

PRIRUČNIK

**za integraciju
seizmoloških podataka
u sustav prostornog planiranja
Republike Hrvatske
na lokalnoj i regionalnoj razini**

Krešimir Kuk
mr.sc. Ines Ivančić
dr.sc. Ivica Sović
dr.sc. Marija Mustać
Tomislav Fiket
dr.sc. Kristina Šariri



REPUBLIKA HRVATSKA
Ministarstvo prostornoga uređenja,
graditeljstva i državne imovine



Financira
Europska unija
NextGenerationEU

IMPRESSUM

Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine

**Priručnik za integraciju seizmoloških podataka u sustav
prostornog planiranja Republike Hrvatske na lokalnoj i regionalnoj razini**



Projekt je sufinancirala Europska unija iz Nacionalnog plana oporavka i otpornosti 2021. – 2026., u okviru provedbe reforme C6.1. R4 - Modernizacija i integracija seizmičkih podataka za proces obnove i planiranja buduće gradnje te monitoring javne infrastrukture.

Izneseni stavovi i mišljenja samo su autorova i ne odražavaju nužno službena stajališta Europske unije ili Europske komisije. Ni Europska unija ni Europska komisija ne mogu se smatrati odgovornima za njih.

Autori:

Krešimir Kuk

mr.sc. Ines Ivančić

dr.sc. Ivica Sović

dr.sc. Marija Mustać

Tomislav Fiket

dr.sc. Kristina Šariri

Karte u Prilozima uredili Marko Kapelj i Vedran Damjanović

Seizmološka služba pri Geofizičkom odsjeku

Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Tisak: Tiskara Zelina d.d.

Naklada 550 primjeraka

ISBN: 978-953-6793-71-6 (tiskano izdanje)

ISBN: 978-953-6793-72-3 (e-knjiga, PDF)

CIP zapis je dostupan u računalnome katalogu Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu pod brojem 001183474

Zagreb, lipanj 2023.

Priručnik s prilogima objavljen je u eKatalogu na poveznici:

<https://katalog.mgipu.hr/details/2104cdc2-cc8f-4478-819f-147f1527a82f>

Sadržaj

1.	UVOD	2
2.	OPĆENITO O POTRESIMA	4
2.1	Osnovni pojmovi, uzroci i vrste potresa	5
2.1.1	Kratki povijesni pregled	5
2.1.2	Znanstveni temelji	5
2.2	Rasjedi	7
2.3	Žarišni mehanizam	8
2.4	Razdioba potresa prema dubini	8
2.5	Prostorna razdioba potresa	9
2.6	Broj potresa i njegova ovisnost o magnitudi	10
2.7	Valovi potresa	11
2.7.1	Prostorni valovi	11
2.7.2	Površinski valovi	12
2.8	Slojevi i građa Zemlje	13
3.	KVANTIFIKACIJA POTRESA	14
3.1	Makroseizmička metoda – intenzitet potresa	15
3.2	Mikroseizmička metoda – magnituda potresa	16
3.3	Odnos magnitude i intenziteta	17
4.	BILJEŽENJE I ANALIZA POTRESA	18
4.1	Bilježenje potresa	19
4.2	Analiza i lociranje potresa	20
5.	SEIZMOLOŠKA MREŽA REPUBLIKE HRVATSKE	22
5.1	Seizmološki sustav automatske obrade podataka	24
5.2	Sustav ranog upozoravanja o potresu	25
5.3	Sustav brzog obavješćivanja i reagiranja	27
6.	SEIZMIČNOST HRVATSKE	28
6.1	Hrvatski katalog potresa	29

6.1.1	Kontinentalna Hrvatska	32
6.1.2	Primorska Hrvatska	34

7. INŽENJERSKA SEIZMOLOGIJA 36

7.1	Seizmički hazard i rizik (potresna opasnost i ugroženost)	37
7.2	Atenuacijske relacije – predviđanje gibanja tla	39
7.3	Karta seizmičkog hazarda	39
7.4	Seizmičko mikrozoniranje	39
7.4.1	Lokalni uvjeti tla	40
7.4.2	Metoda omjera horizontalnog i vertikalnog spektra (HVSr)	41
7.5	Dinamički parametri građevine	42
7.5.1	Rezonancija između građevina i tla	42
7.5.2	Djelovanje potresa na građevine	43

8. KARTE POTRESNIH PODRUČJA REPUBLIKE HRVATSKE 46

8.1	Povijesni pregled	47
8.1.1	Seizmološka karta iz 1987. godine	47
8.2	Hrvatska seizmološka karta 2011.	48
8.2.1	Izrada Karte potresnih područja Republike Hrvatske (2011)	48
8.2.2	Aplikacija za očitavanje Karte potresnih područja Republike Hrvatske	48

9. UPOTREBA SEIZMOLOŠKIH PODATAKA 52

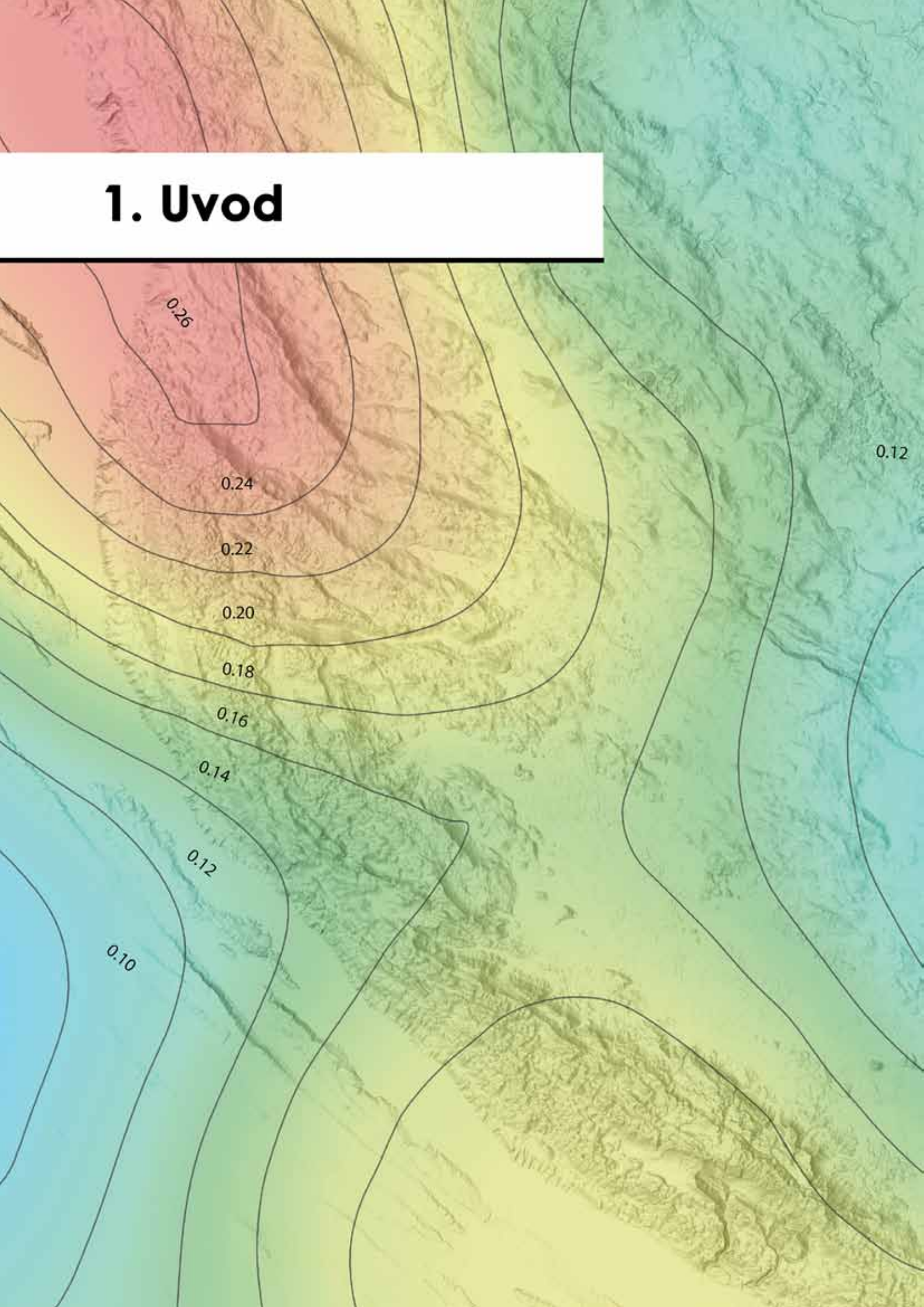
9.1	Promjene u Eurokodovima	54
-----	-------------------------	----

10. LITERATURA 56

11. PRILOZI 60

Prilog 1.	Shematski prikaz upotrebe seizmoloških podataka	61
Prilog 2.	Karta epicentara potresa na području Republike Hrvatske	62
Prilog 3.	Tumač karata potresnih područja Republike Hrvatske iz 2011. godine	63
Prilog 4.	Karte potresnih područja Republike Hrvatske po županijama (iz 2011. godine)	69

1. Uvod



Priručnik za integraciju seizmoloških podataka u sustav prostornog planiranja na lokalnoj i regionalnoj razini Republike Hrvatske (u daljnjem tekstu Priručnik) izrađen je temeljem Sporazuma sklopljenog između Ministarstva prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine i Sveučilišta u Zagrebu, Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u skladu sa Zakonom o izvršavanju Državnog proračuna Republike Hrvatske za 2023. godinu („Narodne novine“, broj 145/22), Državnim proračunom Republike Hrvatske za 2023. godinu i projekcijama za 2024. i 2025. godinu („Narodne novine“, broj 145/22), Nacionalnim planom oporavka i otpornosti 2021.-2026., Odlukom Vlade Republike Hrvatske o sustavu upravljanja i praćenja provedbe aktivnosti u okviru Nacionalnog plana oporavka i otpornosti 2021. - 2026. („Narodne novine“, broj 78/21), Zajedničkim nacionalnim pravilima za Nacionalni plan oporavka i otpornosti, Provedbenim programom i Godišnjim planom rada Ministarstva prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine za 2023. godinu i Odlukom o izravnoj dodjeli sredstava za provedbu reforme C6.1. R4 „Modernizacija i integracija seizmičkih podataka za proces obnove i planiranje buduće gradnje te monitoring javne infrastrukture“, KLASA: 983-01/22-01/114, URBROJ: 531-05-22-2 od 29. rujna 2022.

U Priručniku su opisani osnovni pojmovi u seizmologiji, kako, gdje i zašto nastaju potresi te kako se oni kvantificiraju. Objašnjeno je kako se potres karakterizira, opisani su intenzitet i magnituda potresa te njihove razlike i međusobna povezanost. Ukratko je prezentirano kako se potresi bilježe i analiziraju, opisana je seizmičnost Hrvatske i prikazane karte epicentara s pripadajućim magnitudama potresa koji su se dogodili te su istaknuti potresi koji su se manifestirali najvećom magnitudom.

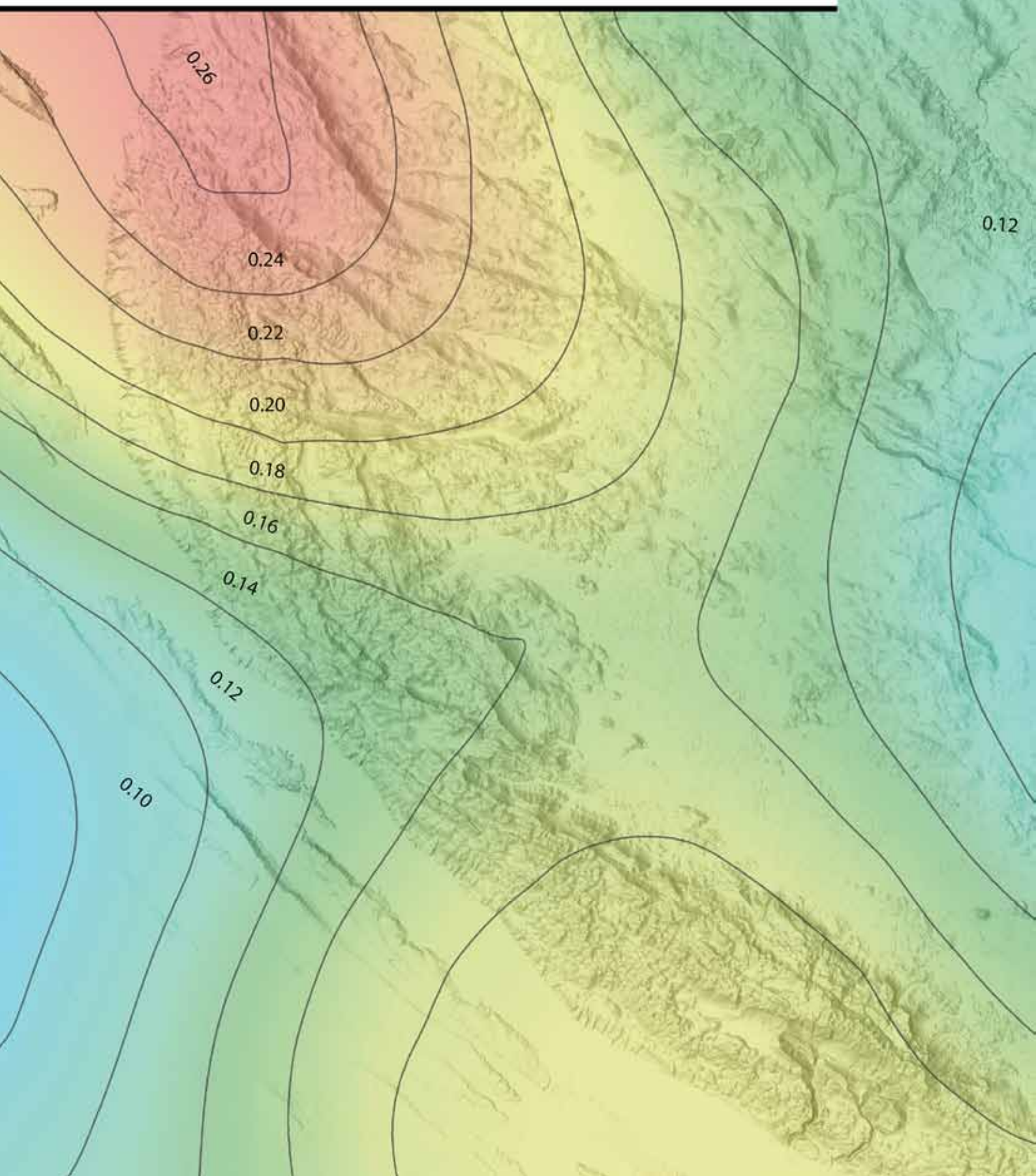
Objašnjeni su osnovni pojmovi i koncepti inženjerske seizmologije, seizmički hazard i rizik (potresna opasnost i ugroženost) te kako se oni računaju. Opisana je i seizmička mikrozonacija.

Objašnjene su osnove djelovanja potresa na građevine te dinamički parametri tla i građevina kojima se bavi inženjerska seizmologija. Komentirane su i prikazane karte potresnih područja Hrvatske, opisana metodologija njihove izrade i prikazane i objašnjene karte koje su se ranije koristile.

Prikazana je hrvatska mreža seizmoloških postaja, stalne i mobilne postaje osnovne mreže, privremene privredne seizmološke postaje te postaje postavljene u sklopu znanstvenih projekata. Predstavljeni su i sustavi automatske obrade podataka u seizmologiji, sustav ranog upozoravanja o potresu i sustav promptnog obavješćivanja o potresima te je komentirano njihovo korištenje u Hrvatskoj.

Grafički dio Priručnika sadržava karte seizmičkog hazarda koje prikazuju iznose (horizontalnih) vršnih ubrzanja tla (tipa A) za povratno razdoblje od 475 godina za cijelu Hrvatsku te za svaku županiju posebno, kao i kartu epicentara potresa na području Hrvatske.

2. Općenito o potresima



2.1 Osnovni pojmovi, uzroci i vrste potresa

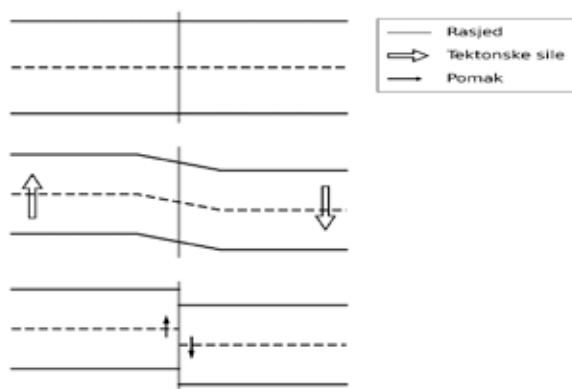
2.1.1 Kratki povijesni pregled

Potres je kao jedna od prirodnih pojava oduvijek izazivao pažnju ljudi. Spoznaje i stavovi o potresima mijenjali su se s razvojem civilizacija. Potresi su tema brojnih mitova diljem svijeta koji najčešće spominju životinje koje nose Zemlju ili neko božanstvo u unutrašnjosti Zemlje. Poznat je, na primjer, indijski mit prema kojem Zemlju drže četiri slona koja stoje na leđima kornjače, kornjača balansira na kobri. Kada se ijedna od tih životinja pomakne nastaje potres. U Japanu se vjerovalo da u mulju na dnu mora živi divovski som Namazu kojeg pomoću velike magične stijene nepomičnim drži bog Kashima. Ako se Kashima opusti, som Namazu počne micati repom i perajama te nastaju potresi. Prema novoze-landskom mitu, Zemlja je živo biće, majka koja u utrobi nosi dijete, boga Ru. Kao i svaka beba, Ru se ponekad rasteže i udara, što na površini stvara potrese. Starogrčki filozofi pokušavali su objasniti potrese kao prirodnu pojavu, Aristotel (IV st. p.n.e.) je primjerice, uzročnikom potresa smatrao snažne vjetrove u podzemnim šupljinama. Njegova teorija je prevladavala u Europi i islamskom svijetu sve do lisabonskog potresa 1755. godine.

2.1.2 Znanstveni temelji

Važnu prekretnicu u istraživanjima potresa predstavlja lisabonski potres jer se tada započelo sa sustavnim utvrđivanjem učinaka potresa i njihovim prirodnoznanstvenim tumačenjem. U radovima o tom potresu prvi se puta spominje rasprostiranje valova potresa kroz unutrašnjost Zemlje. U prvoj polovici 19. stoljeća Cauchy i Poisson jednadžbama su opisali rasprostiranje vala kroz elastičko sredstvo. Druga važna prekretnica bio je potres kod San Francisca u Kaliforniji 1906. godine, jer nakon tog potresa H. F. Reid razvija teoriju elastičkog odraza [1], prema kojoj su potresi posljedica nakupljanja napetosti u stijenama uslijed tektonskih pomaka (slika 1).

Stoga su prvi znanstveni temelji proučavanja potresa postavljeni u drugoj polovini 19. stoljeća, a seizmologija postaje znanstvena disciplina koncem 19. stoljeća, kada se konstruiranjem prvih seizmografa, instrumenata koji bilježe vibracije tla pri potresu, počinje u izučavanju potresa prvenstveno koristiti kvantitativne metode, a napušta kvalitativne.



Gornji dio slike - početno ravnotežno stanje - nema napetosti ni pomaka

Srednji dio - napetosti se gomilaju u stijenama i deformiraju ih

Donji dio - lom stijene započinje na najslabijem mjestu i širi se duž rasjeda, napetosti nestaju, dolazi do pomaka po rasjednoj plohi.

Slika 1. Mehanizam potresa prema Reidu [1].

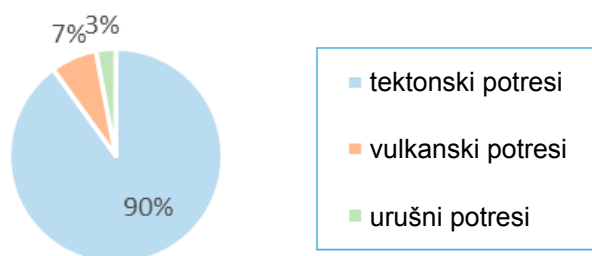
Seizmologija (grč. *seismos* = potres + grč. *logos* = znanost) je znanstvena disciplina iz područja prirodnih znanosti koja proučava potrese i njihove popratne pojave. Proučava procese koji se događaju prije, tijekom i nakon nastanka potresa, kao i valove potresa te karakteristike njihova rasprostiranja kroz unutrašnjost Zemlje i po njezinoj površini. Seizmologija se bavi bilježenjem potresa, analizom njihovih parametara te njihovim djelovanjem na tlo i građevine koje se na njemu nalaze. Koristeći potrese i njihove valove, seizmologija izučava i Zemljinu unutrašnjost, odnosno građu Zemlje. Njezina se upotreba također očituje u istraživanjima nafte i plina. Seizmologija ima značajnu ulogu u protupotresnom inženjerstvu u građevinarstvu, a određivanje potresne opasnosti važan je dio seizmologije.

Potres nastaje u **hipocentru**, podzemnom žarištu, kada se akumulirana elastička energija pretvara većim dijelom u toplinu, a manjim u energiju elastičkih valova (valova potresa). Iz hipocentra se zatim elastičkim valovima energija prenosi dalje u prostor.

Uzroci potresa mogu biti prirodni i umjetni.

Prirodni potresi dijele se prema uzroku nastajanja, odnosno vrsti energije koja se oslobađa, na urušne, vulkanske i tektonske (slika 2).

Prirodni potresi nastaju i primjerice udarom nebeskih tijela, meteorita, tada se oslobađa kinetička energija koju oni posjeduju zbog svoje mase i brzine gibanja.



Slika 2. Vrste potresa prirodnih uzroka.

Umjetni potresi nastaju ljudskim djelovanjem, kao posljedice eksplozija (nuklearnih, rudarskih u rudnicima i kamenolomima), pri geofizičkim istraživanjima, zbog ratnih djelovanja

ili rušenja objekata i sl. Energija koja se oslobodi pri nastanku umjetnog potresa znatno je manja od energije prirodnih potresa, osim u slučaju nuklearnih eksplozija kada su im energije usporedive. Također postoje i potresi inducirani ljudskim djelovanjem koje mijenja napetost u stijenama, poput hidrauličkog frakturiranja, injektiranja fluida u stijene (npr. pri upotrebi geotermalne energije) ili gradnje akumulacijskih jezera.

Urušni potresi čine oko 3% od ukupnog broja potresa. Kod njih se oslobađa potencijalna gravitacijska energija prilikom urušavanja stijena u šupljinama Zemljine kore. Ti su potresi vrlo slabi i osjete se samo u neposrednoj okolini područja gdje je došlo do urušavanja. Mogu biti uzrokom uleknuća, pukotina i dolina, a najčešće se pojavljuju u području krša.

Na **vulkanske potrese** otpada oko 7% svih potresa. Njihovo nastajanje povezano je s kretanjem magme prema površini Zemlje. Stijene pucaju zbog uzdizanja i širenja magme i oslobađanja volatilnih plinova otopljenih u magmi. Takvi potresi ne zahvaćaju velike površine, ali na užem području vulkana mogu imati značajne učinke.

Tektonski potresi čine oko 90% svih potresa i najveći broj jakih potresa spada u tu vrstu. Kod njih dolazi do oslobađanja energije elastičke deformacije koja se u unutrašnjosti Zemlje akumulira uslijed djelovanja tektonskih sila. Zbog sila koje na njih djeluju, stijene se deformiraju (akumulira se energija elastičke deformacije) i taj proces traje tako dugo dok razlike u napetostima ne premaše čvrstoću stijene. Kad do toga dođe stijene pucaju, ili dolazi do naglog gibanja duž već postojećih pukotina - rasjeda i akumulirana energija elastičke deformacije se oslobađa. Veći dio te energije pretvara se u toplinu i mehanički rad za lomljenje i pomicanje materijala u zoni pukotina, dok manji dio energije putuje u obliku elastičkih valova na sve strane oko žarišta.

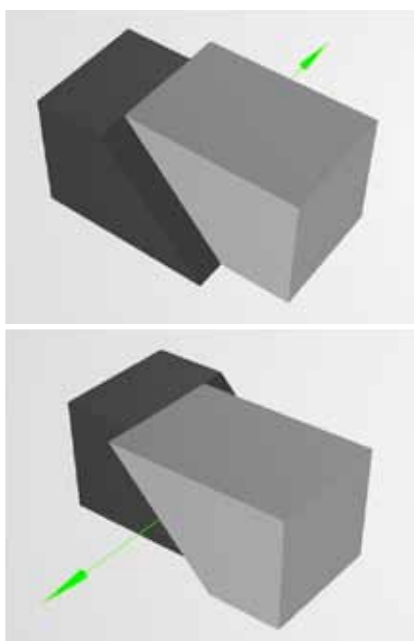
Ploha po kojoj je stijena pukla naziva se **rasjed**, a mjesto na rasjedu u kojem je započeo lom stijene definira se kao **hipocentar** ili **žarište potresa**. Vertikalna projekcija hipocentra na površinu Zemlje, dakle mjesto na površini Zemlje najbliže hipocentru potresa naziva se (mikroseizmički) **epicentar**.

2.2 Rasjedi

Rasjed je strukturna jedinica litosfere, pukotina u kori Zemlje nastala izdizanjem, spuštanjem ili uzdužnim pomicanjem susjednih dijelova duž pukotine. Ploha koja dijeli pomaknute stijenske blokove naziva se rasjednom plohom. Rasjedna ploha odvaja dva rasjedna krila, krovinsko (iznad rasjedne plohe) i podinsko krilo (ispod rasjedne plohe). Rasjedi nastaju kao posljedica diferencijalne napetosti u Zemljinoj kori kad ona premaši čvrstoću stijene.

Prema relativnom pomaku rasjednih krila u odnosu na pružanje rasjedne plohe razlikujemo ([2], vizualizacija [3]):

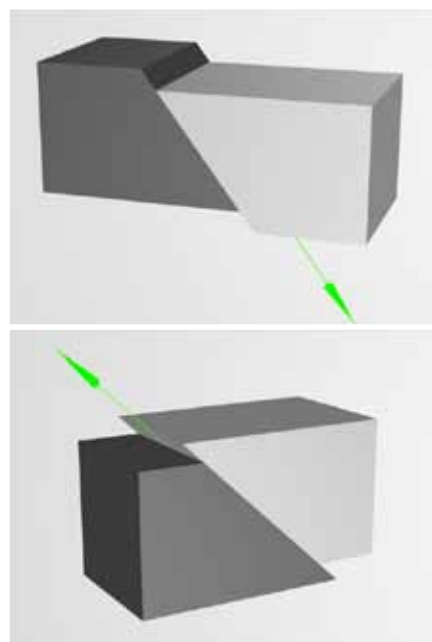
- rasjede s pomakom po pružanju rasjedne plohe (engl. *strike-slip*, mogu biti lijevi rasjed i desni rasjed).



Slika 3. Lijevi i desni rasjed s pomakom po pružanju.

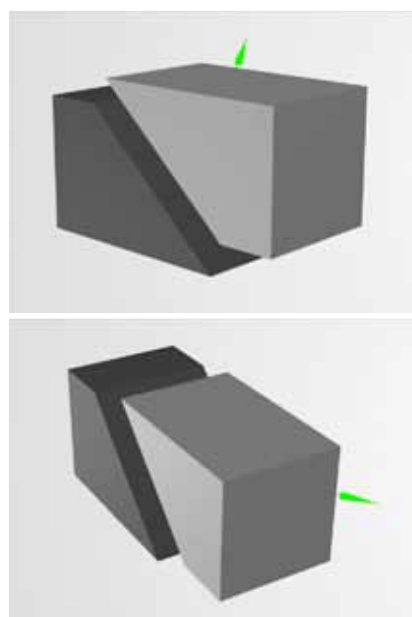
Da bi se odredilo je li rasjed lijevi ili desni, promatra se relativan smjer pomaka u kojem se pomaknulo krilo rasjeda na suprotnoj strani rasjedne plohe.

- rasjede s pomakom okomitim na pružanje rasjedne plohe: (normalni rasjed i reversni rasjed)



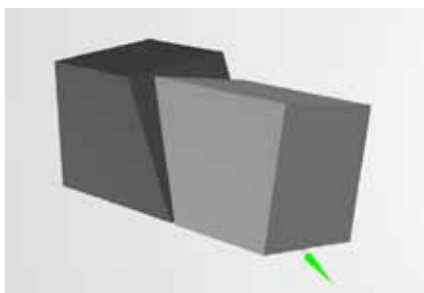
Slika 4. Normalni rasjed i reversni rasjed.

- i rasjede s pomakom dijagonalno na pružanje rasjedne plohe, normalni-lijevi, normalni-desni rasjedi, reversni-lijevi i reversni-desni rasjedi.



Slika 5. Reversni-lijevi rasjed i normalni-lijevi rasjed.

Osim navedenih, postoje i rasjedi s rotacijom rasjednih krila (škarasti ili rotacijski rasjedi).



Slika 6. Rotacijski ili škarasti rasjed.

2.3 Žarišni mehanizam

Žarišni mehanizam (engl. *Focal mechanism*) opisuje deformacije u žarištu potresa koje generiraju seizmičke valove. Podaci zabilježeni seizmografima na većem broju postaja raspoređenih na raznim udaljenostima i u raznim smjerovima oko epicentra potresa mogu se upotrijebiti za određivanje žarišnog mehanizma. Pritom se najčešće pretpostavlja da su seizmički valovi nastali djelovanjem dvostrukog para sila koji na površini Zemlje daju jednake pomake kao i kompleksni proces rasjedanja.

Žarišni mehanizam prikazuje se *beachball* („lopta za plažu“) dijagramom, odnosno projekcijom prostorne razdiobe zračenja P-vala koji je nastao u potresu. Ovakav dijagram sadrži informacije o smjeru i nagibu rasjeda te o smjeru prvog pomaka P-vala. Ima oblik kružnice unutar koje su obojeni dijelovi područja na koja stižu zrake kojima odgovara kompresija stijena u žarištu potresa (pa P-val ima prvi nailazak usmjeren prema tom mjestu s vertikalnom komponentom pomaka prema gore), a bijeli dijelovi su područja gdje se u žarištu događa dilatacija okolnih stijena (prvi nailazak P-vala je orijentacije od tog mjesta s pomakom tla prema dolje). Na žarišnom mehanizmu rasjeda s pomakom po pružanju s vertikalnom rasjednom plohom (slika 7) jasno su vidljiva četiri reznja zračenja P-vala, odnosno četiri područja gdje se izmjenjuju kompresija (crno) i dilatacija (bijelo).

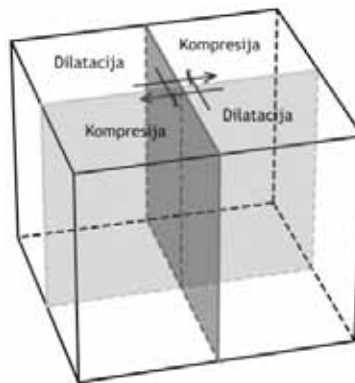


Slika 7. Žarišni mehanizam za rasjede s pomakom po pružanju.

Za rasjede s pomakom okomitim na pružanje rasjedne plohe četiri reznja zračenja P-vala drugačije su orijentirana, stoga su i njihove projekcije, odnosno beachball dijagrami drugačiji. Žarišni mehanizmi za normalni i reversni rasjed nagiba 45° prikazani su na slici 8.

Slika 8. Žarišni mehanizmi za normalni i reversni rasjed nagiba 45° .

Površinska projekcija rasjeda je na takvim dijagramima jedna od linija koje odvajaju obojane i bijele dijelove. Naime, dva međusobno okomita rasjeda poput onih prikazanih na slikama 7. i 8., daju jednake pomake na površini Zemlje. Iz beachball dijagrama nije moguće odrediti koja od dvije linije prikazuje rasjed, za to su potrebne dodatne informacije. Primjerice, lokacije naknadnih potresa dobro ocrtavaju položaj uzročnog rasjeda u prostoru.



Slika 9. Geometrija dva rasjeda (sivo) s pomakom po pružanju (jedan je desni, drugi je lijevi) koji daju iste pomake na površini Zemlje. Strelice označavaju dvostruki par sila.

2.4 Razdioba potresa prema dubini

S obzirom na dubinu na kojoj nastanu, potrese dijelimo u tri grupe: plitke, srednje duboke i duboke.

Žarišta plitkih potresa se nalaze u Zemljinoj kori, odnosno do dubine od približno 70 km. To su većinom tektonski potresi koji nastaju pucaanjem stijena deformiranih tektonskim silama.

Srednje duboki potresi događaju se u dubinama od 70 do 300 km. Žarišta dubokih potresa nalaze se u dubinama od 300 do približno 700 km. Potresa na većim dubinama uglavnom nema ili su vrlo rijetki.

2.5 Prostorna razdioba potresa

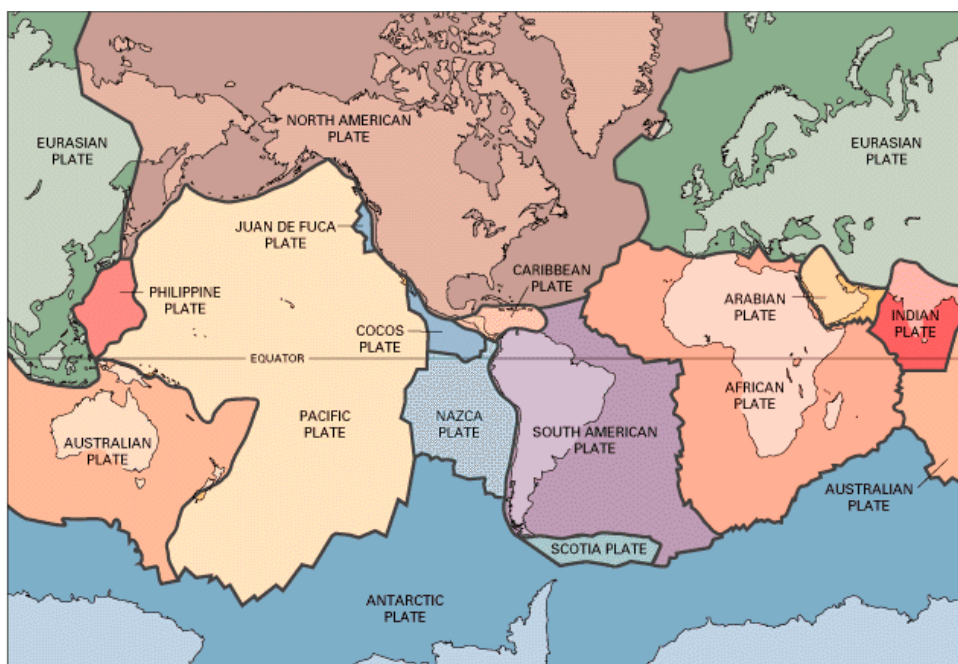
Prikažu li se na zemljopisnoj karti epicentri potresa, uočljivo je da se velika većina potresa događa u dva uska pojasa kojima je, kao lancem, opasana zemaljska kugla. Prvi pojas velike seizmičke aktivnosti nazvan je Cirkumpacifički vatreni prsten jer gotovo potpuno obrubljuje Pacifik. Proteže se od Novog Zelanda preko otočja Tonga, Samoa i Filipina na Japan, zahvaća Kamčatku, Aleute, Aljasku, Male i Velike Antile te čitavu zapadnu obalu Sjeverne i Južne Amerike. Od ukupne energije oslobođene potresima na taj pojas otpada oko 80%.

Drugi pojas je Mediteransko-transazijski. Na njega otpada 15% potresima oslobođene energije. Proteže se od Kanarskih otoka preko Gibraltara, Sredozemnog mora, Apeninskog i Balkanskog poluotoka na Malu Aziju, Kavkaz,

Armensko gorje, Iransku visoravan i Pamir, gdje se dijeli na dva kraka, od kojih se jedan proteže prema Tien Shanu, a drugi, značajniji, preko Himalaje na Indoneziju i Molučke otoke. Na preostalom dijelu Zemlje događa se oko 5% potresa koji su uglavnom rjeđi i slabiji.

Općenito, jači potresi se javljaju u zonama dodira tektonskih (litosfernih) ploča zbog njihovog relativnog gibanja. Na Zemljinoj kugli može se izdvojiti desetak glavnih tektonskih cjelina – tektonskih ploča: Tihooceanska, Euroazijska, Afrička, Sjevernoamerička, Južnoamerička, Antarktička, Indijsko-australska i dr. U zonama dodira tih ploča javlja se najveći broj potresa i događaju se najjači potresi. Ponekad se klasifikacija najvećih ploča ponešto razlikuje, pa taj broj zna varirati (slika 10. i slika 11.).

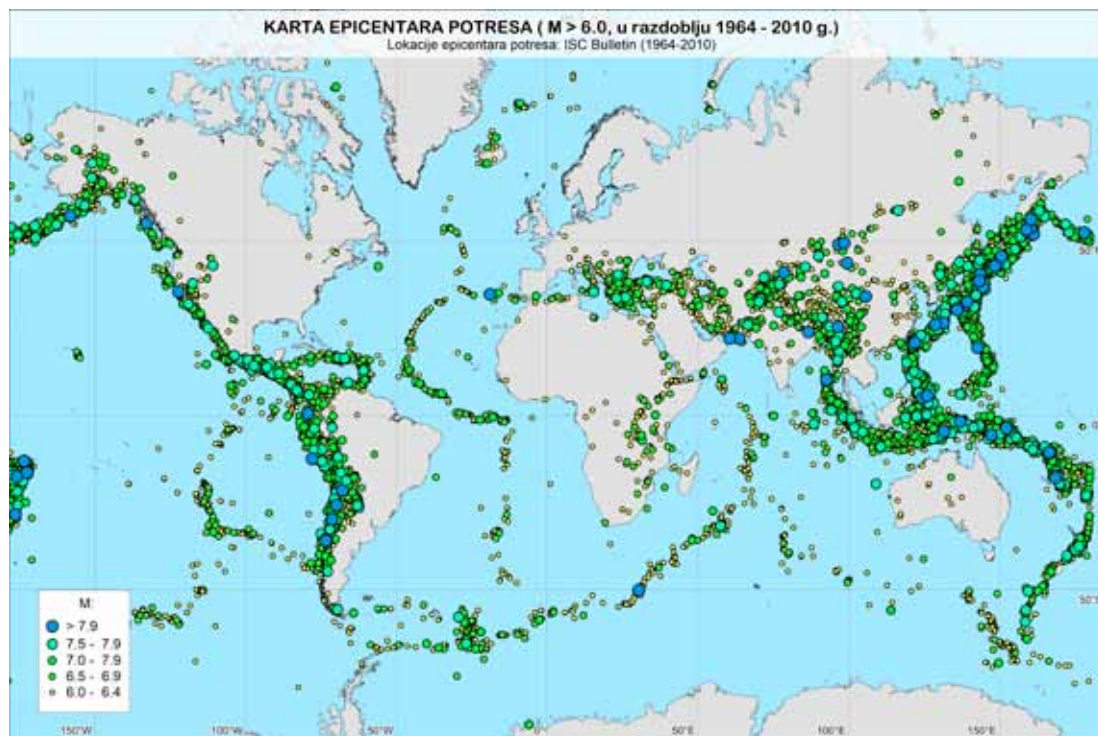
Velike litosferne ploče nastaju u područjima oceanskih grebena, a uranjaju jedna pod drugu u oceanskim brazdama. Pojava pri kojoj jedna litosferna ploča uranja pod drugu naziva se subdukcija. Područje u kojem se, kao posljedica subdukcije događaju potresi, nastaju vulkani i termalni izvori, naziva se Wadati-Benioffova zona.



Slika 10. Karta tektonskih ploča
(izvor: United States Geological Survey, Earthquake Science Center [4]).

Na sljedećoj su slici prikazani epicentri svih potresa na Zemlji, magnituda većih od $M = 6.0$ koji su se dogodili u razdoblju od 1964. do 2010. godine, a nacrtani su koristeći podatke iz seiz-

moloških biltena Međunarodnog seizmološkog centra (ISC, prema engl. *International Seismological Centre*) za navedeno razdoblje [5]–[7].



Slika 11. Epicentri potresa magnituda većih od $M = 6.0$ u razdoblju od 1964. do 2010. godine prema ISC Bulletin 1964.-2010.[5]–[7]. Mjesta na kojima su epicentri potresa najgušći ocrtavaju granice između ploča.

2.6 Broj potresa i njegova ovisnost o magnitudi

Broj potresa koji se događaju u nekom području općenito pada kako raste energija koja je pojedinim potresom oslobođena u žarištu. Drugim riječima, događa se manji broj jakih potresa nego slabih. Veza između magnitude (magnituda je veličina proporcionalna energiji potresa) i broja potresa ima oblik:

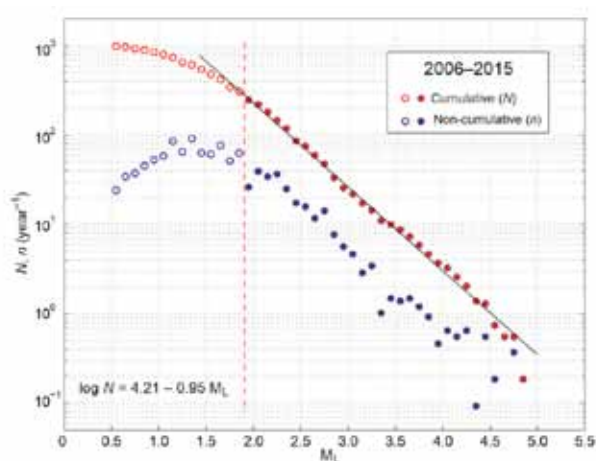
$$\log(N) = a - bM, \quad (1)$$

gdje je N broj potresa s magnitudom većom ili jednakom M , a veličine a i b su konstante. Konstanta b je uglavnom vrijednosti oko 1.0, odnosno za svaku jedinicu smanjenja magnitude potresa ima 10 puta više. Ova se relacija naziva i Gutenberg–Richterov zakon (GR) [8]. Veća vrijednost konstante b (nagiba Gutenberg–Richterove relacije), znači veći udio slabijih potresa u

odnosu na jake potrese, a manja vrijednost parametra b znači manji udio slabijih potresa u odnosu na jake.

Čestina događanja potresa prema magnitudi ($M \geq 0.5$) Hrvatskog kataloga potresa za razdoblje 2006. – 2015. godine prikazana je na slici 12. [9].

Broj potresa određenih raspona magnituda koji se tijekom jedne godine dogode na Zemlji i energije potresa za srednju vrijednost raspona magnituda prikazani su u tablici 1.



Slika 12. Čestina događanja potresa prema magnitudi za Hrvatski katalog potresa (10663 glavnih potresa, $M_L \geq 0.5$) u razdoblju 2006.–2015. Kumulativni (N , crveni krugovi) i nekumulativna čestina (n , plavi kružići) označavaju prag potpunosti na oko $M_L = 1.9$. Puni krugovi označavaju klase magnitude za koje se pretpostavlja da su u potpunosti navedene u katalogu [9]. Puna tanka linija je prilagodba Gutenberg-Richterove relacije na ovaj skup podataka, koja je navedena u lijevom donjem kutu grafa.

Tablica 1. Broj potresa koji se u prosjeku dogode u jednoj godini u ovisnosti o njihovoj magnitudi i njihova energija [10].

Magnituda potresa	Broj po godini	Oslobodena energija (10^{15} J/god)
≥ 8.0	0–1	0–1000
7.0–7.9	12	100
6.0–6.9	110	30
5.0–5.9	1400	5
4.0–4.9	13500	1
3.0–3.9	>100000	0.2

Potresi magnitude između 7.0 i 7.9 događaju se prosječno jedanput mjesečno, a potresi magnitude 6 i više prosječno svaka tri dana. Kako je magnituda proporcionalna logaritmu potresom oslobođene energije najviše seizmičke energije oslobođeno je u jakim potresima. Primjerice, potres magnitude $M = 8.5$ oslobađa puno više energije od svih drugih potresa zajedno koji su se dogodili u prosječnoj godini. Stoga potresna opasnost proizlazi prvenstveno od potresa magnitude blizu najvećih koje se u određenom području mogu dogoditi [10].

2.7 Valovi potresa

Prema osnovnoj podjeli valova potresa oni mogu biti **prostorni** i **površinski**. Prostorni valovi putuju kroz cijelu Zemljinu unutrašnjost, a energija površinskih valova koncentrirana je blizu površine Zemlje.

2.7.1 Prostorni valovi

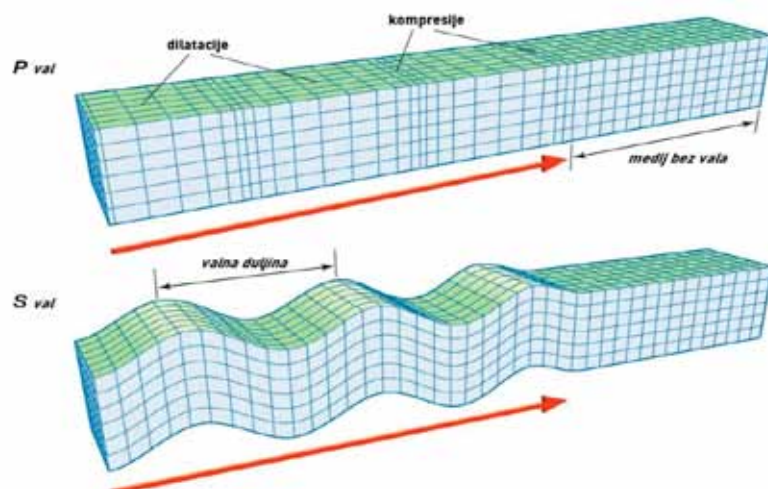
Valovi potresa kreću od mjesta nastanka potresa (hipocentra ili žarišta potresa) na sve strane prema zakonima fizike. Postoje dvije vrste prostornih valova, **longitudinalni** i **transverzalni** (slika 13).

