

SEIZMIČKI RIZIK SAKRALNIH OBJEKATA NA OBRONCIMA MEDVEDNICE KAO POSLJEDICA TOPOGRAFSKIH EFEKATA

DAVOR STANKO¹, LAURA NOVAK¹, SNJEŽANA MARKUŠIĆ², MARIJAN KOVAČIĆ³

1 Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, 42000, Hrvatska

2 Sveučilište u Zagrebu Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički odsjek, Horvatovac 95, Zagreb, 10000, Hrvatska

3 Sveučilište u Zagrebu Prirodoslovno-matematički fakultet, Geološki odsjek, Horvatovac 102b, Zagreb, 10000, Hrvatska

Sažetak

Potresi koji su 2020. godine pogodili Sjeverozapadnu Hrvatsku uzrokovali su značajna oštećenja sakralnih objekata, osobito onih smještenih na izraženim topografskim lokalitetima poput grebena i strmih padina. Sakralni objekti (crkve i kapele) posebno su ranjivi zbog povijesnih faza gradnje, nadogradnji zvonika i degradacije materijala, čime dolazi do mijenjanja njihovih dinamičkih svojstava. Cilj rada je procijeniti rizik potresne rezonancije na sedam sakralnih objekata smještenih na izraženim topografskim lokalitetima, na obroncima Medvednice, primjenom spektralne analize osnovnih frekvencija objekata i tla, dobivenih HVSR metodom, odnosno mjerenjem mikrosezmičkog nemira. Analizirana je podudarnost dominantnih frekvencija tla i vlastitih frekvencija objekata na vrhovima i u podnožju padina s ciljem utvrđivanja utjecaja topografije na prostornu varijabilnost seizmičkog odziva i identifikacije lokacija s povećanim seizmičkim rizikom. Dobiveni podaci predstavljaju osnovu za daljnju procjenu seizmičke ranjivosti i planiranje mjera zaštite kulturne baštine na potresno ugroženim područjima.

Ključne riječi

Sakralni objekti, Medvednica, HVSR, topografija, mikrosezmički nemir, rezonantna frekvencija

1. Uvod

U 2020. godini, područje Sjeverozapadne Hrvatske pogodila su dva potresa od kojih je jedan na području Zagreba (Mw5.4) i jedan u okolici Petrinje (Mw6.4). Potresi su nanijeli oštećenja na sakralnim i kulturnim objektima diljem Sjeverozapadne Hrvatske (Atalić i sur. 2023), a znatna šteta uočena je na padinama Medvednice, posebice sa sjeverne strane Hrvatskog Zagorja, procijenjenog intenziteta VI-VII EMS ljestvice (Markušić i sur. 2021). Na tom području, crkve, kapele, dvorci i slične starije kulturne građevine smještene su na istaknutim topografskim lokalitetima poput vrhova brežuljaka, grebena i strmih padina.

Većina sakralnih objekata građena je na temeljima nekadašnjih ruševnih crkava koje su tijekom povijesti višekratno obnavljane i nadograđivane pri čemu su korišteni različiti građevni materijali, ali i tehnike gradnje. Zvonici su u prošlosti često bili manjih dimenzija, dok su kroz godine sazidani nanovo ili čak povišeni na temeljima starih zvonika što doprinosi njihovoj ranjivosti od potresa (Pascuttini-Juraga and Peharda 2023). Promjene konstrukcijskih karakteristika, degradacija materijala i prethodna oštećenja dodatno povećavaju seizmičku ranjivost sakralnih objekata (Zizi i sur. 2021).

Pretpostavka je da su na pojedinim lokalitetima oštećenja od potresa ponavljana (npr. potresi iz 1775., 1880., 1906., 1990. i 2020. godine). Uz stanje objekta, lokalni uvjeti tla igraju važnu ulogu seizmičkog rizika sakralnih objekata. Poznato je da može doći do koncentracije oštećenja od potresa na istaknutim uzvisinama i grebenima zbog efekta topografske amplifikacije. Općenito se mogu razmatrati dvije vrste opaženih topografskih učinaka: amplifikacija na vrhovima brjegovova i grebena te deamplifikacija u podnožju padina i u dolinama (Bard 1999).

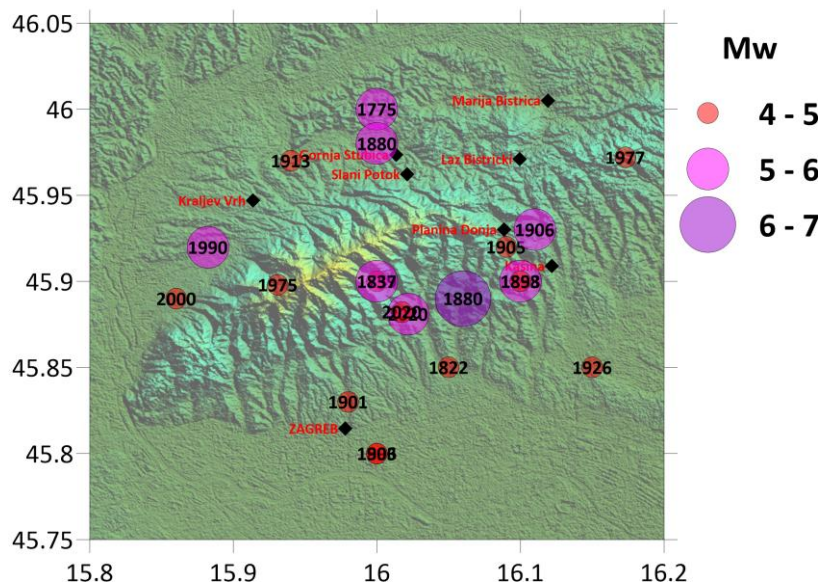
Cilj ovog rada je istražiti pojavu rizika potresne rezonancije sakralnih objekata na izraženim topografskim lokalitetima obronaka Medvednice pomoću metoda spektralne analize osnovnih frekvencija sakralnih objekata u korelaciji sa topografijom terena.

