

Unaprjeđenje metodologije procjene potresnog rizika za zgrade

Pavić, Gordana

Doctoral thesis / Disertacija

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:837784>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-22**



GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Repository / Repozitorij:

[Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek](#)



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Doktorski studij Građevinarstvo

Doktorski rad

**UNAPRJEĐENJE METODOLOGIJE PROCJENE POTRESNOG RIZIKA ZA
ZGRADE**

Gordana Pavić, mag. ing. aedif.

Osijek, 29. lipnja 2023.

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Doctoral study in Civil Engineering

Doctoral dissertation

**IMPROVING THE METHODOLOGY OF SEISMIC RISK ASSESSMENT
FOR RESIDENTIAL BUILDINGS**

Gordana Pavić, M. Sc. in Civ. Eng.

Osijek, June 29, 2023.

PROSUDBENA POVJERENSTVA I BIBLIOGRAFSKI PODACI

Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorskog rada

Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorskog rada imenovano na 5. izvanrednoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 14. prosinca 2020. godine:

1. prof. dr. sc. Ivica Guljaš, redoviti profesor, dipl. ing. građ., Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, predsjednik Povjerenstva
2. izv. prof. dr. sc. Marijana Hadzima - Nyarko, redovita profesorica, dipl. ing. građ., Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, članica
3. izv. prof. dr. sc. Naida Ademović, izvanredna profesorica, dipl. ing. građ., Sveučilište u Sarajevu, Građevinski fakultet, Sarajevo, Bosna i Hercegovina, članica

Tema i mentori doktorskog rada prihvaćeni su odlukom Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na 8. redovitoj elektronskoj sjednici održanoj 10. ožujka. 2021. godine.

Povjerenstvo za ocjenu doktorskog rada

Povjerenstvo za ocjenu doktorskog rada imenovano na 8. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 19. travnja 2023. godine:

1. izv. prof. dr. sc. Ivan Kraus, izvanredni profesor, dipl. ing. građ., Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, predsjednik Povjerenstva
2. izv. prof. dr. sc. Hrvoje Draganić, izvanredni profesor, dipl. ing. građ., Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, član
3. prof. dr. sc. Željana Nikolić, redovita profesorica, dipl. ing. građ., Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, članica

Doktorski rad prihvaćen je odlukom Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na 12. redovitoj sjednici održanoj 14. lipnja 2023. godine.

Povjerenstvo za obranu doktorskog rada

Povjerenstvo za obranu doktorskog rada imenovano na 12. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 14. lipnja 2023. godine:

1. izv. prof. dr. sc. Ivan Kraus, izvanredni profesor, dipl. ing. građ., Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, predsjednik Povjerenstva
2. izv. prof. dr. sc. Hrvoje Draganić, izvanredni profesor, dipl. ing. građ., Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, član
3. prof. dr. sc. Željana Nikolić, redovita profesorica, dipl. ing. građ., Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, članica
4. izv. prof. dr. sc. Ivan Radić, izvanredni profesor, dipl. ing. građ., Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, zamjenski član
5. izv. Prof dr. sc. Krunoslav Minažek, izvanredni profesor, dipl. ing. građ., Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, zamjenski član

Doktorski rad javno je obranjen 29. lipnja 2023. na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Doktorski rad sadržava 348 stranica, 100 ilustracija, 69 tablica i 494 citiranih publikacija.

Prva mentorica doktorskog rada je prof. dr. sc. Marijana Hadzima - Nyarko, redovita profesorica, dipl. ing. građ., Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Drugi mentor doktorskog rada je izv. prof. dr. sc. Borko Bulajić, izvanredni profesor, dipl. Ing. građ., Sveučilište u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Republika Srbija

Istraživanje u okviru doktorskog rada pripada znanstvenom području tehničkih znanosti, znanstvenom polju građevinarstvo.

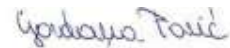
IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je doktorski rad isključivo rezultat mog vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima i oslanja na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrebljavane bilješke i bibliografija. Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno prepisan iz necitiranog rada te kako nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem kako nisam prijavila doktorski rad s istovjetnom temom na drugom studiju Sveučilišta ili na drugom sveučilištu.

Osijek, 29. lipnja 2023.

Gordana Pavić, mag. ing. aedif.



(potpis autora)

PREDGOVOR

Procjene potresnog rizika zgrada oduvijek se smatraju izazovnim zadatkom, pa nije neobično da se analizirajući potresni rizik, neminovno počinje promišljati o potencijalu i učinkovitosti postojećih te mogućnostima predlaganja novih unaprjeđenih metodologija i postupaka proračuna.

Kako je potresni rizik međuovisnost svih komponenata potresnog rizika istražene su mogućnosti i predložena unaprjeđenja u procjeni potresne opasnosti i oštećljivosti zgrada te u modeliranju izloženosti zgrada kao najkritičnije komponente potresnog rizika.

Spoznato je naime, da su postojeće procjene potresne oštećljivosti zgrada upitne pouzdanosti, a istraživanja razloga zašto je to tako ukazala su na druge izazove, poput zanemarivanja potresne opasnosti u područjima s umjerenom i malom seizmičnošću ili nepostojanja baza podataka o zgradama i drugim elementima potresnog rizika.

Predloženom unaprjeđenom metodologijom procijenjen je potresni rizik promatranog područja te oštećljivost zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka generiranog predloženom unaprjeđenom metodologijom.

Od srca zahvaljujem mojim mentorima, prof.dr.sc. Marijani Hadzima-Nyarko i izv.prof.dr.sc. Borku Bulajiću na podršci, usmjeravanju, nesebičnoj pomoći te što su omogućili da izazov doktorskog studija i izrade disertacije budu neprocjenjivo pozitivno iskustvo.

Zahvaljujem prof. dr. sc. Draženu Aničiću, emeritusu Akademije tehničkih znanosti Hrvatske na savjetima i stručnoj pomoći tijekom znanstvenog rada i izrade doktorskog rada.

Hvala, na novim idejama i spoznajama izv. prof. dr. sc. Hugi Rodriguesu te kolegama: Romainu, Nadji i Hugi, na pomoći Vedranu, Mihaelu i drugim dragim prijateljima i kolegama.

Hvala mojoj majci i sestri na bezuvjetnoj podršci te obitelji na strpljenju.

SAŽETAK

U radu se predlaže unaprjeđenje metodologije procjene potresnog rizika za zgrade. Istraživanje na kojem se temelji doktorski rad pokrenuto je zbog spoznaja da potresna opasnost u područjima s umjerenom i malom seizmičnošću nije u potpunosti prepoznata te da postojeće metode procjene oštetljivosti zgrada, generiraju rezultate upitne pouzdanosti jer upotrebljavaju globalne procjene potresne opasnosti, modele izloženosti i tipologije zgrada. Istražene su mogućnosti unaprjeđenja procjena svih triju komponenata potresnog rizika.

Za potresnu opasnost istražene su i dokazane prednosti koje upotreba probabilističkog pristupa, spektara jednolike opasnosti te mikrozoniranja promatranog područja, imaju na konačne rezultate procjene potresne opasnosti. Predložene su nove atenuacijske jednadžbe za područja s umjerenom i malom seizmičnošću, procijenjene vrijednosti horizontalnih i vertikalnih vršnih ubrzanja za područja čije je temeljno tlo sastavljeno od dubokih slojeva lokalnog tla i dubokih geoloških sedimenata. Izrađene su karte seizmičkog mikrozoniranja promatranog područja.

Pouzdanije modeliranje izloženosti istražilo se u smislu prikupljanja podataka o zgradama (i drugim elementima rizika) na licu mjesta te uzimajući u obzir samo one karakteristike zgrada koje su bitne za procjene potresne oštetljivosti. Izrađen je model izloženosti reprezentativnog grada s promatranog područja na temelju kojeg su predložene predominantne tipologije zgrada za koje je utvrđeno da mogu biti dodijeljene zgradama na svim područjima sa sličnom građevinskom praksom i primijenjenim građevinskim propisima.

Rezultati istraživanja i modeliranja potresne opasnosti i izloženosti integrirani su u istraživanju načina unaprjeđenja proračuna potresne oštetljivosti zgrada. U procjeni potresne oštetljivosti upotrijebljeni su modifikatori oštetljivosti zbog utjecaja karakteristika temeljnog tla za čiji su proračun uzeti u obzir spektri jednolike opasnosti i amplifikacija lokalnih i dubokih slojeva temeljnog tla. Za sve zgrade iz modela izloženosti i predominantne tipologije proračunate su vrijednosti ukupnog indeksa oštetljivosti te predloženi razredi oštetljivosti. Istražena je i razlika vrijednosti indeksa oštetljivosti te promjenjivost razreda oštetljivosti s obzirom na najvjerojatniji i manje vjerojatan tip temeljnog tla.

Rezultati modeliranja potresne opasnosti, izloženosti i oštetljivosti promatranog područja implementirani su u GIS sustav.