Longitudinalni valovi šire se sredstvom tako da čestice sredstva osciliraju u smjeru rasprostiranja vala. Takvim se načinom oscilacija u sredstvu kroz koje prolaze stvaraju kompresije i dilatacije (slika 13). Stoga ih se često naziva i kompresijskim valovima. Longitudinalni valovi šire se brže od ostalih tipova valova, zbog toga ih se u seizmologiji naziva i P-valovima, od latinske riječi *prima* (uvijek prvi dolaze na promatrano mjesto). P-valovi su analogni zvučnim valovima koji se šire kroz zrak. Kada P-valovi izađu na površinu iz dubine zemlje, djelić njihove energije može se prenijeti u atmosferu u obliku zvučnih valova. Brzina širenja elastičkih valova ovisi o gustoći i elastičkim svojstvima sredstva kroz koje val prolazi. Brzine longitudinalnih valova kreću se od oko 6 km/s u Zemljinoj kori, dosežu više od 13 km/s u plaštu, u vanjskoj jezgri se smanje na 8 do 10 km/s, a u unutarnjoj jezgri imaju vrijednost oko 11 km/s [11].

Transverzalni valovi se rasprostiru sredstvom tako da čestice sredstva osciliraju okomito na smjer širenja vala. Nazivaju se i valovi posmaka, jer oscilacije čestica generiraju posmak u sredstvu kroz koje se šire. Brzina rasprostiranja im je manja od brzine longitudinalnih valova, pa na promatrano mjesto dolaze nakon longitudinalnih valova te se stoga nazivaju i S-valovima (latinski *secunda*).

Brzina širenja transverzalnih valova u kori Zemlje je oko 3.5 km/s a u njenom plaštu ona raste od oko 4.5 km/s do 7.3 km/s blizu vanjske jezgre, dok u unutarnjoj jezgri ponovo iznosi oko 3.5 km/s. Transverzalni se valovi rasprostiru

samo kroz kruta tijela (za razliku od longitudinalnih valova koji se šire kroz kruta tijela, tekućine i plinove). Činjenica da se ne rasprostiru kroz tekućine omogućila je otkriće da je vanjska Zemljina jezgra tekuća.



Slika 13. Longitudinalni i transverzalni valovi.

2.7.2 Površinski valovi

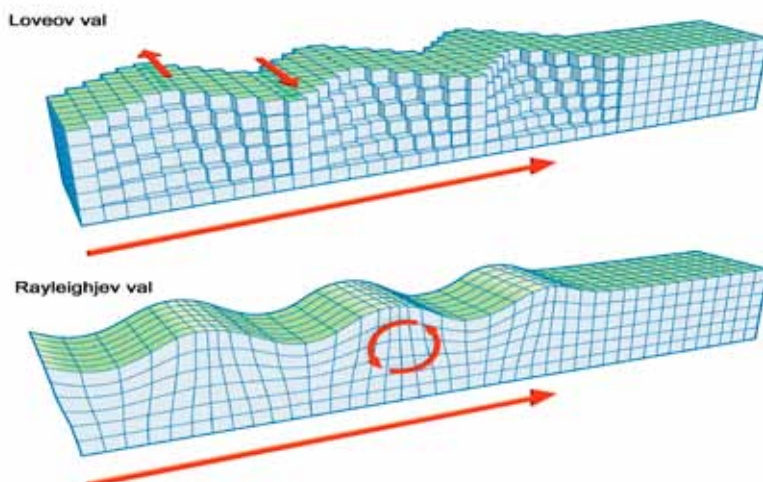
Uslijed interakcije prostornih valova sa slojevitom strukturom unutrašnjosti Zemlje, nastaju tzv. površinski valovi. Njihova osnovna karakteristika je da im amplituda opada s dubinom, tako da je energija tih valova koncentrirana u relativno plitkoj zoni duž površine Zemlje.

Površinski se valovi izraženije očituju na većim epicentralnim udaljenostima, gdje prostorni valovi utnu. Amplitude im mogu iznositi nekoliko centimetara, a brzina širenja im je nešto manja od brzine transverzalnih valova. Razlikuju se

dvije glavne vrste površinskih valova: **Loveovi i Rayleighjevi valovi** (slika 14).

Loveovi valovi (nazvani prema A.E.H. Loveu, britanskom matematičaru) karakterizirani su polarizacijom u horizontalnoj ravnini. Po brzini propagacije brži su od Rayleighjevih valova.

Rayleighjevi valovi rasprostiru se oscilacijama u longitudinalnom i transverzalnom smjeru. Čestice sredstva kojim se šire stoga osciliraju po elipsama.



Slika 14. Loveovi i Rayleighjevi valovi.

2.8 Slojevi i građa Zemlje

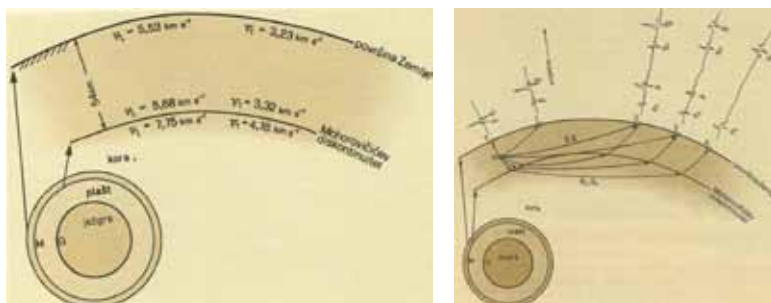
Kao što je opisano u prethodnom poglavlju, brzina valova potresa mijenja se s dubinom. Pritom na određenim dubinama dolazi do nagle značajne promjene u brzini seizmičkih valova. Upravo zahvaljujući potresima i načinu širenja seizmičkih valova kroz Zemlju, otkrivena je struktura unutrašnjosti Zemlje.

Jedno od velikih otkrića u vezi građe Zemlje dogodilo se nakon pokupskog potresa 1909. godine, kada je Andrija Mohorovičić došao do značajnih spoznaja vezanih uz načine rasprostiranja valova potresa kroz unutrašnjost Zemlje. Pretpostavio je i dokazao da se najgornji dio Zemlje – kora – razlikuje u sastavu od sloja ispod nje – plašta, što ima za posljedicu da se pri prolazu vala kroz graničnu plohu podno kore njegova brzina mijenja naglo, tj. diskontinuirano. Druga pretpostavka izražava analitički njegovu zamisao po kojoj brzina u kori neprekinuto raste s dubinom i to je razlog da su putanje (odnosno zrake) vala blago zakrivljene prema površini Zemlje (slika 15., desni dio). To mu je omogućilo

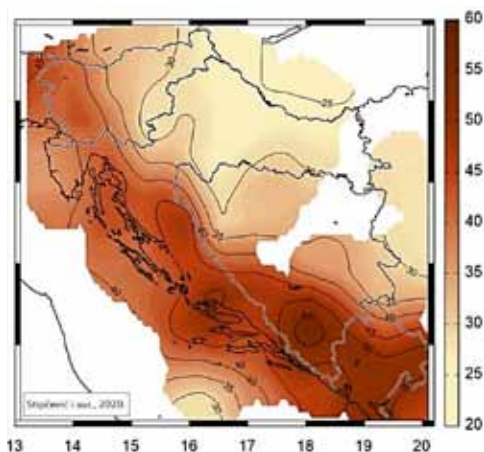
pojasniti brojna dotad nerazjašnjena pitanja u vezi s rasprostiranjem valova kroz koru i gornji dio plašta Zemlje.

Na slici 15. prikazani su Mohorovičićevi rezultati [12], prema kojima debljina kore iznosi 54 km, a brzina npr. longitudinalnog vala raste kontinuirano od 5.53 km/s uz površinu Zemlje do 5.68 km/s na dnu kore; pri prijelazu u plašt njezin iznos skokom poraste na 7.75 km/s. Zbog izuzetnog značenja tih Mohorovičićevih otkrića granična ploha koja odjeljuje koru od plašta Zemlje nazvana je **Mohorovičićevim diskontinuitetom**, (kraće: MOHO ili M-diskontinuitet), a analitički izraz o porastu brzine s dubinom **Mohorovičićevim zakonom**. Na slici 16. prikazana je karta dubina Mohorovičićevog diskontinuiteta ispod Hrvatske [13].

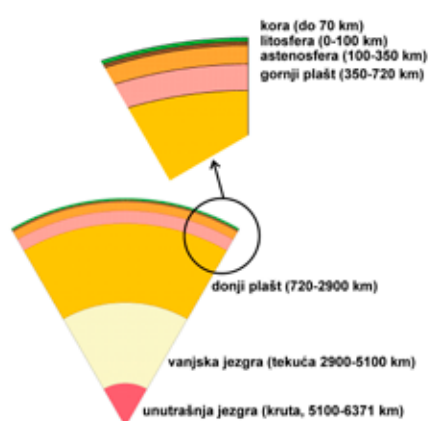
Nakon Mohorovičićevog otkrića definirani su i ostali slojevi unutrašnjosti Zemlje i druge plohe diskontinuiteta. Gutenbergov diskontinuitet, koji odjeljuje plašt i jezgru, otkriven je 1912. godine, a I. Lehmann je 1936. utvrdila da se jezgra sastoji od (najmanje) dva dijela (slika 17).



Slika 15. Slika najgornjeg dijela Zemlje prema rezultatima A. Mohorovičića [12].

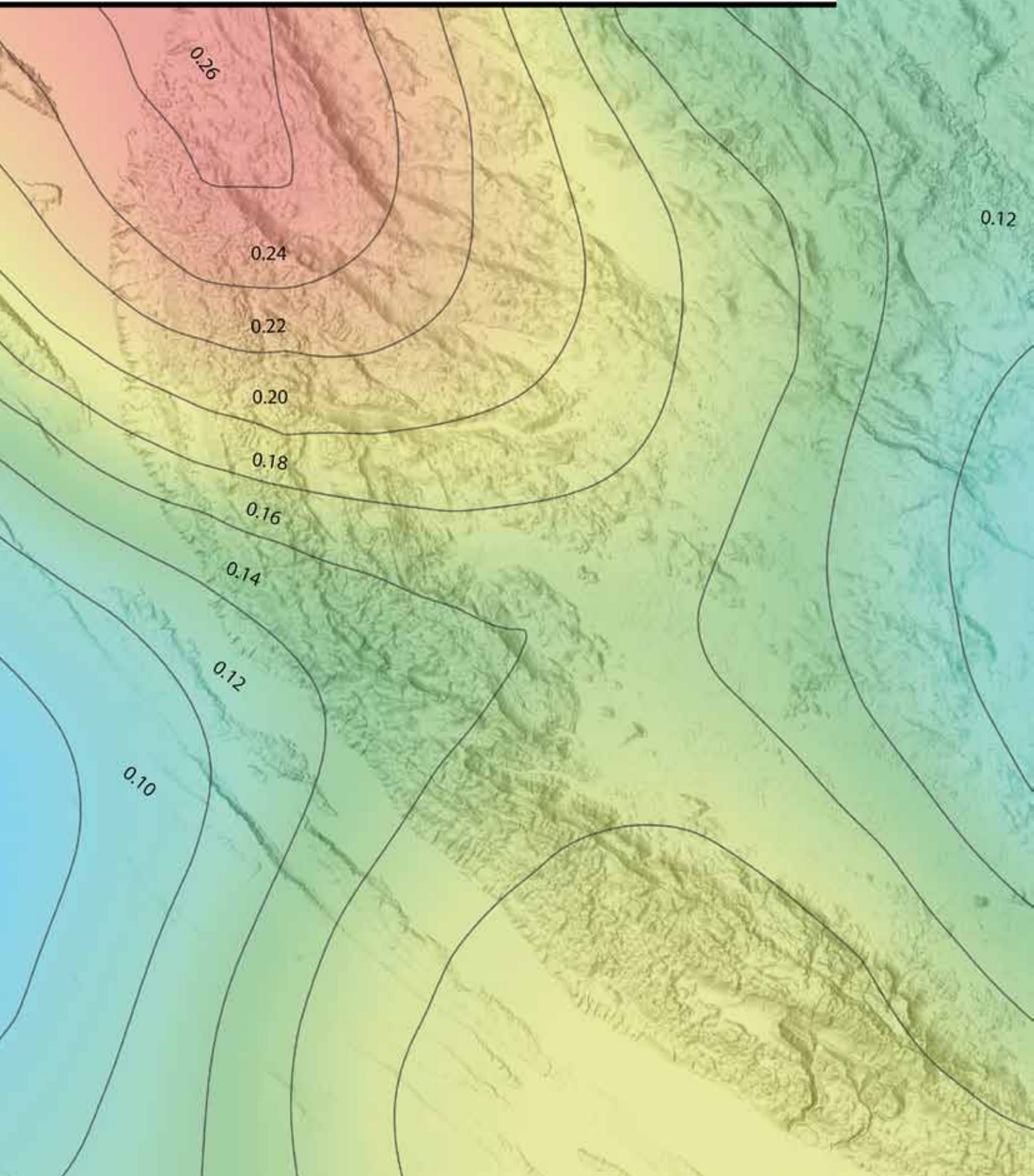


Slika 16. Karta dubina Mohorovičićevog diskontinuiteta ispod Hrvatske [13].



Slika 17. Osnovni slojevi i granične plohe diskontinuiteta brzina valova potresa u Zemljinoj unutrašnjosti.

3. Kvantifikacija potresa

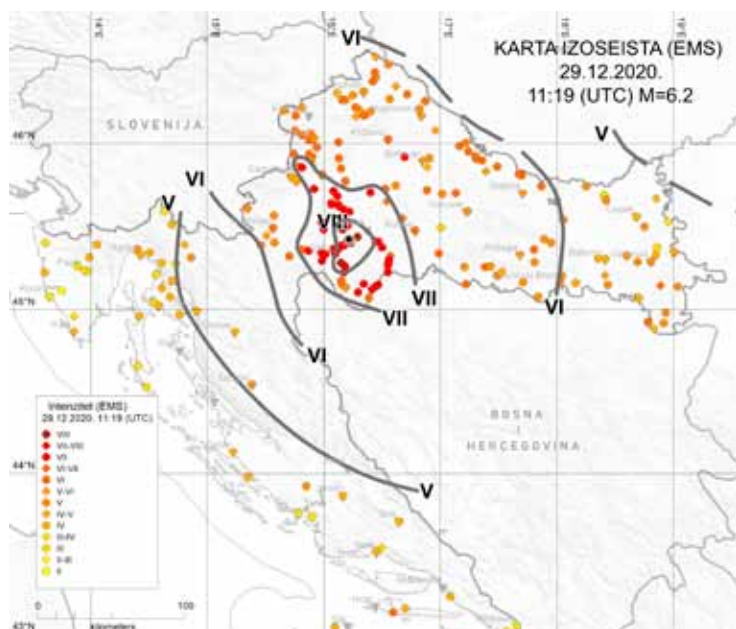


3.1 Makroseizmička metoda – intenzitet potresa

Makroseizmički intenzitet je skup učinaka potresa zamjetnih bez uporabe instrumenata koji su se dogodili istovremeno na istom mjestu. Pojam „isto mjesto“ ne podrazumijeva materijalnu točku, već šire područje kao što je selo, manji grad ili dio većeg grada. Stupanj intenziteta obično se označava rimskim znamenkama. Često se, zbog jezične ekonomičnosti, stupanj intenziteta zove samo intenzitet, tako da će se pod pojmom intenzitet podrazumijevati stupanj intenziteta.

Prostorna razdioba intenziteta jednog potresa naziva se **makroseizmičko polje**. Intenzitet potresa nelinearno opada s udaljenosti od epicentra te bi, u slučaju točkastog izvora, izolinije intenziteta koje se nazivaju **izoseiste** trebale biti kružnice, no stvarne izoseiste potresa su najčešće deformirane elipse (slika 18).

Učinci potresa se razvrstavaju u podskupove pomoću makroseizmičkih ljestvica. **Makroseizmička ljestvica** je skup odredbenica (opisa učinaka) koje moraju biti zadovoljene da bi se nekom mjestu pridijelio odgovarajući intenzitet.

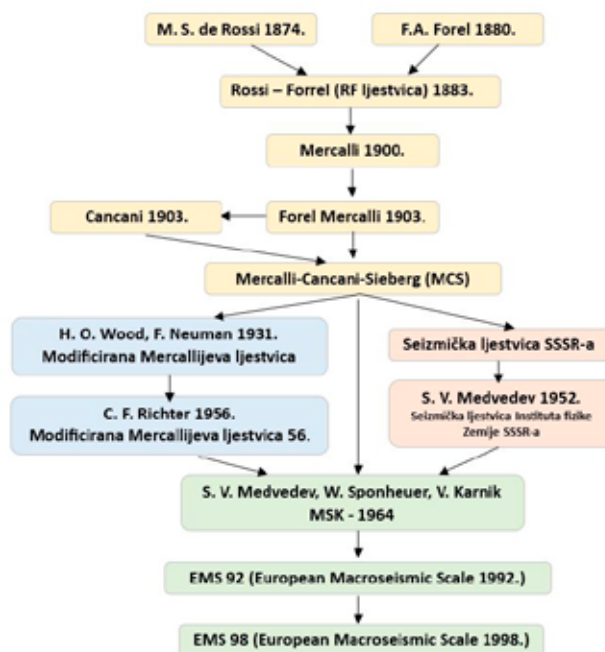


Slika 18. Karta intenziteta i izoseiste potresa koji se dogodio 29. prosinca 2020. godine u 12 sati i 19 minuta s epicentrom kod Petrinje, magnitude $M_L = 6.2$ i intenziteta u epicentru VIII stupnjeva EMS ljestvice.

Kroz povijest je bilo mnogo pokušaja kvantificiranja jačine potresa svrstavanjem učinaka u podskupove. Neki od prvih primjera su pokušaji Nausea i Gastaldija iz 16. stoljeća. Prvu makroseizmičku ljestvicu s pet stupnjeva primijenio je Egen, no makroseizmologija je zaživjela u obliku koji danas poznajemo tek pedesetak godina kasnije s pojavom Rossi-Forelove ljestvice (slika 19). Neovisno jedan od drugoga (Rossi 1874. godine, a Forel 1881.), predložili su ljestvice koje su 1883. ujedinjene u zajedničku deset-stupanjsku Rossi-Forelovu ljestvicu. Makroseizmičku ljestvicu s 12 stupnjeva objavio je 1900. Mercalli, dok je tri godine kasnije Cancani

objavio svoju ljestvicu. Prvu modernu ljestvicu objavio je 1917. Sieberg dopunivši opise učinaka potresa iz Mercallijeve i Cancanijeve ljestvice te je tako nastala Mercalli-Cancani-Siebergova (MCS) ljestvica, koja se još uvijek koristi u nekim zemljama. Razvoj MCS ljestvice tekao je u dva pravca. U Americi je poslužila kao osnova za razvoj modificirane Mercallijeve (MM) ljestvice, dok je u SSSR-u na temelju nje razvijena Seizmička ljestvica Instituta fizike Zemlje. Ujedinjavanjem modificiranih MCS ljestvica nastala je 1964. godine Medvedev-Sponheuer-Karnikova (MSK-64) ljestvica. To je ljestvica od 12 stupnjeva u kojoj se razlikuju količine (poneki, mnogi,

većina...), tri tipa građevina (A, B, C) i u kojoj su klasificirana oštećenja u pet stupnjeva. I ta je ljestvica doživjela niz usavršavanja tako da se u Hrvatskoj dugo vremena koristila MSK-78 ljestvica. MSK ljestvica je poslužila kao temelj za razvoj europske makroseizmičke ljestvice (EMS) koja je objavljena 1998. Bitna razlika ove u odnosu na prethodne ljestvice je u tome što tipovi građevina i oštećenja nisu samo opisani, već su prikazani i skicama i fotografijama. Sve ljestvice koje vode porijeklo od MCS ljestvice koncipirane su tako da omjer akceleracija koje uzrokuju učinke dva-ju uzastopnih stupnjeva iznosi dva, a akceleracije tvore geometrijski niz, no valja naglasiti da je intenzitet slabo koreliran s akceleracijom, jer znatno ovisi i o brzini i o trajanju potresne trešnje.



Slika 19. Razvoj makroseizmičkih ljestvica.

3.2 Mikrozeizmička metoda – magnituda potresa

S pojavom prvih seizmografa moglo se precizno odrediti gibanje tla uzrokovano prolaskom seizmičkih valova. To je omogućilo lociranje potresa, odnosno, računanje mjesta i vremena nastanka potresa. Instrumenti su također omogućili računanje, a ne samo ocjenjivanje, energije oslobođene u žarištu neovisno od epicentralne udaljenosti (udaljenost seizmografa od epicentra).

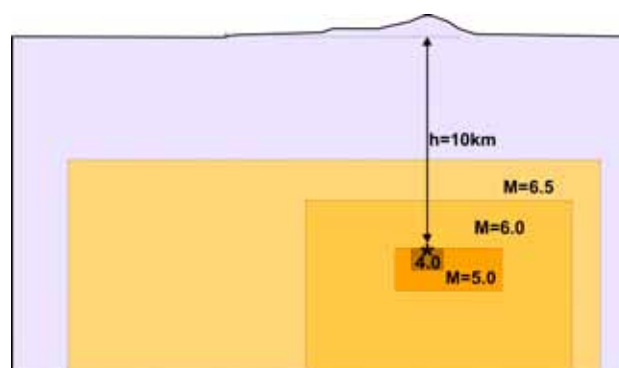
Magnituda potresa M je mjera oslobođene elastičke energije potresa. Temelji se na mjerenju najveće amplitude odabrane grupe valova na seizmogramu potresa. Magnitudu je u seizmologiju uveo Charles F. Richter 1935. godine. Richter je magnitudu definirao kao logaritam najveće amplitude zapisa Wood-Andersonovog seizmografa vlastitog perioda 0.8 s i mirenja 0.8 ako je epicentar udaljen 100 km.

Za različite uvjete od Richterovih, morala se definirati nova, „lokalna“ magnituda, M_L .

Danas se kao najbolja mjera energije uzima momentna magnituda M_w koja se računa iz seizmičkog momenta. **Seizmički moment** je umnožak površine rasjeda na kojem je došlo do pomaka rasjednih krila, srednjeg pomaka i modula smicanja u žarištu potresa.

Računajući logaritam amplitude bilo je moguće veliki raspon energija potresa opisati malim brojevima. Budući da se radi o logaritamskoj funkciji, razlika u magnitudi od 1 znači 31.6 puta veću energiju što znači da potres magnitude 5.0 oslobodi 31.6 puta više energije od potresa magnitude 4.0 i oko 1000 puta više energije od potresa magnitude 3.0.

Na slici 20. su prikazani odnosi dimenzija seizmičkih izvora za potrese u rasponu magnituda od $M = 4.0$ do $M = 6.5$ uz jednak srednji pomak na rasjedu od 1m.



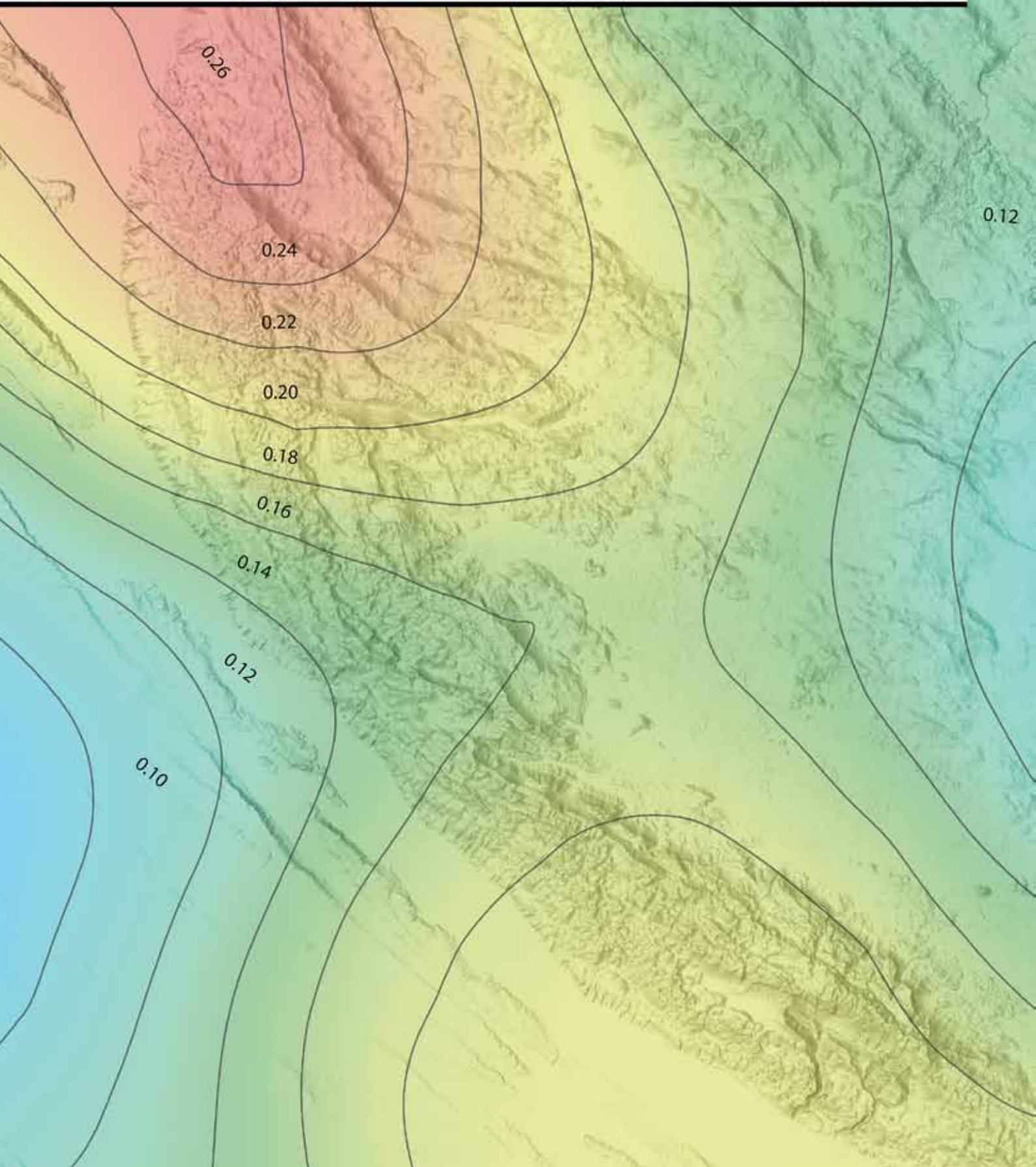
Slika 20. Dimenzije seizmičkih izvora za potrese različitih magnituda, uz pomak na rasjedu od 1m. Zvezdica označava hipocentar svih potresa.

3.3 Odnos magnitude i intenziteta

Veza između intenziteta i magnitude nije funkcijska. U principu, potres veće magnitude za posljedicu ima i veći intenzitet u epicentru, no na njega znatno utječu i drugi faktori kao što su dubina žarišta, svojstva lokalnog tla, razina podzemnih voda, fizikalna i geometrijska svojstva izvora potresa, nelinearni efekti i slično. U nekim slučajevima će se plići potres manje magnitude jače osjetiti od dubokog potresa veće magnitude na manjim epicentralnim udaljenostima. Visoka razina podzemnih voda može izazvati likvefakciju, kad se pijesak natopljen vodom pretvori u tekućinu pod djelovanjem valova potresa i objekti utonu u tlo.

Postoje empirijske jednadžbe koje povezuju intenzitet u epicentru i magnitudu, no one su samo približne zbog svih opisanih svojstava intenziteta. Te jednadžbe se koriste za procjenu magnituda potresa koji su se dogodili u vrijeme dok još nije bilo seizmografa, no magnitudu je moguće pouzdano izračunati samo za potrese za koje postoje seizmogrami. Za potrese koji nemaju takav zapis može se ocijeniti samo njegov intenzitet u epicentru, a magnitudu tek grubo procijeniti na osnovi empirijske jednadžbe.

4. Bilježenje i analiza potresa



4.1 Bilježenje potresa

Od kada se počelo proučavati potrese kao prirodne pojave, pokušavalo se konstruirati instrument kojim bi se zabilježila trešnja tla. Mjerenje gibanja tla nije trivijalan problem, jer se mjerni instrument nalazi na tlu čije gibanje želimo zabilježiti. Za praćenje gibanja tla u tri dimenzije, trebamo zapravo tri instrumenta, dva u horizontalnoj ravnini za bilježenje gibanja tla u smjeru sjever-jug i istok-zapad te jedan za praćenje vertikalne komponente gibanja tla.

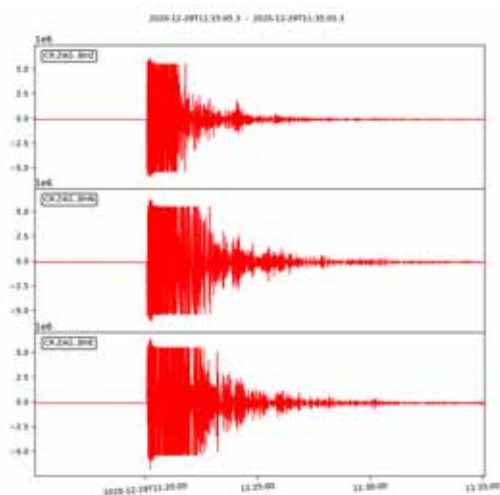
Seizmograf (grč. σεισμός: potres + graf: pisati) je mjerni instrument kojim se mjeri i bilježi gibanje tla tijekom potresa. Ovisno o svojoj konstrukciji, seizmograf bilježi pomak, brzinu ili akceleraciju gibanja tla. Moderni seizmografi u jednom uređaju bilježe gibanje tla u tri dimenzije, pa zapis seizmografa sadrži dvije horizontalne komponente gibanja tla – jednu za oscilacije u smjeru sjever-jug (N komponenta), druga u smjeru istok-zapad (E komponenta) – i vertikalnu (Z) komponentu koja bilježi oscilacije tla u vertikalnom smjeru (gore-dolje). Navedeno vrijedi za klasični ZNE raspored osi koji je i najčešći (Z os – gore/dolje, N os – sjever/jug, E os – istok/zapad).

Akcelerograf je instrument koji mjeri i bilježi akceleraciju trešnje tla. Sastoji se od triju komponenti koje su orijentirane u međusobno okomitim smjerovima i neovisno jedna o drugoj bilježe akceleraciju gibanja tla u zadanom smjeru.

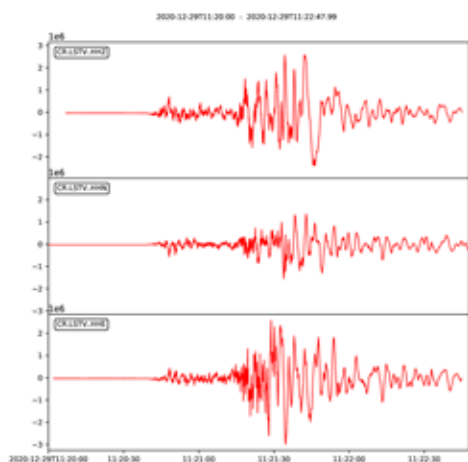
Prvi seizmografi (instrumenti koji su na neki način bilježili i gibanje tla i vrijeme kod potresa) konstruirani su krajem 19. stoljeća, a prvi seizmografi koji se mogu nazvati „funkcionalnima“ u današnjem smislu definicije napravljeni su početkom 20. stoljeća. Glavni dio svakog instrumenta (svake komponente) je vrlo osjetljivo njihalo. Kako je instrument dio sustava u kojem se vrše mjerenja (seizmometar je na Zemlji), trebalo je riješiti problem kako bilježiti gibanje u sustavu u kojem se nalazi i mjerni instrument. Iskorišten je princip inercije, odnosno nesklonost tijela promjeni stanja gibanja. Kako zapis ne bi sadržavao opis gibanja samog njihala (koje bi se pomakom iz ravnoteže nastojalo njihati vlastitom frekvencijom), potrebno je miriti njegove vlastite oscilacije. Na taj način osiguravamo bilježenje samo

oscilacija uzrokovanih gibanjem tla. Na mehaničkim instrumentima to se postizalo viskoznim fluidima (npr. kod instrumenata koje je dizajnirao E. Wiechert, stlačivanjem zraka). Instrumente možemo podijeliti na pasivne i aktivne. Pasivnim instrumentima dovoljno je gibanje tla da bi ga bilježili, dok aktivni trebaju napajanje električnom strujom kako bi bili funkcionalni. Moderni instrumenti su aktivni i u osnovi rade na principu mjerenja struje potrebne da se masa njihala instrumenta zadrži u stanju mirovanja.

Bitne razlike između seizmografa i akceleroografa su, osim činjenice da su seizmogrami kod prvih proporcionalni brzini trešnje tla (vrlo rijetki instrumenti bilježe pomake tla), a kod drugih akceleraciji oscilacija tla, u konstrukciji koja je uzrokovana traženim karakteristikama njihova rada. Seizmografi su osjetljiviji instrumenti, namijenjeni za bilježenje i vrlo slabih potresa (nazivaju se stoga i *weak motion* instrumentima). Imaju malu, nisku razinu unutarnjeg šuma i najčešće bilježe širok pojas frekvencija. Zbog tih svojstava imaju velik, ali ipak ograničen dinamički raspon pa ne mogu zabilježiti jake potrese na malim udaljenostima jer dolazi do zasićenja instrumenta. Primjer zapisa jakog i vrlo blizog potresa kod kojeg je došlo do zasićenja seizmografa je na slici 21. Na slici 22. je prikazan zapis istog potresa, na udaljenoj postaji, bez zasićenja. U oba slučaja radi se o širokopojasnim seizmografima.



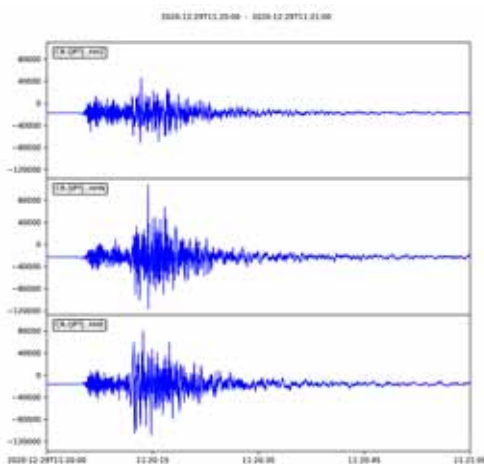
Slika 21. Zapis Petrinjskog potresa od 29. prosinca 2020. godine u 12 sati i 19 minuta, magnitude $M_L=6.2$ na seizmološkoj postaji Zagreb, širokopojasnim seizmografom. Vidljivo je zasićenje instrumenta („rezanje“ zapisa).



Slika 22. Zapis Petrinjskog potresa od 29. prosinca 2020. godine u 12 sati i 19 minuta, magnitude $M_L=6.2$ na seizmološkoj postaji Lastovo, širokopojasnim seizmografom. Vidljivo je kako zasićenja instrumenta nema.

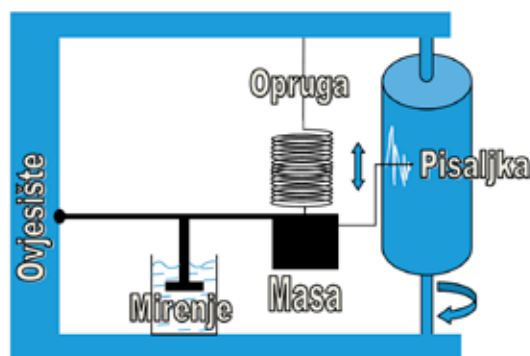
Akcelerograf je konstrukcijom jednostavniji instrument (time i jeftiniji) namijenjen za bilježenje jakih potresa (zato se naziva i *strong motion* instrument). Značajno je manje osjetljiv na sve vanjske uvjete (temperatura, tlak, mikrostrujanja zraka i sl.) pa ga se lakše postavlja, odnosno manji su zahtjevi na lokacije za postavljanje takvih instrumenata. Akcelerografi imaju najveću primjenu u inženjerskoj seizmologiji, njihovi zapisi najznačajniji su za izučavanje svojstava snažne trešnje građevina i tla na kojima su postavljeni. Koriste se i za monitoring infrastruktura (građevina, brana i dr.), a njihovi zapisi od izuzetne su važnosti i za izračun potresne opasnosti.

Primjer akcelerograma Petrinjskog potresa od 29. prosinca 2020. godine u 12 sati i 19 minuta prikazan je na slici 23.



Slika 23. Zapis Petrinjskog potresa od 29. prosinca 2020. godine u 12 sati i 19 minuta akcelerografom na seizmološkoj postaji Puntijarka.

Bitan parametar kod zapisa potresa na nekom instrumentu je vremenska komponenta zapisa gibanja tla. Kod analize potresa, različite faze (različiti tipovi valova potresa) dolaze u različitim vremenima nailazaka pa je bitno u instrumentu vrlo precizno bilježiti i apsolutno vrijeme (unutar nje vrijeme instrumenta) koje se svakom modernom seizmografu osigurava GPS prijamnikom. Na taj način postiže se velika točnost vremena (1 ms) čime se i minimizira pogreška u lokaciji epicentra do koje može doći zbog pogreške u vremenu.



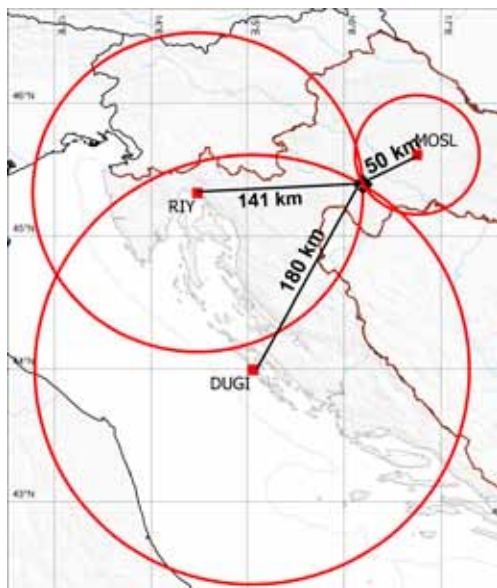
Slika 24. Shematski prikaz vertikalnog seizmometra s oprugom. Mehanički mu je spriječeno gibanje u horizontalnim smjerovima te se registrira samo vertikalni pomak. Za mirenje se koristi viskozna tekućina. Pomaci se bilježe pisaljkom (mehanički seizmograf).

4.2 Analiza i lociranje potresa

Izračun lokacije potresa i drugih parametara koji karakteriziraju potres temelji se na analizi seizmograma potresa dobivenih seizmološkim instrumentima koji su postavljeni na različita mjesta koja nazivamo seizmološke postaje. Seizmološke postaje čine seizmološku mrežu. Što je ta mreža gušća, odnosno broj instrumenata i zapisa veći, dobiveni rezultati su kvalitetniji i precizniji.

Na osnovu zapisa potresa na jednoj seizmološkoj postaji (jednom instrumentu) iz poznatih vremena nailazaka različitih vrsta valova potresa (faza) i poznavajući njihove brzine rasprostiranja, dobiva se udaljenost te postaje od izvora vala (hipocentralna udaljenost). Za određivanje lokacije epicentra potresa, potrebno je raspolagati zapisima potresa s barem tri seizmološke postaje, a za lociranje žarišta (*hipocentra*) potresa s najmanje četiri postaje. Poznavajući brzine putovanja pojedinih faza seizmičkih valova, iz razlike nastupnih vremena S-vala i P-vala određuju se epicentralne udaljenosti pojedine postaje

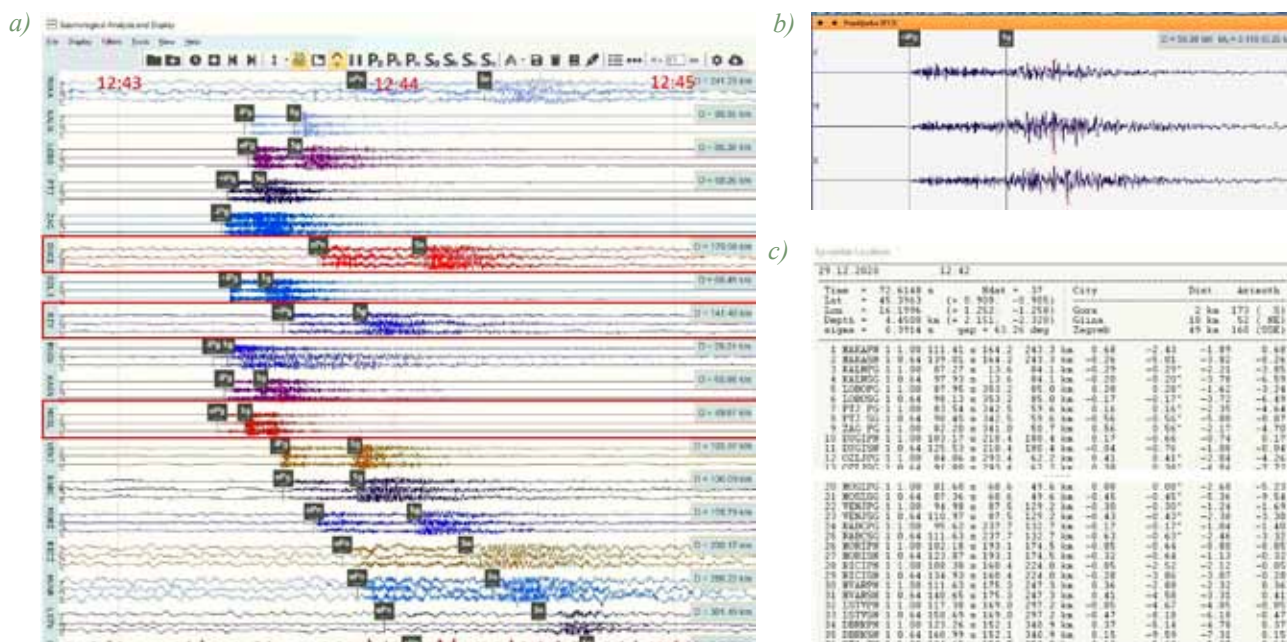
koje daju radijuse kružnica oko svake od postaja, koje prikazuju moguća rješenja lokacije epicentra. Epicentar potresa nalazi se u sjecištu tih kružnica. Takva najjednostavnija shema određivanja epicentra potresa prikazana je na slici 25.



Slika 25. Najjednostavnija shema određivanja epicentra potresa na osnovu nastupnih vremena P i S faza potresa s tri postaje (odgovaraju nastupnim vremenima postaja Rijeka (RIY), Moslavina (MOSL) i Dugi Otok (DUGI) potresa 29. prosinca 2020. godine u 12 sati i 43 min (UTC).

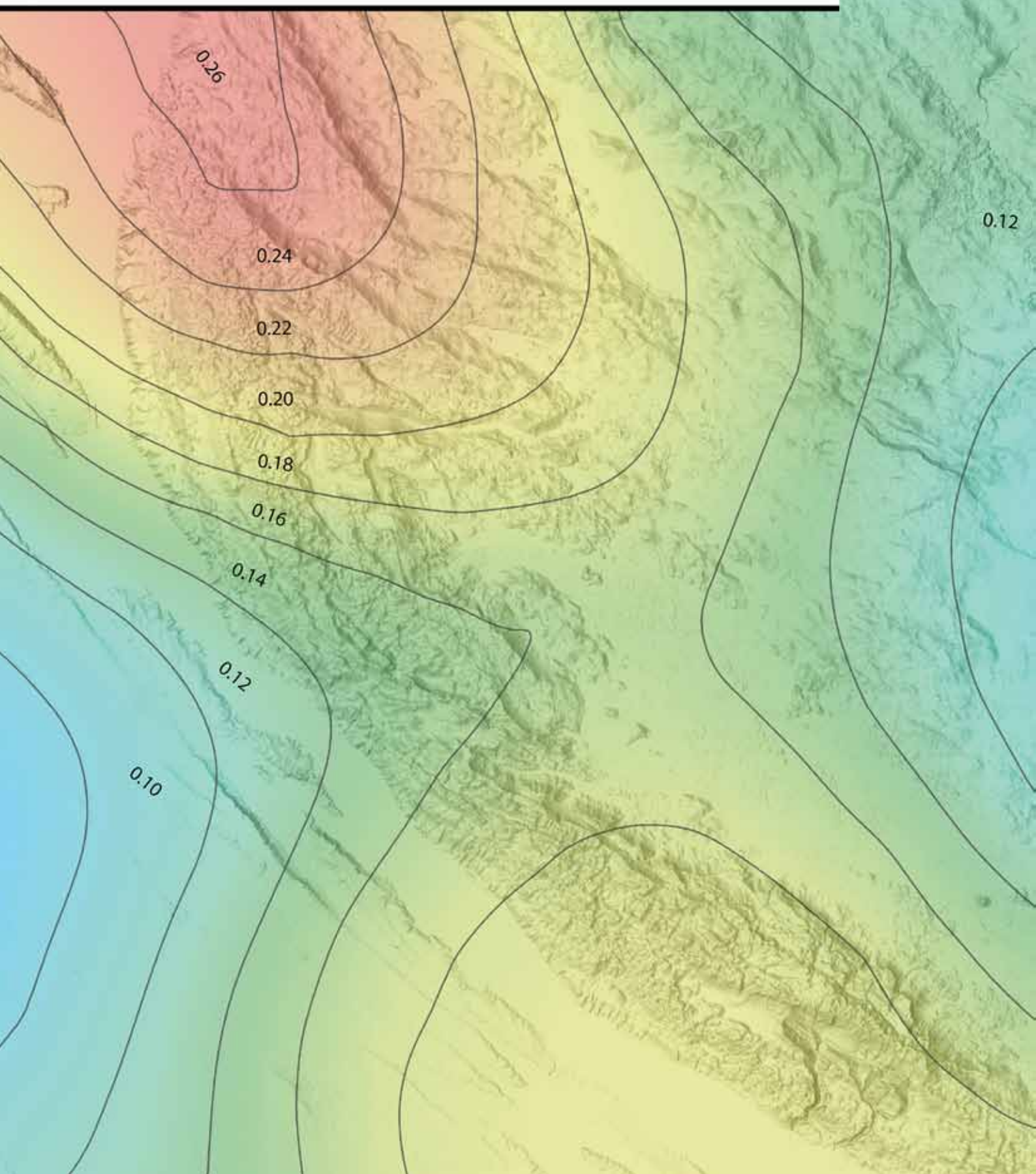
U praksi se za lociranje epicentara potresa koriste podaci s većeg broja seizmoloških postaja složenijim matematičkim postupcima. Osim položaja epicentra, potrebno je odrediti i dubinu žarišta te hipocentralno vrijeme. To se postiže uporabom složenijih algoritama koji koriste podatke svih dostupnih seizmoloških postaja (slika 26). Epicentri potresa Hrvatskog kataloga potresa računati su programom HYPOSEARCH [14].