2. Metode

Analiza i procjena utjecaja topografskih efekata na seizmičku ranjivost sakralnih objekata napravljena je za sedam građevina s područja sjeverozapadne Hrvatske. Sakralni objekti su sljedeći: Crkva Uznesenja Blažene Djevice Marije (Marija Bistrica), Crkva sv. Andrije (Laz Bistrički), Crkva sv. Juraj (Gornja Stubica), Kapela sv. Fabijana i Sebastijana (Slani potok), Crkva sv. Petra i Pavla (Kašina), Crkva sv. Tri Kralja (Kraljev Vrh) i Kapela sv. Jurja (Planina Donja). Uz analizu topografskih efekata, opisana je seizmičnost istraživanog područja te lokalni geološki uvjeti kako bi se razlučio njihov osnovni utjecaj na dominantne frekvencije tla od pojačanja uzrokovanog topografijom terena.

2.1. Seizmičnost istraživanog područja

Analiza seizmičnosti istraživanog područja provedena je na osnovu podataka iz Hrvatskog kataloga potresa (Croatian Earthquake Catalogue – CEC; kontinuirano nadopunjavana verzija kataloga potresa za RH objavljena u Herak i sur. 1996, Markušić i sur. 1993, 1998, Ivančić i sur. 2002, 2006, 2018), koji uz potrese na području Hrvatske sadrži i podatke o potresima u graničnom području susjednih država. Seizmičnost istraživanog područja je umjeren (slika 1), praćena relativno rijetkim snažnim potresima što je svojstveno seizmičnosti unutar tektonske ploče, ali i umjereni jaki potresi mogu biti razorni i imati značajan utjecaj na potresnu opasnost i potresnu ugroženost.



Slika 1 Prostorna razdioba epicentara potresa ($M_w \geq 4$) prema Hrvatskom katalogu potresa za razdoblje 178. pr. Kr. – 2024. godina.

Od pouzdanih povijesnih potresa najstariji potres na području Medvednice, te unutar istraživanog područja, dogodio se 13. listopada 1775. u 6:30 GMT. Epicentar mu je bio između Bedekovčine i Gornje Stubice, a intenzitet u epicentru VII–VIII °MCS. Magnituda izračunata iz makroseizmičkih podataka je iznosila 5.7. Naročito velika šteta je bila u Krapini, Belcu, Pregradi, Zlataru, Zaboku i Svetom Križu Začretju. Crkva svete Barbare u Bedekovčini toliko je bila oštećena u potresu da su je morali srušiti i sagraditi novu (Kišpatić 1891). Unutar istraživanog područja najjači i najvažniji potres dogodio se 9. studenoga 1880. u 6:34 GMT. U Zagrebu se potres osjetio intenzitetom od VIII °MSK Ijestvice, magnituda procijenjena iz makroseizmičkih podataka iznosi 6.1, a epicentar je bio između Čučerja i Planine Gornje kod Kašine. Potres je potaknuo seriju naknadnih slabijih potresa koja je bila posebno izražena sljedećih šest mjeseci. Početkom dvadesetog stoljeća dogodio se unutar istraživanog područja jak potres, 2. siječnja 1906. u 4:26 GMT, s epicentrom u blizini Kašine. Najveći intenzitet je ocijenjen na VII–VIII °EMS, a magnituda potresa je bila 5.3.

Krajem dvadesetog stoljeća, 3. rujna 1990. godine u 08:48 UTC, dogodio se potres s epicentrom kod Kraljevog Vrha, lokalne magnitude 4.8. Maksimalni makroseizmički intenzitet u samom epicentru procijenjen je na VII stupnjeva MSK Ijestvice (Markušić i sur. 1993). Makroseizmička istraživanja provedena neposredno nakon potresa obuhvatila su široko područje, a najznačajnija oštećenja zabilježena su na području Kraljevog Vrha i okolnih naselja, gdje su dominirala oštećenja dimnjaka, pucanje nosivih zidova na starijim objektima te oštećenja krovnih konstrukcija. U novije vrijeme, najsnažniji potres unutar istraživanog područja se dogodio 22. ožujka 2020. u 5:24 UTC. Potres je bio lokalne magnitude $M_L = 5.5$ i momentne magnitude $M_W = 5.4$, s epicentrom u Markuševcu i žarištem na dubini od 7.4 km. Najveći intenzitet je bio VII–VIII °EMS, a potres se osjetio u čitavoj Sloveniji, te dijelovima Austrije, Mađarske, Češke i Bosne i Hercegovine. U dvije godine nakon glavnog potresa na području Medvednice je locirano više od 3500 naknadnih potresa.