Ključne riječi: unaprjeđenje metodologije, procjena potresnog rizik, zgrade, potresna opasnost, izloženost, oštetljivost

ABSTRACT

The dissertation proposes the improvement of earthquake risk assessment methodologies for buildings. The research on which this work is based was initiated due to the knowledge that the earthquake risk in areas with moderate and low seismicity is not fully recognized and that the existing assessments of building vulnerability generate results of questionable reliability because they use global assessments of earthquake risk, exposure models and building typologies. Possibilities of improving the assessments of all three components of earthquake risk were explored.

For the earthquake hazard, the advantages that the use of the probabilistic approach, uniform hazard spectra and microzoning of the observed area have on the final results of the earthquake hazard assessment have been investigated and proven. New attenuation equations were proposed for areas with moderate and low seismicity and also estimated were the values of horizontal and vertical peak accelerations for areas whose underlying soil is composed of deep layers of local soil and deep geological sediments. Seismic microzonation maps of the observed area were created.

More reliable exposure modeling has been explored in terms of collecting data on buildings (and other risk elements) in site and considering only those building characteristics which are relevant to seismic vulnerability assessments. An exposure model of a representative city from the observed area was created, on the basis of which predominant typologies of buildings were proposed, for which it was determined that they could be assigned to buildings in all areas with similar construction practices and applied construction regulations.

The results of research and modeling of seismic hazard and exposure are integrated in research on how to improve the calculation of seismic vulnerability of buildings. In the assessment of seismic vulnerability, vulnerability modifiers were used due to the influence of the characteristics of the foundation, for the calculation of which the spectra of uniform danger and amplification of local and deep layers of the foundation soil were taken into account. For all buildings from the exposure model and predominant typology, the values of the total vulnerability index and the proposed vulnerability classes were calculated. The difference in vulnerability index values and the variability of the vulnerability class were also investigated with respect to the most probable and less probable type of foundation soil. The results of modeling the earthquake hazard, exposure and vulnerability of the observed area we implemented in the GIS system.

Key words: improvement of methodology, assessment of seismic risk, buildings, seismic hazard, exposure, vulnerability

SADRŽAJ

PREDGOVOR.....	I
SAŽETAK	III
SADRŽAJ	VI
POPIS ILUSTRACIJA.....	XII
POPIS TABLICA	XX
POPIS KRATICA I SIMBOLA.....	XXV
1. UVOD.....	1
1.1. Problem i hipoteze	3
1.1.1. Potresna opasnost – problemi i hipoteze 1 i 2	3
1.1.2. Izloženost – problemi i hipoteza 3	6
1.1.3. Potresna oštetljivost – problemi i hipoteza 4	9
1.1.4. Potresni rizik – problemi i hipoteza 5	12
1.2. Cilj istraživanja i komponente za njegovu realizaciju.....	14
1.3. Metodologija i faze istraživanja	16
1.3.1. Predviđanje potresne opasnosti – 1. faza	19
1.3.2. Modeliranje izloženosti i oštetljivosti – 2. faza	20
1.3.3. Dvorazinska analiza potresnog rizika – 3. faza.....	22
1.4. Znanstveni doprinos doktorskog rada	24
2. PREGLED SPOZNAJA, METODOLOGIJA I METODA ISTRAŽIVANJA KOMPONENATA POTRESNOG RIZIKA	26
2.1. Zašto se procjenjuje potresni rizik?	26
2.1.1. Pojam rizika.....	28
2.1.2. Potresni rizik.....	30
2.2. Predviđanja potresne opasnosti	33
2.2.1. Modeliranje odziva konstrukcija na potresnu uzbuđu – spektri odziva	35

2.2.2. Skaliranje mjera intenziteta gibanja temeljnog tla - atenuacijske jednadžbe	41
2.2.3. Uloga temeljnog tla u predviđanju potresne opasnosti	45
2.3. Izloženost elemenata potresnog rizika	51
2.3.1. Temelj za modeliranje izloženosti - podatci o zgradama	52
2.3.2. Modeli izloženosti zgrada	56
2.3.3. Tipologije zgrada i taksonomija	61
2.3.4. Globalne taksonomije	63
2.3.5. Taksonomije u Republici Hrvatskoj	69
2.4. Potresna oštetljivost zgrada	71
2.4.1. Metodologije procjene potresne oštetljivosti	73
2.4.2. Empirijski pristup za procjene oštetljivosti zgrada	76
2.4.3. Analitički pristup procjene oštetljivosti zgrada	79
2.4.4. Hibridni pristup za procjene oštetljivosti zgrada	83
3. MODELIRANJE POTRESNE OPASNOSTI ZA PROMATRANO PODRUČJE	88
3.1. Zašto istraživanje potresne opasnosti za područja male do umjerene siezmičnosti?	89
3.2. Promatrano područje	93
3.2.1. Seizmološke karakteristike	94
3.2.2. Geološko-strukturne karakteristike	96
3.3. Karte potresne opasnosti	99
3.3.1. Procjene horizontalnih vrijednosti PGA postojećim GMPE	102
3.3.2. Procjene vertikalnih vrijednosti PGA postojećim GMPE	105
3.4. Probabilistički pristup za modeliranje potresne opasnosti na promatranom području	107
3.4.1. Predviđanje vrijednosti PGA promatranog područja atenuacijskom jednadžbom Sabetta i Pugliese (1996.)	111
3.4.2. Rezultati preliminarnog proračuna PGA atenuacijskom jednadžbom Sabetta i Pugliese (1996.)	114
3.5. UHS spektri za modeliranje potresne opasnosti promatranog područja	116

3.5.1. Osnovne značajke i nedostaci spektara odziva u normi HRN EN 1998-1:2011	118
3.5.2. Preliminarni UHS spektri za promatrano područje	121
3.6. Razvoj atenuacijskih jednadžbi za skaliranje vrijednosti PGA i PSA na dubokim lokalnim tlama i dubokim geološkim slojevima.....	123
3.6.1. Prijedlog jednadžbi za skaliranja horizontalnih vrijednosti PGA.....	127
3.6.2. Prijedlog jednadžbi za skaliranja vertikalnih vrijednosti PGA	130
3.6.3. Skaliranja horizontalnih amplituda PSA.....	134
3.6.4. Skaliranje vertikalnih amplituda PSA	140
3.7. Mikrozoniranje promatranog područja	144
3.7.1. Karte mikrozoniranja iz skaliranih horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA.....	148
3.7.2. Usporedba različitih krivulja potresne opasnosti proračunatih u ovom istraživanju	154
3.7.3. Spektri jednolike opasnosti i karte potresne opasnosti iz skaliranih horizontalnih i vertikalnih amplituda PSA.....	156
3.8. Zaključak poglavlja	164
4. IZLOŽENOST ELEMENATA RIZIKA PROMATRANOG PODRUČJA	169
4.1. Uvod	170
4.2. Izloženost u Republici Hrvatskoj	171
4.2.1. Razdoblja gradnje i pripadna obilježja	174
4.2.2. Građevinski propisi	180
4.2.3. Pregled nacionalnog fonda zgrada.....	184
4.3. Grad Osijek – područje za modeliranje izloženosti.....	189
4.3.1. Karakteristike gradnje i izloženih elemenata rizika	190
4.4. Unaprijeđena metodologija modeliranja izloženosti.....	193
4.5. Razvoj modela izloženosti grada Osijeka	194
4.5.1. Karakteristike zgrada za model izloženosti.....	195
4.5.2. Usvojene karakteristike zgrada za model izloženosti grada Osijeka.....	198
4.5.3. Metodologija prikupljanja podataka.....	202

4.6. Model izloženosti grada Osijeka – rezultati	205
4.6.1. Statističke karakteristika zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka	206
4.7. Generiranje konstrukcijskih tipologija modela izloženosti grada Osijeka	210
4.7.1. Algoritam za definiranje klasifikacijskih pravila i usvajanje konstrukcijskih tipologija	210
4.7.2. Prijedlog konstrukcijskih tipologija iz modela izloženosti grada Osijeka	212
4.7.3. Usporedba predložene tipologije s postojećim tipologijama	214
4.7.4. Rezultati raspodjele predloženih tipologija u modelu izloženosti	215
4.8. QGIS za obradu i vizualizaciju podataka iz modela izloženosti	218
4.8.1. Vizualizacija modela izloženosti grada Osijeka u QGIS-u	219
4.9. Zaključak.....	225
5. OŠTETLJIVOST ZGRADA ODREĐENA IZ MODELA IZLOŽENOSTI GRADA OSIJEKA	228
5.1. Uvod	229
5.2. Makroseizmička metoda za proračun oštetljivosti	231
5.2.1. Tipologijski indeks oštetljivosti (V_0)	236
5.2.2. Regionalni faktor oštetljivosti (ΔV_R) u proračunu oštetljivosti zgrada	237
5.2.3. Modifikator potresnog ponašanja (ΔV_m)	239
5.3. Utjecaj karakteristika temeljnog tla na oštetljivost zgrada	243
5.3.1. Intenzitet kao parametar potresne opasnosti za predviđanje oštetljivosti zgrada	243
5.3.2. Modifikator oštetljivosti zbog utjecaja karakteristika tla (ΔV_s).....	244
5.4. Proračun parametara oštetljivosti pojedinačnih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka	246
5.4.1. Najvjerojatnije vrijednosti tipologijskih indeksa oštetljivosti (V_0)	247
5.4.2. Rezultati proračuna modifikatora potresnog ponašanja zgrada (ΔV_m)	248
5.4.3. Proračun modifikatora oštetljivosti zbog utjecaja karakteristika tla ($V_{s,n}$).....	250
5.5. Oštetljivost zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka	261
5.5.1. Ukupni indeks oštetljivost (V) pojedinačnih zgrada.....	261
5.5.2. Razredi oštetljivosti zgrada	262

