

existing geodynamic points enable further geodynamic research using all data processed so far.

On the basis of reviewing and evaluating the PhD thesis by MSc Marijan Marjanović, graduate engineer of geodesy, members of the committee concluded that he gave several valuable contributions in the area of state survey, satellite and physical geodesy and especially geodynamics, specifically in defining the first Croatian absolute kinematical model for the area of the Adriatic microplate. This primarily refers to the establishment of a functional database of all available GPS surveys during the period 1994–2005 for the area of the Republic of Croatia (and abroad) and producing a special software application for its efficient use, realized optimal solutions to annual values of

coordinates of monitored points, as well as the final combined solution, calculation of reliable values of horizontal point movement and their comparison with current global models for the Eurasian lithospheric plate and the obtained vertical movements of the same points and their comparison with long-time mean sea level change of tide gauges, an original calculation of the Euler rotation vector and the Euler pole for the Adriatic microplate and defining for the first time in Croatia the kinematical model for Croatia, and finally an independent confirmation that the Adriatic microplate is most probably an independent plate divided by the Gargano-Dubrovnik line.

*Prepared by M. Lapaine*

## Almin Đapo, PhD in Technical Sciences

Almin Đapo defended his dissertation titled *Correlation of the Geodetic and Geologic Model of Tectonic Movement on the Example of the Wider Area of the City of Zagreb* at the Faculty of Geodesy of the University of Zagreb on May 8, 2009. The thesis was defended in the presence of the evaluation committee: Prof. Dr. Damir Medak, Prof. Dr. Boško Pribičević (co-mentor) and Prof. Dr. Ivan Dragičević (co-mentor) from the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering of the University of Zagreb.

Almin Đapo was born on August 17, 1974 in Dubrovnik, where he finished elementary and high school, mathematics and informatics orientation. In 1993, he enrolled the Faculty of Geodesy of the University of Zagreb. He graduated at the beginning of 2000, mentored by academician Petar Krešimir Čolić and with the thesis *Integration of the Republic of Croatia in the World Absolute Gravimetric Grid – The UNIGRACE Project*. In 2002, he enrolled the postgraduate studies at the Faculty of Geodesy. In 2005, he defended his Master's thesis *Processing and Interpretation of Geodetic Surveys of the Geodynamic Network of the City of Zagreb* at the Faculty of Geodesy in 2005.

Since 2000, he has worked as an external collaborator on the project *Establishment of New Geoid Points on the Territory of the Republic of Croatia*, and in October of the same year, he became a junior researcher on the project *Satellite and Physical Geodesy in the Republic of Croatia* headed by Prof. Dr. D. Medak. In November of 2000, he became a junior assistant at the Institute for Higher Geodesy, which is currently called the Institute for Geomatics of the Faculty of Geodesy of the University of Zagreb. He currently works as an assistant at the Chair of Hydrography at the same Faculty. He published several scientific and professional papers, and presented papers at several international conferences. He is a member of the Croatian Chamber of Chartered Engineers of Geodesy. He was award-

ed the Rector's Award for best student papers of the University of Zagreb for the paper titled *Three-Dimensional Geodetic Model of the Plitvice Lakes*.

The report by the evaluation committee reads as follows.

The PhD thesis contains 191 A4 pages with text, 118 figures, 20 tables, a list of references with 101 titles, 26 figures and 8 tables in the appendix, summaries in Croatian and English, and a CD with a digital version of the thesis. The thesis is divided into eight chapters:

1. Introduction
2. Geodetic-geodynamic observations
3. Geodynamic network of the city of Zagreb
4. Performed GPS surveys
5. Computer processing of GPS surveys
6. Recent geological structural relations and tectonic activity
7. Comparison of geodetic and geologic data results
8. Conclusion

Since 1997, the Faculty of Geodesy of the University of Zagreb has been conducting scientific work and research related to the application of precise satellite position determination for geodynamic purposes on specially stabilized points in the area of the city of Zagreb. Although the primary goal of the GPS campaign conducted in 1997 was to establish the Base GPS Network of the City of Zagreb as a basis for establishing the homogeneous field of GPS points for the City of Zagreb, repeated surveys in 2001 and 2004 on the entire network accomplished the second planned purpose of the network, i.e. the Geodynamic Network of the City of Zagreb was realized.

u geodinamička bi se istraživanja osim točaka mjerenih u GPS kampanjama mogle uključiti i referentne stanice permanentne mreže. CROPOS omogućava GNSS mjerenja tijekom 24 sata svakoga dana što bi uz ponavljanje mjerenja na postojećim geodinamičkim točkama omogućilo nastavak geodinamičkih istraživanja uz upotrebu svih do sada obrađenih podataka mjerenja i njihovih rezultata.