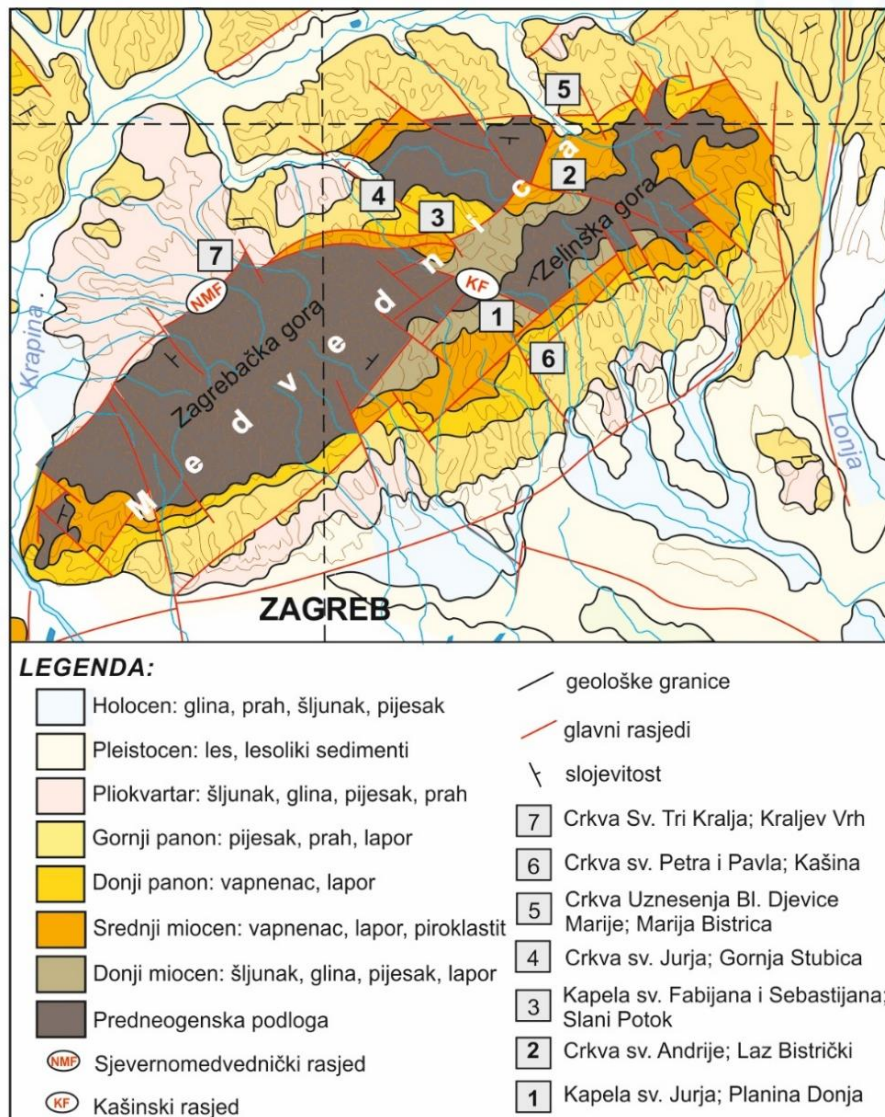
2.2. Geologija istraživanog područja

Planina Medvednica smještena je na kontaktu triju velikih geotektonskih cjelina Alpa, Dinarida i Panonskog bazena. Također, ona se nalazi blizu južnog ruba Zagreb-Zemplin lineamenta koji ujedno predstavlja zonu kontakta između Jadranske i Europske mikroploče (Schmid i sur. 2008; Ustaszewski i sur. 2009). Njezina strukturna građa posljedica je rotacije Dinaridskih jedinica iz njihovog primarnog SZ-JI smjera u današnju JZ-SI orijentaciju i sažimanja u razdoblju kasnog miocena do kvartara. Karakterizirana je antiklinalama i sinklinalama I-SI pružanja koje su omeđene reversnim rasjedima jugoistočne vergencije (Tomljenović i Csontos 2001). Najznačajniji među njima su i danas aktivni reversni rasjed na sjevernoj strani gore, te desni strike-slip rasjed poznat kao Kašinski rasjed koji dijeli čvrstu stariju jezgru Medvednice na jugozapadni dio poznat kao Zagrebačka gora i sjeveroistočni dio imena Zelinska gora (slika 2).

Građu Medvednice čine tektonizirane starije predneogenske stijene i mlađi miocensko-kvartarni sedimenti i sedimentne stijene (Basch, 1995). Predneogenske stijene na površini su otkrivene na njezinim središnjim, vršnim dijelovima. Sastoje se od čvrsto litificiranih paleozojsko-mezozojskih ortometamorfita i parametamorfita, trijaskih dolomita, jurskog ofiolitnog melanža te kredno-paleogenskih sedimentnih stijena i vulkanita (slika 2). Mlađi, pretežito slabo vezani ili nevezani sedimenti i sedimentne stijene okružuju središnji hrbat Medvednice. Sastoje se od rastresitih ili slabo vezanih klastičnih i karbonatnih stijena poput vapnenaca, pješčenjaka, pijesaka i pelita taloženih tijekom neogena i kvartara. Najstarije neogenske naslage čine donjomiocenski šljunkovito pelitni sedimenti koji su najrasprostranjeniji u zoni Kašinskog rasjeda i odvajaju predneogenske stijene Zagrebačke i Zelinske gore (slika 2). Srednjomiocenske naslage prekrivaju široke površine na južnim i sjeveroistočnim padinama Medvednice, uglavnom ih čine vapnenci, vapnenački pješčenjaci i lapori. Rastresiti pjeskovito-pelitni i laporoviti sedimenti gornjeg miocena otkriveni su na hipsometrijski nižim južnim i sjevernim padinama, dok se najmlađe pliokvartarne i kvartarne naslage sastavljene od šljunaka pijesaka i pelita pojavljuju u najnižim dijelovima Medvednice na prelazu prema dolinama rijeke Save i Krapine (slika 2).

