

asist. dr. Anže Babič, univ. dipl. inž. grad.
anze.babic@fgg.uni-lj.si



doc. dr. Jure Žižmond, univ. dipl. inž. grad.
jure.zizmond@fgg.uni-lj.si



prof. dr. Matjaž Dolšek, univ. dipl. inž. grad.
matjaz.dolsek@fgg.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in
geodezijo,
Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in
računalništvo (IKPIR),
Jamova 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK 364-781.2:624.042.7(497.4)



50 LET
INŠTITUT ZA KONSTRUKCIJE,
POTRESNO INŽENIRSTVO
IN RAČUNALNIŠTVO

POTRESNO TVEGANJE STAVBNEGA FONDA V SLOVENIJI

SEISMIC RISK OF THE BUILDING STOCK IN SLOVENIA

Povzetek

Za racionalno odločanje glede krepitve potresne odpornosti grajenega okolja je treba zagotoviti nepristranske informacije o potresnem tveganju, ki jih zaradi nizke frekventnosti močnih potresov ni mogoče vzpostaviti z izkušnjami. V ta namen izvedemo fizikalno osnovani analizi potresnega tveganja stavbnega fonda v Sloveniji. S časovno opredeljeno analizo potresnega tveganja ocenimo povprečne posledice vseh možnih potresov v izbranem časovnem intervalu, kar je osnova za načrtovanje krepitve potresne odpornosti skupnosti. Z analizo tveganja na osnovi potresnega scenarija pa se ovrednotijo posledice potresnega dogodka, določenega z magnitudo in epicentrom potresa. Te informacije so lažje razumljive in so lahko koristne tudi na področju civilne zaščite. V obeh analizah uporabimo stohastičen model potresne ranljivosti stavbnega fonda, ki upošteva negotovosti zaradi omejenega poznavanja stavb. Rezultati časovno opredeljene analize tveganja kažejo, da je v stavbnem fondu od 31 tisoč do 168 tisoč stavb oz. delov stavb, za katere je verjetnost prekoračitve stanja popolne poškodovanosti v 50 letih višja od 1 %, kar bi lahko predstavljalo mejno vrednost dolgoročno sprejemljivega tveganja. Z analizo potresnega tveganja na osnovi potresnega scenarija, ki jo izvedemo za potresni scenarij, definiran z magnitudo 6,1 in epicentrom 5 km severno od centra Ljubljane, ter ob upoštevanju predpostavk modela potresnega tveganja smo ugotovili, da bi število smrtnih žrtev zaradi izbranega potresa zelo verjetno znašalo med 57 in 1208. Ker je potresno tveganje v Republiki Sloveniji previsoko, smo predlagali različne ukrepe za krepitve potresne odpornosti skupnosti.

Ključne besede: potresno tveganje, časovno opredeljena ocena tveganja, ocena tveganja na osnovi scenarija, stavbni fond v Sloveniji, ljubljanski potres, seizmični stresni test

Summary

For rational decision-making regarding the strengthening of seismic resilience of the built environment, it is necessary to provide unbiased information about seismic risk, which cannot be achieved through experience due to the low frequency of major earthquakes. For this purpose, we perform two types of physics-based seismic risk analyses of the building stock in Slovenia. Time-based analysis enables the assessment of the average consequences of all possible earthquakes in the selected time interval, which form the basis for planning community seismic resilience. Scenario-based risk analysis evaluates the consequences of an earthquake event defined by earthquake magnitude and epicentre. The latter information is easier to understand and can also be useful for the emergency response units. Both analyses use a stochastic seismic fragility model of the building stock that accounts for uncertainties due to limited knowledge about buildings. The results of the time-based risk analysis indicate that the building stock most likely contains between 31 thousand and 168 thousand buildings or building parts that have a higher than 1% probability of exceeding the full damage state in 50 years, which could be the limit value for acceptable long-term risk. Based on the seismic risk analysis for the earthquake scenario defined by magnitude 6.1 and the epicentre 5 km north of the centre of Ljubljana, and taking into account the assumptions of the seismic risk model, we determined that the number of fatalities due to the considered earthquake would probably be between 57 and 1208. As the seismic risk in the Republic of Slovenia is too high, we proposed various measures for enhancing community seismic resilience.

Key words: seismic risk, time-based seismic risk assessment, scenario-based seismic risk assessment, building stock in Slovenia, Ljubljana earthquake, seismic stress test

1 UVOD

Odziv slovenske javnosti po lanskim potresih na Hrvaškem je ponovno pokazal, da je percepcija o potresnem tveganju tako med laiki kot inženirji pogosto napačna. Gibanje tal v Ljubljani, ki ga je povzročil potres v Petrinji, je šokiralo in prestrašilo mnogo ljudi, čeprav horizontalni pospeški tal v prestolnici niso presegli 1 % oziroma 3 % g [ARSO, 2021], kar je mnogo manj od maksimalnega pospeška tal, ki se upošteva pri projektiranju objektov v Sloveniji. Po drugi strani pa je predsednik Inženirske zbornice Slovenije v intervjuju za javno televizijo izrazil mnenje, da bi potres z magnitudo, podobno tisti iz petrinjskega potresa, in epicentrom v Ljubljani povzročil škodo na nekaj dimnikih, strehah in objektih, ki so bili slabše grajeni [24ur.com, 2021]. Ta diametralno nasprotujoča si in hkrati napačna prepričanja o potresnem gibanju tal oziroma potresni ranljivosti stavb so ponovno pokazala, da nepristranske percepcije o potresnem tveganju ni mogoče razviti zgolj na podlagi lastnih izkušenj, kot je to značilno tudi za druge redke dogodke [Starbuck, 2009].

Zmotni občutek glede potresne ranljivosti in potresnega tveganja vodi v napačne odločitve glede krepitve potresne odpornosti skupnosti. Prvi pogoj za rešitev tega problema so fizikalno osnovane informacije o potresnem tveganju, ki morajo biti dostopne odločevalcem in ostalim deležnikom. Najbolj nepristransko oceno potresnega tveganja zagotavlja časovno opredeljena analiza tveganja, s katero izračunamo povprečne posledice vseh možnih potresov v izbranem časovnem intervalu. Časovno opredeljeno analizo potresnega tveganja je možno izvesti za posamezne stavbe (npr. [Dolšek, 2002], [Snoj, 2016], [Babič, 2017], [Snoj in Dolšek, 2020], [Jamšek, 2020]) ali širše, npr. za celotni stavbni fond v državi (npr. [Kilar in Kušar, 2009], [ICPD, 2018], [Dolšek in sodelavci, 2020]). Ker rezultati takšne analize zajemajo vpliv vseh možnih potresov na izbranem območju, obenem pa upoštevajo tudi njihovo frekvenčnost, so lahko osnova za racionalno sprejemanje odločitev glede ukrepov za zmanjšanje potresnega tveganja. Po drugi strani pa časovno opredeljeni kazalniki potresnega tveganja ne podajajo informacij o posledicah posamičnih potresnih dogodkov, ki so lahko zanimive za širšo javnost in uporabne na področju civilne zaščite. Pridobitev takšnih informacij je možna z izvedbo analize potresnega tveganja na osnovi potresnega scenarija, kjer se učinek izbranega potresnega dogodka meri s posledicami na širšem geografskem območju. Potresni scenariji so običajno definirani z epicentrom in magnitudo (npr. [Pavel in Vaccareanu, 2016], [Strasser in sodelavci, 2008]), namesto magnitude pa je možno uporabiti tudi makroseizmično intenziteto [Lutman in sodelavci, 2013], ki temelji na subjektivnih opazovanjih. Ob tem je treba poudariti, da analize učinkov potresnih scenarijev v splošnem ne omogočajo nepristranske ocene potresnega tveganja, saj so potresni scenariji izbrani arbitrarno. Kljub temu pa lahko pomembno prispevajo k dvigu ozaveščenosti o potresni ogroženosti grajenega okolja in izboljšajo zmotna prepričanja glede potresne ranljivosti grajenega okolja.

Da bi prispevali k dvigu zavesti oziroma izboljšali občutek glede potresnega tveganja in potresne ranljivosti stavbnega fonda v Sloveniji, v članku predstavimo del metodologije in rezultatov seizmičnega stresnega testa stavbnega fonda v Sloveniji [Dolšek in sodelavci, 2020]. Osredotočimo se na

predstavitev metodologije in nekaterih rezultatov časovno opredeljene analize potresnega tveganja stavbnega fonda in analize potresnega tveganja na osnovi potresnega scenarija, pri čemer potresni scenarij definiramo z magnitudo 6,1 in epicentrom v Ljubljani. Najprej opišemo stavbni fond v Sloveniji (poglavje 2). Metodologijo za izvedbo analiz potresnega tveganja predstavimo v poglavju 3. Rezultate analiz potresnega tveganja prikažemo v poglavju 4. V zadnjem delu članka (poglavje 5) so povzeti še ukrepi za povečanje potresne odpornosti v Sloveniji, ki smo jih na osnovi rezultatov analize potresnega tveganja predlagali Ministrstvu za okolje in prostor RS [Dolšek in sodelavci, 2020].

2 OPIS STAVBNEGA FONDA

Informacije o stavbah in zasedenosti stavbnega fonda v Sloveniji smo pridobili iz Registra nepremičnin [REN, 2021] in Centralnega registra prebivalstva [CRP, 2021], ki vsebuje število stalno in začasno prijavljenih prebivalcev v stanovanjskih stavbah. Da bi se izognili dvojnemu številu prebivalcev, smo upoštevali samo stalno prijavljene prebivalce. Podatki iz Registra nepremičnin se nanašajo bodisi na cele stavbe bodisi na dele stavb (npr. pogosto je vsak vhod v stanovanjski blok svoja nepremičninska enota), razlika med obema enotama pa v registru ni razvidna, zato je tudi v tej študiji nismo mogli upoštevati. Zaradi jedrnatosti v nadaljevanju tako za cele stavbe kot za dele stavb uporabljamo izraz »stavbe«. Vsaka stavba iz Registra nepremičnin je opisana s koordinatami, letom izgradnje, razredom zasedenosti, neto tlorisno površino, prevladujočim materialom nosilne konstrukcije, vrednostjo stavbe glede na model množičnega vrednotenja nepremičnin, številom nadstropij in višino stavbe.

