

UDK 551.2/.3:551.24:528.41:528.06:004.4(497.5)

Izvorni znanstveni članak

Progušćenje točaka Geodinamičke mreže Grada Zagreba u podsljemenskoj zoni

Boško PRIBIČEVIĆ¹, Damir MEDAK², Almin ĐAPO³ – Zagreb

SAŽETAK. U radu se prikazuju rezultati obrade i analize mjerenja na dodatnim točkama, kojima je progušćena Geodinamička mreža Grada Zagreba nakon tri provedene serije mjerenja. Progušćenjem mreže s pet novih geodinamičkih GPS-točaka izvedenim u rujnu 2005. znatno je unaprijeđena primjenjivost rezultata mjerenja na seizmotektonski najaktivnijem području istočne Medvednice. U tim gradskim područjima, koja leže na glinastim naslagama u podsljemenskoj zoni, sada je moguće točnije određivati karakter klizišta te povezati njihov nastanak s tektonskim aktivnostima. Područje istraživanja je nakon 2005. godine prošireno na 21 točku koje su opažane 2006. i 2007. godine. Obrada i analiza tih dviju serija GPS-mjerenja izvedene su s pomoću najnovije inačice znanstvenog softvera GAMIT. Planiran je nastavak istraživanja u 2008. godini realizacijom opažanja kompletne mreže od 41 geodinamičke točke.

Ključne riječi: geodinamika, tektonika, GPS, obrada i analiza geodetskih mjerenja, GAMIT.

1. Uvod

Tektonika ploča i njome uvjetovana geodinamička aktivnost na Zemlji danas su najvažniji znanstveni izazov, u kojem precizno satelitsko određivanje položaja može dati doprinos. Preko globalnih (Argus i Gordon 1991), kontinentalnih i regionalnih (Pinter i dr. 2006) istraživanja dolazi se uz pomoć sve točnijih i dugotrajnijih mjerenja do detaljnijeg uvida u uzroke pomaka Zemljine kore na lokalnoj razini. Upravo takav desetogodišnji istraživački napor predstavlja i Geodinamička mreža Grada Zagreba, čiji su počeci i prvi rezultati detaljno opisani u nizu radova (Medak i Pribičević 2001; 2006), (Pribičević i dr. 2004), (Đapo 2005), (Pribičević i

¹ Prof. dr. sc. Boško Pribičević, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, bprbic@geof.hr,

² Prof. dr. sc. Damir Medak, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, dmedak@geoinfo.geof.hr,

³ Mr. sc. Almin Đapo, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, adapo@geof.hr.

dr. 2007). Mreža je projektirana i uspostavljena 1997. godine s početne ukupno 43 specijalno stabilizirane točke, tako da najbolje reprezentiraju geodinamička događanja na području istraživanja, no tijekom vremena su neke od točaka uništene. Do 2005. godine cijela je mreža opažana 3 puta. Nakon analize pomaka određenih na temelju triju serija mjerenja te izrađenoga geološkog modela pomaka koji se izrazito dobro slaže s dobivenim geodetskim modelom, utvrđeno je seizmotektonski najaktivnije područje. U tom području koje leži na glinastim naslagama u podsljemenskoj zoni, posebno se ističu naselja Šestine, Grmošica, Granešina, Mikulići, Vugrovec i Kašina. Stoga je odlučeno izvršiti progušćenje "Geodinamičke mreže Grada Zagreba" upravo na tom području. Projekt progušćenja obuhvatio je pet dodatnih novostabiliziranih geodinamičkih točaka, kao i sedam postojećih točaka mreže, koje se nalaze u najaktivnijem dijelu mreže. Takva je mreža izopažana i određene su koordinate točaka. Godine 2006. izvedeno je opažanje cjelokupne mreže, no u pripremi mjerenja ustanovljeno je da su dvije novostabilizirane točke uništene i nije ih bilo moguće obnoviti. Stoga je u 2007. godini donesena odluka da se opažanje mreže progušćenja proširi na ukupno 21 točku koje bi se opažale svake godine i time bi bio obuhvaćen seizmotektonski najzanimljiviji dio mreže. Nakon obrade mjerenja iz 2007. godine prvi put smo u situaciji odrediti pomake na prethodno opisanom progušćenom dijelu "Geodinamičke mreže Grada Zagreba". Ovaj je rad posvećen analizi dobivenih rezultata na najaktivnijem dijelu mreže, na kojem su određeni godišnji pomaci bez vremenske interpolacije, što znatno povećava pouzdanost određenih pomaka.