Sakralni objekti koji su bili predmet istraživanja u ovome radu smješteni su u središnjim i sjeveroistočnim

dijelovima Medvednice na podlozi sastavljenoj od raznovrsnih slabije litificiranih ili rastresitih miocenskih i pliokvartarnih naslaga. Tako se u podlozi Kapele svetog Jurja u Planini Donjoj nalaze laporoviti sedimenti donjeg miocena (karpat), a Crkve svetog Andrije u Lazu Bistričkom srednjomiocenski (badenski) lapor koji se proslojavaju s vapnencima i vapnenačkim pješčenjacima. Kapela svetog Fabijana i Sebastijana u Slanome Potoku i Crkva svetog Jurja u Gornjoj Stubici izgrađene su na donjopanonskim laporima, a Crkva Uznesenja Blažene Djevice Marije u Mariji Bistrici i Crkva svetog Petra i Pavla u Kašini na rastresitim gornjopanonskim pjeskovitim naslagama. Na rastresitim pelitno-pjeskovitim pliokvartarnim naslagama izgrađena je Crkva Sveta Tri Kralja u Kraljevom Vrhu.



Slika 2 Geološka karta Medvednice. Isječak iz Osnovne geološke karte Republike Hrvatske 1:300000 (pojednostavljeno)

2.3. Mjerenje mikro seizmičkog nemira i ambijentalnih vibracija – HVSR metoda

Za procjenu rezonantne frekvencije, odnosno one na kojoj tlo prirodno najviše vibrira, korištena je nedestruktivna metoda HVSR – Horizontal-to-Vertical-Spectral-Ratio (Nakamura 1989). Mjerenja mikro seizmičkog nemira izvedena su korištenjem uređaja Tromino Engy 3G (Micromed, Italy). Izmjerena rezonantna frekvencija ovisi o debljini i krutosti mekih naslaga iznad čvrste podloge, a metoda se može upotrijebiti i za mjerenja vlastitih frekvencija građevine (Stanko i Markušić 2020). Svaka građevina, ovisno o svojoj visini, materijalima od kojih je izgrađena i konstrukcijskom sustavu, ima svoju jedinstvenu rezonantnu

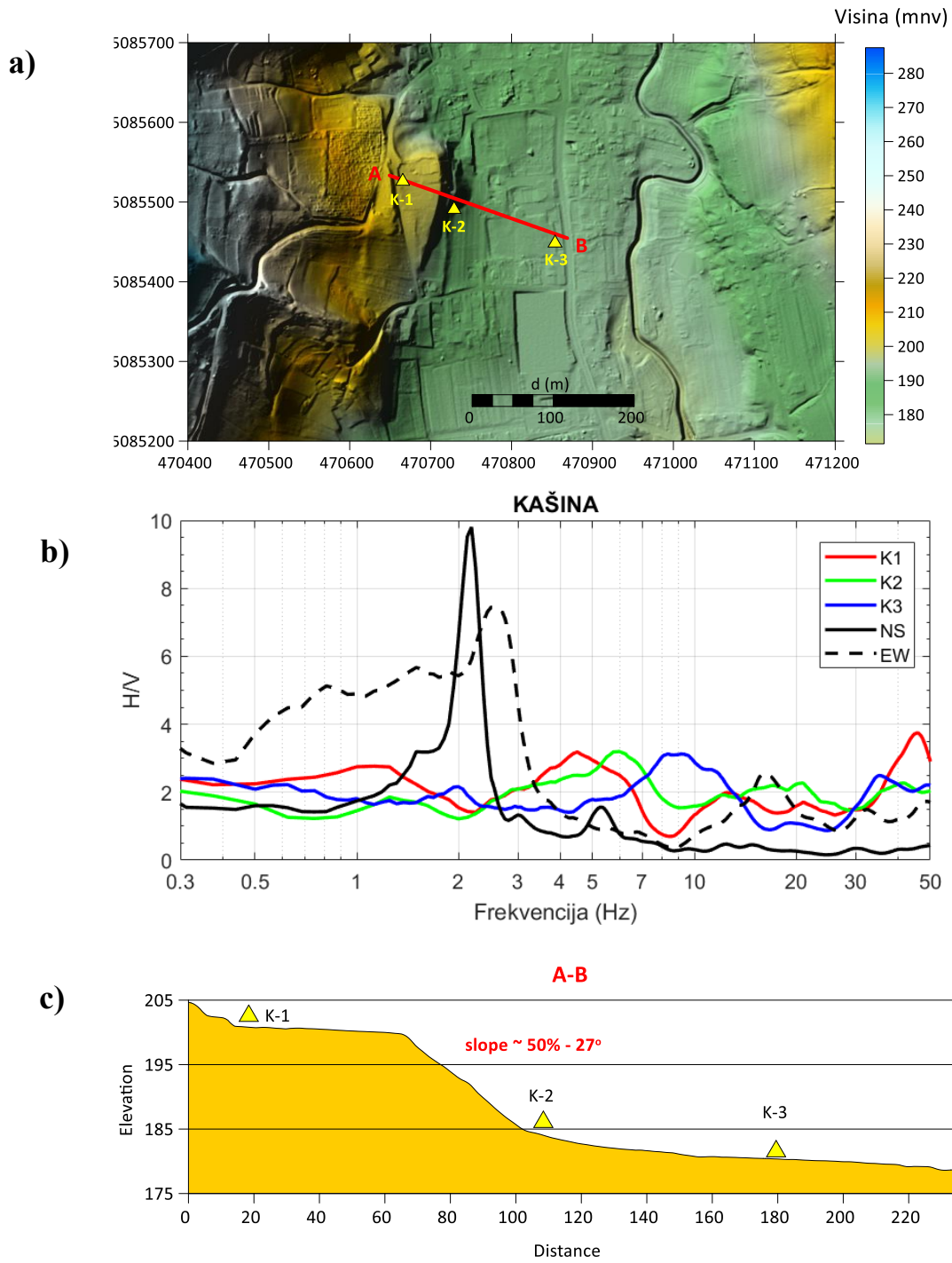
frekvenciju (Lopez i sur. 2019). Najopasniji scenarij nastaje kada se rezonantna frekvencija građevina podudara s rezonantnom frekvencijom tla te u slučaju potresa istih frekvencijskih karakteristika, može doći do teških strukturalnih oštećenja ili kolapsa. Mjerenja ambijentalnih vibracija na sakralnim objektima (prvenstveno zvoncima) i lokalnom tlu (podnožje i vrh brijega) su obavljena na sljedećim lokalitetima na obroncima Medvednice: Marija Bistrica, Laz Bistrički, Gornja Stubica, Slani Potok, Kašina, Kraljev Vrh i Planina Donja. Za potrebe analize topografije terena i visine sakralnih objekata korišten je LiDAR digitalni model reljefa i površine. U seizmičkom propisu Eurokod 8 (2004) definiran je topografski amplifikacijski faktor za nagibe veće od 15° i razliku visine vrh-podnožje brijega 30 m.

