

UDK 551.2/.3:528.06(497.5)
Izvorni znanstveni članak

Geodinamika prostora Grada Zagreba

Boško PRIBIČEVIĆ¹, Damir MEDAK², Eduard PRELOGOVIĆ³ –
Zagreb

SAŽETAK. U radu se prikazuju interdisciplinarna istraživanja geodinamičkih procesa šireg prostora Grada Zagreba. Predmetna istraživanja izvode se unutar projekta "Geodinamička mreža Grada Zagreba", uz dominantan angažman geodetskih znanstvenika i znatnu pomoć drugih geoznanstvenih disciplina. Prvi rezultati i njihova analiza uz pomoć znanstvenoga GAMIT softvera, nakon izvršenih triju serija GPS-mjerenja pokazuju zamjetnu aktivnost geodinamičkih procesa na promatranom prostoru. Radi što pouzdanije analize i primjene dobivenih rezultata, planira se oplemeniti istraživanja uključivanjem novih mjerenja i proširenjem istraživačkog tima novim geoznanstvenicima. Nastavak istraživanja planiran je kroz realizaciju projekta "Geodetsko-geodinamička studija prostora Grada Zagreba".

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

1. Uvod

Područje Jadranske mikroploče seizmički je vrlo aktivno, što dokazuju kako seizmički podaci (Anderson i Jackson 1987), (Skoko i Mokrović 1992), tako i geodetska mjerenja na Sredozemlju (Mantovani i dr. 1992), a posebice na istočnoj obali Jadrana (Altiner 1999). U posljednjih se deset godina GPS-tehnologija nametnula kao glavni geodetski doprinos geodinamičkim istraživanjima u srednjoeuropskim zemljama (Solarić 1999). Geodetski doprinosi tektonskim istraživanjima obuhvaćaju još i dugobazisnu interferometriju (VLBI), satelitsko lasersko mjerenje udaljenosti (SLR) i satelitsku radarsku interferometriju (Keller i Pinter 2002).

Činjenica da je i šire područje Grada Zagreba geodinamički aktivno poznata je već dulje vrijeme, međutim, nisu postojali podaci o veličini stvarnih pomaka, kao ni o

¹Doc. dr. sc. Boško Pribičević, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb

²Prof. dr. sc. Damir Medak, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb

³Prof. dr. sc. Eduard Prelogović, Sveučilišta u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pierrotijeva 6, 10000 Zagreb

njihovoj prostornoj orijentaciji. Prva ideja o geodetskim istraživanjima u tom smjeru nastala je kroz provedbu projekta "GPS-mreža grada Zagreba" (Čolić i dr. 1998). Tom mrežom Grad Zagreb dobiva kvalitetnu mrežu stalnih geodetskih točaka. Osnovni dio te mreže sastojao se od 43 specijalno stabilizirane točke, koje su zadovoljavale sve kriterije koji se postavljaju za geodinamičke točke.

Na tom dijelu mreže izvedena je prva GPS-kampanja pod nazivom "Zagreb '97", koja je bila obrađena uklapanjem u nacionalnu geodetsku mrežu. Na taj način ona je postala osnova za određivanje točaka homogenog polja cijele mreže. Poslije je izvedena i druga obradba u svrhu određivanja pomaka geodinamičke mreže u istome referentnom okviru, slobodnom od nacionalne GPS-mreže, te postala "Geodinamička mreža Grada Zagreba".

Budući da se radi o najvećem takvom zahvatu u nas, već pri projektiranju mreže, a i poslije pri izvođenju radova na njoj, primjenjivao se interdisciplinarni pristup. Stoga su u projekt od njegova samog početka osim geodeta uključeni i geolozi, geofizičari, tektoničari, seizmolozi, građevinari i mnogi drugi znanstvenici.

Zahvaljujući znatnom povećanju točnosti uočljiva je ovisnost geodetskih podataka o vremenu, kao četvrtoj dimenziji, pa je posebna pozornost posvećena stabilizaciji točaka predmetne geodinamičke mreže. Cilj je bio osigurati stabilnost točaka kroz dulje vremensko razdoblje i osigurati ponovno postavljanje GPS-antene uz uvjet "prisilnog centriranja". Na taj je način omogućeno određivanje stvarnih geodinamičkih pomaka s vrlo visokom točnošću kroz dulje razdoblje. Za geodetsku struku važna je činjenica da su predmetna istraživanja važan kvalitativni doprinos u različitim interdisciplinarnim istraživanjima, kao što je praćenje predvjesnika potresa u Zagrebu i okolici radi njihove moguće prognoze. Tu se također mogu ubrojiti i istraživanja za potrebe izradbe novih parametara mikrosezmičke rajonizacije te ispitivanja klizišta na području Grada Zagreba.

Jasno je da se radi o dugogodišnjim istraživanjima, koja su počela 1997. godine i nastavila se drugom mjernom kampanjom "Zagreb 2001" te kontrolnim mjerenjima na 13 točaka u 2003. godini. Daljnji nastavak istraživanja planira se provedbom projekta "Geodetsko-geodinamička studija prostora Grada Zagreba".

2. Geodinamička mreža

S obzirom na veličinu Grada Zagreba i potrebu da se zbog geodinamike prostora obuhvati i nešto šire područje, predmetna geodinamička mreža prekriva površinu od oko 800 km². Osnovna je karakteristika te pretežno rasterski oblikovane mreže da međusobna udaljenost točaka iznosi prosječno 7 km u neizgrađenom dijelu, a na izgrađenom području grada ta je gustoća nešto veća. Naime, s obzirom na to da je područje Grada Zagreba seizmički vrlo aktivno, što će biti detaljnije opisano u sljedećem poglavlju, mreža je projektirana tako da je njome optimalno obuhvaćen recentni strukturni sklop. Točke mreže postavljene su u odnosu na rasjedne zone na položaje koji će najvjernije prikazati geodinamička zbivanja na području proučavanja.