2. Izvedena GPS-mjerenja

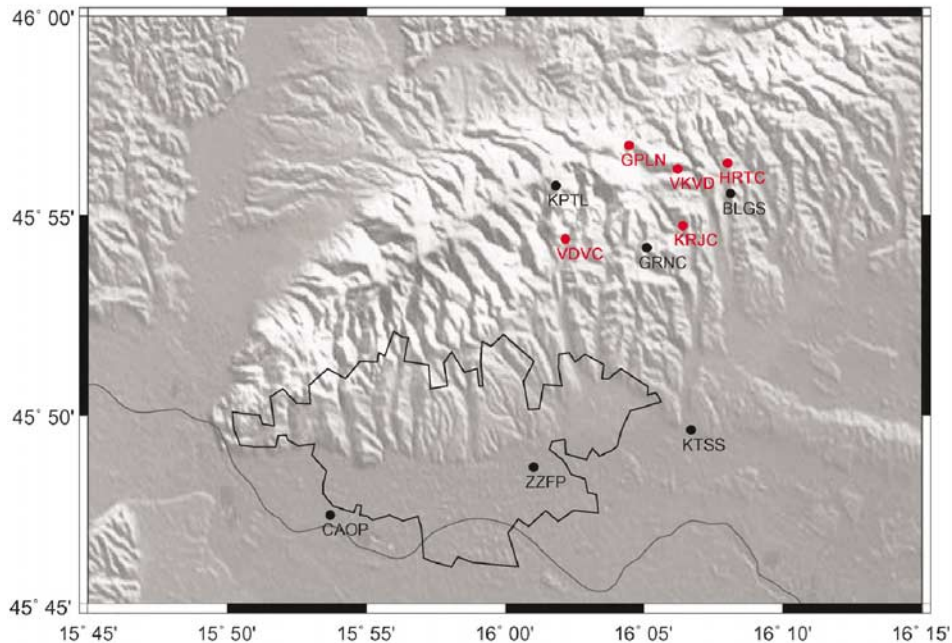
Kao što je već navedeno, na točkama progušćenja Geodinamičke mreže Grada Zagreba izvedene su ukupno tri serije mjerenja. U tablici 1 pregledno su prikazani podaci koji opisuju svaku pojedinu seriju mjerenja.

Tablica 1. *Pregledni podaci o broju točaka, sesija i instrumenata za izvedene kampanje.*

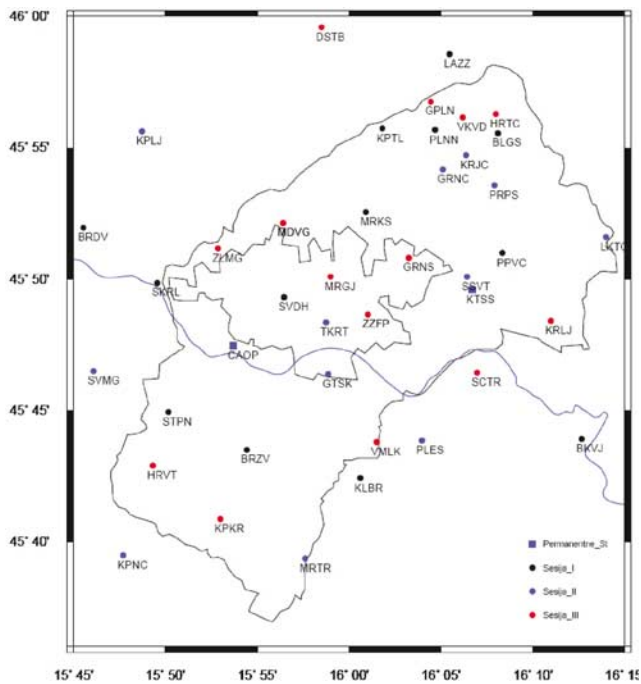
Kampanja	Datum	Br. sesija	Br. točaka	Br. uređaja
Zagreb 2005	10. 09. 2005.-11. 09. 2005.	1	11	11
Zagreb 2006	22. 06. 2006.-25. 06. 2006.	3	41	13
Zagreb 2007	13. 07. 2007.-15. 07. 2007.	2	21	13

S početnih 11 točaka u 2005. godini, prikazanih na slici 1, mreža je 2007. proširena na 21 točku (slika 3). Planira se svake parne godine opažanje kompletne Geodinamičke mreže Grada Zagreba, koja uključujući i predmetnu 21 točku ima ukupno 41 točku (slika 2), a svake neparne godine opažala bi se samo odabrana 21 točka mreže progušćenja. Slike 1, 2, 3 i 4 izrađene su uz pomoć naprednoga znanstvenog softvera Generic Mapping Tools (Wessel i Smith 1998).

