

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Iva Ćuk i Dario Jozinović

PROCJENA SEIZMIČKE UGROŽENOSTI
ZA ZAGREB I DUBROVNIK

Zagreb, 2018.

Ovaj rad izrađen je na Geofizičkom zavodu pod vodstvom doc. dr. sc. Snježane Markušić i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2017./2018.

Uvod

Uobičajeno je seizmičku ugroženost (hazard) nekog područja prikazivati kartama potresne ugroženosti. To su karte koje pokazuju prostornu raspodjelu zabilježenih i/ili procijenjenih vršnih iznosa pomaka, brzine, ubrzanja te spektra odziva. U novije vrijeme cilj je procjena, u realnom vremenu, očekivanog intenziteta potresa na području zahvaćenom potresom, u svrhu brzog informiranja javnosti, boljeg planiranja i djelovanja hitnih intervencija tamo gdje su iste najpotrebnije. Za potrebe ovog rada, a radi procjene seizmičkog hazarda i izrade karata potresne ugroženosti korišten je programski paket ShakeMap [1]. Automatska izrada gore navedenih karata moguća je dolaskom prvih informacija nakon destruktivnog potresa, zapisa gibanja tla, te koordinata epicentra i njegove magnitude. Ako pak pretpostavimo koordinate epicentra, magnitudu očekivanog potresa, te opcionalno parametre rasjednog segmenta koji se može aktivirati ili je već prije bio aktivan, mogu se izraditi karte scenarija potresa, koje osnovnu primjenu imaju u obuci planiranja i koordiniranja hitnih intervencija, vlasti, lokalne uprave i drugih organizacija. Primjenom programskog paketa ShakeMap može se procijeniti gibanje tla na području koje okružuje rasjed i dobiti rezultate kao da je događaj realni potres. Sam program koristi atenuacijske relacije za procjenu vršnih gibanja na osnovnoj stijeni. Ovaj pristup je jednostavan i aproksimativan, generalno prikazuje prosječan utjecaj, zato što je teško objasniti pojedini odabir epicentra ili prikazati rezultate za sve moguće epicentralne lokacije. Karte scenarija korisne su za ispitivanje izlaganja struktura, komunalija i cjevovoda pri posebnim potencijalnim potresima, a njihov temeljni cilj je priprema i trening kako bi bili spremni za rijetke, ali razarajuće događaje pri kojima su važne ispravne i pravovremene reakcije [2].

U ovom radu, napravljena je procjena seizmičkog hazarda primjenom ShakeMap programskog paketa za dva karakteristična i bitna grada u Hrvatskoj – Zagreb, glavni i najnaseljeniji grad i Dubrovnik - jedno od najvažnijih povijesno-turističkih središta Hrvatske i grad s UNESCO-vog popisa Svjetske baštine. Osim navedenoga, oba grada imaju znatnu seizmičku povijest. To su mjesta gdje su se dogodili najjači povijesni potresi (1667. godine u Dubrovniku i 1880. godine u Zagrebu), praktički definiraju seizmički hazard Hrvatske, te je za očekivati na obje lokacije najveće horizontalno ubrzanje s povratnim razdobljem od 475 godina [3]. Prikaz scenarija povijesnih potresa bio je motiv da se prikaže kako bi izgledao model gibanja ukoliko bi došlo do potresa različitih magnituda na istim i/ili bliskim rasjedima. U svrhu preciznijeg prikaza raspodjele

intenziteta korištena je geološka karta Hrvatske [4] i izračunate brzine S valova u gornjih 30 metara (V_{s30}) [5] kako bi bila napravljena bolja prostorna korekcija i dobiven bolji pristup očekivanim amplifikacijskim efektima.

Opći i specifični ciljevi rada

Programski paket ShakeMap osmislio je David Wald za područje Kalifornije, a za njegov dizajn i primjenu zaslužni su Wald i sur. [1]. Zbog svoje svrhe, program se brzo razvijao i širio po cijelom SAD-u. Osim za SAD karte potresne ugroženosti su primijenjene i razvijane za Japan, Tajvan, Kanadu, Italiju, Tursku i Novi Zelandu [6]. ShakeMap je seizmološki utemeljen interpolacijski algoritam koji koristi dostupne podatke gibanja tla i seizmološko znanje za izradu karata gibanja tla na lokalnoj i regionalnoj skali. Kao dodatak podacima koji su neophodni za realističan izvod i prikaz rezultata, osnove za dobivanje točnih karata potresne ugroženosti su atenuacijske relacije, kao funkcije udaljenosti na različitim periodima i različitim magnitudama te realni opisi amplifikacija [2]. Opći cilj ovog rada je upoznavanje s radom samog programskog paketa ShakeMap te njegova primjena na konkretnim slučajevima, a kako bi se pokazala svrha i korist izrađenih karata.

ShakeMap je razvijen prvenstveno zbog urbanih područja gdje je rizik najveći i stanovništvo u opasnosti, a hitna intervencija prostorno složena. Brza dostupnost karata potresne ugroženosti može biti koristan alat organizacijama civilne zaštite, građanima i medijima, zato što pruža prvi izvještaj o potresanju i očekivanu ugroženost kao posljedicu destruktivnog potresa. Budući da je moguć nastanak veće štete na udaljenijim mjestima od samog izvora, zbog amplifikacije, karte potresne ugroženosti temeljna su strategija koja opisuje raspodjelu intenziteta potresa, kako na bliskim tako i na udaljenim područjima. Naš specifični cilj bio je prikazati ugroženost i potencijalnu štetu na području dvaju gospodarskih i turističkih središta Hrvatske, Zagreba i Dubrovnika pretpostavljajući kao ulazne parametre očekivanu magnitudu i pretpostavljene koordinate epicentra. Nadalje, za oba grada uzeta je mogućnost aktivacije dva susjedna rasjeda koji se protežu područjem za koje su izrađene karte scenarija. Kako nema scenarija koji može točno prikazati svaki detalj, scenariji potresne ugroženosti su koristan regionalni model koji pokazuje potencijalnu štetu i pružaju bolje razumijevanje seizmičkog hazarda. U seizmološke svrhe, karte su našle korisnu upotrebu za brzi pregled posljedica geološke strukture i rasjedanja. Treba naglasiti da izrađeni scenariji potresne ugroženosti nisu predviđanja potresa.

Zapravo, nitko ne zna kada će, gdje i kako snažan potres biti. Ovim načinom se samo pretpostavljaju hipotetski potresi (koji bi se realno jednom mogli dogoditi na danim lokacijama, na osnovi proučavanja seizmičke povijesti istih), koordinate njihovih epicentara i magnituda, te se mogu napraviti razumna predviđanja djelovanja tih potresa, naročito način potresanja tla.