Osim toga vodilo se računa o svim kriterijima koje takva mreža mora zadovoljiti na cijelom području protezanja zbog svoga interdisciplinarnoga značenja, a to su:

- određeni broj točaka dobro raspoređenih u mreži treba biti dobro određen po visini, pa su lokacije odabirane tako da se nalaze u blizini očuvanih i visinski pouzdanih repera II NVT, kako bi se s njih metodom preciznoga geometrijskog nivelmana prenijela što je moguće točnija visina na novu točku,
- odabrani položaj točke treba osigurati njezinu maksimalno dostižnu postojanost kroz dulje razdoblje (uvažavanje rasjednih zona, klizišta, izbjegavanje blizine velikih gradilišta i dr.),
- točke trebaju na terenu biti lako pristupačne, tj. njihova lokacija mora imati osiguran pristup vozilom i ako nije izvedivo neposredno uz konkretnu temeljnu točku, onda barem u njezinoj dovoljnoj blizini,
- položaj svake točke mora biti odabrana tako da postoji neometan prijam GPS-signala, odnosno da u okolici točke nema fizičkih zapreka viših od 10 do 15° iznad horizonta, i to posebno na južnom, jugozapadnom i jugoistočnom dijelu horizonta (Solarić M. i dr. 1995),
- točka se ne smije nalaziti u blizini jakih odašiljača i visokonaponskih vodova, moraju se izbjegavati objekti i predmeti koji mogu zbog refleksije prouzročiti smetnje u prijemu GPS-signala.

Sveukupno su još 1997. godine izgrađena 33 stupa današnje Geodinamičke mreže Grada Zagreba, i to 32 stupa nadzemne stabilizacije i jedan stup podzemne stabilizacije (u strogom centru grada), što je detaljno opisano u (Medak i Pribičević 2002). Preostalih 7 točaka ima drugačiju stabilizaciju, koja također zadovoljava sve uvjete koji su postavljeni pred tu specijalnu mrežu. Dakle, mreža se sastoji od 43 točke, a raspored točaka prikazan je na slici 1.

S obzirom na to da je izvođenje prve opažачke kampanje planirano nešto više od mjesec dana nakon završetka gradnje stupova mreže, odlučeno je ispitivati pomake vrha stupa na koji je ugrađen mjedeni vijak za GPS-antenu zbog skupljanja betona.

Pomak vrha betonskog stupa Δl po visini na koji je ugrađen mjedeni vijak izračunan je kao suma apsolutnih deformacija od skupljanja pilota Δl_P , temelja Δl_T i stupa Δl_S prema:

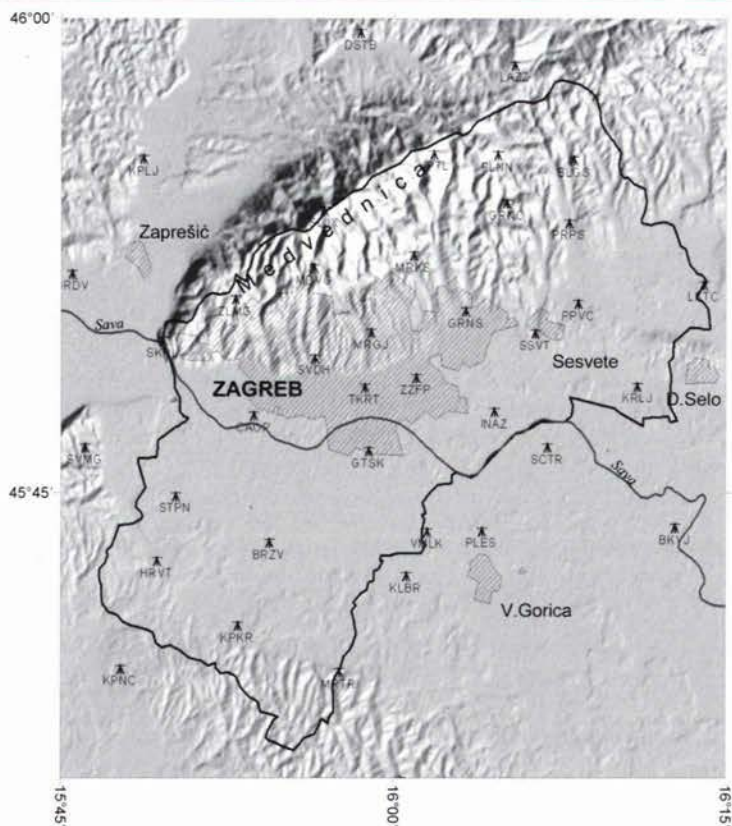
$$\Delta l = \Delta l_P + \Delta l_T + \Delta l_S, \quad (1)$$

$$\Delta l = \varepsilon_{sP(t)} l_P + \varepsilon_{sT(t)} l_T + \varepsilon_{sS(t)} l_s, \quad (2)$$

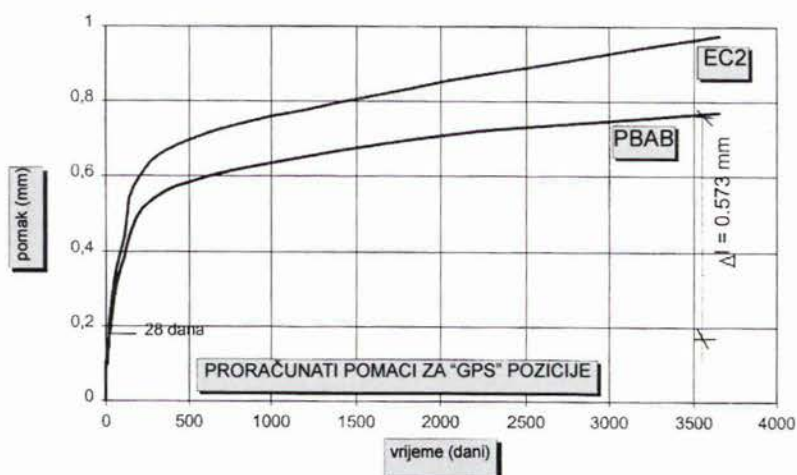
gdje su $\varepsilon_{sP(t)}$, $\varepsilon_{sT(t)}$ i $\varepsilon_{sS(t)}$ koeficijenti skupljanja pilota, temelja i stupa u vremenu t .

Deformacije skupljanja betona izračunane su prema Pravilniku o tehničkim normativima za beton i armirani beton (PBAB) i Eurocode no.2 normi (EC2). Konačne vrijednosti deformacija prikazane su na slici 2.