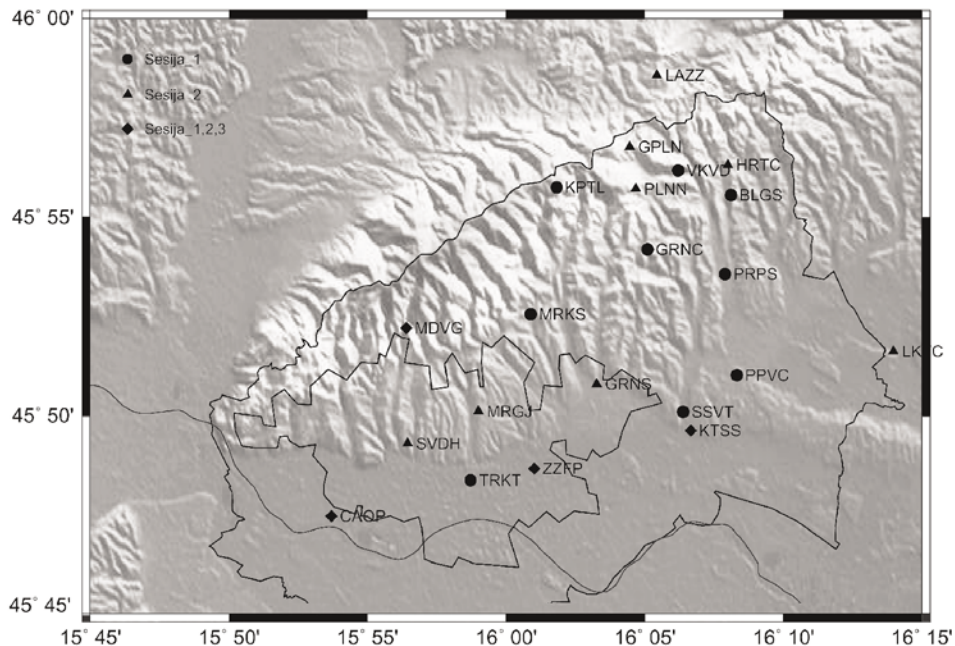
Budući da je na predmetnim istraživanjima potrebno izvesti velik broj simultanih GPS-mjerenja s velikim brojem odgovarajućih GPS-prijamnika, optimalni se rezultati postižu samo ako se koriste dvofrekventni GPS-prijamnici s kvalitetnim



Slika 1. Raspored točaka u GPS-kampanji "Zagreb 2005".



Slika 2. Raspored točaka u GPS-kampanji "Zagreb 2006".



Slika 3. Raspored točaka u GPS-kampanji "Zagreb 2007".

antena. Kako se ovdje radi o geodinamičkom projektu kojemu je temeljni cilj pratiti pomake u dužem vremenskom razdoblju, potrebno je po mogućnosti u svim kampanjama koristiti istovrsnu opremu. Zbog toga su za sva dosadašnja mjerenja odabrani prijamnici i antene tvrtke Trimble.

Za dobru organizaciju izvođenja GPS-kampanje potrebno je izraditi kvalitetan vremenski plan GPS-mjerenja. Poznato je da vektori koji se duže opažaju imaju veću točnost, što se objašnjava time da se pri dužim opažanjima vektor određuje s pomoću više satelita i u različitim konstelacijama, kao i pod različitim uvjetima u troposferi i ionosferi. S druge strane, također je poznato da povećanju točnosti pogoduju opažanja noću, jer su tada stabilnije prilike u slojevima troposfere i ionosfere. Dok se ionosferska korekcija jednostavno modelira kombinacijom faznih razlika, utjecaj troposfere na GPS-mjerenja još je uvijek relativno teško modelirati pa predstavlja nezanemarivi, ali tijekom noći ipak ublaženi izvor smanjenja točnosti mjerenja. Stoga je u svakoj provedenoj seriji mjerenja posebna pažnja posvećena izradi kvalitetnog plana opažanja i organizaciji mjerenja.

3. Računalna obrada provedenih mjerenja

Za potrebe predmetnog projekta korištena je najnovija inačica 10.3 znanstvenog softvera GAMIT, detaljnije opisanog u (King i Bock 2006) i (Pribičević i dr. 2007). GAMIT se može koristiti i za obradu kombiniranih satelitskih i terestričkih mjerenja (Dong i dr. 1998), a vrlo je često primjenjivan na velikim međunarodnim

znanstvenim studijama pomaka tektonskih ploča u mediteranskoj regiji (McClusky i dr. 2000; 2003), (Reilinger i McClusky 2001), (Mahmoud i dr. 2005). Jedna od prednosti korištenja GAMIT-a je napredan algoritam analitičkog uklanjanja pogreške sata uspoređivanjem epoha sa satovima u Fairbanksu i Gilcreeku, pri čem se fazni satovi korigiraju s pomoću procijenjenih pseudoudaljenosti (Herring 2003). Kako je sustav GPS-satelita kontroliran s pomoću oscilatora koji rade na frekvenciji od 10,23 MHz, na Zemljinoj su površini oscilatori postavljeni na vrijednost $10,23 \times (1 - 4,4647 \times 10^{-10})$ MHz. Spomenuti je pomak potreban zbog kompenzacije razlike potencijala i prosječne brzine u odnosu na vremenski trenutak lansiranja satelita.

