

UDK 551.2/.3:551.242.1:528.061:004.4(497.5)
Izvorni znanstveni članak / Original scientific paper

Analiza pomaka na Geodinamičkoj mreži Grada Zagreba iz različitih vremenskih epoha

Boško PRIBIČEVIĆ, Almin ĐAPO – Zagreb¹

SAŽETAK. Mjerenja na Geodinamičkoj mreži Grada Zagreba provedena u razdoblju od 18 godina potvrđuju stalno prisutnu tektonsku aktivnost u obuhvaćenom širem prostoru oko Medvednice. Sva GPS mjerenja obrađena su na istovjetan način: s pomoću najnovije inačice znanstvenog GPS softvera GAMIT/GLOBK 10.6, koji se koristi Kalman filtrom za određivanje brzina iz vremenski odvojenih kampanja. Svi parametri GAMIT-a podešeni su za regionalnu, odnosno lokalnu kampanju. Za ishodišni referentni okvir predmetne geodinamičke mreže izabrane su dvije najstabilnije točke na području istraživanja. Pomaci svih ostalih točaka u mreži odnose se na vektor između dviju spomenutih točaka. Na taj se način izbjegla mogućnost precjenjivanja pomaka svih točaka u mreži zbog možebitnog pomaka jednog jedinstvenog ishodišta. U radu je provedena interdisciplinarna geodetska i geološka analiza i usporedba rezultata dobivenih iz razdoblja 2008–2009. i 2009–2015. Usporedba navedenih razdoblja provedena je zbog njihova različita vremenskog razmaka, koji iznosi jednu godinu (2008–2009), odnosno šest godina (2009–2015). Rezultati analize opisane u radu evidentno pokazuju nužnost provođenja takve vrste mjerenja u vremenskim intervalima od maksimalno jedne godine. Naime, u slučaju višegodišnjih vremenskih razmaka između GPS kampanja dolazi do usrednjavanja pomaka te se zapravo izgube pomaci na godišnjoj razini koji su iznimno vrijedni podaci potrebni za kvalitetnu analizu i razumijevanje mehanizma strukturnog sklopa širega zagrebačkog područja.

Ključne riječi: GPS, geodinamika, geodinamička mreža, GAMIT/GLOBK, geodetski model, geološki model.

1. Uvod

Šire zagrebačko područje seizmički je najaktivnije područje kontinentalnog dijela Republike Hrvatske (Herak i dr. 2009, Herak i dr. 2011), a time i potresno najugroženije. Povijesno gledano tu su se dogodili jaki potresi 1775., 1880. i 1905. godine, od kojih su neki bili i katastrofalni za Grad Zagreb (Prelogović i Cvijanović

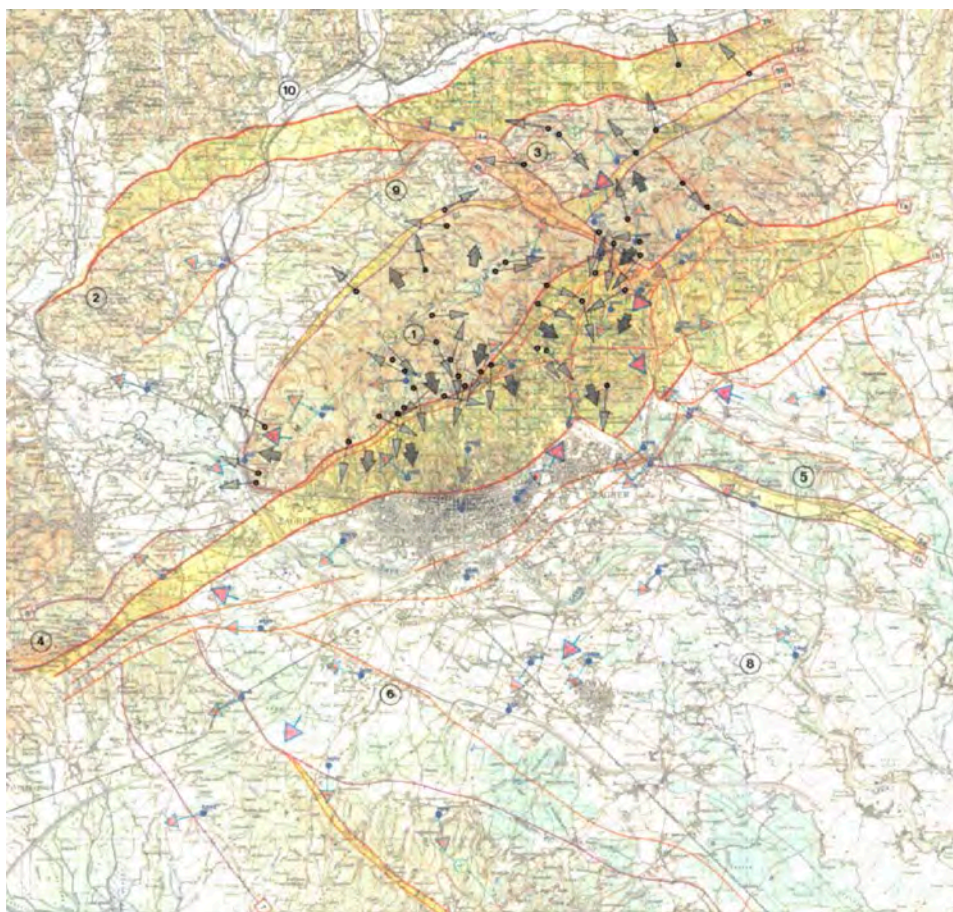
¹ prof. dr. sc. Boško Pribičević, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: bpribic@geof.hr,
doc. dr. sc. Almin Đapo, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: adapo@geof.hr.

1981). Budući da to područje zauzima samo 7% ukupne površine, gdje živi 30% stanovništva koje ostvaruje 50% nacionalnog bruto dohotka Republike Hrvatske, jasno je da to područje ima veliki značaj. To je bio glavni razlog razvoja predmetnoga geodinamičkog projekta za praćenje tektonskih pomaka na području Zagrebačke gore i rubnih područja nekoliko važnih tektonskih cjelina koje se susreću na širem zagrebačkom području, a to su izdanci jugoistočnih Alpa, zatim Dinaridi, te Panonski bazen. Na području Grada Zagreba ističu se mnogobrojni važni rasjedi, duž kojih tektonska aktivnost određuje brojnost i intenzitet potresa (Matoš i dr. 2014, Van Gelder i dr. 2015). Grad Zagreb prepoznao je važnost takvog projekta, te je uspostavljena Geodinamička mreža Grada Zagreba, čiji su počeci i prvi rezultati detaljno opisani u nizu radova i studija (Medak i Pribičević 2001, Medak i Pribičević 2002, Pribičević i dr. 2007a, 2007b, 2008, Đapo 2009, Đapo i dr. 2009, Pribičević i dr. 2011). Mreža je projektirana i uspostavljena 1997. godine s početne ukupno 43 specijalno stabilizirane točke, tako da najbolje reprezentiraju geodinamička događanja na području istraživanja (Solarić 1999, Gerasimenko i dr. 2000). GPS mjerne kampanje na Geodinamičkoj mreži izvedene su od 1997. godine 10 puta, čime je ostvaren skup mjernih podataka u devet vremenskih razdoblja, koji su iskorišteni za određivanje geodinamičkih pomaka u mreži.

U sklopu istog projekta je na području istraživanja proveden i cijeli niz geoloških mjerenja, te je izvedena znanstvena usporedba dvaju modela realiziranih neovisnim metodama: geodetskog modela, utemeljenog na preciznim GPS mjerenjima, te geološkog modela, utemeljenog na dugotrajnim geološkim istraživanjima. Nakon sustavnih interdisciplinarnih analiza geodetskih i geoloških podataka, kao rezultat je određen jedinstveni interdisciplinarni model gibanja pripovršinskih slojeva na području Grada Zagreba. Ti će se rezultati upotrebljavati za opisivanje zona potencijalnih opasnosti od potresa i tektonski izazvanih klizišta. Za potrebe ovoga rada obrada svih provedenih GPS mjerenja izvedena je na istovjetan način: uporabom najnovije (10.6) inačice znanstvenoga GPS softvera GAMIT/GLOBK, koja je objavljena 15. lipnja 2015. godine, a sam postupak obrade bit će detaljnije opisan u nastavku. Deset mjernih GPS kampanja i njihova obrada izvedeno je: 1997., 2001., 2003., 2004., 2005., 2006., 2007., 2008., 2009. i 2015. godine. Kao što se vidi nije bio uspostavljen kontinuitet izvođenja mjernih kampanja. Najveći vremenski razmak bio je između posljednjih dviju kampanja, koji je iznosio 6 godina. Ovaj rad bavi se usporedbom rezultata dobivenih iz razdoblja 2008–2009. i 2009–2015. godine, jer je za razdoblje 2009–2015. utvrđena aktivnost geološkoga strukturnog sklopa u relativno dužem vremenskom razdoblju, pa se detaljne promjene i oscilacije aktivnosti, te godišnje promjene smjera tektonskih pomaka nisu mogle odrediti. Stoga je bilo potrebno provesti interdisciplinarnu analizu s dosadašnjim pomacima posebice iz razdoblja 2008–2009. godine. Najvažnije je bilo uočiti uzroke tektonske aktivnosti i ovisnost položaja obuhvaćenoga geološkog strukturnog sklopa o regionalnim tektonskim pokretima. Zbog toga je potrebno najprije istaknuti njegove osnovne značajke i upozoriti na strukturno-tektonske odnose koji će biti opisani u nastavku.

2. Recentni geološki strukturni sklop za područje istraživanja

Kao što je već napomenuto, u sklopu predmetnog projekta proveden je i niz geoloških mjerenja, te je kao rezultat izrađen recentni geološki strukturni sklop utemeljen na dugotrajnim geološkim istraživanjima, koji je prikazan na slici 1.



Slika 1. *Recentni geološki strukturalni sklop.*

Najvažniji je položaj strukturalne jedinice Žumberačka gora–Medvednica (1 na slici 1), smjera pružanja SI–JZ, što je neposredna granica između zapadnog i južnog rubnog dijela Panonskog bazena. Jedinice Vukomeričke gorice–Šamarica (2), Dugo Selo–Vrbovec–Moslavačka gora (3) i Savski bazen (4) pripadaju južnom rubnom dijelu Panonskog bazena. Imaju pružanje SZ–JI. Uzročnici tektonske aktivnosti jesu tektonski pokreti koji se događaju u regionalnom prostoru (Prelogović i dr. 1995, Prelogović i Kuk 1998, Tomljenović 2002, Pribičević i dr. 2007a, 2007b). U zaleđu strukturalne jedinice Žumberačka gora–Medvednica (1) prisutna je transpresija prostora. To uključuje kompresiju prostora uz regionalne pomake strukturalna prema istoku, jugoistoku. Ti pomaci stvaraju u čelnom dijelu, pogotovo u Medvednici, izraženu kompresiju prostora uz pojavu potresa relativno velike jakosti. Na slici 1 označeni su samo najjači potresi koji su se dogodili. Međutim neprestana pojava potresa manje jakosti izravno upućuju na stalno prisutnu tektonsku aktivnost (Prelogović i Cvijanović 1981, Kuk i dr. 2000, Prelogović i Kuk 1998).