5.6. Modeliranje oštećljivosti tipologija zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka	265
5.6.1. Modifikatori potresnog ponašanja tipologija zgrada (ΔV_m).....	266
5.6.2. Indeksi oštećljivosti tipologija zgrada (V) za tip tla B i C	269
5.6.3. Razredi oštećljivosti za tipologije zgrada.....	271
5.6.4. Usporedba predloženih razreda oštećljivosti.....	274
5.6.5. Srednji stupanj oštećljivosti za predložene tipologije zgrada	276
5.7. Vizualizacija rezultata proračuna oštećljivosti za zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka u QGIS-u	281
5.8. Zaključak poglavlja	283
6. PROCJENA POTRESNOG RIZIKA (GUBITAKA) ZA ZGRADE IZ MODELA IZLOŽENOSTI GRADA OSIJEKA	286
6.1. Potresni gubitci	286
6.1.1. Vjerojatnost gubitaka.....	289
6.2. Procjene potresnih gubitaka za zgrade.....	292
6.2.1. Financijska procjena gubitaka.....	294
6.2.2. Koeficijenti oštećenja.....	296
6.2.3. Procjena gubitaka za zgrade prema Aničiću (1992.).....	298
6.3. Proračun gubitaka za zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka.....	300
6.3.1. Matrice vjerojatnosti oštećenja	301
6.3.2. Modeliranje gubitaka koeficijentima oštećenja.....	304
6.3.3. Gubitci modela izloženosti grada Osijeka	308
7. ZAKLJUČCI, ZNANSTVENI DOPRINOSI I SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA.....	312
7.1. Zaključak.....	312
7.2. Izvorni znanstveni doprinosi	318
7.3. Smjernice za daljnja istraživanja	319
BIBLIOGRAFIJA	322
CURRICULUM VITAE.....	357

POPIS ILUSTRACIJA

Slika 1.1 Faze za ostvarenje cilja istraživanja	17
Slika 1.2 Shematski prikaz – predviđanje potresne opasnosti.....	20
Slika 1.3 Shematski prikaz – modeliranje izloženosti i oštetljivosti.....	22
Slika 1.4 Shematski prikaz – unaprijeđena dvorazinska analiza potresnog rizika.....	23
Slika 2.1 Porast globalnih ekonomskih gubitaka posljednjih desetljeća, kao rezultat prirodnih katastrofa i neplanirane urbanizacije (EMDAT 2020)	26
Slika 2.2 Broj potresa (M_w 5 po Richterovoj ljestvici) koji su se dogodili u posljednja dva desetljeća (Szmigiera 2021)	27
Slika 2.3 Komponente FAO procesa procjene rizika (prema FAO 1995).....	29
Slika 2.4 Proces procjene potresnog rizika (prema Pavić i dr. 2020b).....	31
Slika 2.5 Zapisi potresa (lijevo) i spektri odziva ubrzanja (desno) za potrese koji su pogodili El Centro, Mexico City i Friuli.....	36
Slika 2.6 Generiranje spektra odziva ubrzanja.....	37
Slika 2.7 Prikupljanje podataka o zgradama na temelju zračnih snimki (Omarzadeh i dr.2021).....	54
Slika 2.8 PAGER baza podataka o zgradama i izvori podataka (Jaisval i dr. 2010).....	58
Slika 2.9 Distribucija zgrada iz GED modela izloženosti (Silva i dr. 2020)	59
Slika 2.10 Različite razine veličine promatranog područja	72
Slika 2.11 Stanja oštećenja prema EMS – 98, prerađena prema D'Ayala i dr. (2015.)	73
Slika 2.12 Procjena donje i gornje granice oštećenja kvalitativnim pojmovima ljestvice intenziteta definirane kao rasponi postotaka, prema ljestvici EMS – 98 (Bernardini i dr. 2007)	77
Slika 2.13 Grafički prikaz oštetljivost zgrade a) i b) pretvorba projektnog spektra odziva u $S_a - S_d$ domenu, c) konstruiranje krivulje sposobnosti nosivosti	81
Slika 3.1 Epicentri regionalnih potresa zabilježeni između 1900. i travnja 2021. (USGS 2021), granice centralnog promatranog područja (plavi okvir), epicentri: najvećeg povijesnog potresa na promatranom području (1922. s $M = 4,6$) te nedavnih (2020.-te) potresa u Zagrebu ($M = 5,3$) i Petrinji ($M = 6,4$) (prema Pavić i dr. 2020a).....	90
Slika 3.2 Usporedba standardne metodologije mikrozoniranja i prijedloga unaprijeđenja (prema Pavić i dr. 2020b).....	92

Slika 3.3 Promatrano područje, smještaj te seizmološko-geološke karakteristike (prema Bulajić i dr. 2021a)	93
Slika 3.4 Uzdužni geološki profili promatranog područja (Magaš i dr. 1987).....	97
Slika 3.5 Karte potresne opasnosti Republike Hrvatske za povratna razdoblja 475 (lijevo) i 95 (desno) godina (Herak 2012).....	101
Slika 3.6 a) – e) Probabilistički proračun potresne opasnosti- PSHA (prema Nitish i Ashwani 2020). 107	
Slika 3.7 Ovisnost horizontalnog spektra odziva o geološkim karakteristikama tla	113
Slika 3.8 Vrijednosti PGA za stijenu (lijevo), plitko aluvijalno tlo (sredina) i duboko aluvijalno tlo (desno), dobivene probabilističkim proračunom potresne opasnosti za promatrano područje, upotrebom atenuacijske jednadžbe Sabetta i Pugliese (1996.), za vjerojatnost 10 % u 50 godina (tj. povratno razdoblje od 475 godina), 5 % u 50 godina (povratno razdoblje od 975 godina) i 2 % u 50 godina (povratno razdoblje od 2475 godina)...	114
Slika 3.9 Vrijednosti niza spektralnih amplituda za duboko aluvijalno tlo, dobivene probabilističkim proračunom potresne opasnosti za promatrano područje, upotrebom atenuacijskih jednadžbi za spektralne amplitude Sabetta i Pugliese (1996.), za vjerojatnost 10 % u 50 godina (povratno razdoblje od 475 godina)	115
Slika 3.10 a) – c) Izrada spektra jednolike opasnosti (UHS)	117
Slika 3.11 Elastični spektar odziva tip 1 (HRN EN 1998-1:2011/NA:2011).....	118
Slika 3.12 Spektri jednolike opasnosti za lokaciju 45,55 °N, 18,70 °E, proračunati uporabom atenuacijske jednadžbe Sabetta i Pugliese (1996.), za povratno razdoblje od 475 godina.....	122
Slika 3.13 Spektri jednolike opasnosti za lokaciju 45,55 °N, 18,70 °E, proračunati uporabom atenuacijske jednadžbe Sabetta i Pugliese (1996.), za povratno razdoblje od 975 godina.....	122
Slika 3.14 Spektri jednolike opasnosti za lokaciju 45,55 °N, 18,70 °E, proračunati uporabom atenuacijske jednadžbe Sabetta i Pugliese (1996.), za povratno razdoblje od 2475 godina.....	122
Slika 3.15 Empirijske atenuacijske krivulje horizontalnih vrijednosti PGA proračunate jednadžbama (3.14) do (3.17), za različite uvjete lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva (Bulajić i dr. 2022b)	128
Slika 3.16 Usporedba medijana $\pm 1 \sigma_{log}$ i medijana $\pm 2\sigma_{log}$ (sivo područje) procijenjenih horizontalnih vrijednosti PGA proračunatih jednadžbama (3.14) i (3.16), s vrijednostima PGA snimljenim na dubokim lokalnim temeljnim tlima ($s_L = 2$) i različitim dubokim geološkim slojevima (Bulajić i dr. 2022b).....	129
Slika 3.17 Empirijske atenuacijske krivulje vertikalnih vrijednosti PGA za različite lokalne i duboke geološke uvjete tla (vidi tablicu 3.8), proračunate jednadžbama (3.18) do (3.21) (Bulajić i dr. 2022a)	132