Dodatne korekcije putanje signala sa satelita uključuju i zakrivljenost zbog Zemljina potencijala i iznose do nekoliko centimetara (Hofmann-Wellenhof i dr. 2001):

$$\Delta\tau_1 = \frac{2GM}{c^3} \ln \left(\frac{R_r + R_s + \rho}{R_r + R_s - \rho} \right). \quad (1)$$

U formuli 1, G predstavlja gravitacijsku konstantu, M masu Zemlje, c je brzina svjetlosti, dok su R_r i R_s vektori faznog centra prijarnika i odašiljača, a ρ njihova razlika.

Utjecaj na sat zbog promijenjenog potencijala dan je sljedećim izrazom:

$$\Delta\tau_2 = \frac{-\sqrt{GM}}{c^2} e\sqrt{a} \sin E. \quad (2)$$

U formuli 2 izraz e predstavlja ekscentricitet, a je velika poluos orbite satelita, dok je E anomalija ekscentriciteta (Ashby 2003). Za vrijednost ekscentriciteta $e = 0,02$ utjecaj na sat iznosi 47 ns, što odgovara udaljenosti od 14 m (Herring 2003).

Brzine točaka izračunane su s pomoću modula GLOBK (Herring i dr. 2006), dakle polje brzina izračunano je prema posebnom modelu računskim postupkom Kalmanova filtriranja. Brzine su izražene u milimetrima na godinu (mm/god). Također je izračunana i magnituda ukupnoga prostornog vektora pomaka u sve tri dimenzije. Ocjena točnosti u lokalnom sustavu razdvaja horizontalnu od vertikalne komponente, a to je poželjno uzme li se u obzir slabija točnost određivanja visina GPS-tehnologijom. U tablici 3 dan je statistički prikaz apsolutnih vrijednosti godišnjih brzina točaka mreže. Iz tablice je vidljivo da su rezultati brzina točaka geodinamičke mreže Grada Zagreba dobiveni s izuzetno visokom točnošću, a zahvaljujući velikom broju GPS-mjerenja, posebnom načinu stabilizacije te modulu GLOBK, koji koristi prije navedenu Kalman metodu filtriranja.

Tablica 2. Statistički pregled ocjene točnosti koordinata ("Zagreb 2007").

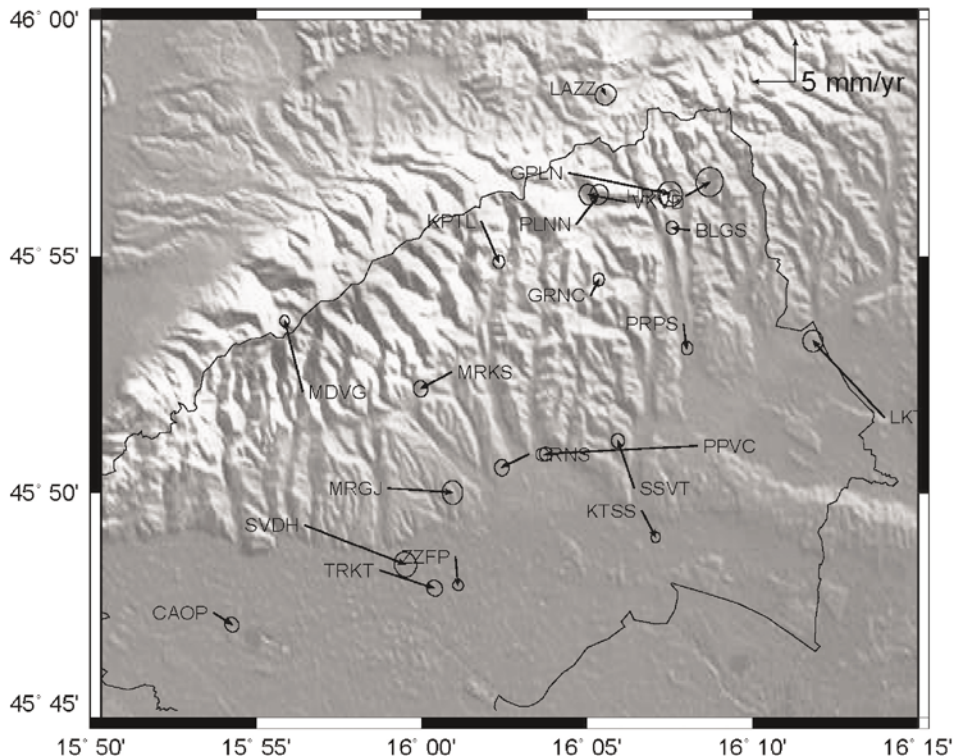
	σ_B [mm]	σ_L [mm]	σ_h [mm]
minimum	$\pm 0,21$	$\pm 0,24$	$\pm 1,01$
maksimum	$\pm 0,64$	$\pm 0,69$	$\pm 3,24$
prosjeak	$\pm 0,37$	$\pm 0,41$	$\pm 1,84$