Za određivanje lokacije epicentra potresa na osnovi nastupnih vremena valova potresa na površini potrebno je poznavati što realističniji model brzina. U praksi se rješenje traži korištenjem algoritama temeljenih na najmanjim odstupanjima nastupnih vremena očitanih sa seizmograma od teorijskog modela. To je inverzni problem kojim se kreće od konačnog rezultata, seizmograma te korištenjem matematičkih metoda dolazi na početak – određivanje izvora vala.



Slika 26 (a) Seizmogrami potresa s epicentrom kod mjesta Gora, 10 km od Gline (magnitudo 3.4) koji se dogodio 29. prosinca 2020. godine u 12 sati i 43 min (UTC). Vrijeme se na seizmogramu očitava na horizontalnoj osi, dok se na vertikalnoj osi očitava brzina oscilacija tla. Prikazan je zaslon programa za analizu potresa SANDI [15]; (b) Seizmogram potresa zabilježen na seizmološkoj postaji Puntijarka; (c) Lokacija epicentra potresa izračunata računalnim programom HYPOSEARCH [14].

5. Seizmološka mreža Republike Hrvatske



Hrvatska seizmološka mreža sastoji se od seizmoloških postaja na kojima su postavljeni seizmološki instrumenti. U gotovo realnom vremenu, signal sa seizmoloških postaja prenosi se u središnji centar Seizmološke službe (u Zagrebu) gdje se podaci pohranjuju i analiziraju.

Hrvatska seizmološka služba djeluje pri Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu. Financirana je iz državnog proračuna iz kojeg godišnje dobiva sredstva za održavanje osnovne seizmološke mreže i druge poslove.

Podaci koji se prikupljaju sa seizmoloških postaja obrađuju se bez prekida, Seizmološka služba permanentno prati i analizira seizmičku aktivnost područja Republike Hrvatske i bliskih susjednih područja iz kojih se potresi manifestiraju i na našem području te o tome obavještava Vladu, Civilnu zaštitu pri Ministarstvu unutarnjih poslova, medije, javnost i druge relevantne institucije.

Seizmološka služba trenutno se sastoji od (samo) 10 ljudi u stalnom radnom odnosu, izgrađuje i održava osnovnu hrvatsku seizmološku mrežu. Njeno je djelovanje koncipirano tako da u svakom momentu postoji dežurni seizmolog, 24 sata u danu, 365 dana u godini, koji analizira potrese i izvješćuje o trenutnoj potresnoj aktivnosti.

Do 2020. godine i potresa u Zagrebu i Petrinji, osnovnu hrvatsku mrežu činilo je ukupno 17 seizmoloških postaja, od kojih je većina bila opremljena samo seizmografima, s vrlo malim brojem akcelerograma.

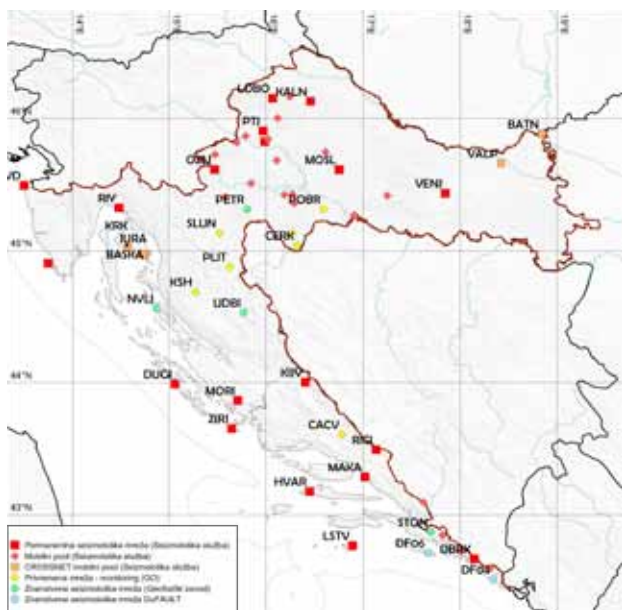
Nakon zagrebačkog potresa, a poglavito nakon petrinjskog potresa, Seizmološka služba je donacijama dobila opremu za svoju prvu bušotinsku postaju te jednu akcelerografsku postaju. Nakon petrinjskog potresa, krajem prosinca 2020. godine, donacijom Vlade RH nabavljena je prijenosna mreža od 20 seizmograma i 20 akcelerograma koji su promptno postavljeni na potresom zahvaćena područja Banovine i na šire zagrebačko područje [16]. Osim osnovne

seizmološke mreže na području Hrvatske, postavljene su privremene seizmološke postaje za potrebe znanstvenoga rada, privrednih seizmoloških istraživanja i monitoring ključne infrastrukture.

U sklopu znanstvenih seizmoloških projekata Geofizičkog odsjeka od 2000. godine bile su postavljane i privremene seizmološke postaje čije se financiranje dijelom nastavljalo drugim aktivnim znanstvenim projektima. Trenutno radi i seizmološka mreža Du-Net uspostavljena u sklopu znanstvenog projekta „DuFAULT“ (2021.–2025.) [17] s ciljem upoznavanja rasjednih sustava te stvaranje modela litosfere velike rezolucije i simulaciju potresne trešnje što će ukazati na lokacije s jakom trešnjom i pomoći će u razumijevanju širenja seizmičkih valova kroz ovo područje. Za potrebe projekta CRONOS u svrhu geofizičko-seizmoloških istraživanja potresom ugroženih područja u RH i razvoj atenuacijskih relacija predviđanja seizmičkog gibanja tla postavljeni su instrumenti koje je posudio norveški partner, NORSAR, u okviru Norveškog financijskog mehanizma (2022.–2024.) [18].

Lokacije seizmoloških postaja hrvatske seizmološke mreže prikazane su na slici 27.

U okviru Nacionalnog plana oporavka i otpornosti na inicijativu Vlade RH provodi se projekt CROSSNET (Razvoj mreže seizmoloških podataka) [19], kojim se omogućava razvoj državne mreže seizmoloških postaja RH u respektabilnu mrežu od 95 seizmoloških postaja, od kojih će 10 instrumenata (seizmograma) biti postavljeno na dno Jadranskog mora. Sve kopnene postaje bit će opremljene i seizmometrima i akcelerometrima. Time će biti riješen problem nedovoljnog broja seizmoloških postaja na području Hrvatske i hrvatska Seizmološka služba će kvalitetom seizmičkog monitoringa područja Hrvatske stati uz bok modernih svjetskih seizmoloških službi.



Slika 27. Hrvatska mreža seizmoloških postaja. Stalne hrvatske seizmološke postaje (crveni kvadrati) i mobilne postaje (narančasti rombovi)[16] i [19] postavljene za praćenje aktivne seizmičnosti koje održava hrvatska Seizmološka služba; privremene privredne postaje Geofizičkog odsjeka (žuti rombovi); privremene seizmološke postaje financirane iz znanstvenih projekata Geofizičkog odsjeka (zeleni i plavi krugovi)[17] i [18].

5.1 Seizmološki sustav automatske obrade podataka

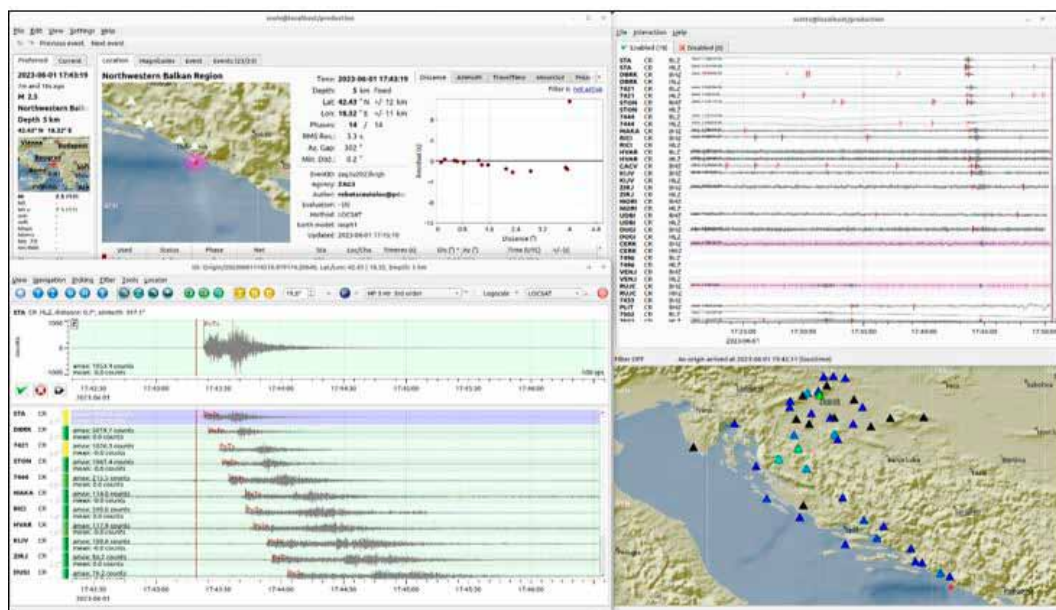
Seizmološki centri već duže vrijeme koriste sustave automatskog prikupljanja i obrade seizmoloških podataka. Pritom se prvenstveno misli na sustave koji analiziraju trenutne podatke koji dolaze sa seizmoloških postaja i promptno ih, automatski, obrađuju. Odmah po obradi podataka rezultati se mogu slati bez interakcije čovjeka prema dežurnim službama. Time se omogućava brza reakcija operativnih službi u slučaju potresa. Primjena navedenih sustava je npr. u sustavima ranog upozoravanja (EEWS – Earthquake Early Warning System, TEWS – Tsunami Early Warning System).

Sustavi automatske obrade podataka u seizmologiji danas su rašireni i dostupni u svijetu, u svojim najosnovnijim verzijama i bez naknade. Moderniji i kompleksniji sustavi, ili samo neki njihovi dijelovi prilagođeni određenim zadaćama (npr. praćenju lokalne seizmičnosti), ipak su uglavnom komercijalni i takvih sustava ima svega nekoliko.

Pouzdanost sustava automatske obrade podataka, odnosno pouzdanost dobivenih rezultata (osnovnih: lokacija i magnituda potresa i drugih, npr. žarišni mehanizmi, automatski generirane karte trešnje (ShakeMap), ...) izuzetno je važna. Ona je najvećim dijelom ovisna o broju i kvaliteti seizmoloških podataka koji ulaze u sustav, a oni pak ovise o vrsti i kvaliteti instrumenata

na promatranim lokacijama, kvaliteti odabrane lokacije seizmološke postaje (karakteristike tla, razina vanjskih, umjetnih i prirodnih smetnji, npr. industrije, prometa, ljudske aktivnosti, šume, vjetrova, blizine mora i dr.) te o ispravnom održavanju sve opreme i redovitoj kalibraciji instrumenata. Namjena takvog sustava je integracija u sustav upravljanja rizicima od katastrofa (SRUK) i najbrža moguća dostupnost podataka nadležnim službama.

U Hrvatskoj se koristi automatski sustav za obradu podataka SeisComP, ali uslijed nedovoljno guste mreže postaja i prevelike razine mikro-seizmičkog šuma postojećih postaja, njegova rješenja zasad ne zadovoljavaju postavljene kriterije kvalitete i pouzdanosti kako bi se mogla proslijediti operativnim službama. Trenutno se sva dobivena rješenja manualno korigiraju ili u potpunosti dobivaju ljudskim radom prije prosljeđivanja drugim službama. To je primarno uzrokovano relativno malim brojem stalnih seizmoloških postaja ali i drugim prethodno navedenim razlozima. Sustav je manje podložan greškama za jače potrese. Proširenjem i poboljšanjem mreže osigurat će se automatska rješenja prihvatljive kvalitete i njihovo direktno prosljeđivanje Operativnom centru Civilne zaštite Ministarstva unutarnjih poslova (OCCZ MUP).



Slika 28. Sustav automatske obrade podataka – potres kod Cavtata 01. lipnja 2023.

5.2 Sustav ranog upozoravanja o potresu

Sustav ranog upozoravanja o potresu (SRUP, engl. *Earthquake Early Warning System*, EEWS) osmišljen je u svrhu objave upozorenja o nadolazećoj potresnoj trešnji. Temeljna ideja sustava je obavješćivanje o nadolazećoj potresnoj trešnji prije nego se ista osjeti na lokaciji. Time se otvara mogućnost djelovanja u smislu smanjenja posljedica samog potresa. Važno je primijetiti – ovdje se ne radi o predviđanju potresa, nego o pokušaju da se na vrijeme pošalje obavijest o nadolazećoj trešnji potresa koji se već dogodio.

Vremenski period između momenta nastanka potresa i generiranog upozorenja varira od nekoliko sekundi do nekoliko desetaka sekundi i ovisi o velikom broju drugih faktora.

Sam sustav spominje se od početka razvoja elektroničkih komunikacija, a razvio se u punoj funkcionalnosti u zadnjih nekoliko desetaka godina. Prvi uspješni primjeri korištenja dolaze iz Japana 1960. godine. Japanska je željeznica koristila instrumente za detekciju trešnje tla iznad zadanog praga i upotrebom sirena zaustavljala vlakove. Grad Meksiko od 1991. godine koristi SAS (Seismic Alert System) što je bio prvi javni funkcionalni sustav ranog upozoravanja o potresu. U svijetu takve sustave koriste Japan, Meksiko, Sjedinjene Američke Države, Taiwan,

Indonezija, a u Europi i okolici Rumunjska i Turska. U fazi ispitivanja sustava su Grčka, Italija, Švicarska i brojne druge zemlje.

Karakteristike seizmičnosti znatno variraju diljem svijeta. Stoga se svi sustavi ranog upozoravanja moraju prilagoditi lokalnim uvjetima. Ne postoji općenito rješenje primjenjivo svugdje na svijetu – sustav koji funkcionira npr. u Japanu, u Republici Hrvatskoj ne bi bio učinkovit.

Rano upozoravanje moguće je jer se elektronički podaci prenose mnogo brže od rasprostiranja valova potresa. Instrument (seizmograf, akcelerograf) detektira početnu trešnju (P-val potresa, val koji je najbrži pa prvi dolazi do seizmološke postaje). Podaci od minimalno definiranog broja instrumenata (najbližih epicentru potresa) dolaze u centar sustava, sustav ih procesira (locira potres i određuje mu magnitudu) te generira upozorenje koje se odašilje na željene lokacije (sredstva obavješćivanja, TV, radio, mobilne mreže i sl.).

Upozorenje je najčešće generirano u obliku informacija koje sadrže vrijeme do nailaska prve trešnje (valova potresa) te očekivanu magnitudu potresa i procjenu jačine trešnje (intenzitet, vršne vrijednosti akceleracije tla, vršne vrijednosti brzine, ...).

U ovisnosti o karakteristikama i specifičnostima različitih područja, to se može postići s različitim brojem instrumenata. Susjedna Italija posjeduje više od 600 akcelorografskih postaja i više od 1000 seizmografskih postaja, sustav ranog upozorenja Kalifornije sadrži više od 1000 instrumenata za praćenje rasjeda San Andreas i slično.

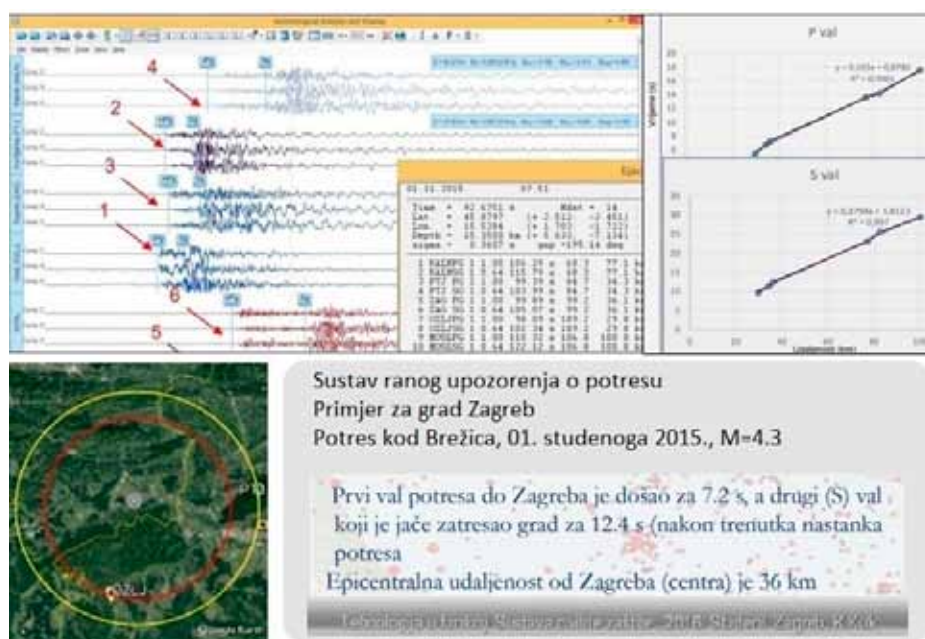
Tehnička ograničenja sustava ranog upozorenja su brojna. Vremenski period od oglašavanja ranog upozorenja do trenutka dolaska valova jake trešnje često je vrlo kratak, upozorenje može biti prekasno za područja bliska epicentru potresa, procijenjene vrijednosti intenziteta i vremena dolaska trešnje nisu uvijek precizne. Napretkom tehnologije, u sustav se uključuju i drugi parametri, poput GNSS mjerenja pomaka tla. Japan primjerice, ima jake potrese, velikih magnituda, ali i velike gradove udaljene stotinama kilometara od epicentara potresa. Stoga su upravo u Japanu sustavi ranog upozorenja u uporabi već godinama i služe za zaustavljanje brzih vlakova, gašenje plinskih i ostalih kritičnih postrojenja i slično. Naime, ako se radi o dovoljno velikim udaljenostima od epicentra potresa, vrijeme između trenutka u kojem su određeni epicentar i magnituda i procijenjenog trenutka nailaska S-valova često omogućava učinkovitu provedbu navedenih aktivnosti.

U posljednjih nekoliko godina pojavile su se i neke nove vrste sustava ranog upozorenja koje

se ne temelje na seizmološkim instrumentima, već na odzivu ljudi koji osjete trešnju ili samo mobitela koji svojim senzorom pokreta osjete vibracije. Umrežavanjem i obradom takvih podataka informacije se iz užeg epicentralnog područja šalju na mobitele i na većim udaljenostima prije nailaska S-valova potresa. S druge strane, ne smatraju se pouzdanim izvorom informacija jer ovise o previše faktora (uređaji moraju mirovati u trenutku potresa, mora ih biti dovoljan broj u epicentralnom području, ...).

U Hrvatskoj sustav ranog upozorenja o potresu u punoj funkcionalnosti za sada nije moguć, prema svim dosadašnjim iskustvima i izračunima. Mjesta nastanka potresa previše su blizu većih gradova da bi sustav imao dovoljno vremena prikupiti podatke, obraditi ih i izdati upozorenje, odnosno vrijeme reakcije je jednostavno prekratko. Neki jači udaljeniji potresi mogli bi biti detektirani sustavom prije početka jače trešnje u određenim područjima, ali za bliske jake potrese vrijeme je naprosto prekratko.

Na slici 29. prikazan je primjer iz 2015. godine, potres epicentra kod Brežica (Slovenija) koji nije bio jak, ali se dogodio na prostoru gdje su mogući jači potresi u blizini Zagreba. Jednak je slučaj i s nedavnim potresima sa zagrebačkog i petrinjskog područja. Slično je i u Rijeci, Splitu ili Dubrovniku.



Slika 29. Analiza mogućnosti sustava ranog upozorenja o potresu [20].

5.3 Sustav brzog obavješćivanja i reagiranja

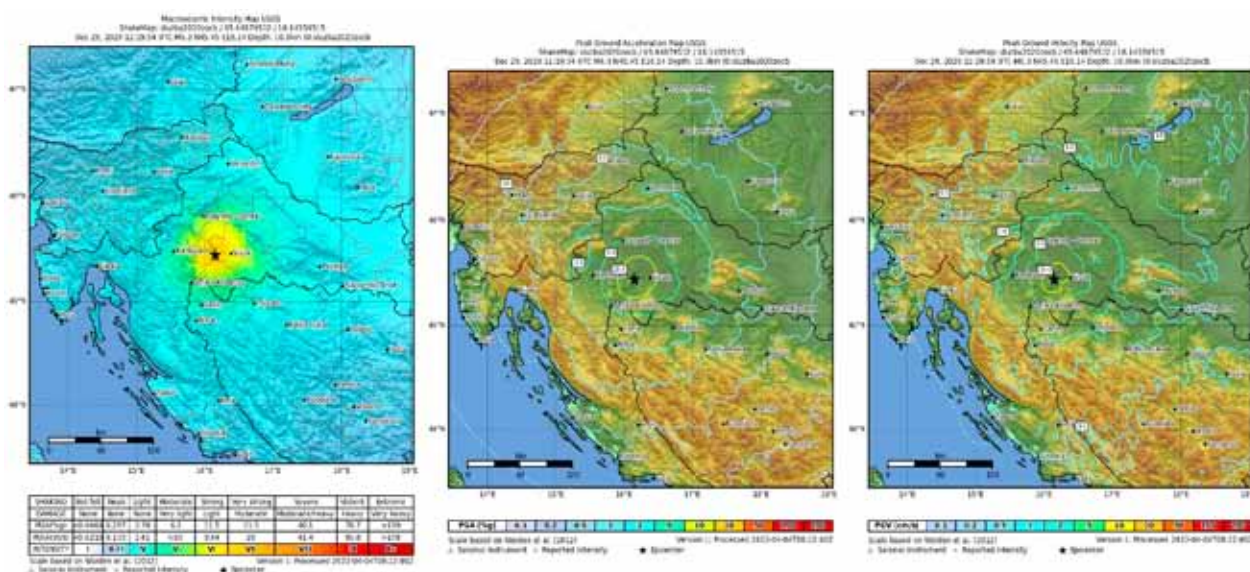
Sustav brzog obavješćivanja i reagiranja (engl. *RRS, Rapid Response System*) jedan je od važnih sustava u smanjivanju posljedica potresa. Ovaj sustav ponajviše služi u civilnoj zaštiti i spašavanju te sličnim operativnim službama u planiranju snaga potrebnih za odgovor na potres. Učinak jakog potresa na društvo može biti smanjen brzim i pravilnim reagiranjem sustava nakon potresa. Brze informacije o učincima potresa usmjeruju timove za potragu i spašavanje u područja gdje su najpotrebniji. Moderna tehnologija dozvoljava mjerenje jakih trešnji tla u područjima izloženim potresima u gotovo realnom vremenu. Temelji se na brzom obradi prikupljenih podataka o potresu. Može sadržavati sve raspoložive podatke (seizmološke, GPS, foto zapise i brojne druge). Obično je složen koliko tehničke i druge mogućnosti dopuštaju. Zato je prepoznat i tražen od vlada i agencija uključenih u zaštitu i spašavanje i općenito institucija koje reagiraju u slučaju potresa. Procjena razdiobe jake trešnje, oštećenja građevina (na osnovu njihovih dinamičkih karakteristika i spektara odziva trešnje tla), pa i potencijalnih žrtava, dostupna je nekoliko minuta nakon samog potresa. Kada sustav detektira potres, računaju se parametri gibanja tla (magnituda, intenzitet, akceleracije trešnje, dominantne frekvencije oscilacija, spektri snage, spektri odziva i dr.). U vrlo kratkom vremenu kreiraju se karte procijenjene

trešnje dostupne bitnim uredima, vatrogascima, medicinskim timovima, medijima i javnosti (slika 30.).

Sustav je to učinkovitiji što je bolje podešen lokalnim uvjetima i recentnim spoznajama struke. Niti jedan od takvih sustava nije moguće „pokrenuti i zaboraviti“, već ga je potrebno stalno nadograđivati novim znanjima.

Za sustav brzog obavješćivanja o potresu u Hrvatskoj može se reći da imamo njegov začetak te ga je neophodno kvalitetno izgraditi i postići punu funkcionalnost za svakodnevnu upotrebu. Njegova okosnica je sustav automatske obrade podataka za potrese koji je postavljen i razvija se u Seizmološkoj službi.

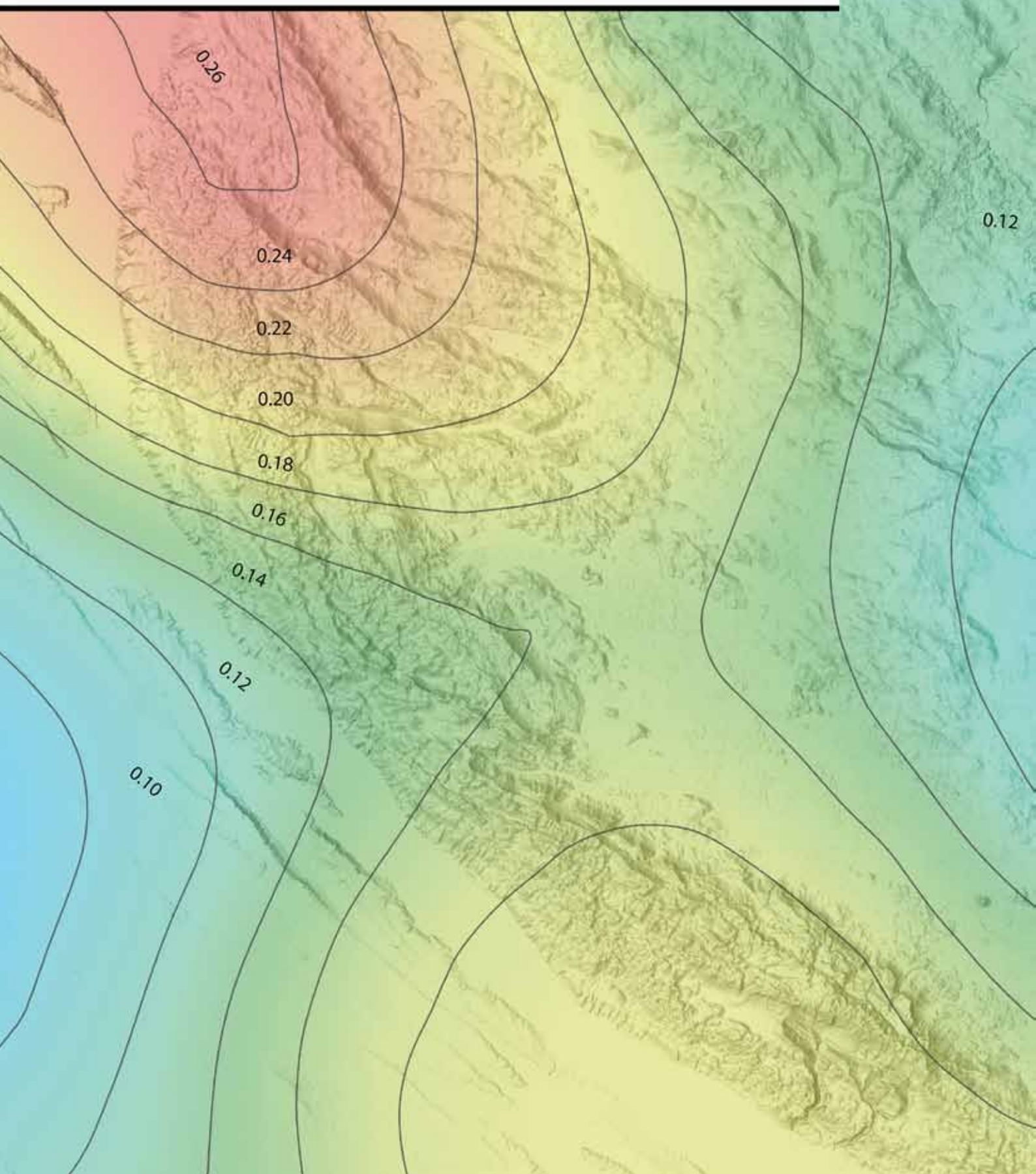
Kako bi se on razvijao i nadograđivao da bi s vremenom postajao sve pouzdaniji, nužno je osigurati prikladnu mrežu seizmoloških postaja, kontinuiranu izobrazbu kadrova, jačanje suradnje sa seizmološkim službama u svijetu, osigurati programske i računalne preduvjete za funkcioniranje sustava. Navedeno je prepoznala Vlada RH i kroz Nacionalni plan oporavka i otpornosti osigurala investiciju kojom se omogućio razvoj i jačanje kapaciteta Seizmološke službe kroz projekt CROSSNET. Projekt će do sredine 2026. godine osigurati kvalitetnu seizmološku infrastrukturu na području cijele države.



Slika 30. Karte trešnje potresa kod Petrinje, 29. 12. 2020., $M_L = 6.2$

Lijevi dio slike prikazuje intenzitet, srednji dio PGA (vršnu akceleraciju), a desni PGV (vršnu brzinu) osciliranja tla pri potresu. Preuzeto iz USGS Earthquake Hazards Program [21].

6. Seizmičnost Hrvatske



Kao dio mediteransko-transazijskog seizmičkog pojasa gotovo se čitavo područje Republike Hrvatske odlikuje izraženom seizmičkom aktivnošću. To poglavito vrijedi za priobalno područje i sjeverozapadni dio Hrvatske, a posebice za južnu Dalmaciju.

Potresi u Hrvatskoj nastaju kao rezultat interakcije i nakupljanja tektonskih napetosti koja nastaje potiskivanjem Jadranske mikroploče (Adria) pod europsku litosferu u konvergentnom graničnom pojasu između Afričke i Euroazijske ploče (u obalnom području, Dinaridima, sve do jugozapadnog dijela Panonske nizine) ili kao rezultat deformacije unutar većih tektonskih jedinica (npr. u unutrašnjosti Hrvatske ili središnjem Jadranu).

6.1 Hrvatski katalog potresa

Znatna seizmička aktivnost u okolini Zagreba u drugoj polovici 19. stoljeća potakla je prirodoslovne znanstvene krugove na izrazitije zanimanje za proučavanje nastanka potresa kao i za intenzivno prikupljanje svih dostupnih podataka o potresima koji su se u povijesti događali na našem tlu. Glavni poticaj općem istraživanju potresa u nas dao je veliki zagrebački potres od 9. studenog 1880. godine koji je do danas najjači poznati potres na tom području. Do kraja 19. i početka 20. stoljeća Mijo Kišpatić prikupio je i objavio podatke za potrese u Hrvatskoj od 361. godine, koji su bili osnova za sva daljnja istraživanja seizmičnosti Hrvatske (npr. [22]–[24]). Prikupljeni su brojni makroseizmički podaci, a postavljanjem prvih seizmografa početkom 20. stoljeća počelo je doba mikroseizmologije.

Hrvatski katalog potresa (*Croatian Earthquake Catalogue*, CEC) sadrži osnovne podatke o više od 175 000 potresa koji su se u Hrvatskoj i susjednim područjima dogodili u vremenu od pr. Kr. do kraja 2021.g. ([9], [25]–[29]). Za izradu kataloga potresa korišteni su svi dostupni instrumentalni podaci hrvatskih seizmoloških postaja (stalnih i privremenih) kao i postaja susjednih država (primarno onih

u Bosni i Hercegovini, Sloveniji, Austriji, Mađarskoj i Crnoj Gori) dobivenih uobičajenom razmjenom seizmoloških podataka, objavljeni radovi i katalozi, neobjavljeni podaci iz Arhive Geofizičkog odsjeka i podaci međunarodnih seizmoloških centara (ISC, CSEM-EMSC, NEIC-USGS, INGV i dr.).

Koordinate epicentara potresa računate su metodom HYPOSEARCH [14]. Uz podatke o tome kada se i gdje se pojedini potres dogodio (koordinate epicentra), dubinu žarišta, magnitudu i intenzitet u epicentru, katalog sadrži i podatke o pouzdanosti lokacije te reference za svaki podatak.

Za povijesne potrese – ugrubo, prije prvog desetljeća 20. stoljeća – u katalogu su dani podatci o intenzitetu potresa. Magnituda M_L povijesnih potresa izračunata je iz intenziteta u epicentru I_0 i dubine h hipocentra potresa po sljedećoj relaciji [30]:

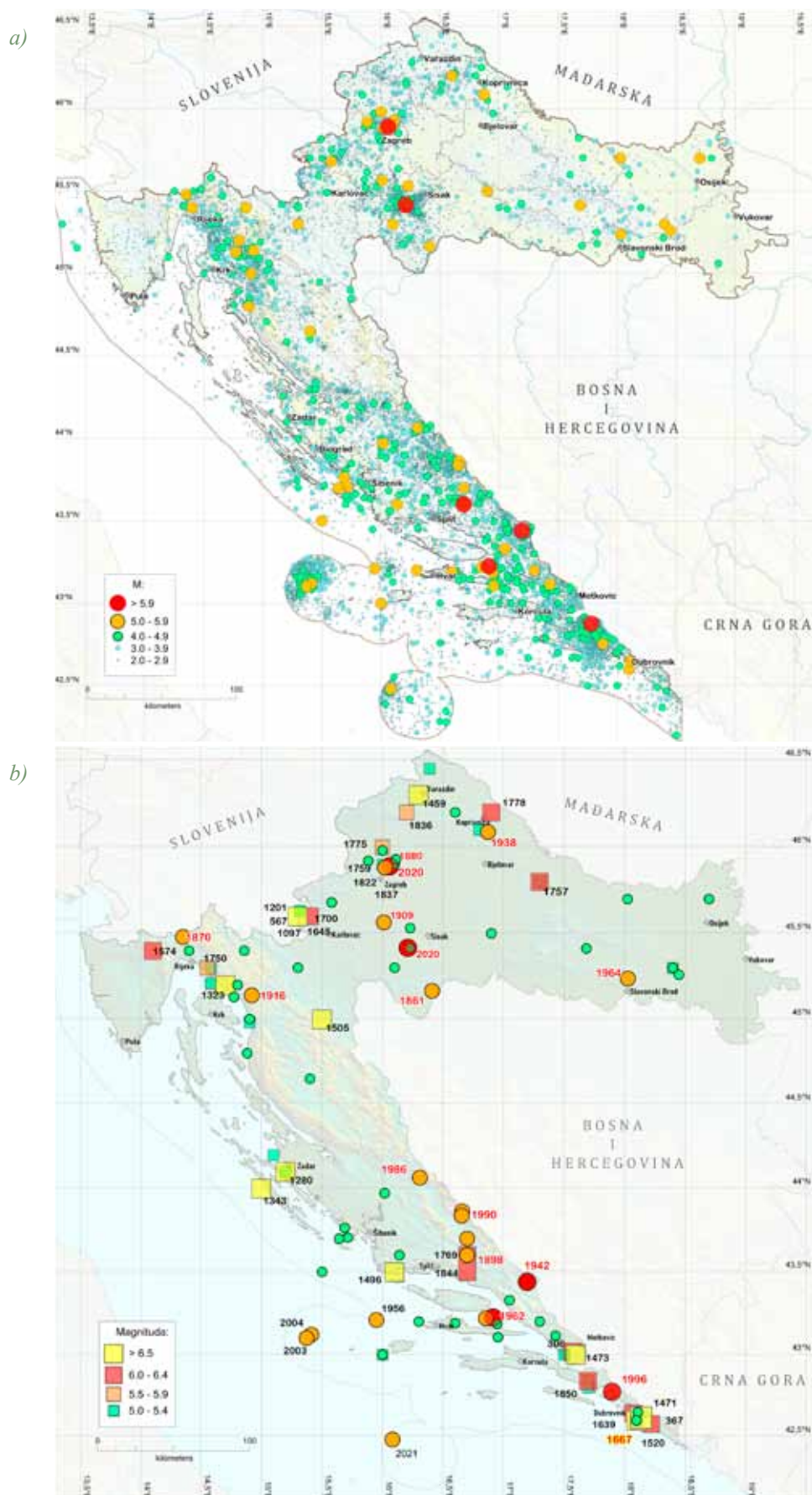
$$M_L = 0.721 I_0 + 1.283 \log h - 1.130 \quad (2)$$

pri čemu je za potrese s nepoznatim iznosom žarišne dubine h uzeta vrijednost od 12 km, koja je srednjak dubina žarišta instrumentalno zabilježenih potresa na području Hrvatske.

Magnituda potresa procijenjena iz instrumentalnih podataka je makroseizmička lokalna magnituda (M_L). Prostorna razdioba epicentara potresa na području Hrvatske

U Hrvatskom katalogu potresa CEC2021 nalaze se podatci o 82946 potresa na području Hrvatske, u razdoblju od prije Krista do kraja 2021. godine.

Prostorna razdioba epicentara potresa (slika 31. (a)) pokazuje gdje se oslobodila glavnina seizmičke energije. Južni dio Hrvatske pokazuje najjaču seizmičku aktivnost. Sjeverozapadna Hrvatska, kao i sjeverni dio priobalja koji obuhvaća područje Klana – Rijeka – Novi Vinodolski također karakterizira izražena seizmička aktivnost. Najmanje seizmički aktivna područja u Hrvatskoj su u istočnoj i zapadnoj Slavoniji, Istri te u području istočnog Korduna, Like i Velebita.



Slika 31. (a) Karta epicentara recentnih potresa na području Hrvatske u razdoblju od 1880. do kraja 2021. godine prema Katalogu potresa Hrvatske CEC2021 magnitude $M \geq 1.5$; (b) Prostorna razdioba potresa magnituda $M \geq 5.0$. Povijesni potresi koji su se dogodili do 1850. godine označeni su kvadratićima, a potresi koji su se dogodili nakon 1850. do kraja 2021. godine označeni su kružicama, istim bojama ovisno o magnitudi, kako je prikazano u legendi. Za potrese magnituda $M \geq 5.5$ uz oznaku epicentra navedena je godina u kojoj se potres dogodio.

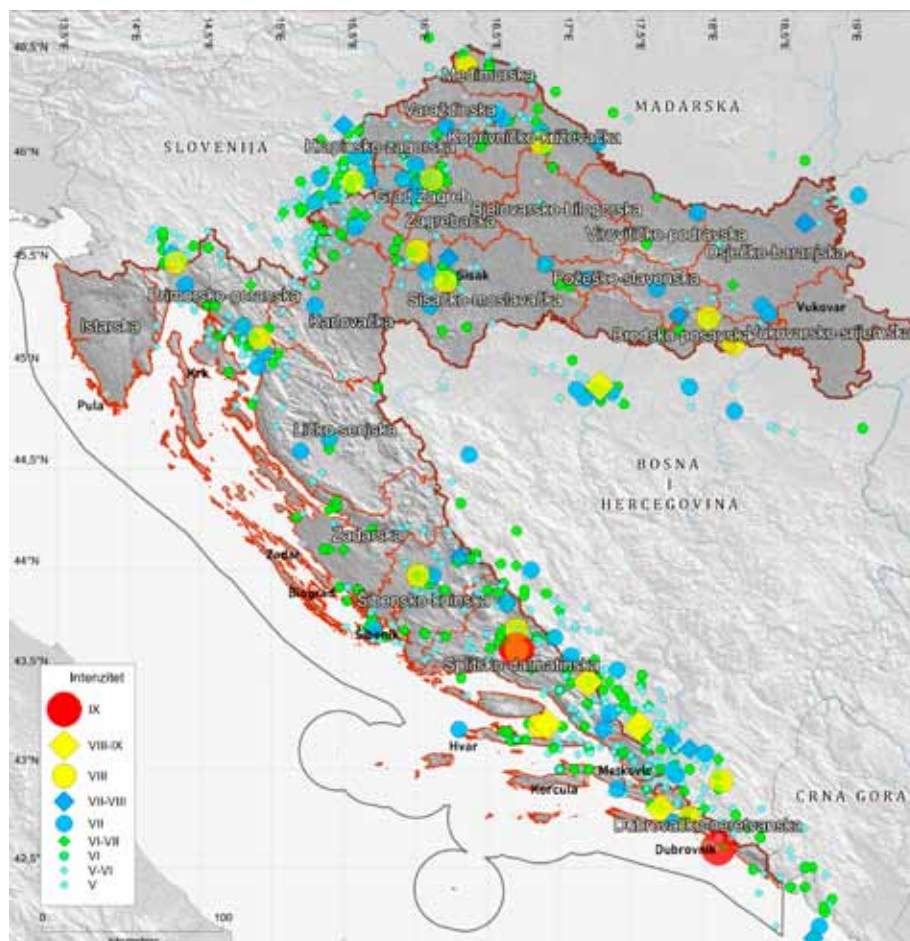
U Hrvatskom katalogu potresa do 1850. godine postoje podaci o 52 potresa iz povijesnih izvora, a u razdoblju od početka 1850. do kraja 2021. g podaci o 74 potresa čija je magnituda bila veća od 5.0, odnosno intenziteta $I_0 \geq \text{VI-VII}^\circ \text{MCS}$ (procijenjene magnitude $M \geq 5.0$ iz intenziteta za potrese prije instrumentalnog bilježenja potresa).

Najstariji (nepouzdana) podatak o takvom potresu u Hrvatskoj navodi potres kod Dubrovnika iz 32. g. pr. Krista. Prostorna razdioba potresa magnituda $M \geq 5.0$ na području Hrvatske, od prije Krista do 2021. godine prikazana je na slici 31(b). Popis najjačih potresa u Hrvatskoj od 17. stoljeća do zaključno 2021. prikazan je u tablici 2.

Tablica 2. Najjači potresi u Hrvatskoj po županijama (od 17. st. do 2021.g.)

Županija	Najbliže mjesto	M_L	Intenzitet $^\circ \text{MCS}$	Datum	Vrijeme (UTC)
Bjelovarsko-bilogorska	Kutina	5.3*	VII	28. siječnja 1900.	09:35
Brodsko-posavska	Dilj Gora	5.7	VIII	13. travnja 1964.	08:30
Dubrovačko-neretvanska	Dubrovnik	7.1*	IX-X	6. travnja 1667.	08:45
Dubrovačko-neretvanska	Ston-Slano	6.0	VIII	5. rujna 1996.	20:44
Grad Zagreb	Zagreb	6.2*	VIII	9. studenog 1880.	06:34
Grad Zagreb	Zagreb	5.5	VII	22. ožujka 2020.	05:24
Istarska	Labin	3.9	V	31. siječnja 1912.	21:02
Karlovačka	Karlovac	5.3*	VII	24. ožujka 1881.	16:45
Koprivničko-križevačka	Bilogora	5.6	VIII	27. ožujka 1938.	11:16
Krapinsko-zagorska	Gornja Stubica	5.3*	VII	11. studenog 1880.	10:26
Ličko-senjska	Senj	5.3*	VII	23. rujna 1878.	20:20
Ličko-senjska	Gospić	5.3*	VII	28. srpnja 1893.	02:40
Ličko-senjska	Rab	5.3	VII	30. lipanj 1949.	06:50
Međimurska	Međimurje	5.1*	VIII	30. ožujka 1738.	
Međimurska	Čakovec	3.9	VI	19. prosinca 1970.	02:59
Osječko-baranjska	Đakovo	5.3*	VII	24. ožujka 1884.	19:59
Osječko-baranjska	Baranja	5.1	VII-VIII	24. studenog 1922	02:15
Požeško-slavonska	Požega	5.0	VII	25. kolovoza 1995.	09:27
Požeško-slavonska	Požega	5.0	VII-VIII	4. travnja 1937.	15:40
Primorsko-goranska	Vinodol	5.8	VIII	12. ožujka 1916.	03:23
Sisačko-moslavačka	Pokupsko	5.8	VIII	8. listopada 1909.	09:59
Sisačko-moslavačka	Petrinja	6.2	VIII	29. prosinca 2020.	11:19
Splitsko-dalmatinska	Trilj	6.7*	IX	2. srpnja 1898.	05:20
Splitsko-dalmatinska	Imotski	6.2	VIII-IX	29. prosinca 1942.	03:42
Splitsko-dalmatinska	Makarska	6.1	VIII-IX	11. siječnja 1962.	05:05
Šibensko-kninska	Knin	5.5	VIII	7. rujna 1970.	20:58
Šibensko-kninska	Knin	5.5	VII-VIII	25. studenog 1986.	13:59
Varaždinska	Koprivnica	4.7	VIII	1. lipnja 1993.	19:51
Zadarska	Benkovac	4.9*	VI-VII	8. studenog 1898	11:33
Virovitičko-podravsko	Slatina	4.1	VI	11. listopada 1903.	01:50
Vukovarsko-srijemska	Bošnjaci kod Vinkovaca	4.4	V-VI	7. listopada 1972.	08:32
Zagrebačka	Plešivica	5.3*	VII	13. kolovoza 1887.	02:54

* Magnituda je procijenjena iz intenziteta



Slika 32. Karta epicentara potresa s maksimalnim intenzitetom u epicentralnom području $I_0 \geq V$ °MCS prema Hrvatskom katalogu potresa (CEC2021) od 17. stoljeća do kraja 2021. godine (nisu prikazani potresi s nepouzdanim povijesnim podacima).

Karta epicentara potresa na području Hrvatske u razdoblju od prije Krista do kraja 2021. godine prema Katalogu potresa Hrvatske CEC2021 magnitude $M \geq 1.0$ prikazana je u Prilogu 2.