Unutar strukturnih jedinica razlikuju se pojedine strukture koje su odvojene rasjedima (slika 1). U oblikovanju struktura veliku važnost imaju raspored, položaj i pružanje stijena različite gustoće koje se nalaze u dubini ili dopiru do površine. Osi gravimetrijskih maksimuma pokazuju njihov položaj i pružanje (Zagorac 1974). Na deformacije i pomake dijelova strukturne jedinice Žumberačka gora–Medvednica (1) važan utjecaj ima prostiranje većega kompleksa granitnih stijena unutar jedinice Dugo Selo–Vrbovec–Moslavačka gora (3) koje se kraj Vrbovca nalaze na dubini oko 1 km. U Vukomeričkim goricama (7) u prvim kilometrima dubine rasprostranjeni su paleozojski škrljavci i mezozojski karbonati blizu površine. U Medvednici (1), Mariji Gorici (2) i Humu (3) te stijene nalaze se i na površini (Šikić i dr. 1977). Gravimetrijski minimumi označavaju najspuštenije dijelove Savskog bazena (4) i Stubičkog podbazena (8). Postoje i skokovita uzdizanja i spuštanja pojedinih kompleksa stijena u dubini zbog kompresije prostora. Zone većih skokova predstavljene su gravimetrijskim gradijentima. Oni upućuju na najaktivnije dionice rasjeda (slika 1), koje se pružaju granicom strukturne jedinice Žumberačka gora–Medvednica (1) i posebno strukture Medvednice (1). To upućuje na postojanje znatne kompresije prostora između tih rasjeda izazvane regionalnim tektonskim pokretima.

Zbog tektonskih pokreta u strukturnom sklopu stvara se polje stresa. Orijentacija maksimalnoga kompresijskog stresa je sjever–jug, a lokalnog stresa je promjenljiva. Orijentacija kompresijskog stresa izravno utječe na pomake i deformaciju Medvednice (1) i njezinih dijelova, te ostalih okolnih struktura. Smjerovi pomaka dijelova struktura uz površinu prema geološkim podacima prikazani su na slici 1.

U strukturnom sklopu dominantnu važnost imaju rasjedi. Uvijek su predstavljeni zonama različite širine unutar kojih ima rasjeda istog pružanja. Pojedini rasjedi imaju i ogranke. Osobito aktivni ogranci, te najaktivniji rasjedi koji dijele strukturne blokove posebno su izdvojeni na slici 1.

U seizmotektonski najaktivnijoj strukturnoj jedinici Žumberačka gora–Medvednica (1) izdvajaju se sljedeći rasjedi za koje se navode osnovni podaci koji upućuju na njihovu aktivnost:

- Zagrebački rasjed (1a, 1b), reversni; seizmotektonski najaktivniji,
- Rasjed Brežice–Koprivnica (2a, 2b), reversni,
- Rasjed Bistra–Laz–Bisag (3a, 3b), reversni,
- Rasjed Stubica–Kašina (4a, 4b), promjenljivoga karaktera.

Najvažnijim rasjedima strukturnog sklopa još se pridružuju: rasjed Dugo Selo–Ivanić Grad (5), reversni, Vukomerički rasjed (6), reversni, Pokupski rasjed (7), reversni, i rasjed Sv. Nedelja–Plešivica (8), reversni.

Za odredbu tektonske aktivnosti i uočavanja posljedica te aktivnosti najprije je bilo potrebno izdvojiti amplitude, smjerove i kutove pomaka mjerene u pojedinim geodetskim točkama. Za ocjenu dinamike tektonskih pokreta provedena je interdisciplinarna analiza dobivenih podataka za razdoblje 2009–2015. s podacima iz ranijih razdoblja, posebice razdoblja 2008–2009. godine, što će biti detaljno opisano u nastavku rada.

3. Računanje pomaka iz GPS mjerenja

Sva provedena GPS mjerenja obrađena su na istovjetan način: korištenjem najnovije (10.6) inačice znanstvenog GPS softvera GAMIT/GLOBK, koja je objavljena 15. lipnja 2015. godine.

Svi su podaci mjerenja konvertirani u RINEX format uz pomoć programa “teqc”, koji je razvio međunarodni sveučilišni konzorcij za GPS–UNAVCO, a preporučen je i od MIT-a. Prilikom imenovanja RINEX datoteka primijenjena su sljedeća pravila: prva četiri znaka jednoznačno određuju stajalište (npr. BKVJ), sljedeća tri su znaka broj dana u godini (183), osmi je znak broj sesije (1). Prva dva znaka u ekstenziji označavaju godinu opažanja (15), a treći je ‘o’ (opažanje). Popis četveroslovnih kratica za stajališta s brojevima točaka korištenih u obradi dan je u tablici 1.

Tablica 1. *Kratice naziva točaka Geodinamičke mreže Grada Zagreba.*

Kratica	Broj	Naziv	Kratica	Broj	Naziv
SKRL	1001	Škrlečev breg	MRTR	1022	Turopoljski Markuševac
ZLMG	1002	Zelena magistrala	GRNS	1023	Granešina
SLJM	1003	Sljeme	PRPS	1024	Prepuštovec
KPTL	1004	Kaptolska lugarnica	DSTB	1025	Donja Stubica
LAZZ	1005	Laz	MRGJ	1026	Mirogoj
BLGS	1006	Blaguša	TKRT	1028	Trg kralja Tomislava
PLNN	1007	Planina	BRDV	1029	Brdovec
MRKS	1008	Markuševac	BRZV	1030	Brezovica
SVDH	1009	Sveti Duh	VMLK	1031	Velika Mlaka
GRNC	1010	Goranec	BKVJ	1032	Bukevje
STPN	1011	Stupnik	KPNC	1033	Kupinec
KPKR	1012	Kupinečki Kraljevec	SVMG	1034	Magdalena
SSVT	1013	Sesvete	KPLJ	1035	Kupljenovo
GTSK	1014	Geod. tehnička škola	MDVG	1036	Medvedgrad
INAZ	1015	INA Žitnjak	HRVT	1037	Horvati
PPVC	1016	Popovec	CAOP	1038	GZAOP
LKTC	1017	Laktec	ZZFP	1039	Zavod za fotogrametriju
KRLJ	1018	Kraljevec	KTSS	1043	Katastar Sesvete
SCTR	1019	Ščitarjevo	VKVD	–	Vukovdol
PLES	1020	Pleso	HRTC	–	Hrtić
KLBR	1021	Kalibracijska baza	GPLN	–	Gornja Planina

Precizne efemeride (IGS final) za sve dane kampanja preuzete su s internetskih stranica američkoga nacionalnoga geodetskog servisa (NGS) u SP3 formatu i konvertirane u G-datoteku odgovarajućim modulom u GAMIT-u.

Svi parametri GAMIT-a podešeni su za regionalnu, odnosno lokalnu kampanju. Za ishodišni referentni okvir predmetne geodinamičke mreže izabrane su dvije točke: gradska permanentna GPS stanica CAOP 1038, jer je upravo to najstabilnija točka na području Grada Zagreba i osim toga je i gradska permanentna GPS stanica, te točka ZZFP 1039. Točke ishodišnog okvira također su imale mogućnost relativnog pomaka, ali su se pokazale jako stabilnima. Pomaci svih ostalih točaka u mreži odnose se na vektor između dviju spomenutih točaka. Na taj se način izbjegla mogućnost precjenjivanja pomaka svih točaka u mreži zbog možebitnog pomaka jednog jedinstvenog ishodišta.

Softver se sastoji od više modula od kojih svaki ima točno određenu ulogu: priprema podataka opažanja, generiranje referentnih orbita satelita, računanje reziduala opažanja i parcijalnih derivacija iz geometrijskog modela, otkrivanje ekstremnih vrijednosti (outliers) ili prekida u podacima, te analiza po metodi najmanjih kvadrata. Iako se svaki modul može pokrenuti neovisno, oni su povezani tijekom podataka, posebice pravilima za imenovanje datoteka, tako da je velik dio obrade najbolje izvesti uz pomoć komandnih datoteka (shell scripts ili batch datoteke), koje priređuju važni moduli: MAKEJ i MAKEXP (make experiment) za pripremu podataka odnosno generiranje J, K i X datoteka, tj. datoteke satova satelita, prijavnika i ulaznih podataka za daljnju obradu, te modul FIXDRV (fixed-table driver) za modeliranje, korekciju i procjenu. Međurezultate je uvijek moguće prikazati kako bi se manualno mogli otkloniti problematični podaci (Herring i dr. 2006a, 2006b, 2015a, 2015b).

Standardni postupak podrazumijeva dva prolaza kroz sve faze programa, što je posebno opravdano ako se ne raspolaže dovoljno točnim koordinatama stajališta. Čak i ako su poznate točne apriori koordinate, drugi prolaz je koristan jer omogućuje bolju manipulaciju lošijim podacima te ocjenu kvalitete za svaku stanicu u mreži.

U tablici 2 prikazan je tijek obrade u softverskom paketu GAMIT, od potrebnih ulaznih podataka u pojedine module programa, preko redoslijeda izvršavanja modula pa do izlaznih podataka iz pojedinih modula.

Primarni rezultat obrade mjerenja slobodno je rješenje u obliku H-datoteke koja se sastoji od procijenjenih parametara i odgovarajućih kovarijanci. Takvo se rješenje prosljeđuje programu GLOBK (GLOBal Kalman filter) koji se koristi principom Kalmanova filtriranja za dobivanje rezultata (Herring i dr. 1990).

Uloga GLOBK programa je kombiniranje podataka iz više sesija (dana) radi dobivanja položaja i brzina opažanih točaka, kao i parametara orbita satelita i Zemljine rotacije.

GAMIT (program *solve*) uključuje težinski algoritam najmanjih kvadrata koji procjenjuje relativne položaje skupa stanica, orbitalne i parametre rotacije Zemlje, zenitna kašnjenja i fazne neodređenosti tako da ih podešava prema dvostrukim razlikama faza opažanja. Budući da je funkcionalni (matematički) model koji se odnosi na opažanja i parametre nelinearan, GAMIT producira dva rješenja: prvo za dobivanje koordinata unutar nekoliko decimetara, a drugo kako bi se dobile konačne procjene (Herring i dr. 2006b, 2015b).