Tablica 3. *Statistički prikaz apsolutnih vrijednosti godišnjih brzina 2006–2007. u mm/god.*

	$v\varphi$ [mm/god]	$v\lambda$ [mm/god]	vhz [mm/god]	vH [mm/god]
minimum	0,27	0,31	0,86	0,11
maksimum	8,89	17,68	17,70	46,66
prosjeak	2,90	4,46	5,96	15,54

Tablica 4. *Prikaz vrijednosti godišnjih brzina 2006–2007. u mm/god.*

	φ	λ	$v\varphi$ [mm/god.]	$v\lambda$ [mm/god.]	azimut	vhz [mm/god.]
BLGS	45,926	16,135	0,27	-2,07	277	2,09
CAOP	45,791	15,895	-1,36	2,18	122	2,57
GPLN	45,946	16,074	-2,42	11,78	101	12,03
GRNC	45,903	16,085	1,85	0,98	28	2,09
GRNS	45,847	16,054	-1,56	-3,15	243	3,52
HRTC	45,938	16,133	1,62	2,76	59	3,20
KPTL	45,929	16,030	-4,72	2,05	156	5,15
KTSS	45,827	16,111	-3,07	1,59	152	3,46
LAZZ	45,976	16,091	-0,77	0,39	153	0,86
LKTC	45,860	16,233	8,89	-8,31	317	12,17
MDVG	45,869	15,940	8,23	-2,05	346	8,48
MRGJ	45,835	15,983	-0,48	7,51	93	7,53
MRKS	45,876	16,015	-1,96	-3,59	241	4,09
PLNN	45,928	16,078	3,49	2,60	36	4,35
PPVC	45,850	16,139	-0,94	-17,68	267	17,70
PRPS	45,893	16,132	-2,86	0,38	172	2,89
SSVT	45,835	16,107	5,55	-1,90	341	5,87
SVDH	45,822	15,941	-4,57	11,71	111	12,57
TRKT	45,806	15,979	-2,07	6,34	108	6,67
VKVD	45,936	16,103	0,82	-4,43	280	4,51
ZZFP	45,811	16,017	-3,38	0,31	174	3,39



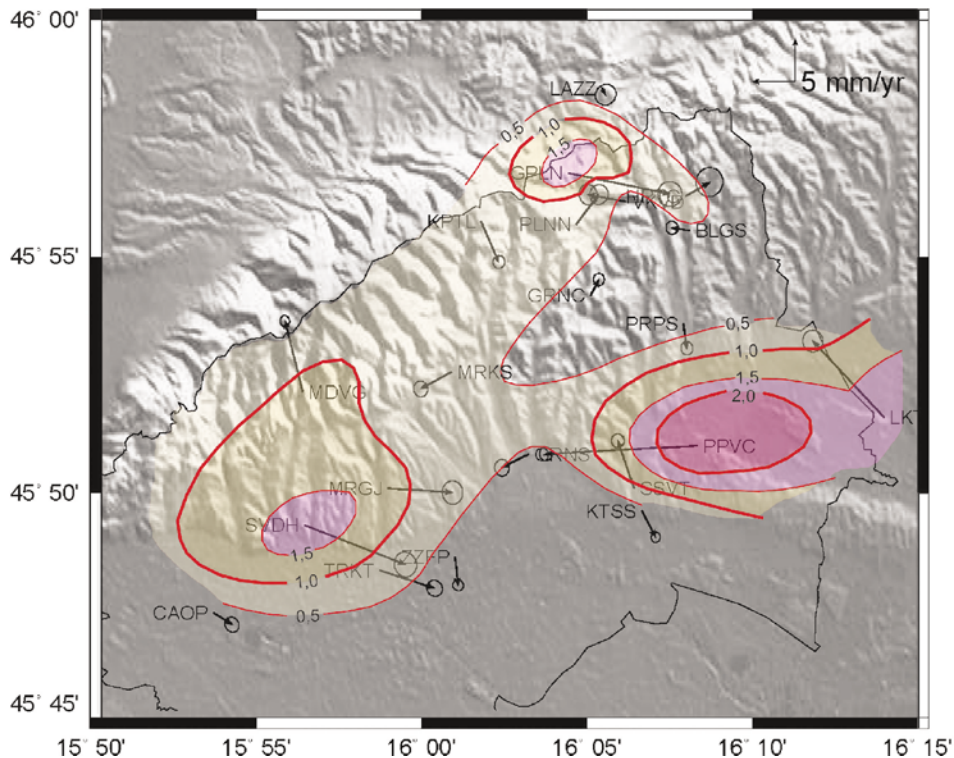
Slika 4. Geodetski model godišnjih brzina 2006–2007. za interesno područje s pripadnim elipsama pogreška.