Iz slike 2 vidljivo je da je najveći prirast deformacija skupljanja betona u prvih 28 dana starosti betona, a ukupni je pomak manji od 1 mm, te je evidentno da nema praktički utjecaj na provedena geodetska mjerenja.



Slika 1. Raspored točaka Geodinamičke mreže Grada Zagreba.



Slika 2. Grafički prikaz računanih pomaka vrha stupova po visini za visinu stupa od 1,30 m.

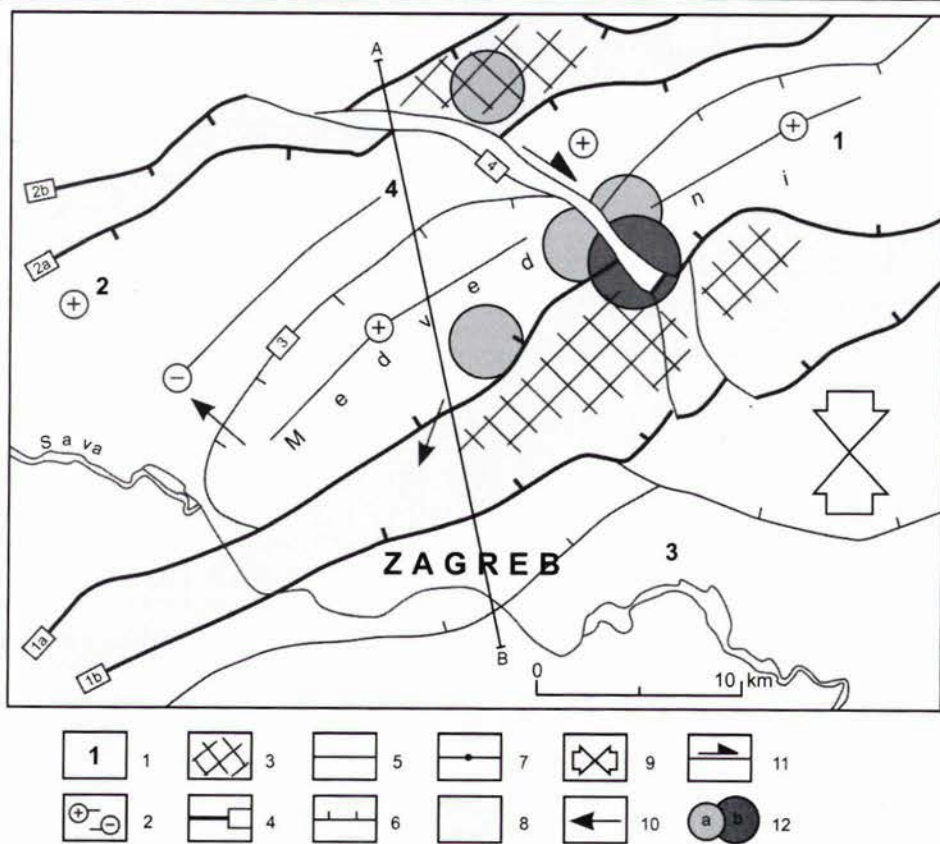
3. Geološki strukturni sklop i recentna tektonska aktivnost

Medvednica i okolica Zagreba nalaze se u Panonskom bazenu i to u graničnoj zoni, između zapadnog i središnjeg dijela bazena. Ta je zona predstavljena Žumberačko-medvedničkim rasjedom. Ona je širine 12–25 km, duljine oko 100 km i orijentacije sjeveroistok-jugozapad. Granice su označene Zagrebačkim rasjedom (1) i rasjedom Kostanjevica-Brežice-Križevci (2, slika 3). Ti rasjedi čine dodatne zone na površini, široke između 2 i 8 km. Duž pružanja rasjedi su većinom reversni, no ipak postoji promjena nagiba, mjestimice i karaktera. Područje Zagreba presijeca Zagrebački rasjed (1). Glavni rasjedi iz zone prate se na potezima: Podsused-Markuševac-Kašina-Zelina (1a) i Kerestinec-Ilica-Maksimira-D. Zelina (1b). Unutar zone postoji više ograna. Zajedno čine snop paralelnih rasjeda različitog nagiba i karaktera. Najčešći su nagibi između 70° i 80°. U Medvednici se ističe i rasjed Bistra-Laz (3), koji je reversan s vergencijom (nagibanjem) prema sjeverozapadu, čini zonu širine do 1 km. Posebnu važnost ima rasjed Stubica-Kašina (4), jer dijeli Medvednicu na dva bloka. Zona rasjeda široka je do 1,5 km.

U Medvednici je stalno prisutna tektonska aktivnost. Na to upućuju učestale pojave potresa. Najjači potresi dogodili su se oko Kašine, Planine, Markuševca i Stubice. Do sada poznati seizmotektonski model (Prelogović i Cvijanović 1981, Prelogović i Kuk 1998, Prelogović i dr. 1998, Kuk i dr. 2000, Pribičević i dr. 2003) pokazuje kompresiju prostora Medvednice, uzrokovanu pomacima Dinarida i Alpa, te odupiranje masa središnjeg dijela Panonskog bazena tim pomacima. U deformacijama Medvednice važnu ulogu imaju stijene velike gustoće, koje se nalaze u njezinoj jezgri. Njihov položaj i pružanje vidljivi su iz gravimetrijskih maksimuma (Pribičević i Medak, 2001). U zonama rasjeda postoje skokoviti pomaci stijena u dubini (slika 3). Oni se iskazuju većim gravimetrijskim gradijentima i označavaju tektonski najaktivnije prostore.

U zoni Žumberačko-medvedničkog rasjeda između pojedinih struktura, zbog tektonskih pokreta, nastaje polje stresa, koje izravno utječe na deformacije sklopa. Orijehtacija je maksimalnoga kompresijskog stresa sjever-jug. To se očituje reversnim pomacima i to suprotne vergencije duž graničnih rasjeda zone Žumberak-Medvednica. Ne posve poprečni odnosi stresa i pružanja struktura rezultiraju dijagonalnim pomacima krovinskih krila rasjeda u prostoru. Stoga su prisutni desni i lijevi pomaci dijelova Medvednice. Desni pomak osobito je vidljiv duž zone rasjeda Stubica-Kašina (3).