Tablica 2. *Tablični prikaz tijeka obrade u GAMIT-u.*

Modul	INPUT	OUTPUT
(1) Generiranje referentnih orbita za satelite		
NGSTOT	SP3 datoteka (Zemaljski fiksirane efemeride)	T-datoteka (Zemaljski fiksirane tablične efemeride) G-datoteka (inicijalni orbitalni uvjeti)
ARC	arc.bat G-datoteka (inicijalni orbitalni uvjeti)	T-datoteka (inercijalne tablične efemeride) G-datoteka (interpolacija iz inercijalne T-datoteke)
ORBFIT	T-datoteka (inercijalne tablične efemeride)	G-datoteka
(2) Pripremanje podataka za procesiranje		
MAKEXP	RINEX datoteke Station.info (antena, prijamnik visina, info.)	D-datoteka (FIXDRV ulazna datoteka) Session.info Ulazna batch datoteka za MAKEX, MAKEJ
MAKEJ	RINEX nav datoteka	J-datoteka (datoteka sata satelita)
MAKEX	RINEX datoteke Station.info Session.info RINEX nav datoteka J-datoteka (datoteka sata satelita) L-datoteka (inicijalne koordinate točaka)	K-datoteka (sat prijamnika) X-datoteka (ulazna mjerenja)
FIXDRV	D-datoteka (definira input i output) sestbl. (kontrola sesije) sittbl. (kontrola točaka) T, J, L, X input	B-datoteka (bexpy.bat; primarna batch datoteka) B-datoteka (bexpy.nnn; sekundarna batch datoteka) I-datoteka (polinomi sata prijamnika)
(3) Računanje reziduala i parcijalnih mjerenja derivacija		
MODEL	L-datoteka (inicijalne koordinate točaka) station.info (antena, prijamnik, visina, info.) X,T,I,J	C-datoteka (računata mjerenja, parcijalne derivacije)
(4) Detektiranje anomalija i cycle-slipova u podacima		
AUTOCLN	C-datoteka	C-datoteka (očišćena)
(5) Provođenje analize po metodi najmanjih kvadrata za procjenu položaja seta točaka		
SOLVE	M-datoteka (kontrolno spajanje podataka) C-datoteka (podaci)	Q-datoteka (sadrži zapis analize) H-datoteka (labavo ograničena rješenja) G,L (update)

U trenutačnoj praksi, GAMIT rješenje obično se ne upotrebljava izravno za dobivanje konačne procjene položaja točaka iz mjerenja već za produciranje procjene i pridružene matrice kovarijanci (“kvazi opažanja”) pozicija točaka i (eventualno) orbitalne i parametre rotacije Zemlje koji su potom ulazi za GLOBK ili druge slične programe za kombiniranje podataka s onima iz drugih mreža i vremena za procjenu pozicije i brzine (Feigl i dr. 1993, Dong i dr. 1998). GLOBK se koristi Kalman filtrom (ekvivalent sekvencijalnim najmanjim kvadratima ako ne postoje stohastički parametri u rješenju) koji radi s matricama kovarijance, a ne s normalnim jednadžbama i stoga zahtijeva da se navede nebeskonačno apriori ograničenje za svaki procijenjeni parametar (vidi npr. Herring i dr. 1990). Kako se ne bi utjecalo na njihovu kombinaciju, GAMIT generira rješenje kojim se koristi GLOBK uz labava ograničenja parametara. Fazne neodređenosti treba riješiti (ako je moguće) pri obradi faze, međutim, GAMIT također stvara nekoliko međurješenja s korisnički definiranim ograničenjima prije popuštanja ograničenja za svoje konačno rješenje. Ovi koraci detaljno su opisani u Herring i dr. (2006b, 2015b) i Dong i dr. (1998).

3.1. Određivanje pomaka za razdoblje 2008–2009.

Za obradu mjerenja odnosno određivanje pomaka korištena je, kao i za prije provedene GPS mjerne kampanje, najnovija inačica 10.6 GAMIT/GLOBK znanstvenog softvera za obradu GPS mjerenja i određivanje brzina uzrokovanih tektonskim pomacima na točkama mjerenja iz vremenski pomaknutih serija mjerenja.

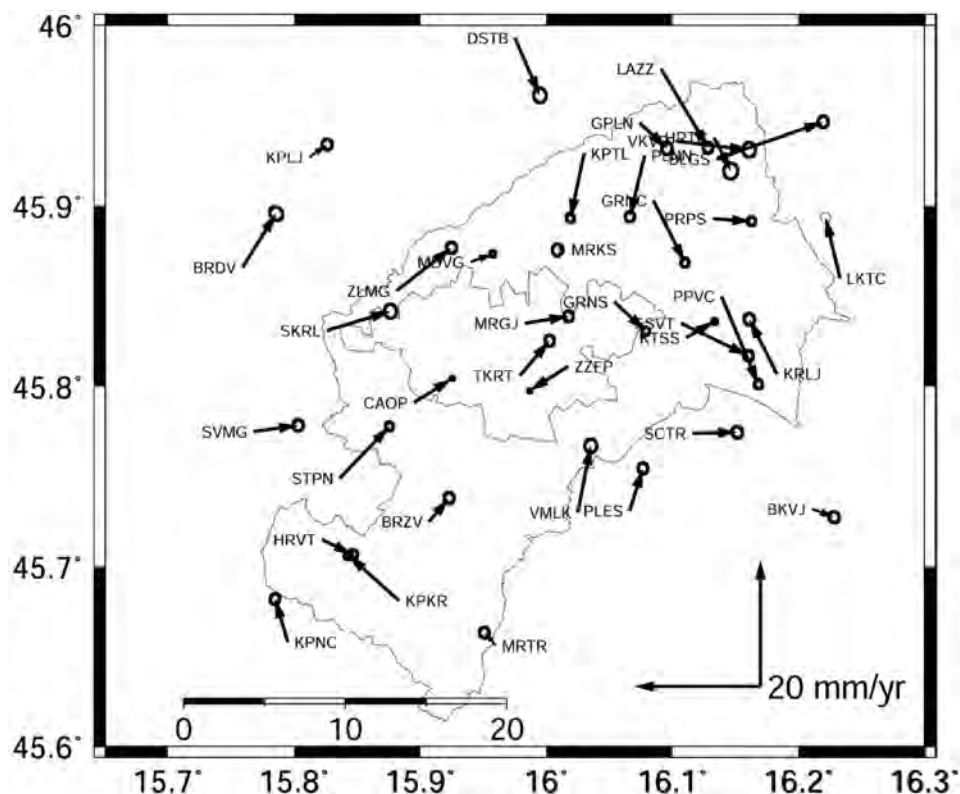
Tablica 3. *Statistički prikaz apsolutnih vrijednosti godišnjih brzina za razdoblje 2008–2009. godine.*

	vφ [mm/god.]	vλ [mm/god.]	vhor [mm/god.]	vh [mm/god.]
min	0,09	1,22	1,22	0,68
max	13,96	16,94	17,93	45,81
avg	5,39	5,42	8,36	15,03

Na slici 2 prikazani su vektori brzina na točkama geodinamičke mreže za razdoblje 2008–2009. godine s pripadnim elipsama pogrešaka. Prikazi brzina izrađeni su s pomoću softverskog paketa Generic Mapping Tools (Wessel i Smith 2004). Statistički prikaz apsolutnih vrijednosti godišnjih brzina za razdoblje 2008–2009. godine prikazan je u tablici 3. Na slici 2 te iz vrijednosti navedenih u tablici 3 evidentno je da je riječ o razdoblju s povećanom tektonskom aktivnošću.

3.2. Određivanje pomaka za razdoblje 2009–2015.

Kako bi se dobio model brzina pomaka točaka Geodinamičke mreže Grada Zagreba za razdoblje od 2009. do 2015. godine, u daljnjoj obradi podataka bilo je potrebno kombinirati prije dobivena rješenja kampanje iz 2009. i 2015. godine.



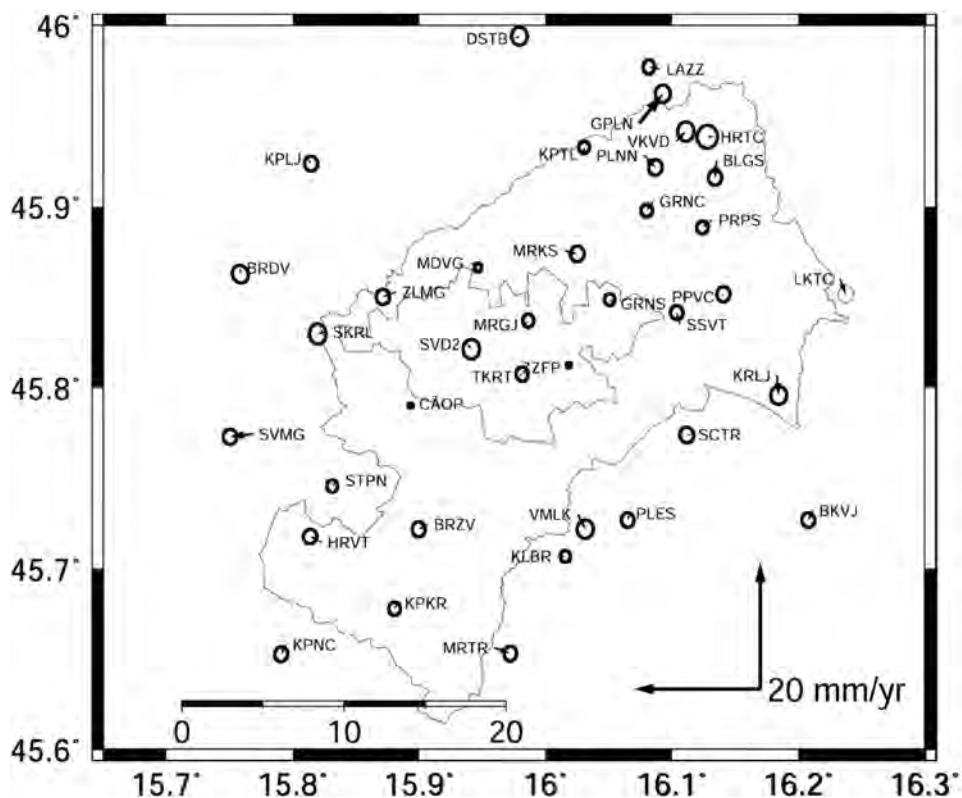
Slika 2. Vektori brzina na točkama Geodinamičke mreže za razdoblje 2008–2009. godine.

