78.99	0.00	1.73	0.44
4	34	-0.76	0.86	0.57	0.91	-0.80	80.26	0.10	1.71	0.42
4	35	-0.71	0.91	0.51	0.95	-0.75	81.28	0.20	1.70	0.40
4	36	-0.67	0.96	0.46	0.99	-0.71	82.13	0.28	1.70	0.38
5	2	0.50	-0.44	1.43	0.88	-0.83	28.24	0.06	1.71	1.31
5	3	0.65	-0.39	1.39	1.00	-0.74	26.69	0.26	1.74	1.54
5	4	0.86	-0.15	0.84	1.01	-0.31	19.88	0.70	1.32	1.50
5	5	1.04	0.38	0.34	1.08	0.34	13.84	1.42	0.74	0.85
5	6	0.91	0.78	0.41	1.06	0.63	36.59	1.69	0.43	-0.42
5	7	0.15	0.44	0.34	0.52	0.07	65.30	0.59	0.45	-1.06
5	8	-1.00	-0.30	-0.46	-0.23	-1.07	-73.12	-1.30	0.83	-0.36
5	9	-1.70	-0.38	-0.35	-0.36	-1.72	-82.63	-2.08	1.36	0.47
5	10	-1.38	-0.78	0.74	-0.60	-1.55	64.56	-2.15	0.95	0.33
5	11	-0.35	-1.57	0.96	-0.18	-1.74	19.05	-1.92	1.55	-0.53
5	12	0.31	-0.61	-0.42	0.35	-0.66	-12.19	-0.31	1.01	-0.96
5	13	0.23	0.42	-1.65	1.16	-0.50	-48.26	0.65	1.66	-0.60
5	14	0.08	0.77	-1.28	1.15	-0.30	-59.17	0.85	1.45	-0.20
5	15	0.71	1.18	-1.19	1.59	0.31	-55.85	1.89	1.28	-0.18
5	16	1.56	0.43	-1.65	2.00	-0.01	-27.75	1.99	2.00	-0.77
5	17	1.22	-0.71	0.54	1.26	-0.75	7.79	0.51	2.01	-1.97
5	18	0.29	0.45	2.69	1.72	-0.97	46.66	0.74	2.69	-1.92
5	19	-0.23	2.02	1.52	2.25	-0.46	72.97	1.79	2.71	0.17
5	20	-0.22	0.32	0.19	0.33	-0.24	80.39	0.10	0.57	1.36
5	21	-0.70	-1.91	0.59	-0.63	-1.98	12.93	-2.62	1.35	1.05
5	22	-1.28	-3.08	-0.10	-1.28	-3.08	-1.53	-4.37	1.80	1.28
5	23	-1.22	-4.08	-1.11	-1.12	-4.18	-10.57	-5.30	3.07	1.98
5	24	-0.71	-3.97	-0.31	-0.70	-3.98	-2.75	-4.68	3.28	1.95
5	25	-0.60	-2.50	0.87	-0.50	-2.60	12.23	-3.10	2.09	1.53
5	26	-0.80	-0.89	1.28	-0.20	-1.49	42.92	-1.69	1.28	1.04
5	27	-1.02	0.04	1.02	0.24	-1.22	67.93	-0.98	1.46	0.64
5	28	-1.11	0.45	0.66	0.51	-1.18	78.59	-0.67	1.69	0.39
5	29	-1.11	0.61	0.40	0.63	-1.13	83.44	-0.50	1.77	0.28
5	30	-1.06	0.68	0.26	0.69	-1.07	85.73	-0.38	1.77	0.24
5	31	-1.00	0.73	0.20	0.74	-1.00	86.74	-0.26	1.74	0.23
5	32	-0.92	0.78	0.17	0.78	-0.93	87.14	-0.15	1.71	0.24
5	33	-0.86	0.83	0.16	0.84	-0.86	87.28	-0.03	1.70	0.26
5	34	-0.79	0.89	0.16	0.89	-0.80	87.36	0.09	1.69	0.26

Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
5	35	-0.74	0.94	0.15	0.94	-0.74	87.44	0.20	1.68	0.26
5	36	-0.69	0.99	0.14	0.99	-0.69	87.55	0.30	1.68	0.26
6	2	0.58	-0.76	1.19	0.81	-0.99	20.77	-0.18	1.80	1.30
6	3	0.69	-0.47	1.20	0.94	-0.72	23.01	0.22	1.66	1.55
6	4	0.74	0.55	0.51	0.92	0.37	34.59	1.29	0.55	1.46
6	5	0.71	1.61	-0.05	1.61	0.71	-88.46	2.32	0.90	0.70
6	6	0.52	1.53	0.61	1.62	0.43	74.54	2.05	1.19	-0.62
6	7	-0.32	0.35	1.84	0.99	-0.96	55.10	0.03	1.96	-1.44
6	8	-1.83	-1.02	1.75	-0.46	-2.39	57.44	-2.86	1.93	-0.85
6	9	-2.84	-1.02	0.24	-1.01	-2.85	86.23	-3.86	1.83	0.44
6	10	-2.55	-0.59	-0.47	-0.56	-2.58	-83.29	-3.14	2.02	0.89
6	11	-1.08	-0.56	-0.19	-0.54	-1.10	-79.97	-1.64	0.55	0.23
6	12	-0.04	0.13	-0.16	0.16	-0.07	-68.89	0.09	0.24	-0.37
6	13	0.06	0.16	-0.42	0.33	-0.11	-51.47	0.23	0.44	-0.47
6	14	-0.22	0.27	-0.82	0.50	-0.45	-60.32	0.04	0.95	-0.11
6	15	-0.12	1.56	-1.60	1.88	-0.44	-68.15	1.44	2.31	0.43
6	16	0.34	1.11	-0.74	1.26	0.19	-68.00	1.45	1.07	0.29
6	17	0.78	-1.44	3.30	1.66	-2.32	28.02	-0.66	3.98	-0.96
6	18	1.26	-0.80	4.78	2.83	-2.37	33.37	0.46	5.20	-1.11
6	19	1.77	1.97	1.07	2.42	1.32	50.13	3.74	1.09	0.37
6	20	1.48	0.59	-0.81	1.63	0.44	-21.21	2.07	1.20	0.38
6	21	0.42	-1.88	-0.10	0.42	-1.89	-1.27	-1.47	2.30	-0.64
6	22	-0.41	-2.84	-2.00	-0.05	-3.20	-19.72	-3.25	3.14	0.14
6	23	-0.62	-4.28	-3.62	0.13	-5.02	-22.36	-4.90	5.15	1.10
6	24	-0.62	-4.56	-2.33	-0.30	-4.88	-15.29	-5.18	4.58	0.77
6	25	-1.09	-2.44	-0.89	-0.96	-2.57	-16.71	-3.53	1.61	0.31
6	26	-1.45	-0.38	-0.46	-0.33	-1.49	-78.40	-1.83	1.16	-0.05
6	27	-1.56	0.35	-0.74	0.42	-1.63	-79.49	-1.21	2.05	-0.26
6	28	-1.48	0.56	-0.85	0.65	-1.56	-78.70	-0.92	2.21	-0.29
6	29	-1.34	0.60	-0.80	0.68	-1.42	-78.79	-0.74	2.10	-0.23
6	30	-1.20	0.62	-0.68	0.68	-1.26	-79.77	-0.58	1.95	-0.14
6	31	-1.08	0.66	-0.55	0.70	-1.12	-81.27	-0.42	1.82	-0.05
6	32	-0.97	0.72	-0.43	0.74	-1.00	-82.89	-0.25	1.74	0.03
6	33	-0.88	0.78	-0.33	0.80	-0.90	-84.36	-0.10	1.70	0.08
6	34	-0.80	0.86	-0.26	0.87	-0.81	-85.54	0.05	1.68	0.12
6	35	-0.74	0.92	-0.21	0.93	-0.75	-86.44	0.18	1.67	0.14
6	36	-0.68	0.98	-0.17	0.99	-0.69	-87.08	0.30	1.67	0.15
7	2	0.43	-1.05	0.31	0.45	-1.06	5.94	-0.62	1.51	0.90
7	3	0.35	-0.42	0.01	0.35	-0.42	0.40	-0.07	0.77	0.94
7	4	0.15	1.32	-0.60	1.39	0.08	-76.47	1.47	1.31	0.79
7	5	-0.07	2.43	-0.44	2.45	-0.09	-85.05	2.36	2.53	0.36
7	6	-0.14	1.42	1.51	1.73	-0.45	67.91	1.28	2.17	-0.24
7	7	-0.33	-0.02	3.97	1.81	-2.17	47.26	-0.35	3.98	-0.96
7	8	-0.71	-0.98	3.92	1.12	-2.81	42.99	-1.69	3.93	-0.91
7	9	-1.09	-0.97	0.51	-0.77	-1.29	51.52	-2.06	0.52	0.23
7	10	-1.08	-0.51	-1.75	0.12	-1.72	-54.02	-1.59	1.84	1.01
7	11	-0.54	-0.25	-1.11	0.18	-0.97	-52.33	-0.80	1.15	0.82

Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
7	12	0.05	0.45	0.20	0.48	0.03	76.92	0.50	0.45	0.36
7	13	0.34	0.27	0.79	0.70	-0.09	42.25	0.61	0.79	-0.16
7	14	0.13	0.18	-0.02	0.18	0.13	-81.61	0.31	0.05	-0.12
7	15	-0.38	1.46	-1.60	1.76	-0.68	-69.50	1.08	2.44	0.53
7	16	-0.59	0.91	-1.00	1.07	-0.74	-73.15	0.33	1.81	0.52
7	17	0.36	-2.00	2.09	0.76	-2.39	20.74	-1.63	3.15	-0.92
7	18	1.70	-1.19	2.64	2.21	-1.70	21.20	0.51	3.91	-1.25
7	19	2.51	2.08	-0.01	2.51	2.08	-0.45	4.59	0.43	0.13
7	20	2.27	0.84	0.27	2.28	0.83	5.38	3.11	1.46	0.27
7	21	2.03	-1.27	1.23	2.14	-1.39	10.23	0.76	3.53	-0.53
7	22	1.47	-1.60	-1.81	1.71	-1.84	-15.25	-0.13	3.56	-0.29
7	23	-0.12	-3.20	-4.43	1.04	-4.36	-27.59	-3.31	5.40	-0.77
7	24	-2.00	-4.52	-4.86	-0.52	-5.99	-31.32	-6.52	5.47	-1.62
7	25	-2.98	-2.83	-4.86	-0.47	-5.34	-45.90	-5.81	4.87	-1.67
7	26	-2.66	-0.60	-3.92	0.58	-3.85	-58.87	-3.26	4.43	-1.50
7	27	-2.13	0.09	-3.19	0.93	-2.96	-62.42	-2.04	3.89	-1.22
7	28	-1.73	0.24	-2.57	0.87	-2.36	-63.69	-1.49	3.23	-0.93
7	29	-1.44	0.28	-2.02	0.74	-1.91	-65.21	-1.16	2.65	-0.66
7	30	-1.24	0.35	-1.57	0.67	-1.56	-67.59	-0.89	2.23	-0.43
7	31	-1.08	0.44	-1.22	0.66	-1.29	-70.61	-0.64	1.95	-0.26
7	32	-0.96	0.56	-0.96	0.70	-1.10	-73.74	-0.40	1.79	-0.14
7	33	-0.86	0.67	-0.77	0.76	-0.95	-76.56	-0.19	1.71	-0.05
7	34	-0.78	0.78	-0.64	0.84	-0.84	-78.85	0.00	1.68	0.00
7	35	-0.71	0.87	-0.54	0.92	-0.75	-80.63	0.16	1.67	0.04
7	36	-0.65	0.95	-0.46	0.98	-0.69	-81.97	0.30	1.67	0.06
8	2	0.21	-1.23	-0.48	0.25	-1.26	-9.15	-1.01	1.51	0.41
8	3	-0.04	-0.39	-0.52	0.10	-0.53	-27.76	-0.43	0.62	0.44
8	4	-0.40	1.70	-0.64	1.75	-0.44	-81.53	1.30	2.19	0.46
8	5	-0.70	2.57	-0.08	2.57	-0.70	-89.27	1.87	3.28	0.31
8	6	-0.67	0.95	1.55	1.26	-0.98	68.23	0.28	2.25	-0.15
8	7	0.01	-0.17	3.30	1.57	-1.74	43.43	-0.17	3.30	-0.93
8	8	1.45	-0.34	2.48	2.08	-0.98	27.10	1.10	3.05	-1.07
8	9	2.56	-0.52	-0.88	2.63	-0.59	-7.93	2.04	3.21	-0.03
8	10	2.43	-0.62	-2.21	2.79	-0.98	-17.93	1.81	3.77	0.41
8	11	1.33	-0.39	-1.37	1.57	-0.63	-19.33	0.94	2.19	0.22
8	12	0.72	0.42	-1.01	1.10	0.05	-36.80	1.15	1.06	0.16
8	13	0.88	0.54	-0.25	0.92	0.50	-17.88	1.42	0.42	-0.34
8	14	0.89	0.30	0.25	0.91	0.27	11.47	1.19	0.64	-0.51
8	15	0.17	0.86	-0.48	0.93	0.09	-72.56	1.02	0.84	0.26
8	16	-0.45	0.39	-0.43	0.45	-0.50	-76.61	-0.06	0.95	0.62
8	17	-0.09	-1.54	0.76	0.01	-1.64	13.74	-1.63	1.64	-0.29
8	18	0.75	-0.85	1.08	0.91	-1.02	17.03	-0.10	1.93	-0.67
8	19	1.16	1.39	0.60	1.60	0.96	55.32	2.56	0.64	0.29
8	20	1.51	0.45	1.72	1.99	-0.03	29.13	1.96	2.02	0.76
8	21	2.11	-0.46	2.28	2.54	-0.89	20.75	1.65	3.44	0.39
8	22	1.75	0.28	-0.09	1.75	0.28	-1.73	2.03	1.48	-0.31
8	23	-0.35	-0.92	-2.11	0.46	-1.73	-37.39	-1.27	2.19	-2.22

Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
8	24	-2.71	-3.43	-4.86	-0.61	-5.52	-40.82	-6.14	4.91	-3.15
8	25	-3.44	-3.28	-7.44	0.36	-7.08	-45.60	-6.72	7.44	-2.66
8	26	-2.71	-1.45	-6.55	1.25	-5.41	-50.42	-4.16	6.66	-2.23
8	27	-1.96	-0.73	-4.95	1.20	-3.90	-51.99	-2.69	5.10	-1.69
8	28	-1.55	-0.50	-3.74	0.92	-2.96	-52.84	-2.05	3.88	-1.23
8	29	-1.29	-0.31	-2.82	0.70	-2.29	-54.60	-1.60	2.99	-0.85
8	30	-1.11	-0.09	-2.16	0.59	-1.79	-57.62	-1.20	2.39	-0.57
8	31	-0.97	0.13	-1.69	0.59	-1.43	-61.56	-0.84	2.01	-0.37
8	32	-0.86	0.34	-1.35	0.64	-1.17	-65.77	-0.53	1.81	-0.23
8	33	-0.78	0.52	-1.11	0.72	-0.98	-69.63	-0.26	1.71	-0.14
8	34	-0.71	0.67	-0.94	0.82	-0.85	-72.83	-0.04	1.67	-0.08
8	35	-0.65	0.80	-0.81	0.90	-0.76	-75.33	0.15	1.66	-0.05
8	36	-0.60	0.90	-0.72	0.98	-0.68	-77.26	0.30	1.66	-0.02
9	2	0.08	-1.36	-1.08	0.26	-1.54	-18.38	-1.28	1.80	-0.05
9	3	-0.20	-0.83	-0.38	-0.14	-0.88	-15.62	-1.02	0.74	0.14
9	4	-0.47	1.45	0.08	1.45	-0.47	88.76	0.98	1.92	0.54
9	5	-0.61	2.47	0.61	2.50	-0.64	84.41	1.86	3.14	0.58
9	6	-0.33	0.87	1.00	1.05	-0.51	70.06	0.53	1.56	-0.04
9	7	0.90	0.10	1.07	1.17	-0.17	26.71	1.01	1.34	-0.61
9	8	3.48	0.14	-0.56	3.51	0.12	-4.79	3.63	3.39	-0.04
9	9	5.94	-0.42	-2.05	6.10	-0.58	-8.94	5.52	6.68	0.89
9	10	5.68	-0.53	0.14	5.68	-0.53	0.65	5.15	6.21	-0.27
9	11	3.28	-0.12	1.10	3.37	-0.21	8.97	3.16	3.58	-1.13
9	12	1.13	0.43	-1.38	1.55	0.00	-31.58	1.55	1.55	-0.27
9	13	0.82	0.54	-1.25	1.32	0.04	-38.55	1.36	1.29	-0.30
9	14	0.87	0.12	0.66	0.99	-0.01	20.75	0.99	1.00	-0.84
9	15	0.31	0.15	0.64	0.56	-0.10	38.23	0.46	0.66	-0.13
9	16	-0.19	-0.01	0.10	0.01	-0.21	76.00	-0.20	0.21	0.79
9	17	-0.15	-0.79	0.61	-0.02	-0.92	21.66	-0.94	0.89	0.44
9	18	0.03	-0.52	1.04	0.34	-0.83	31.21	-0.49	1.18	-0.16
9	19	0.04	0.17	0.56	0.39	-0.19	51.45	0.20	0.57	0.00
9	20	0.29	-0.25	0.37	0.35	-0.31	17.14	0.04	0.65	0.44
9	21	0.51	0.30	0.73	0.79	0.02	36.77	0.81	0.76	0.46
9	22	0.50	1.74	1.48	2.08	0.16	64.97	2.24	1.93	-0.36
9	23	0.36	1.23	2.20	1.98	-0.39	55.85	1.59	2.37	-1.74
9	24	0.16	-1.61	-0.77	0.24	-1.69	-11.75	-1.44	1.93	-1.84
9	25	0.02	-3.05	-4.56	1.23	-4.27	-28.02	-3.03	5.50	-1.25
9	26	-0.46	-2.17	-5.18	1.41	-4.05	-35.87	-2.64	5.46	-1.42
9	27	-0.79	-1.59	-4.46	1.07	-3.46	-39.92	-2.39	4.53	-1.33
9	28	-0.90	-1.31	-3.62	0.71	-2.93	-41.77	-2.22	3.64	-1.04
9	29	-0.89	-0.93	-2.85	0.52	-2.34	-44.57	-1.82	2.85	-0.74
9	30	-0.83	-0.54	-2.27	0.46	-1.83	-48.62	-1.36	2.29	-0.52
9	31	-0.76	-0.19	-1.85	0.50	-1.44	-53.62	-0.95	1.94	-0.36
9	32	-0.70	0.11	-1.55	0.58	-1.17	-58.86	-0.59	1.75	-0.26
9	33	-0.65	0.36	-1.32	0.69	-0.98	-63.63	-0.29	1.66	-0.19
9	34	-0.60	0.56	-1.16	0.80	-0.84	-67.55	-0.04	1.64	-0.14
9	35	-0.56	0.72	-1.03	0.90	-0.74	-70.62	0.16	1.64	-0.11

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
9	36	-0.52	0.84	-0.92	0.99	-0.66	-73.01	0.32	1.65	-0.09
10	2	-0.03	-1.20	-1.83	0.47	-1.70	-28.67	-1.23	2.17	-0.51
10	3	-0.06	-1.25	-1.51	0.30	-1.61	-25.94	-1.31	1.92	-0.63
10	4	0.04	0.87	-1.42	1.28	-0.37	-59.98	0.91	1.64	-0.20
10	5	0.36	2.29	-0.98	2.41	0.24	-76.53	2.65	2.16	0.05
10	6	0.95	1.13	-0.25	1.19	0.89	-62.43	2.08	0.30	-0.20
10	7	2.13	0.24	-0.62	2.18	0.19	-9.16	2.37	1.99	0.06
10	8	3.82	-0.11	-2.61	4.21	-0.50	-16.77	3.71	4.71	1.39
10	9	4.96	-0.50	-2.55	5.24	-0.78	-12.52	4.46	6.02	1.61
10	10	3.97	0.05	2.53	4.34	-0.33	16.41	4.02	4.67	-1.36
10	11	1.85	0.30	3.81	3.13	-0.98	33.89	2.15	4.12	-2.52
10	12	0.12	-0.10	-0.55	0.31	-0.28	-34.29	0.02	0.59	-0.24
10	13	-0.16	-0.01	-0.72	0.28	-0.45	-51.17	-0.17	0.73	0.48
10	14	-0.26	0.20	1.76	0.88	-0.94	52.34	-0.05	1.82	-0.64
10	15	-0.29	-0.04	1.09	0.39	-0.72	51.48	-0.33	1.12	-0.48
10	16	-0.05	-0.59	-0.98	0.24	-0.88	-30.69	-0.64	1.11	0.56
10	17	0.25	-0.38	-0.33	0.29	-0.42	-13.81	-0.13	0.71	0.32
10	18	0.17	0.09	0.87	0.57	-0.30	42.31	0.27	0.88	-0.48
10	19	-0.34	-0.23	0.23	-0.15	-0.41	58.11	-0.57	0.26	-0.49
10	20	-0.67	-0.62	-0.69	-0.30	-0.99	-47.35	-1.29	0.69	0.04
10	21	-0.85	0.27	-0.17	0.27	-0.86	-85.71	-0.58	1.13	0.19
10	22	-0.42	1.84	1.76	2.14	-0.72	71.07	1.42	2.86	-0.19
10	23	1.06	1.95	3.32	3.22	-0.21	52.55	3.01	3.44	-0.45
10	24	2.40	-0.26	1.87	2.69	-0.55	17.61	2.14	3.25	-0.03
10	25	2.62	-2.07	-0.42	2.63	-2.08	-2.59	0.55	4.71	0.17
10	26	1.45	-2.08	-1.56	1.62	-2.24	-11.88	-0.62	3.86	-0.37
10	27	0.36	-1.91	-2.14	0.78	-2.34	-21.70	-1.56	3.12	-0.57
10	28	-0.19	-1.74	-2.30	0.42	-2.35	-27.97	-1.93	2.78	-0.51
10	29	-0.39	-1.31	-2.18	0.33	-2.03	-33.57	-1.70	2.36	-0.42
10	30	-0.46	-0.83	-1.96	0.35	-1.64	-39.65	-1.29	2.00	-0.34
10	31	-0.48	-0.41	-1.74	0.43	-1.32	-46.27	-0.89	1.75	-0.28
10	32	-0.49	-0.05	-1.56	0.54	-1.08	-52.81	-0.54	1.62	-0.24
10	33	-0.48	0.23	-1.41	0.67	-0.91	-58.49	-0.25	1.58	-0.20
10	34	-0.47	0.46	-1.28	0.79	-0.80	-63.02	0.00	1.59	-0.17
10	35	-0.45	0.65	-1.18	0.90	-0.71	-66.52	0.20	1.61	-0.15
10	36	-0.43	0.79	-1.08	1.00	-0.64	-69.26	0.36	1.63	-0.14
11	2	-0.26	-0.55	-2.01	0.61	-1.42	-40.98	-0.81	2.03	-0.58
11	3	-0.10	-1.01	-2.65	0.84	-1.96	-35.52	-1.12	2.80	-1.18
11	4	0.13	0.31	-3.43	1.94	-1.50	-46.47	0.44	3.44	-1.04
11	5	0.44	1.66	-3.10	2.72	-0.62	-55.73	2.10	3.33	-0.70
11	6	0.66	0.87	-1.56	1.55	-0.02	-48.76	1.53	1.57	-0.49
11	7	0.89	-0.05	-1.69	1.39	-0.55	-30.53	0.84	1.94	0.33
11	8	0.42	-0.44	-3.70	1.89	-1.91	-38.41	-0.02	3.81	1.68
11	9	-0.68	-0.31	-3.00	1.02	-2.01	-48.55	-0.99	3.03	1.10
11	10	-1.40	0.75	2.90	1.48	-2.13	63.31	-0.65	3.61	-2.35
11	11	-1.45	0.33	4.58	1.90	-3.02	55.64	-1.12	4.92	-3.15
11	12	-0.92	-1.56	0.82	-0.72	-1.76	26.19	-2.49	1.04	0.12

Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
11	13	-0.48	-1.22	0.76	-0.32	-1.38	22.93	-1.70	1.06	1.67
11	14	0.00	0.62	3.71	2.19	-1.57	49.73	0.62	3.76	0.72
11	15	0.43	0.67	2.90	2.01	-0.91	47.38	1.10	2.91	0.28
11	16	0.43	-0.42	-0.22	0.45	-0.43	-7.14	0.02	0.88	0.90
11	17	0.21	-0.10	-0.17	0.23	-0.12	-14.53	0.11	0.35	0.37
11	18	0.02	0.59	1.21	0.97	-0.36	57.52	0.61	1.34	-0.62
11	19	-0.29	-0.03	0.61	0.17	-0.49	56.26	-0.32	0.66	-0.64
11	20	-0.75	-0.71	-0.57	-0.44	-1.02	-47.48	-1.46	0.57	-0.18
11	21	-1.06	-0.04	-0.46	0.01	-1.11	-77.77	-1.10	1.12	-0.13
11	22	-0.74	1.31	0.50	1.34	-0.77	83.17	0.57	2.11	-0.24
11	23	0.38	1.46	0.82	1.60	0.24	71.47	1.84	1.35	0.12
11	24	1.51	0.12	0.77	1.61	0.02	14.57	1.63	1.59	0.48
11	25	1.87	-1.09	1.13	1.97	-1.19	10.43	0.78	3.17	0.20
11	26	1.41	-1.48	0.97	1.49	-1.56	9.32	-0.07	3.05	-0.17
11	27	0.72	-1.70	-0.06	0.72	-1.70	-0.70	-0.97	2.42	-0.14
11	28	0.27	-1.69	-0.92	0.37	-1.79	-12.53	-1.42	2.17	-0.08
11	29	0.04	-1.34	-1.35	0.32	-1.62	-22.16	-1.30	1.93	-0.12
11	30	-0.10	-0.90	-1.49	0.35	-1.34	-30.85	-0.99	1.69	-0.17
11	31	-0.19	-0.48	-1.50	0.43	-1.10	-39.53	-0.67	1.53	-0.21
11	32	-0.26	-0.13	-1.46	0.54	-0.93	-47.60	-0.39	1.47	-0.22
11	33	-0.30	0.16	-1.41	0.67	-0.81	-54.17	-0.14	1.49	-0.21
11	34	-0.33	0.40	-1.34	0.80	-0.73	-59.17	0.07	1.53	-0.20
11	35	-0.33	0.59	-1.27	0.92	-0.65	-62.97	0.26	1.57	-0.19
11	36	-0.33	0.75	-1.19	1.01	-0.59	-65.97	0.42	1.61	-0.19
12	2	-0.33	0.13	-0.87	0.39	-0.59	-58.89	-0.20	0.99	0.12
12	3	-0.34	-0.25	-1.14	0.28	-0.87	-47.22	-0.59	1.15	-0.41
12	4	-0.63	0.13	-1.76	0.71	-1.20	-56.65	-0.50	1.91	-0.38
12	5	-1.10	0.76	-1.64	1.07	-1.41	-69.36	-0.34	2.48	-0.09
12	6	-1.54	0.24	-0.47	0.28	-1.57	-82.57	-1.29	1.84	0.05
12	7	-1.95	-0.40	-0.96	-0.27	-2.09	-74.12	-2.35	1.82	0.71
12	8	-2.85	-0.38	-2.73	0.22	-3.46	-66.05	-3.23	3.68	1.47
12	9	-3.73	0.25	-1.71	0.42	-3.91	-78.38	-3.48	4.33	0.56
12	10	-3.18	1.19	2.72	1.58	-3.57	74.03	-2.00	5.15	-1.95
12	11	-1.88	0.21	3.60	1.24	-2.91	60.04	-1.67	4.16	-2.49
12	12	-0.67	-2.91	0.44	-0.65	-2.93	5.58	-3.58	2.28	-0.06
12	13	-0.01	-2.93	-0.34	0.00	-2.94	-3.35	-2.94	2.94	1.66
12	14	1.00	0.40	2.91	2.18	-0.79	39.14	1.40	2.97	1.47
12	15	1.52	1.60	4.20	3.66	-0.54	45.59	3.12	4.20	0.86
12	16	0.80	0.37	1.91	1.56	-0.39	38.69	1.17	1.95	1.12
12	17	-0.26	0.16	1.07	0.52	-0.63	55.80	-0.10	1.15	0.64
12	18	-0.50	0.81	1.93	1.32	-1.01	62.11	0.31	2.34	-0.19
12	19	-0.13	0.34	1.42	0.86	-0.64	54.09	0.21	1.50	-0.23
12	20	0.05	-0.40	0.10	0.05	-0.41	6.28	-0.36	0.46	-0.07
12	21	-0.12	0.09	-0.40	0.21	-0.24	-58.91	-0.04	0.45	-0.36
12	22	-0.28	1.14	-0.62	1.21	-0.35	-78.18	0.86	1.55	-0.50
12	23	-0.17	0.97	-1.45	1.32	-0.52	-64.05	0.80	1.85	0.02
12	24	0.21	-0.12	-1.19	0.67	-0.57	-37.24	0.09	1.24	0.26

Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
12	25	0.56	-0.91	0.51	0.61	-0.95	9.58	-0.35	1.56	-0.25
12	26	0.64	-1.24	1.26	0.83	-1.43	16.90	-0.60	2.26	-0.51
12	27	0.59	-1.42	0.48	0.62	-1.45	6.65	-0.82	2.07	-0.21
12	28	0.49	-1.40	-0.40	0.51	-1.42	-6.00	-0.91	1.93	0.00
12	29	0.38	-1.14	-0.89	0.50	-1.26	-15.18	-0.77	1.76	-0.03
12	30	0.23	-0.79	-1.14	0.48	-1.04	-24.12	-0.56	1.53	-0.13
12	31	0.07	-0.44	-1.28	0.51	-0.87	-34.08	-0.36	1.37	-0.21
12	32	-0.06	-0.13	-1.35	0.58	-0.77	-43.45	-0.18	1.35	-0.24
12	33	-0.14	0.14	-1.38	0.70	-0.71	-50.68	-0.01	1.41	-0.24
12	34	-0.19	0.36	-1.37	0.83	-0.65	-55.92	0.17	1.48	-0.23
12	35	-0.21	0.55	-1.33	0.94	-0.60	-59.90	0.34	1.54	-0.22
12	36	-0.22	0.71	-1.27	1.04	-0.54	-63.10	0.49	1.58	-0.23
13	2	-0.12	0.27	0.28	0.31	-0.16	71.83	0.15	0.48	0.87
13	3	-0.19	0.21	1.07	0.58	-0.56	55.29	0.03	1.14	0.64
13	4	-0.55	0.12	1.22	0.48	-0.91	59.58	-0.43	1.39	0.66
13	5	-1.04	0.08	0.96	0.26	-1.22	69.76	-0.95	1.48	0.91
13	6	-1.35	-0.18	1.38	0.14	-1.67	65.23	-1.53	1.81	0.83
13	7	-1.86	-0.28	0.86	-0.17	-1.97	75.65	-2.14	1.80	0.95
13	8	-2.56	0.04	-0.65	0.08	-2.60	-82.97	-2.52	2.67	1.26
13	9	-2.87	0.59	-0.21	0.59	-2.87	-88.29	-2.28	3.46	0.75
13	10	-2.07	1.14	2.37	1.53	-2.46	71.80	-0.93	3.99	-0.59
13	11	-0.86	0.25	2.92	1.26	-1.87	55.39	-0.61	3.13	-1.17
13	12	-0.39	-2.86	-0.14	-0.39	-2.87	-1.62	-3.25	2.48	-0.53
13	13	-0.60	-3.44	-2.94	0.02	-4.07	-23.01	-4.04	4.09	0.27
13	14	-0.64	-0.26	-1.92	0.53	-1.42	-50.58	-0.89	1.95	-0.04
13	15	-0.50	1.64	0.94	1.74	-0.60	78.15	1.14	2.33	-0.68
13	16	-0.74	0.88	1.19	1.08	-0.93	71.81	0.15	2.01	-0.35
13	17	-1.10	0.20	0.68	0.28	-1.18	76.18	-0.90	1.47	0.12
13	18	-0.88	0.61	1.19	0.82	-1.09	70.66	-0.27	1.90	0.14
13	19	-0.04	0.60	1.15	0.94	-0.38	59.60	0.56	1.32	0.24
13	20	0.69	0.14	0.39	0.75	0.08	17.78	0.84	0.67	0.27
13	21	0.91	0.54	0.13	0.92	0.53	9.50	1.45	0.39	-0.23
13	22	0.73	1.51	-0.50	1.58	0.66	-73.71	2.24	0.92	-0.59
13	23	0.43	1.09	-2.22	1.92	-0.39	-53.30	1.53	2.31	-0.23
13	24	0.14	-0.30	-2.51	1.20	-1.35	-40.00	-0.16	2.55	-0.32
13	25	0.01	-1.24	-0.77	0.12	-1.34	-15.81	-1.23	1.46	-0.96
13	26	0.05	-1.50	0.16	0.05	-1.51	2.94	-1.46	1.56	-0.98
13	27	0.35	-1.42	-0.28	0.36	-1.43	-4.50	-1.06	1.79	-0.41
13	28	0.64	-1.20	-0.73	0.71	-1.27	-10.80	-0.56	1.98	-0.11
13	29	0.68	-0.92	-0.88	0.79	-1.03	-14.38	-0.25	1.82	-0.17
13	30	0.50	-0.63	-1.00	0.69	-0.82	-20.78	-0.12	1.51	-0.28
13	31	0.28	-0.35	-1.15	0.62	-0.69	-30.71	-0.07	1.31	-0.33
13	32	0.10	-0.10	-1.28	0.65	-0.65	-40.62	0.00	1.30	-0.33
13	33	-0.02	0.12	-1.37	0.74	-0.63	-47.94	0.11	1.37	-0.30
13	34	-0.07	0.33	-1.40	0.86	-0.60	-53.12	0.26	1.45	-0.27
13	35	-0.10	0.52	-1.38	0.97	-0.54	-57.17	0.42	1.51	-0.26
13	36	-0.11	0.69	-1.33	1.06	-0.49	-60.60	0.57	1.55	-0.26

