

UDK 528.28:629.783:550.34.034:534.64

Izvorni znanstveni članak

Prijedlog da se u Zagrebu i okolici uz CROPOS-ove stanice postavi i nekoliko GPS (GNSS)-permanenitnih stanica za geodinamiku i moguću najavu većeg potresa u sljedećem vremenskom razdoblju

Nikola SOLARIĆ, Miljenko SOLARIĆ – Zagreb¹

SAŽETAK. U uvodu je ukratko opisano kako su Japanci 2000. godine izgradili mrežu od čak 1200 GPS² (GNSS)³-permanenitnih stanica. U kontrolnom centru primaju se svi podaci mjerenja, obrađuju i određuju srednje dnevne koordinate položaja X, Y i Z stanica, kako bi se odredilo pomicanje Zemljine kore. Prof. S. Murai i H. Araki patentirali su pronalaženje GPS-signalu prije potresa pomoću računanja promjena površina trokuta u vrhovima kojih su GPS-stanice. Za 162 potresa veća od magnitude 6. stupnja po Richteru u Japanu su dobili prethodni GPS-signal za potres od jednog do 90 dana prije potresa. U drugom poglavlju opisan je pozicijski sustav CROPOS⁴ u Hrvatskoj, koji je uspostavljen 2008. godine. U njemu se nalazi 30 permanentnih GPS-stanica, a uz naknadnu obradu GPS-podataka pomoću Bernese GPS-softera verzija 5.0 postiže se visoka preciznost određivanja koordinata točaka na milimetar. Slični pozicijski sustav AGROS⁵ u Srbiji, koji također ima 30 GPS (GNSS)-stanica, radio je i kad se dogodio potres magnitude 5,4 stupnja po Richteru 3.11.2010. u okolici Kraljeva. S. Đalović i J. Škrnjug obradili su podatke mjerenja 6 dana prije i 4 dana nakon potresa s Bernese GPS-softerom verzija 5.0. Rezultate promjena duljina objavili su u tablicama, a kad smo te rezultate prikazali grafički pronašli smo prethodni GPS-signal za potres 2 dana prije potresa. To znači da GPS-mjerenja daju novu kvalitetu, jer mjerenja seizmografima daju informaciju o potresima tla, a GPS-mjerenja određuju promjene udaljenosti između GPS-točaka. Tako obični seizmografi slabo određuju vrlo spore linearne pomake zemljine kore,

¹ Prof. emeritus dr. sc. Nikola Solarić, član emeritus Akademije tehničkih znanosti Hrvatske, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: nikola.solaric@geof.hr, prof. dr. sc. Miljenko Solarić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: miljenko.solaric@geof.hr.

² GPS – Global Position System (globalni pozicijski sustav).

³ GNSS – Global Navigation Satellite Systems (Globalni navigacijski satelitski sustavi).

⁴ CROPOS – CROatian POSition System (Hrvatski pozicijski sustav).

⁵ AGROS – Aktivna geodetska referentna osnova Srbije.

koji nisu potresi, a GPS-prijamnici to mogu. Zato očekujemo da će se i GPS-stanice iz CROPOS-a moći koristiti u geodinamici, a i seizmologiji. Zatim se predlaže da se u Zagrebu s okolicom uz CROPOS-ove stanice postavi oko 10 novih dobro stabiliziranih GPS-stanica. Podaci mjerenja skupljali bi se i obrađivali s najnovijom verzijom Bernese GPS-softera u CROPOS-ovu kontrolnom centru, a zatim i računale dnevne promjene udaljenosti između GPS-točaka koje mogu dati prethodni GPS-signal o potresu, prije potresa. Naravno, tu bi metodu trebalo kombinirati s drugim postojećim geofizičkim metodama. Konačnu odluku o najavi prethodnoga GPS-signala za potres dali bi seizmotehničari, koji imaju i svoja mjerenja na rasjedima. To bi bilo bolje nego da se određuju automatski prema grubim pogreškama mjerenja, jer Zemlja nije kruta. Kad se ta metoda uhoda u Zagrebu s okolicom, ona bi se mogla proširiti na Dubrovnik, Split i Rijeku, kao i u susjednim zemljama. Vjerujemo da bi se za taj projekt mogla dobiti financijska potpora od Europske Unije.

Ključne riječi: seizmograf, GPS, GNSS, permanentne GPS-stanice, CROPOS-ov pozicijski sustav, AGROS-ov pozicijski sustav, najava potresa.

1. Uvod

Japan je smješten na tektonski vrlo nestabilnom dijelu Zemlje, gdje se sudaraju ploče Zemljine kore: Pacifička, Filipinska, Sjevernoamerička i Euroazijska. Zato se u Japanu događaju česti potresi. Prema tome potpuno je razumljivo da su Japanci životno zainteresirani za predviđanje kad će se dogoditi potres. Zato nije ni čudo da su uložili znatna financijska sredstva za izgradnju guste mreže GPS-permanentnih stanica. Tako je GSI (Geographic Survey Institute) iz Japana 2000. godine izgradio čak 1200 GPS-permanentnih stanica, postavljajući ih na stupove visoke 5 m. Pritom je razmak između GPS-permanentnih stanica od 20 km do 50 km (URL 1).

Prikupljeni podaci sa svih GPS-permanentnih stanica skupljaju se u njihovu računskom centru i obrađuju, te su dostupni javnosti. Iz skupljenih podataka računaju se srednje dnevne vrijednosti koordinata položaja u geocentričkom koordinatnom sustavu⁶ za sve pojedine GPS-permanentne stanice.

U Hrvatskoj također ima nekih područja koja su tektonski nestabilnija. Najugroženije je dubrovačko područje, gdje se po procjeni voditelja Seizmološke službe RH mr. sc. Vlade Kuka može dogoditi potres od maksimalne magnitude 7,5 stupnjeva po Richteru. Za sjeverozapadni dio Hrvatske, a to znači i za zagrebačko područje, procjenjuje se da se može dogoditi potres maksimalne magnitude od 6,5 stupnjeva po Richteru (URL 7). U Zagrebu je bio katastrofalan razorni potres 1880. godine (Prelogović i Cvijanović 1981, URL 5), koji je izazvao velika razaranja u gradu. Danas bi šteta bila znatno veća jer se grad proširio na veću površinu, a i znatno je

⁶ U geocentričkom koordinatnom sustavu ishodište je u središtu masa Zemlje (njezinu težištu), os X leži u presjeku ravnine meridijana u Greenwichu i ravnine ekvatora, os Y je usmjerena 90° istočno od osi X i leži u ravnini ekvatora, a os Z je usmjerena u smjeru rotacijske osi Zemlje. Prema teorijskoj mehanici materijalnog sustava središte masa Zemlje (težište Zemlje) je ona točka koja stalno zauzima isto mjesto, dok se pojedine čestice Zemlje s izvjesnom masom mogu kretati relativno oko središta masa, kao na primjer kretanje pojedinih ploča Zemljine kore, oceanskih struja vode, cirkulacije atmosfere itd. Zato je izabran taj koordinatni sustav i pri analizi trokuta.

povećan broj stanovnika. Prema statističkim podacima, postoji vjerojatnost od 63% (URL 6) da se jednom u 200 godina u Zagrebu dogodi potres jakosti oko 6 ili više stupnjeva po Richterovoj ljestvici. Zato bi prema iskustvima u Japanu bilo više nego poželjno da se u zagrebačkom području postavi gušća mreža GPS-permanentnih stanica. Pritom bi se mogle iskoristiti već postojeće CROPOS-ove referentne stanice progušćene s desetak novih GPS-permanentnih stanica ili kako to budu predložili seizmotektoničari. Korištenjem CROPOS-ovih referentnih stanica znatno bi se smanjili troškovi na uspostavljanju neke zasebne geodinamičke mreže GPS-permanentnih stanica.