Brzine točaka izračunate su uz pomoć modula GLOBK, dakle polje brzina izračunato je prema posebnom modelu računskim postupkom Kalmanova filtriranja (Reilinger i dr. 2006, Dong i dr. 1998, McClusky i dr. 2000, Davies i Blewitt 2000, Lavallee i dr. 2001). Brzine su izražene u milimetrima na godinu (mm/god.). Također je izračunata i magnituda ukupnog prostornog vektora pomaka u sve tri dimenzije.

Dakle, u modul GLOBK uvrštena su rješenja kampanje iz 2009. i 2015. godine kako bi se dobile godišnje brzine točaka Geodinamičke mreže za to razdoblje, koje su prikazane na slici 3. U tablici 4 dan je statistički prikaz apsolutnih vrijednosti godišnjih brzina točaka mreže za razdoblje 2009–2015. godine.

Tablica 4. Statistički prikaz apsolutnih vrijednosti godišnjih brzina za razdoblje 2009–2015. godine.

	vφ [mm/god.]	vλ [mm/god.]	vhor [mm/god.]	vh [mm/god.]
min	0,01	0,02	0,45	0,05
max	3,70	4,67	5,96	22,97
avg	1,10	1,10	1,72	5,17



Slika 3. Vektori brzina pomaka za razdoblje 2009–2015.

Još jedna od prednosti znanstvenog softvera GAMIT/GLOBK za obradu GPS mjerenja njegova je modularnost i sposobnost prilagođavanja pojedinim slučajevima i drugim open source programima, kao što je GMT (Generic Mapping Tools) (Wessel i Smith 2004).

Za uspješno korištenje GMT-a potrebno je poznavanje “shell” skriptiranja i osnovnih Unix naredbi, te su za dobivanje potrebnih prikaza i analiza rezultata korištene “shell” skripte koje objedinjuju GMT i GAMIT module.

“Shplotvel” skripta jedna je od važnijih skripti koja se koristi GMT alatima, a primjenjuje se na izlazne GLOBK datoteke s rezultatima i omogućuje iscrtavanje prikaza dobivenih vektora brzina na pojedinim točkama mreže skupa s pripadnim elipsama pogrešaka u zadanom mjerilu (Herring i dr. 2006a, 2006b, 2015a, 2015b). Budući da je riječ o shell skriptiranju, također je moguće uz navedene vektore brzina kombinirati i granice Grada Zagreba, digitalni model reljefa i razne druge podloge koje pomažu u jasnijem prikazu i boljoj analizi dobivenih rezultata.

U tablici 5 dan je prikaz vrijednosti godišnjih brzina točaka mreže za razdoblje 2009–2015. godine. Za svaku točku mreže prikazane su brzine u smjeru sjever–jug, istok–zapad te posebno vertikalna komponenta. Također je određen i horizontalni i prostorni vektor brzine za koji su dani i azimut i vertikalni kut koji imaju veliku važnost za kvalitetnu interdisciplinarnu analizu.

Tablica 5. Prikaz vrijednosti izračunatih godišnjih brzina na točkama Geodinamičke mreže za razdoblje 2009–2015.

Točka	Long. [°]	Lat. [°]	vN [mm/ god]	vE [mm/ god]	vH [mm/ god]	v_horiz [mm/ god]	v_prostor [mm/ god]	Azimut [°]	Verti- kalni kut [°]
BKVJ	16,21141	45,73230	-0,69	-1,55	7,56	1,7	7,7	246,0	77,35
BLGS	16,13530	45,92571	-0,22	-2,78	-1,04	2,8	3,0	265,5	-20,45
BRDV	15,75851	45,86620	-0,01	-0,99	-5,42	1,0	5,5	269,4	-79,65
BRZV	15,90652	45,72470	-1,38	-0,83	10	1,6	10,1	211,0	80,85
CAOP*	15,89491	45,79124	-0,31	-0,33	3,84	0,5	3,9	226,8	83,28
DSTB	15,97528	45,99288	0,8	0,32	-2,54	0,9	2,7	21,8	-71,26
GPLN	16,07426	45,94598	3,7	4,67	-11,51	6,0	13,0	51,6	-62,63
GRNC	16,08497	45,90307	-0,98	-1,49	-6,83	1,8	7,1	236,7	-75,37
GRNS	16,05438	45,84655	-0,73	0,6	-3,65	0,9	3,8	140,6	-75,49
HRTC	16,13332	45,93845	-1,05	0,02	-0,49	1,1	1,2	178,9	-25,01
HRVT	15,82245	45,71470	-1,75	0,89	8,23	2,0	8,5	153,0	76,58
KLBR	16,00970	45,70697	1,2	-0,07	0,86	1,2	1,5	356,7	35,58
KPKR	15,88319	45,68086	-0,53	-0,9	6,7	1,0	6,8	239,5	81,14
KPLJ	15,81184	45,92653	0,52	-0,78	0,22	0,9	1,0	303,7	13,21
KPNC	15,79474	45,65799	-0,79	-1,54	6,43	1,7	6,7	242,8	74,93
KPTL	16,03042	45,92909	0,02	1,05	-5,42	1,1	5,5	88,9	-79,03
KRLJ	16,18323	45,80683	0,26	-3,16	0,49	3,2	3,2	274,7	8,79
LAZZ	16,09058	45,97594	-1,76	0,34	2,61	1,8	3,2	169,1	55,52
LKTC	16,23299	45,86035	0,92	-2,5	0,85	2,7	2,8	290,2	17,70
MDVG	15,94044	45,86908	1,22	-0,77	-0,05	1,4	1,4	327,7	-1,98
MRGJ	15,98343	45,83506	0,58	0,55	-5,13	0,8	5,2	43,5	-81,14
MRKS	16,01490	45,87583	2,04	-0,54	0,32	2,1	2,1	345,2	8,62
MRTR	15,95959	45,65622	2,48	-0,93	13,74	2,6	14,0	339,4	79,09
PLES	16,06627	45,73066	-0,25	-1,08	-2,13	1,1	2,4	257,0	-62,51
PLNN	16,07798	45,92836	1,8	-1,94	-5,49	2,6	6,1	312,9	-64,26
PPVC	16,13879	45,85029	0,39	0,39	-1,59	0,6	1,7	45,0	-70,87
PRPS	16,13168	45,89270	-1,49	-1,2	-0,48	1,9	2,0	218,8	-14,08
SCTR	16,11589	45,77443	-0,82	-0,12	3,63	0,8	3,7	188,3	77,14
SKRL	15,82647	45,83092	-1,35	-0,33	14,56	1,4	14,6	193,7	84,55
SSVT	16,10654	45,83485	-0,52	1,89	-4,28	2,0	4,7	105,4	-65,39
STPN	15,83637	45,74894	-1,04	-0,9	6,9	1,4	7,0	220,9	78,73
SVD2	15,93755	45,82420	0,75	-0,83	-3,67	1,1	3,8	312,1	-73,05
SVMG	15,76812	45,77457	-3,55	-0,45	16,37	3,6	16,8	187,2	77,67
TKRT	15,97869	45,80619	0,54	0,38	-4,32	0,7	4,4	35,1	-81,31
VKVD	16,10349	45,93614	1,51	1,54	-1,94	2,2	2,9	45,6	-41,97
VMLK	16,02548	45,73023	1,19	-2,37	-3,07	2,7	4,1	296,7	-49,18
ZLMG	15,88132	45,85281	-2,01	-0,75	22,97	2,1	23,1	200,5	84,66
ZZFP*	16,01704	45,81117	0,32	0,33	-3,45	0,5	3,5	45,9	-82,41

4. Interdisciplinarna analiza pomaka

Za određivanje tektonske aktivnosti i uočavanje posljedica te aktivnosti najprije je bilo potrebno izdvojiti amplitude, smjerove i kutove pomaka mjerene na pojedinim geodinamičkim točkama. Za ocjenu dinamike tektonskih pokreta dodatno su se usporedili dobiveni podaci s podacima iz ranijih razdoblja, posebice razdoblja 2008–2009. godine.

Sumarne amplitude tektonskih pokreta za promatrano, relativno dugotrajno razdoblje (2009–2015) promjenljive su i iskazane u mm (slika 5). Uočava se da su dobivene vrijednosti amplituda pomaka relativno male. To je znak da su se u razmatranom razdoblju događale promjene u intenzitetu tektonske aktivnosti. Ipak, dobivene su sumarne vrijednosti amplituda koje omogućavaju izdvajanje najaktivnijih dijelova strukturnog sklopa. Najveće amplitude tektonskih pomaka upućuju na aktivnost zapadnog dijela Medvednice (1) i prostora između Sljemena (1) i Zelinske gore (2), te posebno oko Sv. Nedelje (4) i u Vukomeričkim goricama (7). Ističu se točke mjerenja s utvrđenim amplitudama pomaka: ZLMG sjeverno od Gornjeg Vrapča 23,1 mm, GPLN u Gornjoj Planini 13,0 mm, SVMG u Sv. Nedelji 16,8 mm i MRTR u Vukomeričkim goricama 14,0 mm. Dobivene vrijednosti amplituda 6,0 mm na slici 4 ističu najaktivnije dijelove strukturnog sklopa, osobito Vukomeričke gorice (7) te središnji i zapadni dio Medvednice (1). Najaktivniji su rasjedi Bistra–Laz–Bisag (3), Vukomerički rasjed (6) i rasjed Sv. Nedelja–Plešivica (8). Posebno se uočava mala aktivnost dijela Zagrebačkog rasjeda (1).

Za uočavanje razmatrane tektonske aktivnosti i ovisnosti položaja obuhvaćenog područja o regionalnim tektonskim pokretima potrebno je istaknuti i dobivene spoznaje iz ranijih razdoblja. Na slici 4 iz razdoblja 2008–2009. godine razabire se povećana aktivnost u dijelu zone Zagrebačkog rasjeda (1) i posebice u zapadnom dijelu Medvednice (1) i u Vukomeričkim goricama (7). Potonje je istaknuto i u razmatranom razdoblju. Maksimumi su mjereni u točkama: ZLMG, sjeverno od Gornjeg Vrapča 40,13 mm/god. i u MRTR u Vukomeričkim goricama 45,81 mm/god. U ranijim razdobljima razlike su naglašenije (Đapo 2009). Primjerice, u razdoblju 2006–2007. godine općenito se bilježi veća aktivnost osobito u zonama Zagrebačkog rasjeda (1) i rasjeda Stubica–Kašina (4) između 19,7 mm/god. (Markuševac) i 50,5 mm/god. (Gornja Planina). U razdoblju 2007–2008. godine tektonska aktivnost se smiruje. Samo u točki SSTV (Sesvete) zabilježena je amplituda pomaka 24,1 mm/god. U zoni Zagrebačkog rasjeda (1) zabilježene su amplitude pomaka iznad 10 mm/god.