Na temelju pregleda i vrednovanja doktorske disertacije mr. sc. Marijana Marjanovića, dipl. ing. geod., članovi Povjerenstva zaključili su da je pristupnik u svojem radu dao više vrijednih prinosa u području državne izmjere, satelitske i fizikalne geodezije te posebno geodinamike, naročito pri definiranju prvoga hrvatskog apsolutnog kinematičkog modela za područje Jadranske mikroploče. To se ponajprije odnosi na: uspostavu funkcionalne baze podataka svih raspoloživih GPS mjerenja u razdoblju

1994.–2005. godina za područje Republike Hrvatske (i šire) te izradu vlastite softverske aplikacije za njezinu učinkovitu upotrebu, ostvarena optimalna rješenja za godišnje vrijednosti koordinata praćenih točaka kao i konačno kombinirano rješenje, zatim računanje pouzdanih vrijednosti horizontalnih gibanja točaka i njihova usporedba s aktualnim globalnim modelima za Euroazijsku litosfernu ploču kao i dobivenih vertikalnih gibanja istih točaka i njihovu usporedbu s dugogodišnjim praćenjima promjene srednje razine mora na mareografima, zatim originalno računanje Eulerovog vektora rotacije i Eulerovog pola za Jadransku mikroploču te na taj način zapravo definiranje po prvi puta u Hrvatskoj kinematičkoga modela za Hrvatsku, te konačno vlastitu nezavisnu potvrdu da je Jadranska mikroploča vrlo vjerojatno nezavisna ploča podijeljena na liniji Gargano-Dubrovnik.

Pripremio M. Lapaine

## Almin Đapo, doktor tehničkih znanosti

159

Almin Đapo obranio je 8. svibnja 2009. na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu disertaciju *Korelacija geodetskog i geološkog modela tektonskih pomaka na primjeru šireg područja Grada Zagreba*. Doktorski rad obranjen je pred povjerenstvom u sastavu prof. dr. sc. Damir Medak, prof. dr. sc. Boško Pribičević (komentor) i prof. dr. sc. Ivan Dragičević (komentor) s Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.



Almin Đapo rođen je 17. kolovoza 1974. u Dubrovniku, gdje je završio osnovnu školu i gimnaziju, matematičko-informatički smjer. Godine 1993. upisao se na Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirao je početkom 2000. pod mentorstvom akademika Petra Krešimira Čolića na temi *Priključenje Republike Hrvatske u svjetsku apsolutnu gravimetrijsku mrežu – Projekt UNIGRACE*. Godine 2002. upisao je poslijediplomski studij na Geodetskom fakultetu. Godine 2005. na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu obranio je magistarski rad *Obrada i interpretacija geodetskih mjerenja na Geodinamičkoj mreži Grada Zagreba*.

Od 2000. radi kao vanjski suradnik na projektu *Uspostavljanje novih geoidnih točaka na teritoriju Republike Hrvatske*, a u listopadu iste godine izabran je u zvanje znanstvenog novaka na projektu *Satelitska i fizikalna geodezija u Republici Hrvatskoj* kojeg je voditelj bio prof. dr. sc. D. Medak. U studenome 2000. izabran je u zvanje mlađi asistent u Zavodu za višu geodeziju, danas Zavodu za geomatiku, Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Danas radi kao asistent u Katedri za hidrografiju. Kao autor i koautor objavio je nekoliko znanstvenih i stručnih radova. Prezentirao je radove na više međunarodnih simpozija. Član je Hrvatske komore ovlaštenih inženjera geodezije. Dobitnik je Rektorove nagrade za najbolje pisane studentske radove

Sveučilišta u Zagrebu za rad pod nazivom *Trodimenzionalni geodetski model Plitvičkih jezera*.

U izvještaju Povjerenstva za ocjenu disertacije možemo pročitati sljedeće.