Ako se iz skupljenih srednjih dnevnih vrijednosti koordinata položaja X , Y i Z GPS-permanentnih stanica izračunaju promjene razlika duljina između točaka u GPS-mreži, teško se može odrediti koja se točka pomicala, a koja je nepomična (Murai i Araki 2003). Zato su prof. emeritus Shunji Murai i Harumi Araki predložili da se iz srednjih dnevnih vrijednosti GPS-mjerenja analiziraju dnevne promjene površina u pojedinim trokutima formiranim između GPS-stanica. O tom je radu u Geodetskom listu prvi put informirao prof. emer. N. Frančula (2010). Murai i Araki taj su svoj postupak patentirali u Japanu 20. prosinca 2005. godine (URL 1).

U Japanu su formirali čak oko 6590 trokuta u različitim kombinacijama između GPS-permanentnih stanica. U tim trokutima, u većim potresima od 2000. do 2007. godine svakodnevno su provjeravali njihove površine, tj. njihove dnevne promjene omjera površina trokuta⁷ i da li one prelaze 3 sigma (standardnog odstupanja mjerenja s GPS-prijamnicima). Tako su za 162 potresa u Japanu veća od 6 stupnjeva po Richterovoj ljestvici u vremenskom razdoblju od 2000. do 2007. godine iz GPS-mjerenja utvrdili da je postojao prethodni GPS-signal, koji je najavljivao potrese prije samog potresa u vremenskom razdoblju od *jednog dana do 90 dana*. Osim toga zaključili su da se približno može odrediti epicentar potresa.

Analizirali su i potrese pomoću GPS-mjerenja na međunarodnim IGS⁸-stanicama za potrese na Sumatri, u Kini, Pakistanu i Kašmiru i pronašli prethodne GPS-sig-nale 6 do 10 dana prije potresa (Murai i Araki 2005, 2006, 2008, 2009).

2. O nekim mogućnostima primjene GPS-mjerenja u geodinamici

Geodeti su i prije željeli pomoći seizmolozima i ostalim geofizičarima oko proučavanja geodinamike i, eventualno, predviđanja potresa, pa su uz rasjede postavljali mikrotrigonometrijsko-trilateracijske mreže koje su povremeno mjerili u kampanjama elektroničkim teodolitima i elektrooptičkim daljinomjerima. Takva mjerenja nisu mogla dati pozitivan rezultat jer su se kontinuirano u vremenu događale deformacije terena. U okolici Zagreba u Kašini u blizini velikog rasjeda akademik Krešimir Čolić pokušao je postaviti takvu mikrogeodetsku mrežu. Geodeti

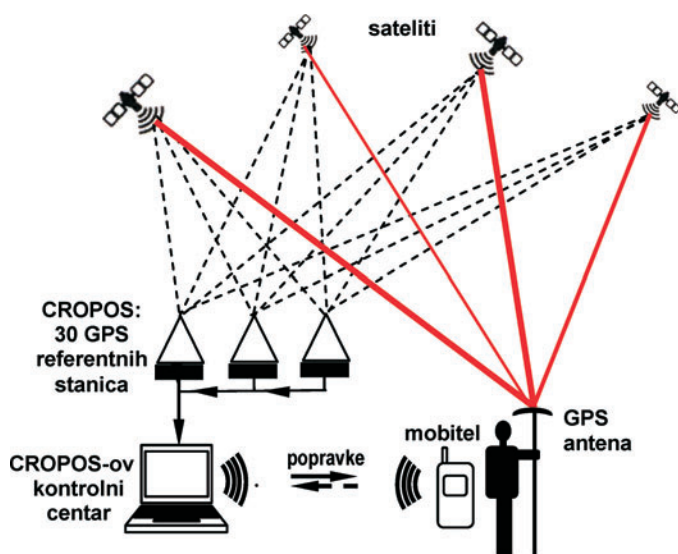
⁷ Dnevna promjena omjera površina trokuta [(površina trokuta nekog dana minus površina trokuta od prethodnog dana)/površina trokuta od prethodnog dana] izražena u ppm-ima (part per milion – dijelova po milijunu).

⁸ IGS – International GPS service.

s Tehničkog sveučilišta u Münchenu odlazili su na izmjeru slične mreže u Tursku, gdje se događaju česti potresi. Rezultata od takvih mjerenja bilo je vrlo malo, jer mjerenja nisu bila izvođena kontinuirano u vremenu, i te su mreže bile relativno male pa nisu obuhvaćale veće područje. Danas su GPS (GNSS)-mjerenja postala vrlo točna, gotovo milimetarske točnosti, i to na velikim udaljenostima, pa je tako izrađena i geodinamička mreža Grada Zagreba u GPS-kampanjama 1997, 2001, 2003, 2004, 2005. i 2006 (Pribičević i dr. 2007). Međutim, valja naglasiti da se danas ta suvremena mjerenja mogu izvoditi automatski s pomoću permanentnih GPS-stanica, sasvim kontinuirano i u dugom vremenskom razdoblju. To onda daje posebnu vrijednost u primjeni u geodinamici, a posebice u seizmologiji.

2.1. CROPOS-ov pozicijski sustav

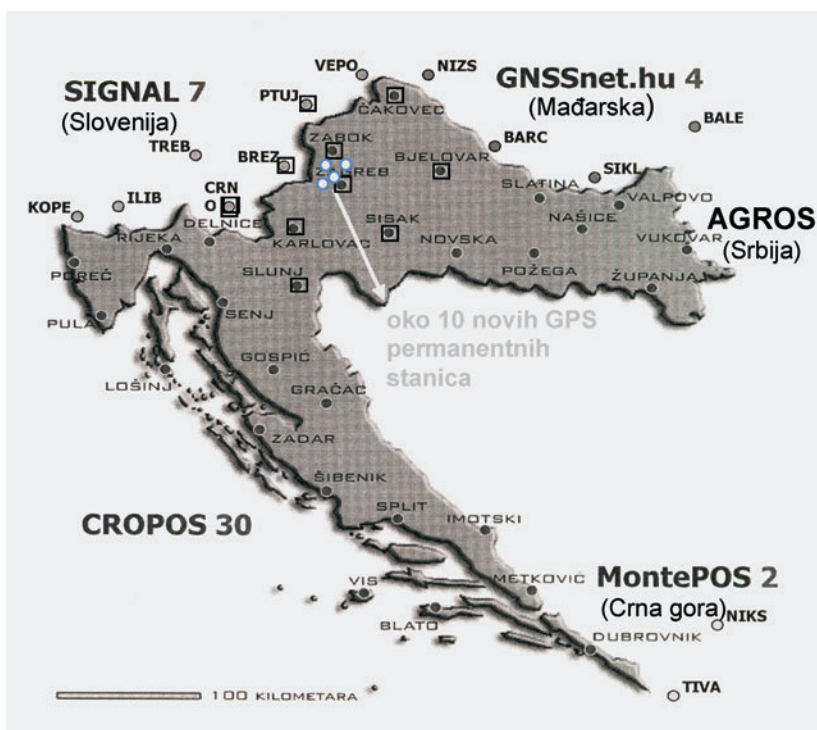
U Hrvatskoj je postavljen CROPOS-ov pozicijski sustav, tj. mreža od 30 referentnih GPS (GNSS)-stanica. To je skraćeni naziv od engleskog naziva CROatian POSition System (CROPOS). Svrha je tog sustava da omogući određivanje položaja stajališta samo s jednom GPS-antonom na površini Zemlje, i to u realnom vremenu. Drugim riječima, geodetskim stručnjacima mora omogućiti momentalno određivanje položaja na terenu s točnošću 2 cm u horizontalnom, te 4 cm u vertikalnom smislu, i to na čitavom području Hrvatske. U tu svrhu u Hrvatskoj su približno na svakih 50 km do 70 km (slike 1 i 2) postavljene referentne stanice, na kojima su postavljeni prijamnicima Trimble NetR5 s antenama Trimble Zephyr Geodetic 2 (Solarić i dr. 2009, Zrinjski 2010). Antene kontinuirano od 0 do 24 sata čitave godine primaju signale sa satelita koji prolaze iznad horizonta GNSS-antene i prenose primljene signale u kontrolni centar (Marjanović i Bašić 2010). U kontrolnom centru se obrađuju svi ti podaci i izračunaju površinske korekcije