Glede na razpoložljive podatke smo pri razvoju modela ranljivosti stavbnega fonda (razdelek 3.5) upoštevali prevladujoči material nosilne konstrukcije, obdobje gradnje in število etaž. Na podlagi teh podatkov, števila stavb in njihove vrednosti smo definirali 20 razredov stavb (preglednica 1). Izkaže se, da je velika večina stavb v Sloveniji bodisi zidanih (opečnatih ali kamnitih) bodisi armiranobetonskih. Stavbe z zidanimi in armiranobetonskimi konstrukcijami smo zato obravnavali ločeno, medtem ko smo stavbe z nosilnimi konstrukcijami iz drugih materialov (jeklene in lesene konstrukcije) oziroma montažne stavbe ter stavbe z nejasno opredeljeno nosilno konstrukcijo združili v en skupen razred. Pri definiciji razredov stavb smo upoštevali tudi nivo potresnoodpornega projektiranja. Zato smo stavbe razdelili v tri obdobja gradnje, in sicer do vključno leta 1964, od vključno leta 1965 do vključno leta 1981 in od vključno leta 1982 dalje. Za stavbe iz najstarejšega obdobja je značilno, da so bile projektirane brez upoštevanja predpisov za potresnoodporno gradnjo. V obdobju po ljubljanskem potresu iz leta 1895 pa do konca druge svetovne vojne je bil sicer v veljavi Stavbinski red, ki je predpisoval povezanost elementov konstrukcije, kar nedvomno prispeva k potresni varnosti, vendar pa predpisov, ki bi neposredno urejali zaščito stavb pred potresi, ni bilo [Fajfar, 2017]. Leta 1964 (po potresu v Skopju) je v veljavo stopil jugoslovanski predpis, ki je temeljil na slovenskem predpisu iz leta poprej in je že zagotavljal osnovni nivo potresnoodpornega projektiranja, leta 1982 (po potresu v Črni gori) pa so se s sprejetjem novega jugoslovanskega predpisa zahteve za potresnoodporno projektiranje zaostrile. Z letom 2008, ko je postalo obvezno projektiranje

Razred stavb	Material nosilne konstrukcije	Obdobje gradnje	Število etaž	Število stavb [×10 ³]	Skupna ocenjena vrednost [milijarde €]	Število prebivalcev [×10 ³]	Skupna površina [milijon m ²]
1	Kamen, opeka	do 1964	1-3	109,1	10,076	342,7	23,70
2			4 ali več	4,7	3,748	72,5	5,03
3		1965–1981	1-3	95,9	10,098	328,5	21,67
4			4 ali več	1,4	1,547	39,9	1,91
5		po 1982	1-3	119,2	13,963	386,0	27,99
6			4 ali več	1,3	1,427	26,8	1,70
7	Armirani beton	do 1964	1-3	4,9	1,208	13,5	2,78
8			4 ali več	0,7	1,4	18,3	1,68
9		1965–1981	1-3	13,9	3,596	41,1	7,92
10			4–6	1,3	3,023	48,6	3,26
11			7 ali več	0,8	3,845	71,2	3,81
12		po 1982	1-3	23,4	8,05	66,1	14,31
13			4–6	1,8	5,525	52,6	6,82
14			7 ali več	0,5	3,506	37,1	3,48
15	Ostalo	od 1964	1-3	47,8	4,7	154,9	11,32
16			4 ali več	2,4	2,6	35,2	3,02
17		1965–1981	1-3	33,1	4,7	102,7	9,54
18			4 ali več	1,1	2,5	40,6	2,47
19		po 1982	1-3	56,3	10,2	146,0	18,02
20			4 ali več	1,2	2,6	28,1	2,84
Skupaj				520,8	98,1	2052,5	173,24

Preglednica 1. Definicija razredov stavb na osnovi materiala nosilne konstrukcije, obdobja gradnje in števila etaž. Skupno število stavb v razredu, skupna ocenjena vrednost in skupno število ljudi v stavbah se nanaša le na stavbe, v katerih bivajo ljudje oziroma katerih ocenjena vrednost znaša vsaj 50.000 €.

stavb po standardu Evrokod, se je potresnoodporno projektiranje dvignilo na še višjo raven, vendar ločnice med stavbami, zgrajenimi pred letom 2008 in po njem, nismo naredili, saj je število stavb iz obdobja po letu 2008 relativno zelo nizko, poleg tega pa smo ocenili, da stavbe, zgrajene po letu 1982, niso pretirano problematične z vidika potresne varnosti, zaradi česar upoštevanje še višjega nivoja projektiranja ne bi imelo bistvenega vpliva na rezultate. Glede na etažnost stavbe smo ločili med nizkimi stavbami, ki imajo največ tri etaže, srednje visokimi stavbami, ki imajo od štiri do šest etaž, in visokimi stavbami, ki imajo sedem etaž ali več. S tem smo upoštevali, da na potresni odziv vpliva tudi višina stavbe, predvsem zaradi neposrednega vpliva višine stavbe na njen nihajni čas. Enaki ali podobni kriteriji za razdelitev stavb glede na njihovo etažnost se pogosto uporabljajo tudi v literaturi (npr. [Kilar in Kušar, 2009], [Kappos in sodelavci, 2006], [NIBS, 2009], [Pitilakis in sodelavci, 2013]).

Na podlagi klasifikacije stavbnega fonda bi bilo možno definirati 27 razredov stavb, vendar pa je stavb z nekaterimi kombinacijami razmeroma malo, zato smo stavbe v teh primerih združili v skupne razrede, in sicer tako, da so razredi stavb čim bolj enotni (v smislu števila stavb, njihove skupne vrednosti in skupnega števila stalno prijavljenih prebivalcev; preglednica 1). Poleg tega omenimo, da so v stavbnem fondu zavoljo poenostavitve upoštewane le stavbe, kjer imajo ljudje prijavljeno stalno prebivališče ali pa je njihova vrednost ocenjena nad 50.000 €. Na ta način se število stavb, ki jih je treba upoštevati pri oceni potresnega tveganja, občutno zmanjša, pri čemer pa je vpliv

na rezultate ocene tveganja zanemarljiv, saj neupoštewane stavbe predstavljajo le 3 % vrednosti celotnega stavbnega fonda glede na model množičnega vrednotenja nepremičnin.

3 METODOLOGIJA

3.1 Časovno opredeljena analiza potresnega tveganja

Časovno opredeljeno analizo potresnega tveganja izvedemo v štirih korakih (preglednica 2). V prvem koraku ovrednotimo potresno obtežbo, in sicer v obliki krivulje potresne nevarnosti, ki predstavlja srednjo letno frekvenco prekoračitve različnih vrednosti mere za intenziteto potresa. Ker smo za intenziteto potresa uporabili maksimalni pospešek tal, PGA, krivuljo potresne nevarnosti zapišemo kot:

$$H_i(pga) = \lambda_i(PGA > pga), \quad (1)$$

kjer $\lambda_i(PGA > pga)$ predstavlja srednjo letno frekvenco, da PGA na lokaciji i -te stavbe preseže izbrano vrednost pga . Število krivulj potresne nevarnosti je enako številu stavb v obravnavanem stavbnem fondu (N_{stavb}), vendar pa se krivulje potresne nevarnosti za stavbe podobnih oz. enakih lokacij ne razlikujejo. Pri njihovi določitvi uporabimo model potresne nevarnosti, ki ga opisujemo v razdelku 3.3.

V drugem koraku ovrednotimo poškodovanost stavb. Osnovni rezultat analize poškodovanosti je srednja letna frekven-

ca prekoračitve izbranih stanj poškodovanosti. Upoštevamo pet stanj poškodovanosti, ki jih povzamemo po metodologiji HAZUS [HAZUS, 2015]: stanje brez poškodb (DS0), stanje majhnih poškodb (DS1), stanje zmernih poškodb (DS2), stanje velikih poškodb (DS3) in stanje popolne poškodovanosti (DS4). Pri izračunu srednje letne frekvence prekoračitve d -tega stanja poškodovanosti za i -to stavbo upoštevamo krivuljo potresne nevarnosti na lokaciji i -te stavbe, $H_i(pga)$, in krivuljo potresne ranljivosti, ki je definirana z verjetnostjo prekoračitve d -tega stanja poškodovanosti pri pogoju PGA, $P_i(DS \geq ds_d | PGA = pga)$. Krivulje potresne ranljivosti stavb določimo na osnovi modela potresne ranljivosti stavbnega fonda. Slednjega podrobneje opisujemo v razdelku 3.5, na tem mestu pa omenimo le, da za posamezno stavbo ne definiramo le ene krivulje ranljivosti, temveč več krivulj, s čimer je model potresne ranljivosti stavbnega fonda definiran stohastično. Srednja letna frekvenca prekoračitve d -tega stanja poškodovanosti, $\lambda(DS \geq ds_d)$, se tako spreminja ne le med stavbami, temveč tudi med simulacijami. Za i -to stavbo in j -to simulacijo jo izračunamo kot:

$$\lambda_{i,j}(DS \geq ds_d) = \int_0^\infty P_{i,j}(DS \geq ds_d | PGA = pga) \left| \frac{d\lambda_i(PGA > pga)}{dPGA} \right| dPGA, \quad (2)$$

kjer je $\left| \frac{d\lambda_i(PGA > pga)}{dPGA} \right|$ absolutna vrednost odvoda krivulje potresne nevarnosti na lokaciji i -te stavbe. Z upoštevanjem vseh simulacij (N_{sim}) in vseh obravnavanih stanj poškodovanosti (N_{DS}) je število izračunanih frekvenc $\lambda_{i,j}(DS \geq ds_d)$ enako $N_{stavb} \cdot N_{sim} \cdot N_{DS}$.

V tretjem koraku izračunamo povprečne posledice potresa za dobo enega leta na nivoju posameznih stavb. V tej študiji se omejimo na neposredne ekonomske izgube zaradi škode na stavbah, ki jih imenujemo tudi pričakovane letne izgube, EAL, ter jih izračunamo za vsako stavbo in simulacijo:

$$EAL_{i,j} = \sum_{d=1}^4 \lambda_{i,j}(DS = ds_d) C_i(DS = ds_d). \quad (3)$$

V enačbi (3) je $\lambda_{i,j}(DS = ds_d)$ srednja letna frekvenca pojava d -tega stanja poškodovanosti i -te stavbe v j -ti simulaciji potresne ranljivosti stavbe. V primeru najvišjega stanja poškodovanosti (DS4) je njena vrednost enaka $\lambda_{i,j}(DS \geq ds_d)$, za ostala stanja poškodovanosti pa razliki $\lambda_{i,j}(DS \geq ds_d) - \lambda_{i,j}(DS \geq ds_{d+1})$. Drugi faktor na desni strani enačbe (3), $C_i(DS = ds_d)$, predstavlja pričakovane neposredne ekonomske izgube za i -to stavbo v primeru d -tega stanja poškodovanosti. Ker smo izgube $C_i(DS = ds_d)$ obravnavali deterministično, se njihova vrednost s simulacijami ne spreminja. Določitev $C_i(DS = ds_d)$ predstavljamo v opisu modela posledic v razdelku 3.6.

V zadnjem, četrtem koraku izračunamo časovno opredeljene kazalnike tveganja na nivoju grajenega okolja. Ti obsegajo število vseh stavb, katerih verjetnost prekoračitve stanja DS4 v 50 letih presega izbrane vrednosti, in število vseh stavb, katerih EAL presega izbrane vrednosti. Pri tem verjetnosti prekoračitve stanja DS4 v 50 letih izračunamo na podlagi srednjih letnih frekvenc prekoračitve stanja DS4 ob upoštevanju Poissonovega procesa. Zaradi večjega števila simulacij vse časovno opredeljene kazalnike tveganja izrazimo z mediano in mejnima vrednostma 90-odstotnega intervala zaupanja.