4. Interdisciplinarna analiza

Nakon provedenih mjerenja 2006. godine na cjelokupnoj Geodinamičkoj mreži Grada Zagreba osobito se ukazalo na stalno prisutnu tektonsku aktivnost područja istraživanja. Pri tome je kao najznačajnija uočena aktivnost zone Zagrebačkog rasjeda između Črnomerca i Sv. Duha prema Vidovcu, te u zoni rasjeda Stubica – Kašina. Također je jasno istaknuta rastuća tektonska aktivnost u zoni rasjeda Stubica – Kašina uz pojave klizišta.

U mjerenjima provedenima u 2007. godini na mreži progušćenja s ukupno 21 točkom polučeni su novi važni podaci. U prvom redu tu se ističu maksimumi mjereni u točkama (slika 5): PPVC (Popovec) – 2,5 cm/god., LKTC (Laktec) – 1,72 cm/god., MRGJ (Mirogoj) – 1,06 cm/god., SVDH (Sv. Duh) – 1,77 cm/god., i GPLN (Gornja Planina) – 1,7 cm/god.

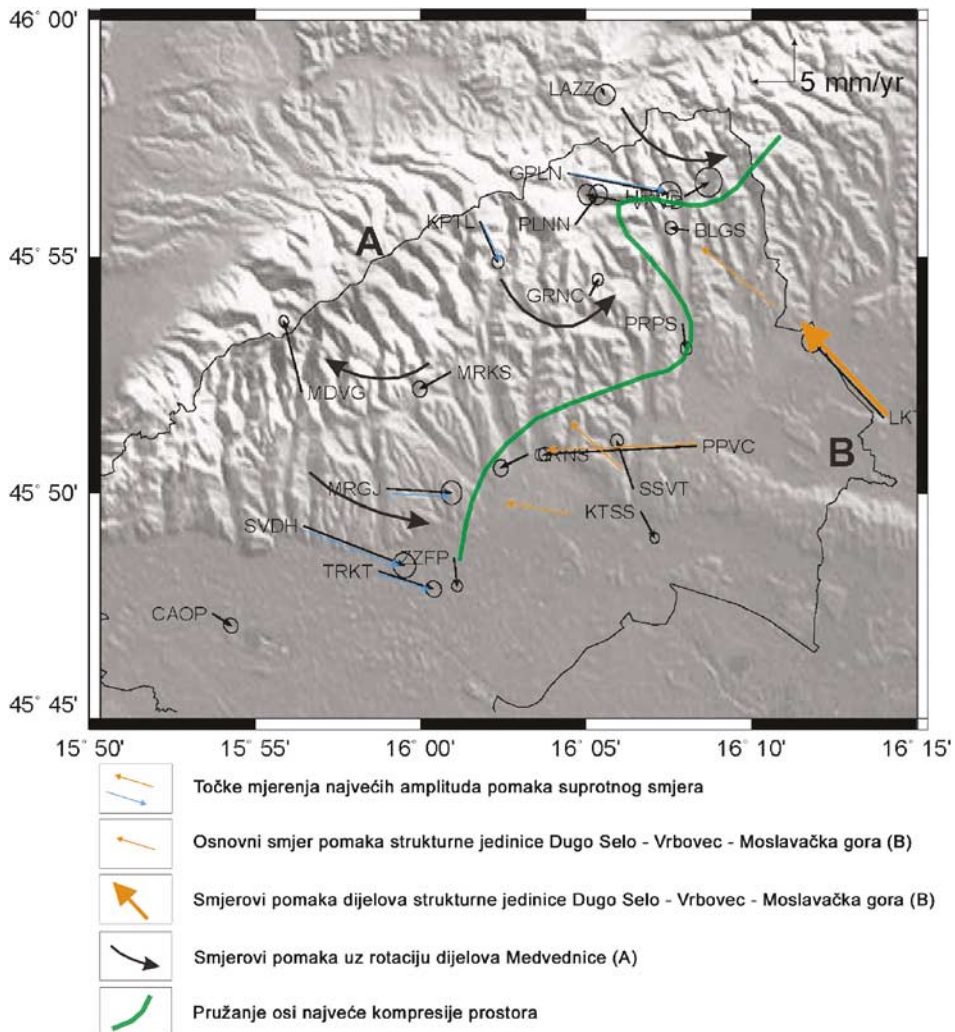
Izrađeni prikazi amplituda pomaka pomoću izolinija na slici 5 ističu tri najaktivnija prostora: relativno široki prostor obuhvaćenog dijela strukturne jedinice Dugo-Selo – Vrbovec-Moslavačka Gora (B), te dijelove Medvednice (A) oko Sv. Duha, Medvedgrada, Markuševca i Planine.