Slika 1. Princip rada CROPOS-ova pozicijskog sustava.

parametara ili virtualna opažanja referentne stanice u blizini rovera, koje se zatim odašilju korisnicima sustava. Geodetski stručnjak na terenu s pomoću GPS-antene prima signale sa satelita i mobilnim internetom (radiovezom) popravke iz kontrolnog centra (slika 1), koji omogućavaju da stručnjak u realnom vremenu na terenu s jednim GPS-uređajem može odmah odrediti svoje precizne koordinate položaja. Pritom oni ne moraju imati najmanje 2 GPS-uređaja da bi u diferencijalnom modu odredili svoje razlike koordinata položaja. U postprocesingu postiže se točnost od 1 cm, a sa znanstvenim Bernese GPS-sofтверom verzija 5.0 dnevne promjene duljine stranica između GPS-strana određuju se na milimetar.

Kako bi i rubna područja Hrvatske bila bolje pokrivena, u radu CROPOS-ova pozicijskog sustava uključene su i neke točke iz susjednih država koje imaju svoje pozicijske GPS (GNSS)-sustave. Tako je na osnovi međudržavne razmjene podataka mjerenja u CROPOS-ov sustav uključeno 7 točaka iz Slovenije, 4 točke iz Mađarske i 2 točke iz Crne Gore, a pregovara se i s kolegama geodetama iz Bosne i Hercegovine (slika 2). CROPOS-ov pozicijski sustav pušten je u rad u prosincu 2008. godine, a bio je financiran u okviru PHARE-programa Europske unije 75% i državnog proračuna Republike Hrvatske 25%. Pritom je vrijednost ugovora bila 1,396.460 € (Marjanović i dr. 2009).



Legenda: ● CROPOS-ove stanice, □ CROPOS-ove stanice uključene u geodina-
mičku mrežu, ● oko 10 novih GPS-stanica u geodina-
mičkoj mreži Zagreba

Slika 2. Referentne stanice u CROPOS-ovoj mreži u Hrvatskoj.

Veliku pomoć u organizaciji uspostave CROPOS-ove mreže permanentnih stanica dali su geodeti iz Njemačke. Tu treba najviše zahvaliti prof. dr. sc. Asimu Bilajbegoviću, koji već gotovo 20 godina predaje geodeziju u Dresdenu.

CROPOS-ov pozicijski sustav ima velike perspektive primjene i u geodinamici, a i u eventualnim mogućnostima predviđanja potresa u Hrvatskoj, ali i u susjednim državama. Na svu sreću od početka rada CROPOS-ova pozicijskog sustava u Hrvatskoj nije bilo većeg potresa, pa tako to nismo mogli ispitati na CROPOS-ovoj mreži.

Kao dokaz da bi CROPOS-ov pozicijski sustav mogao poslužiti za potrebe geodinamike, ali i pomoći u najavi potresa, mogu poslužiti rezultati mjerenja u AGROS-ovu pozicijskom sustavu za vrijeme potresa u Kraljevu 2010. godine.

AGROS-ov pozicijski sustav i potres kod Kraljeva 3. 11. 2010.

AGROS-ov pozicijski sustav satelitski je pozicijski sustav u Srbiji (slika 3) potpuno sličan CROPOS-u. U AGROS-ovoj mreži nalazi se 30 permanentnih GPS-stanica, a postoje i planovi za proširenje.

Potres u okolici Kraljeva dogodio se u noći u 1 sat i 56 minuta 3. 11. 2010. Imao je magnitudu 5,4 stupnjeva po Richterovoj ljestvici i u epicentru izazvao velika razaranja u selima udaljenima oko 10 km sjeveroistočno od Kraljeva. Hipocentar potresa bio je na dubini 10 km, a osjetio se u cijeloj Srbiji i dijelom u Hrvatskoj.

Nakon potresa željelo se analizirati da li su se pomakle GPS-referentne stanice i cijela mreža, tj. da li je njihov mjerni sustav stabilan. Zato su ponovno s pomoću paketa programa Bernese GPS-sofтвер verzija 5.0 izračunate duljine pojedinih dugih stranica u njihovoj mreži i kratke duljine u blizini epicentra (slika 3) za 6 dana prije i 4 dana poslije potresa. Rezultati tih računanja prikazani su u tablicama (Đalović i Škrnjug 2011). U zaključku članka, prema zadatku koji je njima dan, oni su napisali.

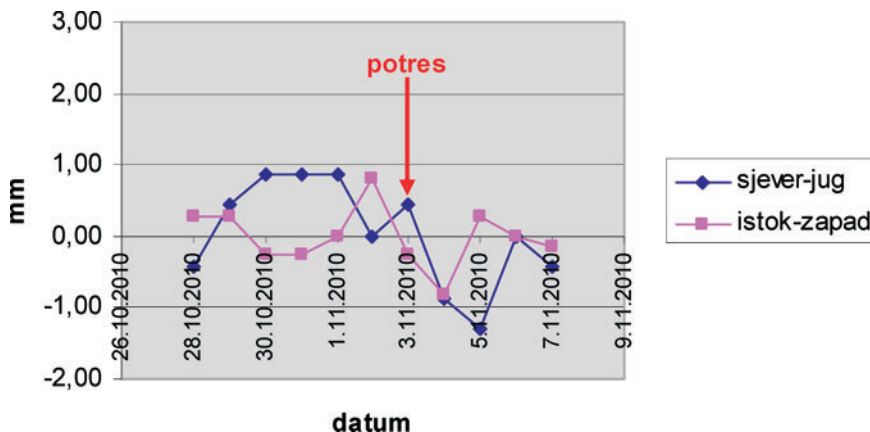
“Na osnovi gore predloženih rezultata jedini zaključak koji se može izvesti je da nije bilo nikakvih značajnih promjena duljina stranica između GPS točaka proizrokovanih potresom, kako u okolici Kraljeva, tako i na cijelom teritoriju Republike Srbije”.