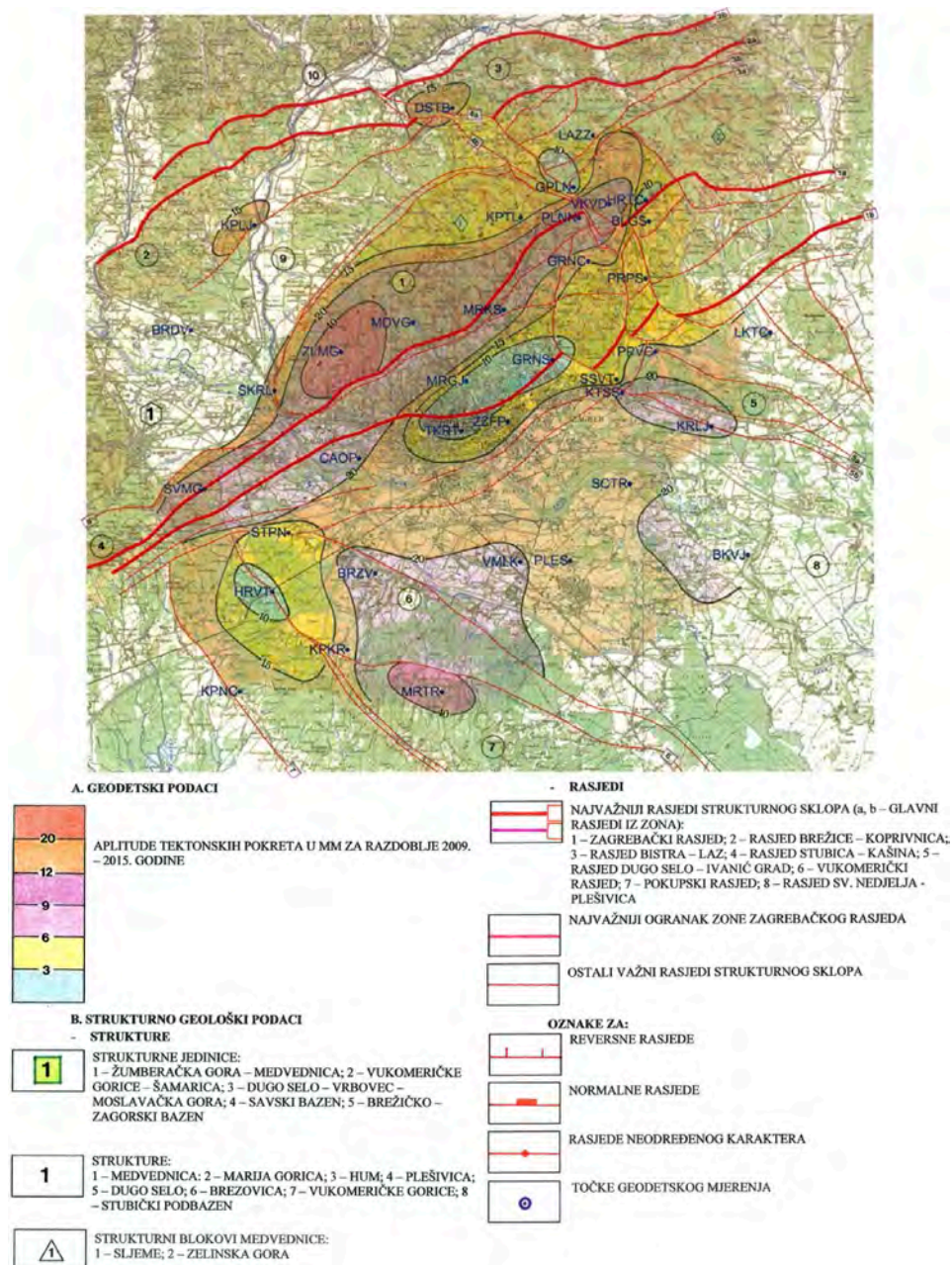
Za cjelovito određivanje tektonske aktivnosti te osobito uočavanja deformacija i pomicanja dijelova struktura važni su dobiveni smjerovi i kutovi nagiba pomaka na pojedinim točkama geodinamičke mreže (slika 6). Potrebno je istaknuti dvije činjenice: promjenljivost smjerova pomaka te stalna prisutnost dijagonalnih pomaka u prostoru, koji su pozitivni (uzdizanje) ili negativni (spuštanje). Strmi kutovi pomaka iznad 70° nabolje pokazuju prostore prevladavajuće kompresije. Izdvajaju se Vukomeričke gorice (7), zapadni dio Medvednice (1) i zona Zagrebačkog rasjeda (1). Uočavaju se i strmi pomaci u točkama u krilima rasjeda Stubica–Kašina (4), u strukturi Dugo Selo (5) i unutar Savskog bazena (4) između Ščitarjeva i Bukovja. Potonje upućuje na suženje prostora bazena i uzdizanje reljefa.

Na temelju mjerenja na pojedinim geodinamičkim točkama, na slici 6 prikazani su i srednji smjerovi pomaka dijelova geološkoga strukturnog sklopa. Oni najbolje pokazuju osnovne pomake struktura. Suprotni smjerovi pomaka na kraćem razmaku izravno označavaju prostore veće kompresije i najaktivnije zone rasjeda npr. u Vukomeričkim goricama (7), zapadnom dijelu Medvednice (1) i široj okolici Sessveta. Također se uočavaju promjenljivi smjerovi pomaka. Pojedini nizovi upućuju na retrogradnu rotaciju dijelova strukturnog sklopa. Uočljiv je niz srednjih smjerova pomaka prema JZ, J i JI u zapadnim dijelovima Medvednice (1) i Vukomeričkim goricama (7), zatim smjerovi pomaka prema JZ i J između Kašine i Sessveta koji su vjerojatno uvjetovani pomacima Zelinske gore (2), te djelomice u Medvednici (1) prema S između Zagreba i Bistre.

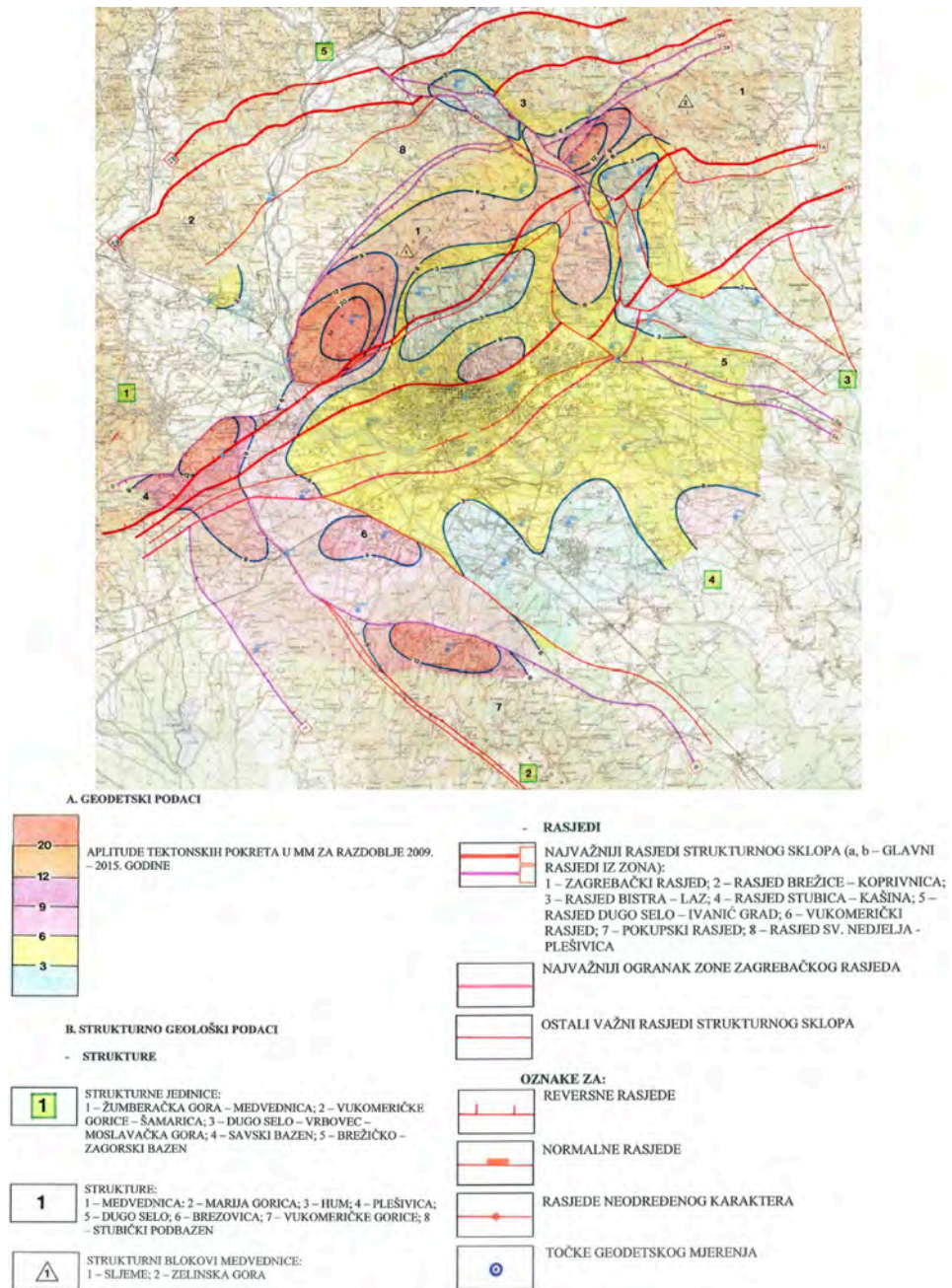
Na temelju dobivenih podataka o amplitudama tektonskih pokreta, smjerovima i dodatno nagibima pomaka izdvojeni su na slici 7 prostori najveće kompresije. Ističu se označeni prostori u Medvednici (1) i Vukomeričkim goricama (7). U tim prostorima događaju se i strmi pomaci točaka i suženje prostora uz isticanje najaktivnijih dionica rasjeda. Prevladavajuća horizontalna komponenta pomaka primjerice između Kašine, Prepuštovca i Popovca posljedica je pomaka Zelinske gore (2) duž zone rasjeda Stubica–Kašina (4). Još treba istaknuti granicu između prevladavajućih pozitivnih (uzdizanje) i negativnih (spuštanje) pomaka dijelova geološkoga strukturnog sklopa. Spuštanje dijelova Medvednice (1) oko zona Zagrebačkog rasjeda (1) i rasjeda Stubica–Kašina (4) pokazuje da se rotacija dijelova Medvednice (1) vjerojatno događa oko koso nagnute osi u prostoru.