3. Rezultati

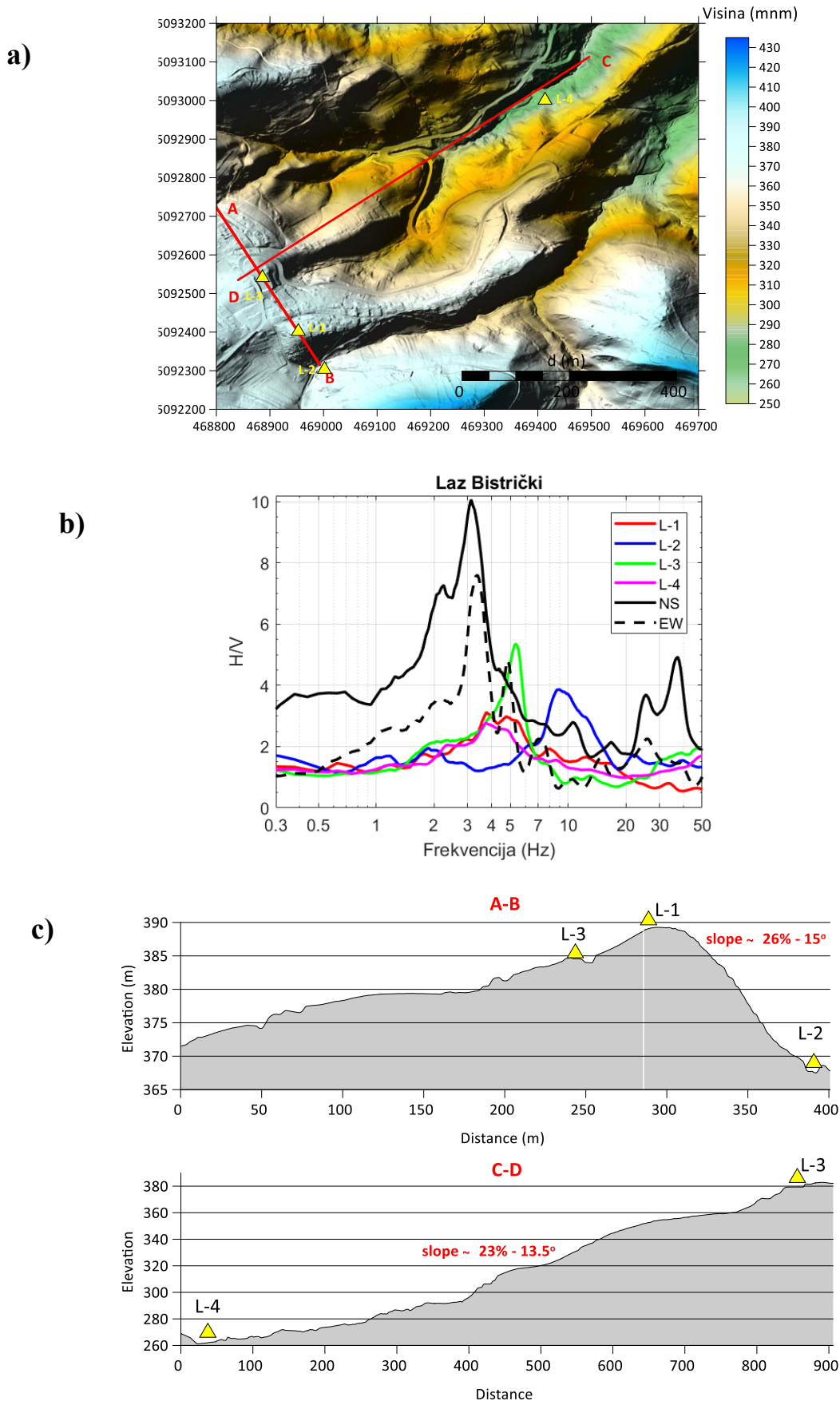
Usporedbom rezonantne frekvencije sakralnog objekta, dobivene mjerenjem ambijentalnih vibracija unutar objekta, s rezonantnom frekvencijom tla mjerenjem mikrosezmičkog nemira u neposrednoj blizini objekta, procijenjen je rizik od pojave rezonancije potres-tlo-objekt. Procjena rizika od rezonancije određena je omjerom razlike između prirodne frekvencije strukture i dominantne frekvencije tla. Što je razlika manja, veća je vjerojatnost od pojave rezonancije. Ako je omjer unutar $\pm 15\%$ smatra se da postoji visok rizik od rezonancije, između $\pm 15\%$ - 25% srednji, a iznad $\pm 25\%$ nizak potencijal rezonancije (Gosar 2010; Stanko i sur. 2017).