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
14	2	-0.34	-0.03	-0.04	-0.03	-0.34	-86.58	-0.37	0.32	0.76
14	3	-0.24	0.11	0.91	0.43	-0.55	55.64	-0.13	0.98	0.59
14	4	0.09	0.07	1.28	0.72	-0.56	44.48	0.15	1.28	0.64
14	5	0.75	-0.22	0.82	0.90	-0.37	20.08	0.53	1.27	1.04
14	6	1.30	-0.25	1.11	1.48	-0.43	17.77	1.05	1.92	0.94
14	7	0.93	0.22	1.50	1.40	-0.25	32.39	1.15	1.65	0.44
14	8	-0.07	0.45	0.50	0.55	-0.17	68.28	0.38	0.72	0.59
14	9	-0.93	0.35	0.12	0.36	-0.94	87.29	-0.58	1.29	0.81
14	10	-0.93	0.65	2.32	1.26	-1.54	62.17	-0.28	2.81	0.30
14	11	-0.56	0.42	3.69	1.84	-1.98	52.45	-0.14	3.82	0.00
14	12	-0.28	-1.49	1.13	-0.06	-1.71	21.63	-1.77	1.65	0.23
14	13	-0.50	-2.34	-2.73	0.23	-3.07	-27.94	-2.84	3.29	0.28
14	14	-0.95	-0.52	-3.69	1.12	-2.59	-48.35	-1.46	3.71	-0.83
14	15	-1.23	1.12	-1.56	1.35	-1.47	-73.18	-0.12	2.82	-1.94
14	16	-1.10	0.75	-0.66	0.80	-1.16	-80.19	-0.36	1.96	-1.70
14	17	-0.70	0.01	-1.08	0.30	-0.99	-61.76	-0.68	1.29	-0.81
14	18	-0.27	0.25	-1.04	0.57	-0.60	-58.24	-0.02	1.17	-0.37
14	19	0.29	0.56	-0.84	0.87	-0.02	-53.76	0.85	0.88	-0.10
14	20	0.83	0.31	-0.73	1.02	0.12	-27.27	1.14	0.90	0.17
14	21	1.41	0.54	0.13	1.41	0.53	4.31	1.94	0.88	0.06
14	22	1.63	2.12	0.25	2.15	1.60	76.72	3.76	0.55	-0.37
14	23	1.38	2.38	-1.76	2.89	0.87	-59.79	3.76	2.02	-0.53
14	24	0.63	0.07	-3.04	1.90	-1.19	-39.73	0.70	3.09	-1.05
14	25	0.02	-1.92	-1.92	0.41	-2.32	-22.33	-1.91	2.73	-1.74
14	26	0.09	-2.15	-1.27	0.26	-2.32	-14.73	-2.06	2.58	-1.33
14	27	0.58	-1.65	-1.67	0.85	-1.93	-18.44	-1.07	2.78	-0.52
14	28	1.03	-1.18	-1.51	1.26	-1.41	-17.23	-0.15	2.68	-0.38
14	29	1.01	-0.83	-1.12	1.17	-0.98	-15.63	0.19	2.15	-0.54
14	30	0.69	-0.54	-1.03	0.88	-0.73	-19.94	0.15	1.61	-0.60
14	31	0.38	-0.30	-1.13	0.70	-0.62	-29.44	0.08	1.32	-0.56
14	32	0.17	-0.10	-1.28	0.69	-0.62	-38.95	0.07	1.30	-0.47
14	33	0.06	0.09	-1.38	0.77	-0.62	-45.65	0.15	1.38	-0.38
14	34	0.01	0.29	-1.42	0.88	-0.57	-50.52	0.31	1.45	-0.31
14	35	0.00	0.49	-1.40	0.99	-0.50	-54.66	0.49	1.49	-0.28
14	36	-0.01	0.67	-1.35	1.09	-0.43	-58.42	0.66	1.51	-0.28
15	2	-0.57	-0.07	-1.34	0.40	-1.03	-55.17	-0.63	1.43	0.06
15	3	-0.32	0.12	-1.30	0.59	-0.79	-54.41	-0.20	1.38	-0.17
15	4	0.33	0.02	-1.45	0.91	-0.57	-38.92	0.34	1.48	-0.15
15	5	1.21	-0.35	-2.02	1.71	-0.85	-26.16	0.86	2.55	0.20
15	6	1.65	-0.28	-1.30	1.85	-0.48	-16.94	1.37	2.33	-0.06
15	7	1.43	0.44	0.42	1.47	0.40	11.48	1.87	1.07	-0.92
15	8	0.83	0.34	0.23	0.86	0.32	12.59	1.18	0.54	-0.50
15	9	0.20	-0.44	-0.26	0.23	-0.47	-11.12	-0.24	0.70	0.46
15	10	-0.41	-0.28	2.41	0.86	-1.56	46.56	-0.70	2.42	0.27
15	11	-1.01	0.03	4.43	1.79	-2.76	51.63	-0.98	4.55	0.17
15	12	-0.38	-0.06	1.68	0.63	-1.08	50.45	-0.44	1.71	1.32
15	13	0.74	-0.16	-1.39	1.12	-0.53	-28.51	0.59	1.66	1.62

Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
15	14	1.55	0.20	-0.97	1.71	0.04	-17.77	1.75	1.66	-0.04
15	15	1.27	0.68	0.14	1.28	0.68	6.89	1.95	0.60	-1.28
15	16	1.04	0.46	-0.44	1.11	0.39	-18.60	1.49	0.72	-1.26
15	17	1.15	-0.01	-1.55	1.54	-0.40	-26.67	1.14	1.94	-0.89
15	18	1.08	0.12	-2.25	1.82	-0.63	-33.40	1.20	2.45	-0.86
15	19	0.77	0.42	-2.47	1.84	-0.65	-40.92	1.19	2.50	-0.73
15	20	0.53	-0.02	-2.21	1.40	-0.88	-37.99	0.52	2.28	-0.47
15	21	0.49	-0.07	-0.77	0.69	-0.26	-27.03	0.43	0.95	-0.30
15	22	0.32	2.31	0.39	2.33	0.30	84.41	2.63	2.03	-0.46
15	23	0.16	3.84	-0.91	3.90	0.10	-83.08	4.00	3.80	-0.47
15	24	0.16	0.84	-2.30	1.69	-0.70	-53.21	0.99	2.40	-0.74
15	25	0.55	-2.33	-1.88	0.83	-2.61	-16.52	-1.78	3.44	-1.49
15	26	1.17	-2.40	-2.13	1.46	-2.69	-15.42	-1.23	4.15	-1.25
15	27	1.57	-1.69	-3.06	2.17	-2.29	-21.60	-0.12	4.47	-0.77
15	28	1.55	-1.36	-2.50	2.01	-1.82	-20.32	0.18	3.83	-0.98
15	29	1.16	-1.04	-1.52	1.40	-1.28	-17.29	0.12	2.68	-1.18
15	30	0.67	-0.66	-1.18	0.89	-0.89	-20.70	0.01	1.78	-1.04
15	31	0.34	-0.38	-1.18	0.67	-0.71	-29.28	-0.04	1.38	-0.83
15	32	0.16	-0.19	-1.31	0.66	-0.69	-37.53	-0.03	1.35	-0.62
15	33	0.09	0.00	-1.42	0.75	-0.67	-43.24	0.09	1.42	-0.44
15	34	0.08	0.22	-1.45	0.88	-0.57	-47.76	0.31	1.45	-0.32
15	35	0.10	0.46	-1.41	1.01	-0.45	-52.21	0.56	1.45	-0.28
15	36	0.09	0.67	-1.34	1.11	-0.35	-56.64	0.76	1.46	-0.30
16	2	0.10	0.47	-2.41	1.50	-0.93	-49.27	0.57	2.43	-0.46
16	3	0.51	0.66	-3.55	2.36	-1.19	-46.22	1.17	3.55	-0.73
16	4	0.90	0.02	-4.17	2.59	-1.67	-39.09	0.92	4.26	-0.85
16	5	0.89	-0.82	-4.21	2.31	-2.24	-33.94	0.07	4.55	-0.72
16	6	0.48	-0.84	-2.60	1.28	-1.64	-31.52	-0.36	2.92	-0.79
16	7	0.32	-0.08	0.22	0.35	-0.11	14.38	0.24	0.46	-1.26
16	8	0.38	-0.13	0.76	0.58	-0.33	28.10	0.25	0.91	-0.65
16	9	0.28	-1.04	0.35	0.31	-1.06	7.39	-0.76	1.37	0.22
16	10	-0.36	-1.03	2.52	0.61	-2.00	37.55	-1.39	2.61	-0.37
16	11	-0.83	-0.31	3.52	1.21	-2.35	49.16	-1.14	3.56	-0.57
16	12	-0.48	0.83	-0.52	0.88	-0.52	-79.19	0.35	1.40	1.23
16	13	0.35	1.13	-2.80	2.19	-0.71	-52.78	1.48	2.90	1.91
16	14	0.97	0.53	0.04	0.97	0.53	2.44	1.50	0.45	0.27
16	15	1.10	0.45	1.96	1.81	-0.25	35.91	1.55	2.06	-0.55
16	16	1.13	0.47	1.25	1.51	0.10	31.09	1.61	1.41	-0.13
16	17	1.12	0.10	0.46	1.17	0.05	12.24	1.21	1.12	0.14
16	18	0.90	0.31	-0.01	0.90	0.31	-0.30	1.21	0.59	0.00
16	19	0.53	0.78	-0.84	1.09	0.21	-53.37	1.31	0.88	-0.10
16	20	0.04	-0.02	-1.44	0.73	-0.71	-43.71	0.02	1.45	-0.34
16	21	-0.82	-0.78	-0.64	-0.48	-1.12	-46.74	-1.60	0.64	-0.70
16	22	-1.96	1.37	1.48	1.53	-2.11	78.04	-0.59	3.64	-0.66
16	23	-1.96	4.07	1.01	4.11	-2.00	85.23	2.11	6.11	0.63
16	24	-0.90	1.70	-0.04	1.70	-0.90	-89.52	0.81	2.60	1.48
16	25	0.64	-1.79	0.43	0.66	-1.81	5.03	-1.15	2.46	0.25

Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
16	26	1.33	-1.29	-1.50	1.53	-1.49	-14.91	0.04	3.02	-0.61
16	27	1.35	-0.81	-3.80	2.45	-1.92	-30.18	0.53	4.37	-0.94
16	28	1.12	-1.75	-3.40	1.91	-2.54	-24.95	-0.63	4.45	-1.69
16	29	0.77	-1.74	-2.00	1.12	-2.09	-19.33	-0.97	3.21	-1.80
16	30	0.46	-1.04	-1.27	0.69	-1.27	-20.15	-0.58	1.96	-1.40
16	31	0.23	-0.59	-1.13	0.52	-0.88	-27.01	-0.36	1.40	-1.04
16	32	0.10	-0.37	-1.28	0.55	-0.82	-34.83	-0.27	1.37	-0.70
16	33	0.10	-0.16	-1.43	0.69	-0.76	-40.01	-0.06	1.45	-0.42
16	34	0.16	0.13	-1.44	0.86	-0.58	-44.46	0.29	1.44	-0.26
16	35	0.21	0.44	-1.36	1.01	-0.37	-49.78	0.65	1.38	-0.24
16	36	0.20	0.69	-1.28	1.13	-0.23	-55.50	0.90	1.37	-0.29
17	2	0.61	1.04	-2.21	1.95	-0.30	-50.51	1.65	2.25	-0.24
17	3	0.74	1.10	-3.07	2.46	-0.62	-48.37	1.84	3.09	-0.24
17	4	0.54	-0.12	-2.98	1.73	-1.32	-38.77	0.41	3.05	-0.26
17	5	-0.09	-1.55	-1.93	0.39	-2.03	-26.42	-1.64	2.42	-0.14
17	6	-0.70	-1.66	-0.04	-0.70	-1.66	-1.30	-2.35	0.96	-0.03
17	7	-0.87	-0.72	2.14	0.28	-1.87	47.00	-1.58	2.15	-0.21
17	8	-0.69	-0.30	1.78	0.42	-1.41	51.09	-0.99	1.83	0.10
17	9	-0.48	-0.90	0.49	-0.36	-1.01	24.99	-1.38	0.65	0.29
17	10	-0.52	-1.21	2.01	0.20	-1.93	35.54	-1.72	2.13	-1.01
17	11	-0.25	-0.71	2.32	0.71	-1.67	39.33	-0.96	2.37	-1.34
17	12	-0.34	1.20	-2.46	1.88	-1.02	-60.98	0.86	2.90	0.87
17	13	-0.62	1.57	-4.00	2.76	-1.80	-59.38	0.96	4.56	1.70
17	14	-0.98	0.14	-0.11	0.14	-0.98	-87.28	-0.83	1.12	0.12
17	15	-0.77	0.14	2.14	0.85	-1.48	56.61	-0.63	2.32	-0.28
17	16	-0.38	0.40	2.00	1.08	-1.07	55.73	0.02	2.15	0.47
17	17	-0.27	-0.24	2.36	0.92	-1.43	45.32	-0.51	2.36	0.96
17	18	-0.23	0.31	2.75	1.44	-1.36	50.52	0.08	2.80	1.20
17	19	-0.01	1.69	1.77	2.06	-0.39	66.90	1.67	2.46	1.21
17	20	0.09	0.84	0.74	0.99	-0.06	67.75	0.93	1.06	0.53
17	21	-0.08	-0.75	0.82	0.12	-0.94	25.38	-0.82	1.06	-0.54
17	22	-0.34	0.28	2.08	1.06	-1.12	53.22	-0.06	2.17	-0.75
17	23	-0.20	2.81	1.15	2.91	-0.31	79.51	2.60	3.22	1.13
17	24	-0.19	1.44	0.98	1.58	-0.33	74.48	1.25	1.91	2.51
17	25	-0.65	-1.15	3.31	0.77	-2.58	40.71	-1.80	3.35	1.46
17	26	-1.09	0.69	1.19	0.87	-1.27	73.08	-0.40	2.14	0.77
17	27	-1.09	0.98	-1.96	1.37	-1.48	-68.30	-0.12	2.85	0.34
17	28	-0.34	-1.78	-2.26	0.28	-2.40	-28.77	-2.13	2.68	-0.88
17	29	0.18	-2.34	-1.30	0.34	-2.50	-13.61	-2.16	2.84	-1.33
17	30	0.38	-1.35	-0.59	0.43	-1.40	-9.37	-0.96	1.83	-1.27
17	31	0.22	-0.75	-0.58	0.30	-0.83	-15.29	-0.53	1.13	-1.05
17	32	0.06	-0.59	-1.06	0.36	-0.88	-29.28	-0.52	1.24	-0.63
17	33	0.12	-0.36	-1.39	0.62	-0.86	-35.49	-0.24	1.47	-0.26
17	34	0.27	0.04	-1.37	0.85	-0.54	-40.29	0.31	1.39	-0.12
17	35	0.35	0.46	-1.25	1.03	-0.22	-47.58	0.80	1.25	-0.17
17	36	0.32	0.77	-1.15	1.16	-0.07	-55.80	1.09	1.23	-0.29
18	2	0.40	1.21	-0.89	1.41	0.20	-66.01	1.61	1.20	0.47

Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
18	3	0.01	1.01	-0.56	1.08	-0.06	-75.23	1.02	1.14	0.83
18	4	-0.64	-0.56	0.54	-0.33	-0.87	48.99	-1.20	0.54	0.94
18	5	-1.37	-2.31	1.87	-0.80	-2.88	31.70	-3.68	2.09	0.99
18	6	-2.02	-2.30	2.80	-0.75	-3.56	42.11	-4.31	2.81	0.79
18	7	-2.80	-0.67	3.48	0.30	-3.77	60.71	-3.47	4.07	0.07
18	8	-3.38	0.49	1.81	0.69	-3.58	77.42	-2.89	4.27	-0.15
18	9	-2.77	0.10	-1.31	0.24	-2.91	-77.69	-2.67	3.16	0.09
18	10	-1.13	-0.90	-0.66	-0.66	-1.36	-54.43	-2.03	0.70	-0.95
18	11	0.45	-1.70	1.17	0.60	-1.85	14.26	-1.25	2.45	-1.11
18	12	0.55	0.17	-0.68	0.75	-0.02	-30.52	0.72	0.77	1.23
18	13	-0.25	1.84	-1.09	1.97	-0.39	-76.20	1.58	2.36	2.14
18	14	-0.77	0.67	0.68	0.74	-0.85	77.33	-0.11	1.59	0.61
18	15	-0.68	0.16	0.79	0.32	-0.84	68.25	-0.52	1.15	-0.36
18	16	-0.42	0.02	0.40	0.10	-0.50	68.79	-0.40	0.60	-0.24
18	17	-0.33	-0.79	0.68	-0.15	-0.97	27.94	-1.11	0.82	0.04
18	18	-0.20	0.11	0.85	0.41	-0.50	54.99	-0.09	0.91	0.46
18	19	-0.09	2.07	0.72	2.13	-0.15	80.76	1.98	2.28	0.75
18	20	-0.16	1.45	1.28	1.68	-0.38	70.84	1.29	2.06	0.42
18	21	0.20	-0.27	1.51	0.76	-0.82	36.37	-0.06	1.58	-0.20
18	22	1.34	-0.07	1.11	1.54	-0.27	19.08	1.27	1.80	-0.58
18	23	1.67	1.37	-0.46	1.80	1.25	-28.49	3.05	0.55	0.42
18	24	0.55	0.38	0.22	0.60	0.33	26.42	0.93	0.27	1.24
18	25	-1.45	-1.11	3.89	0.67	-3.23	47.52	-2.56	3.90	0.84
18	26	-2.39	1.89	3.23	2.43	-2.93	71.47	-0.51	5.36	1.65
18	27	-2.12	2.39	0.99	2.45	-2.18	83.83	0.27	4.62	2.29
18	28	-0.78	-1.40	0.52	-0.69	-1.49	20.06	-2.18	0.80	1.68
18	29	0.48	-2.28	0.83	0.54	-2.34	8.39	-1.80	2.88	0.65
18	30	0.95	-0.94	1.65	1.26	-1.24	20.56	0.02	2.50	-0.60
18	31	0.44	-0.47	0.94	0.64	-0.66	22.97	-0.02	1.30	-0.92
18	32	0.05	-0.74	-0.68	0.18	-0.87	-20.20	-0.69	1.04	-0.40
18	33	0.20	-0.59	-1.37	0.60	-0.98	-30.11	-0.39	1.58	0.05
18	34	0.46	0.02	-1.22	0.89	-0.41	-34.95	0.48	1.30	0.08
18	35	0.51	0.57	-1.02	1.05	0.03	-46.73	1.08	1.02	-0.10
18	36	0.40	0.93	-0.95	1.21	0.12	-59.46	1.33	1.09	-0.31
19	2	0.20	0.87	0.32	0.90	0.16	77.13	1.07	0.74	0.91
19	3	-0.18	0.36	1.07	0.69	-0.51	58.26	0.18	1.20	1.15
19	4	-0.61	-1.00	2.00	0.22	-1.82	39.57	-1.61	2.04	1.10
19	5	-1.01	-2.29	2.41	-0.28	-3.02	30.93	-3.30	2.73	0.80
19	6	-1.38	-1.94	2.33	-0.46	-2.86	38.25	-3.32	2.40	0.15
19	7	-1.96	0.07	2.57	0.69	-2.58	64.15	-1.88	3.27	-0.89
19	8	-2.57	1.24	1.07	1.31	-2.65	82.20	-1.34	3.96	-0.88
19	9	-2.28	0.72	-2.51	1.17	-2.73	-70.03	-1.56	3.91	0.41
19	10	-0.73	-0.52	-2.40	0.58	-1.83	-47.55	-1.25	2.41	0.05
19	11	1.09	-2.26	-0.37	1.10	-2.27	-3.13	-1.16	3.37	-0.76
19	12	1.88	-0.78	-1.51	2.07	-0.98	-14.80	1.09	3.06	0.61
19	13	1.58	1.94	-1.69	2.62	0.89	-51.12	3.52	1.73	1.07
19	14	1.00	1.32	-0.06	1.33	1.00	-85.10	2.32	0.33	-0.17

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
19	15	0.61	0.34	-0.26	0.66	0.29	-21.50	0.95	0.38	-0.93
19	16	0.33	-0.12	-0.95	0.63	-0.42	-32.27	0.20	1.05	-0.98
19	17	0.32	-0.80	-1.62	0.74	-1.23	-27.66	-0.49	1.97	-1.05
19	18	0.40	0.03	-2.40	1.43	-1.00	-40.55	0.43	2.43	-0.92
19	19	-0.20	1.42	-1.30	1.65	-0.43	-70.56	1.22	2.08	-0.78
19	20	-1.52	0.58	1.60	0.85	-1.79	71.39	-0.94	2.64	-0.60
19	21	-2.00	0.00	1.62	0.29	-2.29	70.45	-2.00	2.58	0.32
19	22	-0.94	1.00	-0.31	1.01	-0.95	-85.46	0.06	1.96	0.83
19	23	0.10	1.13	-0.89	1.30	-0.07	-69.60	1.23	1.36	0.32
19	24	0.21	-0.65	0.12	0.21	-0.66	4.08	-0.45	0.87	-0.41
19	25	0.16	-1.57	1.48	0.43	-1.84	20.25	-1.41	2.27	-0.69
19	26	0.31	1.47	0.94	1.63	0.14	70.57	1.78	1.49	0.64
19	27	0.68	2.09	0.37	2.12	0.65	82.67	2.77	1.46	2.16
19	28	1.34	-1.38	0.51	1.37	-1.40	5.32	-0.04	2.77	3.26
19	29	2.09	-1.65	1.97	2.33	-1.89	13.93	0.44	4.22	2.20
19	30	1.94	0.43	4.47	3.54	-1.18	35.65	2.37	4.72	-0.33
19	31	0.76	0.37	2.86	2.01	-0.88	41.16	1.14	2.89	-0.96
19	32	0.19	-0.82	-0.36	0.22	-0.85	-9.70	-0.62	1.07	-0.03
19	33	0.47	-0.78	-1.40	0.78	-1.09	-24.12	-0.30	1.87	0.49
19	34	0.74	0.14	-0.95	1.00	-0.12	-28.66	0.88	1.12	0.26
19	35	0.63	0.82	-0.68	1.08	0.38	-52.78	1.46	0.71	-0.11
19	36	0.38	1.17	-0.72	1.31	0.24	-68.75	1.55	1.07	-0.40
20	2	0.23	0.41	0.84	0.75	-0.11	51.06	0.63	0.86	0.97
20	3	0.09	-0.12	1.38	0.68	-0.71	40.61	-0.02	1.39	0.97
20	4	0.04	-0.92	1.64	0.51	-1.39	29.75	-0.88	1.90	0.65
20	5	0.11	-1.47	1.09	0.28	-1.64	17.30	-1.36	1.91	0.07
20	6	0.50	-0.90	0.33	0.52	-0.92	6.59	-0.39	1.44	-0.76
20	7	1.45	0.69	0.60	1.55	0.59	18.97	2.14	0.97	-1.56
20	8	2.28	1.04	0.51	2.33	0.99	11.17	3.33	1.34	-1.08
20	9	2.18	0.34	-1.46	2.44	0.09	-19.20	2.53	2.35	0.92
20	10	1.46	-0.02	-1.69	1.84	-0.40	-24.45	1.44	2.24	1.18
20	11	1.24	-1.44	-1.55	1.45	-1.65	-15.04	-0.20	3.09	-0.37
20	12	2.02	-0.83	-4.68	3.34	-2.14	-29.32	1.20	5.48	-0.66
20	13	2.60	1.70	-5.16	4.77	-0.47	-40.07	4.30	5.24	-0.96
20	14	1.99	1.20	-1.40	2.40	0.79	-30.22	3.19	1.61	-1.70
20	15	0.92	0.00	0.52	0.99	-0.06	14.83	0.93	1.06	-1.22
20	16	0.31	-0.09	0.03	0.31	-0.09	2.01	0.22	0.40	-0.43
20	17	0.51	-0.06	-1.03	0.81	-0.37	-30.62	0.45	1.18	-0.45
20	18	0.55	0.56	-1.96	1.53	-0.42	-45.12	1.11	1.96	-0.77
20	19	-0.19	0.62	-0.71	0.75	-0.32	-69.32	0.43	1.07	-1.49
20	20	-1.50	-0.93	1.94	-0.20	-2.23	53.17	-2.43	2.03	-1.83
20	21	-2.12	-0.44	0.44	-0.42	-2.15	82.68	-2.56	1.73	-0.06
20	22	-1.75	1.70	-2.10	2.00	-2.04	-74.35	-0.04	4.04	1.57
20	23	-0.95	1.34	-0.75	1.40	-1.01	-80.93	0.40	2.41	0.58
20	24	-0.16	-0.69	0.51	-0.06	-0.79	22.06	-0.85	0.74	-0.75
20	25	0.77	-1.43	-0.52	0.80	-1.46	-6.58	-0.66	2.26	-0.88
20	26	1.39	0.44	-1.43	1.78	0.06	-28.15	1.83	1.72	-0.31

Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
20	27	1.43	0.80	-1.51	1.93	0.30	-33.59	2.23	1.64	0.70
20	28	0.96	-1.58	-2.49	1.47	-2.09	-22.25	-0.62	3.55	2.36
20	29	0.71	-1.03	-0.34	0.72	-1.05	-5.47	-0.33	1.77	1.51
20	30	0.62	1.37	4.12	3.09	-1.10	50.19	1.99	4.19	-1.00
20	31	0.61	0.87	3.35	2.42	-0.94	47.25	1.48	3.36	-0.98
20	32	0.89	-0.79	0.07	0.89	-0.79	1.24	0.10	1.68	0.51
20	33	1.08	-0.67	-1.07	1.23	-0.82	-15.70	0.42	2.05	0.88
20	34	0.93	0.52	-0.51	1.05	0.39	-25.60	1.44	0.66	0.23
20	35	0.51	1.18	-0.31	1.22	0.47	-77.57	1.69	0.75	-0.31
20	36	0.12	1.44	-0.56	1.49	0.06	-78.46	1.56	1.43	-0.56
21	2	0.29	0.13	0.81	0.62	-0.20	39.38	0.41	0.82	0.87
21	3	0.30	-0.20	1.08	0.64	-0.55	32.69	0.10	1.19	0.74
21	4	0.34	-0.40	1.02	0.60	-0.66	26.99	-0.06	1.26	0.36
21	5	0.52	-0.29	0.31	0.54	-0.32	10.51	0.22	0.86	-0.18
21	6	1.10	0.19	-0.62	1.20	0.10	-17.00	1.29	1.10	-0.69
21	7	2.32	0.74	-0.67	2.39	0.67	-11.41	3.06	1.72	-1.01
21	8	3.40	0.20	-0.20	3.40	0.20	-1.80	3.60	3.21	-0.77
21	9	3.15	-0.35	-0.77	3.19	-0.39	-6.19	2.80	3.58	0.27
21	10	1.92	0.37	-1.06	2.09	0.21	-17.16	2.30	1.87	0.52
21	11	0.84	0.28	-1.78	1.49	-0.38	-36.28	1.11	1.87	-0.15
21	12	0.51	0.29	-4.19	2.49	-1.70	-43.49	0.79	4.19	-0.09
21	13	0.29	0.83	-3.55	2.35	-1.24	-49.34	1.11	3.59	-0.52
21	14	-0.14	-0.14	0.45	0.09	-0.37	45.10	-0.28	0.45	-1.45
21	15	-0.21	-0.64	1.69	0.45	-1.30	37.89	-0.85	1.74	-0.89
21	16	0.23	-0.10	0.49	0.36	-0.23	28.09	0.13	0.59	0.23
21	17	0.72	0.52	-0.04	0.72	0.52	-6.36	1.24	0.20	0.41
21	18	0.69	1.26	-0.02	1.26	0.69	-89.16	1.96	0.57	-0.10
21	19	0.65	0.94	0.47	1.07	0.52	60.68	1.59	0.55	-1.47
21	20	1.00	-1.26	0.89	1.09	-1.34	10.75	-0.25	2.43	-2.68
21	21	1.08	-1.45	-1.53	1.29	-1.67	-15.52	-0.37	2.96	-1.26
21	22	0.37	0.81	-3.04	2.12	-0.95	-49.15	1.18	3.07	0.90
21	23	-0.65	1.00	0.07	1.00	-0.65	88.79	0.35	1.65	0.91
21	24	-0.79	-0.13	1.67	0.44	-1.36	55.94	-0.92	1.80	0.39
21	25	-0.38	-0.44	0.11	-0.35	-0.47	30.18	-0.82	0.13	0.54
21	26	-0.03	0.14	-0.68	0.41	-0.30	-51.93	0.11	0.70	0.31
21	27	-0.30	-0.15	-1.18	0.37	-0.82	-48.53	-0.45	1.19	0.25
21	28	-1.56	-1.56	-3.55	0.22	-3.33	-45.03	-3.12	3.55	0.95
21	29	-2.56	-0.54	-2.31	-0.02	-3.08	-65.56	-3.10	3.06	-0.11
21	30	-2.13	1.18	1.58	1.36	-2.31	77.25	-0.95	3.67	-1.65
21	31	-0.36	0.41	1.79	1.00	-0.95	56.58	0.04	1.95	-0.69
21	32	0.99	-0.64	-0.05	0.99	-0.64	-0.82	0.35	1.64	0.84
21	33	1.02	-0.12	-0.84	1.16	-0.26	-18.14	0.89	1.42	0.80
21	34	0.45	1.08	-0.40	1.13	0.39	-73.85	1.53	0.74	-0.18
21	35	-0.08	1.48	-0.21	1.49	-0.09	-86.15	1.40	1.58	-0.71
21	36	-0.38	1.64	-0.60	1.68	-0.42	-81.75	1.26	2.10	-0.79
22	2	0.26	0.07	0.51	0.44	-0.11	34.43	0.33	0.54	0.73
22	3	0.30	-0.03	0.60	0.48	-0.21	30.41	0.27	0.69	0.53

Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
22	4	0.32	0.18	0.57	0.54	-0.04	38.23	0.50	0.58	0.17
22	5	0.31	0.62	0.15	0.64	0.29	76.86	0.93	0.35	-0.17
22	6	0.47	0.82	-0.68	1.03	0.26	-58.70	1.29	0.77	-0.18
22	7	0.77	0.59	-1.05	1.21	0.15	-40.08	1.37	1.06	-0.09
22	8	1.07	-0.32	-0.64	1.14	-0.39	-12.32	0.75	1.53	-0.36
22	9	0.81	-0.63	-0.51	0.86	-0.68	-9.73	0.18	1.53	-0.59
22	10	0.46	0.52	-0.70	0.84	0.14	-47.50	0.98	0.70	-0.54
22	11	-0.08	1.10	-1.14	1.33	-0.31	-68.08	1.02	1.64	-0.12
22	12	-1.01	0.73	-1.55	1.03	-1.31	-69.13	-0.28	2.33	0.75
22	13	-2.05	-0.03	0.03	-0.03	-2.05	89.63	-2.08	2.03	0.57
22	14	-2.05	-0.83	2.13	-0.21	-2.67	59.90	-2.89	2.46	-0.45
22	15	-0.91	-0.62	1.06	-0.21	-1.31	52.70	-1.53	1.10	-0.40
22	16	0.44	-0.25	-0.94	0.68	-0.49	-26.98	0.19	1.17	0.23
22	17	0.88	0.26	-0.51	0.97	0.17	-20.01	1.14	0.80	0.42
22	18	0.65	1.34	1.35	1.75	0.24	58.59	1.99	1.51	0.06
22	19	0.72	1.65	2.36	2.45	-0.08	55.70	2.37	2.54	-0.64
22	20	1.60	-0.19	1.50	1.87	-0.47	19.90	1.41	2.34	-1.32
22	21	2.04	-1.76	-0.62	2.07	-1.79	-4.59	0.28	3.86	-0.81
22	22	1.30	-0.82	-1.39	1.51	-1.03	-16.60	0.48	2.54	0.23
22	23	-0.01	-0.03	0.82	0.39	-0.43	44.22	-0.04	0.82	0.66
22	24	-0.45	0.09	1.77	0.75	-1.11	53.58	-0.36	1.85	0.95
22	25	-0.21	0.39	0.74	0.57	-0.39	64.62	0.18	0.95	1.18
22	26	-0.03	0.50	0.30	0.54	-0.07	75.06	0.47	0.61	0.80
22	27	-0.29	-0.06	-0.07	-0.06	-0.30	-81.74	-0.35	0.24	0.40
22	28	-1.30	-0.85	-1.46	-0.31	-1.84	-53.44	-2.15	1.53	0.41
22	29	-2.14	-0.27	-1.06	-0.13	-2.28	-75.19	-2.41	2.15	-0.20
22	30	-1.83	0.07	0.27	0.08	-1.84	85.96	-1.76	1.92	-0.56
22	31	-0.40	-0.45	0.13	-0.35	-0.49	34.68	-0.84	0.14	0.24
22	32	0.48	-0.22	-0.53	0.57	-0.30	-18.49	0.27	0.88	0.73
22	33	0.30	0.66	-0.71	0.88	0.08	-58.49	0.96	0.80	0.26
22	34	-0.24	1.63	-0.31	1.65	-0.26	-85.30	1.39	1.90	-0.62
22	35	-0.50	1.90	-0.37	1.91	-0.52	-85.59	1.40	2.43	-1.06
22	36	-0.53	1.90	-1.01	2.00	-0.63	-78.72	1.37	2.64	-1.05
23	2	0.15	0.16	0.18	0.24	0.07	45.89	0.31	0.18	0.61
23	3	0.22	0.22	0.15	0.30	0.15	45.90	0.44	0.15	0.38
23	4	0.32	0.59	0.20	0.62	0.28	71.52	0.91	0.34	0.07
23	5	0.39	1.01	0.15	1.02	0.38	83.16	1.39	0.64	-0.10
23	6	0.35	0.96	-0.32	1.00	0.31	-76.08	1.31	0.69	0.12
23	7	0.22	0.47	-0.59	0.67	0.03	-56.61	0.69	0.64	0.31
23	8	0.14	-0.20	-0.18	0.16	-0.23	-14.00	-0.06	0.39	-0.02
23	9	0.12	-0.33	0.27	0.16	-0.36	15.51	-0.21	0.52	-0.46
23	10	0.11	0.30	0.24	0.36	0.05	64.06	0.41	0.30	-0.43
23	11	-0.20	0.65	0.04	0.66	-0.20	88.55	0.45	0.86	0.09
23	12	-0.89	0.27	0.30	0.29	-0.91	82.65	-0.62	1.20	0.56
23	13	-1.50	-0.44	1.27	-0.14	-1.80	64.95	-1.94	1.66	0.35
23	14	-1.41	-0.42	1.43	-0.05	-1.78	62.33	-1.84	1.73	-0.03
23	15	-0.76	0.08	-0.25	0.10	-0.78	-81.81	-0.68	0.88	0.15

Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
23	16	-0.16	-0.25	-1.60	0.60	-1.01	-43.51	-0.41	1.60	0.36
23	17	-0.03	-0.31	-0.88	0.30	-0.63	-36.25	-0.33	0.93	0.26
23	18	-0.14	0.73	1.51	1.17	-0.58	60.06	0.59	1.74	-0.08
23	19	-0.11	1.74	3.16	2.64	-1.01	60.15	1.63	3.66	0.05
23	20	0.40	1.00	2.32	1.90	-0.50	52.21	1.40	2.40	0.41
23	21	0.86	-1.26	1.15	1.00	-1.40	14.24	-0.40	2.40	0.24
23	22	0.94	-1.94	0.68	0.98	-1.98	6.63	-1.00	2.96	-0.19
23	23	1.10	-0.96	0.04	1.10	-0.96	0.61	0.15	2.06	0.13
23	24	1.31	0.11	-0.23	1.32	0.09	-5.49	1.42	1.23	0.60
23	25	1.30	0.86	0.09	1.31	0.86	6.00	2.17	0.45	0.41
23	26	0.67	0.82	0.25	0.89	0.60	60.88	1.49	0.29	0.27
23	27	0.00	0.13	0.14	0.16	-0.03	66.69	0.13	0.20	0.22
23	28	-0.37	-0.32	0.19	-0.25	-0.44	52.04	-0.69	0.19	0.17
23	29	-0.38	-0.10	0.48	0.04	-0.52	60.16	-0.49	0.56	0.13
23	30	-0.08	-0.41	-0.24	-0.04	-0.45	-17.63	-0.49	0.41	0.43
23	31	0.37	-0.61	-1.24	0.67	-0.92	-25.82	-0.25	1.58	0.66
23	32	0.29	0.09	-1.20	0.79	-0.42	-40.36	0.38	1.21	0.23
23	33	-0.09	0.92	-0.50	0.98	-0.15	-76.84	0.83	1.13	-0.24
23	34	-0.41	1.82	0.24	1.83	-0.41	86.88	1.41	2.24	-0.57
23	35	-0.43	2.20	0.25	2.21	-0.43	87.28	1.78	2.64	-0.79
23	36	-0.37	2.07	-0.32	2.08	-0.38	-86.27	1.70	2.47	-0.71
24	2	-0.02	0.31	0.00	0.31	-0.02	-89.92	0.29	0.33	0.57
24	3	0.08	0.47	-0.02	0.47	0.08	-88.25	0.55	0.39	0.40
24	4	0.32	0.80	0.08	0.80	0.32	84.96	1.12	0.48	0.21
24	5	0.59	1.03	0.30	1.07	0.54	72.98	1.62	0.53	0.12
24	6	0.57	0.83	0.30	0.90	0.50	65.38	1.40	0.39	0.26
24	7	0.35	0.45	0.15	0.49	0.31	62.71	0.80	0.18	0.41
24	8	0.21	0.09	0.24	0.28	0.02	32.13	0.30	0.26	0.25
24	9	0.41	-0.11	0.67	0.58	-0.28	25.93	0.30	0.85	-0.07
24	10	0.53	-0.03	1.00	0.82	-0.33	30.41	0.50	1.15	-0.11
24	11	0.26	0.12	1.13	0.76	-0.38	41.57	0.38	1.14	0.12
24	12	-0.22	-0.02	1.18	0.47	-0.72	49.89	-0.24	1.19	0.21
24	13	-0.42	-0.35	1.18	0.20	-0.98	46.88	-0.77	1.18	-0.01
24	14	-0.43	0.07	0.58	0.20	-0.56	65.49	-0.36	0.76	0.06
24	15	-0.46	0.65	-0.64	0.74	-0.55	-75.05	0.19	1.29	0.46
24	16	-0.74	0.04	-1.25	0.39	-1.09	-61.04	-0.70	1.48	0.49
24	17	-0.89	-0.58	-1.03	-0.19	-1.27	-53.40	-1.47	1.08	0.12
24	18	-0.60	-0.07	0.35	-0.02	-0.65	73.26	-0.67	0.64	-0.45
24	19	-0.11	0.91	1.63	1.36	-0.56	61.07	0.81	1.92	-0.42
24	20	0.24	1.09	1.30	1.44	-0.11	61.67	1.33	1.55	0.33
24	21	0.37	-0.48	1.10	0.64	-0.75	26.14	-0.11	1.40	0.47
24	22	1.17	-1.68	0.67	1.21	-1.72	6.61	-0.51	2.94	0.26
24	23	3.13	-0.80	-1.95	3.36	-1.03	-13.22	2.34	4.39	0.82
24	24	4.30	0.38	-1.96	4.53	0.15	-13.29	4.67	4.38	0.29
24	25	3.51	0.86	0.64	3.55	0.82	6.79	4.37	2.73	-1.24
24	26	1.43	0.66	0.63	1.54	0.54	19.61	2.09	1.00	-0.95
24	27	0.16	0.01	-0.25	0.23	-0.07	-29.63	0.16	0.29	-0.15

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
24	28	0.10	-0.31	0.11	0.11	-0.32	7.35	-0.21	0.42	-0.06
24	29	0.32	-0.21	0.10	0.32	-0.21	5.67	0.11	0.53	0.03
24	30	0.40	-0.27	-1.20	0.75	-0.62	-30.54	0.13	1.38	0.38
24	31	0.29	-0.22	-1.91	1.03	-0.95	-37.60	0.07	1.98	0.37
24	32	-0.16	0.05	-0.88	0.40	-0.51	-51.79	-0.11	0.90	-0.15
24	33	-0.47	0.54	0.34	0.57	-0.50	80.75	0.06	1.07	-0.20
24	34	-0.28	1.55	0.99	1.68	-0.41	75.78	1.27	2.09	0.17
24	35	0.11	2.33	1.63	2.60	-0.16	71.86	2.44	2.76	0.23
24	36	0.16	2.22	1.97	2.61	-0.23	68.09	2.38	2.84	0.20
25	2	-0.29	0.42	0.01	0.42	-0.29	89.58	0.13	0.71	0.60
25	3	-0.24	0.59	0.06	0.59	-0.25	88.06	0.35	0.84	0.53
25	4	-0.12	0.81	0.22	0.82	-0.14	83.21	0.68	0.96	0.48
25	5	-0.02	0.84	0.62	0.94	-0.12	72.26	0.82	1.07	0.43
25	6	-0.13	0.62	1.07	0.90	-0.41	62.47	0.49	1.31	0.40
25	7	-0.27	0.61	0.80	0.76	-0.43	68.89	0.34	1.19	0.46
25	8	-0.16	0.60	0.03	0.60	-0.16	88.69	0.45	0.76	0.44
25	9	0.28	-0.04	0.07	0.29	-0.05	6.11	0.24	0.33	0.15
25	10	0.57	-0.53	0.96	0.75	-0.71	20.44	0.03	1.46	-0.11
25	11	0.33	-0.18	1.77	0.99	-0.85	36.99	0.14	1.84	-0.16
25	12	-0.10	0.13	1.62	0.84	-0.80	49.14	0.03	1.64	-0.06
25	13	-0.20	0.05	0.83	0.36	-0.51	53.45	-0.14	0.87	0.01
25	14	0.04	0.35	0.03	0.35	0.04	86.75	0.39	0.31	0.08
25	15	0.20	0.78	-0.82	0.99	-0.02	-62.73	0.98	1.01	0.27
25	16	-0.02	0.44	-1.25	0.87	-0.46	-54.98	0.42	1.33	0.18
25	17	-0.28	-0.26	-1.28	0.37	-0.91	-45.39	-0.54	1.28	-0.17
25	18	-0.17	-0.42	-0.75	0.10	-0.69	-36.01	-0.59	0.79	-0.63
25	19	0.15	0.13	0.05	0.17	0.11	36.66	0.28	0.05	-0.74
25	20	0.22	0.60	0.32	0.65	0.16	69.89	0.82	0.49	-0.16
25	21	0.07	-0.39	0.77	0.29	-0.61	29.60	-0.32	0.90	0.22
25	22	0.69	-1.28	-0.12	0.69	-1.28	-1.78	-0.59	1.98	0.75
25	23	2.37	-0.07	-3.87	3.43	-1.14	-28.90	2.30	4.57	1.97
25	24	3.43	0.89	-2.51	3.94	0.37	-22.31	4.31	3.57	0.57
25	25	2.92	0.63	2.45	3.46	0.10	23.48	3.56	3.35	-2.17
25	26	1.42	0.24	2.08	2.03	-0.37	30.15	1.66	2.40	-1.67
25	27	0.62	-0.22	-0.07	0.62	-0.22	-2.41	0.40	0.85	-0.23
25	28	0.53	-0.32	-0.21	0.55	-0.33	-6.86	0.21	0.88	-0.08
25	29	0.54	-0.16	-0.28	0.57	-0.19	-10.73	0.38	0.75	-0.15
25	30	0.27	-0.09	-1.13	0.68	-0.50	-36.24	0.18	1.18	0.27
25	31	-0.17	-0.21	-0.87	0.25	-0.62	-43.54	-0.38	0.87	0.48
25	32	-0.94	-0.43	1.06	-0.10	-1.27	57.79	-1.37	1.17	0.03
25	33	-1.25	-0.04	1.70	0.40	-1.69	62.76	-1.29	2.09	0.24
25	34	-0.61	1.13	0.79	1.22	-0.70	77.85	0.52	1.91	1.15
25	35	0.33	2.09	1.87	2.49	-0.07	66.61	2.42	2.57	1.02
25	36	0.58	2.13	3.51	3.28	-0.56	56.91	2.71	3.84	0.44
26	2	-0.60	0.46	0.14	0.46	-0.60	86.25	-0.14	1.06	0.62
26	3	-0.70	0.58	0.27	0.59	-0.71	84.13	-0.13	1.30	0.61
26	4	-0.86	0.68	0.53	0.72	-0.90	80.44	-0.18	1.62	0.63

Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
26	5	-1.08	0.61	1.06	0.76	-1.23	73.88	-0.46	1.99	0.59
26	6	-1.28	0.46	1.64	0.79	-1.60	68.33	-0.82	2.39	0.47
26	7	-1.24	0.94	1.02	1.06	-1.35	77.44	-0.30	2.41	0.57
26	8	-0.80	1.38	-0.54	1.41	-0.83	-83.02	0.58	2.25	0.68
26	9	-0.15	0.08	-0.77	0.37	-0.44	-53.54	-0.07	0.80	0.37
26	10	0.30	-1.14	0.53	0.35	-1.18	10.14	-0.84	1.53	-0.18
26	11	0.22	-0.29	1.87	0.93	-1.00	37.33	-0.07	1.94	-0.58
26	12	0.08	0.39	1.53	1.02	-0.55	50.72	0.47	1.56	-0.36
26	13	0.18	0.24	0.20	0.32	0.11	53.35	0.42	0.21	0.07
26	14	0.48	0.65	-0.36	0.76	0.37	-57.55	1.13	0.40	0.11
26	15	0.60	1.02	-0.83	1.28	0.34	-58.46	1.62	0.93	0.06
26	16	0.51	0.65	-1.16	1.16	0.00	-48.57	1.16	1.17	-0.02
26	17	0.34	0.02	-1.05	0.73	-0.37	-36.64	0.36	1.10	-0.19
26	18	0.21	-0.40	-0.69	0.37	-0.56	-24.22	-0.19	0.93	-0.43
26	19	0.16	-0.27	-0.24	0.19	-0.30	-14.63	-0.11	0.49	-0.57
26	20	0.25	0.13	-0.18	0.30	0.08	-27.64	0.39	0.22	-0.45
26	21	0.33	-0.42	-0.31	0.36	-0.46	-11.25	-0.10	0.81	-0.40
26	22	-0.22	-0.97	-1.71	0.34	-1.53	-33.18	-1.19	1.87	0.20
26	23	-1.62	0.23	-4.54	1.76	-3.14	-56.09	-1.38	4.90	1.67
26	24	-2.33	0.95	-2.06	1.24	-2.62	-73.91	-1.38	3.87	0.72
26	25	-1.80	0.32	3.51	1.31	-2.79	60.55	-1.48	4.10	-1.67
26	26	-0.50	-0.11	3.24	1.33	-1.94	48.47	-0.61	3.27	-1.31
26	27	0.18	-0.25	0.48	0.29	-0.36	24.42	-0.07	0.64	0.07
26	28	0.18	-0.10	-0.12	0.20	-0.11	-11.65	0.08	0.31	0.11
26	29	0.06	0.01	0.00	0.06	0.01	-1.71	0.07	0.05	-0.19
26	30	-0.46	-0.26	-0.32	-0.17	-0.55	-61.44	-0.72	0.38	0.09
26	31	-1.24	-0.69	0.19	-0.68	-1.26	80.29	-1.93	0.58	0.29
26	32	-1.84	-0.80	1.76	-0.30	-2.34	60.40	-2.64	2.04	-0.11
26	33	-1.79	-0.13	1.12	0.04	-1.96	73.01	-1.92	2.00	0.21
26	34	-1.14	0.99	-1.25	1.16	-1.31	-74.82	-0.15	2.48	1.22
26	35	-0.42	1.71	-0.07	1.71	-0.42	-89.10	1.29	2.13	0.73
26	36	-0.14	1.79	2.69	2.48	-0.83	62.84	1.65	3.31	-0.31
27	2	-0.83	0.43	0.30	0.45	-0.85	83.38	-0.40	1.29	0.58
27	3	-1.02	0.49	0.48	0.53	-1.05	81.24	-0.52	1.58	0.57
27	4	-1.27	0.52	0.77	0.60	-1.35	78.32	-0.75	1.94	0.55
27	5	-1.52	0.45	1.19	0.62	-1.68	74.41	-1.06	2.30	0.44
27	6	-1.59	0.48	1.41	0.70	-1.81	72.91	-1.11	2.51	0.30
27	7	-1.46	1.25	0.59	1.28	-1.49	83.86	-0.21	2.77	0.55
27	8	-1.11	1.84	-0.80	1.89	-1.17	-82.41	0.73	3.06	1.03
27	9	-0.71	0.33	-0.93	0.51	-0.89	-69.02	-0.38	1.40	0.83
27	10	-0.37	-1.12	0.23	-0.36	-1.13	8.57	-1.49	0.78	-0.10
27	11	-0.11	-0.15	1.24	0.49	-0.75	44.20	-0.26	1.24	-0.98
27	12	0.38	0.25	0.57	0.61	0.02	38.79	0.63	0.59	-0.55
27	13	0.90	-0.04	-0.48	0.95	-0.10	-13.66	0.86	1.05	0.31
27	14	0.96	1.01	-0.02	1.01	0.96	-77.51	1.97	0.06	0.19
27	15	0.55	1.41	-0.11	1.42	0.55	-86.40	1.97	0.87	0.00
27	16	0.24	0.57	-0.74	0.81	0.00	-57.17	0.81	0.81	0.18