Također je izrađena interdisciplinarna analiza dinamike u obuhvaćenom geološkom strukturnom sklopu između razdoblja 2008–2009. godine i 2009–2015. godine (slika 8). Najprije se naglašava nekoliko bitnih činjenica. U svim točkama u oba razdoblja ustanovljeni su različiti smjerovi pomaka. Očito je to posljedica različitih pomaka dijelova struktura i utjecaja regionalnih tektonskih pokreta. Pritom je u pojedinim točkama zadržan trend uzdizanja npr. u LAZZ, HRTC (oko Kašine), HRVT i KPNC (Vukomeričke gorice). Stalno spuštanje postoji u točkama GPIN, VKVD, GRNC, PLNN i PRPS oko zone rasjeda Stubica–Kašina (4), u GRNS u zoni Zagrebačkog rasjeda (1b), u PLES i VMLK u Savskom bazenu (4). Posebno se izdvajaju točke s gotovo istim smjerovima pomaka, npr. HRVT i MRTR u Vukomeričkim goricama (7), HRTC i LAZZ u zapadnom dijelu Zelinske gore (2) te MRGJ, GRNS i TKRT oko zone Zagrebačkog rasjeda (1b). Još su važni srednji pomaci dijelova strukturnog sklopa, primjerice: prema JJI i JI u Medvednici (1) i uz zonu rasjeda Stubica–Kašina (4). Oko Brezovice i Sv. Nedelje te u Savskom bazenu (4) srednji pomaci su prema I i SI, a u Vukomeričkim goricama (7) i kod Dugog Sela (5) prema JZ. Srednji smjerovi pomaka u Medvednici (1) te oko Sv. Nedelje podudaraju se sa smjerom regionalnih tektonskih pokreta. Smjerovi prema SZ upućuju na postojanje odupiranja tim pomacima koji ovise o položajima kompleksa stijena veće gustoće u dubini. Time se povećava kompresija prostora. Konture tih prostora u razdobljima 2008–2009. i 2009–2015. godine uglavnom se podudaraju (slika 8). Osobito se ističu označeni prostori u Vukomeričkim goricama (7), u Medvednici (1), oko Dugog Sela (5), te posebno u zonama Zagrebačkog rasjeda (1) i rasjeda Stubica–Kašina (4).

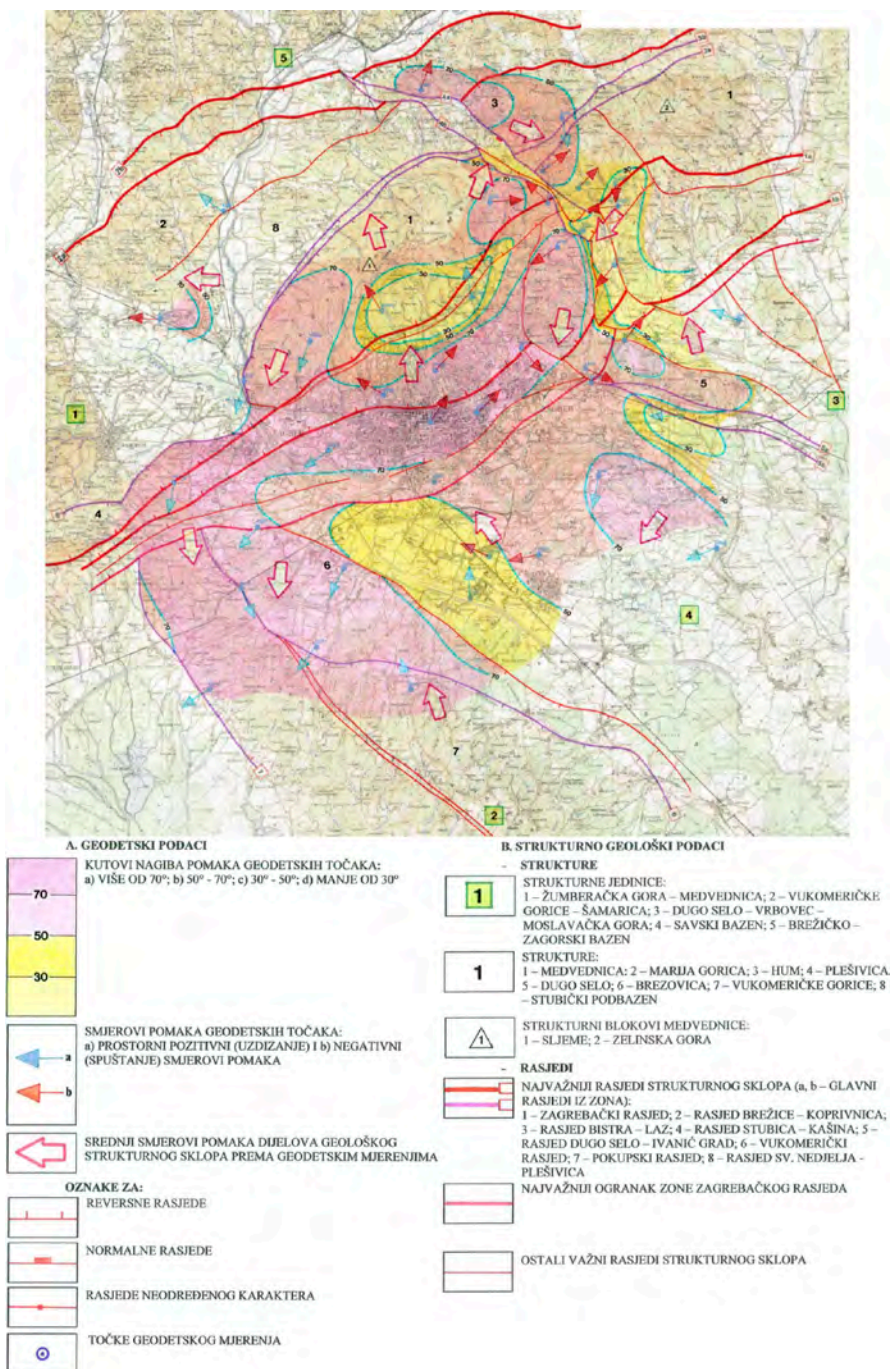
Kompresiju prostora i stalnu tektonsku aktivnost prate pojave potresa (slika 8). U razdoblju 2009–2015. godine dogodilo se 14 potresa magnitude do 3,2 MCS. Svi su povezani s izdvojenim prostorima veće kompresije i zonama rasjeda. U



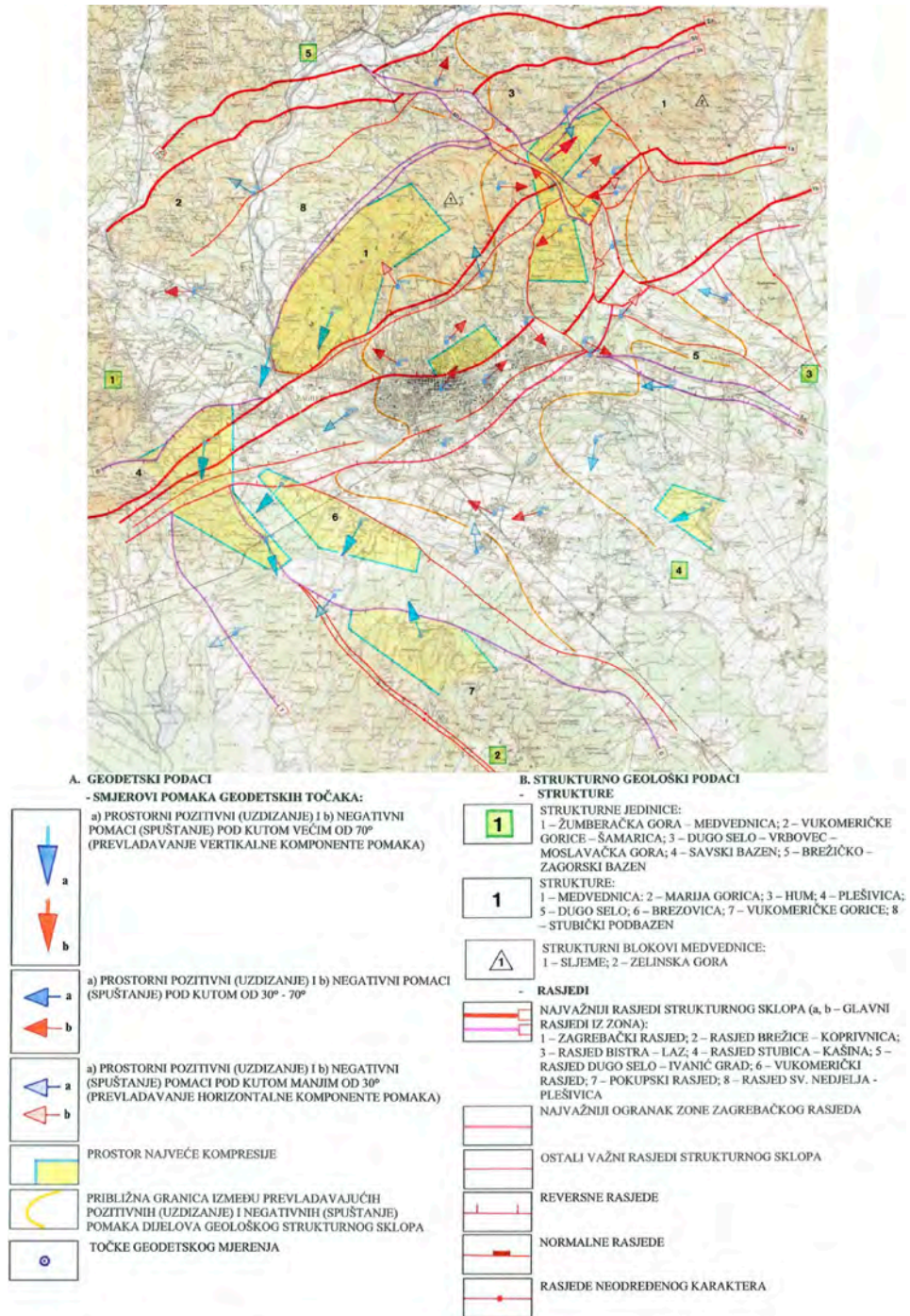
Slika 4. Vrijednosti amplituda tektonskih pomaka u razdoblju 2008–2009. godine.