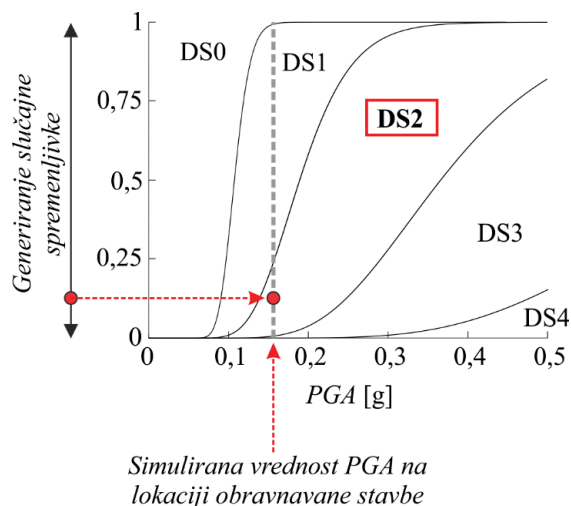
3.2 Analiza tveganja na osnovi potresnega scenarija

Posledice potresnega scenarija smo ocenili z metodologijo, ki sledi toku dogodkov med potresom. Metodologijo analogno s postopkom, predstavljenim v razdelku 3.1, razdelimo na štiri korake (preglednica 2). V prvem koraku na podlagi potresnega scenarija, ki je definiran z momentno magnitudo in hipocentrom, simuliramo polje potresnih intenzitet na lokacijah stavb. Tudi v tem primeru za mero za intenziteto privzamemo PGA. Zaradi negotovosti v intenziteti potresa pri dani magnitudi in hipocentru polje pospeškov PGA simuliramo večkrat (število simulacij označimo z N_{PGA}). Skupno število simuliranih vrednosti PGA v analizi potresnega scenarija je s tem enako $N_{stavb} \cdot N_{PGA}$. Za simulacijo polja pospeškov PGA uporabimo model gibanja tal, ki je predstavljen v razdelku 3.4.

V drugem koraku ovrednotimo poškodovanost stavb, pri čemer izhajamo iz simulacij polja pospeškov PGA in krivulj potresne ranljivosti stavb, ki smo jih omenili že v razdelku 3.1. Stanje poškodovanosti i -te stavbe v primeru k -te simulacije polja pospeškov PGA simuliramo v dveh fazah. V prvi fazi simuliramo krivulje potresne ranljivosti za i -to stavbo, enako kot v časovno-opredeljeni analizi potresnega tveganja (razdelek 3.1). Pri tem upoštevamo negotovosti v modelu potresne

Proces	Časovno opredeljena analiza tveganja	Analiza tveganja na osnovi potresnega scenarija
Opredelitev potresne obtežbe	Določitev krivulj potresne nevarnosti na lokacijah stavb	Simulacije polja pospeškov PGA na lokacijah stavb
Opredelitev poškodovanosti stavb	Simulacije srednjih letnih frekvenc prekoračitve obravnavanih stanj poškodovanosti posameznih stavb	Simulacije stanj poškodovanosti stavb posameznih stavb
Opredelitev posledic na nivoju stavb	Simulacije pričakovane neposredne ekonomske izgube posameznih stavb	Simulacije pričakovane neposredne ekonomske izgube posameznih stavb, simulacije porušitve/neporušitve stavb, simulacije števila smrtnih žrtev v posameznih stavbah
Opredelitev poškodovanosti stavb in posledic na nivoju stavbnega fonda	Statistično ovrednotenje števila stavb, katerih verjetnost prekoračitve stanja DS4 v 50 letih presega izbrane vrednosti, simulacije števila stavb, katerih EAL presega izbrane vrednosti	Statistično ovrednotenje števila stavb v različnih stanjih poškodovanosti, skupne pričakovane neposredne ekonomske izgube, skupnega števila porušeni stavb in skupnega števila smrtnih žrtev

Preglednica 2. Procesi pri izvedbi časovno opredeljene analize tveganja in analize tveganja na osnovi potresnega scenarija ter vmesni rezultati vsakega procesa.



Slika 1. Primer krivulj potresne ranljivosti za posamezno stavbo in določitev stanja poškodovanosti (DS2) na osnovi naključno generirane vrednosti slučajne spremenljivke in similirane vrednosti PGA na lokaciji stavbe.

ranljivosti stavbnega fonda (razdelek 3.5). V drugi fazi naslovimo slučajnost v stanju poškodovanosti i -te stavbe pri poznanih (simuliranih) krivuljah potresne ranljivosti (tj. slučajnost v potresnih kapacitetah pri poznanih krivuljah ranljivosti). To storimo tako, da naključno generiramo vrednost enakomerno porazdeljene slučajne spremenljivke med 0 in 1, na osnovi tako generirane vrednosti in k -te simulacije pospeška PGA na lokaciji i -te stavbe pa določimo stanje poškodovanosti (slika 1). Za vsako simulacijo polja pospeškov PGA izvedemo N_{sim} simulacij poškodovanosti.

V tretjem koraku na osnovi simuliranih stanj poškodovanosti določimo posledice potresnega scenarija. Posledice ovrednotimo z neposrednimi ekonomskimi izgubami, kot v primeru časovno opredeljene analize tveganja (razdelek 3.1), dodatno pa tudi s številom smrtnih žrtev in številom porušениh stavb. Pri tem uporabimo model posledic, ki je predstavljen v razdelku 3.6. Vse tri vrste posledic določimo za vse stavbe iz stavbnega fonda, vse simulacije polja pospeškov PGA in vse simulacije ranljivosti stavb. Za vsako vrsto posledic skupno torej simuliramo $N_{stavb} \cdot N_{PGA} \cdot N_{sim}$ vrednosti.

V zadnjem koraku analize tveganja na osnovi potresnega scenarija določimo poškodovanost in posledice na nivoju stavbnega fonda. Poškodovanost opredelimo s številom stavb v različnih stanjih poškodovanosti, posledice pa s številom porušениh stavb, pričakovano škodo v evrih in pričakovanim številom smrtnih žrtev. Te kazalnike tveganja izračunamo za vsako kombinacijo simulacije polja PGA in simulacije ranljivosti stavbnega fonda. Skupno za vsak kazalnik tveganja torej izračunamo $N_{PGA} \cdot N_{sim}$ vrednosti, ki jih prikažemo z mediano in mejnima vrednostma 90-odstotnega intervala zaupanja.

3.3 Model potresne nevarnosti

Z modelom potresne nevarnosti definiramo krivulje potresne nevarnosti na lokacijah stavb. Zaradi negotovosti v potresni ne-

varnosti pa tudi zaradi trenutne priprave nove analize potresne nevarnosti [Šket Motnikar, 2021] smo uporabili dva modela potresne nevarnosti. Prvi model je uradno veljaven model potresne nevarnosti v Republiki Sloveniji (RS) [Lapajne, Šket Motnikar in Zupančič, 2003], drugi pa je model potresne nevarnosti EU, ki je bil razvit v okviru projekta SHARE [Woessner in sodelavci, 2015]. Oba modela imata prednosti in slabosti. Uradni model RS temelji na nekoliko zastarelem modelu gibanja tal in vključuje le točkovne izvore potresov. Model potresne nevarnosti EU ima bolj grob model izvorov potresov, vendar upošteva tudi površinske izvore potresov ter novejša modela gibanja tal. Zaradi uporabe dveh modelov potresne nevarnosti smo analize tveganja (glej razdelek 3.1) izvajali s krivuljami potresne nevarnosti, pridobljenimi na podlagi obeh modelov. Ker je model potresne nevarnosti EU novejši, smo v 2/3 vseh simulacij analiz tveganja uporabili krivuljo na podlagi EU-modela, v 1/3 vseh simulacij pa krivulje na podlagi uradnega modela potresne nevarnosti v RS.

Krivulje potresne nevarnosti iz prej opisanih modelov smo določili za maksimalni pospešek tal, PGA, in trdna tla (skala: tip tal A). Krivulje potresne nevarnosti z upoštevanjem vpliva tipa tal na lokacijah stavb pa smo modelirali tako, da smo pospeške tal iz krivulj potresne nevarnosti množili s faktorji tal. Faktorje tal smo izračunali v skladu z osnutkom novega standarda Evrokod 8 [CEN/TC 250/SC8, 2020], odvisni pa so od vrste tal na lokacijah objektov in od maksimalnih pospeškov tal na trdnih tleh. Za oceno vrste tal na lokacijah stavb smo razvili karto tal [Dolšek in sodelavci, 2020] na osnovi geološke karte ([Ferlan in Herlec, 2000], [Ferlan in Herlec, 2002]) in klasifikacije tal iz predhodnih študij [Zupančič in sodelavci, 2013].

3.4 Model gibanja tal

Model gibanja tal za izbran potresni scenarij uporabimo za simulacijo maksimalnih pospeškov tal na širšem geografskem območju, ki jih imenujemo polje maksimalnih pospeškov tal oziramo krajše polje pospeškov PGA. Zaradi naključnosti potresne obtežbe polja pospeškov PGA pri dani magnitudi in izvoru potresa ne moremo točno določiti. Zato smo izvedli številne simulacije polja pospeškov PGA, pri čemer smo uporabili metodologijo, ki so jo predstavili Weatherill in sodelavci [2014], ter model gibanja tal Bindija in sodelavcev ([2014a], [2014b]), ki temelji na momentni magnitudi potresa M_w , lokaciji hipocentra in nekaterih drugih parametrih preloma. Vrednost PGA za k -to simulacijo polja in lokacijo i -te stavbe, PGA_{ki} , smo najprej izračunali za tip tal A, in sicer z naslednjim izrazom:

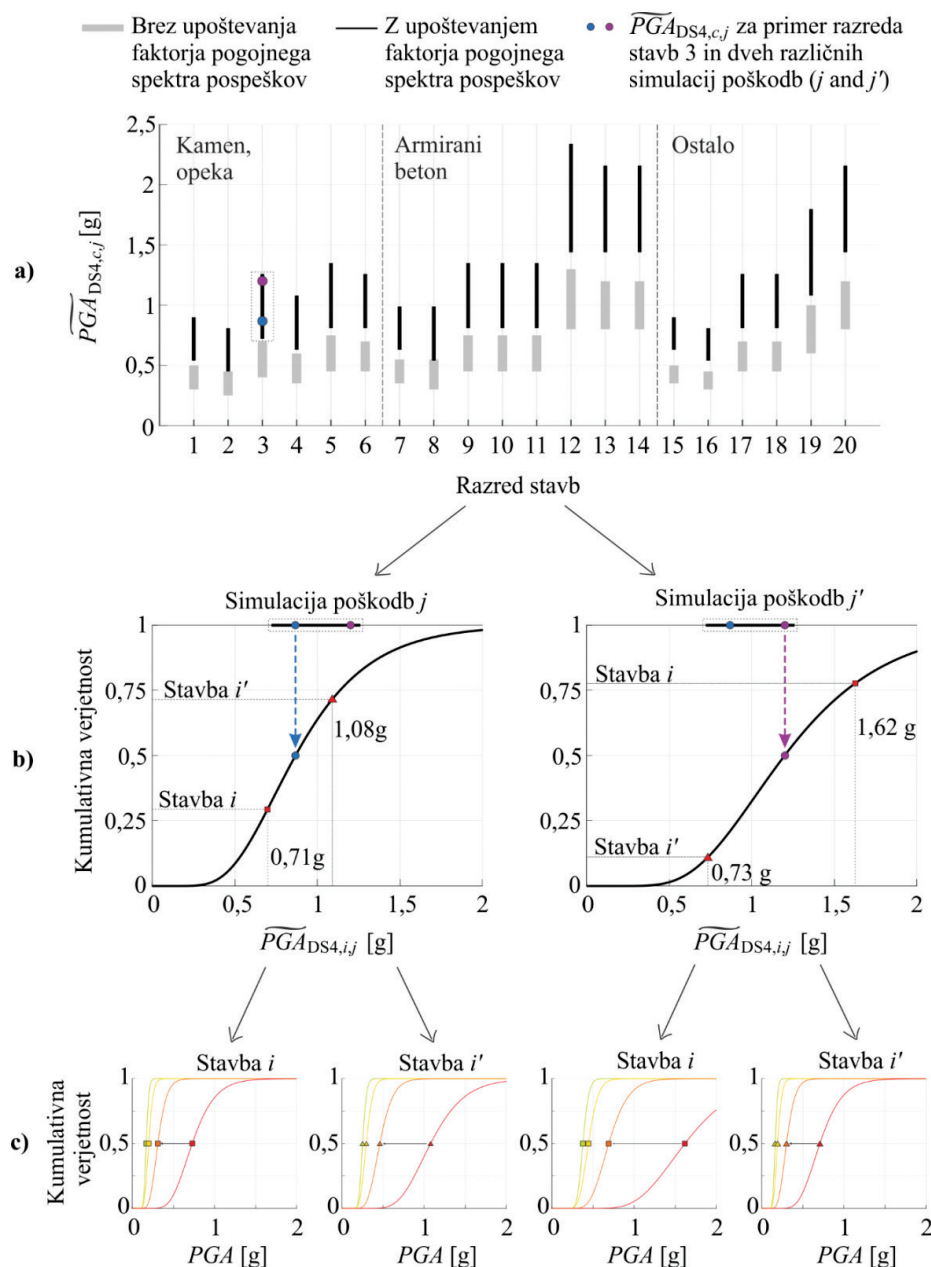
$$\ln PGA_{ki} = \ln \overline{PGA}_i + \sigma \varepsilon_{ki} + \tau \eta_k, \quad (4)$$

kjer je $\overline{PGA}_i$ mediana polja pospeškov PGA za oddaljenost i -te stavbe od izvora potresa, $\sigma \varepsilon_{ki}$ t. i. rezidual znotraj potresnega dogodka (intra rezidual), ki upošteva prostorsko variabilnost potresne obtežbe (PGA), $\tau \eta_k$ pa t. i. rezidual med potresnimi dogodki (inter rezidual), ki upošteva variabilnost povprečne potresne obtežbe (PGA) med različnimi simulacijami. Mediana $\overline{PGA}_i$ je določena z modelom gibanja tal, reziduala $\sigma \varepsilon_{ki}$ in $\tau \eta_k$ pa sta definirana z intra in inter standardnima deviacijama modela gibanja tal, σ in τ , ki sta v splošnem odvisni od mere za intenziteto potresa, magnitude in izvora potresa, ter standardno normalnima slučajnima spremenljivkama ε_{ki} in η_k .

S simulacijo ε_{ki} in η_k opišemo naključnost potresne obtežbe. Ker je intra rezidual prostorsko odvisen, smo pri generiranju vrednosti ε_{ki} upoštevali korelacijo med vrednostmi pospeškov na lokaciji stavb, saj iz rezultatov meritev pospeškov tal sledi, da so pospeški na sosednjih lokacijah korelirani. Za določitev pravil za koreliranje intenzitet med lokacijami je bilo v preteklosti izdelanih precej modelov. Uporabili smo model, ki sta ga predlagala Jayaram in Baker [2009]. Simulacije polja pospeškov PGA za tip tal A smo z upoštevanjem faktorjev tal pretvorili v simulacije polja pospeškov PGA z upoštevanjem tipov tal na lokacijah obravnavanih stavb, kot je to razloženo v razdelku 3.3.

3.5 Model potresne ranljivosti stavbnega fonda

Z modelom potresne ranljivosti stavbnega fonda vsaki stavbi dodelimo krivulje potresne ranljivosti, ki izražajo verjetnost presežanja d-tega stanja poškodovanosti pri pogoju PGA, $P(DS \geq ds_d | PGA = pga)$. Na ta način je potresna kapaciteta stavbe za vsako stanje poškodovanosti definirana kot slučajna spremenljivka, za katero v tej študiji predpostavimo, da je logaritemsko normalno porazdeljena, kot je to običajno privzeto v literaturi ([Ibarra in Krawinkler, 2005], [Porter, Kennedy in Bachman, 2007], [Bradley, 2008], [Schäfer in sodelavci, 2011],



Slika 2. a) Razpon vrednosti $\widetilde{PGA}_{DS4,c,j}$ za upoštevanje razredov stavb z in brez upoštevanja faktorja pogojnega spektra pospeškov, b) shematski prikaz dveh simulacij $\widetilde{PGA}_{DS4,c,j}$ in pripadajočih porazdelitev ($\widetilde{PGA}_{DS4,i,j}$) za razred stavb 3 ter c) shematski prikaz dveh simulacij ($\widetilde{PGA}_{DS4,i,j}$) in pripadajočih krivulj potresne ranljivosti za dve stavbi iz razreda stavb 3.

[HAZUS, 2015]). Krivulja potresne ranljivosti za d -to stanje poškodovanosti je s tem definirana kot:

$$P(DS \geq ds_d | PGA = pga) = \Phi \left(\frac{\ln(pga / \overline{PGA}_{DS_d})}{\beta_{DS_d}} \right), \quad (5)$$

kjer je $\overline{PGA}_{DS_d}$ mediana maksimalnih pospeškov tal, ki povzročijo d -to stanje poškodovanosti, β_{DS_d} pa standardna deviacija logaritmskih vrednosti teh pospeškov tal.

Zaradi nepopolnega poznavanja stavb uporabimo stohastičen model potresne ranljivosti stavbnega fonda, s katerim lahko upoštevamo negotovosti v potresni ranljivosti stavb. Uporabljeni model predvideva simulacijo krivulj potresne ranljivosti oz. kapacitete stavb v dveh fazah: najprej na nivoju razredov stavb in nato na nivoju posameznih stavb. Na nivoju razredov stavb je negotovost v krivuljah potresne ranljivosti upoštevana z naključnim simuliranjem mediane maksimalnih pospeškov tal za stanje poškodovanosti DS4, $\overline{PGA}_{DS4,c,j}$, kjer c predstavlja razred stavbe, j pa indeks simulacije poškodb. Zaradi omejenega poznavanja stavbnega fonda upoštevamo, da $\overline{PGA}_{DS4,c,j}$ sledi enakomerni porazdelitvi z mejnima vrednostma, ki ju ocenimo na podlagi obstoječih študij potresnih ranljivosti stavb za c -ti razred stavb ([HAZUS, 2015], [Schäfer in sodelavci, 2011]) (slika 2a). Ker se je izkazalo, da obstoječe študije potresne ranljivosti v večini primerov temeljijo na konservativno izbranih spektrih pospeškov, smo mediane $\overline{PGA}_{DS4,c,j}$ korigirali s faktorjem pogojnega spektra pospeškov, ki smo ga ocenili z nelinearnimi dinamičnimi analizami sistemov z eno prostostno stopnjo (SDOF), reprezentativnih za obravnavani razred stavb, ob upoštevanju akceleroگرامov, ki so odražali spektralne pospeške elastičnega spektra po Evrokodu 8, in akceleroگرامov, ki so približno odražali pogojni spekter pospeškov [Baker, 2011]. Vse akceleroگرامe smo izbrali iz baz podatkov NGA in RESORCE ([Ancheta in sodelavci, 2014], [Akkar in sodelavci, 2014]). Izkazalo se je, da se mejne vrednosti $\overline{PGA}_{DS4,c,j}$ ob upoštevanju faktorja pogojnega spektra pospeškov znatno povečajo (slika 2a).

V drugi fazi določimo krivulje potresne ranljivosti na nivoju posameznih stavb, in sicer za vsa obravnavana stanja poškodovanosti. Negotovost pri določitvi potresne ranljivosti naključno izbrane stavbe v obravnavanem razredu upoštevamo tako, da mediane krivulj potresne ranljivosti za stanje DS4 posameznih stavb ($\overline{PGA}_{DS4,i,j}$) opišemo z logaritmsko normalno porazdeljeno slučajno spremenljivko, katere mediana je enaka mediani ranljivosti obravnavanega razreda stavb $\overline{PGA}_{DS4,c,j}$ (slika 2b). Pri tem indeksa i in j v ($\overline{PGA}_{DS4,i,j}$) predstavljata stavbo in simulacijo, skladno z opisom iz razdelkov 3.1 in 3.2. Negotovost v vrednosti PGA, ki povzroča DS4, znotraj obravnavanega razreda stavb ovrednotimo s standardno deviacijo $\beta_{DS4,c}$. V primeru razredov stavb 1–14, ki vsebujejo zidane in armiranobetonske stavbe, za $\beta_{DS4,c}$ privzamemo vrednost 0,40, skladno s priporočili iz [HAZUS, 2015]. Za razrede stavb 15–20 (Preglednica 1) $\beta_{DS4,c}$ na podlagi strokovne presoje povečamo na 0,60, saj je zaradi različnega oz. neznanega materiala nosilne konstrukcije v teh razredih stavb negotovost v potresni ranljivosti posameznih stavb večja. Na podlagi simuliranih vrednosti ($\overline{PGA}_{DS4,i,j}$) nato določimo še mediane za ostala stanja poškodovanosti, $\overline{PGA}_{DS1,i,j}$, $\overline{PGA}_{DS2,i,j}$ in $\overline{PGA}_{DS3,i,j}$ (slika 2c). Pri tem izhajamo iz tipičnih razmerij med medianami za različna stanja poškodovanosti iz [HAZUS, 2015], hkrati pa upoštevamo, da je pri nižjih stanjih poškodovanosti zaradi manjše zahtevane duktilnosti manjši tudi

faktor pogojnega spektra pospeškov. Na koncu za krivulje potresne ranljivosti na nivoju posameznih stavb določimo še standardne deviacije logaritmskih vrednosti pospeškov za vsa stanja poškodovanosti ($\beta_{DS1,i}$, $\beta_{DS2,i}$, $\beta_{DS3,i}$ in $\beta_{DS4,i}$). Pri določitvi $\beta_{DS4,i}$ uporabimo model, ki je bil v ta namen razvit v [Dolšek, Lazar Sinković in Žižmond, 2017], za preostala stanja poškodovanosti pa dodatno upoštevamo še razmerja med razpršenostjo potresnih kapacitet pri različnih stanjih poškodovanosti iz [Dolšek, 2012].