Područje Kašine, koje je tijekom Zagrebačkog potresa pretrpjelo najveća oštećenja, izgrađeno je od rastresitih i mekih sedimentima što može pogodovati seizmičkoj amplifikaciji. HVSR krivulje za točke K-1, K-2 i K-3 (slika 3) pokazuju prostornu varijabilnost seizmičkog odziva tla i debljine površinskih rastresitih sedimenata od 10 do 20 m (Stanko & Markušić 2020). Razlika između vlastitih frekvencija zvonika i same crkve NS i EW komponenti ukazuje na usmjereno ovisan dinamički odziv. Iako primarno frekvencije zvonika nisu u istom frekvencijskom rasponu kao obližnje tlo, rezultati upućuju na to da je povećan seizmički rizik same crkve posljedica djelovanja mekane geološke podloge i izražene topografije na većim frekvencijama. Niske dominantne frekvencije tla pogoduju rezonanciji s vitkim i visokim strukturama poput crkvenih zvonika, dok više frekvencije zahvaćaju glavni strukturalni dio crkve (Lopez i sur. 2019) što potvrđuje usporedba vlastitih frekvencija strukture i zvonika Crkve Sv. Petra i Pavla s dominantnom frekvencijom tla.

Nasuprot tome, na lokalitetima poput Laza Bistričkog i Planine Donje prevladavaju krutije srednjemiocenske i gornjomiocenske laporovite naslage, koje općenito rezultiraju povoljnijim seizmičkim odzivom tla. Međutim, rezultati ovog istraživanja upućuju na to da krutija podloga ne isključuje povišen rizik od rezonancije, osobito kada se objekt nalazi na izraženoj topografiji gdje može doći do efekta pojačanja gibanja tla. Na slici 4 prikazan je primjer topografskog područja Laza Bistričkog i usporedba frekvencija podnožja i vrha brijega sa vlastitom frekvencijom zvonika crkve sv. Andrije na vrhu malog brežuljka. Iako lokalitet karakteriziraju kruti i kompaktni srednjemiocenski lapori s proslojcima litotamnijskog vapnenca, izražena topografija pokazuje se kao važan čimbenik u pojavi rizika od potresne rezonancije što se uočava na usporednom prikazu izmjerenih vlastitih frekvencija zvonika i crkve s lokalnim tlom u istom frekvencijskom rasponu. Sličan utjecaj topografije uočen je i na području Planine Donje gdje je rizik potresne rezonancije visok, unatoč povoljnim geološkim uvjetima, što potvrđuju i opažena oštećenja nakon Zagrebačkog potresa.



Slika 3 a) Digitalni model reljefa - Kašine (LiDAR, izvor: DGU Hrvatska), b) usporedba osnovnih frekvencija (NS i EW komponente) crkve Sv. Petra i Pavla (K-1) s frekvencijama lokalnog tla na područja Kašine c) Prikaz dvodimenzionalnog visinskog profila A-B s točkama mjerenja K-1, K-2 i K-3.



Slika 4 a) Digitalni model reljefa - Laz Bistrički (LiDAR, izvor: DGU Hrvatska), b) usporedba osnovnih frekvencija (NS i EW komponente) crkve Sv. Andrije (L-3) s frekvencijama lokalnog tla na područja Laza Bistričkog c) Prikaz dvodimenzionalnog visinskog profila A-B i C-D s točkama mjerenja L-1, L-2, L-3 i L-4.

Iako je podudarnost frekvencije objekta i tla neposredni preduvjet za pojavu rezonancije, dominantne frekvencije tla u velikoj su mjeri određene geološkom podlogom i topografskim položajem. Mekši i slabije konsolidirani sedimenti poput holocenskih i pontskih rastresitih pjeskovitih naslaga i lapora, karakterizirani su nižim vlastitim frekvencijama i većom seizmičkom amplifikacijom (Stanko i Markušić 2020; 2024) čime se povećava vjerojatnost njihova podudaranja s vlastitim frekvencijama vitkih povijesnih konstrukcija, osobito zvonika. Kod sakralnih građevina i razmatranja npr. empirijskih relacija za procjenu vlastitih frekvencija (npr. zbog nedostupnosti i nemogućnosti provedbe ambijentalnih vibracija), trebalo bi uzeti u obzir uz visinu i duljinu i širinu objekta (Lopez i sur. 2019), međutim taj dio predstavlja problem s obzirom na nedostupnost podataka o visini i tlocrtu kod većine sakralnih objekata. Za većinu sakralnih objekata dostupni su podaci o visini objekta, dok su za pojedine objekte visine procijenjene iz digitalnog modela površine. Sumarni prikaz rezultata i procjena rizika na pojavu potresne rezonancije, prikazani su u Tablici 1.