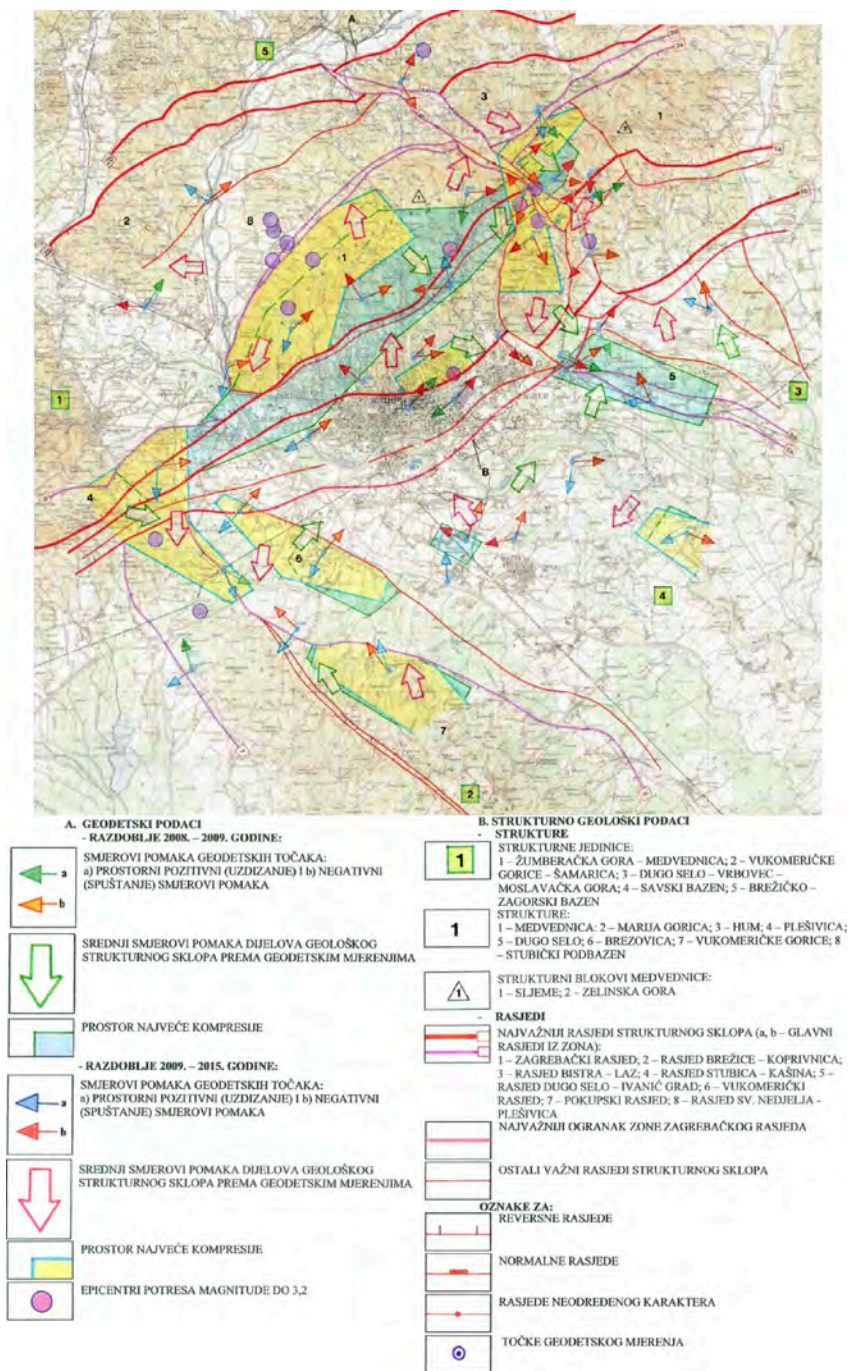
Slika 5. Amplitude tektonskih pokreta na temelju geodetskih podataka za razdoblje 2009–2015. godine.



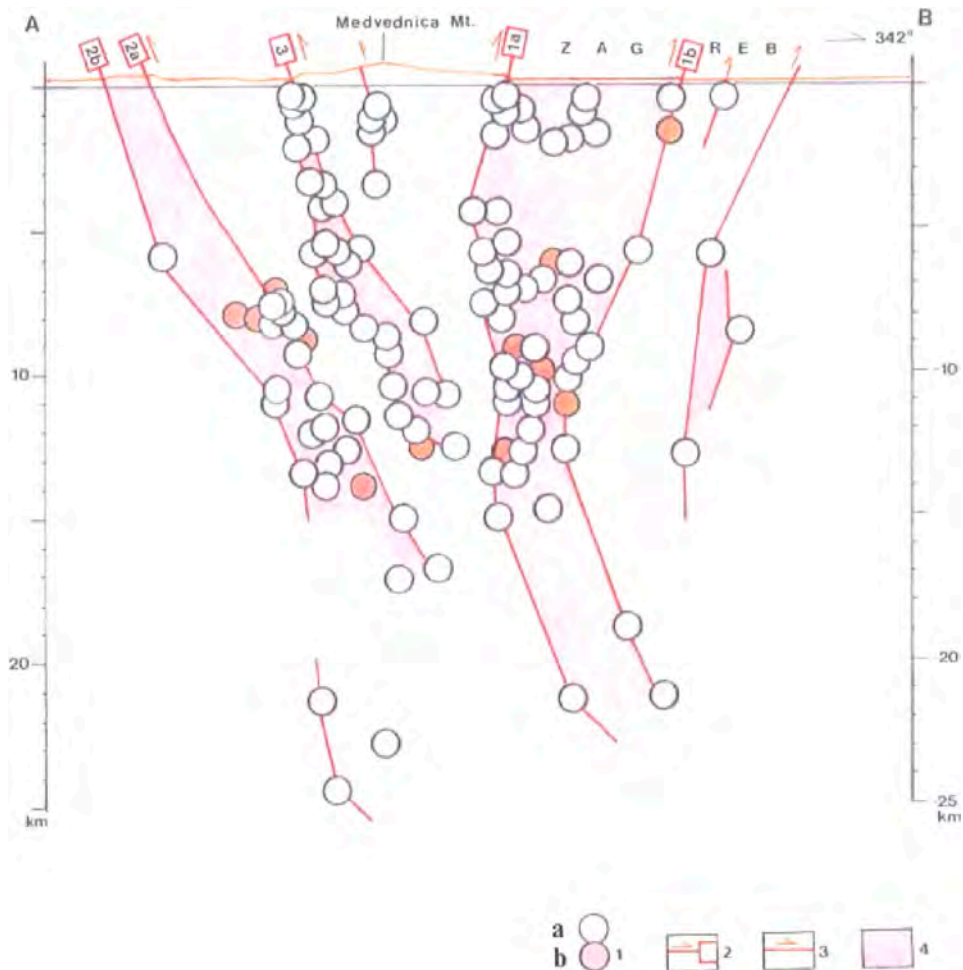
Slika 6. Kutovi nagiba i smjerovi tektonskih pokreta na temelju geodetskih podataka za razdoblje 2009–2015. godine.



Slika 7. Dinamika geološkoga strukturnog sklopa u razdoblju 2009–2015. godine.



Slika 8. Usporedba dinamike geološkoga strukturnog sklopa između razdoblja 2008–2009. i 2009–2015. godine.



Legenda:

- 1 Žarišta potresa koji su se dogodili:
 - a) u razdoblju 1997–2009. godine magnitude do 3,5
 - b) u razdoblju 2009–2015. godine magnitude do 3,2
- 2 Najvažniji rasjedi granični strukturnoj jedinici Žumberačka gora–Medvednica: Zagrebački rasjed (1), rasjed Brežice–Koprivnica (2) i rasjed Bistra–Laz–Bisag (3)
- 3 Ostali aktivni rasjedi
- 4 Seismotektonski aktivna zona u prostoru

Slika 9. Seismotektonski profil A–B.

seismotektonskom profilu A–B prikazana su žarišta potresa u prostoru koji su se dogodili u razdobljima 1997–2009. godine i 2009–2015. godine (slika 9). Seismotektonski aktivne zone izravno se povezuju s najaktivnijim zonama Zagrebačkog rasjeda (1), rasjeda Brežice–Koprivnica (2) i rasjeda Bistra–Laz–Bisag (3). Pojedini potresi događaju se i u prostoru sučeljavanja Zagrebačkog rasjeda (1) i rasjeda Stubica–Kašina (4).

5. Zaključak

Predmetna interdisciplinarna geodinamička istraživanja provedena su u razdoblju od 18 godina i potvrđuju stalno prisutnu tektonsku aktivnost u obuhvaćenom širem prostoru oko Medvednice. Geodinamička mreža projektirana je i uspostavljena 1997. godine s početne ukupno 43 specijalno stabilizirane točke, tako da najbolje reprezentiraju geodinamička događanja na području istraživanja. Za potrebe ovog rada obrada svih provedenih GPS mjerenja izvedena je na istovjetan način: korištenjem najnovije (10.6) inačice znanstvenog GPS softvera GAMIT/GLOBK, koja je objavljena 15. lipnja 2015. godine. Od uspostave geodinamičke mreže do sada je izvedeno i obrađeno 10 GPS kampanja: 1997., 2001., 2003., 2004., 2005., 2006., 2007., 2008., 2009. i 2015. godine. Nažalost, nije bio uspostavljen kontinuitet godišnjeg izvođenja mjernih kampanja, a najveći vremenski razmak koji je iznosio 6 godina, bio je između posljednjih dviju kampanja. U radu je provedena interdisciplinarna analiza rezultata dobivenih u razdoblju 2008–2009. i 2009–2015. godine zbog njihova različita vremenskog razmaka koji je iznosio jednu godinu (2008–2009), odnosno šest godina (2009–2015). Naime, za razdoblje 2009–2015. utvrđena je aktivnost geološkoga strukturnog sklopa u relativno dužem vremenskom razdoblju, pa se detaljne promjene i oscilacije aktivnosti te godišnje promjene smjera tektonskih pomaka nisu mogle odrediti.

U razdoblju 2008–2009. godine pomaci na geodinamičkim točkama pokazuju povećanje tektonske aktivnosti. Osobito je aktivna zona Zagrebačkog rasjeda (1), i to na čitavoj dužini između Sv. Magdalene i Planine, zatim u Vukomeričkim goricama duž dionice Vukomeričkog rasjeda (6), te unutar Savskog bazena (8). Maksimumi su mjereni u točkama: ZLMG (sjeverno od Gornjeg Vrapča) 40,13 mm/god, MRTR (Vukomeričke gorice) 45,81 mm/god, BKVJ (Bukevje na Šavi) 39,37 mm/god, MDVG (Medvedgrad) 36,59 mm/god, SVMG (Sv. Magdalena) 27,08 mm/god, BRZV (Brezovica) 26,95 mm/god, VKVD (Vukovdol) 27,08 mm/god i MRKS (Markuševac) 21,83 mm/god.