Kada se pogledaju ti numerički rezultati svrstani u tablicama, stvarno se nije mogla vidjeti nekakva pravilnost odnosno nepravilnost. Zato smo promjene duljina stranica između dana prikazali grafički (slika 3 i 4), pa se može bolje vidjeti kako su se mijenjale duljine stranica između GPS-točaka 6 dana prije i 4 dana poslije potresa.

Promjene duljina stranica između GPS-točaka prije i nakon potresa kod Kraljeva

Izračunate promjene duljina velikih stranica sjever-jug (Subotica–Bujanovac) duge 438 km i istok-zapad (Kladovo–Loznica) duge 269 km, iz srednjih dnevnih koordinata položaja određenih GPS-mjerenjem, bile su približno unutar +1 i –1 mm, tj. unutar točnosti mjerenja – računanja (slika 3).

Dnevne promjene duljina stranica između GPS-točaka (Gornji Milanovac, Ivanjica, Kuršumljica i Kruševac) u blizini epicentra potresa kod Kraljeva prikazali smo

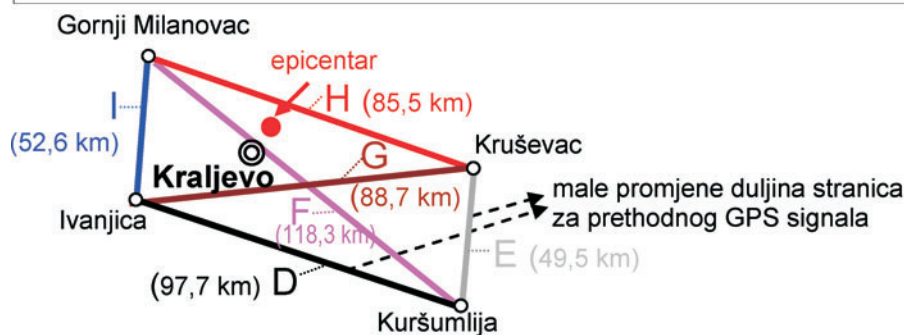
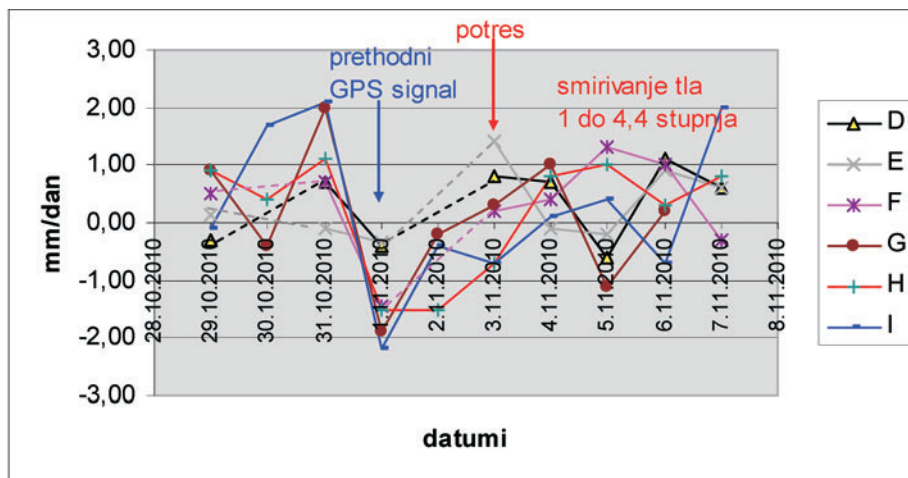


Slika 3. Promjene izračunatih duljina velikih stranica sjever-jug i istok-zapad prije i poslije potresa, izračunate su iz srednjih dnevnih koordinata položaja, a izražene su u mm.

grafički (slika 4), pa se bolje vidi kako su se mijenjale duljine stranica tijekom 6 dana prije i 4 dana poslije potresa. Epicentri potresa u Japanu obično su daleko u oceanu, tako da ondje analiza s duljinama strana uglavnom nije uspješna. Mi nismo mogli direktno primijeniti metodu Muraija i Arakija, jer nismo imali površine trokuta, odnosno koordinate položaja X, Y i Z GPS-stanica. Zato smo analizirali promjene duljina stranica između GPS-točaka u blizini Kraljeva, koje su duge od 50 do 118 km. Osim toga seizmotektoničari iz promjena duljina stranica između GPS-stanica mogu pravilnije donositi zaključke o pojavi potresa. Veličina pomaka terena nije isključivo mjerilo o tome da li će doći do potresa, jer je potrebno poznavanje i struktura seizmičkih linija.

Iz grafičkog prikaza na slici 4 vidi se da su dnevne promjene duljina stranica između GPS-točaka 30. i 31. 10. 2010. i 1. 11. 2010., i to posebice one bliže mjestu budućeg potresa, bile znatno veće nego ostalih dana. To je stvarno nagovještavalo veći potres u idućem vremenskom razdoblju. Osim toga vidi se da su se 1. 11. 2010. skraćivale duljine stranica, tj. da je došlo do kompresije u terenu – boranja terena. Do boranja terena dolazi zbog tektonske aktivnosti Zemlje, tj. međusobnog trenja kore i plašta u pokretu, najčešće duž postojećih raspuklina u Zemljinoj kori kao što su rasjedi, brazde ili rovovi. Prethodni GPS-signal prije potresa koji nagovještava veliki potres u sljedećem vremenskom razdoblju bio je veći na stranicama bližim budućem epicentru potresa: I, H, F i G. Gotovo da nije bilo dnevnih promjena duljina na udaljenim stranicama D i E, što ujedno ukazuje da su duljine izmjerene i izračunate s točnošću od milimetra. Na temelju toga može se prognozirati i približni položaj budućeg epicentra potresa.

Prije 1. 11. 2010., tj. prije prethodnog GPS-signala postojala su dva manja potresa približno druge magnitude po Richterovoj ljestvici, ali vjerojatno i veći spori pomaci. Naime, ti veći spori pomaci mogu biti razlog i za veće promjene duljina stranica između GPS-točaka, a da nije bilo potresa. Te spore linearne pomake slabije mogu osjetiti seizmografi, jer oni u principu pokazuju podrhtavanje



Slika 4. Dnevne promjene duljina stranica između GPS-točaka, u blizini epicentra prije i poslije potresa izražene u mm/dan (za neke dane nema podataka te su zato susjedne točke spajane crtkanim linijama).

terena. Međutim, te spore pomake mogu osjetiti GPS-prijamnici koji primaju signale s GPS-satelita, i to kontinuirano čitav dan (24 sata). Na taj način GPS-prijamnici određuju ukupne promjene duljina stranica između GPS-točaka u jednom danu, kad se računaju koordinate položaja točaka za svaki dan (za svaka 24 sata).