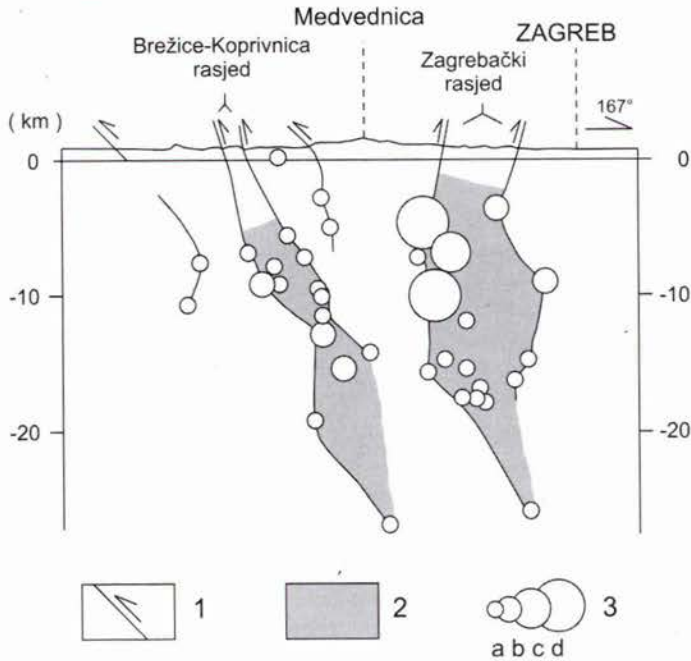
Podaci o žarištima potresa pokazuju da se seizmotektonski aktivne zone u prostoru izravno pridružuju rasjedima Žumberačko-medvedničke zone (slika 4). Najjači potresi u Medvednici dogodili su se u zoni Zagrebačkog rasjeda (1). Još je važno naglasiti da stalni tektonski pokreti rezultiraju pomacima dijelova Medvednice osobito izraženima u zonama rasjeda. Na slici 3 označeni su srednji smjerovi pomaka dobiveni geološkim mjerenjima na površini. Ti će se pomaci u sklopu budućih istraživanja usporediti s geodetskim zbog dobivanja stvarnih odnosa akcijskih tektonskih pokreta i reakcijskih pomaka i deformacija strukturnog sklopa.



Slika 3. Geološki strukturni sklop Medvednice.

Legenda:

- A. **Strukture:** 1 – Medvednica (1), Marija Gorica (2), Savski bazen (3), Stubički podbazen (4); 2 – osi maksimuma i minimuma gravimetrijskih Bouguerovih anomalija; 3 – zone većih gravimetrijskih gradijenata.
- B. **Zona Žumberačko-medvedničkog rasjeda** (trase graničnih rasjeda na površini): Zagrebački rasjed (1a – dionica Sv. Nedelja-Podsused-Markuševec-Kašina-Zelina, 1b – Jastrebarsko-Kerestinec-Ilica-Maksimira-D. Zelina); rasjed Kostanjevica-Brežice-Križevci (2a,b – trase graničnih rasjeda zone).
- C. **Najvažniji rasjedi Medvednice:** 5 – rasjed Bistra-Laz (3), rasjed Stubica-Kašina (4), te važni prateći rasjedi; 6 – oznaka za reversne rasjede; 7 – oznaka za dionice rasjeda bez sigurno određenog karaktera; 8 – zone rasjeda.
- D. **Recentna tektonska aktivnost:** 9 – orijentacija maksimalnog kompresijskog stresa; 10 – smjer pomaka dijelova Medvednice uz površinu; 11 – rasjed s prevladavajućim horizontalnim pomakom krila; 12 – epicentri najjačih potresa (a) i posebno potresa iz 1880. godine (b).



Slika 4. Seizmotektonski profil. Legenda: 1 - rasjed; 2 - seizmotektonski aktivna zona; 3 - hipocentri potresa magnitude a: $M \leq 4$, b: 4-5, c: $M = 5,6$, d: $M \geq 6$.

4. Osnove naprezanja i deformacija u geodetskoj geodinamici

Naprezanje koje se javlja zbog pritiska na tektonske ploče (engl. *stress*) i njima izazvane deformacije (engl. *strain*), (Turcotte i Schubert 2001), temelje se na osnovnom teoremu kinematike, što ga je 1858. formulirao Helmholtz:

“Promjena položaja infinitezimalnog područja oko točke deformabilnog tijela je u prvoj aproksimaciji jednaka sumi translacije $u^{[T]}$, rotacije $u^{[R]}$ i dilatacije $u^{[D]}$.”

Teorem je moguće izvesti razvojem Taylorova reda (Straub 1996). Neka je $x(t_1)$ vektor položaja u vremenu t_1 i $x(t_2)$ vektor položaja u vremenu t_2 . Razlika između dvaju položajnih vektora je vektor pomaka $u(x, \Delta t = t_2 - t_1)$. Zanimare li se članovi višega reda, imamo:

$$u(x + dx) = u(x) + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot dx. \tag{3}$$

Sastavnice vektora u mogu se izraziti kao:

$$u_i(x + dx) = u_i(x) + \sum_{k=1}^3 \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \cdot dx_k, \tag{4}$$

gdje parcijalne derivacije $\left. \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right|_x = a_{ik}$ predstavljaju tenzor dimenzija 3×3 .

Svaku je kvadratnu matricu moguće rastaviti na simetrični i asimetrični dio:

$$u_i(x+dx) = u_i(x) + \sum_{k=1}^3 \frac{a_{ik} - a_{ki}}{2} \cdot dx_k + \sum_{k=1}^3 \frac{a_{ik} + a_{ki}}{2} \cdot dx_k = u_i^{[T]}(x) + u_i^{[D]}(x) + u_i^{[R]}(x). \quad (5)$$

Dakle, svaku je deformaciju deformabilnog tijela moguće aproksimirati razdvajanjem na tri sastavnice:

- prva sastavnica $u_i^{[T]}$ translacija je susjednih točaka,
- drugu sastavnicu $u_i^{[R]}$ moguće je transformirati u vektorski produkt

$$\sum_{k=1}^3 \frac{a_{ik} - a_{ki}}{2} \cdot dx_k = \frac{1}{2} \cdot (\text{rot } u \times dx) = R \cdot dx,$$

- treća sastavnica $u_i^{[D]} = \sum_{k=1}^3 \frac{a_{ik} + a_{ki}}{2} \cdot dx_k = \sum_{k=1}^3 \varepsilon_{ik} \cdot dx_k$, pri čemu je ε_{ik} simetrični dio tenzora koji se obično naziva tenzor deformacije.