3.6 Model posledic

Model posledic omogoča povezavo med stanji poškodovanosti in posledicami potresov. V primeru časovno opredeljene analize tveganja, izvedene v tej študiji, posledice izrazimo z neposredno ekonomsko izgubo za dobo enega leta. Pri modelu posledic potresnega scenarija pa ocenimo neposredno ekonomsko izgubo, poleg tega pa tudi število porušenih stavb in število smrtnih žrtev.

Neposredne ekonomske izgube za i -to stavbo in d -to stanje poškodovanosti izračunamo kot:

$$C_i(DS = ds_d) = A_i \cdot C_R \cdot c_d, \quad (6)$$

kjer je A_i neto tlorisna površina i -te stavbe, C_R povprečen strošek nadomestitve stavbe na m^2 neto tlorisne površine ter c_d razmerje med stroški popravila za d -to stanje poškodovanosti in stroškom C_R . Površine A_i smo pridobili iz Registra nepremičnin [REN, 2021] (poglavje 2). Pri oceni stroška C_R smo upoštevali strošek novogradnje ter strošek rušitve in odstranitve poškodovane stavbe. Za strošek novogradnje smo upoštevali 1100 € na m^2 neto tlorisne površine. To vrednost smo ocenili na podlagi stroškov gradnje za osnovni cenovni razred iz spletnega portala PEG [PEG, 2020] in z upoštevanjem nižje davčne stopnje. Pri določitvi stroška rekonstrukcije smo izhajali iz obstoječih študij potresnih izgub ([Porter in Kiremidjian, 2001], [Bradley, 2009], [Snaj in Dolšek, 2020]), v katerih se razmerje med stroškom rekonstrukcije in stroškom novogradnje giblje med 1,08 in 1,15. Upoštevali smo vrednost 1250 € na m^2 neto tlorisne površine, kar je 13,5 % več kot strošek novogradnje. Razmerja c_d smo povzeli po metodologiji HAZUS [HAZUS, 2015] ter za stanja poškodovanosti DS1–DS4 znašajo 0,02, 0,1, 0,4 in 1,0. Ker vse tri faktorje na desni strani enačbe (6) obravnavamo kot količine, neodvisne od simulacije poškodovanosti, je tudi $C_i(DS = ds_d)$ neodvisna od indeksa simulacij j .

Porušitev oz. neporušitev stavb simuliramo na podlagi deležev porušenih stavb pri doseženem stanju poškodovanosti DS4, p_c . V skladu z [HAZUS, 2015] upoštevamo, da so ti deleži odvisni od materiala nosilne konstrukcije in števila etaž, znašajo pa med 5 % in 15 %. V primeru ostalih stanj poškodovanosti upoštevamo, da se stavbe ne porušijo. Glede na te predpostavke za i -to stavbo in j -to simulacijo določimo spremenljivko $O_{i,j}$, ki zavzame vrednost 1 (stavba je porušena) ali 0 (stavba ni porušena):

$$O_{i,j} = \begin{cases} 1, & DS_{i,j} = DS4 \text{ in } z_j \leq p_{c,i} \\ 0, & DS_{i,j} = DS4 \text{ in } z_j > p_{c,i}, \\ 0, & DS_{i,j} < DS4 \end{cases} \quad (7)$$

kjer je z_j vrednost slučajne spremenljivke z enakomerno porazdelitvijo med 0 in 1 v j -ti simulaciji, $p_{c,i}$ delež porušenih stavb v primeru stanja poškodovanosti DS4, značilen za razred, v katerega je i -ta stavba uvrščena, $DS_{i,j}$ pa stanje poškodovanosti

i -te stavbe, doseženo v j -ti simulaciji. Omeniti velja, da stanje poškodovanosti na levi strani enačbe (7) ni podano, ker je v oceni posledic potresnega scenarija stanje poškodovanosti dane stavbe enolično določeno s simulacijo.

Pri določitvi števila smrtnih žrtev predpostavljamo, da se smrtni primer lahko zgodi le, če se stavba poruši. Zato število smrtnih žrtev v i -ti stavbi in j -ti simulaciji, $F_{i,j}$, določimo kot:

$$F_{i,j} = O_{i,j} \cdot \lambda_f \cdot N_{p,i}, \quad (8)$$

kjer je λ_f delež smrtnih žrtev pri porušitvi stavbe, $N_{p,i}$ pa število ljudi v i -ti stavbi. Za delež λ_f smo predpostavili vrednost 0,10, ki je bila privzeta tudi v študiji [ICPD, 2018], medtem ko smo $N_{p,i}$ ocenili na podlagi modela ekvivalentne letne zasedenosti stavb [Lazar Sinković in Dolšek, 2020] ob upoštevanju števila stalnih prebivalcev, navedenih v Centralnem registru prebivalstva [CRP, 2021].

4 REZULTATI ANALIZE POTRESNEGA TVEGANJA

4.1 Časovno opredeljena analiza tveganja

S časovno opredeljeno analizo potresnega tveganja smo izračunali verjetnost prekoračitve stanja popolne poškodovanosti (DS4) v 50 letih in neposredno ekonomsko izgubo (škodo). Kazalnika časovno opredeljene analize potresnega tveganja smo ovrednotili za vsako stavbo in za vse simulacije, s katerimi smo upoštevali negotovosti pri določitvi potresne ranljivosti stavb. Število vseh simulacij (N_{sim}) je znašalo 2250.

Na nivoju stavbnega fonda je uporabljena kazalnika tveganja možno prikazati na različne načine. Na slikah 3a in 3d prikazujemo število vseh stavb, za katere velja, da je bodisi verjetnost prekoračitve stanja DS4 v 50 letih bodisi neposredna ekonomska izguba večja od izbrane vrednosti na osi X. Enake rezultate na slikah 3b–3c in 3e–3f prikazujemo še ločeno za zidane in armiranobetonske stavbe. Ker je v simulacijah zajet vpliv negotovosti potresne ranljivosti stavb, se število vseh stavb glede na vrednost na osi X spreminja med simulacijami. Zato je število stavb na sliki 3 prikazano za 5., 50. (mediana) in 95. percentil.

S slik 3a–3c sledi, da je glede na uporabljeni model in z upoštevanjem 90-odstotnega intervala zaupanja med 31 tisoč in 168 tisoč (mediana 108 tisoč) stavb, za katere je verjetnost prekoračitve stanja DS4 v 50 letih večja od 1 % (približno $2 \cdot 10^{-4}$ v enem letu). Tolikšna vrednost ustreza ciljni verjetnosti mejnega stanja pri porušitvi, kot jo uporabljajo pri določitvi projektne potresne obtežbe novih stavb v ZDA [Luco in sodelavci, 2007], podobno ciljno tveganje pa pričakujemo v novi različici standarda Evrokod 8, ki je trenutno v fazi priprave. Enako tveganje smo v poročilu [Dolšek in sodelavci, 2020] privzeli za mejo med dolgoročno sprejemljivim in nesprejemljivim tveganjem. Ob tem je treba poudariti, da je meja sprejemljivega tveganja v standardnih večkrat povezana z definicijo potresne obtežbe, uporabljene v potresni analizi oz. analizi tveganja, z definicijo stanja poškodovanosti ter tudi zahtevami glede modela konstrukcije, ki se uporabi v analizi. Zaradi tega so lahko vrednosti za sprejemljivo tveganje odvisne tudi od natančnosti izraču-

na potresnega tveganja. Če je potresno tveganje izračunano pristransko, je običajno pristransko določeno tudi sprejemljivo potresno tveganje.

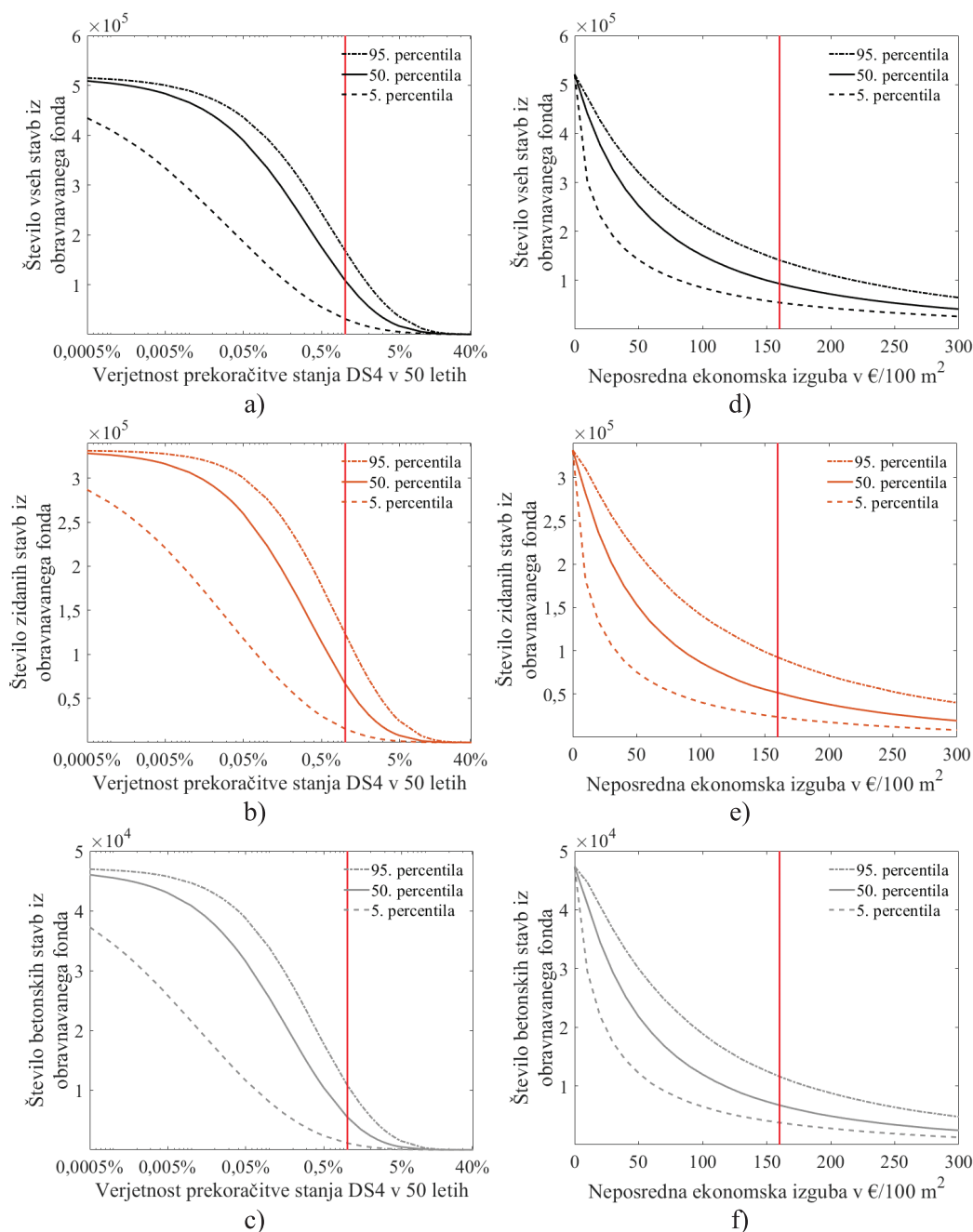
Glede na upoštevano mejo med dolgoročno sprejemljivim in nesprejemljivim tveganjem lahko sklepamo, da bi bilo treba precejšen delež stavb v Sloveniji utrditi oziroma nadomestiti z novimi. Mediana števila stavb, katerih verjetnost prekoračitve DS4 presega mejno vrednost, namreč predstavlja kar 21 % stavbnega fonda. Približno 62 % od teh stavb je zidanih (med 15 tisoč (5. percentil) in 124 tisoč (95. percentil), mediana 67 tisoč), betonskih stavb je precej manj (med 1100 (5. percentil) in 11 tisoč (95. percentil), mediana 5500), nekaj pa je tudi stavb z drugačnim oz. neznanim materialom nosilne konstrukcije.