Na slici 32. je prikazana prostorna razdioba potresa s maksimalnim intenzitetom $I_0 \geq V$ °MCS u epicentralnom području prema Hrvatskom katalogu potresa (CEC2021) [9], [25]–[29]. Na karti su prikazani maksimalni intenziteti potresa određeni na osnovu prikupljenih makroseizmičkih podataka (glavnih potresa i naknadnih potresa za koje je bilo moguće utvrditi maksimalni intenzitet). Povijesni potresi s nepouzdanim podacima nisu prikazani na karti.

U Hrvatskoj seizmološkoj bazi podataka postoje pouzdani podaci za 63 potresa na području Hrvatske od početka 17. stoljeća čiji je maksimalni intenzitet bio veći ili jednak VII °MCS. Od toga se 13 potresa u epicentralnom području osjetilo maksimalnim intenzitetom VIII °MCS, tri VIII–IX °MCS i dva IX °MCS (slika 32).

6.1.1 Kontinentalna Hrvatska

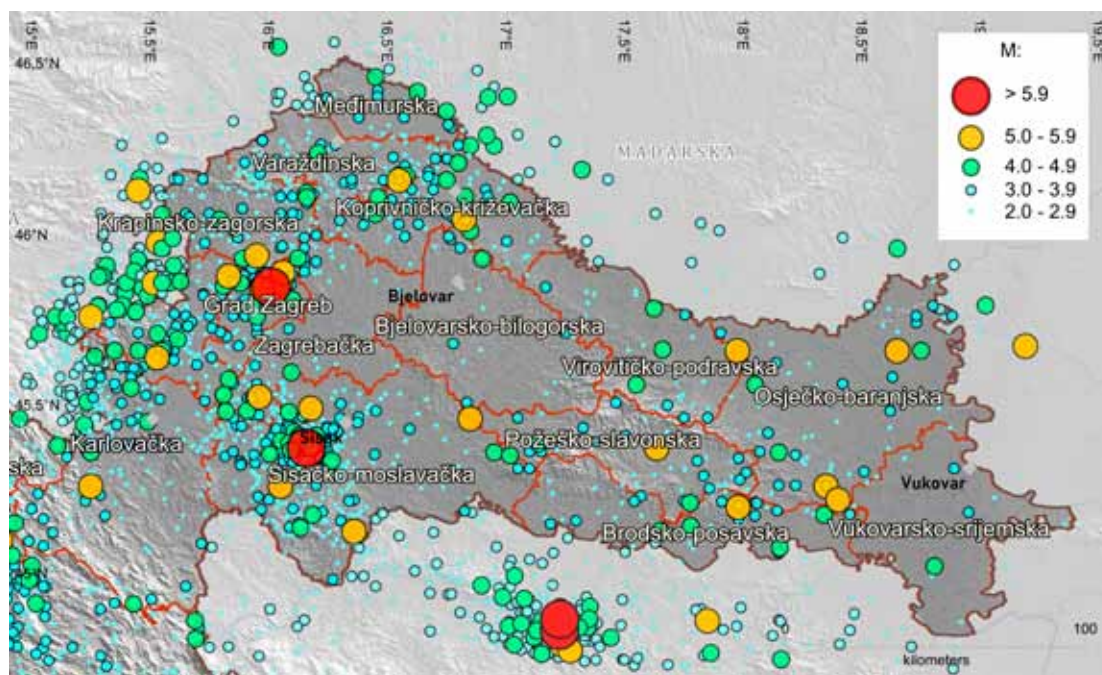
Kontinentalni dio Hrvatske zauzima područje sjeverozapadnih Dinarida, jugozapadnog dijela Panonske nizine i njegove zapadne rubove prema alpskom području. Interakcije između Jadranske mikroploče, Dinarida, Alpa i Panonskog bazena doveli su do složenih tektonskih i strukturnih odnosa.

Sjeverozapadni dio Hrvatske (obuhvaća sjeverni dio Karlovačke županije, Zagrebačku županiju i grad Zagreb, Varaždinsku i Koprivničko-križevačku županiju, te Sisačko-moslavačku županiju) je seizmički najaktivnije područje u kontinentalnoj Hrvatskoj, s epicentrima koji se protežu od Bilogore i Koprivnice duž planina Kalnik, Ivanščica i Medvednice prema Žumberku na zapadu te od Pokuplja do Zrinske gore na jugu (slika 33).

Potres koji se dogodio 9. studenoga 1880. bio je najjači potres koji se dogodio u zagrebačkom epicentralnom području. Njegov hipocentar bio

je ispod Medvednice, u blizini mjesta Kašina i Planina. Najveći intenzitet je procijenjen na VIII °MCS (magnituda 6.2 procijenjene iz intenziteta). Novine su pisale da se Zagreb potresao, prestrašivši ljude i uzrokujući dvije žrtve. Prema povijesnim podacima Zagreb je u to vrijeme imao nešto manje od 30.000 stanovnika i oko 2500 zgrada.

U potresu je ukupno oštećeno ili uništeno 1400 zgrada [31]. Nakon potresa iz 1880. godine, 17. prosinca 1901. dogodio se jak potres s epicentrom u okolici Šestina. Gotovo na istom mjestu kao i potres 1880. dogodila su se još dva jaka potresa 17. prosinca 1905. i 2. siječnja 1906. godine.



Slika 33. Potresi magnitude $M \geq 2.0$ locirani u kontinentalnom dijelu Hrvatske u razdoblju od 1850. do 2021. godine.

U dolini Kupe dogodio se 8. listopada 1909. godine jak potres, s epicentrom 40-ak km jugo-istočno od Zagreba blizu Pokupskoga, najvećeg intenziteta VIII °MCS-ljestvice u epicentralnom području (procijenjene magnitude 5.8). Potres je izazvao znatna oštećenja, a jako se osjetio i u Zagrebu gdje je bilo porušenih dimnjaka [32].

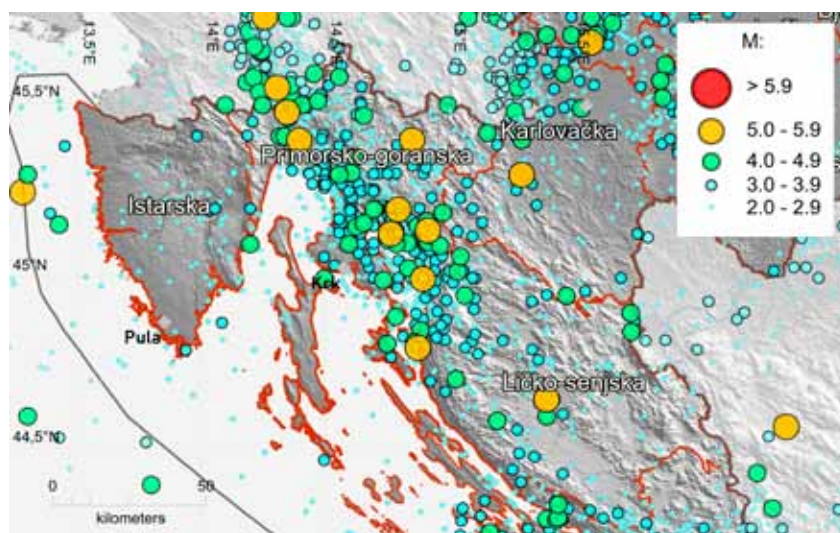
Zagreb i šire zagrebačko područje pogodio je 22. ožujka 2020. u 6 sati i 24 minute snažan potres lokalne magnitude $M = 5.5$. Nakon glavnog potresa uslijedio je čitav niz brojnih naknadnih potresa (do kraja 2021. godine zabilježeno je oko 3600 potresa, od kojih je u prvoj godini zabilježeno oko 3300). Većina epicentara serije naknadnih potresa dogodila se na području grada Zagreba, posebice naseljima Markuševac i Čučerje. Dubine pouzdano lociranih žarišta većinom su procijenjene do najviše 12 km [33].

Krajem iste, 2020. godine, 29. prosinca u 12 sati i 19 minuta okolicu Petrinje pogodio je razoran potres magnitude 6.2 i intenziteta u epicentru VIII stupnjeva EMS ljestvice. Od posljedica potresa smrtno je stradalo sedmero ljudi te je došlo do značajne materijalne štete u Petrinji, Sisku, Glini i okolnim mjestima. Oštećeni su mnogi stambeni i gospodarski objekti diljem Sisačko-moslavačke, Zagrebačke i Karlovačke županije. Potres se osjetio u cijeloj Hrvatskoj i susjednim državama, Austriji, Češkoj, južnim dijelovima Njemačke i Poljske te u dijelovima Rumunjske, Bugarske i Albanije. U širem epicentralnom području došlo je do brojnih koseizmičkih slomova tla, ponajviše do klizišta, izboja pijeska, urušnih vrtača i pukotina na prometnicama. Do kraja 2021. godine locirano je oko 18 800 naknadnih potresa, a seizmička aktivnost petrinjskog područja nastavljena je i u 2022. godini [34].

Najslabije seizmički aktivno područje kontinentalne Hrvatske su zapadna i istočna Slavonija, Moslavina i Baranja (županije Bjelovarsko-Bilogorska, Virovitičko-podravska, Požeško-slavonska, Brodsko posavska, Osječko-Baranjska i Vukovarsko-srijemska). Iako je seizmičnost ovih dijelova Hrvatske karakterizirana relativno rijetkom pojavom jakih potresa, povijesna seizmičnost pokazuje da je njegov seizmički potencijal nezanemariv. Kod Slavonskog Broda se 13. travnja 1964. godine dogodio najjači potres na području istočne Slavonije. Bio je magnitude $M = 5.7$, odnio je dva ljudska života i uzrokovao veliku materijalnu štetu.

6.1.2 Primorska Hrvatska

Seizmičnost obalnog dijela Hrvatske jasno je ograničena na dvije prepoznatljive domene koje se razlikuju po ukupnoj aktivnosti [9], sjeverozapadni, koji obuhvaća epicentralna područja Ilirska Bistrica–Rijeka–Senj (uključujući dijelove Like, Gorskog kotara i Velike Kapele), Velebita i Istre (slika 34.) te seizmički aktivniji središnji i južni dio koji se proteže od Zadra, Šibenika i Kornata južno prema epicentralnom području Dinara-Kamešnica, Split, Metković, Ston-Dubrovnik te središnji i južni Jadran (slika 34.)



Slika 34. Potresi magnitude $M \geq 2.0$ locirani u sjevernom djelu priobalja u razdoblju od 1850. do 2021. godine.

6.1.2.1 Sjeverozapadno priobalje

U sjeverozapadnom obalnom području (područje Istarske i Primorsko-goranske županije, južni dio Karlovačke županije i Ličko-senjska županija) seizmički je aktivno relativno usko priobalno područje koje obuhvaća šire riječko epicentralno područje od planine Snežnik prema Hreljinu, Crikvenici, otoku Krku i Senju. Poznato je po čestoj pojavi relativno slabih potresa ($M_L < 4.0$) i povremenih pojava umjerenih ili jakih potresa ($M_L \geq 4.0$) [9]. Područje Istre zapadno od Učke je seizmički slabo aktivno.

Najjači recentni potres magnitude $M = 5.8$ zabilježen je 12. ožujka 1916. godine kod Grižana

u Vinodolu ($I_0 = VIII$ °MCS). U srpnju iste godine zabilježen je 12 km sjeverozapadno od glavnog potresa najjači naknadni potres magnitude $M = 5.4$. Krajem 19. stoljeća, 1. ožujka 1870. g. kod Klane se dogodio potres maksimalnog intenziteta $I_0 = VIII$ °MCS (procijenjene magnitude $M = 5.5$) [35].

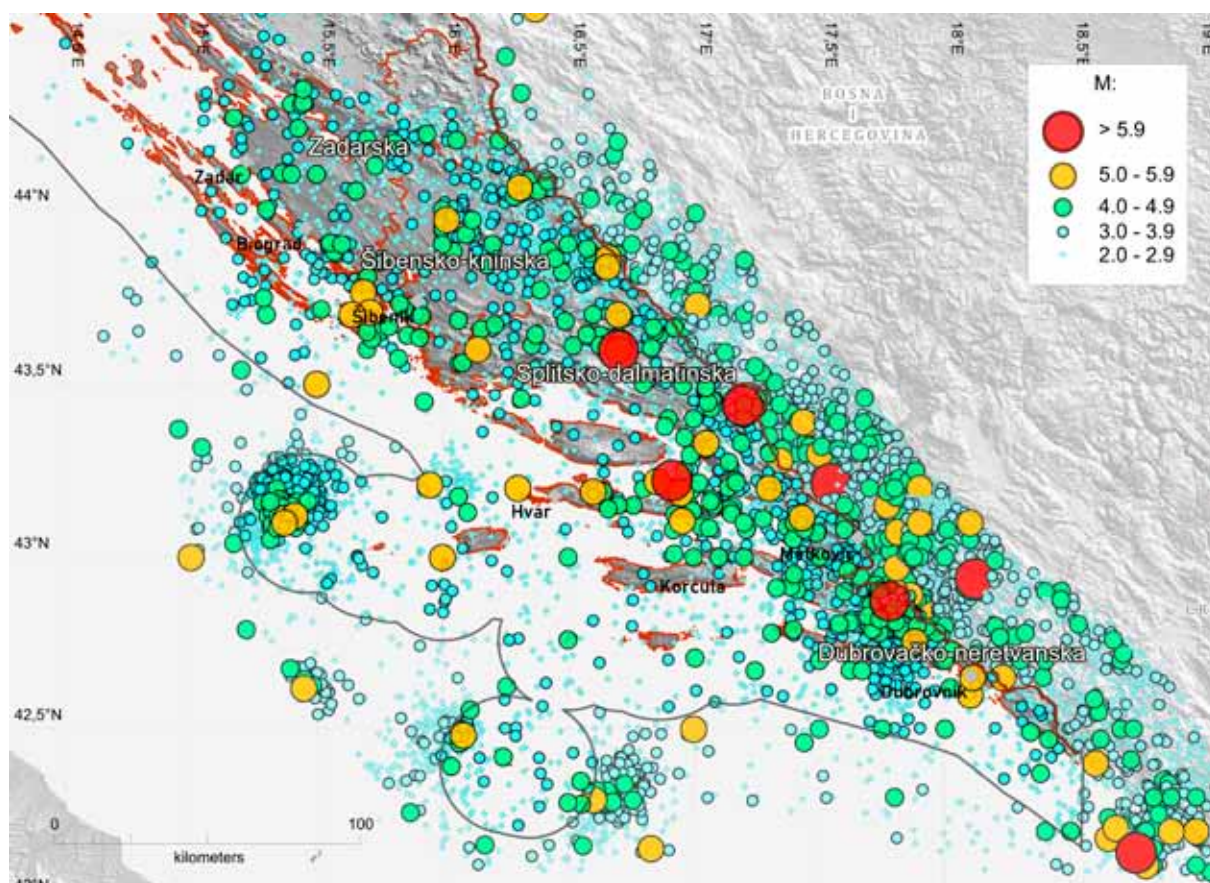
6.1.2.2 Središnja i južna Dalmacija

Pojas najveće seizmičke aktivnosti u obalnom dijelu Hrvatske proteže se u širokom području koje obuhvaća priobalje i otoke središnjeg dijela Dalmacije, zaleđe i granično područje s Bosnom

i Hercegovinom, epicentralna područja središnjeg Jadrana (Palagruža, Jabuka) te južnu Dalmaciju jugoistočno od Dinare prema Imotskom, dolinu Neretve, Metković-Stolac, Ston-Slano i Dubrovnik (slika 35.).

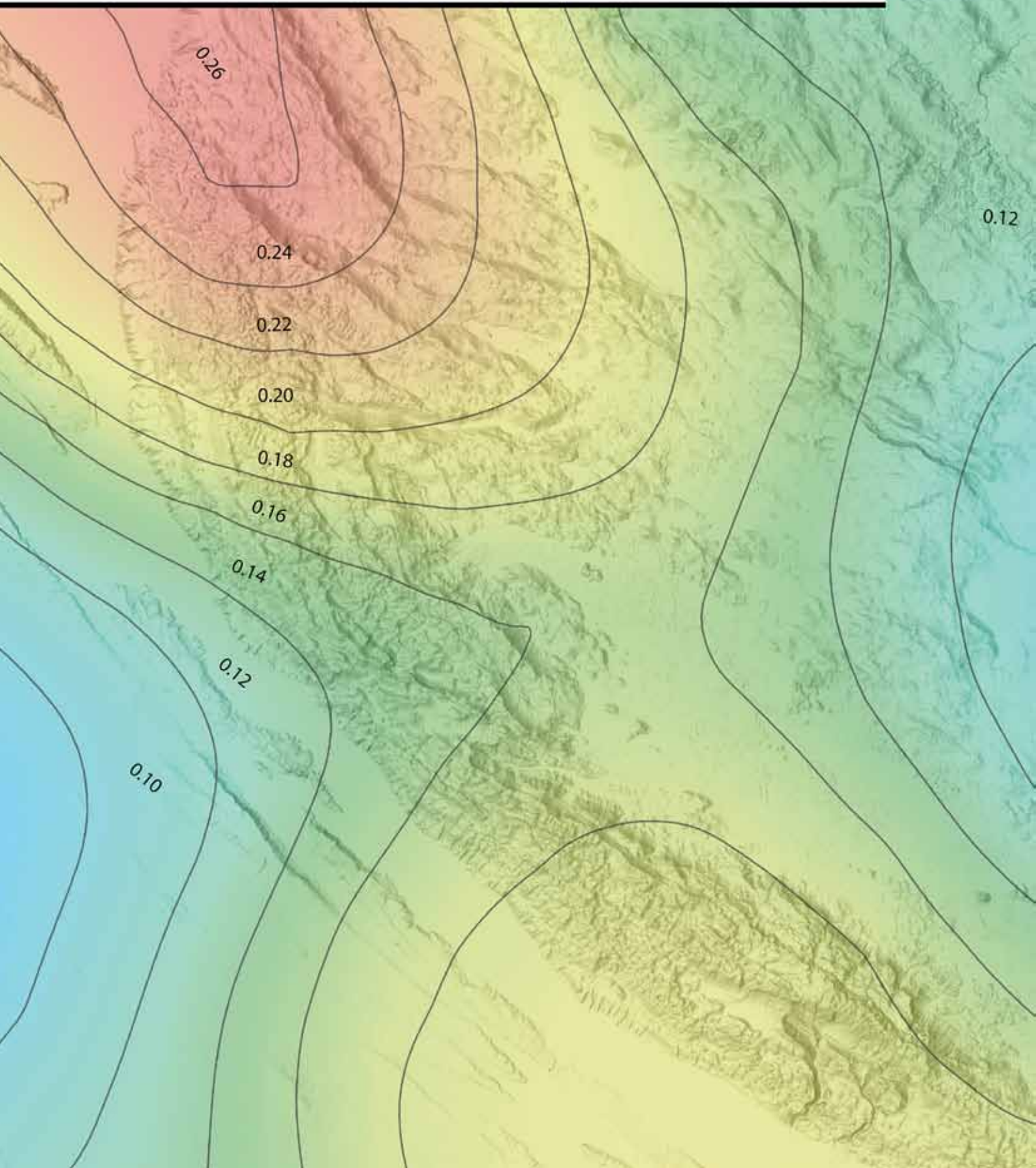
U seizmički najaktivnijem području Hrvatske, koje se proteže južno od Zadra i Šibenika dogodili su se najjači potresi u Hrvatskoj. Od povijesnih potresa valja istaknuti potres koji se u središnjoj Dalmaciji dogodio godine 1898. kod Trilja. Potres je bio najvećeg intenziteta u epicentru IX °MCS ljestvice. Godine 1942 kod Imotskog se dogodio potres magnitude 6.2. Kod Makarske su se 1962. godine dogodila dva vrlo jaka potresa (7. i 11. siječnja), prvi magnitude 5.9 i drugi 6.1. nakon kojih je uslijedilo mnoštvo naknadnih potresa. Jedan čovjek je poginuo. Materijalna šteta je bila vrlo velika [36].

U najjužnijem djelu Hrvatske obale dogodio se 1667. godine i najjači potres na području Hrvatske od 17. st do danas, poznat kao Veliki dubrovački potres. Prouzročio je velike štete, uništio je ili oštetio većinu kuća od Dubrovnika do Budve. Dubrovački potres iz 1667. godine je najjači dobro dokumentirani potres u priobalnom dijelu Hrvatske koji značajno utječe na seizmičnost i procjenu potresne opasnosti. U istom epicentralnom području dogodio se kod Stona godine 1850. potres najvećeg intenziteta u epicentru $I_{\max} = \text{VIII-IX } ^\circ\text{MCS}$. Krajem prošlog stoljeća 5. rujna 1996. kod Stona i Slanog dogodio se potres magnitude 6.0 koji je posve uništio tri sela i izazvao štete u mnogim dalmatinskim gradovima. Nakon glavnog potresa uslijedilo je na tisuće naknadnih potresa.



Slika 35. Potresi magnitude $M \geq 2.0$ locirani u središnjoj i južnoj Dalmaciji u razdoblju od 1850. do 2021. godine.

7. Inženjerska seizmologija



Potresi se smatraju jednom od najvećih prirodnih ugroza budući da uzrokuju izuzetno velike ljudske žrtve gotovo svake godine, izazivaju tsunamije, odrone, poplave i čine ogromne ekonomske štete i socijalne probleme. Prema „Procjeni rizika od katastrofa za Republiku Hrvatsku“ [37] potres je jedna od mogućih katastrofa u Hrvatskoj za koju se procjenjuje visok rizik. Slabiji potresi neće izazvati štete, jednako kao i jači potresi čiji se epicentri nalaze dovoljno daleko od gradova ili drugih značajnih lokacija na kojima bi mogli izazvati štete. Ljudske žrtve, baš kao i štete, bit će značajno manje ili će u potpunosti izostati ako su gradovi pripremljeni na potresne događaje. To se može postići koristeći bolju gradnju, seizmički otpornije objekte, sigurnosne sustave i općenito efektivnije planiranje i pripremanje za katastrofe.

Najekonomičniji način smanjivanja ekonomskih i socijalnih efekata potresa jest procjena potresne opasnosti i na temelju nje procjena i posljedično ublažavanje seizmičke ugroženosti. Prevencija koja se sastoji u pravilnom odabiru terena i načina gradnje, kao i u ojačavanju potresom ugroženih postojećih građevina, je jedina strategija koja omogućava efektivno smanjivanje štetnih utjecaja potresa.

Dio seizmologije koji se bavi proučavanjem potresne pobude na lokalnoj razini naziva se inženjerska seizmologija. Ona se dakle bavi opisivanjem i parametrizacijom jake trešnje tla (atenuacijske relacije), lokalnim uvjetima tla i njegovim odzivom na snažnu seizmičku pobudu (npr. seizmička mikrozonacija), procjenom dinamičkih parametara tla te proučavanjem pojave rezonancije i interakcije između tla i građevina čime se povezuje s potresnim inženjerstvom. Možda najvažniji doprinos navedenih istraživanja jest pri procjeni potresne opasnosti (seizmičkog hazarda) koja je rezultat još i statističke evaluacije opažene seizmičnosti te modeliranja dugoročne aktivnosti identificiranih seizmogenih rasjeda.

7.1 Seizmički hazard i rizik (potresna opasnost i ugroženost)

Seizmički hazard (potresna opasnost) definiran je seizmičnošću, a iskazuje se vjerojatnošću premašaja određene vrijednosti nekog od parametara gibanja tla za potresa, najčešće ubrzanja gibanja tla (ranije intenziteta potresa) unutar razmatranog vremenskog razdoblja na nekom definiranom području.

Stoga seizmički hazard za neku lokaciju može npr. biti iskazan procjenom da će maksimalna akceleracija trešnje u iznosu od 0.2 g (20% od ubrzanja sile teže na Zemlji) biti s vjerojatnošću od 10 % premašena tijekom (bilo kojih) 50 godina.

Seizmički rizik (potresna ugroženost) prikazuje vjerojatnost šteta koje potres može proizročiti. Te se štete manifestiraju kroz učinke na stanovništvo, ljudske žrtve, ekonomske i druge segmente društvene zajednice. Dobiva se konvolucijom seizmičkog hazarda s ranjivošću i izloženošću.

Seizmička ranjivost definirana je kao karakteristika određene konstrukcije da pretrpi strukturna i nestrukturna oštećenja prilikom potresnog djelovanja. U procjeni seizmičkog rizika za građevine procjena ranjivosti igra vrlo važnu ulogu. Procedure procjene seizmičke ranjivosti mogu biti empiričke, poluempiričke i analitičke. Ranjivost se može općenito promatrati i kao vjerojatnost gubitka za određenu razinu djelovanja potresa.

Seizmička izloženost prikazuje razmjer ljudske prisutnosti, aktivnosti (primjerice prisutnost građevina) u područjima koja su izložena seizmičkoj aktivnosti, odnosno potresnoj opasnosti (hazardu). U podacima o (seizmičkoj) izloženosti nalaze se podaci o zgradama, vrstama i načinu njihova korištenja, broju stanovnika koji u njima boravi i sl. U Hrvatskoj je seizmička izloženost parametar koji je slabo definiran, što direktno utječe na pouzdanost procjene seizmičkog rizika.

Seizmički hazard se procjenjuje na dva načina: determinističkim i vjerojatnosnim (probabilističkim) pristupom.

Deterministički pristup (engl. DSHA, *deterministic seismic hazard assessment*) baziran je na diskretnim događajima, pri čemu se odabire nekoliko potresnih scenarija. U obzir uzima realistično procijenjene vrijednosti parametara jačine trešnje na određenoj udaljenosti uzrokovane odabranim potresima, a one se određuju na osnovi seizmoloških i seizmotektonskih podataka uz pretpostavku da se ti odabrani potresi mogu pojaviti u bilo kojoj točki definiranih seizmičkih izvora. Ovaj je pristup prikladan za procjenu potresne opasnosti na pojedinoj lokaciji (*site-specific*) kada se želi modelirati odziv na konkretne potrese koji mogu zadesiti tu lokaciju. U tom je slučaju moguće izračunati i tzv. *sintetičke ili umjetne akceleroگرامe*, odnosno procijeniti reprezentativnu pobudu koju bi planirani objekt mogao doživjeti tijekom svoje eksploatacije. Takvi se akceleroگرامi često koriste za numeričke simulacije odziva konstrukcije na potres.

Metoda probabilističkog određivanja seizmičkog hazarda (engl. PSHA, *probabilistic seismic hazard assessment*) koristi najveću moguću količinu raspoloživih podataka i znanja ne samo iz seizmologije, nego i seizmotektonike, geologije i primijenjene geofizike.

U probabilističkom pristupu za svaku se lokaciju u obzir uzimaju svi relevantni seizmički izvori u skladu s njihovom produktivnošću (opisanom G-R relacijom) te se uz pomoć odabranih atenuacijskih relacija procjenjuju vjerojatnosti premašivanja pojedinih parametara trešnje tla (obično vršne akceleracije, PGA) na lokaciji tijekom zadanoga referentnog razdoblja. Pri tome se razmatraju i sve pridružene nepouzdanosti. To je moguće napraviti preko integrala hazarda, ili npr. generiranjem sintetičkih kataloga potresa stohastičkim (Monte-Carlo) postupkom.

Oba pristupa za veću pouzdanost trebaju što potpunije podatke o potresima, geologiji, tektonici, karakteristikama sredstva u kojem se rasprostiru seizmički valovi, odnosno zakonitosti smanjivanja jačine trešnje s povećanjem udaljenosti od seizmičkog izvora. Navedeni se postupci (DSHA i PSHA) u principu mogu odnositi na bilo koju prirodnu ugrozu povezanu s potresima – trešnju tla, klizišta, likvefakciju ili npr. tsunami.

Karte seizmičkog hazarda često se nazivaju i **seizmološke karte**. Koriste se u planiranju i projektiranju gradnje na seizmički aktivnim područjima. Izračun seizmičkog hazarda za takve se namjene provodi redovito probabilističkim pristupom. Metodologiju je prvi definirao 1968. g. Cornell [38], široko je primijenjena i nadograđena [39]–[41].

Važna početna pretpostavka je da su potresi u nekom seizmičkom izvoru međusobno neovisni, oni su slučajni događaji u vremenu te se zato mogu opisati Poissonovom razdiobom.

Vrlo značajna veličina u vjerojatnosnom pristupu određivanja pojave potresa jest **povratno razdoblje**. To je srednji razmak, najčešće iskazan u godinama, između dva sukcesivna premašaja određene vrijednosti neke veličine (npr. horizontalne akceleracije oscilacija tla pri potresu) tijekom vrlo dugačkog razdoblja. Ekvivalentno je reći da je povratno razdoblje recipročna vrijednost godišnje učestalosti premašaja te vrijednosti.

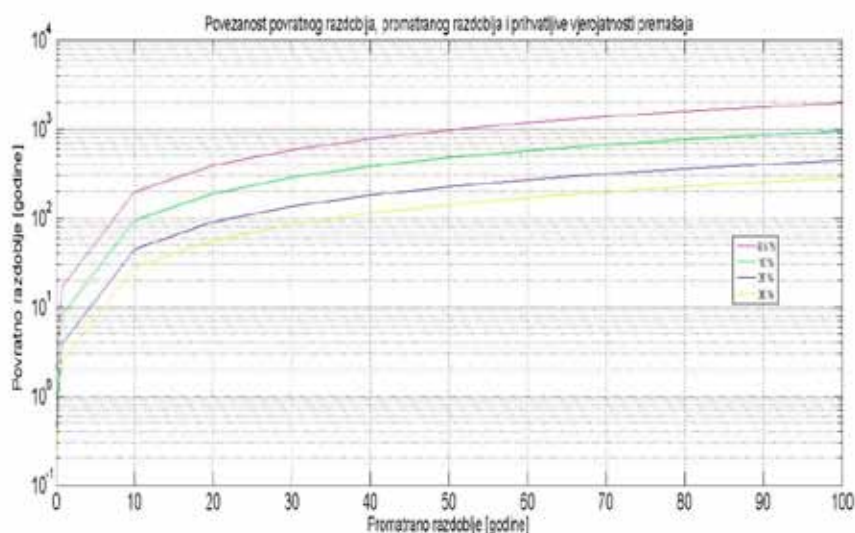
Iz takve definicije može se izvesti vrlo važna relacija

$$P_t = 1 - e^{-t/T} \quad (3)$$

gdje je: P_t - vjerojatnost za premašaj odabrane vrijednosti (npr. horizontalne akceleracije), t - vremenski interval (npr. eksploatacijski period nekog objekta), T – povratno razdoblje. Relacija (3) dakle iskazuje vjerojatnost (P_t) premašaja neke vrijednosti tijekom (bilo kojih) t godina, koja odgovara zadanom povratnom razdoblju (T).

Povratno se razdoblje često pogrešno interpretira kao očekivano vrijeme između dva uzastopna premašaja razmatranog parametra hazarda (npr. PGA). Prethodna definicija to jasno opovrgava. Relacija (3) pokazuje da povratno razdoblje nema neku „prognostičku“ vrijednost jer potresi u vremenu ne iskazuju nikakvu periodičnost.

Ako bismo koristeći gornju jednadžbu analizirali slučaj da vjerojatnost premašaja određene magnitude ili iznosa akceleracije potresa na nekoj lokaciji bude jednaka 10 %, a za duljinu promatranog (referentnog) vremenskog razdoblja uzmemo npr. 50 godina (vrijednost koja se često uzima kao ciljani eksploatacijski vijek običnih građevina), dobivamo povratno razdoblje T od 475 godina.



Slika 36. Krivulje povezanosti povratnog razdoblja, promatranog razdoblja eksploatacije i prihvatljivog rizika premašaja.

Duljina promatranog razdoblja vezana je dakle uz rizik koji smo voljni prihvatiti. Uz vjerojatnost premašaja od 10 % i promatrano vremensko razdoblje od primjerice 20 godina dobiva se povratno razdoblje od 190 godina. Na sl. 36. grafički su predložene krivulje povezanosti promatranih veličina.

7.2 Atenuacijske relacije – predviđanje gibanja tla

Potres koji je nastao u nekom seizmičkom izvoru generirat će trešnju odnosno gibanje tla koje će biti promjenjivo u ovisnosti o udaljenosti od izvora potresa. Predviđanje gibanja tla na nekoj udaljenosti od izvora potresa definira se **atenuacijskim relacijama**. One pokazuju koliko se neka promatrana veličina koja karakterizira potres (npr. akceleracija trešnje tla) mijenja s udaljenošću za određenu magnitudu (jačinu) potresa pri čemu se u obzir uzimaju i drugi parametri povezani s tipom tla, frekvencijom trešnje i detaljima potresnog izvora.

Kako su atenuacijska svojstva Zemljine kore različita u raznim područjima, tako je i primjena pojedinih atenuacijskih relacija ograničena na područja sličnih geoloških i seizmotektonskih svojstava.

Atenuacijske relacije se računaju na temelju empirijskih podataka, zapisa akceleroograma. Tek ako za neko područje postoji velik broj akceleroograma jakih potresa, moguće je izvesti i pouzdanu atenuacijsku relaciju.

7.3 Karta seizmičkog hazarda

Kao rezultat izračuna seizmičkog hazarda za zadano područje izrađuje se karta seizmičkog hazarda. Na njoj je prikazana odabrana veličina (npr. vršno ubrzanje tla, PGA) čiji se kartirani iznosi očekuju premašiti s vjerojatnošću koja odgovara odabranoj razini rizika u skladu s povratnim razdobljem za koje je karta napravljena. Karte se mogu odnositi na razinu osnovne stijene ili na površinu realnog tla.

7.4 Seizmičko mikrozoniranje

Rezultat računanja potresne opasnosti je vjerojatnost premašivanja određene vrijednosti, najčešće akceleracije, u određenom vremenskom razdoblju i obično se odnosi na razinu osnovne stijene (tlo tipa A prema Eurokodu 8). Građevine se nalaze na površini Zemlje, a „nivo osnovne stijene“ odvojen je od površine slojevima tla različitih debljina i karakteristika. Različita svojstva tla ispod površine utječu na karakteristike trešnje na površini Zemlje. Stoga je potrebno procijeniti kakav će utjecaj na trešnju na površini imati slojevi tla koji se nalaze ispod površine a iznad osnovne stijene.

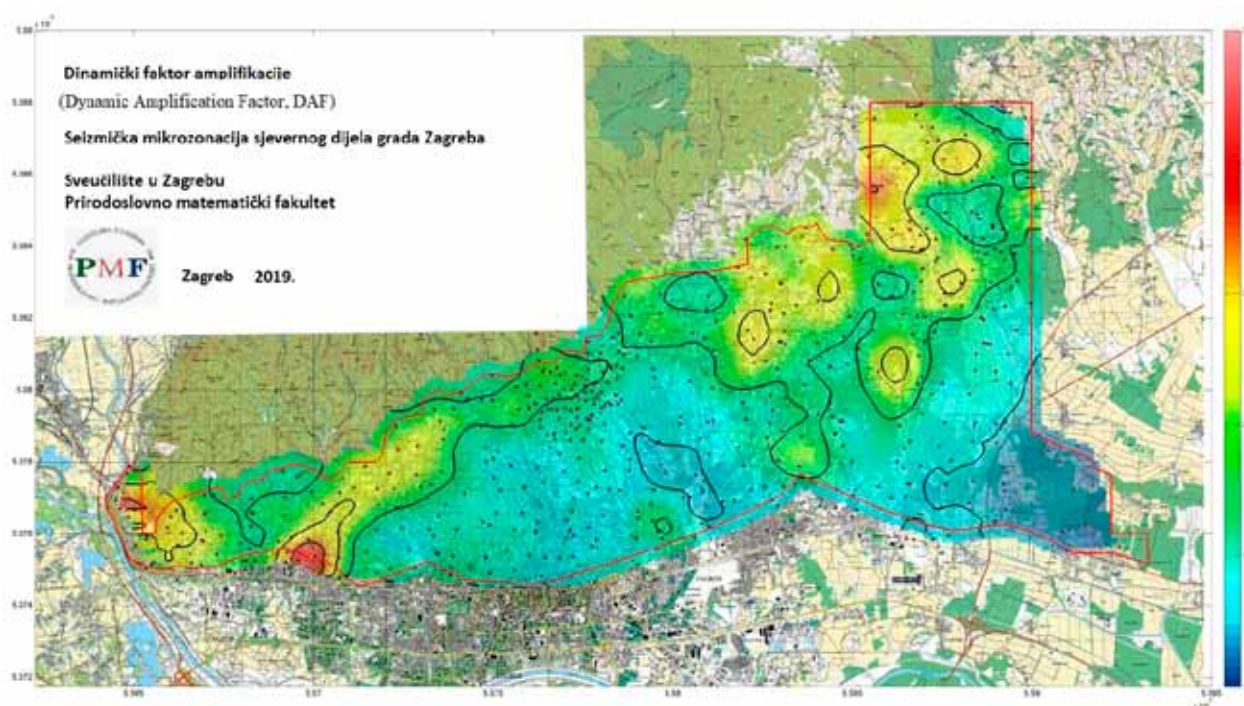
Seizmičko mikrozoniranje je postupak kartiranja područja koja se pri potresu slično ponašaju. To mogu npr. biti područja s jednakim pojačanjem vršne akceleracije, s istim osnovnim frekvencijama ili jednakim iznosom $v_{s,30}$. Podaci dobiveni mikrozoniranjem se koriste u planiranju

nju urbanih cjelina i ojačavanju posebno važnih građevina u ugroženim područjima, što znači da seizmičko mikrozoniranje omogućuje smanjenje rizika od potresa.

Na štete koje se mogu dogoditi na nekoj lokaciji utječu tri faktora: seizmički izvor sa stazom vala, lokalni uvjeti tla (seizmički hazard) te odziv građevina na pobudu potresom. U seizmičko mikrozoniranje ulazi računanje seizmičkog hazarda (opasnosti) na tlu tipa A i određivanje lokalnih uvjeta tla, makar se pod pojmom mikrozoniranja često misli samo na određivanje lokalnih uvjeta tla na širem području. Taj dio seizmičkog mikrozoniranja provodi se uglavnom metodama primijenjene geofizike koje se razlikuju po istraživanim parametrima, a posljedično i cijenom.

Određivanje lokalnih uvjeta tla najvažniji je posao seizmičkog mikrozoniranja. Izlazni parametri mogu biti kategorija tla prema važećoj normi, omjeri spektralnih amplituda na osnovnoj stijeni i površini, spektar odziva tla i faktor dinamičkog pojačanja (*Dynamic Amplification Factor*, DAF).

Seizmičko mikrozoniranje pokazat će prostornu razdiobu tipova tla na razmatranom području, pa posljedično npr. i koliki je očekivani prirast vršne horizontalne akceleracije (PGA) ili spektralne akceleracije na površini tla u odnosu na istu veličinu na osnovnoj stijeni ili kakva je prostorna razdioba dominantnog perioda tla na kojemu se očekuje najveća amplifikacija.



Slika 37. Faktor dinamičkog pojačanja (Dynamic Amplification Factor, DAF) [42].

Spomenute će veličine biti objašnjene u nastavku.

7.4.1 Lokalni uvjeti tla

Kao što je objašnjeno ranije, potresna otpornost neke građevine ovisi o više čimbenika koji su međusobno povezani. Oscilacije površinskog sloja, na kojima se nalazi promatrana građevina, ovise o lokalnim karakteristikama tla. Različita

geološka svojstva (ponajprije krutost i debljina potpovršinskih slojeva) uzrokuju različito manifestiranje seizmičkih valova te utječu na jačinu trešnje. Tako se oscilacije površine tla u odnosu na razinu osnovne stijene zbog navedenih čimbenika mogu pojačati, pa čestice na površini mogu oscilirati (tresti se) jače od čestica na osnovnoj stijeni. Ta se pojava naziva **amplifikacija** (pojačanje trešnje) i jedno je od važnijih dinamičkih svojstava tla.

Tablica 3. Tipovi tla prema Eurokodu 8

Tip tla	Opis stratigrafskog profila	Parametri		
		$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (udara/30 cm)	c_u (kPa)
A	Stijena ili druga geološka formacija poput stijene uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini	>800	–	–
B	Nanosi vrlo gustog pijeska, šljunka ili vrlo krute gline, debljine najmanje nekoliko desetaka metara, s postupnim povećanjem mehaničkih svojstava s dubinom	360 – 800	>50	> 250
C	Duboki nanosi gustog ili srednje gustog pijeska, šljunka ili krute gline debljine od nekoliko desetaka metara do više stotina metara	180 – 360	15 – 50	70-250
D	Nanosi rahlog do srednje zbijenog nekoherentnog tla (s nešto mekih koherentnih slojeva ili bez njih), ili pretežno meko do dobro koherentno tlo	< 180	< 15	< 70
E	Profil tla koja se sastoji od površinskog aluvijskog sloja s vrijednostima v_s za tipove C ili D i debljinom između 5 i 20 m ispod kojeg je krući materijal s $v_s > 800$ m/s			
S_1	Nanosi koji se sastoje od, ili sadrže, sloj debljine najmanje 10 m mekih glina/praha s velikim indeksom plastičnosti ($PI > 40$) i velikim sadržajem vode	< 100 (približno)	–	10 – 20
S_2	Nanosi tla podložnih likvefakciji, osjetljivih glina ili svaki drugi profil tla koji nije obuhvaćen tipovima A do E ili S_1			

Eurokod 8 [43] razlikuje tipove tla primarno na temelju prosječne brzine transversalnih valova u sloju od površine do dubine od 30 metara ($v_{s,30}$). Iz tablice 3. je vidljivo da tip tla A karakterizira velika krutost i velika brzina rasprostiranja seizmičkih valova ($v_{s,30} > 800$ m/s). To je referentan tip tla pa u njemu amplifikacija po definiciji ne postoji.

Brzine propagacije seizmičkih valova najtočnije se mjere sondiranjem u bušotinama, metodama seizmičke tomografije u bušotinama (eng. *crosshole* i *downhole* metodama), no te su metode zbog bušenja skupe. Jeftinija i stoga masovnije primjenjiva mjerenja (od mjerenja u bušotinama) su geofizičke metode kao što su seizmička refrakcija i refleksija, analiza površinskih valova (MASW), geoelektrično profiliranje i metoda koja se bazira na mjerenju mikroseizmičkog nemira, tzv. HVSR metoda [44].

Mikroseizmički nemir su stalno prisutne oscilacije Zemljine površine uzrokovane prirodnim uzrocima (vjetar, plima i oseka i dr.) te ljudskim djelovanjem (industrija, promet i dr.).

Mjeri se seizmološkim instrumentima, jednako kao i potresi, često se koristi kao izvor pobude jer je uvijek prisutan.

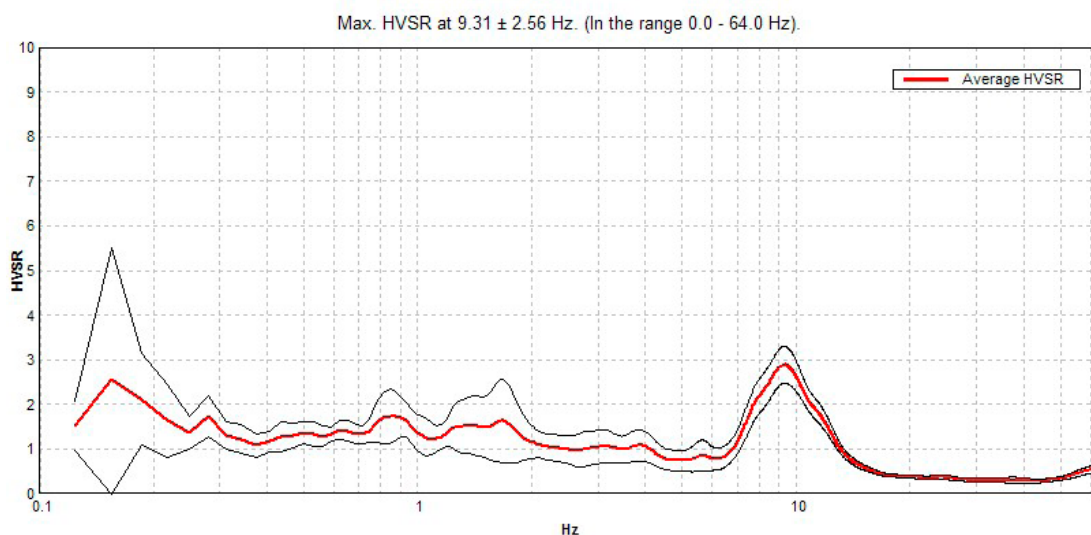
Nelinearno ponašanje tla značajno mijenja rezultatno gibanje površine tla kod jake i dugotrajne pobude (npr. snažan blizi potres), pri čemu slojevi primaju velike količine energije. Faktor dinamičkog pojačanja (DAF) se tada smanjuje, ali rastu amplitude pomaka i brzine te mogućnost pojave likvefakcije.

7.4.2. Metoda omjera horizontalnog i vertikalnog spektra (HVSR)

Nakamura je 1989. g. predložio metodu omjera horizontalno-vertikalnog spektra (HVSR ili H/V metoda) [44] i od tada se ona naširoko koristi za mikrozonaciju i procjenu lokalnih uvjeta tla (npr. [45]–[49]). Postupak se bazira na analizi mikroseizmičkog nemira i izračunu omjera njegovog horizontalnog i vertikalnog spektra: prvi signifikantni maksimum u HVSR krivulji odražava temeljnu frekvenciju tla, ako postoji dovoljno visok kontrast impedancije između sedimenata i

stijena. Ova je metoda jednostavan i ekonomičan način za procjenu rezonantne (fundamentalne) **frekvencije tla**, iako ne postoji konsenzus o teorijskim osnovama metode (npr. [50]).

Na temelju izmjerenih vlastitih frekvencija tla u istoj je analizi često moguće odrediti i debljine sedimenata iznad osnovne stijene.