Doktorski rad sadrži 191 stranicu teksta formata A4, 118 slika, 20 tablica, popis literature sa 101 naslovom, 26 slika i 8 tablica u prilogu, sažetak na hrvatskom i engleskom jeziku te CD s digitalnom verzijom dokorskog rada. Rad je podijeljen u 8 poglavlja:

### 1. Uvod

2. Geodetsko-geodinamička opažanja
3. Geodinamička mreža Grada Zagreba
4. Izvedena GPS-mjerenja
5. Računalna obrada GPS-mjerenja
6. Recentni geološki strukturni odnosi i tektonska aktivnost
7. Usporedba rezultata geodetskih i geoloških podataka
8. Zaključak

Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu od 1997. godine provodi sustavan znanstvenoistraživački rad vezan uz primjenu preciznog satelitskog određivanja položaja za geodinamičke svrhe na specijalno stabiliziranim točkama na području Grada Zagreba. Iako je prvi i osnovni cilj GPS-kampanje izvedene 1997. godine bila uspostava Temeljne GPS-mreže Grada Zagreba kao osnove za uspostavu homogenog polja GPS-točaka za Grad Zagreb, ostvarenjem ponovljenih mjerenja 2001. i 2004. godine na cjelovitoj mreži, ispunjena je i druga planirana svrha te mreže, tj. ostvarena je Geodinamička mreža Grada Zagreba.

Making scientifically based conclusions about tectonic movements in an area is only possible on the basis of multiple repeated precise surveys. Considering a series of geological surveys that were conducted during a period of time in the researched area, there was a need for a scientific comparison of two models realized by independent scientific procedures: the geodetic model, founded on precise satellite positioning, and the geologic model, founded on long-term geologic research.

The main goals of the dissertation were to determine movement of points of the Geodynamic Network of the City of Zagreb 1997-2008 and a comparison between the geodetic and geologic model of tectonic movements in the researched area.

The first chapter of the dissertation presents the author's motivation: following global and local geodynamics as one of the most important scientific applications of precise satellite positioning. Furthermore, the hypothesis is established. This is followed by descriptions of previous research related to geodynamic research of the Adriatic microplate and the area of Zagreb. The author primarily used high quality and recent references. The chapter ends with the thesis layout.

The second chapter describes the Earth as a dynamic planet, which is seen from the tectonic plate movement. There are basic principles of tectonic plate movement, as well as contemporary surveys of geodynamic movement with emphasis on global navigation satellite systems (GNSS) and satellite radar interferometry.

comprehensive knowledge in application of the software and described in detail the methodology of Kalman filtering, which is used to consolidate discrete campaigns. Freeware programs are usually used in scientific institutions to process and visualize results. Their advantages are proven in this thesis as well.

The results are velocity models of points of the Geodynamic Network for the periods 1997-2001, 2001-2004, 2004-2006, 2006-2007, 2007-2008, 2006-2007-2008 and cumulatively for the whole period from 1997 to 2008. The maximum absolute value of movement for the whole arrangement in the horizontal direction is 4.3 mm/year, and in vertical direction 17.5 mm/year. The highest absolute values of movement were obtained for the period 2006-2007 and they amount to 19.4 mm/year in the horizontal and 50.3 mm/year in the vertical direction, which makes it clear that they are geodynamically significant movements. However, it should be emphasized that mean values of movement are 3 mm/year. The dissertation proves that applying the multipoint method in various temporal periods, it is possible to derive a reliable geodetic model of tectonic movement of the Earth's crust in the researched area which can be considered between a local and a regional one. Existing research for similar purposes mostly used the extremely expensive method of setting up a dense network of permanent GPS stations.

The sixth chapter represents results of long-term neotectonic research in the area of Medvednica Mountain. Using more than 40 graphical representations and figures, all important faults and fault outcrops are described, as well as the effects of tectonic activity on the surface of the Earth: cracks in houses, public objects, and roads. A reliable geologic movement model was created and compared with the obtained geodetic model.

The seventh, most important chapter compares the geodetic and geologic model, supported by geostatistical analysis of vector data. Spearman's statistical test confirmed the hypothesis of the significant correlation between the two movement models. The coefficient of 0.94 (level of significance 1 %) indicates a high degree of correlation between geodetic and geologic movement in the area. Also created was the model of a spatial-temporal base of all survey and movement data by using state-of-the-art object-relation database PostgreSQL, which also represents scientific contribution of the dissertation.