Slika 3.18 Usporedba medijana $\pm 1 \sigma_{\log}$ i medijana $\pm 2\sigma_{\log}$ (sivo područje) procijenjenih vertikalnih vrijednosti PGA proračunatih jednadžbama (3.18) i (3.20), s vrijednostima PGA snimljenim na dubokim lokalnim temeljnim tlima ($s_L = 2$) i različitim dubokim geološkim slojevima (Bulajić i dr. 2022a).....	133
Slika 3.19 Empirijske atenuacijske krivulje za četiri različita perioda oscilacija proračunata pomoću jednadžbe (3.22) i koeficijenata iz tablica 3.9 i 3.8, za duboke slojeve lokalnog tla ($s_L = 2$) i različite parametre dubokih geoloških slojeva (Bulajić i dr. 2021a).....	136
Slika 3.20 Empirijske procjene medijana horizontalnih amplituda PSA, medijana $\pm 1 \sigma_{\log}$ i medijana $\pm 2 \sigma_{\log}$ (zasjenjeno područje) za $s_L = 0$ za stjenovito tlo, $s_L = 2$ za kruto tlo i $s_L = 1$ za duboke slojeve lokalnog tla) koja leže na dubokim geološkim sedimentima ($s = 0$) (Bulajić i dr. 2021a)	138
Slika 3.21 Usporedba između regionalnih horizontalnih spektara pseudoubrzanja snimljenih na dubokim lokalnim tlima ($s_L = 2$) i empirijska predviđanja jednadžbom (3.22) i koeficijentima iz tablice 3.10 (Bulajić i dr. 2021a)	139
Slika 3.22 Empirijske atenuacijske krivulje za četiri različita perioda oscilacija proračunata pomoću jednadžbe (3.23) i koeficijenata iz tablice 3.11 i 3.8, za duboke slojeve lokalnog tla ($s_L = 2$) i različite parametre dubokih geoloških slojeva (Bulajić i dr. 2021b).....	142
Slika 3.23 Medijani provedenih empirijskih procjena vertikalnih vrijednosti PSA, medijana $\pm 1 \sigma_{\log}$ i medijana $\pm 2 \sigma_{\log}$ (zasjenjeno područje) za $s_L = 0$ za stjenovito tlo, $s_L = 2$ za kruto tlo i $s_L = 2$ za duboke slojeve lokalnog tla) koja leže na dubokim geološkim sedimentima ($s = 0$) (Bulajić i dr. 2021b).....	143
Slika 3.24 Odnos između regionalnih vertikalnih spektara pseudoubrzanja na slojevima lokalnog temeljnog tla ($s_L = 2$) i empirijskih predviđanja definiranih jednadžbom (3.23) (Bulajić i dr. 2021b).	144
Slika 3.25 Maksimalni polumjeri za promatrano područje koji moraju biti uključene u PSHA proračune horizontalnih vrijednosti PGA kako bi se postigla točnost ukupne procjene potresne opasnosti od: najmanje 99 % za Tr 95 god. = 205 km, za Tr 475 god. = 132,5 km točno 99 % za Tr 95 god. = 182,5 km, za Tr 475 god. = 115 km (Bulajić i dr. 2022b).....	145
Slika 3.26 Maksimalni polumjeri za promatrano područje koji moraju biti uključene u PSHA proračune vertikalnih vrijednosti PGA kako bi se postigla točnost ukupne procjene potresne opasnosti od: najmanje 99 % za Tr 95 god. = 187,5 km, za Tr 475 god. = 117,5 km točno 99 % za Tr 95 god. = 172,5 km, za Tr 475 god. = 105 km (Bulajić i dr. 2022a)	146
Slika 3.27 Maksimalni polumjeri za promatrano područje koji moraju biti uključene u PSHA proračune horizontalnih vrijednosti spektralnih amplituda kako bi se postigla točnost ukupne procjene od: 99 % za Tr 475 god. za $PSA(T = 0,5 s) = 228$ km, $PSA(T = 0,3 s) = 184$ km, $PSA(T = 0,05 s) = 123$ km 50 % za Tr 475 god. i za $PSA(T = 0,5 s) = 43$ km (Bulajić i dr. 2021a).....	147
Slika 3.28 Maksimalni polumjeri za promatrano područje koji moraju biti uključene u PSHA proračune vertikalnih vrijednosti spektralnih amplituda kako bi se postigla točnost ukupne procjene od: 99 % za Tr 475 god. za $PSA(T = 0,5 s) = 229$ km, $PSA(T = 0,3 s) = 185$ km, $PSA(T = 0,05 s) = 111$ km 50 % za Tr 475 god. i za $PSA(T = 0,5 s) = 58$ km (Bulajić i dr. 2021b)	147

Slika 3.29 Razdvajanje potresne opasnosti za centralnu lokaciju promatranog područja - vjerojatnosti doprinosa potresa različitih epicentralnih udaljenosti i magnituda u vrijednostima prekoračenja ($PGA > pga$) / dostizanja ($PGA = pga$) horizontalnih komponenta potresne opasnosti, za $T_r = 475$ godina (Bulajić i dr. 2022b).....	148
Slika 3.30 Razdvajanje potresne opasnosti za centralnu lokaciju promatranog područja - vjerojatnosti doprinosa potresa različitih epicentralnih udaljenosti i magnituda u vrijednostima prekoračenja ($PGA > pga$) / dostizanja ($PGA = pga$) vertikalnih komponenta potresne opasnosti, za $T_r = 475$ godina (Bulajić i dr. 2022a).....	149
Slika 3.31 Razdvajanje doprinosa, epicentralnih udaljenosti i magnituda u kumulativnoj vrijednosti prekoračenja ($PGA > pga$) / dostizanja ($PGA = pga$) horizontalnih komponenta potresne opasnosti, za različita povratna razdoblja (Bulajić i dr. 2022b)	150
Slika 3.32 Razdvajanje doprinosa, epicentralnih udaljenosti i magnituda u kumulativnoj vrijednosti prekoračenja ($PGA > pga$) / dostizanja ($PGA = pga$) vertikalnih komponenta potresne opasnosti, za različita povratna razdoblja (Bulajić i dr. 2022a)	150
Slika 3.33 Karte potresnog mikrozoniranja za vjerojatnosti od p u t godina koje odgovaraju povratnim razdobljima od 95 (gore lijevo), 475 (gore desno), 975 (dolje lijevo) i 2475 (dolje desno) godina za duboko lokalno temeljno tlo i duboke slojeve geoloških sedimenata u (Bulajić i dr. 2022a)	151
Slika 3.34 Karte potresnog mikrozoniranja za vjerojatnosti od p u t godina koje odgovaraju povratnim razdobljima od 95 (gore lijevo), 475 (gore desno), 975 (dolje lijevo) i 2475 (dolje desno) godina za stjenovito temeljno tlo iznad mješovitih dubokih geoloških sojeva (Bulajić i dr. 2022b)	152
Slika 3.35 Karte potresnog mikrozoniranja za vjerojatnosti p u t godina koje odgovaraju povratnim razdobljima od 95 (gore lijevo), 475 (gore desno), 975 (dolje lijevo) i 2475 (dolje desno) godina za temeljno tlo sastavljeno od dubokog lokalnog tla i dubokih geoloških sedimenata (Bulajić i dr. 2022a)	153
Slika 3.36 Usporedba različitih krivulja potresne opasnosti, generiranih iz skaliranih horizontalnih vrijednosti PGA u ovom istraživanju, s horizontalnim vrijednostima PGA danim na hrvatskim kartama potresne opasnosti (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) i s vrijednostima PGA iz tablice 3.4 (poglavlje 3.3.1.), na temelju stupnjeva intenziteta danih u bivšim propisima SFRJ (Službeni list SFRJ, 1964; 1982; 1990) (Bulajić i dr. 2022b).....	155
Slika 3.37 Usporedba različitih krivulja potresne opasnosti, generiranih iz skaliranih vertikalnih vrijednosti PGA, s vrijednostima PGA za vertikalni smjer danim na hrvatskim kartama potresne opasnosti (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) te usporedba vertikalnih/ horizontalnih omjera PGA predloženih u EN 1998-1:2004 s vertikalnim vrijednostima PGA iz tablice 3.6, na temelju stupnjeva intenziteta iz bivših propisa SFRJ (Službeni glasnik SFRJ, 1964; 1981; 1990) (Bulajić i dr. 2022a)	156
Slika 3.38 Primjeri rezultata razdvajanja potresne opasnosti horizontalnih amplitude PSA za centralnu lokaciju promatranog područja (Bulajić i dr. 2021a)	157
Slika 3.39 Primjeri rezultata razdvajanja potresne opasnosti vertikalnih amplitude PSA za centralnu lokaciju promatranog područja (Bulajić i dr. 2021b)	158