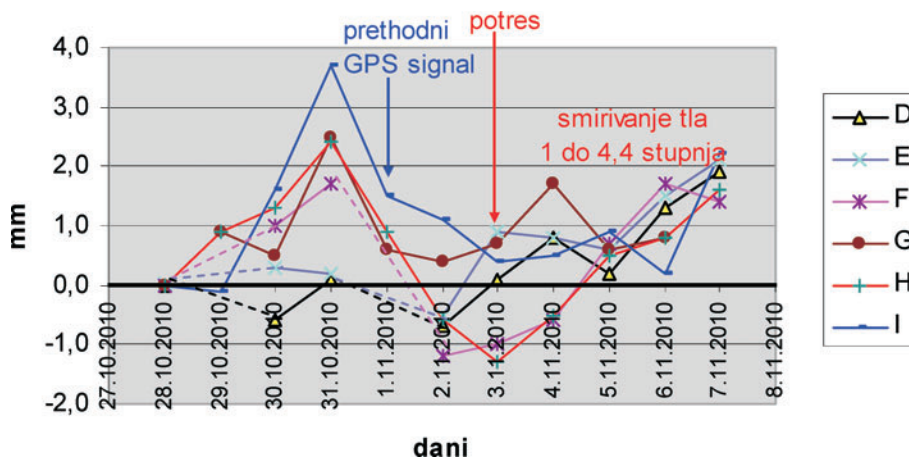
Može se naglasiti da u principu seizmografi i GPS-prijamnici mjere različite fizikalne veličine, te da se te dvije metode međusobno nadopunjuju. U radovima Murajja i Arakija nismo našli primjedbu o tome što su njima seizmografi pokazivali za vrijeme prethodnoga GPS-signalu prije potresa, ali pretpostavljamo da su oni vjerojatno imali tu informaciju.

Kao što se vidi iz slike 4, za vrijeme potresa 3. 11. 2010. kod Kraljeva bile su manje promjene stranica između GPS-točaka nego prije prethodnoga GPS-signalu prije potresa. Naime, može se dogoditi da su dnevne promjene duljina stranica između GPS-točaka ostale male, a da se sve streslo, da su se srušile zgrade i seizmografi pokazali potres. U tom slučaju GPS-prijamnici gotovo nisu pokazali zna-

kove za potres. Tako je to približno bilo i kod Kraljeva 3. 11. 2010. Može se kazati da će GPS-prijamnici pokazati promjene duljina stranica između GPS-točaka samo ako su ostale trajne deformacije terena, odnosno ako su se trajnije promijenile udaljenosti između GPS-točaka.

Također iz grafikona (slika 4) vidi se da je nakon potresa bilo i niz potresa za vrijeme smirivanja terena.

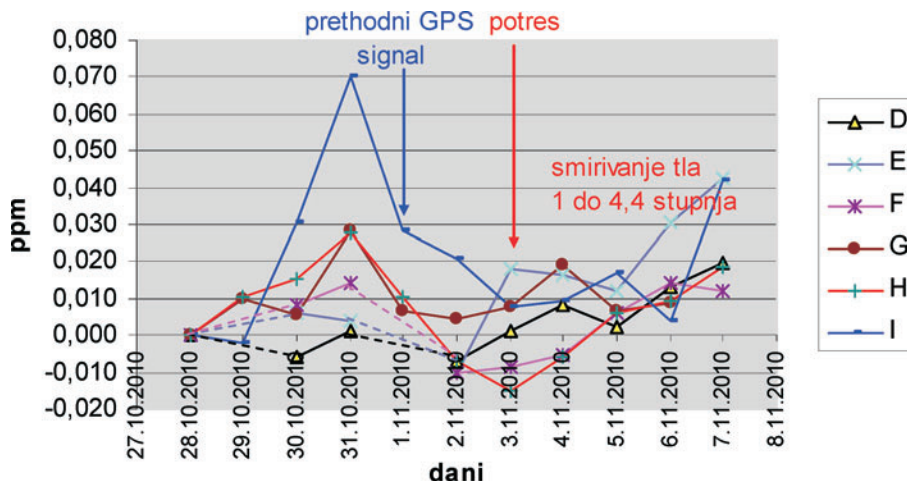
Da bi se vidjelo kako se površina zemlje deformira i mijenjaju duljine stranica između GPS-točaka tijekom 10 dana, izradili smo i grafički prikaz u kojem se vide ukupne promjene duljina izražene u milimetrima u blizini epicentra potresa, i to počevši od 28. 10. 2010. do 7. 11. 2010. (slika 5). Takav prikaz može pomoći seizmotektoničarima pri analizi i utvrđivanju koje se ploče pomiču i gdje dolazi do zaustavljanja pomicanja ploče.



Slika 5. Ukupne promjene duljina stranica između GPS-točaka u blizini epicentra potresa počevši od 28. 10. 2010. do 7. 11. 2010. izražene u milimetrima (za neke dane nema podataka te su zato susjedne točke spajane crtkanom linijom).

Da bi se vidjelo naprezanje u terenu u pojedinoj stranici, promjene duljina stranica izrazili smo u ppm-ima⁹ (slika 6). U analiziranom primjeru bilo bi dobro da je još analizirana koja strana u blizini epicentra potresa, npr. Ivanjica–Batočina. Osim toga bilo bi dobro da smo mogli analizirati promjene duljina stranica i u svim susjednim trokutima oko promatranog četverokuta, kao i da je sve to analizirano u znatno dužem vremenskom razdoblju prije potresa. Na primjer, da se sve to analiziralo tri mjeseca prije ili još bolje dvije-tri godine prije potresa, vidjelo bi se je li bio već prije koji prethodni GPS-signal za potres. Uostalom Murai i Araki dobili su za potres u Tohoku 11. 3. 2011. tri puta prethodni GPS-signal za potres, i to 5., 12. i 19. veljače, što u znatnoj mjeri otežava prognozu potresa. Osim toga

⁹ ppm – promjena duljine stranice između GPS-točaka kroz duljina stranice. Zato ppm pokazuje naprezanje u Zemljinoj površini u pojedinom pravcu stranice, u omjeru 1:1 000 000.



Slika 6. Ukupne promjene duljina stranica između GPS-stanica u blizini epicentra potresa počevši od 28. 10. 2010. do 7. 11. 2010. izražene u ppm-ima (za neke dane nema podataka te su zato susjedne točke spajane crtkanom linijom).

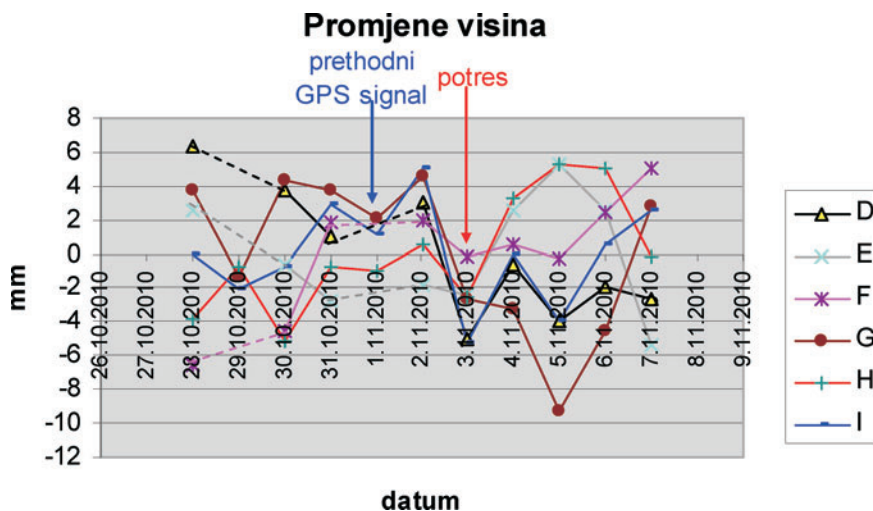
oni su za jedan potres u Japanu dobili prethodni GPS-signal za potres tri mjeseca prije potresa.