The comprehensive interdisciplinary analysis of acquired results provided a unique interdisciplinary model of movement of near-surface layers of the Earth's crust in the area of the city of Zagreb. It is a significant scientific contribution to the understanding of geodynamic activities in the area of the city of Zagreb.

On the basis of review and evaluation of the thesis, members of the evaluation committee concluded that the applicant MSc Almin Đapo, graduate engineer of geodesy mastered the methods of scientific work and research by collecting sources, reading them, analyzing them, making conclusions and presenting them. The committee concluded that the applicant's work, especially the independent processing of all GPS surveys, original comparison of geodetic and geologic movement models, application of geostatistical correlation analysis between models, and advanced use of spatial-temporal models of object-relation databases, made a valuable contribution to the application of geodesy in geodynamics.

*Prepared by M. Lapaine*

160

## *Correlation of the Geodetic and Geologic Model of Tectonic Movement on the Example of the Wider Area of the City of Zagreb*

The third chapter describes in detail the origin of the Geodynamic Network of the City of Zagreb which was used to realize the practical part of the thesis. The chapter also explains the interdisciplinary character of the researched network and all geodynamic research in which precise geodetic surveys play an important role. The network creation project is described, as well as special subterranean and superterranean point stabilization unique in the Republic of Croatia.

The fourth chapter describes all conducted GPS surveys on the Geodynamic Grid of the City of Zagreb. Each campaign description includes a graphical and tabular representation of points according to survey periods, along with instruments used.

The fifth chapter is especially significant because it contains the author's contribution to research on the geodetic and geodynamic network. A unique approach was applied for processing GPS surveys: all GPS campaigns were processed with the scientific GAMIT/GLOBK software developed at the Massachusetts Institute of Technology. The author demonstrated

Donošenje znanstveno utemeljenih zaključaka o tektonskim pomacima na nekom je području moguće tek na temelju višestruko ponavljanih preciznih mjerenja. Kako je u još duljem vremenskom razdoblju na području istraživanja proveden i cijeli niz geoloških mjerenja, javlja se potreba za znanstvenom usporedbom dvaju modela realiziranih neovisnim znanstvenim postupcima: geodetskog modela, utemeljenim na preciznom satelitskom pozicioniranju, te geološkog modela, utemeljenog na dugotrajnim geološkim istraživanjima.

Glavni ciljevi disertacije bili su određivanje pomaka na točkama Geodinamičke mreže Grada Zagreba 1997-2008 te usporedba geodetskog i geološkog modela tektonski uvjetovanih pomaka na području istraživanja.

U prvom poglavlju disertacije izlaže se motivacija rada: praćenje globalne i lokalne geodinamike kao jedne od najvažnijih znanstvenih primjena preciznog satelitskog pozicioniranja. Zatim se postavlja hipoteza u kojoj se jasno postavljaju pitanja na koja doktorski rad treba dati odgovor. Potom se opisuju prethodna istraživanja vezana uz geodinamička istraživanja Jadranske mikroploče i zagrebačkog područja. Autor se ovdje pretežno služi navođenjem kvalitetnih, aktualnih referenci. Na kraju poglavlja izložena je struktura doktorskog rada.

Drugo poglavlje opisuje Zemlju kao dinamični planet, što je vidljivo iz pomaka tektonskih ploča. Prikazani su osnovni principi pomicanja tektonskih ploča, te suvremeni postupci mjerenja geodinamičkih pomaka s posebnim naglaskom na globalne navigacijske satelitske sustave (GNSS) i satelitsku radarsku interferometriju.

U trećem poglavlju detaljno se opisuje nastanak Geodinamičke mreže Grada Zagreba koja je poslužila za realizaciju praktičnog dijela doktorskog rada. Objašnjava se interdisciplinarni karakter kako mreže koja se istražuje tako i svih geodinamičkih istraživanja u kojima precizna geodetska mjerenja imaju sve važniju ulogu. Opisan je projekt izrade mreže, te specijalna podzemna i nadzemna stabilizacija točaka jedinstvena u Republici Hrvatskoj.

U četvrtom poglavlju opisuju se sva izvedena GPS-mjerenja na Geodinamičkoj mreži Grada Zagreba. Za svaku kampanju grafički je i tablično prikazan raspored točaka prema razdobljima mjerenja zajedno s upotrijebljenim instrumentarijem.