Slika 38. HVSr spektralni graf na površini tla lokacije na Braču [51].

7.5 Dinamički parametri građevine

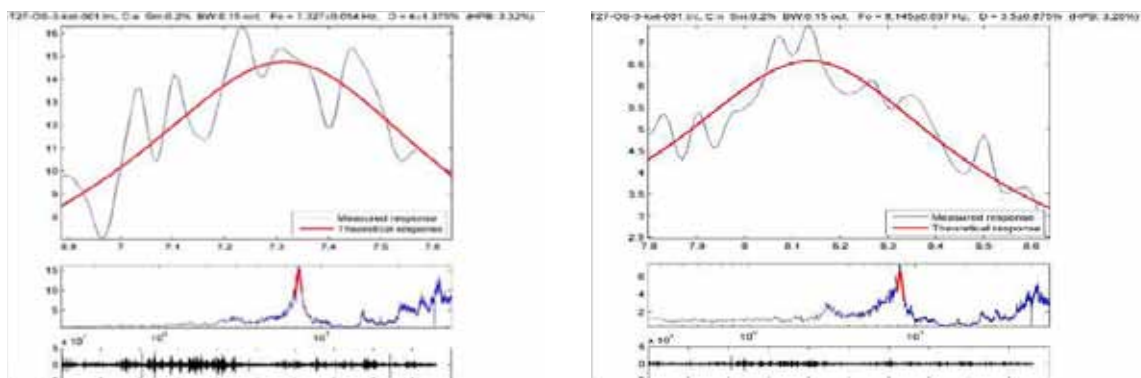
Ponašanje građevine podvrgnute dinamičkom opterećenju obično se opisuje dinamičkim parametrima: frekvencijama osnovnog i viših modova titranja, odgovarajućim koeficijentima prigušenja i modalnim oblicima. Dinamičko opterećenje predstavlja promjenu opterećenja u vremenu, a izvor tog opterećenja su sile koje nastaju zbog ljudske aktivnosti kao i zbog djelovanja prirodnih sila, vjetera, eksplozija i potresa koji djeluju na strukturu. Jaki potresi imaju najrazornije posljedice: od lakih strukturnih oštećenja do potpunog urušavanja konstrukcije. Strukturna oštećenja mogu biti posebno teška kada je **vlastita frekvencija strukture** blizu vlastite frekvencije tla zbog vrlo efikasnog rezonantnog prijenosa energije s tla na zgradu.

Na moguću pojavu rezonancije valja obratiti pozornost prilikom planiranja i projektiranja gradnje uzimajući u obzir vlastitu frekvenciju tla na kojem se planira gradnja, procijenjenu vrijednost vlastitih frekvencija buduće građevine te očekivan spektralni sastav potresne pobude.

7.5.1 Rezonancija između građevina i tla

Za postojeće građevine moguće je identificirati one koje su u opasnosti od rezonancije u slučaju potresa kako bi ih se učinilo otpornijima na efekte potresa te smanjilo njihovu ranjivost. To je najučinkovitija strategija prevencije za postojeće zgrade, jer omogućuje zaštitu objekata i ljudi uz minimalne troškove. Štoviše, procjene dinamičkih parametara zgrade vrlo su važne i za praćenje stanja zgrade; kada su parametri građevine poznati u neoštećenom stanju, tada se varijacije tih parametara mogu koristiti kao pokazatelj promjene strukturnog integriteta zgrade (npr. zbog rekonstrukcije ili zbog strukturnih oštećenja uzrokovanih potresom i/ili prirodnom degradacijom materijala). Praćenje se može provesti stalnim ili povremenim mjerenjima. To se posebno odnosi na praćenje osnovne i viših frekvencija zgrade.

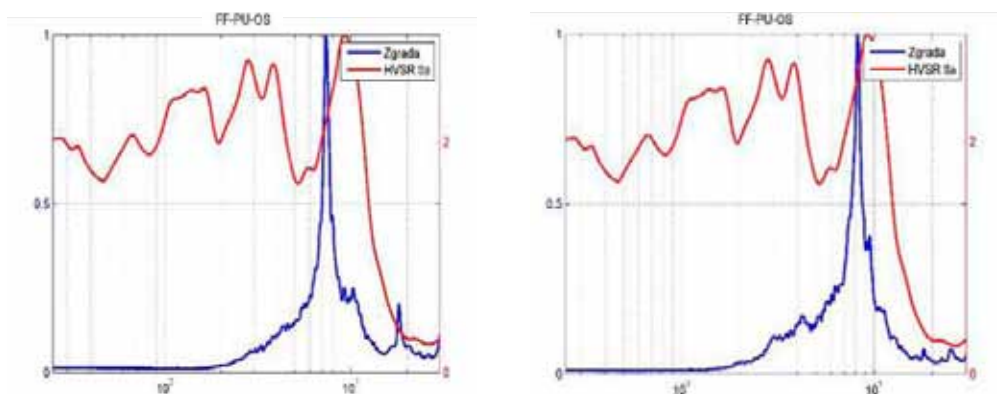
Općenito, najbolja metoda za procjenu dinamičkih parametara zgrade je bilježiti njezin odziv na gibanje tla uslijed potresa. Međutim, to zahtijeva trajno instrumentalno praćenje građevine kako bi se zabilježilo gibanje strukture tijekom potresnog opterećenja, a takva su mjerenja dugotrajna i skupa.



Slika 39. Uzdužna i poprečna komponenta osciliranja zgrade na Braču [51].

Opasnost rezonancije između tla i građevine uslijed potresa procjenjuje se usporedbom krivulje standardnog spektralnog omjera zgrade (SSR) i krivulje „free-field” HVSR mjerenja u blizini objekta [52]–[54]. Pri tome je SSR jednak omjeru horizontalne komponente vibracije

zgrade i iste te komponente pobudnoga signala, tj. mikroseizmičkog nemira izvan zgrade. Kako bi se pouzdano procijenila opasnost rezonancije, koriste se različiti definirani kriteriji o tome koliko blizu trebaju biti vlastite frekvencije zgrade i temeljnoga tla.



Slika 40. Korigirani spektar oscilacija zgrade i HVSR krivulje okolnog tla na Braču [51].

Slika 40 prikazuje Fourieov spektar mikroseizmičkog nemira zgrade korigiran signalom pobude (plava linija) i HVSR okolnog tla (crvene linije) za uzdužnu (lijevo) i poprečnu (desno) komponentu osciliranja zgrade. Na osi apscisa prikazana je frekvencija, lijeva ordinata prikazuje spektar zgrade normiran na maksimalnu amplitudu, dočim desna os ordinate prikazuje vrijednosti HVSR-a. Uočava se da je šiljak poprečne komponente (maksimum krivulje) frekvencije zgrade vrlo blizu vlastitoj frekvenciji tla pa je vjerojatnost pojave rezonancije zgrade i tla relativno velika.

7.5.2 Djelovanje potresa na građevine

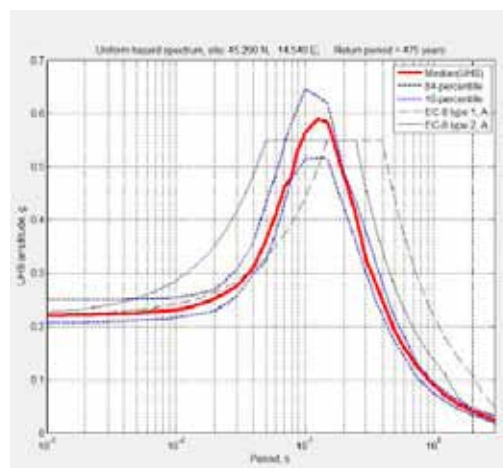
Utjecaj potresa na zgrade ili druge važne građevinske strukture (mostove, vijadukte, ...) ispituje se, analitički izračunava prilikom planiranja i projektiranja njihove gradnje i/ili prilikom provjere zadovoljavaju li već postojeći objekti postavljene protupotresne (aseizmičke) kriterije. Razmatra se kako će se promatrana konstrukcija ponašati u nekom „očekivanom“ potresu, potresu kakav se već događao na promatranom prostoru ili se procjenjuje da bi se mogao dogoditi. Promatraju se svojstva konstrukcija (nosivost, duk-

tilnost, krutost, ...) u kontekstu da pri potresnom djelovanju, dakle dinamičkom gibanju, podnesu seizmičke sile koje tada na njih djeluju. Sile su, osim svojstvima samih građevina, karakterizirane parametrima trešnje (primarno akceleracijom trešnje – sila koja djeluje na neku masu je prema Newtonovom zakonu direktno proporcionalna akceleraciji trešnje kojoj je ona izložena). Konstrukcija će se dakle pri potresu gibati načinom koji je karakteriziran i svojstvima same konstrukcije i svojstvima (parametrima) trešnje. Osim zahtjeva koji se postavljaju u stanju mirovanja (nosivosti i sl.), strukture moraju biti dovoljno elastične da izdrže trešnju (ljuljanje) i vrate se u početni položaj, početno stanje. Deformacije, u opsegu prihvatljivom u smislu izostanka strukturnih oštećenja, moraju biti ograničene, a konstrukcija mora biti sposobna potrošiti energiju (koju apsorbira iz potresa). Za takve procjene matematički se modelira odziv konstrukcije na potresnu trešnju. U tom se dijelu najviše spajaju seizmologija i građevinarstvo. U građevinarstvu su definirane brojne metode za analizu ponašanja konstrukcija kada su izložene seizmičkim silama (npr. metoda spektra kapaciteta, metoda „postupnog guranja“ i dr.). Polazni parametri, odnosno modeli u takvim proračunima, definiraju se u kontekstu seizmologije.

Spektar odziva (engl. *response spectrum*) ili **spektar odgovora** osnovno je polazište u analizi građevina pri potresnoj pobudi. Spektri odziva mogu biti spektri akceleracije, brzine ili pomaka. Osnovni pristup izračuna spektara odziva se temelji na zapisu potresa na promatranoj lokaciji (akcelerogramu). Akcelerogram je trokomponentni vremenski niz izmjerenih akceleracija za vrijeme trajanja potresa na nekoj lokaciji. Najjednostavniji model pretpostavlja da je građevina jednostavan fizikalni sustav, harmonički oscilator s jednim stupnjem slobode. Njega onda karakteriziraju dominantno njegov vlastiti period i koeficijent (faktor) prigušenja. Pretpostavlja se također da nema nelinearnosti (odstupanja iz područja linearnosti, što u stvarnoj praksi nije slučaj). Za odabranu vlastitu frekvenciju (ili period) dinamičkom analizom vrši se izračun maksimalnog odziva idealizirane građevine (oscilatora s jednim stupnjem slobode) na zadanu pobudu (akcelerogram). Postupak se ponavlja

za sve frekvencije od interesa. Izračun se obično vrši za različite vrijednosti faktora prigušenja, a najčešće se uzima 5% kritičnog prigušenja. Isti je princip i metodologija računanja spektara odziva brzine ili pomaka.

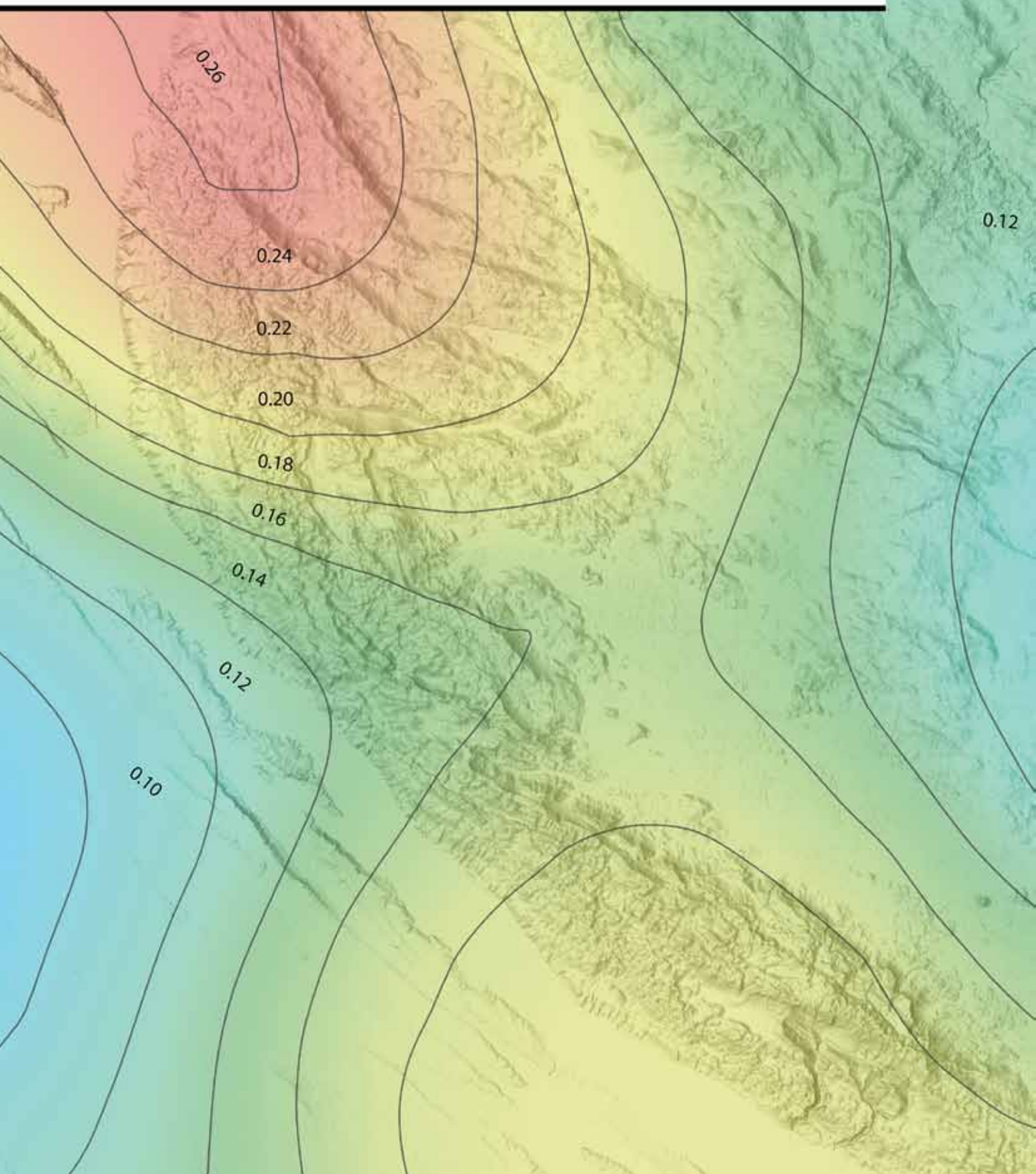
Spektri ujednačenog hazarda (engl. UHS, *uniform hazard spectra*) definiraju se pak za neku istraživanu lokaciju probabilistički, uzimajući u obzir sve potrese unutar promatranog područja kakvi se mogu dogoditi i atenuacijske relacije (vidi poglavlje 7.2). UHS spektri rezultat su dakle postupka procjene seizmičkog hazarda, posve ekvivalentno, primjerice, slučaju iskazivanja potresne opasnosti vršnom horizontalnom akceleracijom (PGA).



Slika 41. UHS spektar lokacije na Krku. Spektri ujednačenog hazarda (uniform hazard spectra, UHS) za povratno razdoblje od 475 godina. Crveno: medijan UHS; Plavo crtkano: 84. i 16. percentil; Crno, crtkano: Elastični spektar odziva, tip 1 za tlo tipa A, prema Eurokodu 8; Crno, puna linija: Elastični spektar odziva, tip 2 za tlo tipa A, prema Eurokodu 8.

Važno je napomenuti da je potrebno biti vrlo oprezan pri usporedbi različitih spektara. Usporedba klasičnih spektara odziva i UHS spektara nije korektna.

8. Karte potresnih područja Republike Hrvatske

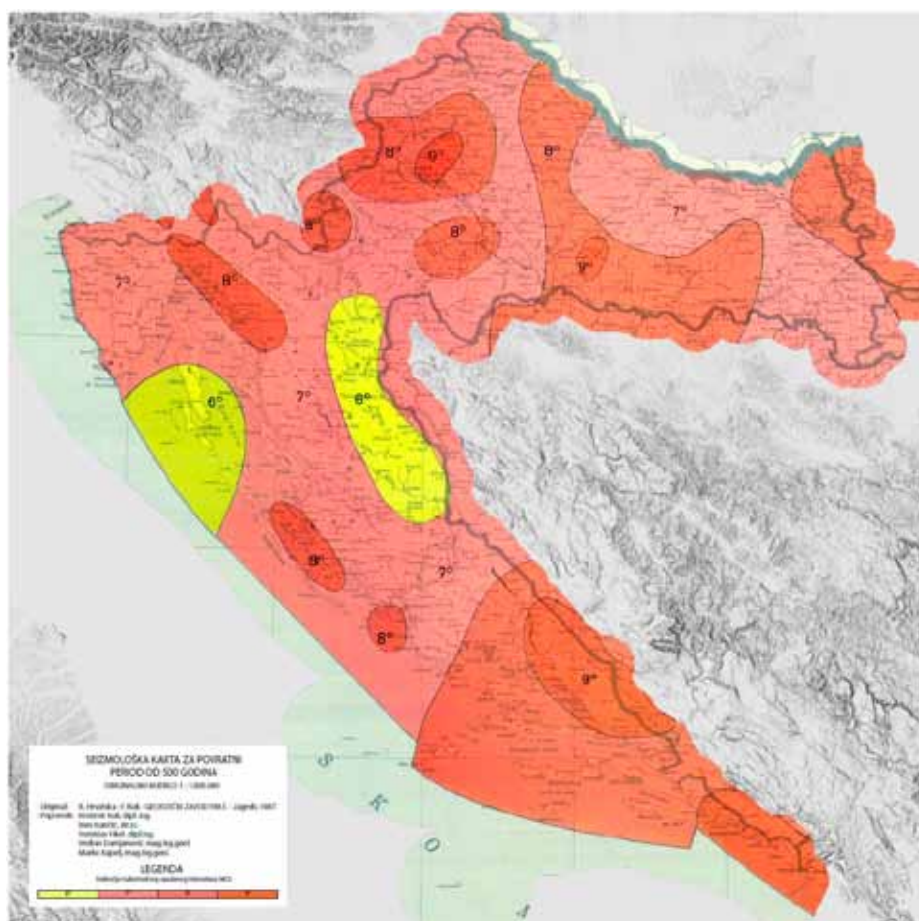


8.1 Povijesni pregled

8.1.1 Seizmološka karta iz 1987. godine

Katastrofalni Skopski potres 1963. godine predstavlja prekretnicu pri korištenju seizmičkih parametara u graditeljstvu u bivšoj državi. Od tada se u projektiranju i gradnji kroz zakonsku regulativu nameću obveze projektantima i graditeljima da u proračune stabilnosti konstrukcija uključuju i parametre seizmičkih sila koje djeluju na konstrukcije tijekom gibanja tla za potresa. Isprva su to samo smjernice s osnovnim naputcima o korištenju otpornijih građevinskih elemenata i materijala koje su do današnjih dana, kroz europsku zakonsku regulativu, prerasle u detaljne i precizne opise metoda i formula za složene proračune seizmičke otpornosti građevina. Seizmološke karte iz starijih vremena prikazivale su u pravilu maksimalne intenzitete potresa bazirajući

se samo na empirijskim podacima. Prve probabilističke seizmološke karte izradio je V. Kuk 1987. godine (Geofizički zavod PMF-a u Zagrebu) [55]. Bile su to karte za područje Hrvatske, kao dio karata za područje Jugoslavije, a činio ih je set od šest karata za povratna razdoblja od 50, 100, 200, 500, 1000 i 10000 godina. Karta za povratni period 500 godina uzeta je kasnije kao reprezentant povratnog perioda 475 godina koji odgovara vjerojatnosti premašivanja od 10% i eksploatacijskom razdoblju 50 godina, što se često uzima kao srednji životni vijek stambenog objekta u Europi. Kao takva, karta je postala i dio propisa o gradnji u Hrvatskoj. Karte su izrađene korištenjem Gumbelove treće distribucije teorije ekstrema [56] uz Jenkinsonov pristup [57].



Slika 42. Seizmološka karta iz 1987.

Kod korištenja te karte u projektiranju u graditeljstvu problem je, kao i uvijek kada se seizmička sila iskazuje kroz intenzitet potresa, što je veza tih dviju veličina slaba i nije jednoznačna. Taj je problem bio riješen tabličnim prikazom u propisima o gradnji, tzv. koeficijenta seizmičkog intenziteta K_s koji ulazi direktno u proračun ukupne horizontalne sile na konstrukciju. Ta je karta bila prilog Pravilniku o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima u bivšoj državi, pa kasnije i u Republici Hrvatskoj, sve do 2012. godine, od kada prema europskoj zakonskoj regulativi prilog odgovarajućoj normi koja regulira protu-potresnu gradnju mora biti karta ubrzanja, a ne intenziteta potresa.

Važno je naglasiti da se ova karta, iako ju se još uvijek povremeno konzultira, više ne smije koristiti!

8.2 Hrvatska seizmološka karta 2011.

8.2.1 Izrada Karte potresnih područja Republike Hrvatske (2011)

Kartu potresnih područja Republike Hrvatske [58] izradio je prof. dr. sc. Marijan Herak sa suradnicima s Geofizičkog odsjeka PMF-a u Zagrebu uz suradnju Hrvatskog zavoda za norme, na temelju analize seizmoloških podataka do 2010. godine (za više od 50.000 potresa u Hrvatskoj i susjednim područjima).

Karte potresne opasnosti (hazarda) za povratno razdoblje 95 godina (slika 45) i 475 godina (slika 44) su s tumačem (Dodatak C) (Prilog 4) sastavni dio Nacionalnog dodatka HRN EN 1998-1:2011/NA:2011, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade [59]. Karta je u skladu s trenutnim europskim propisima koji se temelje na vršnoj akceleraciji tla tijekom potresa. Ubrzanja tla izražena su u jedinicama akceleracije sile teže (g).

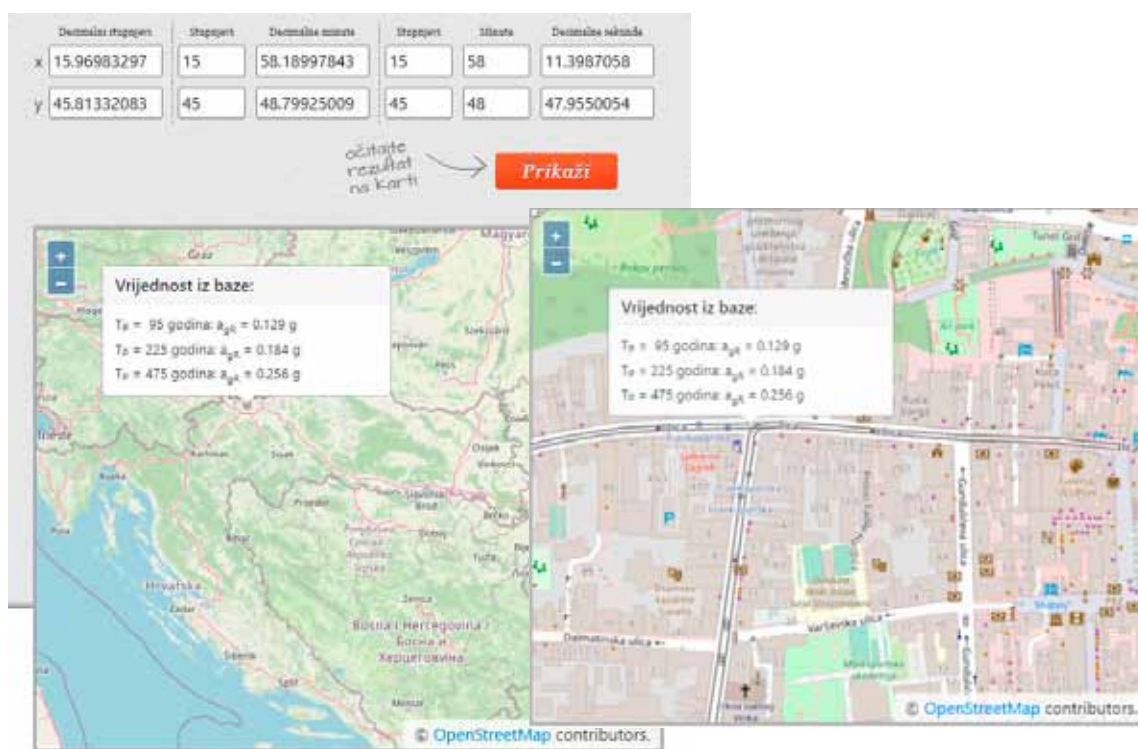
8.2.2 Aplikacija za očitavanje Karte potresnih područja Republike Hrvatske

Aplikacija na stranici Geofizičkog odsjeka PMF-a: <http://seizkarta.gfz.hr/> omogućuje očitavanje iznosa horizontalnih vršnih ubrzanja tla tipa A (a_{gR}) za povratna razdoblja od $T_p = 95, 225$ i 475 godina izraženih u jedinicama gravitacijskog ubrzanja ($1\text{ g} = 9.81\text{ m/s}^2$) [60]. Za projektiranje valja očitavanja potvrditi uvidom u karte, koje su s tumačem dostupne za preuzimanje u PDF formatu u punoj rezoluciji.

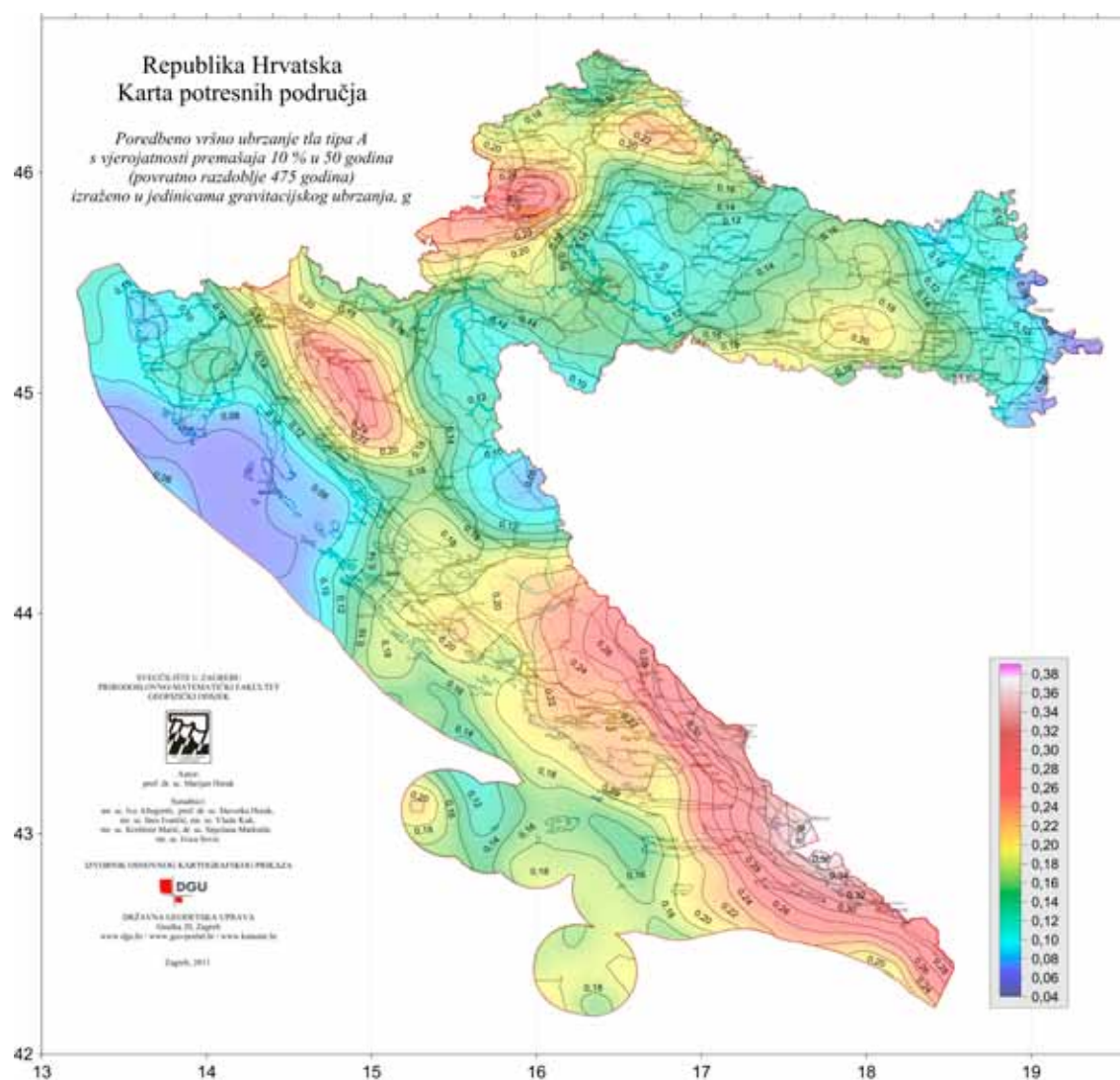
Primjer

Pomoću aplikacije na stranici Geofizičkog odsjeka PMF-a može se npr. za lokaciju na raskršću Frankopanske ulice i Ilice u Zagrebu (slika 43) očitati potresom prouzročeno horizontalno poredbeno vršno ubrzanje 0.256 g (u jedinicama gravitacijskog ubrzanja g) na osnovnoj stijeni čiji se premašaj tijekom bilo kojih 50 godina očekuje s vjerojatnošću od 10 % (što odgovara poredbenom povratnom razdoblju potresa od 475 godina), odnosno horizontalno poredbeno vršno ubrzanje 0.129 g na osnovnoj stijeni čiji se premašaj tijekom bilo kojih 10 godina očekuje s vjerojatnošću od 10 % (tj. poredbeno povratno razdoblje potresa od 95 godina).

Nužno je napomenuti da kod projektiranja valja voditi računa da se vrijednosti na spomenutoj karti odnose na osnovnu stijenu (tlo tipa A), a od osnovne stijene do površine tla često se nalaze slojevi koji mogu i višestruko pojačati učinke određene za osnovnu stijenu. Zato je, ovisno o vrsti lokalnog tla, potrebno u obzir uzeti spektralnu amplifikaciju. Dakle, za korištenje karata potrebno je ili provesti mikroseizmičko zoniranje većeg područja, ili za svaki pojedini slučaj posebnom studijom odrediti tip tla na gradilištu.

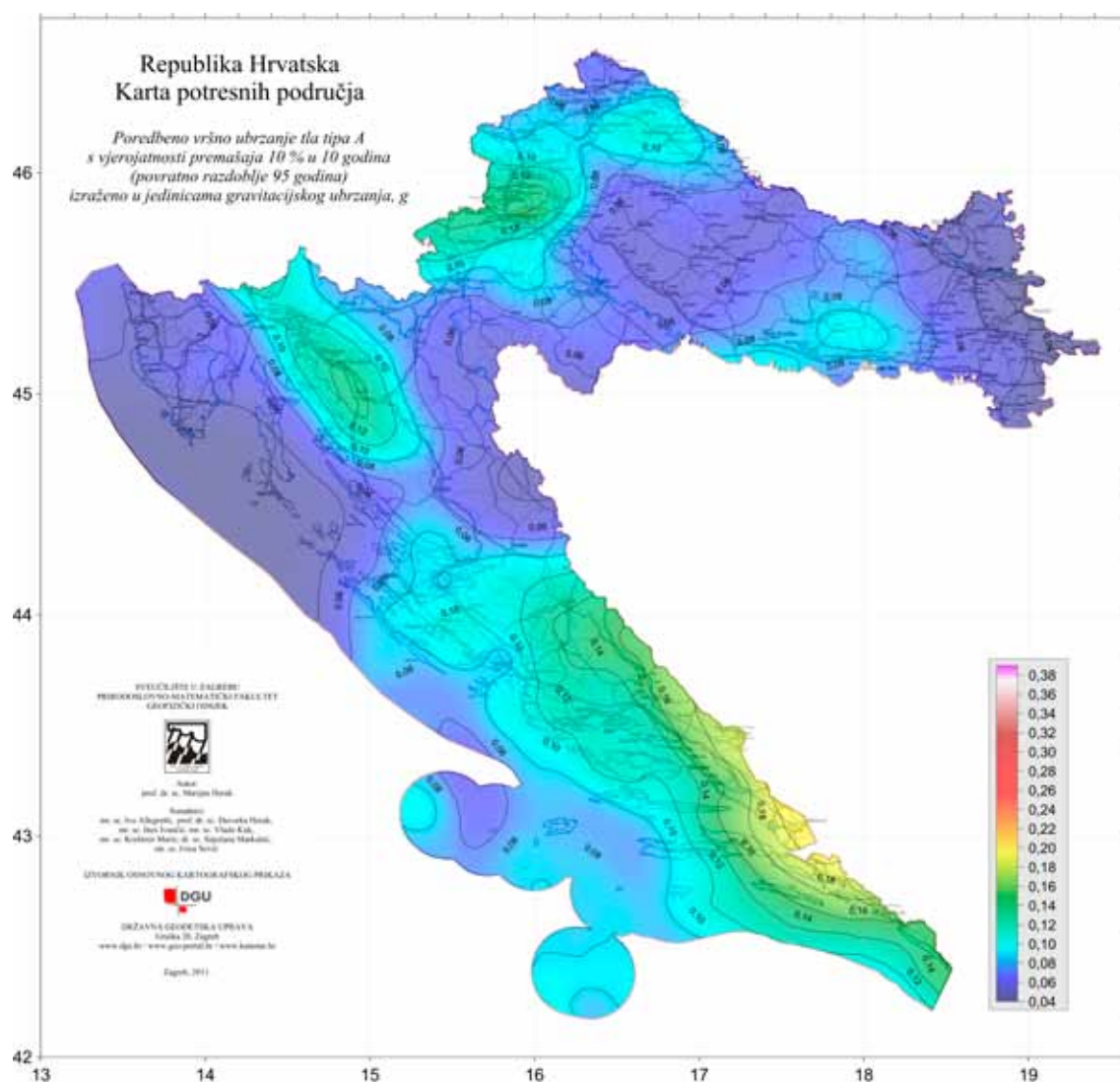


Slika 43. Primjer očitavanja iznosa horizontalnih vršnih ubrzanja tla tipa A (a_{gR}) za povratna razdoblja od $T_p = 95$, 225 i 475 godina izraženih u jedinicama gravitacijskog ubrzanja ($1\text{ g} = 9.81\text{ m/s}^2$) na raskršću Frankopanske ulice i Ilice u Zagrebu s aplikacije na stranici Geofizickog odsjeka PMF-a: <http://seizkarta.gfz.hr/> [59].



Slika 44. Karta potresnih područja Republike Hrvatske za poredbena vršna ubrzanja temeljnog tla a_{gR} za temeljno tlo tipa A, s vjerojatnosti premašaja 10 % u 50 godina, za poredbeno povratno razdoblje potresa $T_{NCR} = 475$ godina, u jedinicama gravitacijskog ubrzanja g. [58].

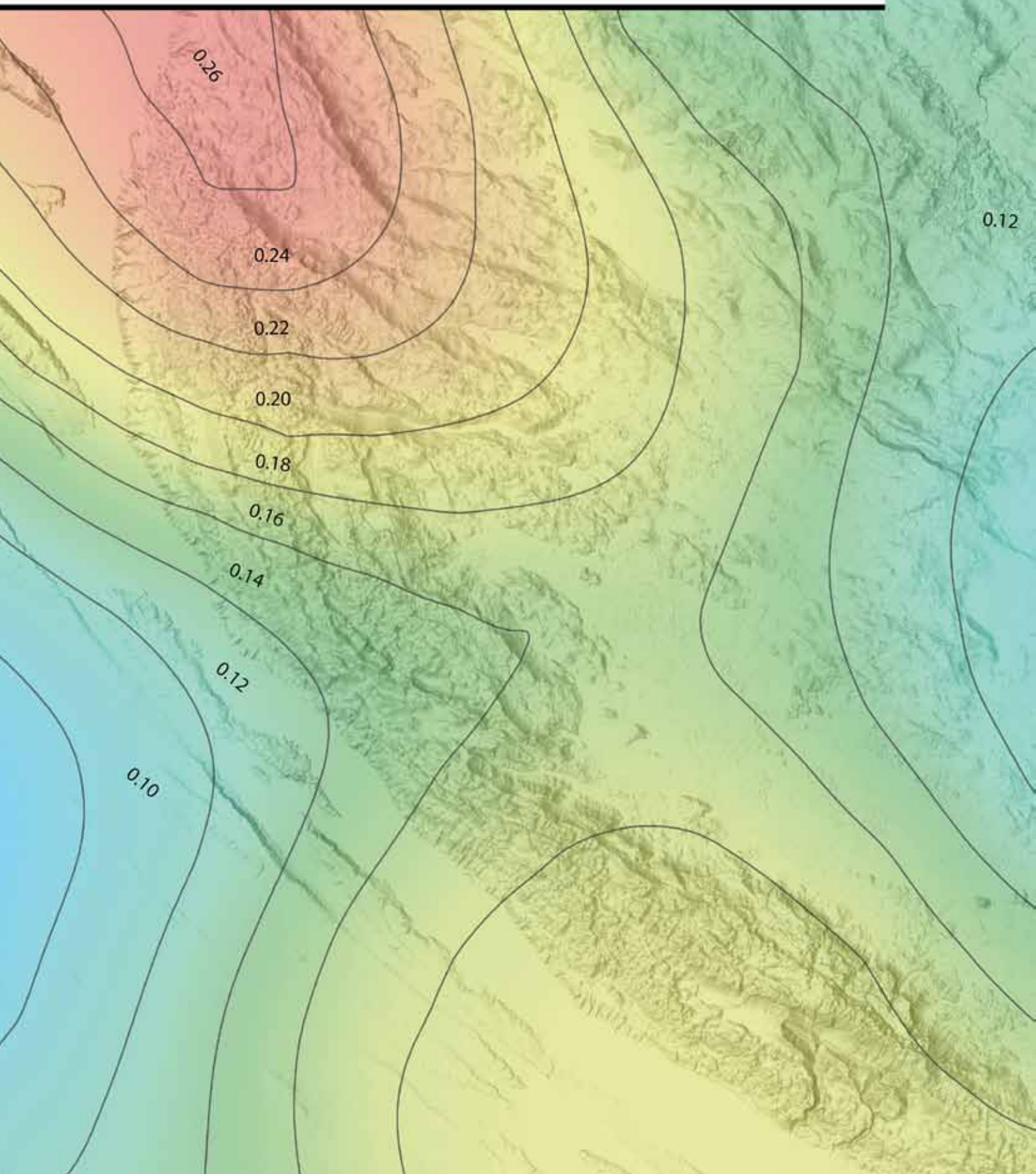
NAPOMENA: Ova karta ne smije se upotrebljavati za očitavanje iznosa ubrzanja. Za to se mora upotrijebiti izvornik u mjerilu približno 1:800 000.



Slika 45. Karta potresnih područja Republike Hrvatske za poredbena vršna ubrzanja temeljnog tla a_{gR} za temeljno tlo tipa A, s vjerojatnosti premašaja 10 % u 10 godina, za poredbeno povratno razdoblje potresa $T = 95$ godina, u jedinicama gravitacijskog ubrzanja g. [58].

NAPOMENA: Ova karta ne smije se upotrebljavati za očitavanje iznosa ubrzanja. Za to se mora upotrijebiti izvornik u mjerilu približno 1:800 000.

9. Upotreba seizmoloških podataka



Seizmološki podaci dobivaju se kao konačni produkt svih seizmoloških istraživanja odnosno svih aktivnosti koje se provode u seizmologiji. Stoga bi naslov ove cjeline mogao glasiti i korištenje rezultata seizmoloških istraživanja.

Dvije su osnovne grupe seizmoloških istraživanja. Prva su znanstvena i stručna istraživanja temeljnih fizikalnih značajki unutrašnjosti Zemlje te pojava koje su s time povezane (potresi, vulkani, tsunamiji i sl.). One su opisane u prethodnim poglavljima. Drugu vrstu čine istraživanja čiji se rezultati koriste u prostornom planiranju i projektiranju, odnosno istraživanja koja daju ulazne parametre za složene proračune dinamičkih odnosa interakcije u jedinstvenom sustavu temelj-tlo-konstrukcija.

Ako se seizmološka istraživanja i aktivnosti u svezi s gibanjima tla za potresa razmatraju u domeni vremena proteklog od trenutka nastanka potresa, mogu se razlučiti također dvije osnovne grupe: jedna je promptno reagiranje i djelovanje neposredno po nastanku potresa s ciljem informiranja nadležnih državnih službi i institucija o osnovnim parametrima potresa (vrijeme nastanka potresa, lokacija epicentra, dubina žarišta potresa, magnituda, intenzitet u epicentru potresa, osnovne značajke makroseizmičkog polja). Drugu predstavljaju naknadna istraživanja i različiti proračuni koji spadaju u osnovne rutinske seizmološke poslove i kada nema recentne (lokalne) seizmičke aktivnosti. Promptno reagiranje nakon potresa treba biti provedeno u što kraćem vremenu kako bi se na što opsežniji i brži način moglo aktivirati sve sustave zaštite i spašavanja (sustav hitne medicinske pomoći, sustav spašavanja stradalih u ruševinama, vatrogasna služba, građevinska mehanizacija, infrastrukturni sustav i dr.). Time se spašavanje i zaštita stradalih čine funkcionalnijima, odnosno efikasnost u tzv. „zlatnom satu“ (engl. *golden hour* – predstavlja vrijeme u kojem je za različite službe broj spašenih maksimalan) je najveća.

Prema propisima o gradnji, kod proračuna stabilnosti konstrukcija moraju se u obzir uzeti i seizmičke sile. Pri tome postoje dva osnovna pri-

stupa, ovisno o vrsti, odnosno tipu konstrukcije o kojoj se radi.

Za obične, standardne građevine, seizmička sila na konstrukciju računa se jednostavnim uvrštavanjem sa seizmološke karte očitano iznosa horizontalne akceleracije koja odgovara povratnom razdoblju 475 godina u odgovarajuće izraze navedene u normama za protupotresnu gradnju. Utjecaj lokalnog tla na amplifikaciju akceleracije uključuje se u proračun preko vrijednosti koeficijenta tipa tla koji je naveden u propisima.

Za najvažnije objekte, u Prilogu 1. označene kao građevine od posebnog značenja, provode se (među ostalim) i seizmološka i inženjersko-seizmološka istraživanja te određuju horizontalne akceleracije. Projektiranje odnosno gradnja na maksimalne vrijednosti akceleracije (one koje sigurno neće biti premašene) najskuplji je, ali i najsigurniji način gradnje. Projektne akceleracije računaju se za povratno razdoblje koji odgovara usvojenoj razini rizika i eksploatacijskom periodu prema relaciji 3. Često se uzima da je, kao i kod običnih objekata, povratno razdoblje 475 god., rizik 10% i eksploatacijski period 50 god., no to je stvar inženjerske odluke, odnosno kompromisa dvaju želja: da objekt bude otporan u odnosu na seizmičke sile (manja oštećenja su dopuštena ali konstruktivni elementi ne smiju biti oštećeni) ali i da cijena gradnje bude ekonomski prihvatljiva. Ako se tako definirane akceleracije odnose na nivo osnovne stijene, prema važećoj normi (Eurokod) to je tlo tipa A, odnosno vrijednosti brzine transverzalnih valova $v_{s,30} > 800$ m/s, konačne projektne vrijednosti akceleracija na površini ili nivou temeljenja dobivaju se množenjem faktorom dinamičkog pojačanja koji se određuje na osnovi fizikalnih značajki slojeva između osnovne stijene i površine, odnosno nivoa temeljenja. Uz seizmološka istraživanja, potrebno je dakle provesti i geofizičke i geomehaničke terenske radove, odnosno izvršiti istraživanja utjecaja lokalnog tla. Navedene akceleracije predstavljaju vršne akceleracije, no često je, s obzirom na dinamičke značajke konstrukcije, potrebno odrediti i očekivane spektre

odziva na vremenski niz akceleracija osciliranja tla za potresa.

Posebna vrsta seizmoloških istraživanja jest seizmički monitoring različitih infrastruktura. To mogu biti elektrane, brane, tvornice i drugi značajni industrijski objekti, ali i bolnice, katedrale te različiti kulturološki ili općenito objekti od posebnog značenja. Tu je potrebno razdijeliti vrstu, odnosno način monitoringa obzirom na zadane ciljeve. Jedan način jest postavljanje jednog ili više seizmoloških instrumenata na promatranu lokaciju (najčešće akcelerografa) s ciljem praćenja jačine trešnje (primjerice akceleracije trešnje) pri potresu. Instrumenti tada, kada jačina trešnje premaši unaprijed postavljeni prag trešnje, automatski zatvaraju plinovode, sustave u elektranama, izvore zračenja, promet u nekom tunelu, mostu, željezničkoj pruzi, zaustavljaju liftove i sl. U Prilogu 1. taj je način označen kao reagiranje na premašaj praga trešnje.

Drugi način, označen kao praćenje odziva objekata, podrazumijeva mjerenje i zapisivanje karakteristika trešnje tijekom potresa (najčešće akceleracije). Iz dobivenih se zapisa dobivaju spektri potresa, „frekventni sastavi potresa“ – koji prikazuju na kojim se frekvencijama oslobađa najviše energije, računaju vrijednosti dinamičkih i drugih parametara koji karakteriziraju promatranu građevinu i dr. Promjene dinamičkih parametara u vremenu upućuju na oštećenja objekata odnosno ukazuju na smanjenu otpornost prema budućim potresima. Ti su podaci izrazito značajni i za sve buduće građevinske zahvate na istraživanom objektu, obnovu, ojačanja i dr.

Takva instrumentalna seizmološka opažanja provode se kontinuirano na svega nekoliko lokacija (primjerice Knežev dvor i palača Sponza u Dubrovniku).