Deformacijska analiza utemeljena na izloženome matematičkom modelu od velikog je značenja za obradbu geodetskih mjerenja u tektonski aktivnim područjima. Za fizikalnu interpretaciju deformacije nužno je još uvesti definiciju naprezanja koja djeluje na tijelo:

$$p_i^{(n)} = \sum_{k=1}^3 \sigma_{ik} \cdot n_k, \quad (6)$$

gdje je: n_k normala na plohu

σ_{ik} tenzor naprezanja

$p_i^{(n)}$ vektor naprezanja koji djeluje na površinu.

Dijagonalni elementi tenzora naprezanja daju veličinu naprezanja u smjeru okomitom na površinu (normalno naprezanje). Nediagonalni elementi daju veličinu naprezanja u tangencijalnom smjeru (posmično naprezanje).

Odnos naprezanja i deformacije moguće je matematički izraziti uz pomoć Navier-Hookeova zakona:

$$\sigma_{ij} = 2\mu \cdot \varepsilon_{ij} + \lambda \cdot \Theta \cdot \delta_{ij}, \quad (7)$$

gdje je: λ prva Laméova konstanta

μ druga Laméova konstanta

δ Kroneckerov simbol

Θ dilatacija volumena

ε dilatacija duljine.

Laméove konstante ovise o elastičnosti i rigidnosti materijala. U geoznanostima se češće koriste Youngov modul elastičnosti E i Poissonov omjer ν , koji se mogu izračunati iz Laméovih konstanti.

Posebno značajna veličina, koja se može izvesti iz tenzora naprezanja i deformacije, gustoća je deformacijske energije D_E .

$$D_E = \frac{1}{2} \text{trag}(\sigma \cdot \varepsilon) = \mu \left(\left(\varepsilon_{ji} + \frac{\lambda \Theta}{2\mu} \right) \cdot \varepsilon_{ij} \right). \quad (8)$$

Gustoća energije može se izraziti kao [J m^{-3}], tj. pomoću osnovnih jedinica mehanike ovako [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$]. Lokacije s visokom gustoćom energije upućuju na mjesta visokoga potencijalnoga potresnog rizika. Iz svega navedenoga jasno je da se uz pomoć pažljivo planiranih i vrlo preciznih geodetskih mjerenja mogu postupcima deformacijske analize dobiti iznimno važni parametri za realnu procjenu potresnog rizika. Uključivanje geodezije u interdisciplinarna geoznanstvena istraživanja geodinamičkih fenomena nužno je upravo zbog toga što su geodetska mjerenja izvor egzaktnih veličina koje idealno upotpunjavaju modele geologa, tektoničara i seizmičara.

5. GPS-opažanja u Geodinamičkoj mreži Grada Zagreba

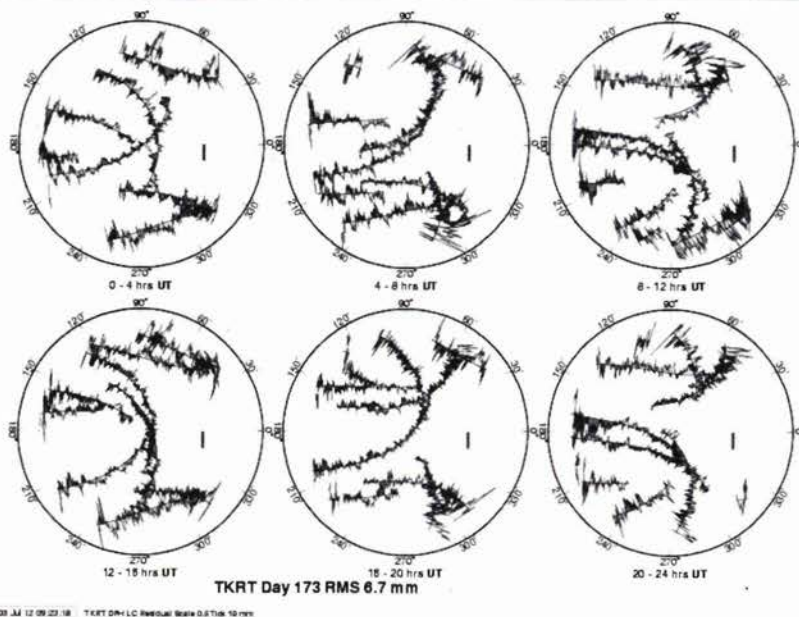
Na točkama geodinamičke mreže Grada Zagreba izvodila su se GPS-mjerenja u tri kampanje: 1997. i 2001. godine opažana je cijela mreža (Medak i Pribičević 2001 i 2002), dok je 2003. godine obuhvaćeno ciljanih 13 točaka (Medak i Pribičević 2003b). U tablici 1 pregledno su navedeni podaci o broju točaka, sesija, instrumenata za sve tri kampanje.

Tablica 1. Pregled izvedenih GPS-opažanja u Geodinamičkoj mreži Grada Zagreba.

Kampanja	Datum	Broj sesija	Broj točaka	Broj uređaja
Zagreb 1997	27. 10. 1997. – 29. 10. 1997.	2	43	27
Zagreb 2001	25. 06. 2001. – 28. 06. 2001.	3	40	16
Zagreb 2003	22. 06. 2003. – 23. 06. 2003.	1	13	13

Za obradbu GPS-mjerenja i primjenu metoda deformacijske analize na rezultate obradbe korišten je znanstveni softver GAMIT (King i Block 1995), kojega se skraćeni opis daje u nastavku.

Programski paket za analizu GPS-mjerenja GAMIT (GPS At MIT) razvijen je u suradnji Odjela za geo, atmosferske i planetarne znanosti (Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences) glasovitoga Massachusetts Institute of Technology (MIT) sa Scripps Institution of Oceanography, University of California at San Diego (Dong i dr. 1998). Riječ je o znanstvenom softveru koji nije specifično vezan ni za jednog proizvođača GPS-opreme.