Sve naprijed izloženo dokazuje da bi i CROPOS-ova mreža mogla eventualno pomoći pri ocjeni može li u idućem vremenskom razdoblju doći do velikog potresa u Zagrebu i okolici.

Može se naglasiti da postoji bitna razlika između onoga što mjere seizmografi i onoga što mjere GPS-prijamnici. Naime, seizmografi mjere potresanje tla, a GPS-prijamnici mjere svoje koordinate položaja iz kojih se određuju promjene duljina stranica između GPS-točaka. Tako obični seizmografi slabo mogu odrediti vrlo spore pokrete u Zemljinoj kori, a to mogu precizno učiniti GPS-prijamnici. Naime, GPS-prijamnici određuju koordinate položaja X, Y i Z GPS-referentnih stanica integrirajući sve promjene duljina tijekom dana. Na taj način mogu se odrediti i vrlo spora gibanja Zemljine kore, koja se ne očituju kao potresi. To uistinu čini novu kvalitetu, jer te dvije vrste mjerenja daju dvije fizikalne veličine koje se nadopunjuju. Treba naglasiti da je to danas omogućeno zahvaljujući superpreciznosti određivanja koordinata položaja i na velikim udaljenostima uz pomoć satelitskih pozicijskih sustava. U prvom redu misli se na GPS-mjerenja, a zatim djelomično i na GLONASS-satelite. Treba spomenuti da će se s europskim satelitskim navigacijskim sustavom Galileom, koji se sada izgrađuje, postizati još veća točnost određivanja koordinata položaja točaka, tj. točnost mjerenja povećat će se za 2,2 puta (Švehla 2008, Zrinjski 2010), jer će imati kvalitetniji signal.

Promjene visina stranica između GPS-točaka prije i nakon potresa kod Kraljeva

GPS-mjerenjem određene su i elipsoidne visine GPS-točaka prije i nakon potresa, a iz toga su određene i elipsoidne visine stranica. Njihove promjene grafički su



Slika 7. Promjene elipsoidnih visina stranica između GPS-točaka prije, za potresa i nakon potresa u Kraljevu od 28. 10. do 7. 11. 2010. (za neke dane nema podataka te su zato spajane točke sa susjednima crtkanom linijom).

prikazane na slici 7. Iz nje se vidi da se prije prethodnoga GPS-signala i prije potresa većina stranica uzdizala (da se teren borao), a za potresa da su stranice pale. Nakon potresa za slijeganja terena visine su se dosta mijenjale. Šteta je da se u principu GPS-elipsoidne visine određuju približno i do tri puta nepreciznije od horizontalnih koordinata. Vjerojatno bi bilo bolje da smo imali izravne podatke o elipsoidnim visinama GPS-točaka.

2.2. Analizu dijagrama promjena duljina i visina stranica trebaju voditi seizmotektoničari

Analizu grafikona promjena duljina stranica i visina trebaju voditi seizmotektoničari kojima je poznato gdje su rasjedi, položaji tektonskih ploča i kako se i inače pomiču tektonske ploče. Iz slike 4 vidi se da su se 1. 11. 2010. duljine stranica, posebice bliže budućem mjestu potresa, skratile, tj. da je došlo do kompresije – boranja terena, što je nagovještavalo potres. Zato je to mogao biti prethodni GPS-signal, koji je najavljavao potres. Osim toga iz slike 7, vidi se da su se do 1. 11. 2010. stranice uzdizale (teren se borao), a za potresa da je sve palo. Zato ti prikazi promjena visina i duljina stranica mogu pomoći seizmotektoničarima da u svojim analizama i predviđanjima donose pravilnije zaključke i pravilnije odrede prethodni GPS-signal prije potresa. Svakako je pravilnije da prethodni GPS-signal određuju seizmotektoničari u kombinaciji s drugim postojećim geofizičkim metodama (jer oni poznaju geološki sastav tog područja i imaju svoja mjerenja na rasjedima), a ne da se prethodni GPS-signal automatski određuje prema 3 sigma (gruboj pogrešci mjerenja), jer Zemlja nije kruta. Seizmotektoničari će za određivanje prethodnoga GPS-signala morati steći i iskustvo pri analizi prethodnih potresa.

3. Prijedlog da se progusti CROPOS-ova mreža za potrebe geodinamike, kao i za eventualnu najavu većeg potresa u Zagrebu u sljedećem vremenskom razdoblju

Projekt izgradnje posebne GPS-geodinamičke mreže za čitavu Hrvatsku bio bi vrlo skup. Zato bi trebalo iskoristiti postojeći CROPOS-ov pozicijski sustav u Hrvatskoj i progustiti ga većim brojem GPS-permanentnih stanica na područjima gdje se mogu očekivati znatnija gibanja Zemljine kore i pojava potresa.

GPS-stanice u geodinamici morale bi se postaviti u čvrste stijene. To se može teško ostvariti zbog dovođenja struje, telefonske linije, zaštite od gromova, ali i zaštite referentne stanice od krađe i oštećenja. U Japanu su GPS-referentne stanice postavljene na vrlo solidno izgrađene stupove visoke 5 m koji su prethodno vrlo pažljivo stabilizirani. Na taj način procjenjujemo da je cijena kvalitetno stabilizirane točke s GPS-uređajem i njenim napajanjem električnom energijom, uređajem za prijenos podataka mjerenja, zaštitom od gromova i dodatnim osiguranjem od krađe iznosila čak oko 150.000 € po stupu. To kod nas nije moguće ostvariti u vrijeme financijske krize. Zbog toga su CROPOS-ove stanice većinom postavljene na krovove katastarsa, a to je tako i u drugim pozicijskim sustavima susjednih zemalja, kao i u njemačkom pozicijskom sustavu SAPOS.

Takve GPS-referentne stanice iz pozicijskih sustava mogu se koristiti i u geodinamici, što najbolje pokazuje analiza pomaka prije i nakon potresa kod Kraljeva 3. 11. 2010. Međutim, trebalo bi svakako ispitati stabilnost CROPOS-ovih referentnih GPS-stanica koje bi se koristile u geodinamici, tj. osigurati njihove položaje odmjeranjem od bliskih stabilnih točaka. Osim toga kontrola stabilnosti CROPOS-ovih stanica može se provesti i spektralnom analizom vremenskih redova koordinata. Na primjer u SAPOS-ovoj mreži u Njemačkoj mijenjale su se koordinate položaja preko 5 mm, a spektralnom analizom utvrdilo se da je stup bio veza za metalnu fasadu zgrade koja je zbog Sunčeva zagrijavanja izazivala pomicanje antene. Sada se u CROPOS-u i AGROS-u koriste antene Trimble GNSS Zephyr Geodetic 2, koje su dosta kvalitetne (Solarić i dr. 2009, Zrinjski 2010).