Na osnovi slik 3d–3f lahko sklepamo, da je od 380 do 467 tisoč stavb (90-odstotni intervala zaupanja) izpostavljenih letni izgubi 160 €/100 m² ali manj, ki smo jo definirali kot dolgoročno spremenljiva letna izguba. Namreč tolikšne izgube so približno enake izgubam zaradi ogrevanja za energetski razred B glede na ([UL RS, 2014], [UL RS, 2019]), če za ceno energentov privzamemo vrednost 0,05 €/kWh. Od 428 tisoč stavb, kolikor znaša mediana števila stavb z letno izgubo, manjšo ali enako 160 €/100 m², je približno 280 tisoč zidanih stavb (grajenih iz opeke oziroma kamna; 90-odstotni intervala znaša med 239 tisoč in 308 tisoč), približno 41 tisoč pa stavb iz armiranega betona (90-odstotni intervala znaša med 36 tisoč in 44 tisoč). Za preostale stavbe v obravnavanem fondu pričakovana letna izguba znaša 160 €/100 m² ali več. Število takšnih stavb je ocenjeno na 93 tisoč (mediana), kar predstavlja 18 % obravnavanega stavbnega fonda, 90-odstotni interval pa se giblje med 54 tisoč in 141 tisoč stavbami. Za te stavbe lahko trdimo, da so njihove ekonomske izgube zaradi potresov dolgoročno nevzdržne [Dolšek in sodelavci, 2020]. Oba kazalnika, ocenjena na podlagi časovno opredeljene analize potresnega tveganja, torej kažeta, da bi bilo treba potresno tveganje v Sloveniji čim prej zmanjšati.

4.2 Analiza tveganja na osnovi potresnega scenarija

Z namenom ponazoritve posledice močnega potresa v Sloveniji smo simulirali potresni dogodek z magnitudo 6,1 in epicentrom približno 5 km severno od centra Ljubljane (46,111°N, 14,507°E; glej sliko 4), ki ustreza velikonočnemu ljubljanskemu potresu iz leta 1895 [Vidrih, 1995]. Omeniti velja, da se ocenjena magnituda 6,1 nanaša na lokalno magnitudo M_L , je pa slednja za magnitude okoli 6 precej podobna momentni magnitudi M_w , ki se uporablja v Bindijevim modelu gibanja tal (razdelek 3.4). Zato smo v simulacijah polja PGA upoštevali, da M_w znaša 6,1. Za geometrijske parametre preloma, na katerem se zgodi simulirani potres, smo upoštevali najverjetnejše vrednosti parametrov Žužemberškega preloma ($rake=160^\circ$, $strike=315^\circ$, $dip=80^\circ$) [Zupančič, 2020]. Omenjeni parametri so vhodni podatki za model gibanja tal.

Poškodovanost stavb in posledice za izbrani potresni scenarij smo določili za stavbe znotraj vplivnega območja, ki smo ga definirali z oddaljenostjo 30 km od projekcije prelomne površine na površje (slika 4). Vrednost stavb v vplivnem območju je ocenjena na približno 44 milijard €, kar znaša skoraj

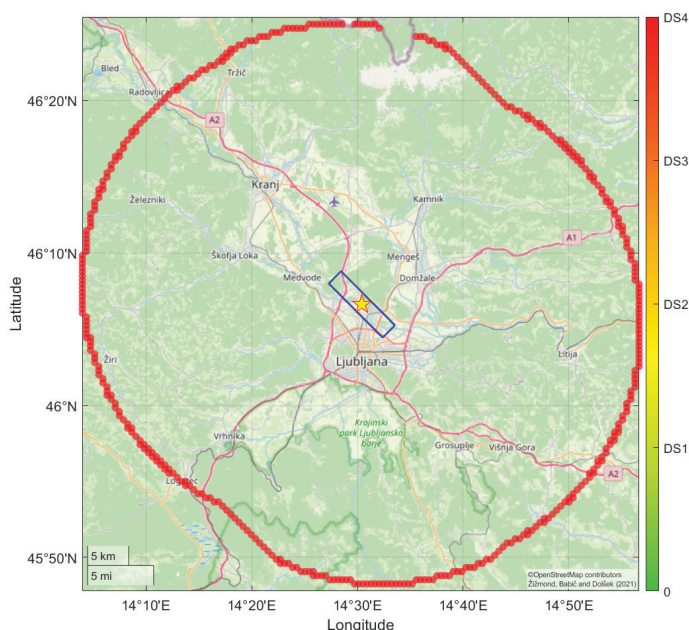


Slika 3. a), b) in c) Število stavb (vseh, zidanih, armiranobetonskih), katerih verjetnost prekoračitve stanja DS4 presega izbrane vrednosti, ter d), e) in f) Število stavb (vseh, zidanih, armiranobetonskih), katerih neposredna ekonomska izguba presega izbrane vrednosti.

polovico vrednosti celotnega stavbnega fonda v Sloveniji, v njih pa živi 676 tisoč ljudi. V nadaljevanju tega razdelka stavbe znotraj vplivnega območja imenujemo tudi izpostavljene stavbe.

Zaradi negotovosti polja pospeškov PGA glede na model gibanja tal smo polja pospeškov PGA za izbrani potresni scenarij simulirali 250-krat ($N_{PGA}=250$). V simulacijah smo upoštevali tako negotovost zaradi razlik pospeškov med dvema dogodkoma kot tudi negotovost zaradi prostorske variabilnosti pospeškov

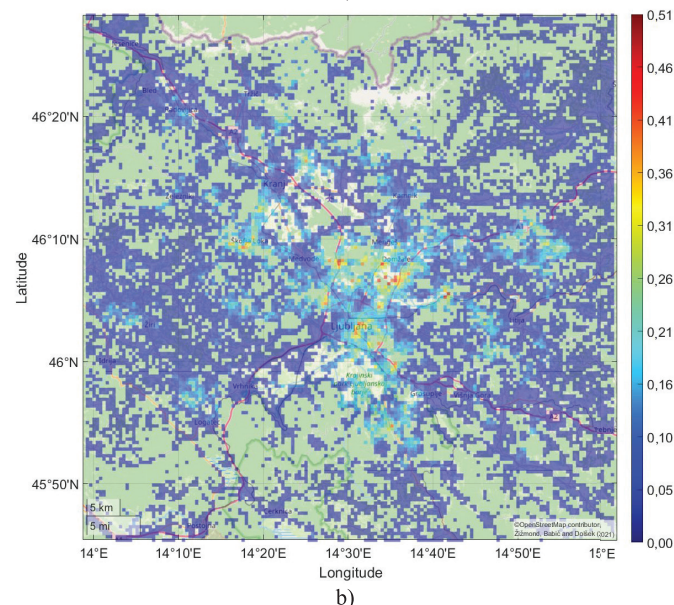
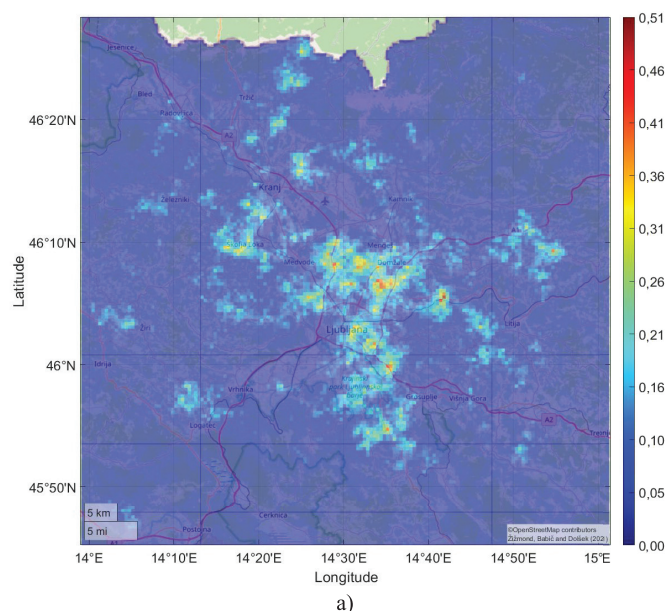
pri danem potresnem dogodku (glej razdelek 3.4). Na sliki 5 prikazujemo primer pospeškov PGA na skali in pospeškov PGA z upoštevanjem tipa tal na lokacijah objektov za eno simulacijo. Pospeški PGA z upoštevanjem tipa tal so prikazani samo za lokacije stavb. S sliko lahko vidimo, da se pospeški ne zmanjšujejo enakomerno z oddaljenostjo od projekcije prelomne površine, saj smo v simulacijah upoštevali tudi vpliv naključnosti potresne obtežbe (ϵ_{ki}), kot jo določa model za simulacijo gibanja tal (glej razdelek 3.4). Poleg tega je možno opaziti, da so pospeški PGA na tleh različnih tipov tal višji kot tisti na skali.



Slika 4. Predpostavljena lokacija epicentra potresa (rumsena zvezda) in potencialno vplivno območje potresa, ki smo ga definirali z oddaljenostjo 30 km od projekcije prelomne površine na površje (moder pravokotnik).