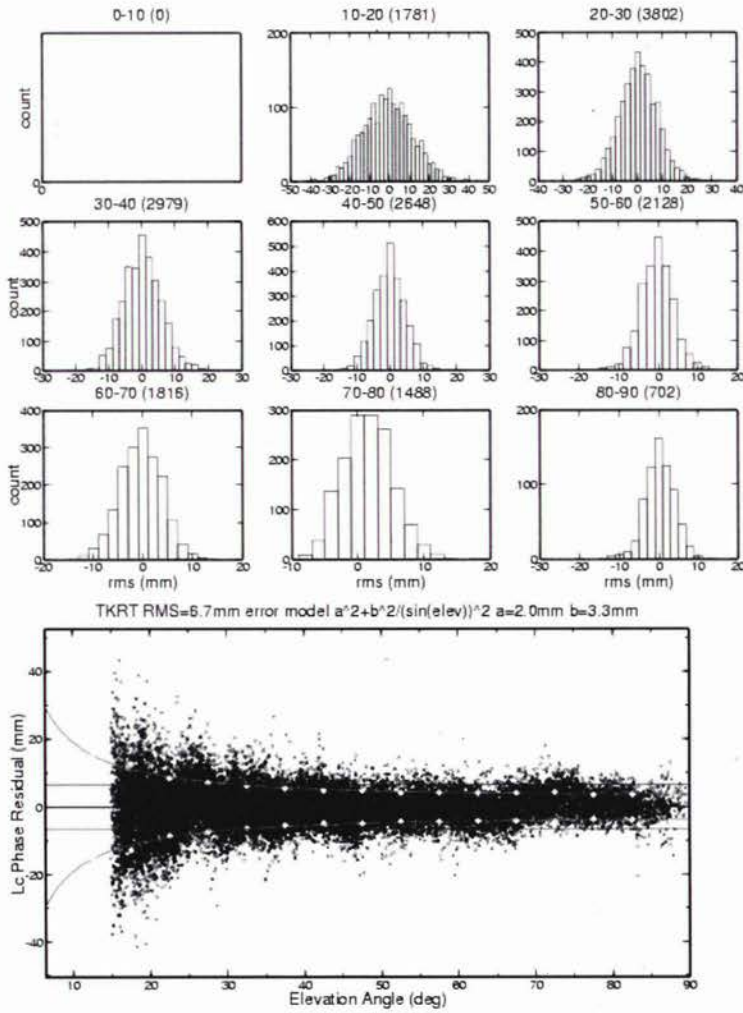
Slika 5. Grafički prikaz reziduala za pojedine satelite tijekom 24 sata opažanja na točki Trg kralja Tomislava.

Obradba GPS-mjerenja programskim paketom GAMIT sastoji se od tri koraka. Primarni rezultat obrade mjerenja programom GAMIT slobodno je rješenje koje se sastoji od procijenjenih parametara i odgovarajućih kovarijanci za svaki pojedinačni eksperiment (najčešće jedan dan simultanih opažanja). Primjeri vizualizacije međurezultata dani su na slikama 5 i 6. Tako dobiveno rješenje prosljeđuje se programu GLOBK (GLOBAL Kalman filter). Uloga je toga programa kombiniranje podataka iz više sesija (dana) radi dobivanja položaja i brzina opažanih točaka, kao i parametara orbita satelita i Zemljine rotacije. U drugom se koraku pojedinačni eksperimenti kombiniraju u jedinstveno rješenje koje dopušta stohastičko variranje parametara. Na kraju se u trećem koraku postavljaju definitivni uvjeti za fiksne točke i brzine, čime se definira referentni okvir konačnog rješenja. Postupak obradbe detaljnije je opisan u radovima (Medak i Pribičević 2002 i 2003b).

Rezultat obradbe detaljan je ispis svih mogućih parametara (koordinata točaka, duljina i komponenata vektora) s pripadajućom ocjenom točnosti za svaki podatak. Postignuta točnost u sve tri mjerne kampanje u geodetskom je smislu izvanredna: za položajne koordinate 1–2 mm dok je visinska komponenta nekoliko puta netočnija (tablica 2). Niža točnost u kampanjama 2001. i osobito 2003. može se pripisati periodičkom maksimumu Sunčeve aktivnosti, koji je nastupio upravo u navedenom razdoblju.

Konačno se iz rezultata mogu izračunati relativne brzine pomaka. Pri tome se mogu primijeniti dvije različite metode.

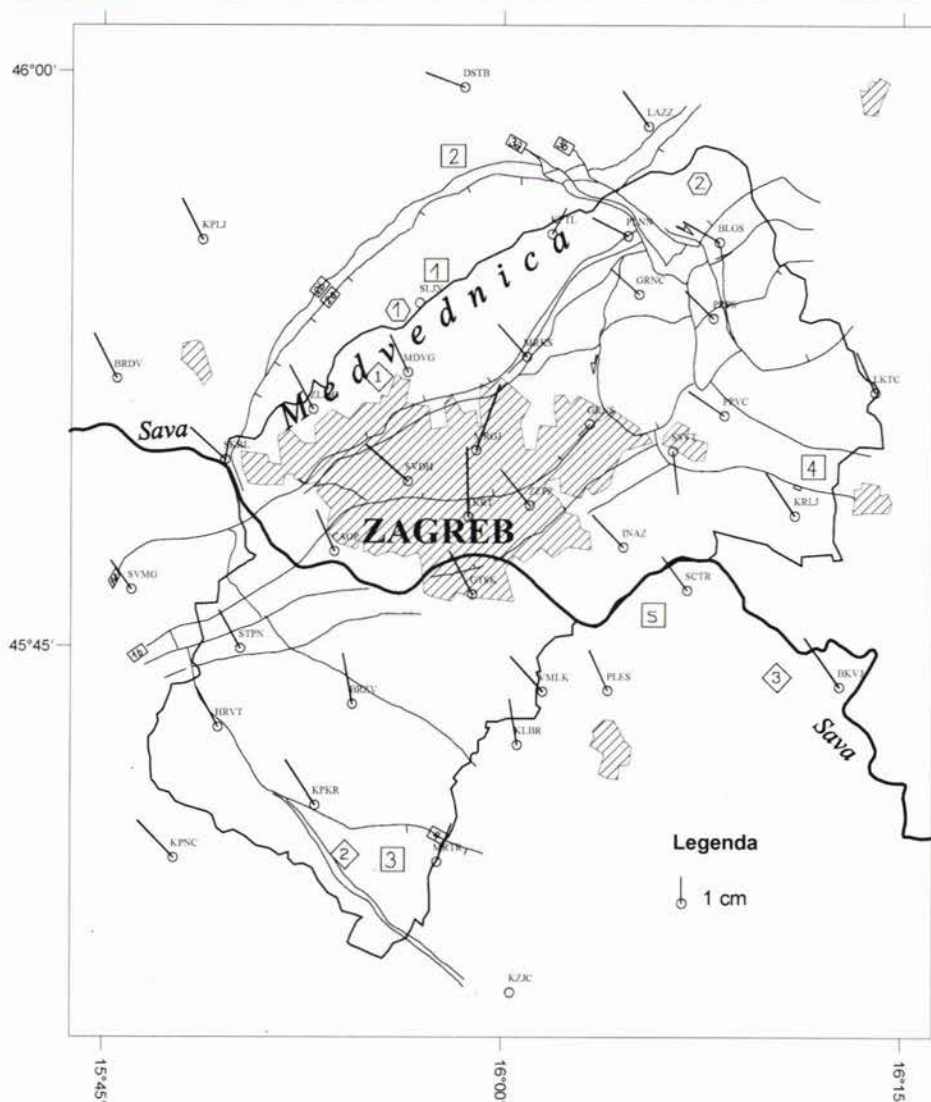
Prema prvoj metodi jedna se točka fiksira (u ovom slučaju trigonometrijska točka Kozjača), a relativni pomaci i odgovarajuće brzine izračunaju se iz razlika koordi-