Plan rada

Za ovaj rad korištena je 3.1 verzija ShakeMap programskog paketa instalirana u Nacionalnom institutu za geofiziku i vulkanologiju (INGV) u Rimu, gdje je program automatiziran, a generirane karte prikazuju se na mrežnim stranicama gotovo u realnom vremenu - nekoliko minuta nakon potresa [7]. Daljnjim pristizanjem podataka iste se automatski nadograđuju. Za svrhu izrade gotovo trenutnih karata podaci se zapisuju gustom mrežom instrumenata, uglavnom širokopojasnim digitalnim uređajima, seizmografima i akcelerografima. U Hrvatskoj je trenutno instalirano se 39 digitalnih širokopojasnih seizmografa (17 stalnih postaja Seizmološke službe, 4 privremene postaje, 7 postaja u sklopu VELEBIT mreže te 11 AlpArray i AlpArray CASE postaja) [8]. S obzirom da ShakeMap u Hrvatskoj još nije instaliran ulazni podaci se unose i njima upravlja ručno. Uz seizmološke podatke potrebne za ispravnu interpolaciju, koriste se prethodno određene atenuacijske relacije za procjenu gibanja tla i lokalna amplifikacija bazirana na osnovu prosječne brzine S valova u gornjih 30 m (V_{s30}).

Relacije

Za područja izvan dosega seizmičkih instrumenata i za izradu karata scenarija, gibanja tla moraju se pretpostavljati koristeći dostupne parametre izvora potresa i atenuacijske relacije. Atenuacijske relacije su dostupne za širok spektar magnituda, žarišnih mehanizama i tektonskih postavki. Igraju važnu ulogu u kvalitetnoj izradi karata potresne ugroženosti. Kako je Hrvatska podijeljena na 17 različitih seizmičkih zona [9], bilo bi idealno kada bi za svaku zonu koristili njoj najbolju odgovarajuću atenuacijsku relaciju. No, za ShakeMap program razvijene su i ponuđene određene relacije [10] predviđene za određena područja. Tako za cijelo područje Europe postoji samo jedna atenuacijska relacija. Stoga je za svrhe ovog rada, bez obzira na regionalne različitosti seizmičke aktivnosti, korištena predložena atenuacijska relacija, koju su izveli Akkar i Bommer [11].

Prostorna korekcija

Kako su amplitude seizmičkih valova na osnovnoj stijeni manje su od onih na rahlom, mekanom sloju ovaj korak igra važnu ulogu pri izradi karata potresne ugroženosti. Rastresiti, mekani slojevi sedimenata, odnosno depozita, na čvrstoj, osnovnoj stijeni mogu znatno povećati amplitudu seizmičkih valova odgovarajuće frekvencije na samoj površini do nekoliko puta. Pri interpoliranju prostornih podataka na mrežu preko koje će biti definirane razne prostorne varijacije prvo se uklanjaju amplifikacijski utjecaji zatim izvodi interpolacija na uniformnoj mreži te na kraju dodaju amplifikacijski uvjeti za svaku točku mreže, ovisno o njezinim karakteristikama. U praksi se prvo konvertiraju amplitude zabilježenih vršnih gibanja na osnovnu stijenu, pa se računaju vršna gibanja za zamišljene točke mreže koja je bazirana na osnovnoj stijeni primjenom atenuacijske jednadžbe. Amplitude ovisne o amplifikacijskim faktorima se nadalje dodaju procjenama za osnovnu stijenu koristeći geološku kartu s prosječnim brzinama S valova u gornjih 30 metara (V_{s30}). Amplifikacijski faktori su usvojeni iz Borchardt-ovih relacija [12]. Važno je napomenuti da je ova procedura prostorne korekcije uređena tako da vrati originalne, zabilježene podatke. Najvažniji parametar za proceduru prostorne korekcije je brzina širenja S valova u gornjih 30 metara (V_{s30}). Geološka klasifikacija litologije za područje Hrvatske provedena je na osnovu geološke karte Hrvatske [4] s mjerilom 1:300 000.

Ranije izračunate brzine V_{s30} iz Stanko i sur. [5] poslužile su kao smjernice pri svrstavanju litoloških jedinica u geološku kategorizaciju prema Eurokodu 8 [13] - EC8 (tablica 1). Određivano je po pravilu koje kaže da skoro sve stijene (karbonati, vapnenci, breče itd.) u geološkoj kategorizaciji spadaju u kategoriju A prema EC8, vapnenačko-klastične naslage, tvrdi pješčenjaci, lapori, zbijeni šljunci, jako tvrde gline i slični „tvrđi“ materijali spadaju u B kategoriju, aluvijalni šljunci i pijesci u većini slučajeva su C kategorija, dok općenito debele naslage pijeska, slabe gline i prahovi spadaju u D kategoriju te se većinom nalaze na aluvijalnim područjima neposredno uz rijeke. Važno je napomenuti da je ovo samo gruba procjena, jer je bez bušotina i geofizičkih istraživanja teško precizno procijeniti EC8 kategoriju samo prema geološkoj karti. Za klasificiranu litologiju dodijeljene su sljedeće brzine: A = 1000, B = 600, C = 300, D = 150 i E = 250 m/s, koje su zatim usuglašene sa seizmotektonskim značajkama (prof. Tomljenović, usmeno priopćenje). Osim za područje Hrvatske, geološka klasifikacija litologije napravljena je i za područje Bosne i Hercegovine, zbog uskog dijela južnog Jadrana, gdje se epicentri nekih važnih potresa nalaze izvan granice Hrvatske. Treba naglasiti da za

područje Bosne i Hercegovine nisu bili dostupni podaci o izmjerenim prosječnim brzinama širenja S valova u gornjih 30 m (V_{s30}).

Tablica 1 Geološka klasifikacija i odgovarajuće V_{s30} vrijednosti

Vrsta tla	Opis stratigrafskog profila	V_{s30} (m/s)
A	Stijene (karbonati, vapnenci, breče itd.)	1000
B	Vapnenačko-klastične naslage, tvrdi pješčenjaci, lapori, zbijeni šljunci, jako tvrde gline i slični „tvrđi“ materijali	600
C	Aluvijalni šljunci i pijesci	300
D	Debele naslage pijeska, slabe gline, prahovi	150
E	Površinski aluvijalni slojevi C ili D, 5-20 m debljine, koji se nalaze preko tvrđeg materijala	250