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
27	17	0.21	0.02	-0.34	0.31	-0.08	-30.24	0.22	0.39	0.11
27	18	0.16	-0.23	0.28	0.20	-0.28	17.95	-0.08	0.48	-0.19
27	19	0.01	-0.32	0.26	0.06	-0.37	18.63	-0.31	0.43	-0.31
27	20	0.13	-0.01	-0.24	0.20	-0.08	-29.86	0.13	0.28	-0.27
27	21	0.46	-0.23	-0.62	0.58	-0.35	-21.03	0.23	0.93	-0.43
27	22	-0.14	-0.78	-1.34	0.28	-1.20	-32.31	-0.92	1.48	-0.36
27	23	-2.32	-0.07	-2.71	0.56	-2.96	-64.90	-2.39	3.52	0.57
27	24	-3.93	0.43	-1.20	0.51	-4.01	-82.32	-3.51	4.52	0.55
27	25	-3.69	-0.08	2.44	0.29	-4.06	72.99	-3.78	4.35	-0.52
27	26	-1.84	-0.17	2.63	0.56	-2.56	61.16	-2.00	3.12	-0.46
27	27	-0.67	0.11	0.68	0.23	-0.80	69.44	-0.57	1.03	0.24
27	28	-0.51	0.27	0.05	0.27	-0.51	88.21	-0.24	0.78	0.14
27	29	-0.78	0.08	0.47	0.14	-0.84	75.71	-0.71	0.98	-0.28
27	30	-1.41	-0.57	0.62	-0.47	-1.51	71.86	-1.98	1.04	-0.26
27	31	-2.14	-1.07	0.69	-0.96	-2.25	73.59	-3.21	1.28	-0.20
27	32	-2.06	-0.71	0.86	-0.59	-2.18	73.80	-2.77	1.60	-0.45
27	33	-1.38	0.31	-0.86	0.41	-1.48	-76.51	-1.07	1.89	-0.07
27	34	-0.79	1.25	-3.50	2.25	-1.79	-60.09	0.46	4.04	0.73
27	35	-0.62	1.43	-2.19	1.90	-1.09	-66.55	0.81	2.99	0.02
27	36	-0.49	1.26	0.88	1.37	-0.59	76.69	0.78	1.96	-1.14
28	2	-0.92	0.39	0.42	0.43	-0.95	81.17	-0.52	1.38	0.50
28	3	-1.07	0.42	0.59	0.48	-1.13	79.15	-0.65	1.61	0.45
28	4	-1.22	0.43	0.82	0.52	-1.32	76.79	-0.80	1.84	0.36
28	5	-1.28	0.43	1.00	0.57	-1.42	74.81	-0.85	1.99	0.22
28	6	-1.18	0.62	0.87	0.72	-1.28	77.08	-0.56	2.00	0.13
28	7	-1.05	1.34	0.10	1.34	-1.05	88.74	0.29	2.39	0.52
28	8	-1.02	1.81	-0.78	1.87	-1.07	-82.34	0.80	2.94	1.22
28	9	-1.03	0.59	-0.73	0.67	-1.11	-77.85	-0.44	1.78	1.18
28	10	-0.85	-0.60	0.19	-0.57	-0.89	71.90	-1.45	0.32	0.21
28	11	-0.22	0.02	0.88	0.36	-0.55	52.67	-0.20	0.91	-0.63
28	12	0.54	-0.06	0.06	0.54	-0.07	2.64	0.48	0.61	-0.17
28	13	1.05	-0.33	-0.57	1.11	-0.39	-11.26	0.72	1.50	0.56
28	14	0.97	1.12	0.55	1.33	0.76	52.64	2.09	0.57	0.17
28	15	0.57	1.58	0.88	1.74	0.40	69.62	2.15	1.34	0.02
28	16	0.20	0.49	0.08	0.50	0.20	82.41	0.69	0.30	0.43
28	17	-0.04	-0.04	0.29	0.11	-0.18	44.75	-0.07	0.29	0.34
28	18	-0.22	-0.06	0.94	0.34	-0.61	49.83	-0.27	0.95	-0.09
28	19	-0.33	-0.25	0.77	0.10	-0.68	48.05	-0.57	0.78	-0.11
28	20	-0.31	-0.11	0.28	-0.04	-0.38	62.32	-0.42	0.34	0.23
28	21	-0.07	-0.01	0.28	0.11	-0.18	51.34	-0.08	0.29	0.36
28	22	0.03	-0.46	0.73	0.22	-0.66	28.00	-0.44	0.87	0.08
28	23	-0.50	-0.45	0.70	-0.12	-0.82	47.30	-0.95	0.70	0.00
28	24	-1.30	-0.23	0.30	-0.21	-1.32	82.19	-1.53	1.12	0.30
28	25	-1.55	-0.39	0.88	-0.24	-1.70	71.46	-1.94	1.46	0.30
28	26	-1.04	-0.02	1.17	0.25	-1.31	65.55	-1.06	1.55	0.14
28	27	-0.52	0.64	0.29	0.66	-0.54	82.93	0.12	1.20	0.21
28	28	-0.56	0.63	0.04	0.63	-0.56	89.09	0.06	1.19	-0.05

Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera

Vrsta	Kolona	e_x [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_y [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_{xy} [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_1 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	e_2 [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	φ [$^\circ$]	Δ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	γ [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]	Ω [$\frac{\text{mm}}{\text{km}}$]
28	29	-0.96	0.02	0.73	0.14	-1.08	71.75	-0.94	1.22	-0.50
28	30	-1.40	-0.72	1.17	-0.38	-1.74	60.14	-2.12	1.36	-0.65
28	31	-1.64	-0.97	0.83	-0.78	-1.84	64.36	-2.61	1.06	-0.58
28	32	-1.30	-0.31	-0.32	-0.29	-1.33	-81.17	-1.62	1.04	-0.41
28	33	-0.75	0.78	-2.23	1.37	-1.33	-62.25	0.04	2.70	0.09
28	34	-0.50	1.50	-3.63	2.57	-1.58	-59.44	1.00	4.15	0.51
28	35	-0.55	1.24	-2.37	1.82	-1.14	-63.53	0.68	2.96	-0.13
28	36	-0.42	0.80	-0.07	0.80	-0.42	-88.35	0.38	1.22	-1.08
29	2	-0.88	0.37	0.47	0.42	-0.92	79.65	-0.51	1.34	0.41
29	3	-0.96	0.40	0.61	0.47	-1.02	77.93	-0.56	1.49	0.34
29	4	-0.98	0.44	0.73	0.52	-1.07	76.32	-0.55	1.60	0.24
29	5	-0.90	0.52	0.76	0.62	-1.00	76.00	-0.38	1.62	0.16
29	6	-0.72	0.77	0.54	0.82	-0.77	80.13	0.05	1.59	0.19
29	7	-0.60	1.22	-0.04	1.22	-0.60	-89.43	0.61	1.82	0.56
29	8	-0.70	1.38	-0.66	1.43	-0.75	-81.18	0.68	2.18	1.11
29	9	-0.89	0.76	-0.60	0.82	-0.94	-79.98	-0.12	1.76	1.15
29	10	-0.77	0.15	0.24	0.16	-0.79	82.69	-0.62	0.95	0.57
29	11	-0.16	0.15	0.87	0.45	-0.47	54.73	-0.01	0.92	0.15
29	12	0.30	-0.34	0.03	0.30	-0.34	1.52	-0.04	0.64	0.42
29	13	0.39	-0.40	-0.49	0.46	-0.47	-15.88	-0.01	0.93	0.59
29	14	0.32	0.99	0.68	1.13	0.18	67.31	1.31	0.96	0.04
29	15	0.31	1.42	1.31	1.72	0.00	65.16	1.72	1.72	0.00
29	16	0.16	0.46	0.75	0.72	-0.09	55.76	0.62	0.81	0.48
29	17	-0.19	0.01	0.77	0.31	-0.49	52.32	-0.18	0.79	0.37
29	18	-0.39	0.05	1.29	0.51	-0.86	54.44	-0.35	1.37	-0.01
29	19	-0.38	-0.21	1.20	0.31	-0.90	48.91	-0.59	1.21	0.10
29	20	-0.37	-0.33	0.78	0.04	-0.74	46.70	-0.70	0.78	0.52
29	21	-0.37	-0.12	0.76	0.15	-0.64	54.44	-0.49	0.80	0.74
29	22	-0.21	-0.22	1.36	0.47	-0.90	44.84	-0.43	1.36	0.44
29	23	-0.04	-0.36	1.82	0.72	-1.13	40.17	-0.40	1.85	0.02
29	24	-0.10	-0.39	1.16	0.36	-0.84	38.01	-0.48	1.20	0.09
29	25	-0.27	-0.40	0.38	-0.13	-0.54	35.66	-0.67	0.40	0.28
29	26	-0.38	0.20	0.12	0.21	-0.38	83.94	-0.17	0.59	0.19
29	27	-0.43	0.98	-0.03	0.98	-0.43	-89.33	0.55	1.40	0.06
29	28	-0.58	0.80	0.28	0.81	-0.60	84.22	0.22	1.41	-0.22
29	29	-0.76	-0.03	0.96	0.21	-1.00	63.53	-0.79	1.21	-0.61
29	30	-0.75	-0.64	1.16	-0.11	-1.28	47.56	-1.39	1.17	-0.85
29	31	-0.56	-0.62	0.40	-0.39	-0.79	40.80	-1.18	0.40	-0.75
29	32	-0.33	0.10	-1.13	0.49	-0.72	-55.49	-0.23	1.21	-0.31
29	33	-0.32	1.03	-2.56	1.81	-1.09	-58.87	0.72	2.90	0.25
29	34	-0.60	1.49	-2.91	2.24	-1.35	-62.84	0.89	3.59	0.52
29	35	-0.82	1.10	-1.71	1.43	-1.14	-69.17	0.29	2.57	0.04
29	36	-0.71	0.63	-0.15	0.64	-0.71	-86.74	-0.07	1.34	-0.65