Peto poglavlje posebno je značajno jer je u njemu izražen autorov doprinos istraživačkom radu na geodetsko-geodinamičkoj mreži. Za obradu GPS-mjerenja primijenjen je jedinstveni pristup: sve GPS-kampanje obrađene su s pomoću znanstvenog softvera za obradu GPS-mjerenja GAMIT/GLOBK razvijenog na Massachusetts Institute of Technology. Autor je u radu demonstrirao cjelovito znanje u primjeni tog softvera i detaljno objasnio metodologiju Kalmanova filtriranja koja se koristi pri objedinjavanju vremenski odvojenih kampanja. Slobodni softveri uobičajeno se rabe na znanstvenim institucijama kako za obradu tako i za vizualizaciju rezultata. Njihove prednosti dokazane su i u ovom doktorskom radu.

Rezultat su modeli brzina na točkama Geodinamičke mreže dobiveni za razdoblja 1997-2001, 2001-2004, 2004-2006, 2006-2007, 2007-2008, 2006-2007-2008. te kumulativno za cijelo razdoblje od 1997. do 2008. Maksimalna apsolutna vrijednost pomaka za ukupno rješenje u horizontalnom smjeru iznosi 4,3 mm/god, a u vertikalnom 17,5 mm/god. Najveće apsolutne vrijednosti pomaka dobivene su u razdoblju 2006-2007. i iznose 19,4 mm/god. u horizontalnom i 50,3 mm/god u vertikalnom smjeru iz

čega je vidljivo da se radi o geodinamički signifikantnim pomacima. No, ipak treba naglasiti da su srednje vrijednosti brzina 3 mm/god. Disertacija dokazuje da je metodom istodobne obrade svih mjernih točaka (multipoint) u različitim vremenskim epohama moguće izvesti vjerodostojan geodetski model tektonskih pomaka Zemljine kore na području istraživanja koje se po svojem protezanju može ocijeniti granicom između lokalnog i regionalnog. Dosadašnja istraživanja za slične su svrhe uglavnom upotrebljavala iznimno skupu metodu postavljanja guste mreže permanentnih GPS postaja.

Šesto poglavlje daje prikaz rezultata dugogodišnjih neotektonskih istraživanja na području Medvednice. Uz pomoć više od 40 grafičkih prikaza i slika opisani su svi najvažniji rasjedi i njihovi izdanci, kao i posljedice tektonske aktivnosti na površini Zemlje: pukotine na kućama, javnim objektima, cestama. Izrađen je vjerodostojni geološki model pomaka koji je uspoređen s dobivenim geodetskim modelom.

U sedmom, najznačajnijem poglavlju prikazuje se usporedba geodetskog i geološkog modela potkrijepljena geostatističkom analizom vektorskih podataka. Spearmanov statistički test potvrdio je hipotezu o signifikantnoj korelaciji između dva modela pomaka. Dobivena vrijednost od 0.94 (uz razinu signifikantnosti 1%) ukazuje na visoki stupanj korelacije između geodetskih i geoloških pomaka na tom području. Također je izrađen model prostorno-vremenske baze podataka svih mjerenja i pomaka upotrebom najsuvremenije objektno-relacijske baze podataka PostgreSQL, što također predstavlja znanstveni doprinos ove disertacije.

161

## *Korelacija geodetskog i geološkog modela tektonskih pomaka na primjeru šireg područja Grada Zagreba*

Provedena iscrpna interdisciplinarna analiza dobivenih rezultata dala je jedinstveni interdisciplinarni model gibanja pripovršinskih slojeva Zemljine kore na području Grada Zagreba. On predstavlja značajan znanstveni doprinos poznavanju geodinamičkih aktivnosti na području Grada Zagreba.

Na temelju pregleda i vrednovanja pojedinih dijelova doktorskog rada članovi povjerenstva zaključili su da je pristupnik mr. sc. Almin Đapo, dipl. ing. geod., ovladao metodikom znanstveno-istraživačkog rada: prikupljanjem izvornika, njihovim čitanjem, analiziranjem, stvaranjem zaključaka i njihovom prezentacijom. Ocijenili su da je pristupnik svojim radom, posebno samostalno izvedenom obradom svih GPS-mjerenja, originalnom usporedbom geodetskog i geološkog modela pomaka, primjenom geostatističke analize korelacije između modela, te naprednom upotrebom prostornovremenskih modela objektno-relacijskih baza podataka dao vrijedan doprinos području primjene geodezije u geodinamici.

*Pripremio M. Lapaine*