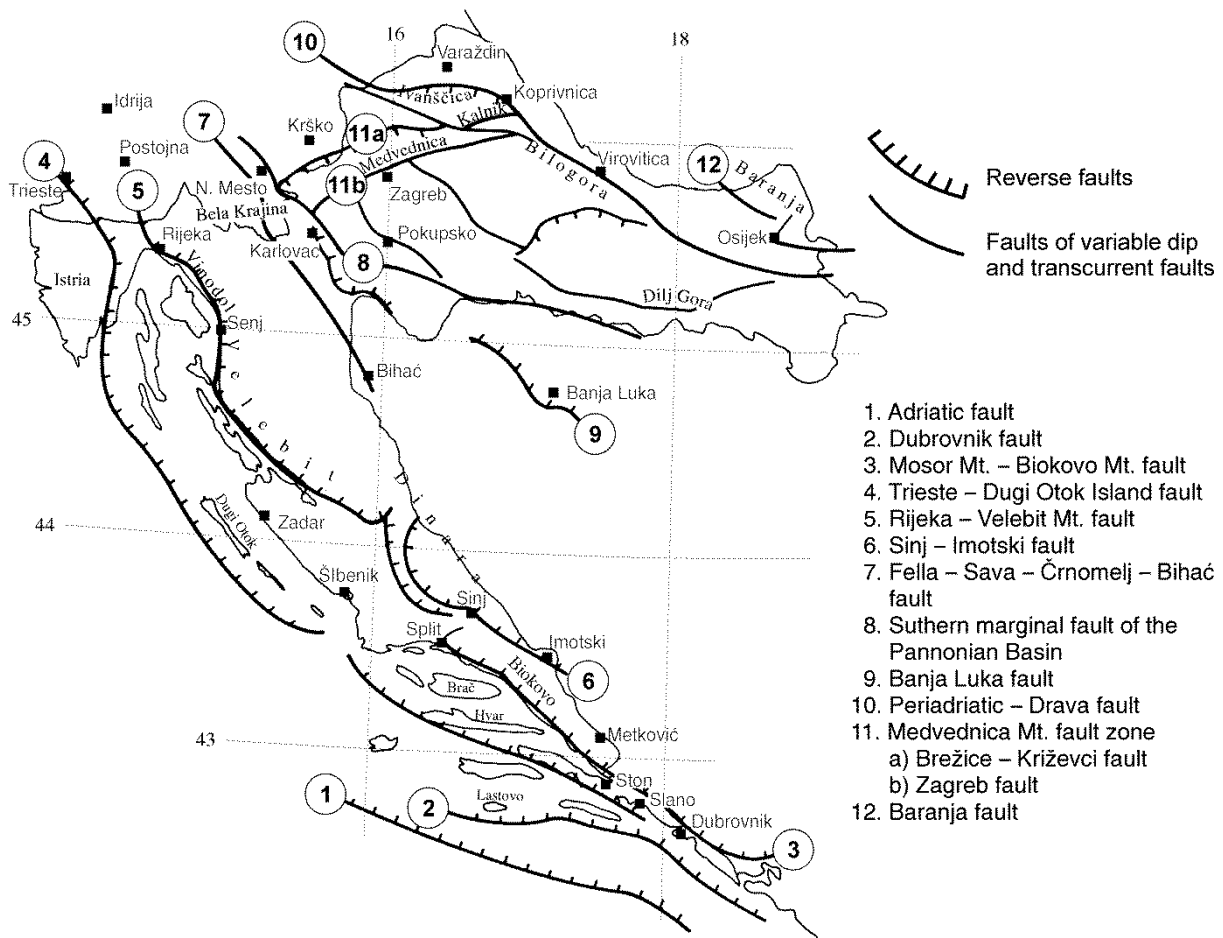
Ulazni podatci

Osnovni ulazni parametri za izradu karata scenarija potresne ugroženosti su lokalna magnituda, koordinate epicentra potresa te opcionalno, definicija rasjednog segmenta koji se može aktivirati ili je već prije bio aktivan. Program računa na sličan način kao pri generiranju karata potresne ugroženosti realnih događaja te može procijeniti gibanje tla na području koje okružuje rasjed i dati rezultate kao da je događaj realni potres. Svi ulazni podaci moraju biti zapisani u datoteci koja je pisana XML (Extended Markup Language) jezikom. Oni se na izrađenoj karti nalaze u zaglavlju, a u podnožju je prikazana Modificirana Mercallijeva ljestvica intenziteta (MMI) [6] za koju možemo reći da ima dobra preklapanja sa Mercalli-Cancani-Siebergovom (MCS) ljestvicom korištenom u Hrvatskoj [14].

Rezultati i diskusija

Dosadašnja procjena parametara seizmičkog hazarda na području Hrvatske [9] pokazuje da se maksimalne vrijednosti horizontalnog ubrzanja s velikim povratnim periodom, dobivene kombinacijom determinističke i probabilističke procedure, mogu očekivati na aktivnom obalnom dijelu Hrvatske, oko grada Dubrovnika, dok u kontinentalnom dijelu zemlje najveći je hazard oko Zagreba. Osim toga, ova područja su posebno zanimljiva zbog svog gospodarskog, turističkog i kulturnog značaja. Pri unosu

ulaznih podataka o geometriji rasjeda korištena je slika 2, koja prikazuje kartu najvažnijih rasjeda [9].

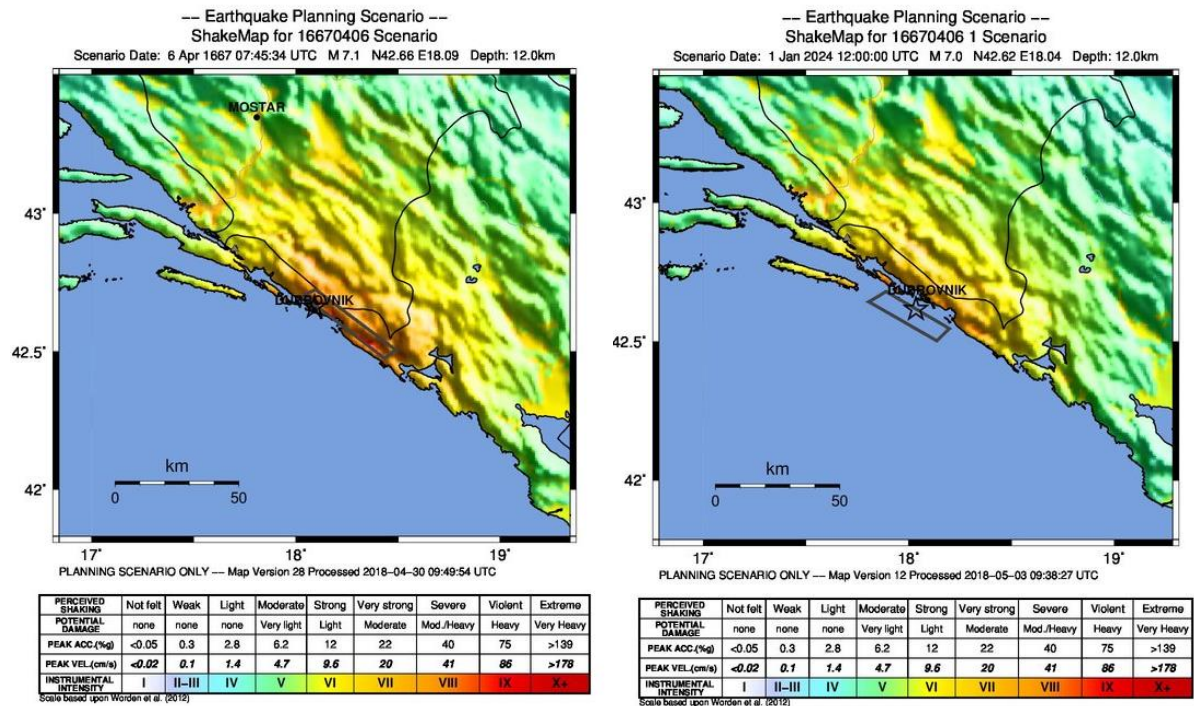


Slika 1. Karta najvažnijih rasjeda u Hrvatskoj (preuzeto iz [9]).