U razdoblju 2009–2015. godine dobivene su vrijednosti pomaka relativno male. To je znak da su se u razmatranom razdoblju događale promjene u intenzitetu tektonske aktivnosti. Najveće amplitude tektonskih pomaka upućuju na aktivnost zapadnog dijela Medvednice (1) i prostora između Sljemena (1) i Zelinske gore (2), te posebno oko Sv. Nedelje (4) i u Vukomeričkim goricama (7). Ističu se točke mjerenja s utvrđenim amplitudama pomaka: ZLMG sjeverno od Gornjeg Vrapča 23,1 mm, GPLN u Gornjoj Planini 13,0 mm, SVMG u Sv. Nedelji 16,8 mm i MRTR u Vukomeričkim goricama 14,0 mm.

Iz provedene je interdisciplinarnе analize razvidno da je s obzirom na dugo razdoblje između dviju GPS kampanja (2009–2015) došlo do znatnog smanjenja amplitude pomaka.

Još jednom se pokazalo da je nužno provođenje GPS kampanja u vremenskim intervalima od maksimalno jedne godine kako bi se izbjegla vremenska interpolacija rezultata. Naime, u slučaju višegodišnjih vremenskih razmaka između GPS kampanja dolazi do usrednjavanja pomaka te se zapravo izgube pomaci na godišnjoj razini koji su iznimno vrijedni podaci potrebni za kvalitetnu analizu i razumijevanje mehanizma strukturnog sklopa šireg zagrebačkog područja.

ZAHVALA. Autori zahvaljuju prof. dr. sc. Eduardu Prelogoviću, redovitom profesoru Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u miru, na sudjelovanju i velikom doprinosu u svim fazama predmetnih istraživanja od njihova početka.

Literatura

- Davies, P., Blewitt, G. (2000): Methodology for global geodetic time series estimation: A new tool for geodynamics, *Journ. Geophys. Res.*, 105, 11, 11083–11100.
- Dong, D., Herring, T., King, R. (1998): Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data, *Journal of Geodesy*, 72, 4, 200–214.
- Dapo, A. (2009): Korelacija geodetskog i geološkog modela tektonskih pomaka na primjeru šireg područja Grada Zagreba, doktorski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Dapo, A., Pribičević, B., Medak, D., Prelogović, E. (2009): Correlation between Geodetic and Geological Models in the Geodynamic Network of the City of Zagreb, *Reports on geodesy*, 86, 1, 115–122.
- Feigl, K. L., Duncan, C. A., Bock, Y., Dong, D., Donnellan, A., Hager, H. B., Herring, T. A., Jackson, D. D., Jordan, T. H., King, R. W., Larsen, S., Larson, K. M., Murray, M. H., Shen, Z., Webb, F. H. (1993): Space geodetic measurement of crustal deformation in central and southern California 1984–1992, *J. Geophys. Res.*, 98, 21677–21712.
- Gerasimenko, M. D., Shestakov, N. V., Teruyuki, K. (2000): On optimal geodetic network design for fault-mechanics studies, *Earth Planets Space*, Vol. 52.
- Herak, D., Herak, M., Tomljenović, B. (2009): Seismicity and earthquake focal mechanisms in North-Western Croatia, *Tectonophysics*, 485, 212–220.
- Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, K., Marie, K., Markušić, S., Sović, I. (2011): Seismic hazard maps of Croatia, *Geophysical Challenges of the 21st century Zagreb*, poster, Zagreb, Croatia.
- Herring, T., Davis, J., Shapiro, I. (1990): Geodesy by radio astronomy: the application of Kalman filtering to Very Long Baseline Interferometry, *J. Geophys. Res.*, 95, 12561–12581.
- Herring, T., King, R., McClusky, S. (2006a): Documentation for the MIT Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program: GLOBK 10.3, Cambridge.
- Herring, T., King, R., McClusky, S. (2006b): Documentation for the MIT GPS analysis software: GAMIT 10.3, Cambridge.
- Herring, T. A., King, R. W., Floyd, M. A., McClusky, S. C. (2015a): Introduction to GAMIT/GLOBK, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology.
- Herring, T. A., King, R. W., Floyd, M. A., McClusky, S. C. (2015b): GAMIT – GPS Analysis at MIT, Reference Manual 10.6, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology.
- Kuk, V., Prelogović, E., Sović, L., Kuk, K., Marić, K. (2000): Seizmološke i seizmotektonske značajke šireg zagrebačkog područja, *Građevinar*, 52, 11, 647–653.

- Lavallee, D., Blewitt, G., Clarke, P. J., Nurutdinov, K., Holt, W. E., Kreemer, C., Meertens, C. M., Shiver, W. S., Stein, S., Zerbini, S., Bastos, L., Kahle, H-G. (2001): GPSVEL Project: Towards a Dense Global GPS Velocity Field, In Proceedings of the International Association of Geodesy Scientific Assembly, Budapest.
- Matoš, B., Tomljenović, B., Trenc, N. (2014): Identification of tectonically active areas using DEM: a quantitative morphometric analysis of Mt. Medvednica, NW Croatia, *Geological quarterly*, 58, 1, 51–70.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksöz, M. N., Veis, G. (2000): Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus, *Journal of Geophysical Research*, 105.
- Medak, D., Pribičević, B. (2001): Geodynamic GPS-Network of the City of Zagreb – First Results, In The Stephan Mueller topical conference of the European Geophysical Society: Quantitative neotectonic and seismic hazard assessment: new integrated approaches for environmental management, Balatonfüred, Hungary.
- Medak, D., Pribičević, B. (2002): Geodinamička mreža Grada Zagreba, *Zbornik Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu povodom 40. obljetnice samostalnog djelovanja 1962–2002*, Bašić, T. (ur.), Zagreb, 145–156.
- Prelogović, E., Cvijanović, D. (1981): Potres u Medvednici 1880. godine, *Geol. vjesnik*, 34, 137–146.
- Prelogović, E., Jamičić, D., Aljinović, B., Velić, J., Saftić, B., Dragaš, M. (1995): Dinamika nastanka struktura južnog dijela panonskog bazena, *Prvi hrvatski geološki kongres, Opatija, Vol. 2*, 481–486.
- Prelogović, E., Kuk, V. (1998): Seizmotektonska aktivnost zapadnog dijela Hrvatske, *Znanstveni skup Andrija Mohorovičić – 140. obljetnica rođenja, Zbornik radova, Bajić, A. (ur.)*, Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb, 115–124.
- Pribičević, B., Medak, D., Prelogović, E., Đapo, A. (2007a): Geodinamika prostora Grada Zagreba, *Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu*, Zagreb.
- Pribičević, B., Medak, D., Đapo, A. (2007b): Progušćenje točaka Geodinamičke mreže Grada Zagreba u podsljemenskoj zoni, *Geodetski list*, 4, 247–258.
- Pribičević, B., Medak, D., Đapo, A. (2008): Utjecaj geodinamičkih procesa na izgradnju objekata i infrastrukture na području Grada Zagreba, *Razvitak Zagreba – Zagreb 2008, Zbornik radova, Radić, J. (ur.)*, Gradsko poglavarstvo Grada Zagreba i Hrvatski inženjerski savez, Zagreb, 109–116.
- Pribičević, B., Đapo, A., Medak, D. (2011): Geodetsko-geološka istraživanja na širem zagrebačkom području oslonjena na Geodinamičku mrežu Grada Zagreba, *Geodetski list*, 1, 1–19.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrova, A., Filikov, S. V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R., Karam, G. (2006): GPS Constraints on Continental Deformation in the Africa–Arabia–Eurasia Continental Collision Zone and implications for the Dynamics of Plate Interactions, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, B05411.
- Solarić, M. (1999): Suradnja srednje europskih zemalja u geodeziji i geodinamici, *Znanstveni skup Andrija Mohorovičić – 140. obljetnica rođenja, Zbornik radova, Bajić, A. (ur.)*, Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb, 165–177.

- Šikić, K., Basch, D., Simunić, A. (1977): Osnovna geološka karta, list Zagreb, L38-80, 1:100000.
- Tomljenović, B. (2002): Strukturne značajke Medvednice i Samoborskog gorja, doktorski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Van Gelder, I. E., Matenco, L., Willingshofer, E., Tomljenovic, B., Andriessen, P. A. M., Ducea, M. N., Beniest, A., Gruić, A. (2015): The tectonic evolution of a critical segment of the Dinarides–Alps connection: Kinematic and geochronological inferences from the Medvednica Mountains, NE Croatia, *Tectonics*, Vol. 34, Issue 9, 1952–1978.
- Wessel, P., Smith, W. H. F. (2004): *The Generic Mapping Tools – Technical Reference and Cookbook*, 4th edition.
- Zagorac, Z. (1974): Interpretacija gravimetrijskog reziduala i njena primjena u području Savske i Dravske potoline, doktorski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.

Movement Analysis on Geodynamic Network of the City of Zagreb from Different Time Epochs

ABSTRACT. Measurements conducted on the Geodynamic Network on the City of Zagreb in the period of 18 years confirm the ever-present tectonic activity in the covered wider area around the Medvednica mountain. All GPS measurements are processed in the same way: using the latest version of the scientific GPS software GAMIT/GLOBK 10.6, which uses Kalman filter to determine the velocities from time separated GPS campaigns. All parameters of GAMIT are configured for regional or local campaign. As the reference points of the Geodynamic network, two of the most stable points in the research area were chosen. Movements of all other points in the network refer to the vector between the two points mentioned. In this way, the possibility of overestimating the movement of all points in the network for possible displacement of one single origin is avoided. In the paper an interdisciplinary geodetic and geological analysis and comparison of results obtained from periods 2008–2009 and 2009–2015 was conducted. The reason for comparing these periods is their different time period, which is one year (2008–2009) and six years (2009–2015). The results of the analysis described in this paper, clearly demonstrate the necessity of conducting this type of measurements in intervals of up to one year. Specifically, in the case of perennial time intervals between GPS campaigns comes to averaging of the movements, and actually the loss of movements on an annual basis which are extremely valuable and essential for quality analysis and understanding of the mechanism of the structural assembly of the wider Zagreb area.

Keywords: GPS, geodynamics, geodynamic network, GAMIT/GLOBK, geodetic model, geologic model.

Primljeno / Received: 2016-07-21

Prihvaćeno / Accepted: 2016-08-25