Ker so krivulje ranljivosti stavb negotove (razdelek 3.2), smo poškodovanosti za vsako stavbo in polje pospeškov PGA simulirali 20-krat ($N_{sim} = 20$). Posledično smo za vsako stavbo ocenili $N_{PGA} \cdot N_{sim} = 5000$ stanj poškodovanosti. Za boljšo predstavbo na sliki 6 prikazujemo poškodovanost stavb za izbrano simulacijo. Zaradi omejitve ločljivosti slik na formatu A4 ne prikazujemo poškodovanosti vsake stavbe posebej za izbrano simulacijo, temveč povprečno poškodovanost stavb na izbrano enoto geografske površine ($0,25 \times 0,25$ km), ki se določi na osnovi poškodovanosti posameznih stavb znotraj geografske enote. Vidimo lahko, da se povprečna poškodovanost stavb prostorsko precej spreminja, kar je posledica slučajnosti polja pospeškov PGA, razlik v potresnih kapacitetah stavb in razlik v gostoti urbane okolja. Za prikazano simulacijo (sliki 6a) je poškodovanost stavb razmeroma ugodna, kar je posledica simulacije razmeroma nizkih vrednosti polja pospeškov PGA in razmeroma visoke kapacitete stavb. Ravno obratne razmere so bile simulirane v simulaciji, prikazani na sliki 6b, kjer je poškodovanost stavb občutno višja. Stanja poškodovanosti stavb na sliki 6 so prikazana, da bralec dobi občutek o raztrosu poškodovanosti stavb po območju, ki je posledica negotovosti pri določitvi polja pospeškov PGA pri dani magnitudi in epicentru potresa, poseljenosti in kvalitete gradnje stavb. S teh slik ni možno sklepati, katera območja bi bila najbolj poškodovana pri točno določenem potresu, saj ne znamo vnaprej natančno predvideti gibanja tal.

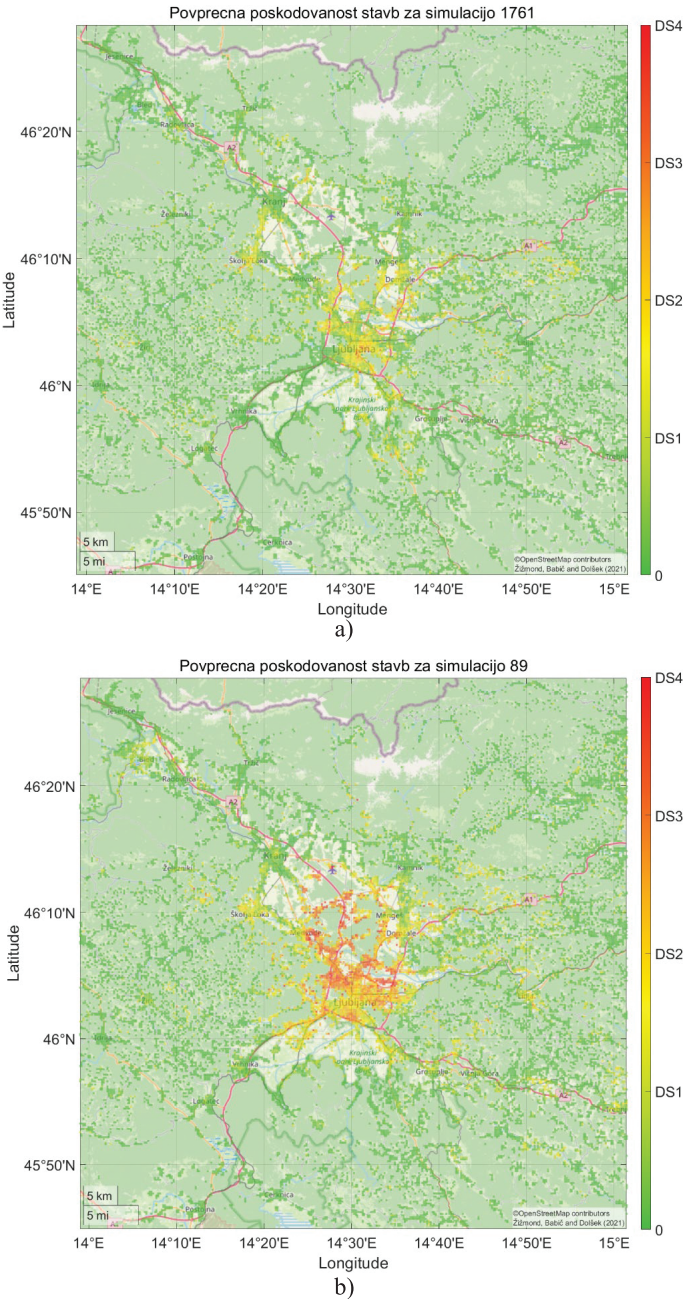
Ob upoštevanju vseh simulacij polja PGA in krivulj ranljivosti (preglednica 3) lahko zaključimo, da bo med 11 % in 28 % (90-odstotna stopnja zaupanja) obravnavanega stavbnega fonda utrpelo poškodovanost stopnje DS1 ali DS2. Mediana števila stavb v stanju poškodovanosti DS3 znaša 11.680 stavb, kar je 8 % stavb v obravnavanem fondu. Mediana števila stavb v stanju poškodovanosti DS4 znaša 4637, kar je 3,2 % vseh izpostavljenih stavb, 90-odstotni interval zaupanja za to stanje



Slika 5. Maksimalni pospešek tal za 1761. simulacijo kritičnega potresa ($M_w=6,1$, nadžarišče $lat=46,111^\circ$ $lon=14,507^\circ$) za a) skalo na površju in b) z upoštevanjem uporabljenega modela tal.

poškodovanosti pa sega od 0,7 % do 11,0 % vseh izpostavljenih stavb. Poudariti velja, da je tako velik raztros predvsem posledica slučajnosti polja pospeškov PGA, medtem ko nanj v mnogo manjši meri vplivajo negotovosti v modelu ranljivosti stavb.

Na podlagi simulacij poškodovanosti stavb in uporabljenega modela posledic (razdelek 3.6) ocenjujemo, da bo izbrani potresni scenarij povzročil porušitev 668 stavb (mediana), medtem ko se vrednosti pripadajočega 90-odstotnega intervala zaupanja gibljejo med 139 in 2320. Pri tem naj še enkrat omenimo (glej poglavje 2), da se rezultati nanašajo na stavbe ali dele stavb vendar v poročilu zaradi jednatosti tako za cele stavbe kot za dele stavb uporabljamo izraz »stavbe«. Poleg



Slika 6. Karta povprečne poškodovanosti stavb na enoto površine 0,25 × 0,25 km za a) simulacijo 1761, ki povzroči neposredno ekonomsko izgubo (škodo), ki približno ustreza 5. percentilu škode in b) simulacijo 89, ki povzroči škodo, ki približno ustreza mediani škode.

tega z upoštevanjem 90-odstotnega intervala zaupanja ocenjujemo, da bo število smrtnih žrtev znašalo med 57 in 1208, pri čemer je mediana tega števila ocenjena na 330, ter da se bo ekonomska izguba gibala med 2,5 in 16,4 milijarde € (mediana je ocenjena na 7,1 milijarde €). Glede na število poškodovanih stavb je pričakovana škoda precejšnja, kar je posledica dejstva, da se največja koncentracija škode pojavlja v centru Ljubljane, kjer je gostota stavbnih površin precej nad povprečjem gostote stavb v Sloveniji.

Posledice potresa	5. percentil	50. percentil	95. percentil
Št. stavb v DS1 Delež izpostavljenih stavb	16.537 11,3 %	20.418 14,0 %	23.878 16,3 %
Št. stavb v DS2 Delež izpostavljenih stavb	18.960 13,0 %	30.363 20,8 %	40.479 27,8 %
Št. stavb v DS3 Delež izpostavljenih stavb	4142 2,8 %	11.680 8,0 %	23.291 15,9 %
Št. stavb v DS4 Delež izpostavljenih stavb	962 0,7 %	4637 3,2 %	16.039 11,0 %
Št. porušениh stavb Delež izpostavljenih stavb	139 0,1 %	668 0,5 %	2320 1,6 %
Žrtve glede na ekvivalentno letno zasedenost stavb	57	330	1208
Pričakovana ekonomska izguba (10 ⁹ €)	2,5	7,1	16,4

Preglednica 3. Število stavb v izbranih stanjih poškodovanosti in pripadajoče posledice (število porušениh stavb, število smrtnih žrtev in pričakovana ekonomska izguba) za izbrani potresni scenarij. Rezultat so prikazani za 90-odstotni interval zaupanja in mediano.

5 UKREPI ZA POVEČANJE POTRESNE ODPORNOSTI V SLOVENIJI IN SKLEP

Rezultati analize potresnega tveganja stavbnega fonda v Sloveniji so pokazali, da Slovenija ni potresnoodporna. Zato smo Ministrstvu za okolje in prostor RS v okviru Seizmičnega stresnega testa stavbnega fonda v Sloveniji pripravili načrt upravljanja potresnega tveganja do leta 2050 [Dolšek in sodelavci, 2020], v upanju, da ga bodo začeli v doglednem času realizirati. Primarni cilj načrta upravljanja potresnega tveganja so ukrepi za krepitev potresne odpornosti, ki obsegajo utrditev stavb oziroma nadomestne gradnje, vendar je zmotno prepričanje, da je takšne ukrepe možno realizirati, ne da bi izvedli nekatere druge ukrepe, kot so ukrepi za ovrednotenje potresne varnosti, ukrepi za širjenje informacij o potresni varnosti in ukrepi za zagotavljanje finančnih spodbud za krepitev potresne varnosti. Vsaka od teh kategorij ukrepov ima različen namen, čeprav so predlagani ukrepi medsebojno povezani. Na primer, ukrepi za ovrednotenje potresne varnosti, ki obsegajo pridobitev ustreznih podatkov o stavbnem fondu in izboljšanje modelov, uporabljenih v analizi potresnega tveganja, so usmerjeni k povečanju zanesljivosti ocene potresne varnosti, s tem pa omogočajo racionalnejše odločitve glede utrditve oz. nadomestitve stavb in bolj smotrno delitev finančnih spodbud. Ukrepi za širjenje informacij o potresnem tveganju se nanašajo na izvedbo seiz-

mičnih stresnih testov posameznih stavb in stavbnega fonda ter javni prikaz njihovih rezultatov v obliki potresnih izkaznic, ti ukrepi pa bodo predvidoma povečali angažiranost deležnikov za izvedbo ukrepov utrditve in ukrepov za ovrednotenje potresne varnosti. Enak namen imajo ukrepi za zagotavljanje finančnih spodbud. Ti obsegajo ustanovitev Sklada za krepitev potresne odpornosti, katerega cilj je zagotavljanje investicij za vse preostale kategorije ukrepov. Seizmični stresni test stavbnega fonda v Sloveniji [Dolšek in sodelavci, 2020], katerega del je tudi analiza potresnega tveganja, ki je prikazana v tem članku, je možno in seveda tudi smiselno izboljšati in periodično ponavljati, saj so nekateri vhodni podatki še precej neceloviti. Periodičnost seizmičnega stresnega testa pa je treba razumeti kot sestavni del upravljanja tveganj, saj omogoča spremljanje krepitve oziroma nazadovanja potresne odpornosti skupnosti.

6 ZAHVALA

Metodologija za izvedbo seizmičnega stresnega testa je rezultat temeljnega raziskovalnega projekta Seizmični stresni test grajenega okolja (J2-8159) in raziskav v okviru raziskovalnega programa Potresno inženirstvo (P2-0185), ki ju financira Javna Agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS). Avtorji se za podporo zahvaljujemo ARRS. Prav tako se zahvaljujemo Ministrstvu za okolje in prostor RS in viš. pred. dr. Miranu Ferlanu, ki sta nam pomagala zbrati potrebne podatke za izvedbo analize. Ministrstvu za okolje in prostor se zahvaljujemo tudi za financiranje aplikacije metodologije na primeru stavbnega fonda Republike Slovenije.