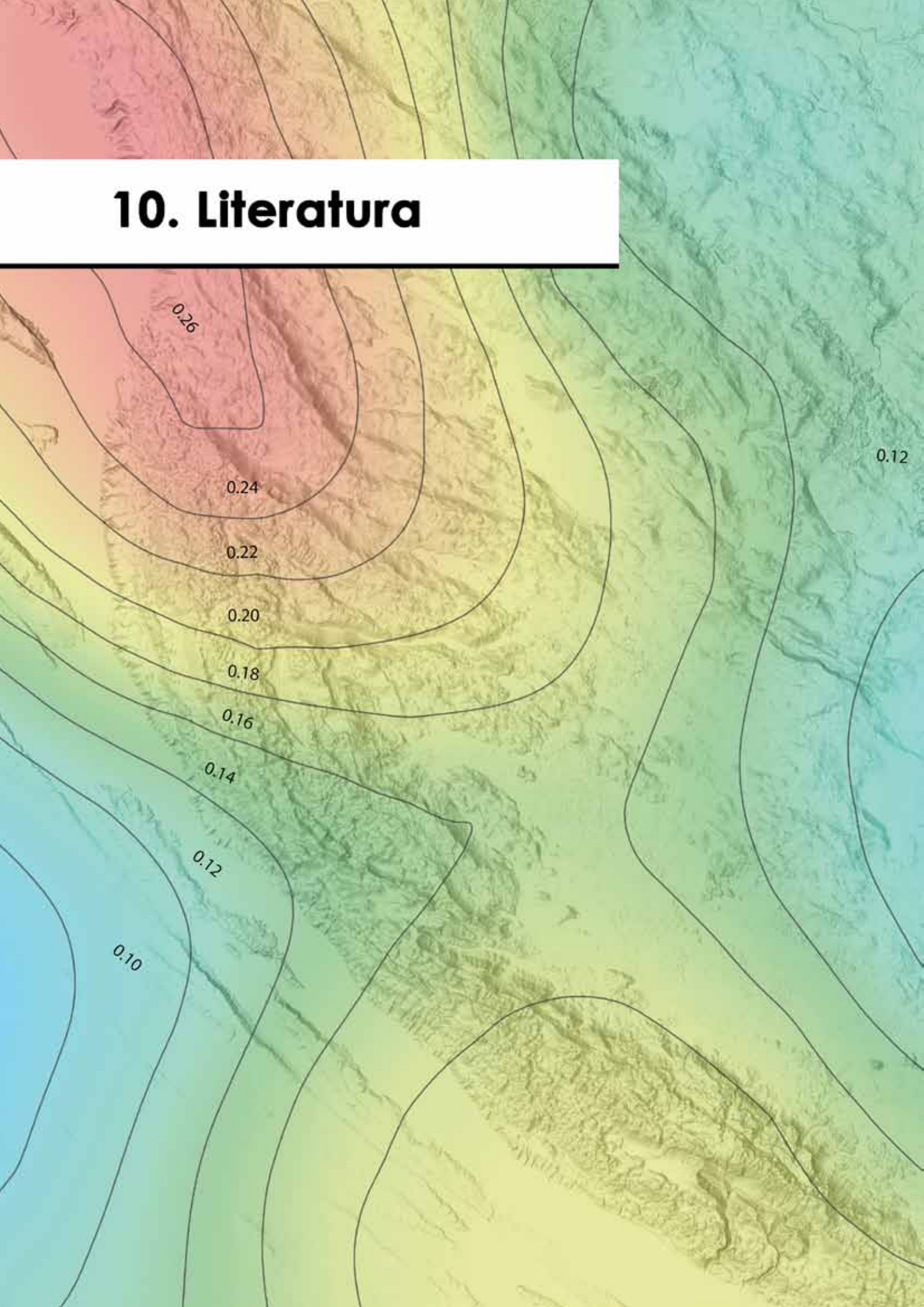
neracije Eurokodova, a nova inačica Eurokoda 8 će 2025. godine zamijeniti postojeću normu. Temeljni su ciljevi između ostaloga i pojednostavljenje primjene propisanih normi, ali i smanjenje opsega područja koje se ostavlja definirati na nacionalnim nivoima pojedinih država.

Stoga se i u Hrvatskoj u narednim godinama očekuje donošenje novih normi što podrazumijeva i izradu novih seizmoloških karata, koje je ionako periodički potrebno novelirati, a posljednje su, kao što je ranije navedeno, napravljene prije dvanaest godina.

9.1 Promjene u Eurokodovima

U Europskom se zakonodavstvu, kao i drugdje u svijetu, pokušava pratiti novije znanstvene spoznaje koje se nastoje periodički implementirati u protupotresno zakonodavstvo. S vremenom se također uočava i sve više nedostataka u postojećim normama koje se koriste. Europski tehnički odbor zadužen je za razvoj nove ge-

10. Literatura

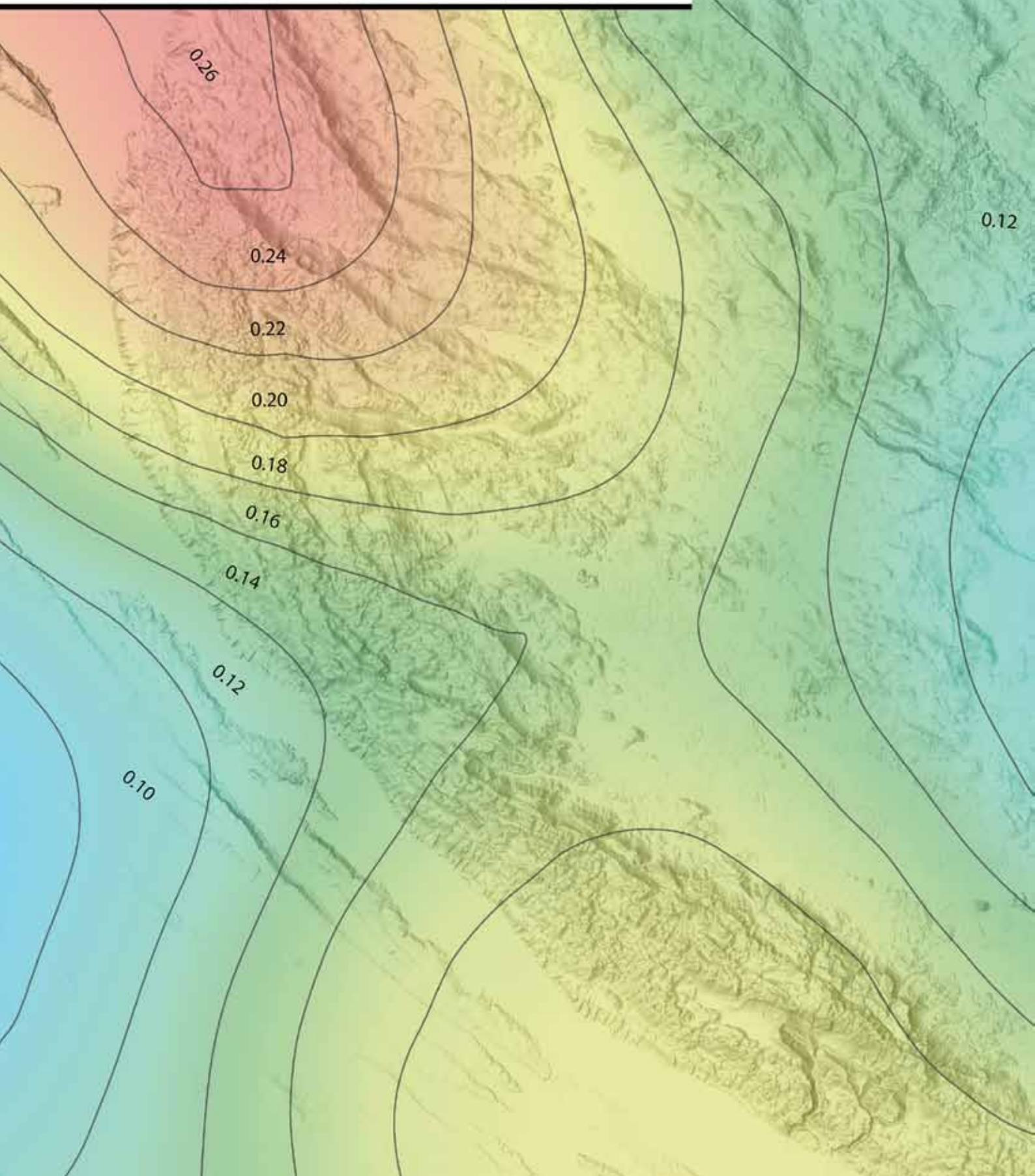


- [1] Reid, H. F. (1910): The mechanics of the earthquake, in the California earthquake of April 18, 1906. U: *Report of the State Investigation Commission*, Washington, D.C., Carnegie Institution of Washington, **2**, 16–28.
- [2] Tomljenović, B. (2016): Strukturna geologija, Rasjedi - morfološke i kinematske značajke i klasifikacija, https://rudar.rgn.hr/~bruntom/nids_bruntom/PDF%20Strukturna%20geologija/06-%20Rasjedi.pdf (zadnje pristupljeno u lipnju 2023.).
- [3] Ivančić, M., Mihajlović, Ž., Ivančić, I. (2015): Seismic data visualisation. U: *Proceedings of the 38th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronic MIPRO 2015*, Distributed Computing and Visualization (DC VIS), Rijeka, Hrvatska, 340–343, http://www.zemris.fer.hr/predmeti/ra/Magisterij/14_Ivancic/index.html (zadnje pristupljeno u lipnju 2023.).
- [4] USGS, Earthquake Science Center: Tectonic plates of the Earth. Public domain. Preuzeto s <https://www.usgs.gov/media/images/tectonic-plates-earth>.
- [5] International Seismological Centre (2023): On-line Bulletin, <https://doi.org/10.31905/D808B830>, <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>.
- [6] Storchak, D. A., Di Giacomo, D., Bondár, I., Engdahl, E. R., Harris, J., Lee, W. H. K., Villaseñor, A., Bormann, P. (2013): Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009). *Seismological Research Letters*, **84**(5), 810–815, <https://doi.org/10.1785/0220130034>.
- [7] Storchak, D. A., Di Giacomo, D., Engdahl, E. R., Harris, J., Bondár, I., Lee, W. H. K., Bormann, P., Villaseñor, A. (2015): The ISC-GEM global instrumental earthquake catalogue (1900–2009): Introduction. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **239**, 48–63, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.06.009>.
- [8] Gutenberg, B., Richter, C. F. (1956): Magnitude and energy of earthquakes. *Annales Geophysicae*, **9**(1), 1–15.
- [9] Ivančić, I., Herak, D., Herak, M., Allegretti, I., Fiket, T., Kuk, K., Markušić, S., Prevolnik, S., Sović, I., Dasović, I., Stipčević, J. (2018): Seismicity of Croatia in the period 2006–2015. *Geofizika*, **35**(1), 69–98, <https://doi.org/10.15233/gfz.2018.35.2>.
- [10] Stein, S., Wysession, M. (2003): An introduction to seismology, earthquakes, and Earth structure, Oxford Blackwell Science, xi+498 pp.
- [11] Dziewonski, A. M., Anderson, D. L. (1981): Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **25**(4), 297–356, [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7).
- [12] Skoko, D., Mokrović, J. (1998): Andrija Mohorovičić. Državni hidrometeorološki zavod Republike Hrvatske, Školska knjiga, Zagreb, 111 pp.
- [13] Stipčević, J., Herak, M., Molinari, I., Dasović, I., Tkalčić, H., Gosar, A. (2020): Crustal thickness beneath the dinarides and surrounding areas from receiver functions. *Tectonics*, **37**, 1–15, <https://doi.org/10.1029/2019TC005872>.
- [14] Herak, M. (1989): HYPOSEARCH – An earthquake location program. *Computers & Geosciences*, **15**(7), 1157–1162.
- [15] Orlić, N., Herak, M., Miklić, D. (2007–2021): SANDI – Seismogram ANalysis and DIspay, computer program, Department of Geophysics, Faculty of Science, University of Zagreb.
- [16] Godinu dana nakon petrinjskog potresa – rezultati privremene mobilne mreže postaja PETRINJANET. https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/mobilna_mreza/rezultati_petrinjanet (zadnje pristupljeno u lipnju 2023.).
- [17] Karakterizacija i monitoring rasjednog sustava šireg dubrovačkog područja – DuFAULT. Znanstveni projekt, voditelj doc. dr. sc. Josip Stipčević (Hrvatska zaklada za znanost, projekt IP-2020-02-3960), <https://projectdufault.geof.pmf.unizg.hr/hr/> (zadnje pristupljeno u lipnju 2023.).
- [18] Geofizičko-seizmološka istraživanja potresom ugroženih područja u RH i razvoj atenuacijskih relacija predviđanja seizmičkog gibanja tla – CRONOS. Znanstveni projekt, voditeljica projekta izv. prof. dr. sc. Snježana Markušić (Program: „Lokalni razvoj i smanjenje siromaštva, Norveški financijski mehanizam 2014.–2021.“), <https://projekt-cronos.hr/o-projektu/> (zadnje pristupljeno u lipnju 2023.).
- [19] Projekt CROSSNET – Razvoj mreže seizmoloških podataka. Infrastrukturni projekt, Seizmološka služba pri Geofizičkom odsjeku PMF-a, voditelj Tomislav Fiket (Nacionalni plan oporavka i otpornosti C6.1. R4-I1). <https://crossnet.potres.hr> (zadnje pristupljeno u lipnju 2023.).
- [20] Kuk, K. (2016): Sustav ranog upozoravanja o potresu, Zagreb, Croatia. Preuzeto s <https://policycommons.net/artifacts/3815553/sustav-ranog-upozoravanja-o-potresu/4621469/>, 32 pp.

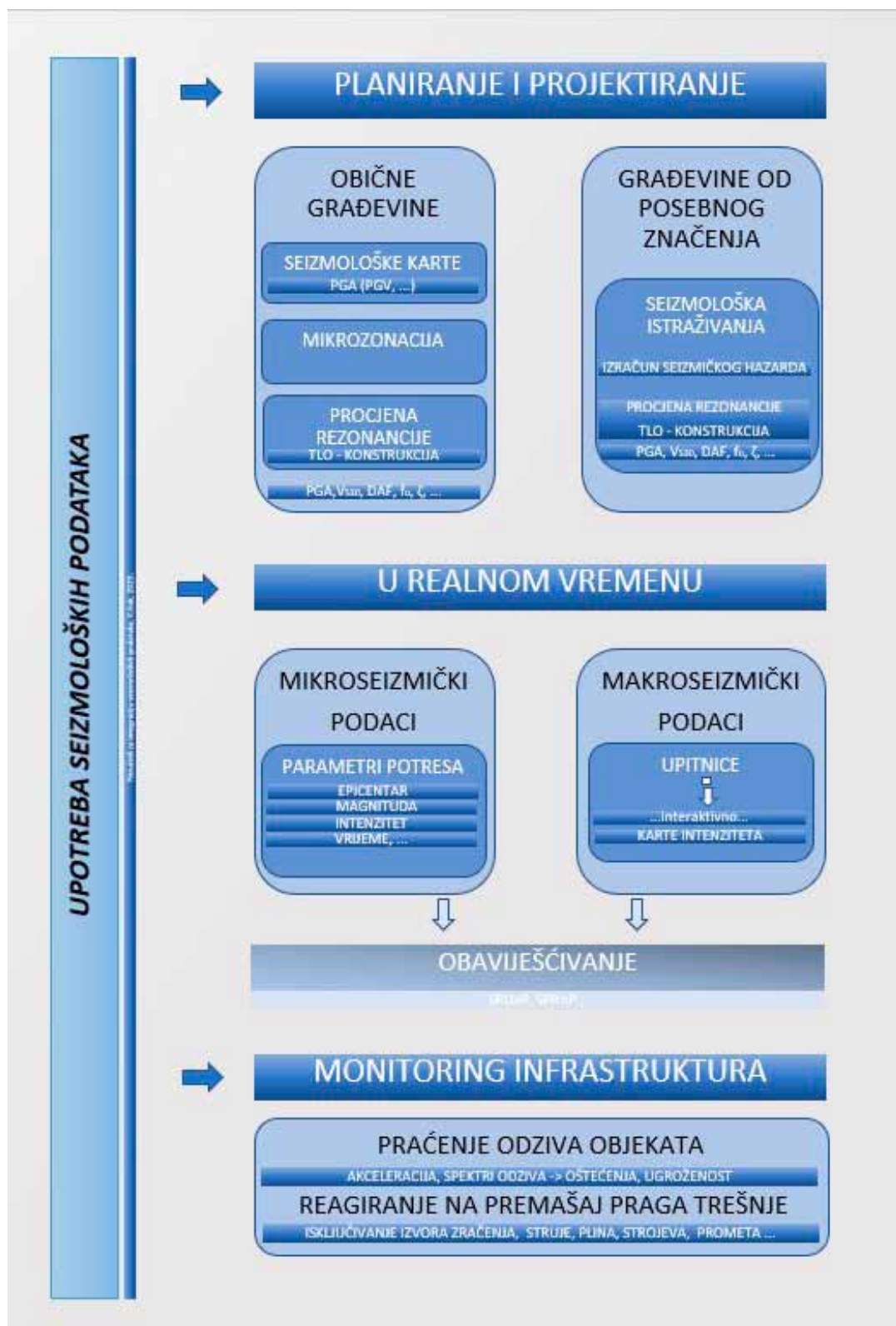
- [21] USGS Earthquake Hazards Program. M 6.4 - 2 km WSW of Petrinja, Croatia; Preuzeto s <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000d3zh/shakemap/pga?source=us&code=us6000d3zh>.
- [22] Kišpatić, M. (1891): Potresi u Hrvatskoj. Rad JAZU, CVII, Zagreb.
- [23] Kišpatić, M. (1892): Potresi u Hrvatskoj. Rad JAZU, CVIX, Zagreb.
- [24] Kišpatić, M. (1895): Potresi u Hrvatskoj. Rad JAZU, CXXII, Zagreb.
- [25] Arhiva Geofizičkog odsjeka PMF-a, Sveučilište u Zagrebu.
- [26] Herak, M., Herak, D., Markušić, S. (1996): Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908–1992, *Terra Nova*, **8**(1), 86–94.
- [27] Markušić, S., Herak, D., Ivančić, I., Sović, I., Herak, M., Prelogović, E. (1998): Seismicity of Croatia in the period 1993–1996 and the Ston-Šlano earthquake of 1996. *Geofizika*, **15**, 83–101.
- [28] Ivančić, I., Herak, D., Markušić, S., Sović, I., Herak, M. (2002): Seismicity of Croatia in the period 1997–2001. *Geofizika*, **18–19**, 17–29.
- [29] Ivančić, I., Herak, D., Markušić, S., Sović, I., Herak, M. (2006): Seismicity of Croatia in the period 2002–2005. *Geofizika*, **23**(2), 87–103.
- [30] Herak D. (1995): Razdioba brzina prostornih valova potresa i seizmičnost šireg područja Dinare. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 145 pp.
- [31] Markušić, S., Stanko, D., Korbar, T., Belić, N., Penava, D., Kordić, B. (2020): The Zagreb (Croatia) M5.5 earthquake on 22 March 2020. *Geosciences*, **10**(7), 252, <https://doi.org/10.3390/geosciences10070252>.
- [32] Herak, D., Herak, M. (2010): The Kupa Valley (Croatia) earthquake of 8 October 1909 — 100 years later. *Seismological Research Letters*, **81**(1), 30–36, <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.1.30>.
- [33] Dvije godine od zagrebačkog potresa. Seizmološka služba, https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/o_zagrebackom_potresu_2020/druga_godisnjica_zagrebackog_potresa (zadnje pristupljeno u lipnju 2023.).
- [34] Potresi kod Petrinje. Seizmološka služba, https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/potresi_kod_petrinje (zadnje pristupljeno u lipnju 2023.).
- [35] Herak, M., Živčić, M., Sović, I., CeciĆ, I., Dasović, I., Stipčević, J., Herak, D. (2018): Historical seismicity of the Rijeka region (NW External Dinarides, Croatia) – Part II: The Klana earthquakes of 1870. *Seismological Research Letters*, **89**(4), 1524–1536, <https://doi.org/10.1785/0220180064>.
- [36] Herak, D., Herak, M. (2012): Seizmičnost i potresna opasnost na Makarskom primorju. *Makarsko primorje danas*, Institut društvenih znanosti Ivo Pilar, Zagreb, 265–276.
- [37] Glavna radna skupina Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa (2019): Procjena rizika od katastrofa za Republiku Hrvatsku. https://civilna-zastita.gov.hr/UserDocsImages/CIVILNA%20ZA%C5%A0TITA/PDF_ZA%20WEB/Procjena_rizika%20od%20katastrofa_2019.pdf.
- [38] Cornell, A. (1968): Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **58**, 1583–1606.
- [39] McGuire, R. K. (1978): FRISK: Computer program for seismic risk analysis using faults as earthquake sources. Open-File Report No. 78-1007, U.S. Geological Survey, Washington D.C., <https://doi.org/10.3133/ofr781007>.
- [40] Coppersmith, K. J., Youngs, R. R (1986): Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessments within intraplate environments. U: *Proceedings of the 3rd National Conference on Earthquake Engineering*, **1**, 301–312.
- [41] Reiter, L. (1990): Probabilistic seismic hazard analysis — Lessons learned: A regulator's perspective. *Nuclear Engineering and Design*, **123**(2–3), 123–128.
- [42] Sović, I., Allegretti, I., Dasović, I., Fiket, T., Herak, D., Herak, M., Ivančić, I., Kuk, K., Markušić, S., Mustać, M., Prevornik, S., Stipčević, J. (2019): Seizmička i geološka mikrozonacija dijela grada Zagreba: Knjiga 4: Mjerenja i interpretacija mikroseizmičkog nemira. Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički odsjek, 178 pp.
- [43] HRN EN 1998-5/NA: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 5. dio: Temelji, potporne konstrukcije i geotehnička pitanja, 40 pp.
- [44] Nakamura, Y. (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute (RTRI), Quarterly Reports*, **30**(1), 25–33, <http://worldcat.org/oclc/3127232>.
- [45] Gallipoli, M. R., Mucciarelli, M., Castro, R. R., Monachesi, G., Contri, P. (2004): Structure, soil–structure response and effects of damage based on observations of horizontal-to-vertical spectral ratios of microtremors. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**(6), 487–495, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2003.11.009>.

- [46] Gosar, A. (2007): Microtremor HVSr study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes. *Engineering Geology*, **91**(2–4), 178–193, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.01.008>.
- [47] Gosar, A. (2010): Site effects and soil-structure resonance study in the Kobarid basin (NW Slovenia) using microtremors. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **10**(4), 761–772, <https://doi.org/10.5194/nhess-10-761-2010>.
- [48] Herak, M., Herak, D. (2010a): Analyses of seismicity as input for earthquake hazard studies in Bosnia and Herzegovina. *Izgradnja*, **64**(5–6), 263–281.
- [49] Herak, M., Herak, D. (2010b): Continuous monitoring of dynamic parameters of the DGFSM building (Zagreb, Croatia). *Bulletin of Earthquake Engineering*, **8**(3), 657–669, <https://doi.org/10.1007/s10518-009-9112-y>.
- [50] Mucciarelli, M., Gallipoli, M. R. (2001): A critical review of 10 years of microtremor HVSr technique. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, **42**(3), 255–266.
- [51] Kuk, K., Mustać, M., Prevolnik, S., Stipčević, J., Herak, M., Ivančić, I., Sović, I., Markušić, S., Fiket, T., Štih, D., Uroš, M., Atalić, J., Novak Šavor, M., Lazarević, D., Žagar, T., Jandrić, K. (2019): Procjena potresne otpornosti osnovne škole „Pučišća“ - Studija. Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički odsjek i Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 143 pp.
- [52] Mucciarelli, M., Contri, P., Monachesi, G., Calvano, G., Gallipoli, M. R. (2001): An empirical method to assess the seismic vulnerability of existing buildings using the HVSr technique. *Pure and Applied Geophysics*, **158**(12), 2635–2647, <https://doi.org/10.1007/PL00001189>.
- [53] Panou, A. A., Theodulidis, N., Hatzidimitriou, P., Stylianidis, K., Papazachos, C. B. (2005): Ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio in site effects estimation and correlation with seismic damage distribution in urban environment: The case of the city of Thessaloniki (Northern Greece). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**(4), 261–274, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2005.02.004>.
- [54] Warnana, D. D., Soemitro, R. A. A., Utama, W. (2011). Application of microtremor HVSr method for assessing site effect in residual soil slope. *International Journal of Basic & Applied Sciences IJBAS-IJENS*, **11**(4), 73–78.
- [55] Kuk, V. (1987): Seizmološka karta za povratni period od 500 godina, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički zavod.
- [56] Gumbel, E. J. (1954). Statistical theory of extreme values and some practical applications: A series of lectures. US Government Printing Office, National Bureau of Standards, Washington, D. C., Applied Mathematics Div., pp 60.
- [57] Makjanić, B. (1977): Kratak prikaz klime Zagreba. *Radovi Geofizičkog zavoda u Zagrebu*, **III**/18, 125–176.
- [58] Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Sović, I. (2011): Republika Hrvatska, Karta potresnih područja, <http://seizkarta.gfz.hr>.
- [59] Hrvatski zavod za norme (2011): Nacionalni dodatak za niz normi HRN EN 1998-1:2011/NA:2011, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 1.dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade.
- [60] Hrvatski zavod za norme (2011): Karte potresnih područja Republike Hrvatske – *on-line* aplikacija, Geofizički odsjek Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu, (<http://seizkarta.gfz.hr>.)

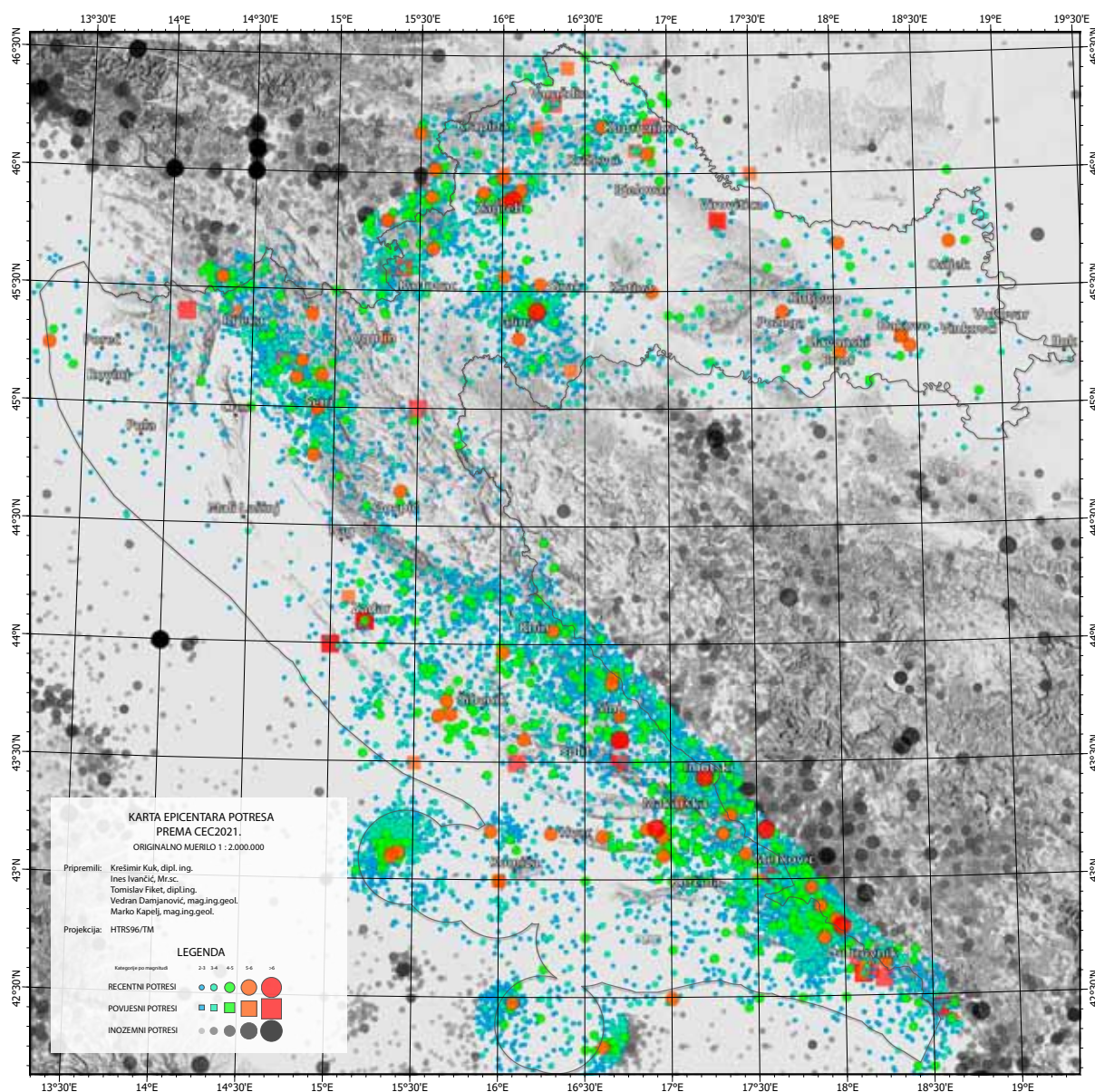
11. Prilozi



Prilog 1. Shematski prikaz upotrebe seizmoloških podataka



Prilog 2. Karta epicentara potresa



Karta epicentara potresa na području Republike Hrvatske u razdoblju od prije Krista do kraja 2021. godine prema Katalogu potresa Hrvatske CEC2021.

Prilog 3. Tumač karata potresnih područja Republike Hrvatske iz 2011. godine**1 Upotreba karte**

Karte potresnih područja tiskane su u boji u velikom formatu, u približnom mjerilu 1:800 000. Njihove inačice na slikama 1 i 2 služe tek za ilustraciju te nisu namijenjene očitavanju parametara. Kartama su prikazana potresom prouzročena horizontalna poredbena vršna ubrzanja (a_{gR}) površine temeljnog tla tipa A čiji se premašaj tijekom bilo kojih $t = 50$ godina (slika 1), odnosno $t = 10$ godina (slika 2) očekuje s vjerojatnošću od $p = 10\%$. Vjerojatnosti premašaja (p) i poredbena razdoblja (t) s povratnim su razdobljem (T) povezana izrazom

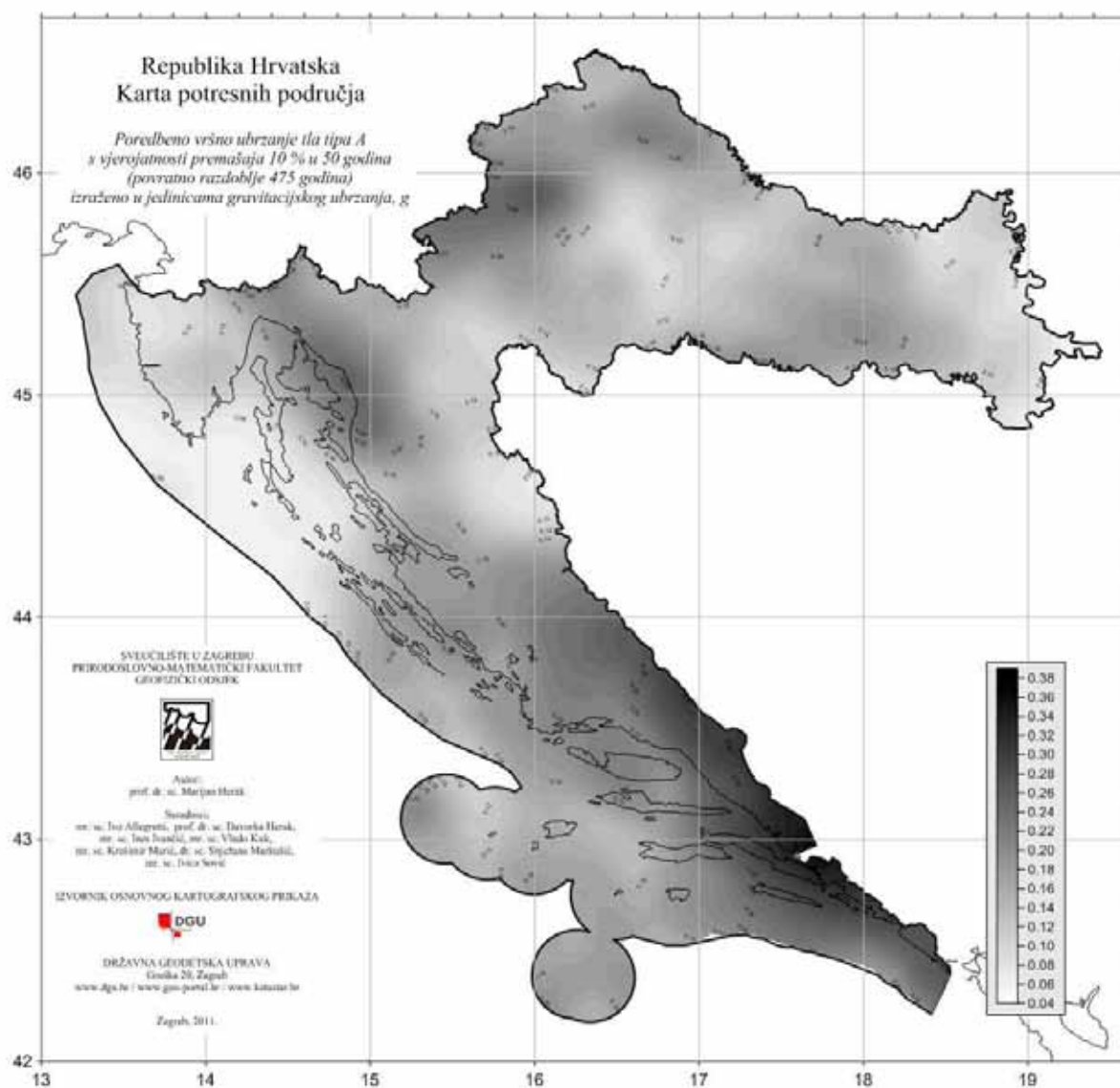
$$p = 100 \left[1 - \left(1 - \frac{1}{T} \right)^t \right]$$

pa vrijednosti prikazane na karti odgovaraju ubrzanjima koja se u prosjeku premašuju svakih $T = 475$ (odnosno $T = 95$) godina. Ubrzanja su izražena u jedinicama gravitacijskog ubrzanja g ($1\ g = 9,81\ m/s^2$).

Kako su potresi u vremenu razdijeljeni po Poissonovoj razdiobi, njihovo događanje na određenom mjestu nema nikakve pravilnosti te vrijeme budućeg potresa ni na koji način ne ovisi o tome kada se dogodio prethodni potres. Povratna razdoblja (T), dakle, imaju smisla samo za procjenu ukupnog broja potresa koji se mogu očekivati tijekom nekog duljeg razdoblja, ali ne i za procjenu vremena u kojem će se oni dogoditi.

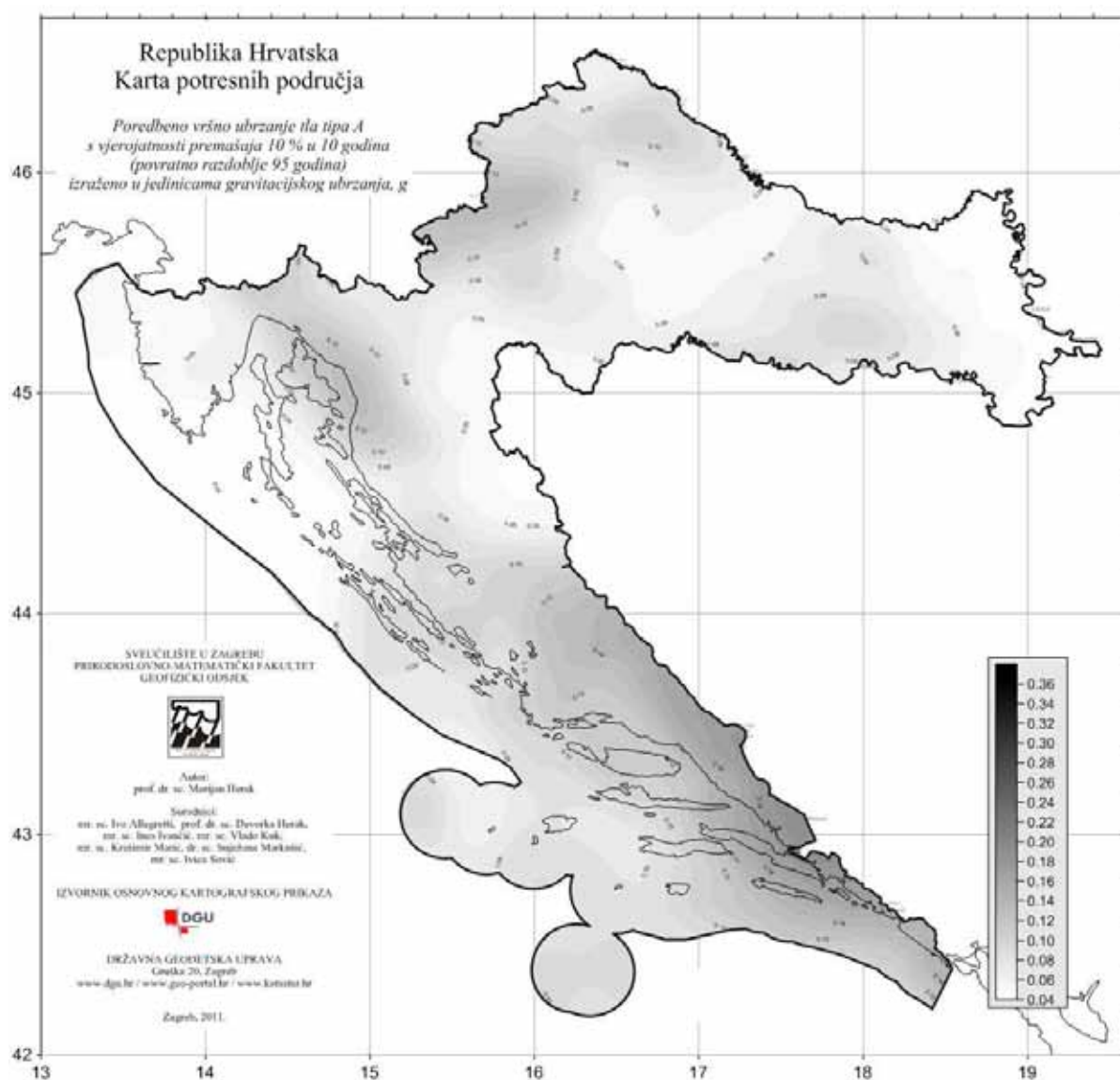
Iznosi poredbenih vršnih ubrzanja na karti prikazani su izolinijama s rezolucijom od 0,02 g . Numerički navedene vrijednosti na karti odnose se na prostor između dvije susjedne izolinije (vidjeti sliku 3) Novska je u području $a_{gR} = 0,14\ g$. U slučaju dvojbe valja uzeti prvu susjednu veću vrijednost.

Karta je tiskana u približnom mjerilu 1:800 000, s ortogonalnim koordinatnim osima kako bi se olakšalo određivanje položaja lokacije. Zbog toga nije pogodna za precizno mjerenje udaljenosti.



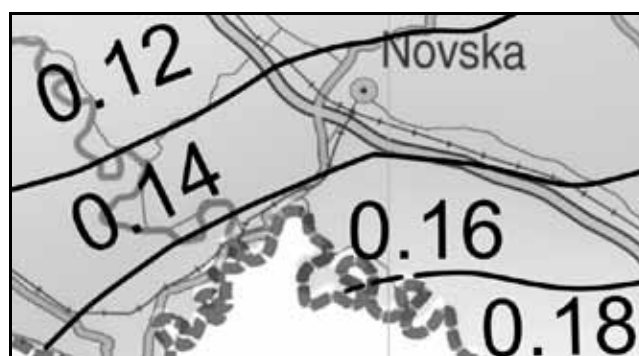
Slika 1 – Karta potresnih područja Republike Hrvatske za poredbena vršna ubrzanja temeljnog tla a_{gR} , za temeljno tlo tipa A, s vjerojatnosti premašaja 10 % u 50 godina, za poredbeno povratno razdoblje potresa $T_{NCR} = 475$ godina, u jedinicama gravitacijskog ubrzanja g

NAPOMENA: Ova karta ne smije se upotrebljavati za očitavanje iznosa ubrzanja. Za to se mora upotrijebiti izvornik u boji u mjerilu približno 1:800 000.



Slika 2 – Karta potresnih područja Republike Hrvatske za poredbena vršna ubrzanja temeljnog tla a_{gR} , za temeljno tlo tipa A, s vjerojatnosti premašaja 10 % u 10 godina, za poredbeno povratno razdoblje potresa $T_{DLR} = 95$ godina, u jedinicama gravitacijskog ubrzanja g

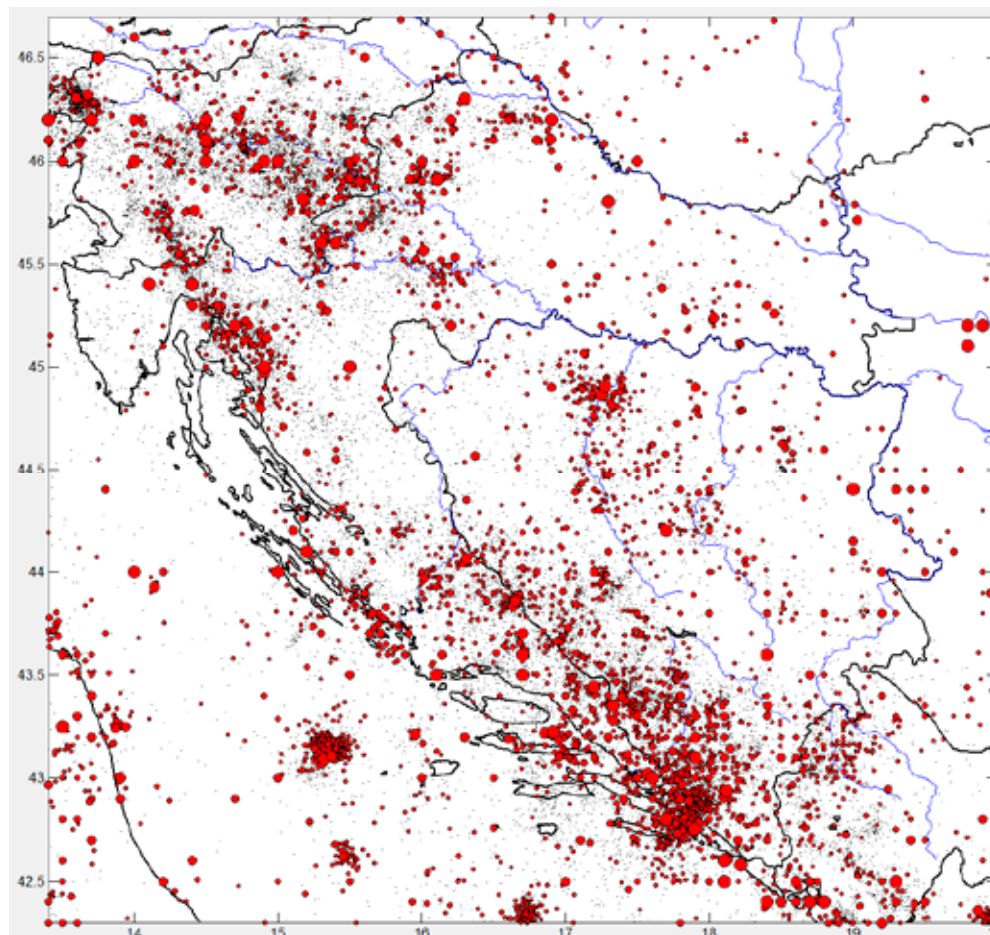
NAPOMENA: Ova karta ne smije se upotrebljavati za očitavanje iznosa ubrzanja. Za to se mora upotrijebiti izvornik u boji u mjerilu približno 1:800 000.



Slika 3 – Detalj karte iz slike 1 za grad Novsku

2 Izrada karata potresnih područja Republike Hrvatske

Karte potresnih područja karte su seizmičkog hazarda ili potresne opasnosti koja se procjenjuje na temelju opažene seizmičnosti tijekom što je moguće duljeg razdoblja. Za Hrvatsku osnovna je baza podataka sadržana u Hrvatskom katalogu potresa (Herak et al., 1996) koji održava Geofizički odsjek Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu. Trenutno sadrži osnovne podatke o više od 40 000 potresa koji su se dogodili na teritoriju Republike Hrvatske i susjednim područjima, a redovito se dopunjuje podacima o novim potresima. Današnja mreža seizmografa u Hrvatskoj omogućuje da se godišnje prosječno locira i u katalog uvrsti više od 3 500 potresa. Kartu epicentara potresa prikazuje slika 3. Magnitude potresa u katalogu su lokalne magnitude (M_L), za koje je u nekoliko radova pokazano da za Hrvatsku približno po iznosima odgovaraju momentnoj magnitudi (M_W).