Slika 3.40 Primjeri razdvajanje doprinosa za udaljenost i magnitude, u kumulativnoj vrijednosti prekoračenja ($A > a$) / dostizanja ($A = a$), horizontalnih spektralnih amplituda pseudoubziranja te krivulja ponovljivosti magnitude za područje potresnog izvora koji najviše doprinosi seizmičnosti za centralnu lokaciju promatranog područja (Bulajić i dr. 2021a)	159
Slika 3.41 Primjeri razdvajanje doprinosa za udaljenost i magnitude, u kumulativnoj vrijednosti prekoračenja ($A > a$) / dostizanja ($A = a$), vertikalnih spektralnih amplituda pseudoubziranja te krivulja ponovljivosti magnitude za područje potresnog izvora koji najviše doprinosi seizmičnosti za centralnu lokaciju promatranog područja (Bulajić i dr. 2021b)	159
Slika 3.42 Karte potresne opasnosti za horizontalna ubrzanja za 6 amplituda PSA i vjerojatnosti prekoračenja od 10 % u 10 godina (6 gornjih lijevih slika), 10 % u 50 godina (6 gornjih desnih slika), 5 % u 10 godina (6 donjih lijevih slika), i 2 % u 50 godina (6 donjih desnih slika) (Bulajić i dr. 2021a) .	160
Slika 3.43 Karte potresne opasnosti za vertikalna spektralna ubrzanja u promatranom području za 6 različitih amplituda PSA i vjerojatnosti prekoračenja od 10 % u 10 godina (6 gornjih lijevih slika), 10 % u 50 godina (6 gornjih desnih slika), 5 % u 10 godina (6 donjih lijevih slika), i 2 % u 50 godina (6 donjih desnih slika) (Bulajić i dr. 2021b)	161
Slika 3.44 Usporedba spektara jednolike opasnosti iz horizontalnih amplituda PSA proračunatih za centralnu lokaciju promatranog područja za četiri različite razine vjerojatnosti ponovljivosti sa spektrima Tip 2 prema HRN EN 1998:2011 (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) za tlo tipa C (Bulajić i dr. 2021a)	162
Slika 3.45 Usporedba spektara jednolike opasnosti iz vertikalnih amplituda PSA za centralnu lokaciju promatranog područja za četiri različite razine vjerojatnosti ponovljivosti sa spektrima Tip 2 prema HRN EN 1998:2011 (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) za tlo tipa C (Bulajić i dr. 2021b).....	163
Slika 4.1 Postotak stambenih jedinica u urbanim sredinama Republike Hrvatske prema projektu NERA (prema NERA 2011).....	173
Slika 4.2 Zgrade iz razdoblja 1860. – 1920.	175
Slika 4.3 Zgrade iz razdoblja 1920. – 1948.	175
Slika 4.4 Zgrade iz razdoblja 1948. – 1964.	176
Slika 4.5 Zgrade iz razdoblja 1964. – 1981.	177
Slika 4.6 Zgrada iz razdoblja 1981. – 2005. (Osijek).....	178
Slika 4.7 Zgrada iz razdoblja 2005. – 2012. (Osijek).....	179
Slika 4.8 Zgrade izgrađene poslije 2012.....	180
Slika 4.9 Nestambene zgrade u Republici Hrvatskoj (prema Pavić i dr. 2020a).....	186
Slika 4.10 Gradske četvrti i mjesni odbori grada Osijeka.....	190

Slika 4.11 Prevladavajući konstrukcijskih tipova zgrada postojećeg fonda zgrada grada Osijeka (Pavić i dr. 2020b).....	191
Slika 4.12. Shema za unaprjeđenja metodologije modeliranja izloženosti	193
Slika 4.13 Razredba karakteristika zgrada prema veličini utjecaja na ukupnu potresnu oštetljivost (prema Stone 2017)	196
Slika 4.14 Dio radnog lista iz Excela s karakteristikama zgrada koje se prikupljaju za bazu podataka postojećeg fonda zgrada grada Osijeka	199
Slika 4.15 Obrazac za prikupljanje podataka na licu mjesta (Galista i Hadzima-Nyarko 2015)	203
Slika 4.16 Android aplikacija za kreiranje baze podataka koju je razvio EM2 d.o.o. (Pavić i dr. 2020b)	204
Slika 4.17 Prosječne vrijednosti ploštine i visine u modelu izloženosti grada Osijeka	205
Slika 4.18 Brojnost zgrada prema konstrukcijskom sustavu i materijalima izvedbe u modelu izloženosti grada Osijeka.....	206
Slika 4.19 Postotak zgrada prema izvedbi stropne konstrukcije i konstrukcije krovišta u modelu izloženosti grada Osijeka.....	207
Slika 4.20 Brojnost zgrada prema razdobljima izgradnje u modelu izloženosti grada Osijeka.....	208
Slika 4.21 Brojnost zgrada prema nekonstrukcijskim karakteristikama u modelu izloženosti grada Osijeka.....	209
Slika 4.22 Postotak zgrada s obzirom na tlocrtnu pravilnost u modelu izloženosti grada Osijeka.....	209
Slika 4.23 Algoritam za definiranje razredbenih pravila i usvajanje konstrukcijskih tipologija (prema Pavić i dr. 2020a).....	211
Slika 4.24 Zastupljenost predloženih tipologija zidanih zgrada u ukupnom broju do sada popisanih zidanih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka.....	217
Slika 4.25 Zastupljenost predloženih tipologija armiranobetonskih zgrada u ukupnom broju do sada popisanih armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka	218
Slika 4.26 Mogućnosti vizualizacije modela izloženosti grada Osijeka u QGIS-u.....	220
Slika 4.27a - f Vizualizacija karakteristika zgrada iz modela izloženosti grada osijeka u QGIS-u	223
Slika 4.28 Prikaz karakteristika zgrade u QGIS-u.....	224
Slika 5.1 Oštetljivosti prema EMS – 98 (Grünthal, 1998).....	232
Slika 5.2 Krivulja vjerojatnosti oštetljivosti za razrede oštetljivosti B i C (EMS – 98) (Giovinazzi i Lagomarsino 2006).....	234

Slika 5.3 Funkcija pripadnosti indeksa oštećljivosti V za razrede oštećljivosti prema EMS – 98 (Lagomarasino i Giovinazzi 2006)	235
Slika 5.4 Postotak zgrada s obzirom na razrede oštećljivosti generirane iz proračuna koji je uzeo u obzir ΔV_R	238
Slika 5.5 Spektri jednolike opasnosti proračunati za koordinate 45°32' N, 18°23' E za $T_r= 475$ godina i spektri HRN EN 1998:2011 tip 2 za tlo tipa A, B i C.....	251
Slika 5.6 Grafička usporedba prirasta intenziteta $\Delta I_s, n$ za zidane i armiranobetonske zgrade	258
Slika 5.7 Raspodjela vrijednosti $V_{s,n}$ za zidane i armiranobetonske zgrade.....	261
Slika 5.8 Postotak razreda oštećljivosti niskih armiranobetonskih i srednje visokih zidanih zgrada do sada popisanih u modelu izloženosti grada Osijeka	265
Slika 5.9 Proces modeliranja oštećljivosti pojedinačnih zgrada i skupa zgrada	265
Slika 5.10 Razlike u vrijednostima ΔV_m s obzirom na visinu zgrada.....	268
Slika 5.11 Vrijednosti indeksa oštećljivosti za temeljno tlo tipa B	269
Slika 5.12 Postotak razreda oštećljivosti tipologija niskih, srednje visokih i visokih zgrada razvrstanih prema visini (temeljno tlo tipa B)	274
Slika 5.13 Srednji stupanj oštećenja tipologija zidanih zgrada	277
Slika 5.14 Srednji stupanj oštećenja tipologija armiranobetonskih zgrada	278
Slika 5.15 Usporedba krivulja oštećljivosti tipologija srednje visokih zgrada	279
Slika 5.16 Krivulje oštećljivosti na različitom temeljnom tlu.....	280
Slika 5.17 Krivulje oštećljivosti tipologija zidanih zgrada	281
Slika 5.18 Raspodjela dodijeljenih tipologija u modelu izloženosti grada Osijeka	281
Slika 5.19 Raspodjela proračunatih razreda oštećljivosti za temeljno tlo tipa C u modelu izloženosti grada Osijeka.....	282
Slika 5.20 Raspodjela proračunatih razreda oštećljivosti za temeljno tlo tipa B u modelu izloženosti grada Osijeka.....	282
Slika 6.1. Potresni gubitci – potres 6. veljače 2023. (M 7,8) – Turska i Sirija (https://www.dw.com/hr/ , foto: DHA/AFP; https://prigorski.hr/ , foto: Twitter; https://www.portalnovosti.com/ , foto: Boris Roessler; https://bosnainfo.ba/ , foto: ANADOLIA. pristupljeno 1. 4. 2023.)	287
Slika 6.2 Krivulje oštećljivosti prema: a) Akkasu i Erdiku (1984.), b) Sauteru i Shahu (1978.)	291
Slika 6.3 Ploštine tipologija zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka	301