Dubrovnik

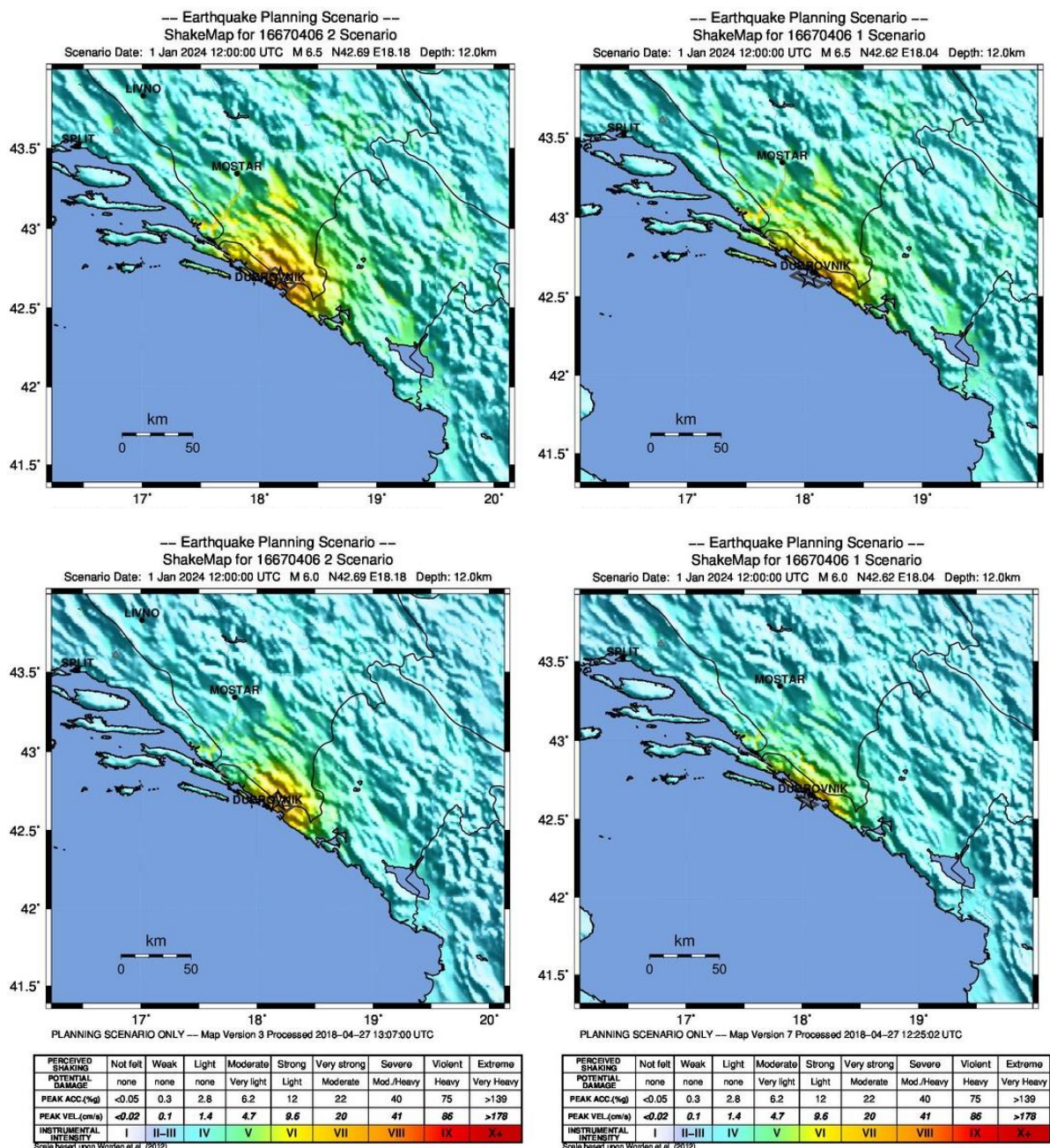
Veliki dubrovački potres dogodio se 6. travnja 1667. godine i zasigurno zaslužuje veliku pozornost jer je svojim djelovanjem opustošio Dubrovnik i okolicu te ima značajan utjecaj na seizmičnost i procjenu seizmičkog hazarda gotovo cijelog obalnog dijela Hrvatske. Potres se osjetio maksimalnim intenzitetom IX-X °MCS ljestvice [15], što ovaj potres čini najsnažnijim potresom na teritoriju Hrvatske. Potresno područje se pružalo čak od Turske do Trsta. Većina potresa na ovom području rezultat su pomaka duž Dubrovačkog rasjeda i Mosor-Biokovo rasjeda (slika 1). Ulazni podaci za izradu scenarija uzeti su iz rada Markušić i sur. [15], gdje je epicentar potresa smješten desetak kilometara sjevernije od lokacije koja se nalazi u Hrvatskom katalogu potresa. Osim toga napravljena

je datoteku koja sadrži informacije o rasjednoj zoni, gdje je za duljinu rasjeda uzeta vrijednost 30 km (što odgovara magnitudi potresa), kako je navedeno u istom radu. Treba naglasiti da je korišten pristup u kojem se uključuje pružanje rasjeda, što smanjuje utjecaj same lokacije epicentra na rezultatnu raspodjelu intenziteta.



Slika 2. Lijevo: Karta scenarija velikog Dubrovačkog potresa s uključenim parametrima rasjeda
Desno: Karta scenarija s pretpostavljenim parametrima rasjedne zone.

Na slici 2 prikazane su karte scenarija potresnog hazarda za Dubrovački potres sa uključenim parametrima rasjeda. Može se uočiti kako se duž rasjedne zone izmjenjuju intenzitet VIII i IX °MMI ljestvice, što je jasni pokazatelj da program uzima u obzir litologiju i moguće amplifikacijske čimbenike. Ovdje je dat sjajan način uvida u situaciju gdje se u kratkom vremenu može procijeniti ozbiljnost situacije. Kao usporedbu prikazano je kako izgleda distribucija intenziteta na Dubrovačkom području kada bi se dogodio potres magnitude $M = 7.0$ kao posljedica pomaka duž Mosor-Biokovo rasjeda u podmorju Jadrana s epicentrom oko 6 km jugozapadno od prethodnog, velikog Dubrovačkog potresa. U ovom slučaju maksimalno očekivani intenzitet iznosi VIII °MMI ljestvice.