Slika 5. Utvrđene zone najvećih tektonskih aktivnosti.

Najvažniji podaci u provedenoj interdisciplinarnoj analizi odnose se na smjerove pomaka pojedinih točaka (slika 6). Tu je vidljivo da unutar strukturne jedinice Dugo Selo – Vrbovec-Moslavačka gora (B), pojedine točke se pomiču prema sjeverozapadu i zapadu. Također je važno istaknuti isti smjer pomaka u točkama mjerenja oko Planine (VKVD i HRTC). S druge strane u Medvednici točke koje pokazuju najveće amplitude (osim MDVG) imaju pomake prema istok-jugoistoku i jugoistoku. Ostale točke u Medvednici imaju različite smjerove pomaka. Pri tome pomaci najbližih točaka ukazuju na prisutnu rotaciju pojedinih dijelova Medvednice (slika 6).

Na temelju utvrđenih amplituda i smjerova pomaka pojedinih točaka mjerenja na slici 5 jasno se ističu područja s prisutnim najaktivnijim tektonskim pokretima tijekom 2007. godine. Očiti su osnovni suprotni pomaci Medvednice (A) i obuhvaćenog dijela strukturne jedinice Dugo Selo – Vrbovec – Moslavačka gora (B). Takvo suprotno gibanje dviju velikih tektonskih jedinica izaziva kompresiju prostora. Iz slike 6 vidljivo je da os najveće kompresije prostora ima pružanje u smjeru sjeveroistok – jugozapad. Osnovni smjer pomaka strukturne jedinice Dugo Selo – Vrbovec – Moslavačka gora (B) poprečan je na pružanje spomenute osi u prostoru Planine i Kašine. S druge strane točke GPLN i KPTL u Medvednici imaju međusobno suprotni smjer pomaka. Navedeni podaci zorno prikazuju prostor najveće



Slika 6. Prikaz pružanja osi najveće kompresije prostora.

tektonske aktivnosti u periodu između dviju serija mjerenja. Također suprotni pomaci točaka TRKT, SVDH, MRGJ i PPVC ističu aktivnost prostora između Sv. Duha, Markuševca i Seseveta.

5. Zaključna razmatranja

Predmetna istraživanja na Geodinamičkoj mreži Grada Zagreba obuhvatila su nova GPS-mjerenja na geodinamički najaktivnijem području sjeveroistočnog dijela Zagrebačke gore. U 2007. godini izvedena su GPS-mjerenja na točkama proguš-

ćenja Geodinamičke mreže Grada Zagreba (ukupno 21 točka u kampanji), te su iste uključene u obradu i određivanje modela brzina pomaka.

U ovom radu određen je geodetski model brzina za razdoblje između dvije serije mjerenja (2006–2007).

Provedenom interdisciplinarnom analizom utvrđene su amplitude i smjerovi pomaka pojedinih točaka mjerenja te su detektirane jasno istaknuta tri područja s prisutnim najaktivnijim tektonskim pokretima 2007. godine. Također je određena os najveće kompresije područja istraživanja, uzrokovana suprotnim gibanjem dviju velikih tektonskih jedinica.

Kao najvažnije zaključke predmetnih istraživanja možemo izdvojiti:

- tijekom 2007. godine tektonski je aktivan prostor između Sv. Duha, Markuševca, Seseveta i Planine;
- značajni su pomaci obuhvaćenog dijela strukturne jedinice Dugo Selo – Vrbovec – Moslavačka gora (B);
- kompresija prostora najviše je izražena oko Planine i Kašine te između Sv. Duha, Mirogoja, Markuševca i Seseveta;
- različiti smjerovi pomaka dijelova strukturne jedinice Dugo Selo – Vrbovec-Moslavačka gora (B) i Medvednice (A) ukazuju da se njihovi pomaci događaju uz rotaciju koja je osobito uočljiva u Medvednici (A);
- najvažnije je istaknuti prisutnu relativno veću tektonsku aktivnost tijekom 2007. godine uz maksimalne amplitude tektonskih pomaka između 1,7 i 2,5 cm/god.