Međutim, radi povećanja točnosti kad to dopuste financijske mogućnosti bilo bi poželjno zamijeniti ih nešto kvalitetnijim GNSS-antenama choke ring (Solarić i dr. 2009, Zrinjski 2010), te ih još više zaštititi od gromova.

CROPOS-ov kontrolni centar vjerojatno bi u prvo vrijeme mogao poslužiti za skupljanje GPS-podataka mjerenja s CROPOS-ovih stanica, ali i s nekoliko dodatnih GPS-stanica sa zagrebačkog područja, kao i za obrađivanje prikupljenih podataka mjerenja s pomoću najnovije verzije Bernese GPS-softvera. Naknadno će se morati proširiti kapacitet kontrolnog centra, a i ekipno pojačati. Zadatak kontrolnog centra bit će proširen svakodnevnim podnošenjem izvješća seizmotektoničarima o promjenama duljina između GPS-točaka.

U I. fazi postavile bi se dvije permanentne GPS (GNSS)-stanice kojima bi se stalno mjerilo u blizi rasjeda u Kašini, a podatke mjerenja odašiljalo u kontrolni centar. Seizmotektoničari bi trebali izabrati mjesta za položaje GPS-stanica i pritom paziti na klizišta (Pribičević i dr. 2007). Kad se uhoda I. faza prešlo bi se na II. fazu, u kojoj bi se na području Zagreba i njegove malo šire okolice postavilo još

8 novih permanentnih GPS-stanica, tj. ukupno približno 10 GPS-permanentnih stanica, što bi morali odrediti seizmotektoničari (slika 2).

Otkrića iz fizike za koja su primljene Nobelove nagrade za 2005. i 1997. godine omogućit će da se u sljedećih približno 5 do 10 godina konstruiraju optički satovi (Solarić i dr. 2012) na principu frekvencijskog češlja. Oni će biti još 1000 puta precizniji od atomskih satova. To će omogućiti preciznija mjerenja GPS-prijamnicima, što će dovesti i do još preciznijeg pronalaženja prethodnoga GPS-signalu prije potresa, vjerojatno i manjih od magnitude 5 stupnjeva po Richteru. Zato su perspektive daljnjeg razvoja ove GPS-metode relativno vrlo velike.

Budući da u Zagrebu ima znatno više stanovnika nego u drugim regijama Hrvatske, važno je da se ta metoda najprije uhoda u Zagrebu i okolici. Kad se ta metoda uhoda u Zagrebu i uz nuklearnu elektranu Krško ona se može primijeniti i u ostalim trusnim područjima u Dubrovniku, Splitu i Rijeci, a i u susjednim državama – Sloveniji, Bosni i Hercegovini, Makedoniji, Srbiji, Italiji, Grčkoj i drugdje, gdje postoje mreže referentnih GPS-točaka slične CROPOS-u. Za razvoj te metode moći će se vjerojatno koristiti i europski fondovi zajedno s Italijom, Slovenijom i ostalim zainteresiranim zemljama.

Uz to bi i dalje trebalo razvijati i ostale metode praćenja gibanja u Zemljinoj kori kao:

- zapisivanje potresa seizmografima
- mjerenja temperature tla
- mjerenje radona
- satelitske snimke Zemlje u infracrvenom području
- gravimetrijska mjerenja
- satelitska detekcija TEC¹⁰-om
- VAN¹¹-metodu,
- druge metode, koje predlože geofizičari, da bi se mogao donijeti sigurniji zaključak o tome da potres doista dolazi i u kojem se vremenskom razdoblju može očekivati.

Sve te metode zajedno mogle bi eventualno dovesti do točnije najave (prognoze) potresa, gdje i kada će doći do potresa, tj. u kojem se vremenskom razdoblju može pojaviti.

4. Zaključak

Mreža CROPOS-ova sustava u Zagrebu i okolici mogla bi se osim u geodetske svrhe upotrebljavati i u geodinamici kao i za eventualnu najavu potresa. Za tu namjenu trebalo bi progustiti CROPOS-ovu GPS-mrežu uz dodatno postavljanje približno 10 GPS-permanentnih stanica. Svi podaci mjerenja morali bi se skupljati u CROPOS-ovu kontrolnom centru i obrađivati najnovijom verzijom Bernese GPS-sofтверa. Osim toga u kontinuiranu obradu trebalo bi uvesti podešeni Kalmanov filter, koji bi omogućio uvid u prognozirani položaj stanica i omogućio da-

¹⁰ TEC – Total Electron Content (totalna količina elektrona) je važna količina koja opisuje stanje ionosfere.

¹¹ VAN – metoda je metoda Grka P. Varotsosa, C. Alexopoulos i K. Nomikosa u kojoj se pomoću elektroda u rasjedu i zemlji izvan rasjeda mjeri napon između elektroda. Prema tome kako se postavljaju elektrode i koje se električne veličine mjere postoje još i metode Enomoto-Hashimoto, Fulnawa-Takahashi, Olke et al. i Yoshimoto.

vanja eventualnog alarma. Tako bi se svakodnevno pratile promjene duljina stranica između GPS-točaka i upozoravali seizmotektoničari o eventualnoj najavi potresa. CROPOS-ov pozicijski sustav radi u okviru Državne geodetske uprave te bi s njima trebalo dogovoriti suradnju. Nakon uvođenja te metode u Zagrebu i oko nuklearne elektrane Krško, moglo bi ju se primijeniti i u okolici Dubrovnika, Splita i Rijeke, te u susjednim zemljama, pogotovo zbog toga što u većini njih postoje mreže referentnih GPS-stanica slične CROPOS-u. Za razvoj te metode vjerojatno će se moći koristiti i europski fondovi zajedno s Italijom, Slovenijom i drugim zainteresiranim zemljama.

Iako se ne prognozira točno vrijeme nastupanja potresa, nego se pretpostavlja da će do njega doći u sljedećem vremenskom razdoblju, puno je već to da se ljudi mogu na vrijeme pripremiti za nastupajuće poteškoće.

ZAHVALA. Zahvaljujemo prof. emeritusu Sunji Muraiju što nam je dao prve informacije o uporabi GPS-mjerenja u analizi potresa u Japanu.

Također, zahvaljujemo prof. emeritusu Nedjeljku Frančuli što nas je svojim prilogom u vijestima Geodetskog lista upozorio na radove u Japanu te smo preko njega dobili časopis Geodetska služba br. 114 s člankom Analiza promjena dužina baznih linija permanentnih stanica prije i nakon zemljotresa u Kraljevu.

Zahvaljujemo kolegi S. Đaloviću i kolegici J. Škrnjug što su objavili detaljne rezultate svojih mjerenja odnosno računanja, iz kojih smo mogli pomoću grafičkog prikaza dokazati da je dva dana prije potresa kod Kraljeva 2010. godine postojao prethodni GPS-signal.

Veliku zahvalnost dugujemo prof. dr. sc. Eduardu Prelogoviću što nam je dao korisne savjete, a i prof. dr. sc. Marijanu Heraku te voditelju Seizmološke službe RH mr. sc. Vladi Kuku. Također, veliku zahvalnost dugujemo prof. dr. sc. Asimu Bilajbegoviću za njegove vrlo korisne savjete i informacije.