7 LITERATURA

24ur.com, <https://www.24ur.com/novice/slovenija/kako-varne-so-stavbe-v-sloveniji-pred-mocnimi-potresi.html>, datum vpogleda: 26. 10. 2021, 2021.

Akkar, S., Sandikkaya, M.A., Senyurt, M., Azari Sisi, A., Ay, B.O., Traversa, P., Douglas, J., Cotton, F., Luzi, L., Hernandez, B., Godey, S., Reference database for seismic ground-motion in Europe (RESORCE), Bulletin of Earthquake Engineering, 12, 311–339, 2014.

Ancheta, T.D., Darragh, R.B., Stewart, J.P., Seyhan, E., Silva, W.J., Chiou, B.S.J., Wooddell, K.E., Graves, R.W., Kottke, A.R., Boore, D.M., Kishida, T., Donahue, J.L., NGA-West2 database, Earthquake Spectra, 30, 989–1005, 2014.

ARSO, Agencija Republike Slovenije za okolje, Akcelorogrami zabeleženi v Sloveniji med potresom 29.12.2020 z epicentrom v Petrinji, 2021.

Babič, A., Potresni obremenitveni test za montažne armirano-betonske hale, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2017.

Bradley, B.A., Structure-Specific Probabilistic Seismic Risk Assessment, Doktorska disertacija, University of Canterbury, Department of Civil and Natural Resources Engineering, Christchurch, Nova Zelandija, 2009.

Bradley, B. A., Dhakal, R. P., Error estimation of closed-form solution for annual rate of structural collapse. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 37(15), 1721–1737, 2008.

Baker, J. W., Conditional mean spectrum: Tool for ground-motion selection, Journal of Structural Engineering, 137, 322–331, 2011.

Bindi, D., Massa, M., Luzi, L., Ameri, G., Pacor, F., Puglia, R., Augliera, P., Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods up to 3.0 s using the RESORCE dataset, Bulletin of Earthquake Engineering, 12, 391–430, 2014a.

Bindi, D., Massa, M., Luzi, L., Pacor, F., Puglia, R., Augliera, P., Ameri, G., Erratum to: Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods up to 3.0 s using the RESORCE dataset (Bull Earthquake Eng, 10.1007/s10518-013-9525-5), Bulletin of Earthquake Engineering, 12, 431–448, 2014b.

CEN/TC 250/SC8, wdEN1998-1-1, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance—Part 1-1: General Rules and Seismic Action, CEN European Committee for Standardisation, Bruselj, Belgija, 2020.

CRP, spletna stran Centralnega registra prebivalstva <https://nio.gov.si/nio/asset/nio+centralni+register+prebivalstva+crp+vpogled+preko+emso?lang=sl>, Centralni register prebivalstva, Vlada RS, Ministrstvo za notranje zadeve, datum vpogleda: 26. 10. 2021, 2021.

Dolšek, M. Odziv armiranobetonskih okvirov s polnili med potresi, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2002.

Dolšek, M., Simplified method for seismic risk assessment of buildings with consideration of aleatory and epistemic uncertainty. Structure and Infrastructure Engineering, 8, 939–953, 2012.

Dolšek, M., Lazar Sinkovič, N., Žižmond, J., IM-based and ED-P-based decision models for the verification of the seismic collapse safety of buildings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 46, 1–18, 2017.

Dolšek, M., Žižmond, J., Babič, A., Lazar Sinkovič, N., Jamšek, A., Gams, M., Isaković, T., Seizmični stresni test stavbnega fonda Republike Slovenije (2020–2050), Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo, 2020.

Fajfar, P., Pregled nekaterih programov potresnega utrjevanja in izbor pregledne literature s področja potresne ogroženosti šol, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2017.

Ferlan, M., Herlec, U., Digitalna geološka karta in GIS, Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 1999–2000, zbornik referatov simpozija, Ljubljana, 26. september 2000, 209–225, 2000.

Ferlan, M., Herlec, U., Konceptualni model GIS-a za geologijo, Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2001–2002, 87–95, 2002.

HAZUS MH 2.1, Technical Manual, Multi-Hazard Loss Assessment Methodology, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, ZDA, 2015.

Ibarra, L. F., Krawinkler, H., Global collapse of frame structures under seismic excitations. John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford, Kalifornija, ZDA, 2005.

ICPD, Presidency of the Council of Ministers Italian Civil Protection Department. National Risk Assessment. Overview of the Potential Major Disasters in Italy: Seismic, Volcanic, Tsuna-

mi, Hydro-Geological/hydraulic and Extreme Weather, Droughts and Forest Fire Risks; ICPD: Rim, Italija, 2018.

Jamšek, A., Seizmični stresni test z nepopolnimi podatki o stavbi, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2020.

Jayaram, N., Baker, J. W., Correlation model for spatially distributed ground-motion intensities, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38, 1687–1708, 2009.

Kappos, A. J., Panagopoulos, G., Panagiotopoulos, C., Penelis, G., A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4, 391–413, 2006.

Kilar, V., Kušar, D., Assessment of the earthquake vulnerability of multi-residential buildings in Slovenia = Ocena potresne ogroženosti večstanovanjskih zgradb v Sloveniji, *Acta geographica Slovenica*, 49(1), 89–118, 2009.

Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P., Probabilistic seismic hazard assessment methodology for distributed seismicity, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 2502–2515, 2003.

Lazar Sinković, N., Dolšek, M., Fatality risk and its application to the seismic performance assessment of a building, *Engineering Structures*, 205, 2020.

Luco, N., Ellingwood, B. R., Hamburger, R. O., Hooper, J. D., Kimball, J. K., Kircher, C. A., Risk targeted versus current seismic design maps for the conterminous United States, *Structural Engineers Association of California convention*, Squaw Creek, California, 2007.

Lutman, M., Klemenc, I., Weiss, P., Zupančič, P., Šket Motnikar, B., Banovec, P., Cerk, M., POTROG – Potresna ogroženost v Sloveniji za potrebe Civilne zaščite, *Zavod za gradbeništvo*, 2013.

NIBS, National Institute of Building Sciences, Multihazard loss estimation methodology – Earthquake model (HAZUS 09 technical manual), Poročilo pripravljeno za Federal Emergency Management Agency, 712 str., 2009.

Pavel, F., Vacareanu, R., Scenario-based earthquake risk assessment for Bucharest, Romania, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 20, 138–144, 2016.

PEG, spletna stran PEG gradbenega portala–Projektantske Ocene Investicij <http://www.peg-online.net/ocene-investicij>, PeG podatkovniki d.o.o., datum vpogleda: 10. 2. 2020, 2020.

Pitilakis, K., Argyroudis, S., Kakderi, K., Argyroudi, A., SYNER-G Project: Deliverable D8.20: Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain, Aristotle University of Thessaloniki & Commission of the European Communities–Directorate General Joint Research Centre, Ispra, Italija, 2013.

Porter, K.A., Kiremidjian, A.S., Assembly-Based Vulnerability of Buildings and Its Uses in Seismic Performance Evaluation and Risk Management Decision-Making, Stanford University, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford, CA, ZDA, 2001.

Porter, K., Kennedy, R., Bachman, R., Creating Fragility Functions for Performance-Based Earthquake Engineering, *Earthquake Spectra*, 23(2), 471–489, 2007.

REN, spletna stran Registra nepremičnin <https://eprosor.gov.si/imps/srv/api/records/26252870-5100-4408-a3e0-54ea80eb3612>, Register nepremičnin, Ministerstvo za okolje in prostor, Geodetska uprava Republike Slovenije, datum vpogleda: 26. 10. 2021, 2021.

Schäfer, D., Scherer, R., Pietsch, M., Wenzel, H., SYNER-G Project: Deliverable D7.1: Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain, SYNER-G D7.1–Functional Fragility Curve Archive, Vienna Consulting Engineers: Dunaj, Avstrija, 2011.

Snoj, J., Ocena potresnega tveganja zidanih stavb, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2014.

Snoj, J., Dolšek, M., Pushover-based seismic risk assessment and loss estimation of masonry buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 49, 567–588, 2020.

Starbuck, W.H., Perspective–Cognitive Reactions to Rare Events: Perceptions, Uncertainty, and Learning, *Organization Science*, 20, 925–937, 2009.

Strasser, F. O., Bommer, J. J., Şeşetyan, K., Erdik, M., Çağnan, Z., Irizarry, J., Goula, X., Lucantoni, A., Sabetta, F., Bal, I. E., Crowley, H., Lindholm, C., A comparative study of European earthquake loss estimation tools for a scenario in Istanbul, *Journal of Earthquake Engineering*, 12, 246–256, 2008.

Šket Motnikar, B., Nova karta potresne nevarnosti Slovenije in metodologija izdelave, Slovenski inženirski dan, Sobivanje s potresi in drugimi naravnimi nesrečami, Ljubljana, 2021.

Vidrih, R., Godec, M., Ljubljanski potres leta 1895 in njegov vpliv na razvoj gradbeno-tehničnih predpisov, *UJMA*, 231–237, 1995.

Woessner, J., Laurentiu, D., Giardini, D., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., Valensise, G., Arvidsson, R., Basili, R., Demircioglu, M.B., Hiemer, S., Meletti, C., Musson, R. W., Rovida, A. N., Şeşetyan, K., Stucchi, M. in The SHARE Consortium, The 2013 European Seismic Hazard Model: Key components and results, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13, 3553–3596, 2015.

Weatherill, G., Esposito, S., Iervolino, I., Franchin, P., Cavalieri, F., Framework for Seismic Hazard Analysis of Spatially Distributed Systems, V SYNER-G: Systemic Seismic Vulnerability and Risk Assessment of Complex Urban, Utility, Lifeline Systems and Critical Facilities, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, Uredniki: Pitilakis, K., Franchin, P., Khazai, B., Wenzel, H., Springer: Dordrecht, Nizozemska, 2014.

UL RS, Pravilnik o metodologiji izdelave in izdaji energetske izkaznice stavb. Uradni list RS, št. 92/14, Uradni list Republike Slovenije, 10302–10321, 2014.

UL RS, Pravilnik o spremembah Pravilnika o metodologiji izdelave in izdaji energetske izkaznice stavb. Uradni list RS, št. 47/19, Uradni list Republike Slovenije, 6040, 2019.

Zupančič, P., Mencin, E., Trobec, A., Gosar, A., Izdelava strokovnih podlag za določitev potresne obtežbe na obravnavanih območjih, Del A: Tipologija tal, POTROG – Potresna ogroženost v Sloveniji za potrebe Civilne zaščite, *Zavod za gradbeništvo*, 2013.

Zupančič, P., Agencija RS za okolje, Republika Slovenija, Ministrstvo za okolje in prostor, osebna komunikacija, 2020.