Slika 6. Grafički prikaz reziduala GPS-mjerenja prema elevaciji satelita za točku Trg kralja Tomislava.

Tablica 2. Ocjena točnosti koordinata točaka u Geodinamičkoj mreži Grada Zagreba po kampanjama.

Kampanja	Broj točaka	m_p [mm]			m_i [mm]			m_h [mm]		
		min	max	sredina	min	max	sredina	min	max	sredina
Zagreb 1997	43	0,6	1,4	0,9	0,8	1,7	1,1	2,9	9,3	4,6
Zagreb 2001	40	0,9	1,8	1,3	1,1	2,4	1,6	4,0	11,5	6,3
Zagreb 2003	13	1,6	3,1	2,0	2,0	3,8	2,4	8,0	19,9	10,3



Slika 7. Horizontalni pomaci točaka u Geodinamičkoj mreži Grada Zagreba 1997-2001 i strukturalni sklop područja Grada Zagreba.

nata za svaku točku u odnosu na fiksiranu. Rezultat takvog postupka vizualiziran je na slici 7. Temeljni mu je nedostatak što postoji teorijska mogućnost da se giba fiksna točka u odnosu na cjelovitu mrežu, a ne obratno.

Druga se metoda zasniva na približnom fiksiranju više točaka referentnog okvira unutar mreže, nakon čega se posebnom tehnikom Kalmanova filtra pronalaze optimalne procjene kako za točke referentnog okvira, tako i za sve ostale točke u mreži. Istodobno se automatski izračunavaju i pomaci.

6. Zaključak

U Geodinamičkoj mreži Grada Zagreba u prethodnih 7 godina izvedene su tri mjerne kampanje u svrhu određivanja geodinamičkih pomaka u prostoru Grada Zagreba. Interdisciplinarnom analizom i usporedbom horizontalnih i vertikalnih brzina dobivenih geodetskim mjerenjima s geološkim strukturama i tektonskim pomacima u Medvednici, uz uvažavanje metoda deformacijske analize, došlo se do sljedećih zapažanja:

- Smjerovi horizontalnih pomaka u geodinamičkim točkama mjerenja suprotni su smjerovima pomaka utvrđenima na plohama rasjeda. To upućuje na prisutne reverzne pomake u zoni Zagrebačkog rasjeda (Prelogović i Kuk 1998).
- Prevladavajući smjer horizontalnih pomaka sjever-sjeverozapad vjerojatno znači da su kretanja masa stijena u širem prostoru Zagreba (zapadni rubni dio Panonskog bazena, sjeverozapadno od Medvednice) suprotnog smjera. To izaziva kompresiju u Medvednici i veću recentnu seizmotektonsku aktivnost.
- Najveće vrijednosti horizontalnih i vertikalnih brzina sigurno označavaju i mjesta ili zone tektonskih pomaka u razdoblju mjerenja. U tom smislu nazire se aktivnost zone Zagrebačkog rasjeda (dionica Sv. Nedjelja-Markuševac) i Stubičkog rasjeda. Tomu je podudarna i relativno veća seizmička aktivnost zapadnog dijela Medvednice, zabilježena u posljednje tri godine (Pribičević i dr. 2003).
- Iz dobivenih pomaka može se zaključiti da se u slučaju točke Sveti Duh najvjerojatnije radi o klizištu, dok se pomaci na permanentnoj stanici Katastar Sesvete mogu pripisati kvaliteti temeljenja zgrade, koja ne udovoljava strogim uvjetima geodinamičkih mjerenja.
- Pomak na točki Blaguša upućuje na to da je upravo ondje najzanimljivije i najaktivnije područje u smislu daljnjeg praćenja aktivnosti na području Geodinamičke mreže Grada Zagreba.

Treba napomenuti da će buduća nova geodetska mjerenja pokazati ponešto drugačije smjerove brzina, što je u skladu sa stalno prisutnom promjenom intenziteta seizmotektonske aktivnosti, te promjenama smjerova tektonskih pomaka dijelova Medvednice i općeg stanja režima kompresije u aktivnom prostoru.

Iz prethodnog je poglavlja vidljivo da se veličina horizontalnih pomaka kreće u rasponu od –25 mm do 25 mm, te se s obzirom na točnost provedenih opažanja mogu smatrati pravim horizontalnim geodinamičkim pomacima nastalim u razdoblju između 1997. i 2001. godine. Veličina pomaka pokazuje da se na području Grada Zagreba događaju evidentne geodinamičke aktivnosti, što potvrđuje opravdanost predmetnih istraživanja. U vertikalnom smislu pomaci su nešto veći što valja pripisati manjoj točnosti određivanja visina GPS metodom.