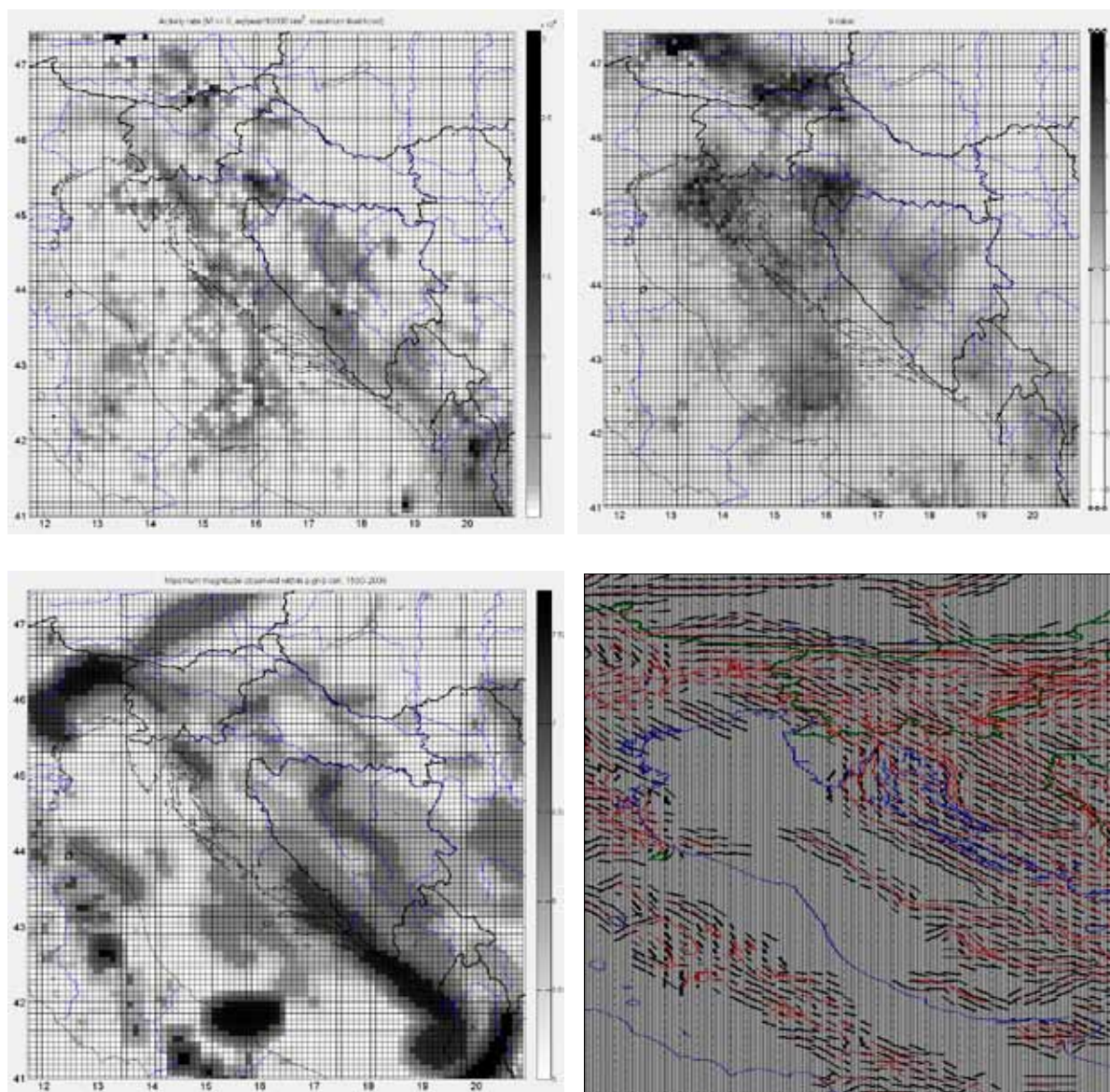
Slika 4 – Epicentri potresa iz Hrvatskog kataloga potresa (Geofizički odsjek PMF-a, 2011).

Kako katalog sadrži ne samo glavne, nego i prethodne i naknadne potrese, za koje ne vrijedi pretpostavka o Poissonovoj razdiobi, prije analize proveden je postupak izdvajanja glavnih potresa. Svaki je katalog potresa nužno nehomogen jer njegova potpunost varira po godinama i po magnitudi. Zbog toga je prije statističke obrade potrebno odrediti prostornu i vremensku razdiobu magnitudnog praga potpunosti. To je napravljeno onako kako je opisano u Herak et al. (2009). Tako pripremljen katalog poslužio je za proračun osnovnih statističkih parametara seizmičnosti u čvorovima guste mreže kojom je prekriveno istraživano područje.

U svakom od čvorova određena su tri parametra – a , b , $M_{\max}$ – koji omogućuju procjenu učestalosti potresa i njihovu razdiobu prema magnitudi (Gutenberg-Richterova relacija):

$$\log N = a - bM, \quad M \in [M_{\min}, M_{\max}] \quad (\text{C.2})$$

N je broj potresa s magnitudom $\geq M$, a $M_{\min}$ je magnituda od koje je katalog potpun u okolišu svakog čvora. $M_{\max}$ je maksimalna moguća magnituda potresa na rasjedima u okolišu razmatranoga čvora, a određuje se uzimajući u obzir najveće povijesne potrese te prema seizmotektonskom potencijalu i recentnoj aktivnosti rasjeda. Seizmičnost je tako opisana dvama modelima: u modelu 1 elementi mreže bili su dimenzija $8,3 \times 8,3$ km, a u modelu 2 dimenzije su bile $5,5 \times 5,5$ km. Konačna prostorna polja parametara a , b , $M_{\max}$ izgladnena su na tri načina binormalnim eliptičkim kernelom različitih dimenzija čija je duža os bila usmjerena u dominantni pravac pružanja rasjeda u okolišu predmetnog čvora, kako bi se utjecaj pojedinih jakih potresa iz prošlosti razdijelio na čitavu rasjednu zonu. Na taj način, za svaki model definirana su još tri podmodela (a , b , c) pa se ukupno radilo sa šest različitih modela seizmičnosti. Kao primjer, na slici 5 prikazane su prostorne razdiobe parametara a , b , $M_{\max}$, za model 1 (podmodel b)), te dominantni smjer pružanja rasjeda.



Slika 5 – Konačna polja razdiobe parametara a (gore lijevo, prikazano je 10^3), b (gore desno), i $M_{\max}$ (dolje lijevo) u relaciji (AR2) za model 1b te prevladavajući smjer pružanja rasjeda (dolje desno)

Seizmička opasnost proračunana je upotrebom stohastičkog (Monte-Carlo) postupka, u kojem se vjerojatnost premašivanja određenog ubrzanja određuje statističkom analizom sintetičkog kataloga potresa koji se generira upotrebom empirijske razdiobe (AR2) za svaki element mreže te za vrlo dugi niz godina (ovdje 2 000 000 godina). Za svaki od generiranih potresa proračunano je najveće teorijsko horizontalno ubrzanje u svakom čvoru mreže, i to upotrebom 6 empiričkih atenuacijskih relacija (AR):

AR1: Herak, Markušić, Ivančić (2001)	[w = 0,20]
AR2: Akkar, Bommer (2010)	[w = 0,25]
AR3: Bindi, Luzi, Pacor, Sabetta, Massa (2009)	[w = 0,25]
AR4: Fukushima (2003)	[w = 0,10]
AR5: Chiou, Youngs (2008)	[w = 0,10]
AR6: Idriss (2008)	[w = 0,10].

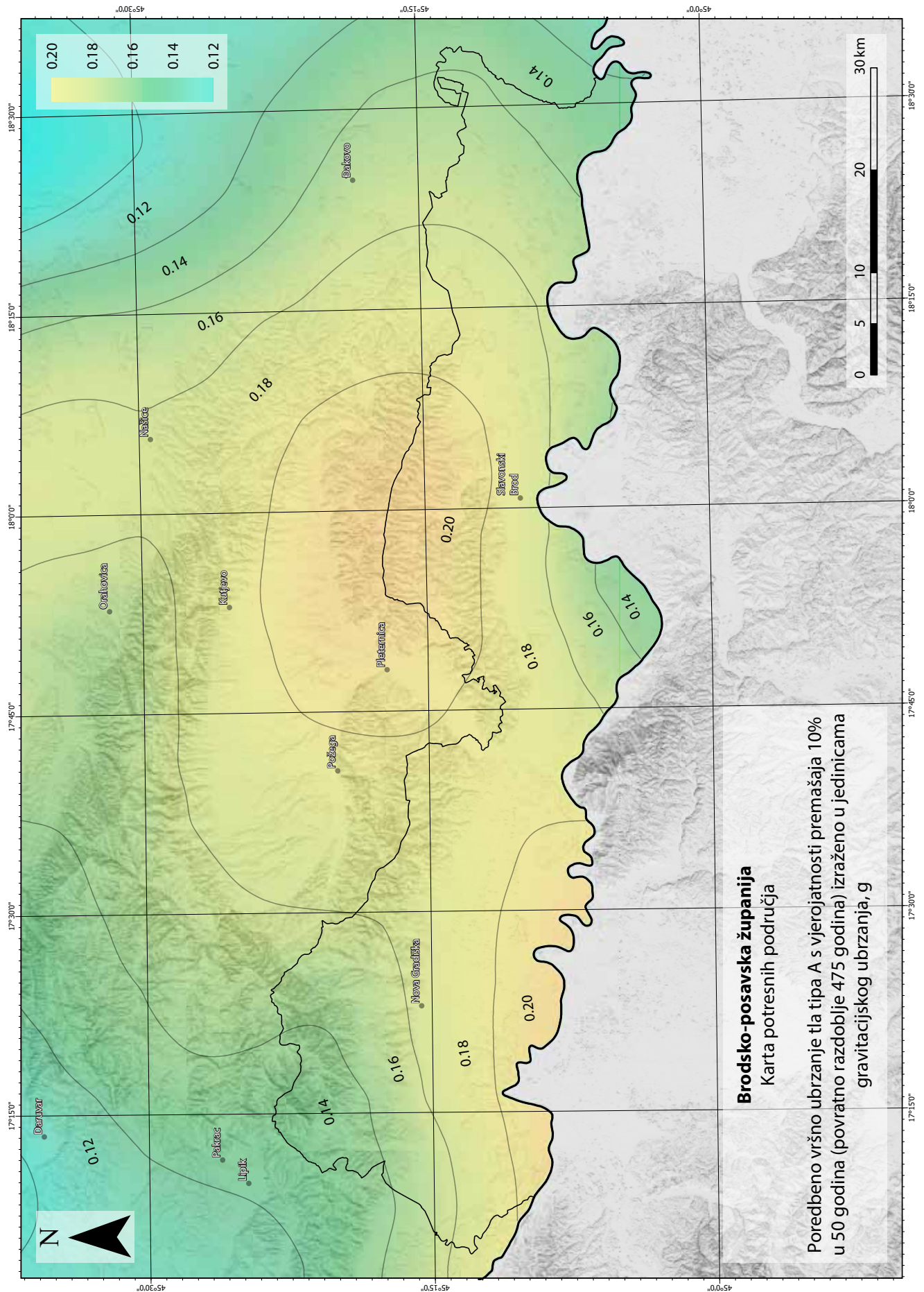
Ti su odnosi odabrani između desetaka raspoloživih jer su barem na neki način reprezentativni za razmatrano područje. Herak et al. (2001) jedini je AR izveden za područje Hrvatske (širi prostor Dinarida). AR2 je nova relacija koje se odnosi na cijelu Europu i Mediteran, AR3 je izveden za Italiju, AR4 se često upotrebljava pri određivanju hazarda za nuklearne elektrane, dok su AR5 i AR6 tzv. *new generation* (NGA) relacije izvedene na osnovi istog, reprezentativnog skupa opažanja iz cijeloga svijeta. U uglatim zgradama prikazane su "težine" za svaki AR, čija je suma 1,0. AR daje vrijednosti najvećeg horizontalnog ubrzanja (PGA) na temelju poznavanja magnitude potresa, udaljenosti lokacije od žarišta potresa te raznih drugih parametara (vrste i geometrije rasjeda, položaja lokacije u odnosu na rasjed, tipa tla...).

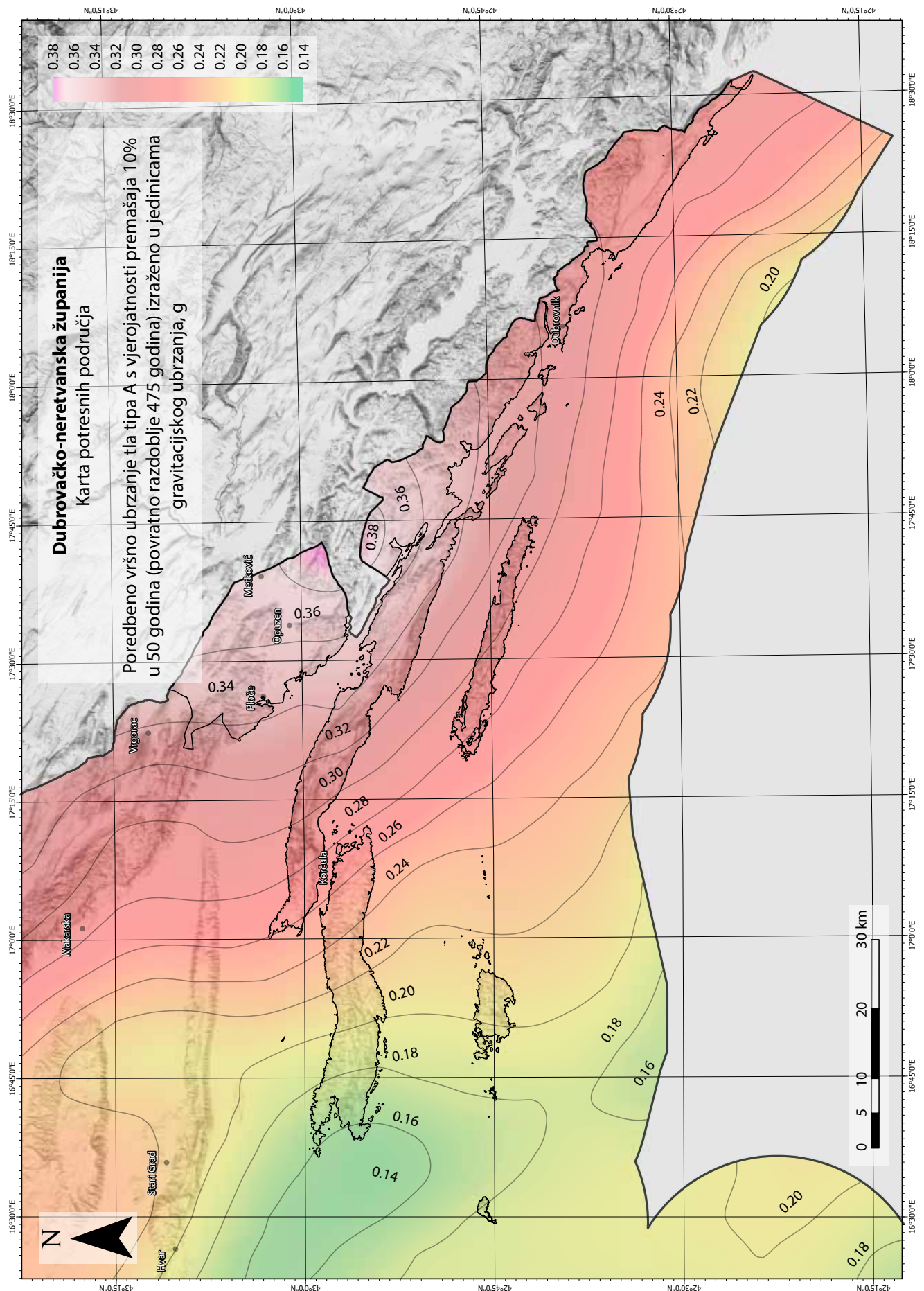
Aleatorna nepouzdanost procjene PGA izražena je standardnom devijacijom za svaki od upotrijebljenih AR te je uzeta u obzir pri proračunu. Odgovarajuća nepouzdanost $M_{\max}$ uzeta je kao $\pm 0,2$ jedinice magnitude. Epistemičke se nepouzdanosti u obzir uobičajeno uzimaju tako da se konstruira tzv. logičko stablo, u kojem svaka od grana predstavlja određeni, mogući scenarij događaja. Težina pojedine grane ovisi o pridijeljenoj vjerojatnosti toga scenarija. U ovom slučaju upotrijebljeno je jednostavno logičko stablo sa 36 grana, po jedna za svaki par (AR, podmodel), pri čemu su svi podmodeli (1a, 1b, 1c, 2a, 2b, 2c) imali jednake težine.

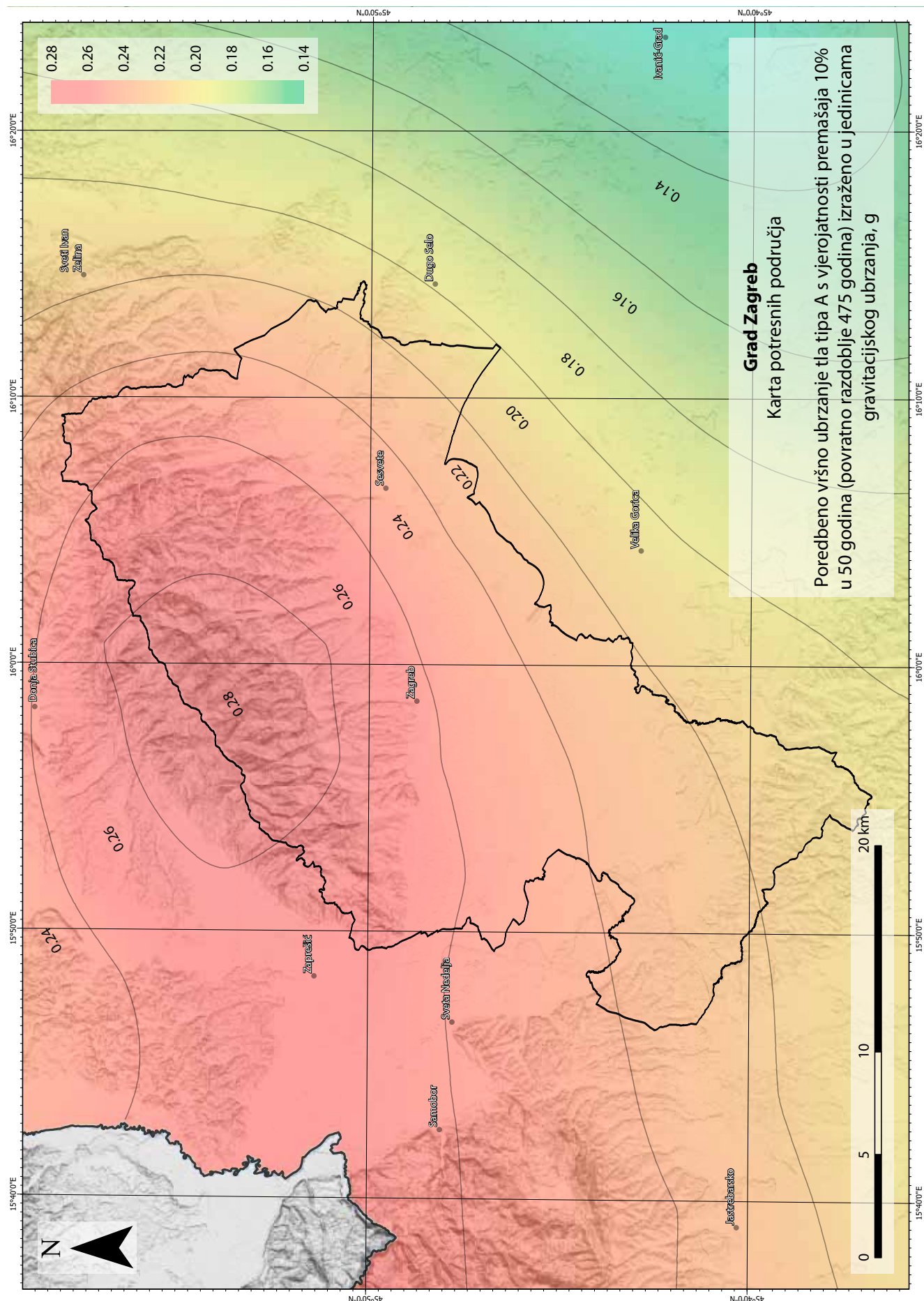
Kada je, kako je opisano, generirana seizmička povijest najvećih ubrzanja tijekom dva milijuna godina u svakom čvoru mreže, bilo je moguće statistički ocijeniti vjerojatnosti opažanja ubrzanja većeg od zadanog tijekom odabranog poredbenog razdoblja (ili njihova povratna razdoblja). Tako proračunano polje ubrzanja interpolirano je na mrežu 2 x 2 km te je prikazano na kartama. Izolinije su izvučene postupkom kriginga, a prikazane su na digitalno formiranoj kartografskoj podlozi koju je izradila Državna geodetska uprava.

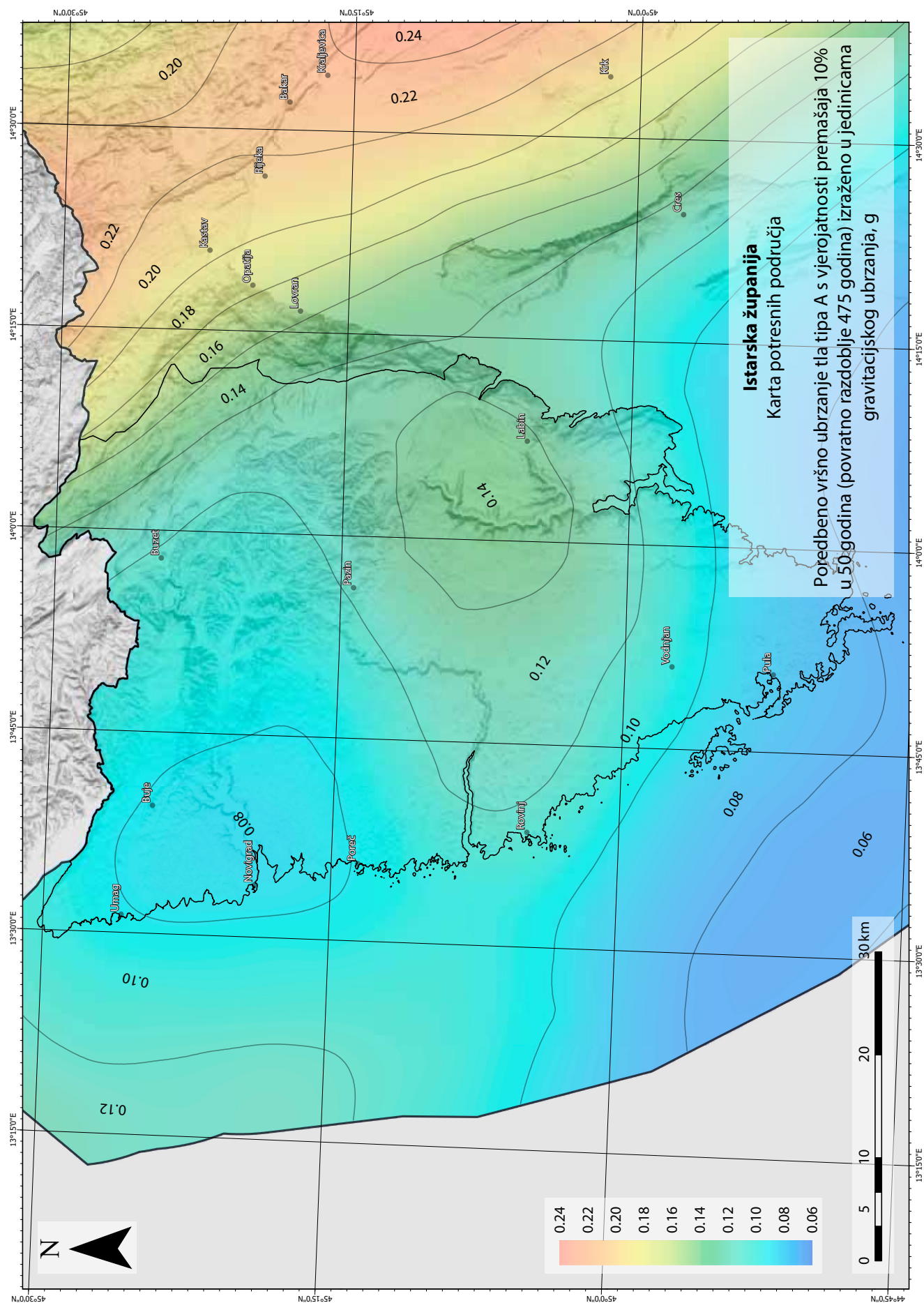
3 Literatura

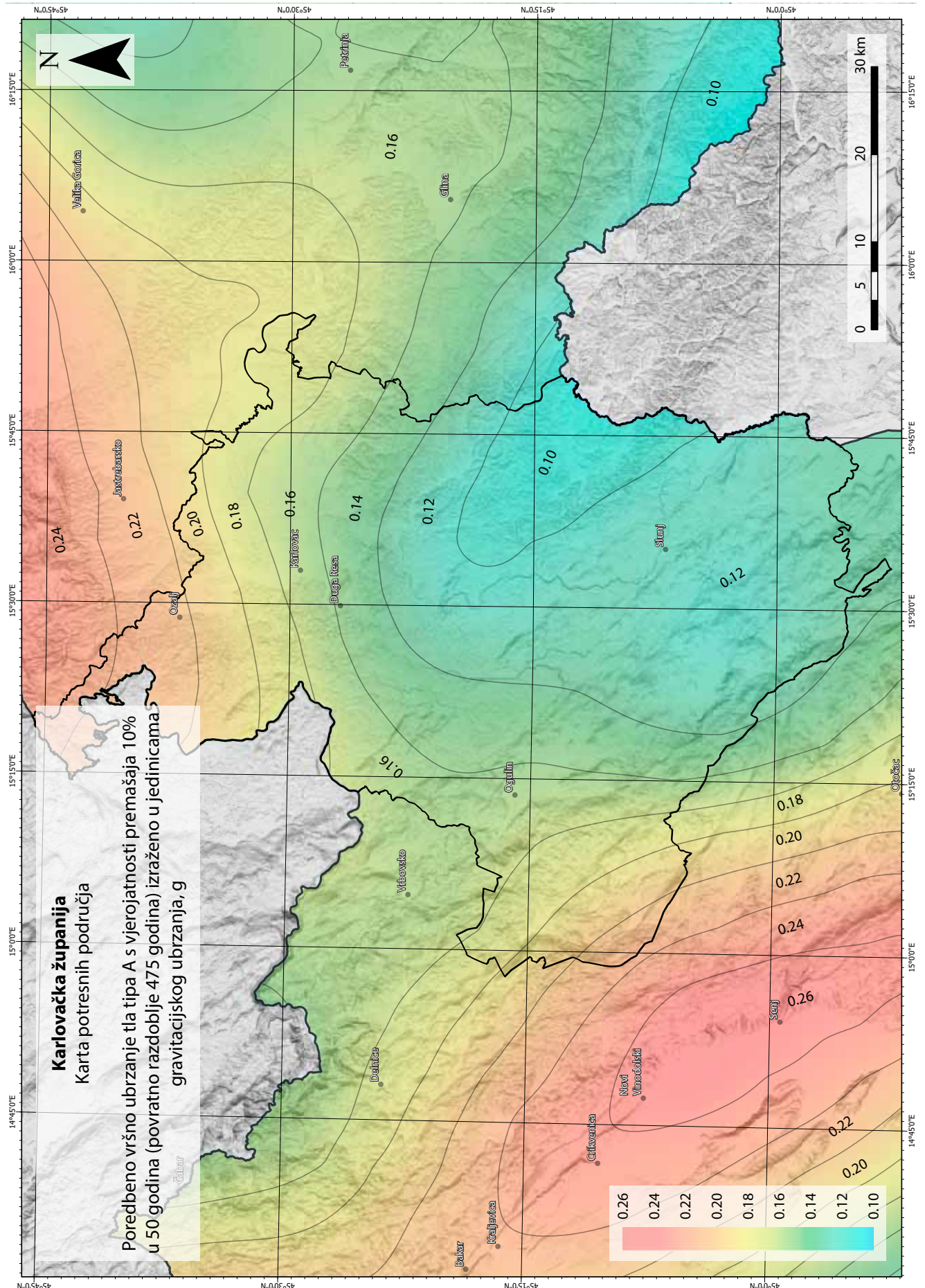
- (1) Akkar S., Bommer J. J. (2010): Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East, *Seismological Research Letters* 81/2, 195-206.
- (2) Bindi D., Luzi L., Pacor F., Sabetta F., Massa M. (1996): Towards a new reference ground motion prediction equation for Italy: update of the Sabetta-Pugliese (1996), *Bull. Earthquake Eng.* 7, 591-608, DOI 10.1007/s10518-009-9107-8.
- (3) Chiou B. S.-J., Youngs R. R. (2008): NGA Model for Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra, PEER Report 2008/09, Pacific Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.
- (4) Fukushima Y., Berge-Thierry C., Griot-Pommerehne D. (2003): Attenuation relation for West Eurasia determined with recent near-fault records from California, Japan and Turkey, *Journal of Earthquake Engineering* 7, 573-598.
- (5) Herak D., Herak M., Tomljenović B. (2009): Seismicity and focal mechanisms in North-Western Croatia, *Tectonophysics* 465, 212-220, DOI:10.1016/j.tect.2008.12.005.
- (6) Herak M., Herak D., Markušić S. (1996): Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908-1992, *Terra Nova* 8, 86-94.
- (7) Herak M., Markušić S., Ivančić I. (2001): Attenuation of peak horizontal and vertical acceleration in the Dinarides area, *Studia Geophysica et Geodaetica* 45, 383-394.
- (8) Idriss, I. M. (2008): An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated By Shallow Crustal Earthquakes, *Earthquake Spectra* 24, 217-242.