Literatura

- Đalović, S., Škrnjug, J. (2011): Analiza promjena dužina baznih linija permanentnih stanica pre i nakon zemljotresa u Kraljevu, Geodetska služba, 114, 12–19.
- Frančula, N. (2010): Nova saznanja o predviđanju potresa, Geodetski list, 64 (87), 1, 40.
- Marjanović, M., Bašić, T. (2010): CROPOS – positioning easier than ever, INF-0002, Trimble Dimensions 2010 conference “Converge, Connect and Collaborate” (5th), 8–10 November 2010, Las Vegas, USA.
- Marjanović, M., Miletić, I., Vičić, V. (2009): CROPOS – prvih šest mjeseci rada sustava, Zbornik radova 1. CROPOS konferencije, Zagreb.
- Murai, S., Araki, H. (2003): Earthquake Prediction Using GPS-A New Method Based on GPS Network Triangles, GIM Volume 17, October 2003.
- Murai, S., Araki, H. (2005): Was early warning of Sumatra earthquake possible?, Coordinates, Vol. 1, Issue 2, July 2005, 8–11.
- Murai, S., Araki, H. (2006): Was there any pre-signal of Pakistan earthquake?, Coordinates, Vol. 2, Issue 4, April 2006, 6–7.

- Murai, S., Araki, H. (2008): Couldn't we predict the Wenchuan Earthquake with GPS?, Coordinates, Dec 2008.
- Murai, S., Araki, H. (2009): Earthquake Prediction: New Finding, GIM international, Vol. 23, Issue 6, June 2009, 18–23.
- Prelogović, E., Cvijanović, D. (1981): Potres u Medvednici 1880. godine, Geološki vjesnik, 34, 137–146.
- Pribečević, B., Medak, D., Prelogović, E., Đapo, A. (2007): Geodinamika prostora grada Zagreba, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Solarić, N., Solarić, M., Zrinjski, M. (2009): GPS-antena Zephyr Geodetic, Geodetski list, Vol. 63 (86), No. 4, 329–352.
- Solarić, N., Solarić, M., Švehla, D. (2012): Nove revolucionarne mogućnosti u geodeziji koje pružaju otkrića za koja su dobivene Nobelove nagrade za fiziku 2005. i 1997. godine, Geodetski list, Vol. 66 (89), No. 1, 1–19.
- Švehla, D. (2008): A novel design for a timing and navigation system, Kolloquium Satellitennavigation, TU München, 8 May 2008, http://www.nav.ei.tum.de/joomla/documents/up/colloquium_svehla_slides.pdf, (04.04.2011.).
- Zrinjski, M. (2010): Definiranje mjerila kalibracijske baze Geodetskog fakulteta primjenom preciznog elektrooptičkog daljinomjera i GPS-a, Doktorska disertacija, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- URL 1: Monitoring of Disaster using Remote Sensing, GIS and GPS, http://www.management.kochi-tech.ac.jp/PDF/IWPMIWPM_Murai.pdf, (19.02.2012.).
- URL 2: 10 degree Map Centered at 40° N, 145° N, <http://wattsupwiththat.com/2011/10/03/possible-earthquake-early-warning-signal-discovered/>, (19.02.2012.).
- URL 3: Atmosphere above Japan Heated Rapidly Before M9 Earthquake, <http://www.technologyreview.com/blog/arxiv/26773/>, (19.02.2012.).
- URL 4: Potres u L'Aquila 2009, <http://www.google.hr/search?q=potres+1%27aquila+2009+wikipedija+mht&channel=linkdoctor>, (19.02.2012.).
- URL 5: Prijete li nam razorni potresi?, <http://www.forum.hr/archive/index.php/t-438593.html>, (26.01.2012.).
- URL 6: Hrvatsku svake minute trese slab potres, <http://www.tportal.hr/vijesti/hrvatska/16295/Hrvatsku-svake-minute-trese-slab-potres.html>, (19.02.2012.).
- URL 7: Razorni potresi prijete Dalmaciji, <http://imotskidanas.com/razorni-potresi-prijete-dalmaciji/>, (19.02.2012.).
- URL 8: 2011 Japan Earthquake and Tsunami, <http://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/visualization/collections/japan2011.html>, (28.03.2012.).
- URL 9: Crustal movement before and after the Great East Japan Earthquake, Murai, S., Araki, H., Vol. VIII, Issue 5, May 2012, <http://mycoordinates.org/>, (20.05.2012.).
- URL 10: Potres – Wikipedia, <http://hr.wikipedia.org/wiki/Potres>, (20.05.2012.).

Proposal for Setting up in Zagreb and its Surroundings a few GPS (GNSS) Permanent Stations for Geodynamics and Possibility of the Announcement of Larger Earthquake in the Future Period

ABSTRACT. It is described in the introduction how the Japanese established in 2000 the network of even 1200 GPS (GNSS) permanent stations. All measurement data are received in the control centre, where they are also processed and the daily positional coordinates of the stations X, Y and Z determined, with the aim to determine the movements of the Earth's crust in this way. Prof. S. Murai and H. Araki patented the detection of GPS signal before the earthquake by means of computing the changes of the triangle areas which had GPS stations at their vertices. For 162 earthquakes larger than 6.0 magnitudes on the Richter's scale in Japan, the preceding GPS signal was received before the earthquake of 1 to 90 days. The second chapter describes the positional system CROPOS in Croatia that was established in 2008. There are 30 permanent stations in it, and by means of subsequent processing of GPS data by means of the Bernese GPS software version 5.0, high precision in determining the point coordinates to millimetre is obtained. Similar positioning system AGROS in Serbia has also 30 GPS (GNSS) stations that were in operation at the time of the earthquake measuring 5.4 magnitudes on the Richter's scale on 3.11.2010 in the surroundings of Kraljevo. S. Đalović and J. Škrnjug processed the measurement data 6 days before and 4 days after the earthquake by means of Bernese GPS software version 5.0. The results of length changes between GPS stations were published in the form of numerical tables, and when we these results were presented graphically, the preceding GPS signal for the earthquake was found 2 days before the earthquake. It was explained that the GPS measurements yield new quality because the measurements with seismographs give the information about the ground earthquakes, but GPS measurements determined the changes in distances between GPS points. Hence, normal seismographs determine poorly very slow linear movements of the Earth's crust that are no earthquakes, while GPS receivers can do that. We expect therefore that it will be possible to use also the GPS stations from CROPOS in geodynamics, as well as in seismology. It is furthermore suggested, that 10 new well stabilized GPS station should be set up in Zagreb and its surroundings. The measurement data would be collected and processed by means of the most recent version of Bernese GPS software in CROPOS control centre, and then the daily change of the distances between the GPS points would be computed that can yield the preceding GPS signal, before the earthquake itself. Of course, this method should be combined with other available geophysical methods. The final decision about the announcement of the preceding GPS signal before earthquake would be given by seismotectonic experts that also have the measurements on faults at their disposal. It would be better than to determine them automatic from gross errors of measurement, because the Earth is not solid body. When this method will be organised in Zagreb and its surrounding, it could be possibly extended this method to Dubrovnik, Split and Rijeka, as well as to the neighbouring countries. We believe that this project could get the financial support from the European Union.

Keywords: seismographs, GPS, GNSS, permanent GPS stations, CROPOS positioning system, AGROS positioning system, earthquake announcement.

Primljeno: 2012-05-22

Prihvaćeno: 2012-09-01