Slika 6.4 Slika matrica vjerojatnosti oštećenja iz Microsoft Excela za tipologiju OZ_K_S.....	302
Slika 6.5 Matrice vjerojatnosti oštećenja tipologija zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka.....	303
Slika 6.6 Ukupni gubitci tipologija zidanih i armiranobetonskih zgrada modela izloženosti	308
Slika 6.7 Postotak oštećene ploštine tipologija srednje visokih zgrada u modelu izloženosti za 1., 3. i 5. stupanj oštećenja.....	309
Slika 6.8 Gubitci za zidane zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka, za stupnjeve intenziteta: IV., V., VI., VII., VIII. i IX. izraženi ploštinom	310
Slika 6.9 Gubitci za armiranobetonske zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka, za stupnjeve intenziteta: IV., V., VI., VII., VIII. i IX. izražani ploštinom.....	311
Slika 6.10 Gubitci za tipologije zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka, za stupanj intenziteta V	311

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Razredba parametara upotrebljivanih u regresijskim jednadžbama, prema Graizer i Kalkan (2011.)	43
Tablica 2.2 Usporedba tipovi tla i pripadnih prosječnih brzina posmičnih valova temeljnog tla prema HRN EN 1998-1:2011 i GB50011-2016.....	49
Tablica 2.3 Prednosti i nedostaci taksonomija orijentiranih na rizik i taksonomija koje se temelje na popisnim kategorijama (prema Pavić i dr. 2020a)	67
Tablica 2.4 Kvantifikacija postojećih taksonomija (prema Brzev i dr. 2013)	68
Tablica 2.5 Broj žrtava uzrokovanih globalnim potresima posljednjih godina (Xia i dr. 2020).....	71
Tablica 3.1 Potresi na promatranom području (Φ i λ geografske koordinate, h dubina hipocentra, M magnituda (Richterova), Δ epicentralna udaljenost, l_0 epicentralni intenzitet).....	96
Tablica 3.2 Stupnjevi makroseizmičkih intenziteta za pet najnaseljenijih gradova u Hrvatskoj, prema kartama potresnog zoniranja iz 1950. (Službeni list SFRJ 39/64 1964), 1982. (Službeni list SFRJ 31/81, 49/82 1982) i 1990. (Službeni list SFRJ 31/81, 49/82, 29/83, 21/88, 52/90 1990) (prema Pavić i dr. 2020b)	100
Tablica 3.3 Koeficijenti za procjene vertikalne vrijednosti PGA prema različitim normama i istraživačkim studijama, gdje je a_g vrijednost PGA u horizontalnom smjeru (prema Bulajić i dr. 2022a)	102
Tablica 3.4 Stupnjevi makroseizmičkog intenziteta, prema kartama potresnog zoniranja iz 1950. (Službeni list SFRJ 1964), 1982. (Službeni list SFRJ 1982) i 1990. (Službeni list SFRJ 1990), te odgovarajuće empirijske vrijednosti PGA procijenjene pomoću jednadžbe 3.1 za pet gradova u Republici Hrvatskoj (prema Pavić i dr. 2020b, Bulajić i dr. 2021a)	103
Tablica 3.5 Horizontalne vrijednosti PGA koje odgovaraju kartama iz 1990. (Službeni list SFRJ 31/81, 49/82, 29/83, 21/88, 52/90 1990) za povratna razdoblja 100 i 500 godina, kao i PGA vrijednosti prikazane na najnovijim službenim kartama potresne opasnosti (Herak 2012) za Republiku Hrvatsku (prema Pavić i dr. 2020b).....	104
Tablica 3.6 Stupnjevi makroseizmičkog intenziteta, dani na kartama potresnog zoniranja iz 1950. (Službeni list SFRJ 1976), 1982. (Službeni list SFRJ 1982) i 1990. (Službeni list SFRJ 1990) i odgovarajuća empirijska procjena vertikalnih vrijednosti PGA proračunate jednadžbom 3.2 za pet gradova u Republici Hrvatskoj (prema Bulajić i dr. 2022a).....	106
Tablica 3.7 Parametri za skaliranje elastičnog spektra odziva (HRN EN 1998-1:2011/NA:2011)	119
Tablica 3.8 Kategorijske varijable za različite tipove lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva, koje se upotrebljavaju za jednadžbe skaliranja u ovom doktorskom radu	125
Tablica 3.9 Koeficijenti skaliranja i standardne devijacije, proračunati na temelju horizontalnih komponenata ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od epicentra do mjernog mjesta, za	

empirijsku atenuacijsku jednadžbu (3.22) u kojoj je R epicentralna udaljenost, izvedeni za šire promatrano područje (Bulajić i dr. 2021a).....	134
Tablica 3.10. Koeficijenti skaliranja i standardne devijacije za empirijsku atenuacijsku jednadžbu (3.22) u kojoj je R hipocentralna udaljenost, proračunati na temelju horizontalnih komponenata ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od hipocentra do mjernog mjesta, izvedeni za šire promatrano područje (Bulajić i dr. 2021a).....	135
Tablica 3.11 Koeficijenti skaliranja i standardne devijacije, za empirijsku atenuacijsku jednadžbu (3.23) u kojoj je R epicentralna udaljenost, proračunati na temelju vertikalnih komponenata ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od epicentra do mjernog mjesta, izvedeni za šire promatrano područje (Bulajić i dr. 2021b).....	140
Tablica 3.12 Koeficijenti skaliranja i standardne devijacije, za empirijsku atenuacijsku jednadžbu (3.23) u kojoj je R hipocentralna udaljenost, za vertikalne amplitude PSA, izvedeni za šire promatrano područje s R kao hipocentralnom udaljenosti (Bulajić i dr. 2021b).....	141
Tablica 4.1 Grupiranja stanovništva u urbanim područjima (DZS 2022)	171
Tablica 4.2 Razvoj primjene građevinskih propisa i norma vezanih uz gradnju zgrada u Republici Hrvatskoj	181
Tablica 4.3 Broj stambenih jedinica prema godini izgradnje (DZS 2013).....	183
Tablica 4.4 Stambene zgrade u Republici Hrvatskoj razvrstane prema godini izgradnje (Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske 2018)	185
Tablica 4.5 Nestambene zgrade u Republici Hrvatskoj razvrstane prema godini izgradnje (Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske 2018)	187
Tablica 4.6 Pregled nacionalnog fonda stambenih zgrada u urbanim i ruralnim područjima gradnje (Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske 2018)	188
Tablica 4.7 Pregled nacionalnog fonda nestambenih zgrada prema područjima urbano/ruralno (Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske 2018)	188
Tablica 4.8 Broj stanovnika i stambenih jedinica prema popisima stanovništva iz 2011. i 2021. (DZS 2013)	193
Tablica 4.9 Razredba konstrukcijskih sustava EMS – 98 i visine zgrada prema broju katova Giovinazzi (2005.).....	213
Tablica 4.10 Konstrukcijske tipologije iz modela izloženosti grada Osijeka (prema Pavić i dr. 2020a)	212
Tablica 4.11 Usporedba tipologije HAZUS i EMS – 98 s predloženom tipologijom (prema Pavić i dr. 2020a)	215

Tablica 4.12 Raspodjela zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka prema tipologiji i zastupljenost zgrada s obzirom na broj katova u pojedinoj tipologiji.....	215
Tablica 5.1 Razredi oštećljivosti i vrijednosti pripadnih indeksa oštećljivosti prema EMS – 98 (Giovinazzi 2005)	231
Tablica 5.2 Izrazi za srednji stupanj oštećenja μ_D predloženi prema različitim autorima	233
Tablica 5.3 Vrijednosti indeksa oštećljivosti V_0 za različite tipove zgrada prema RISK-UE (Lagomarsino i Giovinazzi 2006, Giovinazzi 2005).....	236
Tablica 5.4 Vrijednosti modifikatora ponašanja zidanih zgrada (Milutinović i Trendafiloski 2003) ...	240
Tablica 5.5 Vrijednosti modifikatora ponašanja armiranobetonskih zgrada (Milutinović i Trendafiloski 2003)	241
Tablica 5.6 Prijedlog novih vrijednosti pojedinih modifikatora ponašanja armiranobetonskih zgrada (Tomas 2017.)	242
Tablica 5.7 Usvojene vrijednosti indeksa oštećljivosti V_0 za zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka (prema Milutinović i Trandafilovski 2003, Lagomarsino i Giovinazzi 2006, Giovinazzi 2005)	247
Tablica 5.8 Rasponi proračunatih vrijednosti i prosječne vrijednost ΔV_m , niskih zidanih i srednje visokih armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka.....	249
Tablica 5.9 Vrijednosti parametara za spektar odziva tipa 2 (HRN EN 1998:2011)	251
Tablica 5.10 Osnovni periodi oscilacija T_1 prema izrazu (5.10) (HRN EN 1998:2011) za zidane zgrade	252
Tablica 5.11 Osnovni periodi oscilacija T_1 prema izrazu (5.11) za armiranobetonske zgrade	252
Tablica 5.12 Vrijednosti množitelj faktora ubrzanja (f_{PGA}, s, n) za brzu i detaljnu procjenu oštećljivosti zidanih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka	253
Tablica 5.13 Vrijednosti f_{PGA} na temelju geoloških karakteristika temeljnog tla (Midorikawa 1987)	254
Tablica 5.14 Vrijednosti množitelj faktora ubrzanja (f_{PGA}, s, n) za brzu i detaljnu procjenu oštećljivosti armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka.....	255
Tablica 5.15 Vrijednosti prirasta intenziteta pojedinačnih zidanih i armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka.....	256
Tablica 5.16 Vrijednosti ΔI proračunate na temelju geoloških karakteristika temeljnog tla.....	257
Tablica 5.17 Vrijednosti modifikatora oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika tla za proračun oštećljivosti zidanih i armiranobetonskih zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka.....	259
Tablica 5.18 Usporedba vrijednosti $V_{s,n}$ za zidane i armiranobetonske zgrade.....	260