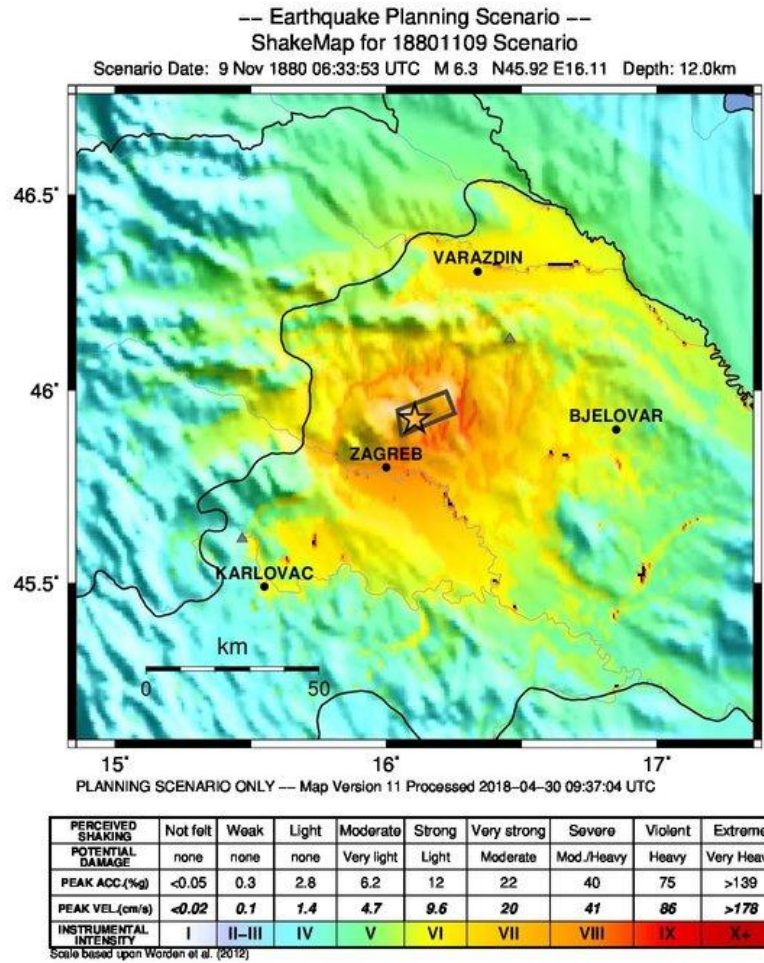
Slika 3. Karte scenarija intenziteta za slučajeve lokacije epicentra na obalnom dijelu(lijevo) i u podmorju Jadrana(desno), magnitude: gore: $M = 6.5$. dolje: $M = 6.0$.

Osim potresa s najvećom očekivanom magnitudom interesantno je vidjeti prostornu raspodjelu intenziteta ukoliko bi se dogodio potres manje magnitude, ali još uvijek značajne, s razornim svojstvima. Na slici 3 prikazani su potresi magnitude $M = 6.5$, odnosno $M = 6.0$ koji bi aktivirali dva različita segmenta (različitih lokacija epicentara). Očekivano je da će potres s epicentrom na kontinentalnom dijelu zahvatiti i utjecati na šire kontinentalno područje međutim karte daju odličan uvid opsega područja zahvaćenog

potresanjem s izvorom u podmorju Jadrana. Osim toga, na karti su jasno prikazane kontinentalne i državne granice te upisani veliki gradovi. Zvezdica označava epicentar, a rasjedna zona aproksimativno je uokvirena. Izabrana hipocentralna dubina za dane pretpostavljene događaje je uzeta 12 km, što je srednja dubina žarišta na cijelom području Hrvatske [16].