Vidljivo je nakon navedenih zaključaka da je ta specijalna geodetska (geodinamička) mreža u potpunosti opravdala svoju svrhu. Geodetski stručnjaci tim su projektom dokazali da svojim visoko preciznim mjerenjima zauzimaju važno mjesto u interdisciplinarnim istraživanjima važnima za Grad Zagreb, političko, gospodarsko i kulturno središte Republike Hrvatske.

Tu se ponajprije misli na potrebnu izradbu nove karte mikrosezmičke rajonizacije za područje Grada Zagreba. Prvi stvarni doprinos geodetskih stručnjaka tom veli-

kom projektu može biti "Geodetsko-geodinamička studija prostora Grada Zagreba", kao logičan nastavak predmetnih istraživanja.

Naravno, predmetna geodinamička mjerenja treba i dalje ponavljati svake 2 do 3 godine, te će se tako s vremenom odrediti stvarni tijek i potpunija slika o geodinamičkim zbivanjima na području Grada Zagreba. Za dobivanje još bolje slike tih zbivanja, koja će poslužiti za izradbu prve geodinamičke studije Grada Zagreba, presudna je kampanja koju bi obavezno trebalo izvesti 2004. godine na svim točkama mreže.

ZAHVALA. Zavod za katastar i geodetske poslove Grada Zagreba pruža predmetnim istraživanjima aktivnu potporu od samog početka projekta "GPS-mreža Grada Zagreba". Autori se ovom prilikom žele zahvaliti svim djelatnicima Zavoda koji su sudjelovali na projektu, a posebice pročelniku Stjepanu Galiću, ing. geod., na iznimnom razumijevanju cjelokupne problematike i nesebičnoj pomoći u svim fazama istraživanja.

Literatura

- Altiner, Y. (1999): Analytical Surface Deformation Theory for Detection of the Earth's Crust Movements. Springer Verlag.
- Anderson, H., Jackson, J. (1987): Active tectonics of the Adriatic region. *Geophysics*. Y.R.A.S., 91, 937–983.
- Čolić, K., Prelogović, E., Pribičević, B., Švehla, D. (1999): Hrvatski geodinamički projekt CRODYN i GPS mreža grada Zagreba. Znanstveni skup Andrija Mohorovičić – 140. obljetnica rođenja: zbornik radova, Bajić, A. (ur.), Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb, 141–152.
- Dong, D.-N., Herring, T. A., King, R. W. (1998): Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data. *Journal of Geodesy*, 72, 200–214.
- Keller, E. A., Pinter, N. (2002): Active Tectonics, Earthquakes, Uplift and Landscape. Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- King, R. W., Block, Y. (1995): Documentation for the MIT GPS analysis software: GAMIT. Massachusetts Institute of Technology.
- Kuk, V., Prelogović, E., Sović, L., Kuk, K., Šariri, K. (2000): Seizmološke i seizmotektonske značajke šireg zagrebačkog područja. *Gradevinar*, 52/11, 647–653, Zagreb.
- Mantovani, E., Albarello, D., Babbucci, D. R., Tamburelli, C., (1992): Recent Geodynamic Evolution of the Central Mediterranean Region. *Tipografia Senese*, 1–88, Siena.
- Medak, D., Pribičević, B. (2001): Geodynamic GPS-Network of the City of Zagreb – First Results. The Stephan Mueller topical conference of the European Geophysical Society: Quantitative neotectonic and seismic hazard assesment: 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.), Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 145–156.
- Medak, D., Pribičević, B. (2003a): Processing of Geodynamic GPS-Networks with GAMIT Software. *Reports on Geodesy*, Warsaw University of Technology, 1 (64), 75–84.

- Medak, D., Pribičević, B. (2003b): Elaborat o izvršenim radovima na projektu Geodinamička mreža Grada Zagreba – serija mjerenja "Zagreb 2003", Zagreb.
- Prelogović, E., Cvijanović, D. (1981): Potres u Medvednici 1880. godine. Geološki vjesnik, 34, 137–146, Zagreb.
- 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.
- Prelogović, E., Saftić, B., Kuk, V., Velić, J., Dragaš, M., Lučić, D. (1998): Tectonic activity in the Croatian part of the Panonian basin. Tectonophysics, 297, 283–293.
- Pribičević, B., Medak, D. (2001): Utjecaj gustoće pripovršinskih masa Zemljine kore na geoidne undulacije. Geodetski list 1, 19–31.
- Pribičević, B., Medak, D., Prelogović, E. (2003): Investigation of geodynamics of Adriatic micro-plate by means of geodetic, geophysical and geologic methods. Reports on Geodesy, Warsaw University of Technology, 1 (64), 85–92.
- Skoko, D., Mroković, J. (1992): Andrija Mohorovičić. Školska knjiga Zagreb.
- Solarić, M., Bilajbegović, A., Capek, B., Podunavac, B. (1995): Analiza ovisnosti "vidljivosti" GPS satelita o geografskoj širini mjesta mjerenja. Geodetski list 1, 5–13.
- Solarić, M. (1999): Suradnja srednjoeuropskih zemalja u geodeziji i geodinamici. Znanstveni skup Andrija Mohorovičić – 140. obljetnica rođenja: zbornik radova, Bajić, A. (ur.), Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb, 165–177.
- Straub, C. (1996): Recent Crustal Deformation and Strain Accumulation in the Marmara Sea Region, N.W. Anatolia, inferred from GPS Measurements. Mitteilungen des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie an der ETH Zurich, Nr. 58.
- Turcotte, D. L., Schubert, G. (2001): Geodynamics. Second Edition, Cambridge University Press.

Geodynamics of the area of the City of Zagreb

ABSTRACT. This paper presents interdisciplinary research of geodynamic processes of the wider area of the City of Zagreb. Research is conducted under the project „Geodynamic network of the City of Zagreb“, with dominant participation of geodesists with significant contribution of other geoscientists. After three series of GPS-measurements, the analysis of the first results with scientific software GAMIT show significant geodynamic activity in the research area. In order to get more reliable results, new measurements have been planned as well as adding new geoscientists to the research team. The continuation of the research is foreseen through the project „Geodectic-geodynamic study of the area of the City of Zagreb“.

Keywords: geodynamics, tectonics, GPS, processing of geodetic measurements, GAMIT.

Prihvaćeno: 2004-1-20