Tablica 5.19 Rasponi vrijednosti i prosječne vrijednosti ukupnog indeksa oštećljivosti niskih zidanih i srednje visokih armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka.....	262
Tablica 5.20 Vrijednosti indeksa oštećljivosti za razrede oštećljivosti (Lagomarsino i Giovinazzi 2006, Giovinazzi 2005).....	263
Tablica 5.21 Odnos razreda oštećljivosti i indeksa oštećljivosti (Martinez-Cuevas i dr. 2016)	263
Tablica 5.22 Broj niskih zidanih i srednje visokih armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti prema razredima oštećljivosti, oštećljivost prikazanih zgrada proračunatih za temeljno tlo tipa C	263
Tablica 5.23 Vrijednosti modifikatora potresnog ponašanja ΔV_m za tipologije zgrada grada Osijeka	267
Tablica 5.24 Usporedba vrijednosti ΔV_m za pojedinačne zgrade s 3, 4 i 5 katova, nearmirano ziđe, kruti strop (NAZ_O_K_S) s predloženom vrijednosti tipološkog modifikatora potresnog ponašanja (ΔV_m).	268
Tablica 5.25 Vrijednosti indeksa oštećljivosti predloženih tipologija zgrada na tlu tipa B i C.....	270
Tablica 5.26 Vrijednosti indeks oštećljivosti za predložene tipologije zgrada i vrijednosti iz nekoliko sličnih istraživanja proračunate makroseizmičom metodom	271
Tablica 5.27 Najvjerojatniji razredi oštećljivosti predloženih tipologija zgrada na temelju modela izloženosti grada Osijeka (za tlo tipa C)	272
Tablica 5.28 Razredi oštećljivosti tipologija zgrada za tipove tla B i C	273
Tablica 5.29 Usporedba predloženih razreda oštećljivosti	275
Tablica 5.30 Srednji stupanj oštećljivosti za predložene tipologije zidanih zgrada.....	276
Tablica 6.1 Stupnjevi oštećenja D_{Gk} (Giovinazzi 2005):	289
Tablica 6.2 Težinski koeficijenti - HAZUS (1999.), HAZUS (1999.), SSN (1995.) i ATC13 (1987.) i Bramerini (1995.).....	290
Tablica 6.3 Matrice vjerojatnosti oštećenja prema Withman i dr. (1973.).....	292
Tablica 6.4 Srednji koeficijenti oštećenja MDR i raspon koeficijenata oštećenja DF za 5 stupnjeva oštećenja prema Yin Zhiqian (1995.), Hwangu i dr. (1994.) i Gurpinar i dr. (1978.).....	295
Tablica 6.5 Srednji koeficijenti oštećenja $MDFI$ za stupnjeve intenziteta: VI., VII., VIII. i IX.....	295
Tablica 6.6 Koeficijenti oštećenja (prema D'Ayala 2013).....	296
Tablica 6.7 Matrica oštećljivosti za potres VIII. stupnja i postotak građevinske štete (prema Aničiću 1992)	300
Tablica 6.8 Proračun gubitaka za tipologiju NAZ_O_F_N	305

Tablica 6.9 Proračun gubitaka za tipologiju AB_O_S	306
Tablica 6.10 Proračun gubitaka za tipologiju OZ_K_S.....	307

POPIS KRATICA I SIMBOLA

a	ukupan broj potresa žarišnog područja
AB	armiranobetonska konstrukcija
AB_DS_S	armirani beton_ dvojni sustav_ srednje visoke zgrade
AB_DS_V	armirani beton_ dvojni sustav_ visoke zgrade
AB_O_N	armirani beton_ konstrukcijski sustav okvir_ niske zgrade
AB_O_S	armirani beton_ konstrukcijski sustav okvir_ srednje visoke zgrade
AB_O_V	armirani beton_ konstrukcijski sustav okvir_ visoke zgrade
AB_Z_N	armirani beton_ zidovi_ niske zgrade
AB_Z_S	armirani beton_ zidovi_ srednje visoke zgrade
AB_Z_V	armirani beton_ zidovi_ visoke zgrade
a_g	proračunska vrijednost PGA u horizontalnom smjeru
ATC	Vijeće za primijenjenu tehnologiju (engl. Applied Technology Council)
a_{vg}	proračunska vrijednost PGA u vertikalnom smjeru
B	postotak zastupljenosti zgrada određenog konstrukcijskog sustava u ukupnom broju zgrada
b	koeficijent krivulje ponovljivosti potresa
BTM	Matrica tipologija zgrada (engl. <i>Building Typology Matrix</i>)
C	postotak oštećenja zgrada određenog konstrukcijskog sustava
c_1 do c_6	parametri temeljnog tla iz regresijskih proračuna
DF	faktor oštećenja (engl. <i>Damage Factor</i>)
XXV	

D _G	stupanj oštećenja (engl. <i>Damage Grade</i>)
DK_N	drvene konstrukcije_niske zgrade
DPM	matrica vjerojatnosti oštećenja (engl. <i>damage probability matrix</i>)
DS	dvojni sustavi
DSHA	deterministička analiza potresne opasnosti (engl. <i>Deterministic seismic hazard analysis</i>)
DSZ RH	Državni zavod za statistiku
EERI	Istraživački institut za potresno inženjerstvo (engl. <i>Earthquake Engineering Research Institute</i>)
EMS – 98	Europska makroseizmička ljestvica (engl. <i>European Macroseismic Scale</i>)
EN	Europske norme
ENV	Europske prednorme
EPISCOPE	projekt: Sheme praćenja pokazatelja energetske učinkovitosti za kontinuiranu optimizaciju procesa obnove europskih stambenim fondova (engl. <i>Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks</i>)
EQINFOS	Informacijski sustav podataka o jakim potresnim gibanjima tla (engl. <i>The Strong Motion Earthquake Data Information System</i>)
EUROSTAT	Europski statistički ured (engl. <i>European Statistical Office</i>)
$F(I, BDP)$	mjera oštetljivosti područja za danu BDP vrijednost i intenzitet potresa
$F(I, S)$	makroseizmička oštetljivost

$f_{(PGA, s, n)}$	množitelj faktora ubrzanja za pojedinačne zgrade
$f_{(ri / mi)}$	funkcija gustoće vjerojatnosti za udaljenost od žarišta potresa
FAO	Organizacija za hranu i agrokulturu (engl. <i>Food and Agriculture Organization</i>)
FEMA	Agencija Ministarstva domovinske sigurnosti Sjedinjenih Američkih država, (engl. Federal Emergency Management Agency)
f_m	funkcija gustoće vjerojatnosti za magnitudu
f_{PGA}	množitelj faktora ubrzanja
G	postotak građevinske štete koji odgovara pojedinom stupnju oštećenja
GED	Globalna baza podataka o izloženosti (engl. <i>Global Exposure Database</i>)
GEM	projekt: Globalni modeli potresa (engl. <i>Global Earthquake Model</i>)
GIS	Geografski informacijski sustav (engl. <i>Geographic Information System</i>)
GMPE	jednadžba gibanja temeljnog tla (engl. <i>Ground Motion Prediction Equations</i>)
h	dubina hipocentra
H	visina zgrade u metrima od temelja ili gornjeg ruba krutog podruma
HAZU	Hrvatska Akademija znanosti i umjetnosti
HAZUS-MH	program: Opasnosti Sjedinjene Američke Države - višestruke opasnosti (engl. <i>Hazards United States- Multi - Hazard</i>)
H_j	prosječna očekivana učestalost djelovanja potresnog gibanja jakosti j
HORIZON	projekt Europske unije za istraživanje i inovacije: Horizon Europe
I	potresna opasnost definirana makroseizmičkim intenzitetom
i	promatrani konstrukcijski sustav