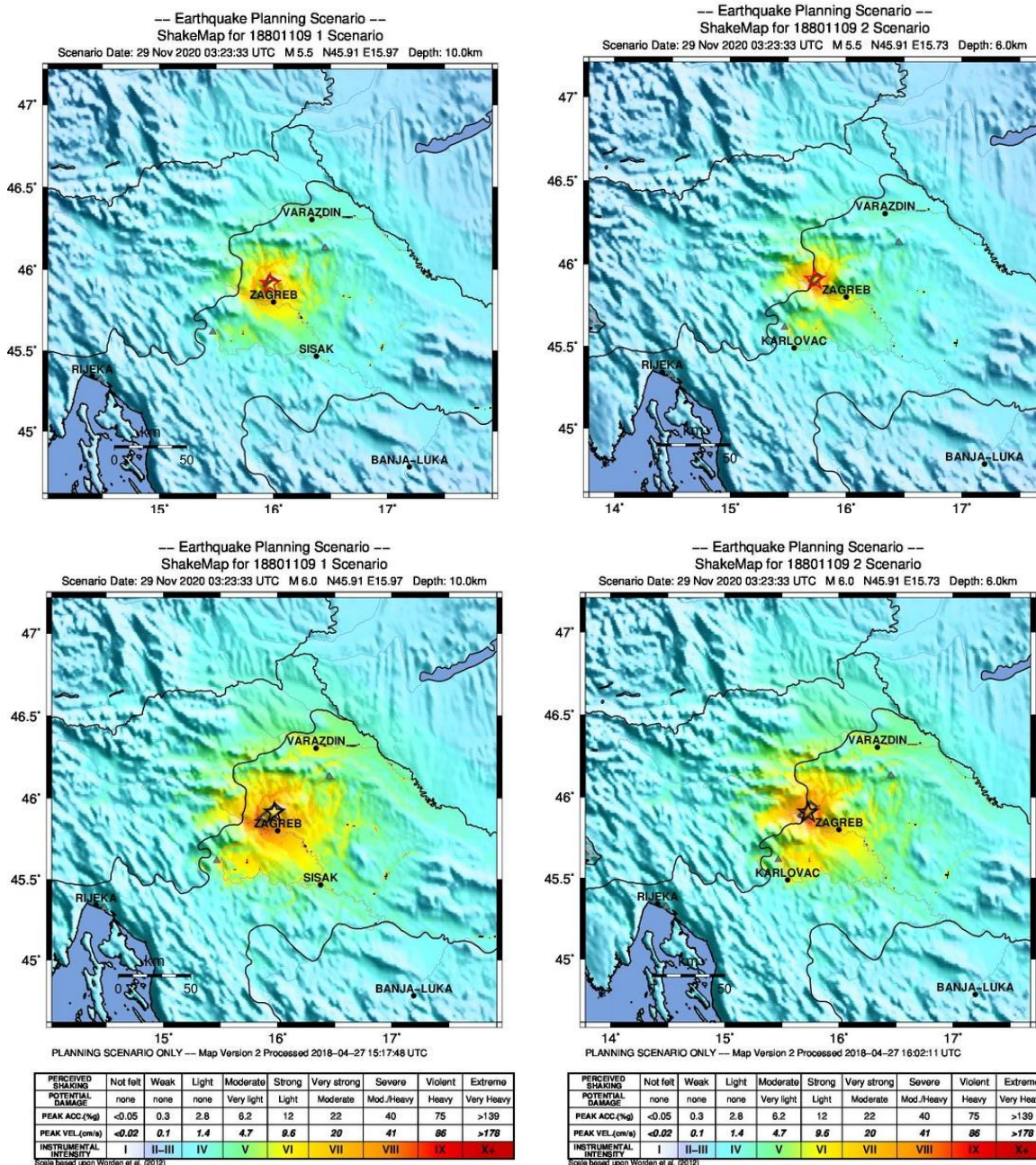
Zagreb

Područje Zagreba i okolice najgušće je naseljeni dio Hrvatske zbog čega je vrlo ranjivo od potresa. Sam grad Zagreba omeđen s dva aktivna rasjeda (Brežice-Križevci rasjed i Medvednički rasjed) koji čine široku rasjednu zonu Medvednice. U ovom radu su prikazane karte scenarija za potrese koji su se hipotetski dogodili na oba navedena rasjeda te karta povijesno značajnog zagrebačkog potresa iz 1880. godine. Najbliža i najznačajnija za Zagreb, epicentralna lokacija (Kašina) Medvednice nalazi se na svega 15 km udaljenosti sjeveroistočno od središta grada [17]. Tu se dogodio najveći zagrebački potres 9. studenoga 1880. godine. Maksimalni intenzitet u epicentru procijenjen je na VIII °MCS, a u ostalom dijelu grada Zagreba na VII-VIII °MCS, dok je magnituda procijenjena na $M = 6.3$ [18].



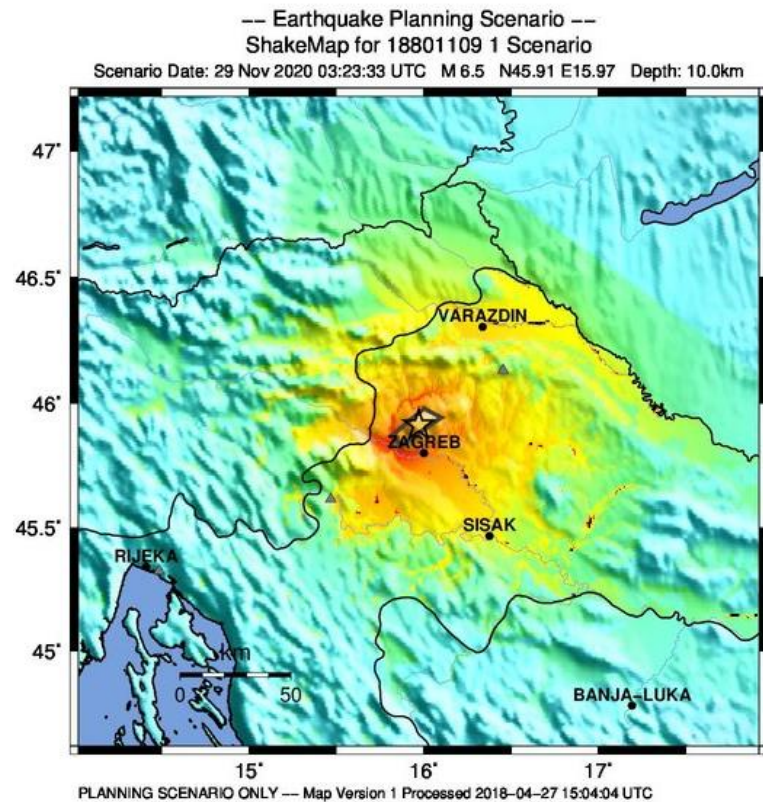
Slika 4. Karta scenarija potresa od 9. studenoga 1880. godine s epicentrom na području Zagreba.

Na slici 4 može se vidjeti kako je potresanje djelovalo na različitim geološkim cjelinama te kakav je utjecaj imalo na sam glavni grad. Na slici 5 prikazani su hipotetski potresi magnitude $M = 5.5$ i $M = 6.0$ za koje je pretpostavljeno da su se dogodili na gore navedenim rasjedima. Za hipocentralne dubine stavljene su vrijednosti 10 km, odnosno 6 km [19]. Oba rasjeda (Brežice-Križevci rasjed i Medvednički rasjed) imaju smjer pružanja SI-JZ, što se vidi na slici 1.



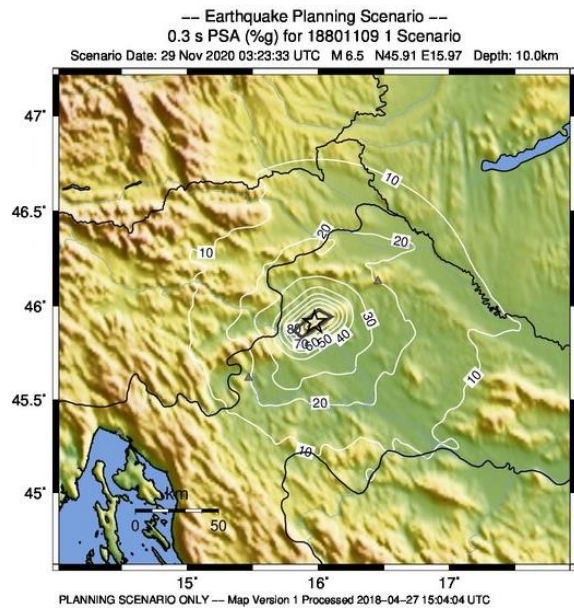
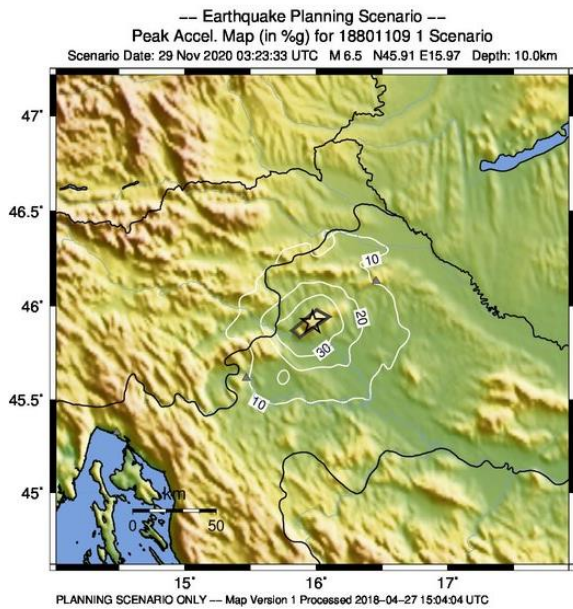
Slika 5. Karte scenarija intenziteta za potrese s epicentrima na rasjedima Medvednica (lijevo) i Brežice-Križevci (desno) s magnitudama; gore: $M = 5.5$, dolje: $M = 6.0$.