Analiza vlastitih frekvencija objekata i tla pokazuje da se kod lokacija s izraženijim topografskim položajem i nepovoljnijom geološkom podlogom (rastresiti i meki sedimenti) češće javljaju uvjeti bliski rezonanciji zbog amplifikacijskih efekata, što je u skladu s procjenama višeg seizmičkog rizika. Međutim i na povoljnijim geološkim uvjetima (npr. kruti laporoviti materijali), efekti pojave rezonancije i amplifikacije ne mogu se skroz zanemariti. Topografski položaj dodatno modificira frekvencijski sadržaj i amplitudu gibanja tla zbog refleksije i fokusiranja seizmičkih valova na grebenima i strmim padinama, čime se lokalno stvaraju nepovoljniji uvjeti za konstrukcije (Massa i sur. 2014). U tom kontekstu, seizmički rizik sakralnih objekata na obroncima Medvednice ne proizlazi isključivo iz konstrukcijskih karakteristika građevina, već je rezultat nepovoljne kombinacije topografskih efekata, lokalnih geoloških uvjeta i dinamičke interakcije tla i konstrukcije. Razmatranje dinamike interakcije objekta i gibanja tla uslijed potresa te pojave oštećenja u tom segmentu je vrlo složena jer se radi o nekoliko efekata: 1) klasična oštećenja objekta zbog slabosti (starosti) konstrukcije i tipologije gradnje iz određenog doba, 2) oštećenja zbog same jačine i blizine potresa, 3) oštećenja zbog klasične pojave 1D rezonancije tlo-građevina, 4) oštećenja uslijed pojave tzv. trostruke 2D rezonancije topografija-tlo-građevina i 5) 3D efekti usmjerenosti i polarizacije na topografski izraženim vrhovima i 6) ostali geo-hazardni efekti nastali uslijed potresa.

Tablica 1 Sumarni prikaz rezultata i procjena rizika na pojavu potresne rezonancije.

Lokacija	Objekt	Geologija	Nagib terena (%)	Visina Zvonik (m)	f_0 (NS i EW) (Hz)	f_0 (NS i EW) (Hz)	f_0 vrh (Hz)	f_0 podnožje (Hz)	Procjena rizika od rezonancije
Marija Bistrica	Crkva Uznesenja Blažene Djevice Marije	Holocen	8	62	1.75	4.04	1.88	4.63	Visoka
		Pont – rastresite pjeskovite		13.8	1.78	3.67			
Laz Bistrički	Crkva sv. Andrije	Baden – lapori s vapnencima	26	20*	3.13	4.38	3.94	3.65	Visoka
		Panon		10*	3.38	4.86			
Gornja Stubica	Crkva sv. Juraj	Holocen - lapori	15	48	2.38	3.31	1.81	4.34	Umjerena
		Pont		15	2.39	3.13			
Slani Potok	Kapela sv. Fabijana i Sebastijana	Panon lapori	26	19	4.56	8.75	11.25	24.40	Umjerena
		Panon lapori		7.5	4.97	8.00			
Kašina	Crkva sv. Petra i Pavla	Pont – rastresite pjeskovite	22	24.4	2.19	5.32	4.60	8.92	Visoka
		Pliokvartar – rastresiti pelitno pjeskoviti		16.1	2.59	4.52			
Kraljev Vrh	Crkva sv. Tri Kralja	Pliokvartar – rastresiti pelitno pjeskoviti	17	26	1.44	4.34	2.65	2.42	Umjerena
		Pliokvartar – rastresiti pelitno pjeskoviti		18	1.46	4.89			
Planina Donja	Kapela sv. Jurja	Neogen - lapori	50	23.3	2.81	4.18	4.56	3.06	Visoka
				9.6	3.56	3.96			

4. Zaključak

Mjerenje ambijentalnih vibracija može poboljšati razumijevanje dinamičkih odziva sakralnih objekata. Ponavljanjem mjerenja moguće je pratiti promjene u rezonantnoj frekvenciji zgrade, pogotovo nakon potresa. Smanjenje frekvencije može ukazivati na smanjenje krutosti konstrukcije uslijed oštećenja, starenja materijala ili drugih degradacijskih procesa uslijed određenih hazardnih pojava. Podaci iz HVSR analize mogu biti ključni za projektiranje mjera ojačanja koje će promijeniti dinamičke karakteristike zgrade i učiniti je sigurnijom, pogotovo iz aspekta pojave rezonancije potres-tlo-građevina ili topografija-tlo-građevina. HVSR metoda i mjerenja ambijentalnih vibracija, kao ekonomično i neinvazivno rješenje, igraju ključnu ulogu u analizi seizmičke ranjivosti građevina i upravljanju geotehničkim rizicima. Na topografski izraženim lokalitetima ključno je detaljno analizirati potencijalni utjecaj sekundarnih pojava uzrokovanih potresom, poput koseizmičkih klizišta, kako bi se osigurala cjelovita procjena stabilnosti terena i objekata.

Na temelju proučavanja pojedinačnih sakralnih objekata i pripadajućih geoefekata moguće je steći vrijedne spoznaje o tome koje su lokacije podložne seizmičkoj ranjivosti. Za potrebe detaljnijeg uvida u ranjivost navedenih sakralnih objekata potrebno je napraviti opsežna interdisciplinarna istraživanja koja obuhvaćaju temeljite povijesne analize, terenska mjerenja te izradu i primjenu numeričkih modela.