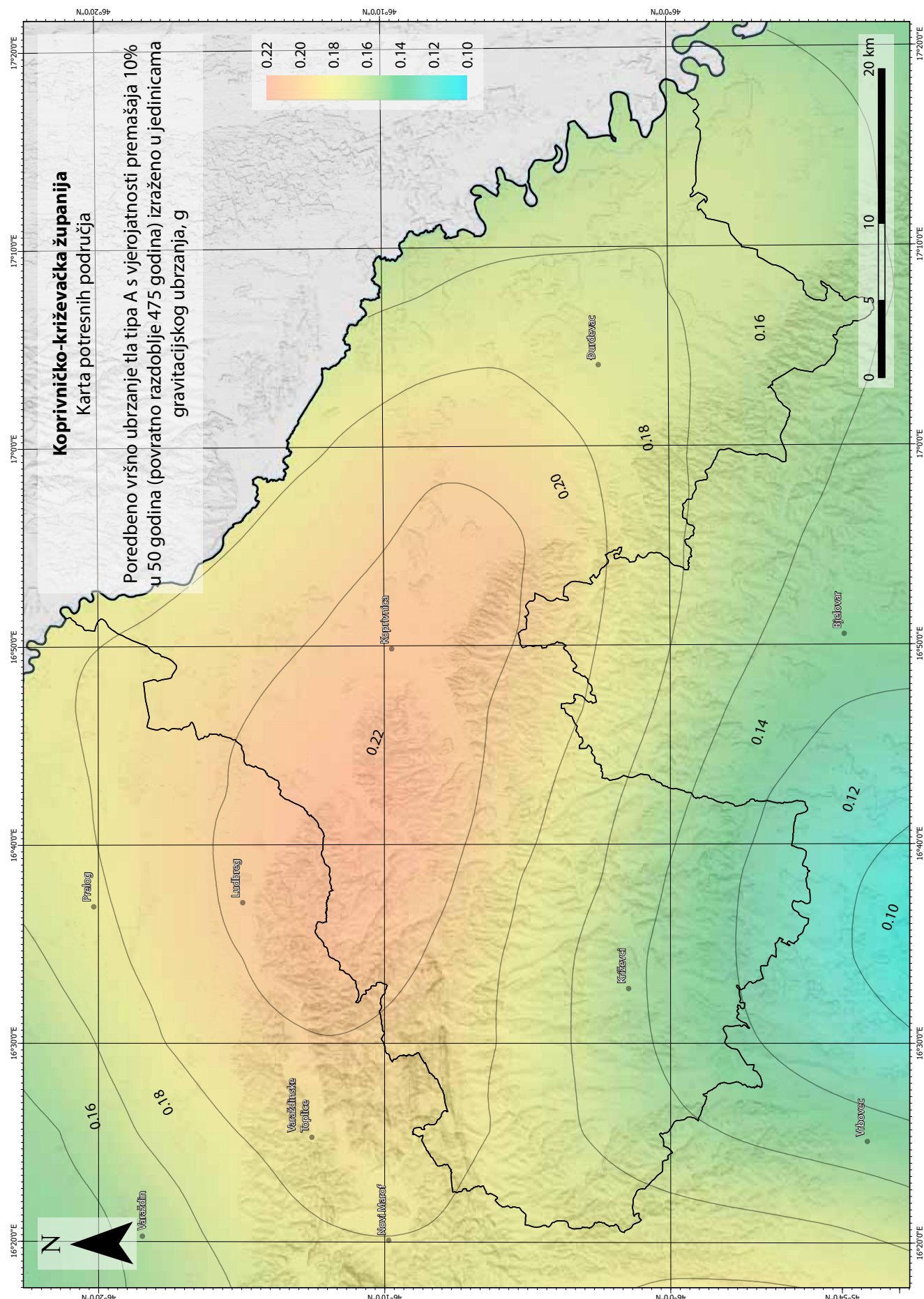


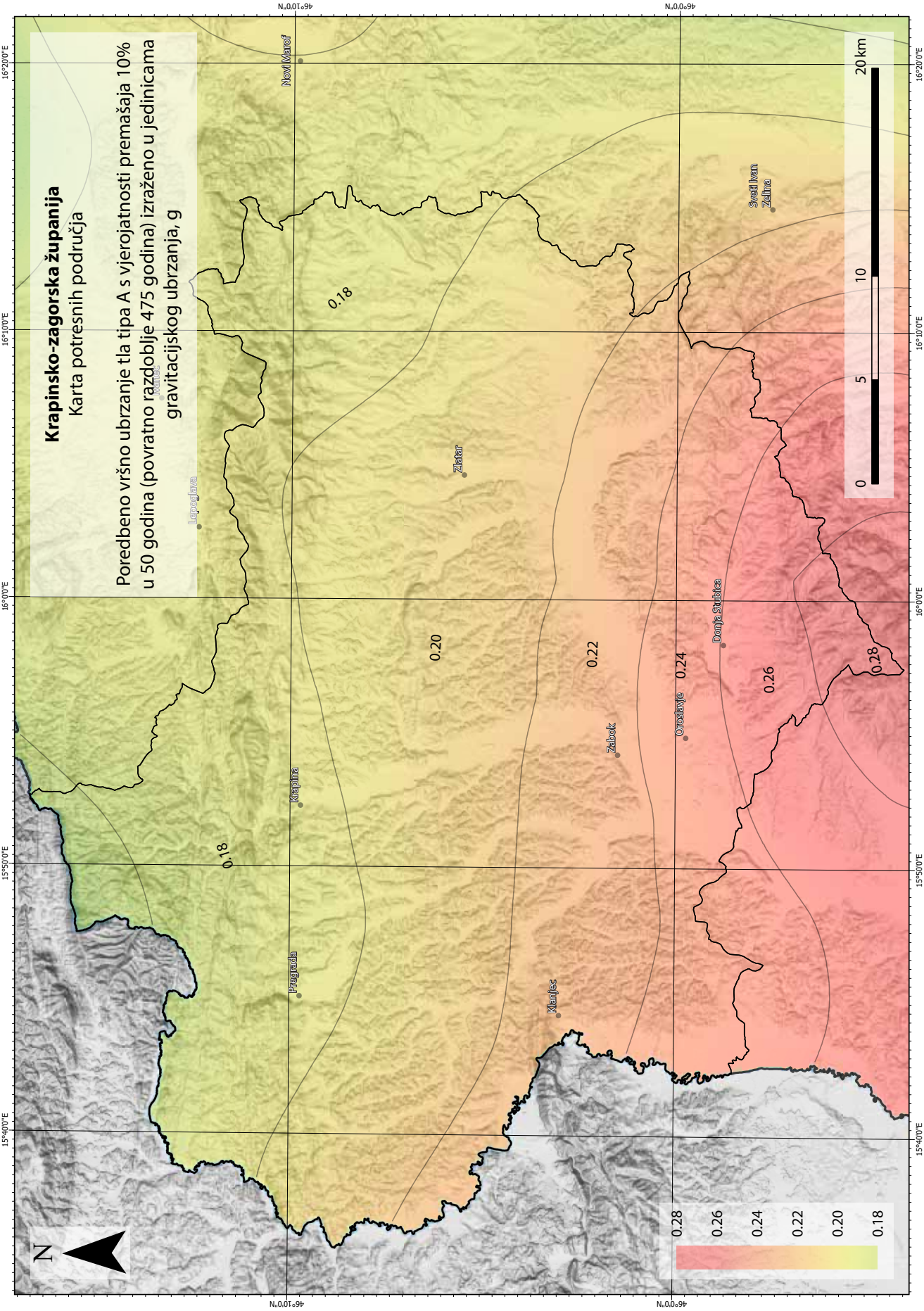


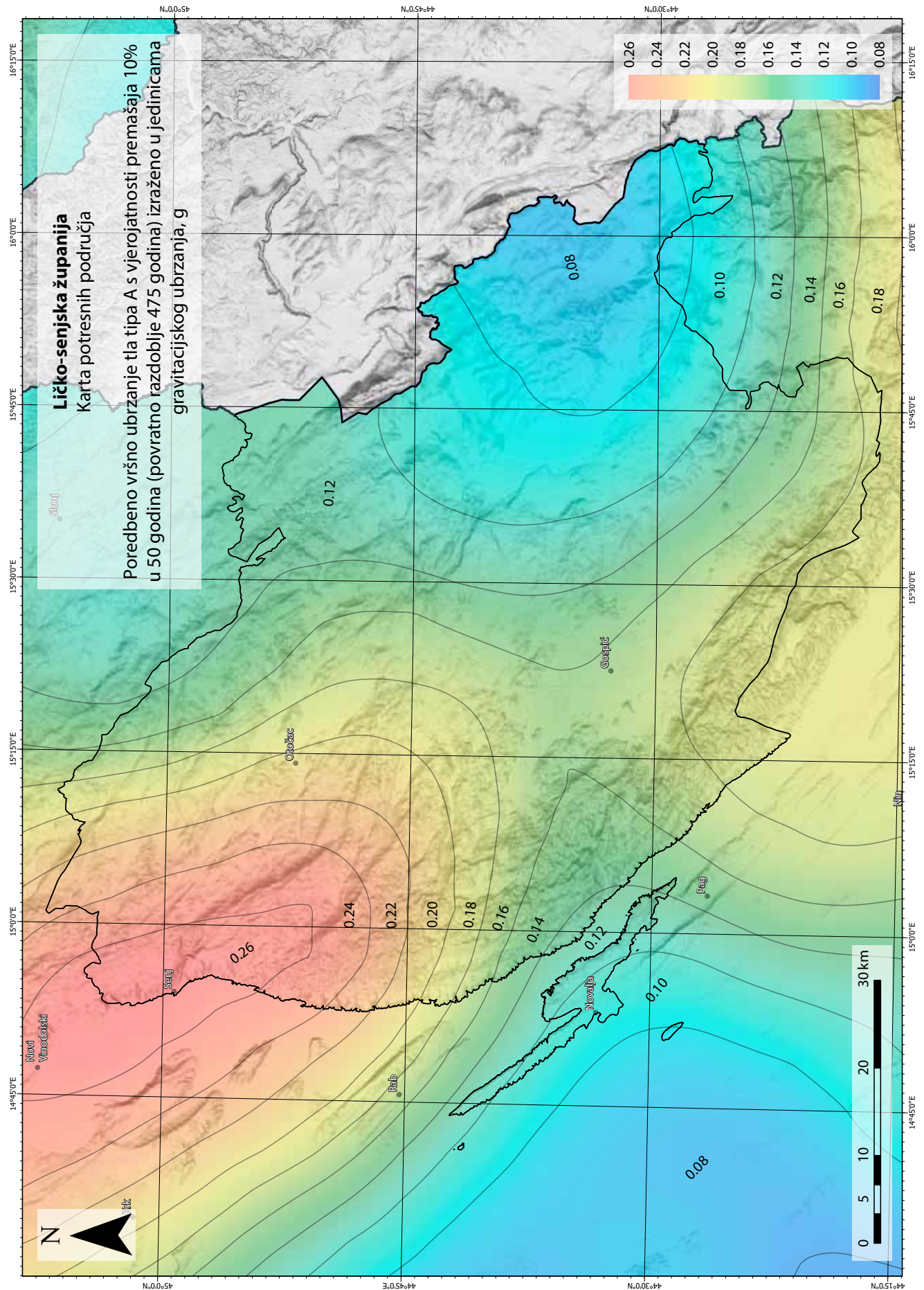


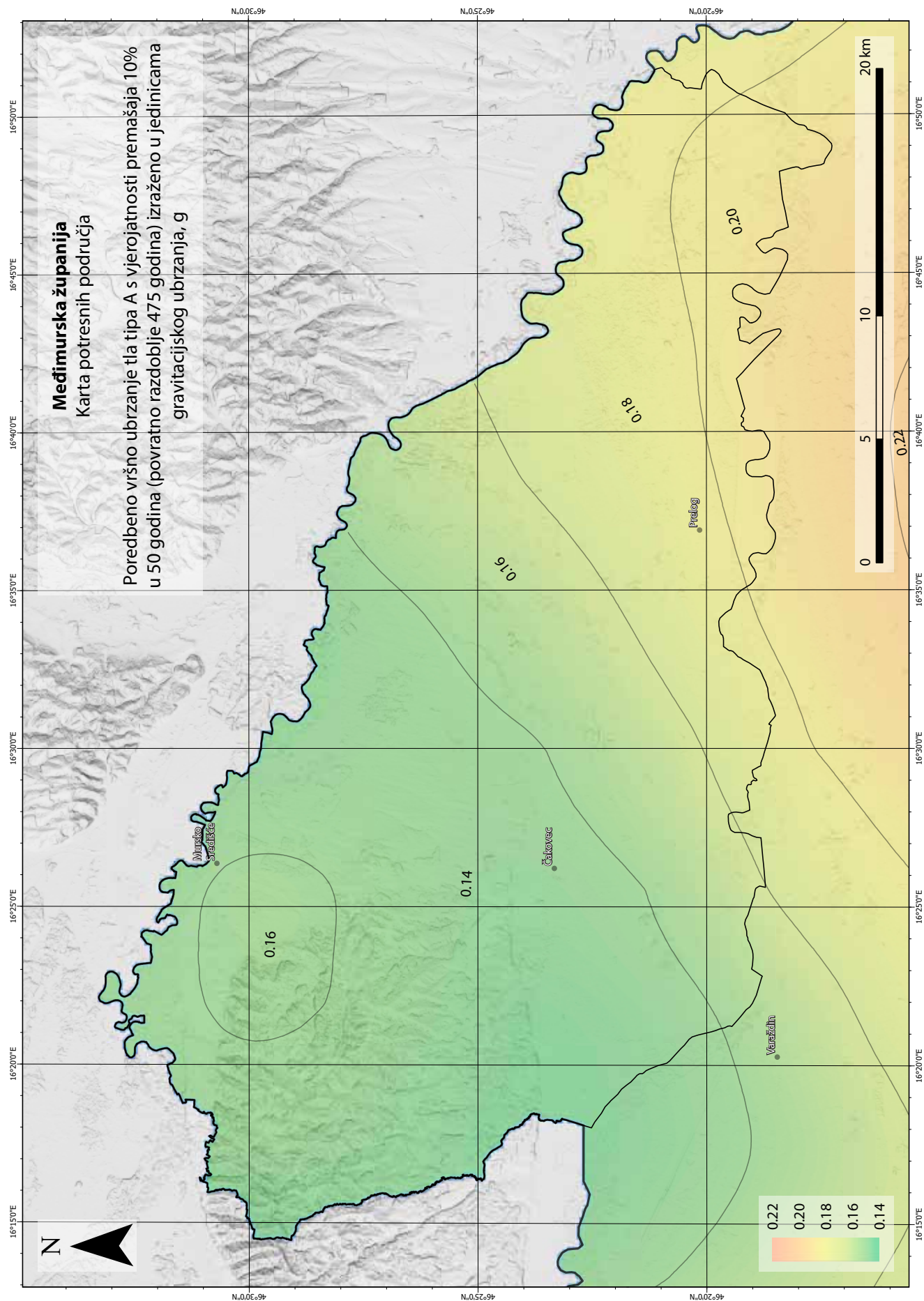


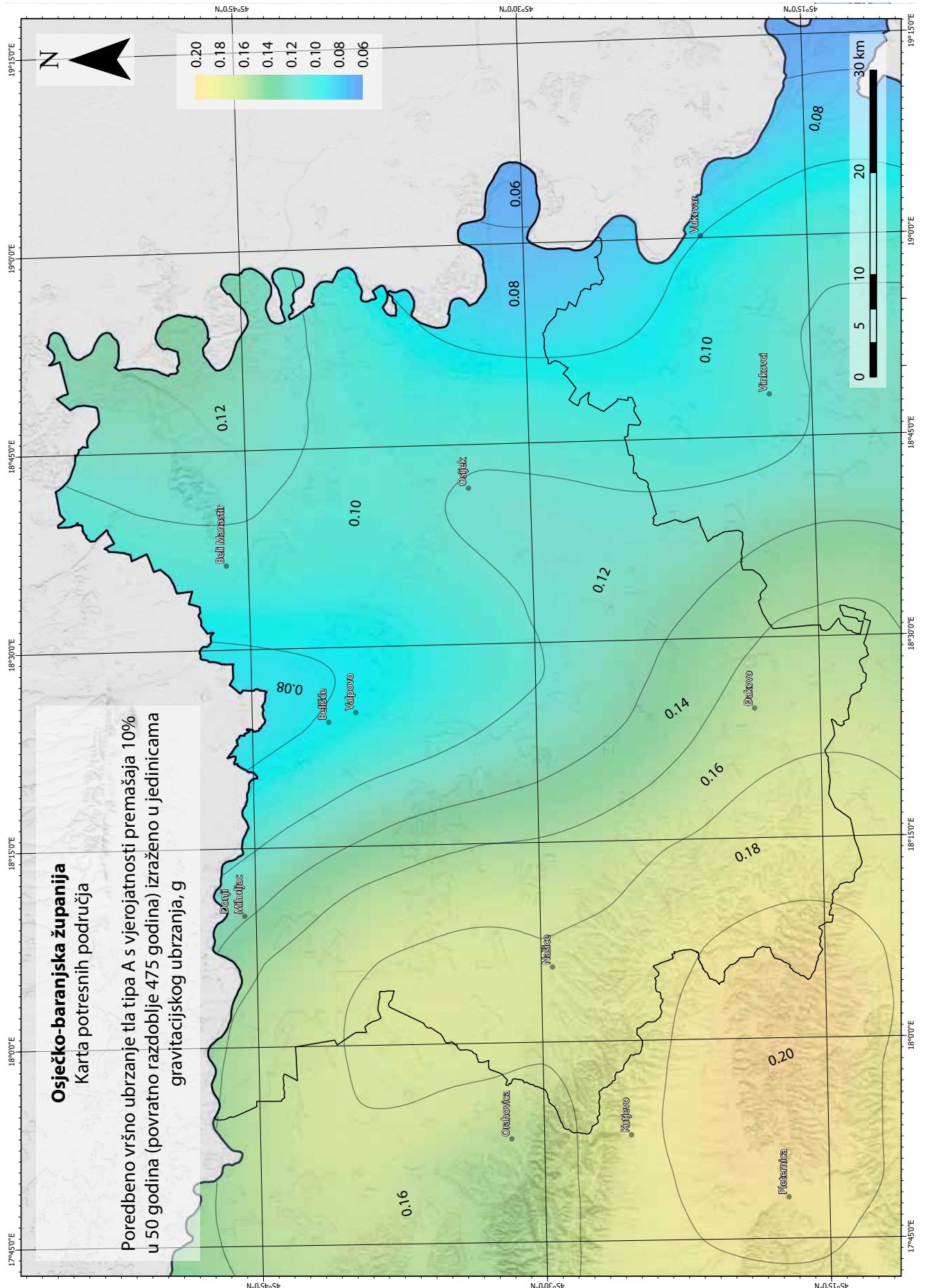


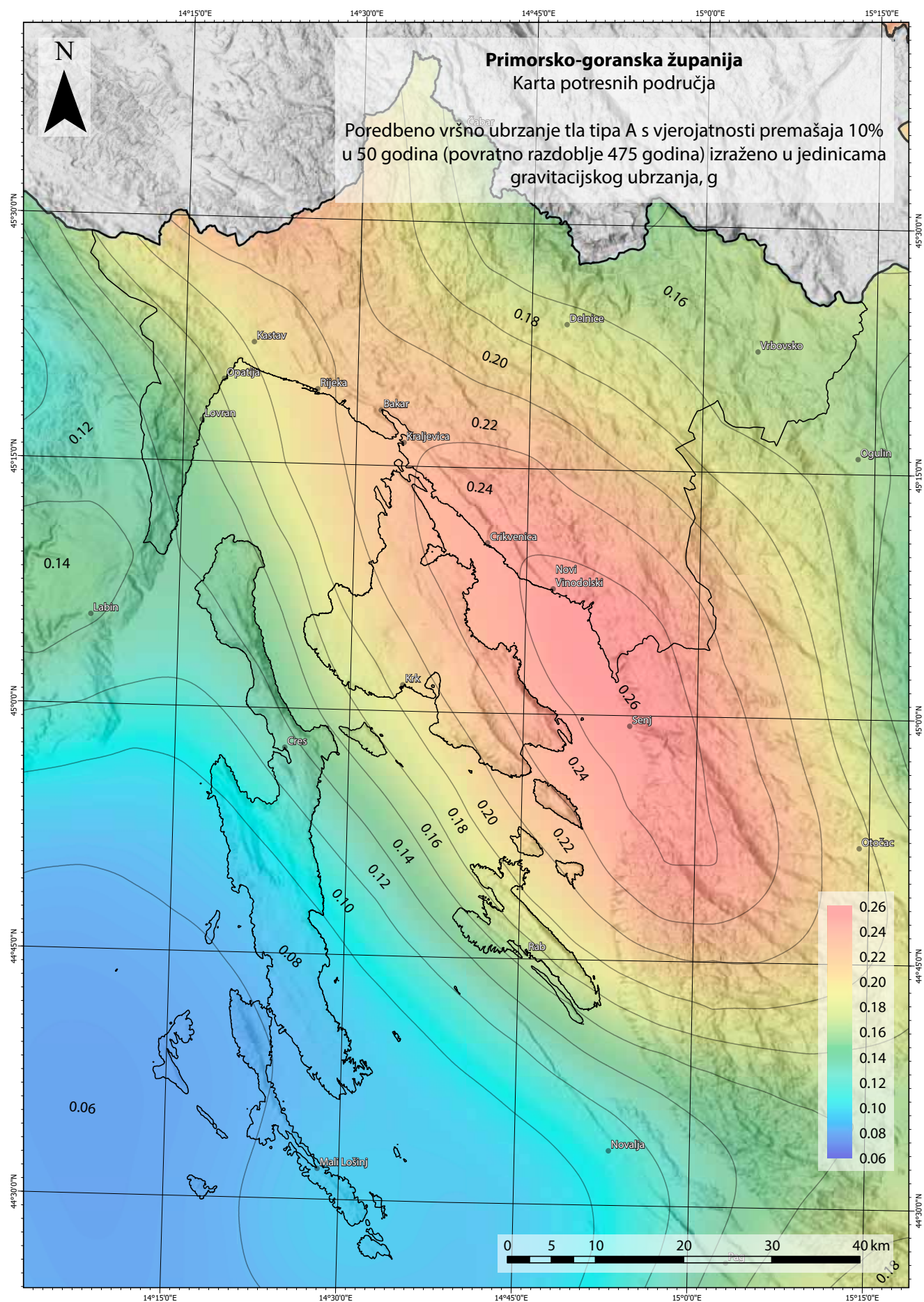


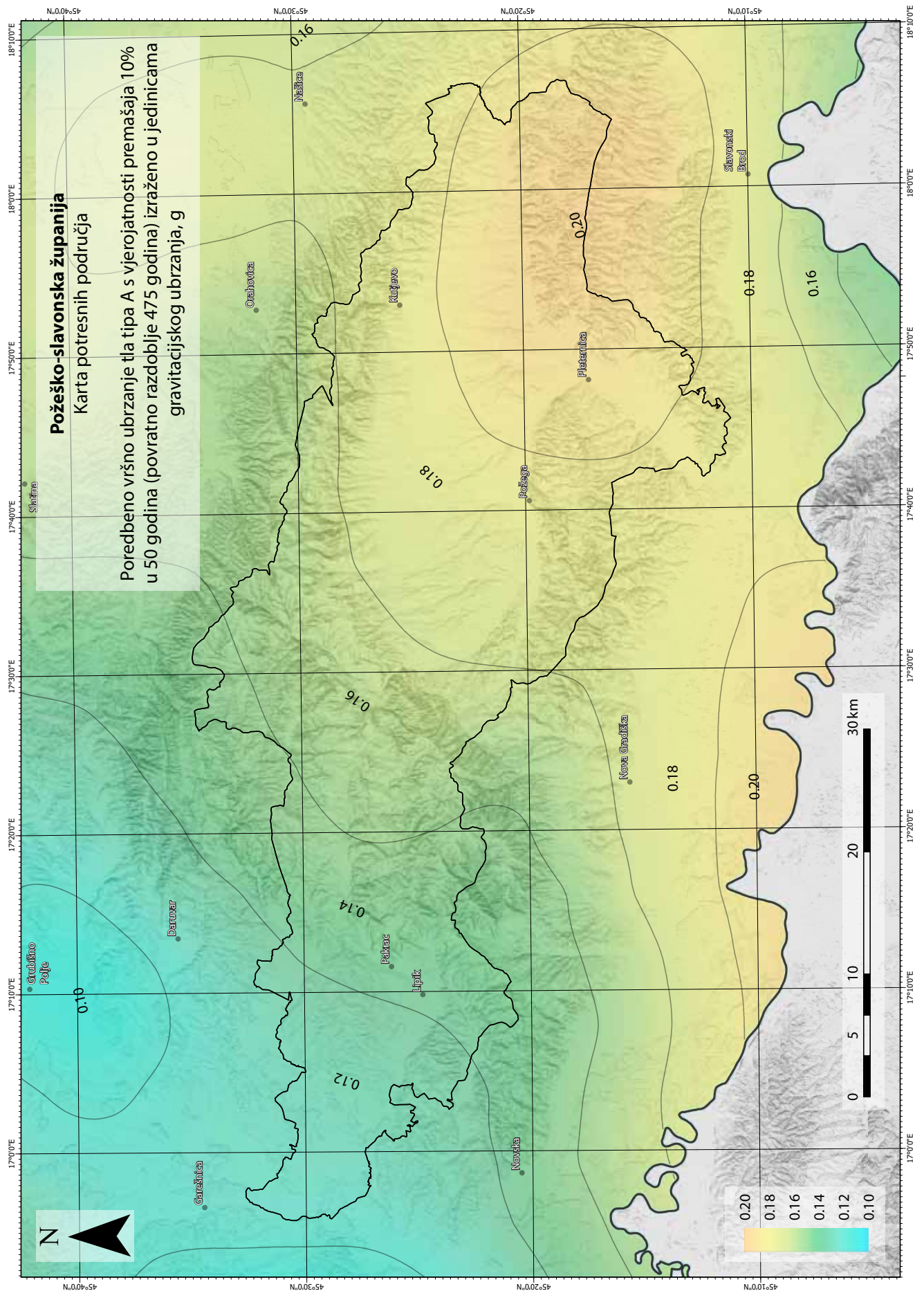


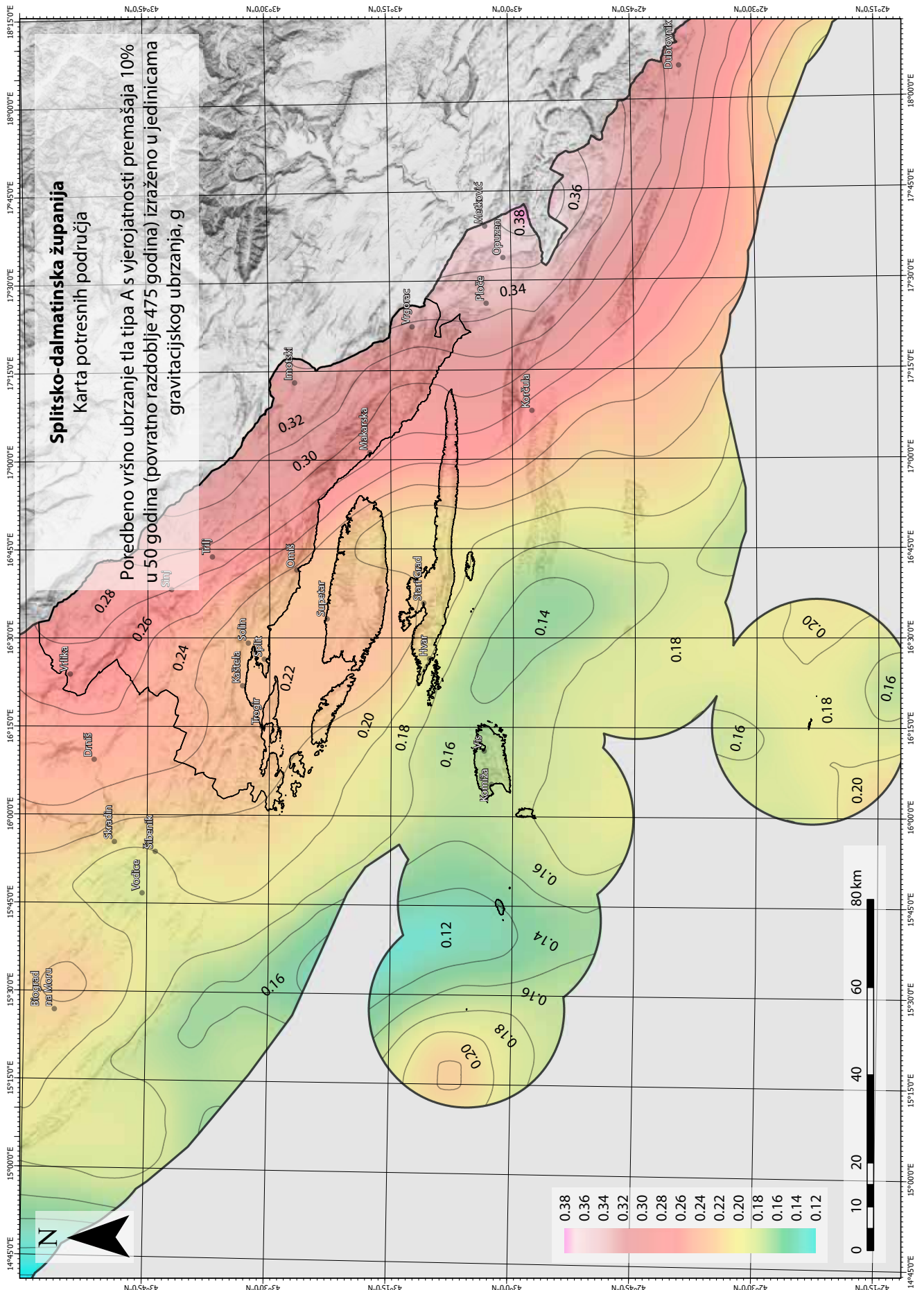


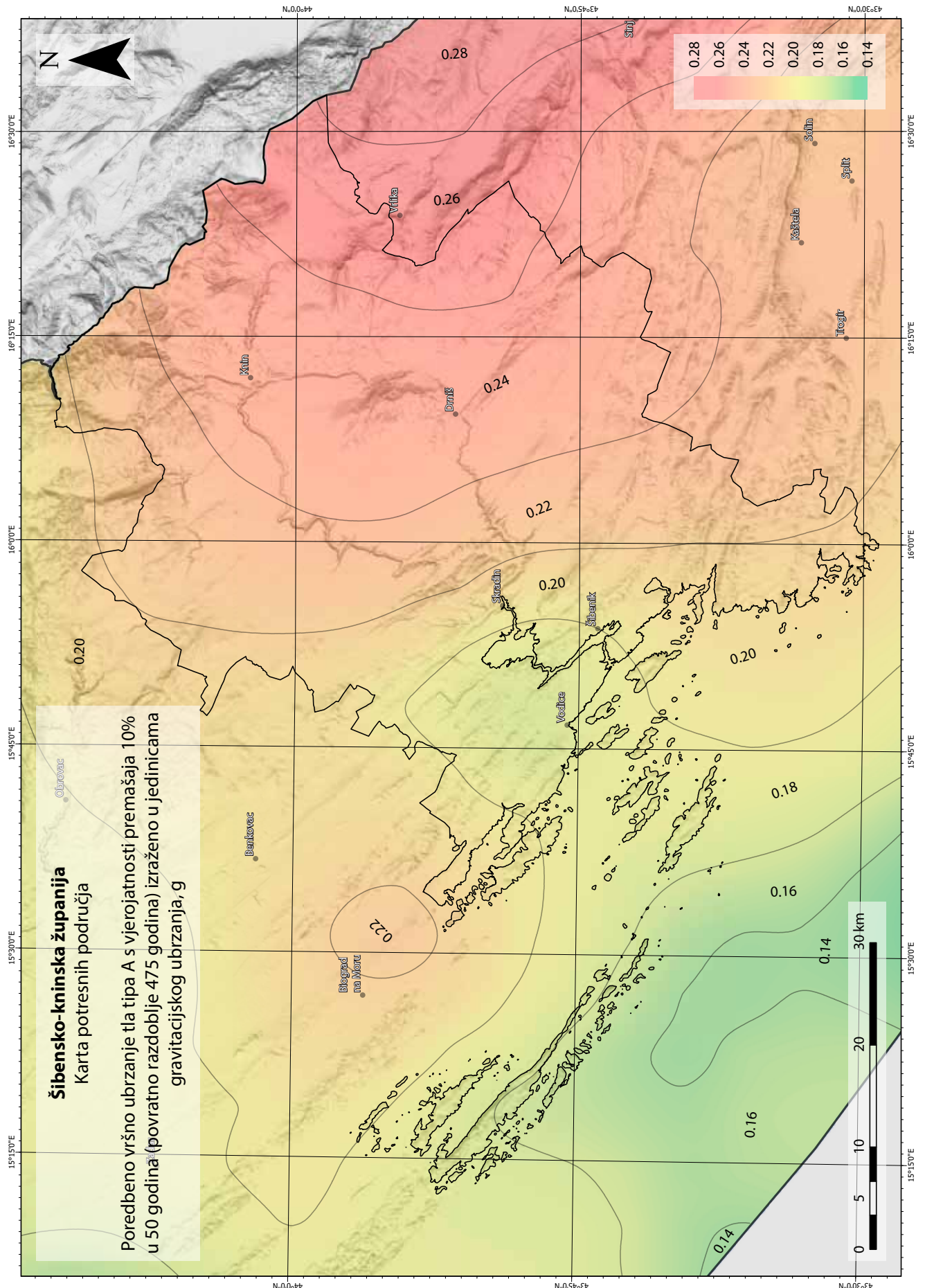


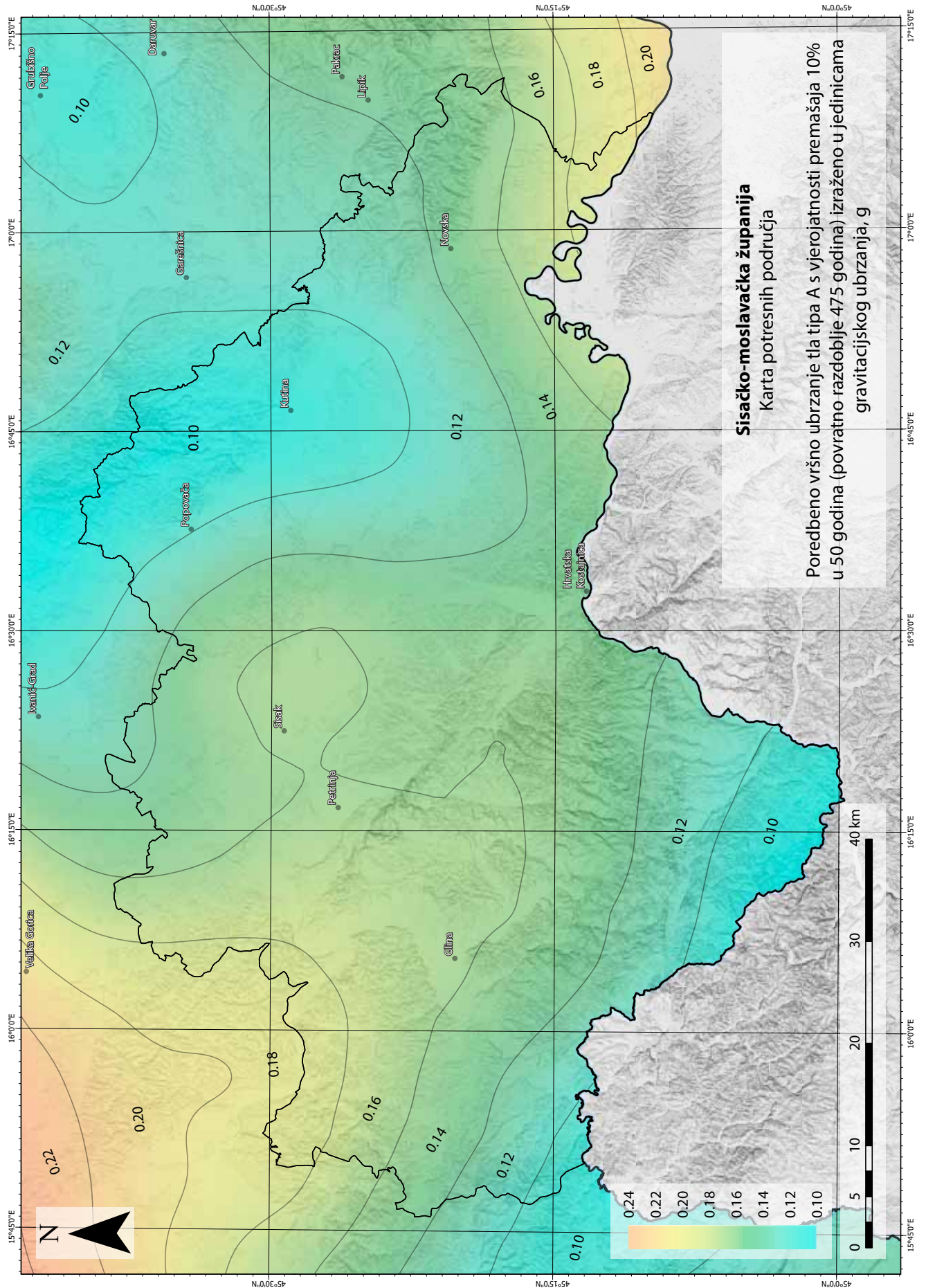


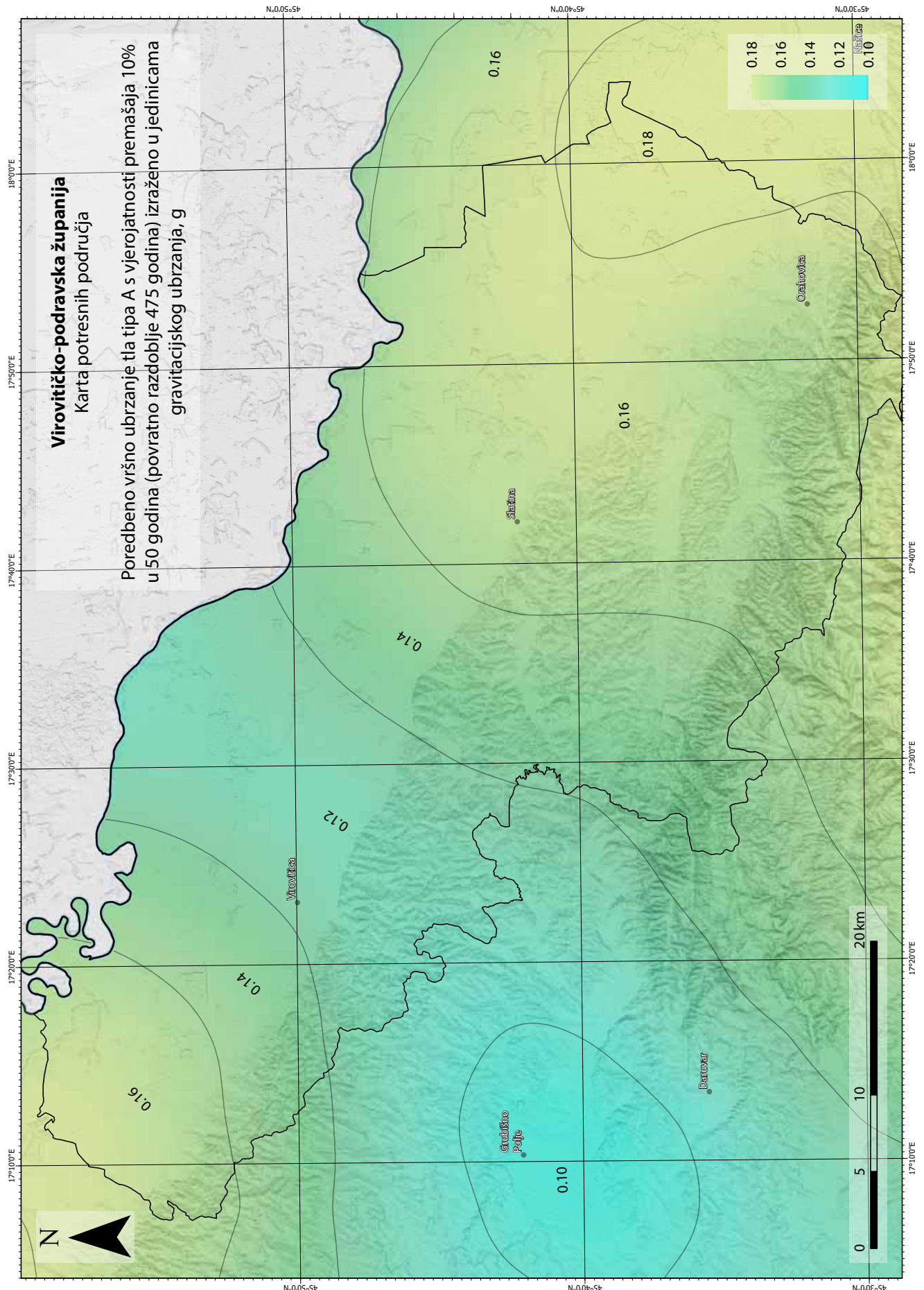


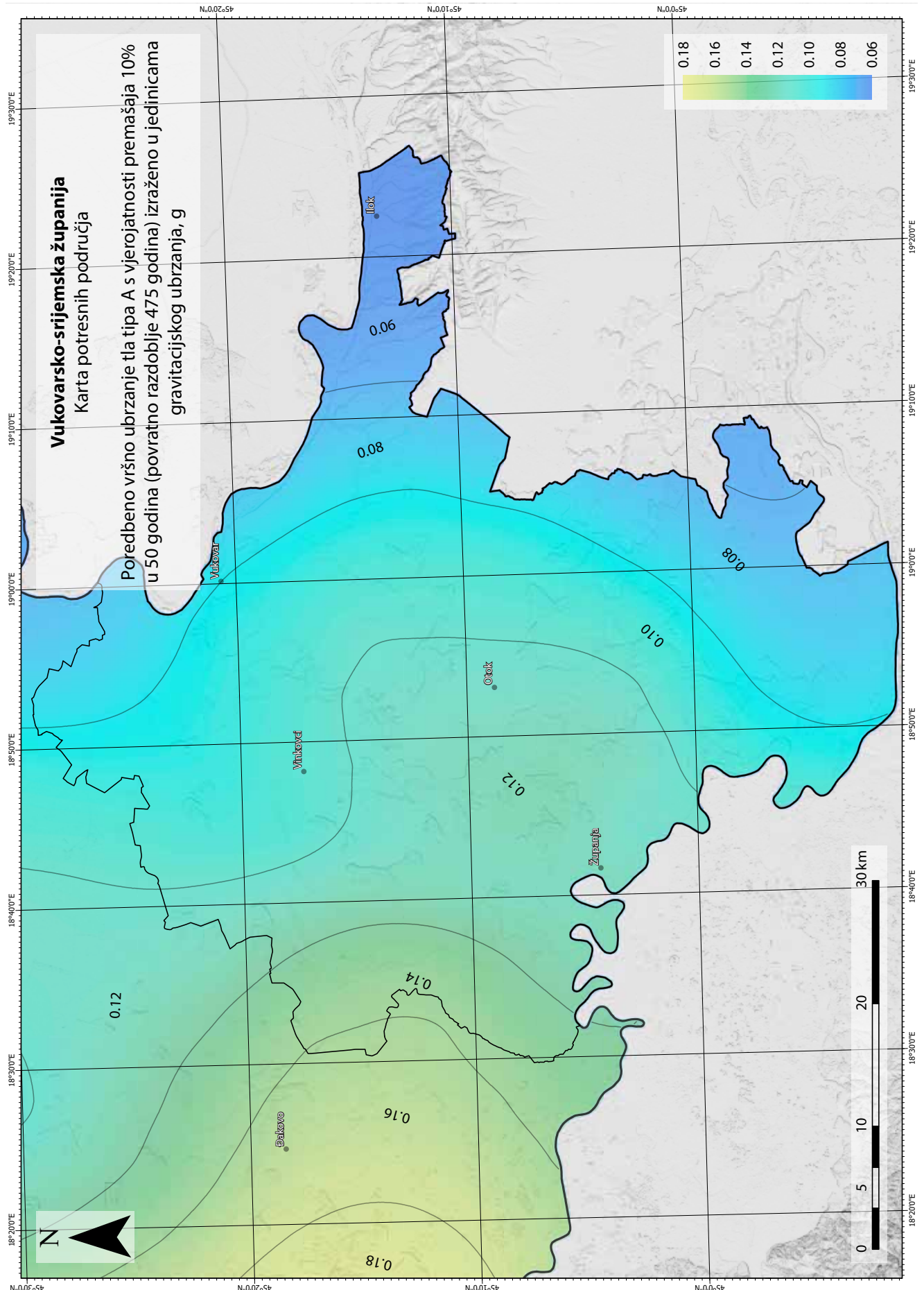


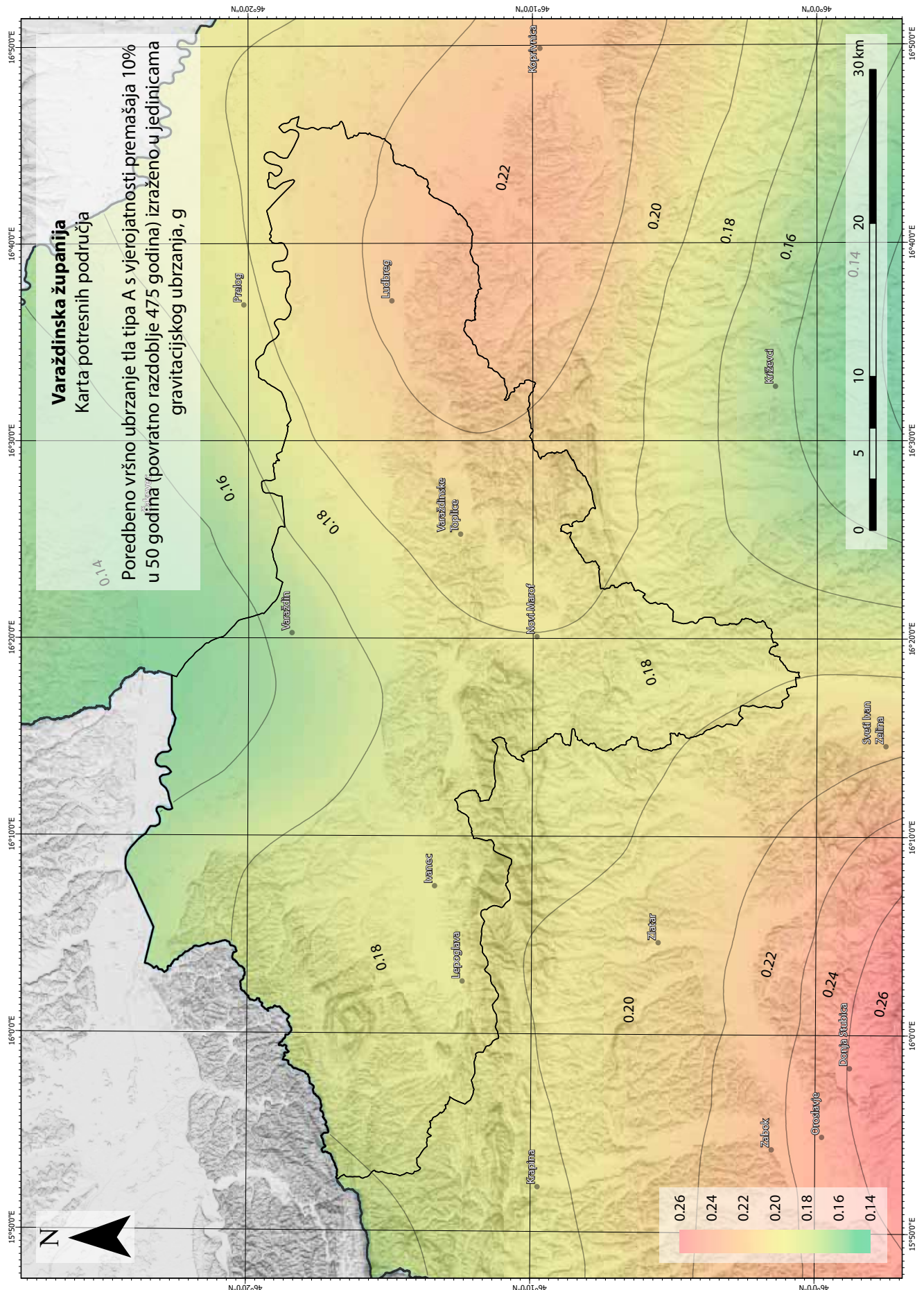


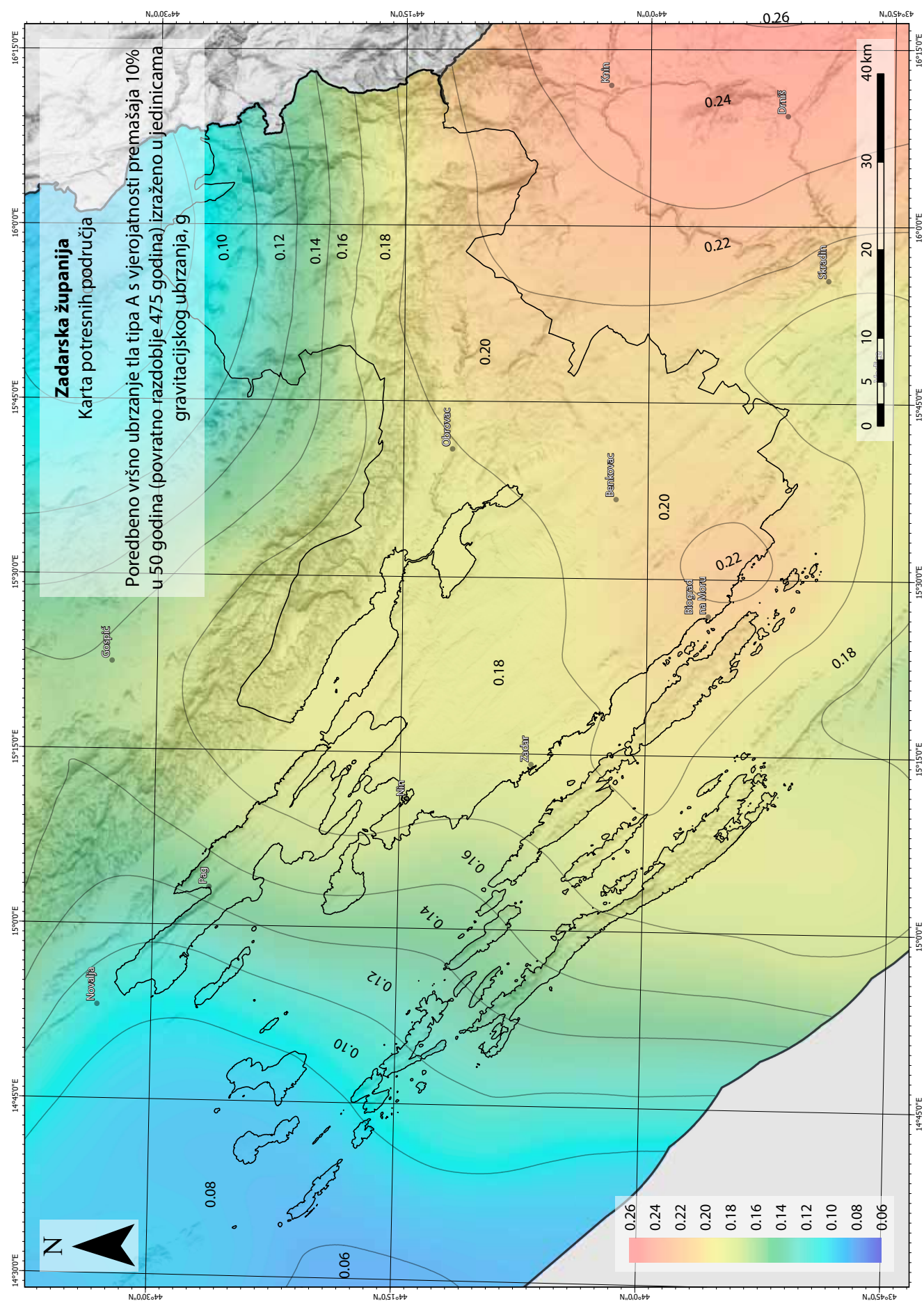


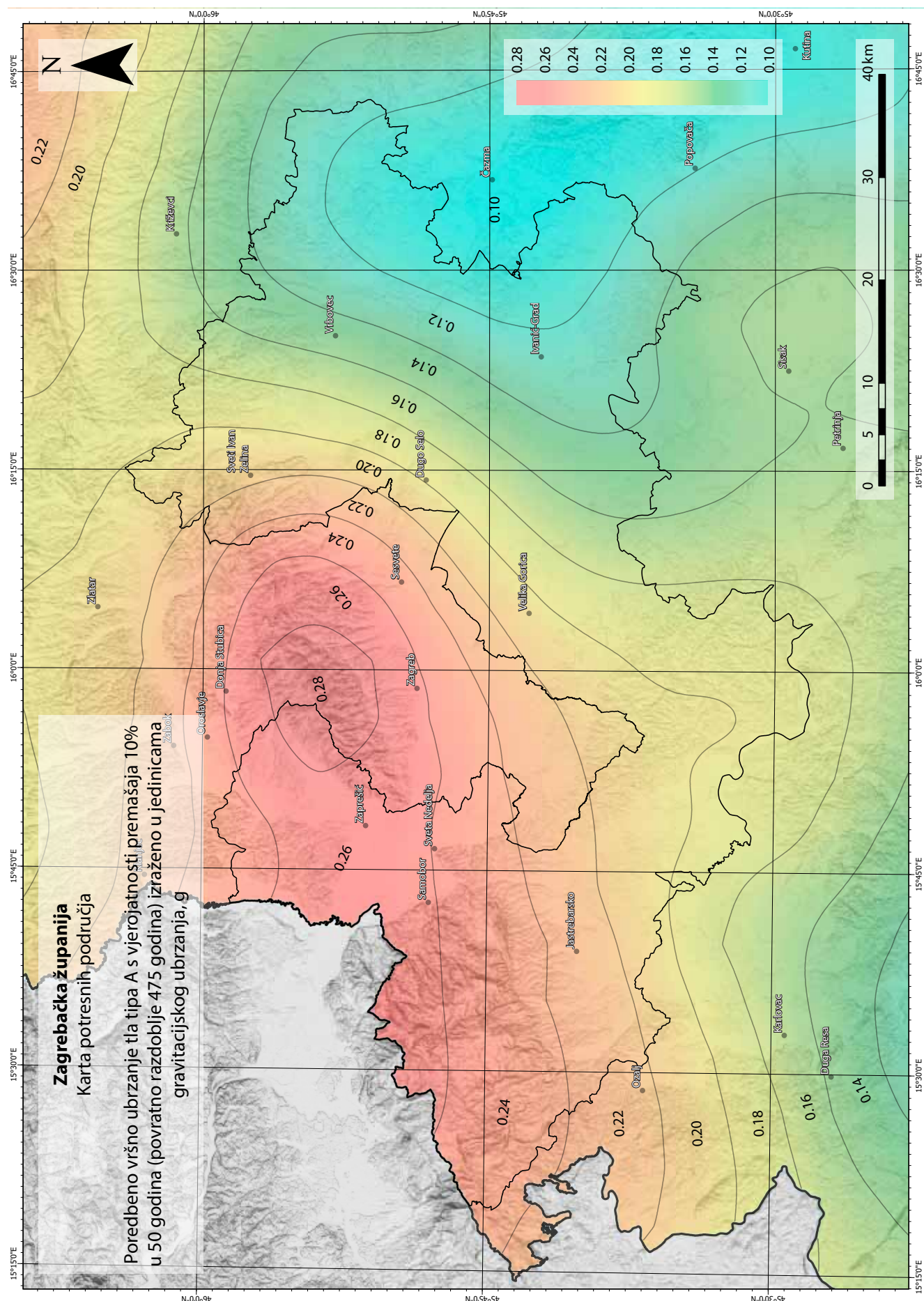




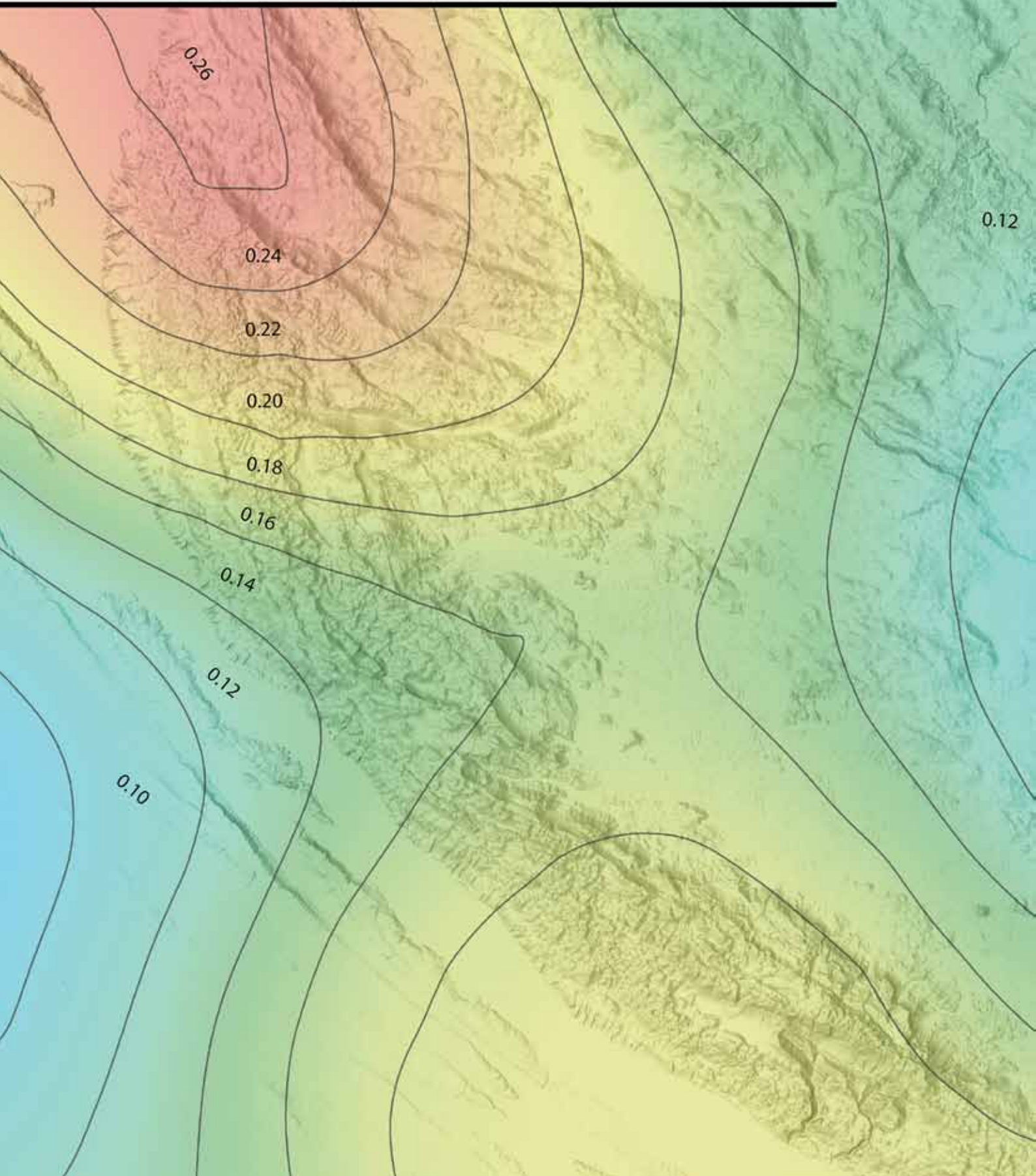








Indeks pojmov



A

akcelerograf, 19, 25, 39
atenuacijske relacije, 37, 38

D

deterministički pristup, 38
dinamički parametri građevine, 27, 37, 42, 54

E

epicentar, 6, 8, 9, 10, 17, 20, 21
epicentralna udaljenost, 12, 16, 17, 20

F

faktor dinamičkog pojačanja, 40, 41, 53

I

intenzitet, 15, 16, 17, 25, 27, 29, 47, 48
inženjerska seizmologija, 20, 36, 37
izoseiste, 15

K

karta seizmičkog hazarda, 38, 39, 46, 47, 48, 50, 51
karte potresnih područja, 46, 47, 48, 50, 51

L

lokalna magnituda, 16, 29
lokalni uvjeti tla, 17, 39, 40, 41, 54
longitudinalni valovi, 11, 12
Loveovi valovi, 11, 12

M

magnituda potresa, 11, 16, 17
makroseizmička ljestvica, 15, 16
makroseizmički intenzitet, 15
makroseizmičko polje, 15
mikroseizmički nemir, 341, 42, 43
Mohorovičićev diskontinuitet, 13
momentna magnituda, 16

P

potres, 3, 5, 8
povratno razdoblje, 38, 39, 47, 48, 49, 50, 51
površinski valovi, 12
prostorni valovi, 11, 12

R

rasjed, 7, 8, 16
rasjedna ploha, 7, 8
Rayleighjevi valovi, 12
rezonancija, 37, 42, 43

S

seizmička izloženost, 7
seizmička ranjivost, 37
seizmička refrakcija, 41
seizmički hazard (potresna opasnost), 37, 38, 39, 47, 48, 49, 50, 51
seizmički moment, 16
seizmički rizik, 37
seizmičko mikrozoniranje, 39, 40, 41
seizmograf, 19, 21, 23, 24
seizmologija, 6, 22, 23
Seizmološka služba, 23, 27
spektar mikroseizmičkog nemira, 43, 44
spektar odziva, 44
spektri ujednačenog hazarda, 44
sustav ranog upozoravanja o potresu, 25, 26

T

tektonske ploče, 9, 29
tektonski potresi, 6
tipovi tla, 41
transverzalni valovi, 11, 12, 41

U

umjetni potresi, 6
urušni potresi, 6

V

vlastita frekvencija strukture, 42, 43, 44
vlastita frekvencija tla, 42, 43, 44
vulkanski potresi, 6

Z

žarišni mehanizam, 8
žarište potresa (hipocentar), 6, 11, 20, 29