Osim karata koje pokazuju raspodjelu intenziteta ShakeMap program izrađuje i karte koje prikazuju izolinije vršnog ubrzanja, vršne brzine te spektar odziva. Na slici 6 prikazana je karta intenziteta, vršnog ubrzanja i spektra odziva za period $T = 0.3$ s, za potres magnitude $M = 6.5$ za lokaciju epicentara na Medvednica rasjedu.



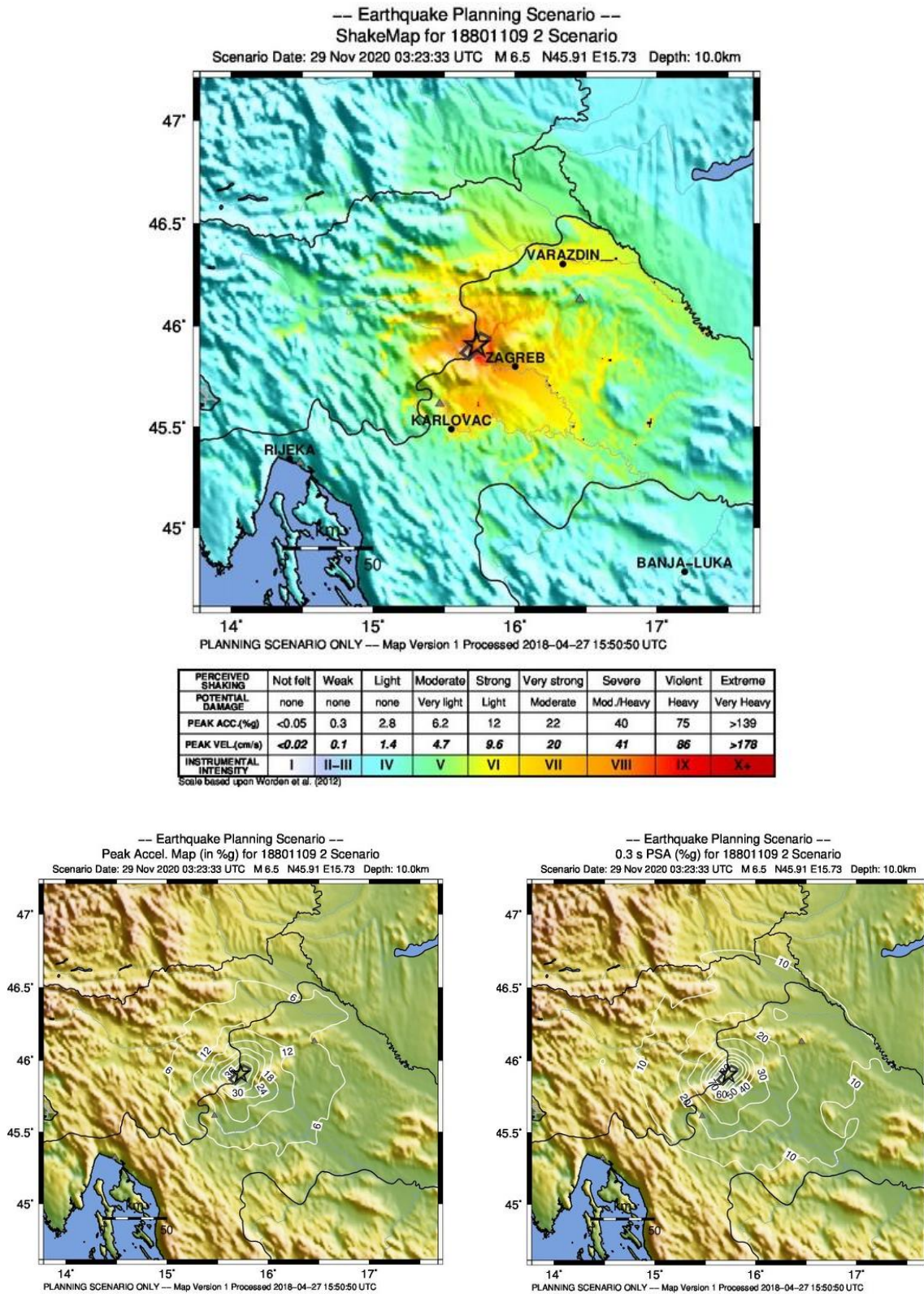
PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Mod./Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<0.05	0.3	2.8	6.2	12	22	40	75	>139
PEAK VEL.(cm/s)	<0.02	0.1	1.4	4.7	9.6	20	41	86	>178
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Scale based upon Worden et al. (2012)



Slika 6. Karta scenarija intenziteta (gore), vršnog ubrzanja (lijevo) i spektra odziva (desno) za potres s epicentrom na Medvednica rasjedu.

Isti slijed karata prikazan je na slici 7 za potres magnitude $M = 6.5$ za lokaciju epicentra na Brežice-Križevci rasjedu.



Slika 7. Karta scenarija intenziteta (gore), vršnog ubrzanja (lijevo) i spektra odziva (desno) za potres s epicentrom na Brežice-Križevci rasjedu.

Vršne vrijednosti vertikalnih komponenti se ne koriste u konstrukciji karata zbog regresijskih relacija koje se temelje na horizontalnim vršnim vrijednostima. Izolinije se temelje na maksimalno izračunatoj vrijednosti na definiranoj mreži za svaki potres. Za srednje do jake potrese, model vršne akceleracije je često kompliciran s ekstremnim promjenama na udaljenosti od nekoliko kilometara. Uzrok su geološke razlike malih razmjera koje značajno mogu promijeniti amplitudu visokofrekventnih ubrzanja i karakter valnog oblika. Unatoč tome, model vršnih ubrzanja često odražava ono što se osjetilo od niže razine potresanja do više razine oštećenja. Spektar odziva pokazuje odgovor prigušenog oscilatora s jednim stupnjem slobode na zabilježeno gibanje tla. Ova reprezentacija podataka je važna za inženjerstvo kao pokazatelj kako će trešnja djelovati na građevinske strukture [2], jer postoji ovisnost između vlastitog perioda zgrade T i njene visine H ($H \approx 62.5 \cdot T$).

Zaključak

U ovom je radu analiziran seizmički hazard Zagreba i Dubrovnika, primjenom ShakeMap programskog paketa, instaliranog u Nacionalnom institutu za geofiziku i vulkanologiju u Rimu. Program je primijenjen za izradu karata scenarija za koje su pretpostavljeni potrebni ulazni podaci. Prikazane su karte značajnih povijesnih potresa čiji su epicentri bili u ova dva grada. Za izradu karata korišten je prilagođeni Akkar i Bommer [11] model atenuacijskih relacija za područje Europe. Za prostornu korekciju korištena je geološku kartu Hrvatske s mjerilom 1:300 000 gdje su svakoj litološkoj jedinici sukladno geološkoj kategorizaciji prema Eurokodu 8 dodijeljene određene brzine V_{s30} . Osim za područje Hrvatske, geološka klasifikacija litologije napravljena je i za područje Bosne i Hercegovine.