Zahvala

Ovaj rad financirala je Hrvatska zaklada za znanost projektom "Amplifikacija seizmičkoga gibanja tla uzrokovana topografskim efektima u Sjevernoj Hrvatskoj" [HRZZ-IP-2022-10-1296, HRZZ-DOK-2025-02-2377].

Literatura

- Atalić, J., Demšić, M., Baniček, M., Uroš, M., Dasović, I., Prevolnik, S., Kadić, A., Šavor Novak, M. and Nastev, M., (2023) 'The December 2020 magnitude (Mw) 6.4 Petrinja earthquake, Croatia: seismological aspects, emergency response and impacts. *Bulletin of Earthquake Engineering*', 21 (13), pp. 5767–5808.
- Bard, P. Y. (1999) *Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*.
- Basch, O. (1995): *Geološka karta Medvednice. U: Geološki vodič Medvednice* (ur. K. Šikić). Institut za geološka istraživanja, Zagreb
- EN 1998-5 (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects* [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]
- Gosar, A., (2010) 'Natural Hazards and Earth System Sciences Site effects and soil-structure resonance study in the Kobarid basin (NW Slovenia) using microtremors', *Hazards Earth Syst. Sci.*
- Herak, M., Herak, D. and Markušić, S. (1996) 'Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908–1992', *Terra Nova*, 8 (1), pp. 86–94.
- Ivančić, I., Herak, D., Herak, M., Allegretti, I., Fiket, T., Kuk, K., Markušić, S., Prevolnik, S., Sović, I., Dasović, I. and Stipčević, J. (2018) 'Seismicity of Croatia in the period 2006-2015', *Geofizika*, pp. 69.–98.
- Ivančić, I., Herak, D., Markušić, S., Sović, I. and Herak, M. (2006) 'Seismicity of Croatia in the period 2002-2005', *Geozifika*, 23 (2), pp. 87.–103.
- Ivančić, I., Herak, D., Herak, M., Markušić, S., Sović, I., Herak, M. (2002) 'Seismicity of Croatia in the period 1997-2001', *Geofizika*, 18-19, pp. 17-29.
- Kišpatic, M. (1981) *Potresi u Hrvatskoj. Rad Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti*, 13, pp. 81–164.
- Lopez, S., D'amato, M., Ramos, L., Laterza, M. and Lourenço, P. B. (2019) 'Simplified formulations for

- estimating the main frequencies of ancient masonry churches', *Frontiers in Built Environment*, pp. 5.
- Markušić, S., Stanko, D., Penava, D., Ivančić, I., Oršulić, O. B., Korbar, T. and Sarhosis, V. (2021) 'Destructive m6.2 Petrinja Earthquake (Croatia) in 2020—Preliminary multidisciplinary research', *Remote Sensing*, 13 (6).
- Markušić, S., Herak, D., Ivančić, I., Sović, I., Herak, M. and Prelogović, E. (1998) 'Seismicity of Croatia in the period 1993–1996 and the Ston-Slano earthquake of 1996', *Geofizika*, 15, 83–101.
- Markušić, S., Herak, D., Sović, I. and Herak, M. (1993) Seismicity of Croatia in the period 1990–1992. *Geofizika*, 10, pp. 39–41.
- Massa, M., Barani, S. and Lovati, S. (2014) 'Overview of topographic effects based on experimental observations: Meaning, causes and possible interpretations' *Geophysical Journal International*, 197 (3), pp. 1537–1550.
- Nakamura, Y. (1989) A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research*, 30, 25–33.
- Pascuttini-Juraga, V. and Peharda, I. (2023) 'Posljedice zagrebačkog i petrinjskog potresa na kulturnim dobrima Varaždinske i Međimurske županije – oštećenja i hitne mjere zaštite', *Godišnjak zaštite spomenika kulture Hrvatske*, 46/47, pp. 207–218.
- Schmid, S. M., Bernoulli, D., Fügenschuh, B., Matenco, L., Schefer, S., Schuster, R., Tischler, M. and Ustaszewski, K. (2008) 'The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: Correlation and evolution of tectonic units. *Swiss Journal of Geosciences*', 101 (1), pp. 139–183.
- Stanko, D. and Markušić, S. (2024) 'Site amplification model for Croatia estimated by random vibration theory-based site response analysis', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 179.
- Stanko, D., Markušić, S., Strelec, S. and Gazdek, M. (2017) 'HVSAR analysis of seismic site effects and soil-structure resonance in Varaždin city (North Croatia)' *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, pp. 666–677.
- Tomljenović, B. and Csontos, L. (2001) 'Neogene-quadernary structures in the border zone between Alps, Dinarides and Pannonian Basin (Hrvatsko zgorje and Karlovac basins, Croatia)', *International Journal of Earth Sciences*, 90 (3), pp. 560–578.
- Ustaszewski, K., Schmid, S. M., Lugović, B., Schuster, R., Schaltegger, U., Bernoulli, D., Hottinger, L., Kounov, A., Fügenschuh, B. and Schefer, S. (2009) 'Late Cretaceous intra-oceanic magmatism in the internal Dinarides (northern Bosnia and Herzegovina): Implications for the collision of the Adriatic and European plates', *Lithos*, 108 (1–4), pp. 106–125.
- Zizi, M., Rouhi, J., Chisari, C., Cacace, D. and De Matteis, G. (2021) 'Seismic vulnerability assessment for masonry churches: An overview on existing methodologies', *Buildings*, 11 (12).