Zaključno možemo konstatirati da predmetna istraživanja pokazuju permanentnu seizmotektonsku aktivnost između dvije serije mjerenja. Za nastavak istraživanja od iznimne će važnosti biti provođenje nove kampanje 2008. godine, koja po dinamičkom planu treba obuhvatiti sve točke Geodinamičke mreže te će se na osnovi mjerenja iz posljednjih nekoliko mjernih kampanja moći izraditi najrecentniji modeli brzina kretanja geoloških struktura za šire područje Grada Zagreba.

Literatura

- Argus, D. F., Gordon, R. G. (1991): No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 2039–2042.
- Ashby, N. (2003): Relativity in the Global Positioning System. *Living Reviews in Relativity*, 6, 1–42.
- Dong, D., Herring, T., King, R.W. (1998): Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data. *Journal of Geodesy*, 72, 200–214.
- Đapo, A. (2005): Obrada i interpretacija geodetskih mjerenja na geodinamičkoj mreži Grada Zagreba. Magistarski rad. Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Zagreb. 2005.
- Herring, T. (2003): *The Global Positioning System and Relativity*. Department of Earth, Atmosphere and Planetary Sciences. MIT, Cambridge.

- Herring, T. A., King, R. W., McClusky, S. (2006), GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program, Department of Earth, Atmosphere and Planetary Sciences. MIT, Cambridge.
- Hoffman-Wellenhop, B., Lichtenegger, H., Collins, J. (2001): GPS Theory and Practice. Fifth, revised edition. Springer, Beč, New York.
- King, R. W., Bock, Y. (2006): Documentation of the MIT GPS analysis software: GAMIT, MIT, Cambridge.
- Mahmoud, S., Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Tealeb, A. (2005): GPS evidence for northward motion of the Sinai Block: Implications for E. Mediterranean tectonics. *Earth and Planetary Science Letters*, 238, 217–224.
- McClusky, S., i dr. (2000): Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus, *J. Geophys. Res.*, 105, 5695–5719.
- McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D., Tealeb, A. (2003): GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions, *Geophys. J. Int.*, 155, 126–138.
- Medak, D., Pribičević, B. (2001): Geodynamic GPS-Network of the City of Zagreb – First Results, *Quantitative Neotectonics and Seismic Hazard Assessment: New Integrated Approaches for Environmental Management / Gabor, Bada (ur.)*, 80.
- Medak, D., Pribičević, B. (2006): Processing of geodynamic GPS-networks in Croatia with GAMIT software, In: *The Adria Microplate, GPS Geodesy, Tectonics and Hazards / Pinter, Nicholas et al. (eds)*, 247–256.
- Medak, D., Pribičević, B., Prelogović, E., Đapo, A. (2007): Primjene geodetsko-geodinamičkih GPS-mjerenja za monitoring tektonski uvjetovanih klizišta, *SIG 2007. Simpozij o inženjerskoj geodeziji*, G. Novaković (ur.). Zagreb, Hrvatsko geodetsko društvo, 229–242.
- Pinter, N., Grenerczy, G., Stein, S., Weber, J., Medak, D. (2006): *Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics and Hazards*, Springer Verlag. *Nato Science Series: IV. Earth and Environmental Sciences Vol. 61*.
- Pribičević, B., Medak, D., Prelogović, E. (2004): Geodinamika prostora Grada Zagreba. *Geodetski list*, 58 (81), 1, 51–65.
- Pribičević, B., Medak, D., Prelogović, E., Đapo, A. (2007): Geodinamika prostora Grada Zagreba. *Znanstvena monografija. Geodetski fakultet, Zagreb 2007*.
- Reilinger, R., McClusky, S. (2001): GPS constraints on block motions and deformations in western Turkey and the Aegean: Implications for earthquake hazards, in *Seismotectonics of the North-western Anatolia-Aegean and Recent Turkish Earthquakes*, edited by T. Taymaz, 14– 20, Istanbul Tech. Univ., Istanbul, Turkey.
- Wessel, P., Smith, W. H. F. (1998): New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. American Geophysical Union*, vol. 79 (47), 579.

Densification of the Zagreb Geodynamic Network in the Area of northeast Medvednica

ABSTRACT. This paper gives the results of processing and analysis of measurements on new points of Geodynamic network of the City of Zagreb, after three GPS-campaigns performed on those points. Densification of the network with five new points in September 2005 improved the applicability of results in seismically and tectonically active region of eastern Medvednica. It is now easier to determine the causes of landslides and the link with tectonic activities for those urban areas, situated on clay layers in the bottom of Mount Medvednica. After the primary densification in 2005, the area of research has been extended to 21 points observed in 2006 and 2007. Processing and analysis of those two measurement series were performed with the latest version of scientific software GAMIT. For 2008, further research has been planned through the observation of all 41 points in the complete network.

Key words: geodynamics, tectonics, GPS, processing and analysis of geodetic observations, GAMIT.

Prihvaćeno: 2007-12-05