Iako izrađene karte daju dobar uvid u područja s potencijalnom ugroženošću sa sigurnošću možemo reći da taj uvid još nije precizan odgovor potresanja te sigurno precjenjuju ili podcjenjuju vrijednosti. Razlog je odabir atenuacijskih relacija koje su u ovom slučaju najvažniji alat. Instalacijom i prilagodbom programa na područje Hrvatske, gdje bi se izvele i koristile odgovarajuće atenuacijske relacije za Hrvatsku te još detaljnije analizirala prostorna korekcija povećala bi se preciznost prikazanih komponenti i distribucije potresanja. Osim toga u budućnosti bi se trebala prilagoditi i ljestvica

intenziteta potresa na Mercalli-Cancani-Siebergovu (MCS) ljestvicu, korištenu u Hrvatskoj.

Zahvala

Zahvaljujemo se mentorici doc. dr. sc. Snježani Markušić na poticaju, podršci i povjerenju koje je imala u nas. Zahvaljujemo se dr. Albertu Michelini koji nas je primio pod svoje mentorstvo u Italiji te profesoru Bruni Tomljenoviću i Davoru Stanku koji su nam pomogli pri pripremi ulaznih podataka.

Literatura

- [1] Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H., Kanamori, H., Scrivner, C. W. and C. B. Worden (1999): Trinet ‘ShakeMaps’: rapid generation of peak ground motion and intensity maps for earthquakes in southern California. *Earthq.*, Vol. 15, p. 537.
- [2] Worden, C. B. and D. J. Wald (2016): ShakeMap Manual, version 2.0, 1-113.
- [3] Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, K., Marić, K., Markušić, S. and I. Sović (2011): Seismic hazard maps of Croatia. *Geophysical Challenges of the 21st Century*, 43-43.
- [4] Hrvatski geološki institut: https://www.hgi-cgs.hr/geoloska_karta_Hrvatske_1-300_000.htm, 03.05.2018.
- [5] Stanko, D., Markušić, S., Ivančić, I., Gazdek, M. and Z. Gülerce (2017); Preliminary Estimation of Kappa Parameter in Croatia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1755-1307
- [6] Wald, D. J., Worden, C. B. , Quitoriano, V. and K. L. Pankow (2006): ShakeMap Manual, Technical Manual, Users Guide, and Software Guide; <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/12A01/pdf/508TM12-A1.pdf>
- [7] Michelini, A., Faenza, L., Lauciani, V. and L. Malagnini (2008): Shakemap implementation in Italy. *Seismol. Res. Lett.*, 79, Vol. 5, 688–697.
- [8] Mreža seizmoloških postaja, http://www.pmf.unizg.hr/geof/znanost/seizmologija/velebit/mreza_velebit-net , 02.05.2018.

- [9] Markušić, S. and M. Herak (1998): Seismic zoning of Croatia. *Natural Hazards*, 18, 269-285.
- [10] Wald, D. J., Worden, C. B., Quidroni, V. and K. L. Pankow (2006): *ShakeMap Software Guide*.
- [11] Akkar, S. and J. J. Bommer (2007); Empirical Prediction Equations for Peak Ground Velocity Derived from Strong-Motion Records from Europe and the Middle East, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97(2), 511-530.
- [12] Borchardt, R. (1994); Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthq. Spectra*, 10, Vol. 4, 617–653.
- [13] Hrvatski zavod za norme (2011): HRN EN 1998-1:2011/NA:2011, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade – Nacionalni dodatak (Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings – National Annex).
- [14] Musson, R. M. W., Grünthal, G. and M. Stucchi (2010): The comparison of macroseismic intensity scales. *J Seismol*, 14, 413–428.
- [15] Markušić, S., Ivančić, I. and I. Sović (2017): The 1667 Dubrovnik earthquake – some new insights. *Studia geophysica et geodaetica*, 61 , 3; 587-600.
- [16] Herak, M., Herak, D. and S. Markušić (1996); Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908-1992. *Terra Nova*, 8, 86-94.
- [17] Herak, D. i M. Herak (2006): Veliki zagrebački potres 1880. godine. *Meridijani*, (1333-7289), 109, 24-33.
- [18] Sović, I. (1998): Croatian macroseismic database. *Annales Geophysicae / EGS* (ur.). Aberystwyth : Cambrian Press, 1998. C137
- [19] Đurđević, F.: Seizmotektonika šireg zagrebačkog područja. Završni rad. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 2015.

Procjena seizmičke ugroženosti za Zagreb i Dubrovnik

Iva Ćuk i Dario Jozinović

Sažetak

U ovom radu je opisana primjena ShakeMap programskog paketa za izradu karata scenarija potresne ugroženosti gdje su pretpostavljene magnitudo, lokacije epicentara i pružanje rasjeda unošene ručno, kako za povijesne događaje, tako i za one očekivane na području Zagreba i Dubrovnika. Dobiveni rezultati mogu poslužiti u svrhu brze analize hazarda, te daju uvid u mjesta s najvećom potencijalnom štetom. Program je dobar i brz izvor informacija i od posebnog je značaja kada je njegova primjena automatska, jer tada u roku od nekoliko minuta nakon potresa daje uvid u situaciju gdje hitna intervencija može (i mora) brzo reagirati. Izrađene karte napravljene su za najjače potrese u Hrvatskoj, koji karakteriziraju područja najizraženijeg hazarda prema Karti potresnih područja Republike Hrvatske [3]. Može se očekivati da dobiveni rezultati ne daju precizne prikaze zbog korištenja atenuacijskih relacija za cijelu Europu. Bolji prikaz bi se dobio kada bi prilagodili atenuacijske relacije za područje Hrvatske. Nadalje, nadogradnjom podataka o litologiji i površinskom utjecaju te unosom još preciznijeg opisa rasjeda s točnim koordinatama i duljinom aktivne dionice rasjeda dobila bi se viša razina prikaza modela štete.

Ključne riječi: ShakeMap, karte scenarija, seizmički hazard, Hrvatska

Seismic hazard assessment for Zagreb and Dubrovnik

Iva Ćuk i Dario Jozinović

Abstract

In this paper we describe the use of the ShakeMap software package for creating scenario maps of earthquakes for which we assumed and manually entered the magnitude, location and geometry of the fault: both for historical events and for those expected in Zagreb and Dubrovnik. The results obtained can be used for the purpose of a rapid hazard analysis and provide insight into areas with greatest potential damage. The ShakeMap software is good and fast source of information and it is of particular importance when it is automatic procedure for estimating ground motions within a few minutes from earthquake occurrence. We generated maps for assumed events using a hazard map of the Republic of Croatia [3]. It can be expected that the obtained results do not give a precise picture because of using general ground- motion prediction equation for European area which should be adapted for Croatia. Furthermore, by upgrading lithology and surface data and by providing more precise description of the fault with the exact coordinates and rupture length, a higher level representation of the damage model would be obtained.

Keywords: Shakemap, scenario maps, seismic hazard, Croatia