I (°MCS)	makroseizmički intenzitet
IEE	projekt Europske unije: Inteligentna energija u Europi (engl. <i>Intelligent Energy Europe</i>)
I_0	epicentralni intenzitet
ISESD	Internetska stranica za europske podatke o jakim potresnim gibanjima tla (engl. <i>Internet Site for European Strong-Motion Data</i>)
j	promatrani stupanj oštećenja (1.,2.,3.,4.,5.,6.)
L	gubitak
M	magnituda potresa, lokalna (Richterova)
MCE	maksimalni mogući potres (engl. <i>Maximum Credible Earthquake</i>)
MDF	srednji koeficijent oštećenja (engl. <i>Mean Damage Factor</i>)
MDF_{DG}	srednji koeficijent oštećenja za određeni stupanj oštećenja
MDF_i	srednji koeficijenti oštećenja za određeni intenzitet
MDR	srednji stupanj oštećenja (engl. <i>Mean Damage Ratio</i>)
MFD	višestambene zgrade (engl. <i>Multi-Family Dwellings</i>)
MMI	modificirana Mercallijeva ljestvica intenziteta (engl. <i>Modified Mercalli intensity scale</i>)
M_{min} i M_{max}	minimalna i maksimalna magnituda za svako žarišno područje
M_s	magnituda površinskih potresnih valova
MSK	Medvedev–Sponheuer–Karnik ljestvica
M_w	momentna magnituda

n	broj zgrada u uzorku
$N(pga)$	očekivani godišnji broj potresa
NAZ_O_F_N	nearmirano ziđe_ opeka _fleksibilan konstrukcijski sustav_ niske zgrade
NAZ_O_F_S	nearmirano ziđe_ opeka _fleksibilan konstrukcijski sustav_ srednje visoke zgrade
NAZ_O_K_N	nearmirano ziđe_ opeka _krut konstrukcijski sustav_ niske zgrade
NAZ_O_K_S	nearmirano ziđe_ opeka _krut konstrukcijski sustav_ srednje visoke zgrade
NAZ_O_K_V	nearmirano ziđe_ opeka _krut konstrukcijski sustav_ visoke zgrade
NAZ_OSF_F_N	nearmirano ziđe_ opeka starog formata_ fleksibilan konstrukcijski sustav_ niske zgrade
NAZ_OSF_F_S	nearmirano ziđe_ opeka starog formata_ fleksibilan konstrukcijski sustav_ srednje visoke zgrade
NEES	Mreža za simulaciju potresa (engl. <i>Network for Earthquake Engineering Simulation</i>)
NERA	projekt: Mreža europskih istraživačkih infrastruktura za procjenu i ublažavanje rizika od potresa (engl. <i>Network of European Research Infrastructures for Earthquake Risk Assessment and Mitigation</i>)
N_{GR}	broj potresa
OZ_K_N	omeđeno ziđe_ krut konstrukcijski sustav_ niske zgrade
OZ_K_S	omeđeno ziđe_ krut konstrukcijski sustav_ srednje visoke zgrade
OZ_K_V	omeđeno ziđe_ krut konstrukcijski sustav_ visoke zgrade
P	vjerojatnost da procijenjena vrijednost $PSA(T)$ neće biti nadmašena

$P(D_k)$	vjerojatnost pojave određenog stupnja oštećenja
$P(I)$	vjerojatnosti opasnosti i ukupnih gubitaka različitih stupnjeva intenziteta
PAGER	baza podataka o zgradama: Brze globalne procjene nakon potresa (engl. <i>Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response</i>)
p_c	vjerojatnost posljedice zbog potresa
P_c	vjerojatnost da određeno stanje gubitka bude unutar dopuštenih raspona ili premašeno
P_{DGI}	vjerojatnost određenog stupnja oštećenja za promatrani intenzitet
PGA	vršno ubrzanje temeljnog tla (engl. <i>Peak ground acceleration</i>)
PGD	najveći pomak tla (engl. <i>Peak ground displacement</i>)
PGV	vršna brzina temeljnog tla (engl. <i>Peak ground velocity</i>)
p_k	vjerojatnost pojave određenog stupnja oštećenja k
PMF	funkcija vjerojatnosti za masu (engl. <i>Probability Mass Function</i>)
PSA (T)	amplituda pseudo ubrzanja za period oscilacija T (engl. <i>Peak spectral amplitude</i>)
PSHA	probabilistička analiza potresne opasnosti (engl. <i>Probabilistic Seismic Hazard Analysis</i>)
PSI	ljestvica potresnog intenziteta bez parametara (engl. <i>Parameterless Scale of Seismic Intensity</i>)
$P_t(A)$	očekivana razina potresne opasnosti
PU	postotak oštećenja zgrada
p_{Ud}	vjerojatnost nenastanljivosti zgrada nakon potresa

Q	indeks duktilnosti određenog konstrukcijskog tipa
QGIS	Geografski informacijski sustav - kvantni (engl. <i>Quantum Geographic Information System</i>) GIS softver za koji nije potrebno kupiti licencu
q_n	omjer zgrada različitih visina tj. broja katova (n)
R	udaljenost od hipocentra ili epicentra
R_0	parametar atenuacijske jednadžbe
R_{ij}	prosječna učestalost gubitka za element i zbog djelovanja potresnog gibanja jakosti j temeljnog tla
RISK-UE	projekt Europske unije: Napredni pristup scenarijima rizika od potresa (engl. <i>Advanced approach to earthquake risk scenarios</i>)
r_k	omjer zgrada karakteriziranih modificirajućim faktorima (k)
R_{\min} i R_{\max}	minimalna i maksimalna vrijednost za udaljenost od promatrane lokacije do žarišta potresa
S	ukupna izloženost područja
$s = 0$	geološki sedimenti
$s = 1$	mješoviti duboki geološki slojevi
$s = 2$	geološka stijena
S_a	spektralno ubrzanje
SAD	Sjedinjene Američke Države
$S_{ae}(T)(A)$	amplituda elastičnog spektra odziva perioda T za referentni tip tla A (stijena)
$S_{ae}(T)(k)$	amplituda elastičnog spektra odziva perioda T za promatrani tip tla (k)

S_d	spektralni pomak
SDOF	sustav s jednim stupnjem slobode (engl. <i>Single Degree of Freedom</i>)
$S_e(T)$	elastični horizontalni spektar odziva temeljnog tla za ubrzanje
SERA	projekt: Infrastruktura za istraživanje seizmologije i potresa - Savez za Europu engl. <i>Seismology and Earthquake Engineering Research Infrastructure Alliance for Europe</i>)
SFD	samostojeće obiteljske kuće (engl. <i>Single-Family Detached Homes</i>)
SFDRR	Sendai okvir za smanjenje rizika od katastrofa (engl. <i>Sendai Framework for Disaster Risk Reduction</i>)
S_{G1} i S_{G2}	varijable za duboke geološke slojeve
SHARE	projekt: Harmonizacija potresne opasnosti u Europi (engl. <i>Seismic Hazard Harmonization in Europe</i>)
$s_L = 0$	stjenovito tlo
$s_L = 1$	kruto tlo
$s_L = 2$	duboka lokalna tla
S_{L1} i S_{L2}	varijable za lokalne slojeve temeljnog tla
SYNER-G	europski kolaborativni istraživački projekt za potresnu oštetljivost i analizu rizika zgrada, spašavanje i infrastrukturu
T	period oscilacija linearnog sustava s jednim stupnjem slobode
T_1	osnovni periodi oscilacije zgrade
TABULA	projekt: Tipološki pristup za energetske procjene fonda zgrada (engl. <i>Typology</i>

Approach for Building Stock Energy Assessment)

T_r	povratno razdoblje
UHS	spektri jednolike opasnosti (engl. <i>Uniform Hazard Spectra</i>)
UNDP / UNESCO	Razvojni program Ujedinjenih naroda/Organizacija Ujedinjenih naroda za obrazovanje, znanost i kulturu (engl. <i>United Nations Development Programme/United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>)
UNDP / UNIDO	Razvojni program Ujedinjenih naroda/Organizacija Ujedinjenih naroda za industrijski razvoj (engl. <i>United Nations Development Programme/United Nations industrial Development Organization</i>)
UN-HABITAT	Program Ujedinjenih naroda za ljudska naselja (engl. <i>The United Nations Human Settlements Programme</i>)
USGS	Geološki zavod Sjedinjenih Američkih Država (engl. <i>United States Geological Survey</i>)
V	ukupni indeks oštetljivosti zgrade
$V_{(s, 30)}$	prosječna vrijednost brzine širenja S valova u gornjih 30 m profila temeljnog tla pri posmičnoj deformaciji 10^{-5} ili manjoj
V_0	najvjerojatnija vrijednost tipologijskog indeksa oštetljivosti
V_{ij}	razina gubitka koja bi nastala na elementu i kao rezultat djelovanja j
VIM	Metoda indeksa oštetljivosti (engl. <i>Vulnerability Index Method</i>)
$V_{m, k}$	modifikator pojedine karakteristike zgrade
$V_{m, k}$	modifikator potresnog ponašanja pojedine karakteristike zgrade k
$V_{s, n}$	modifikator oštetljivosti zbog utjecaja karakteristika tipa temeljnog tla s zgrade s

	brojem katova n
$W_{(c, k)}$	težinski koeficijenti krivulja oštećljivosti za gubitke
$W_{(U, d)}$	težinski koeficijenti za vjerojatnost pojave određenog stupnja oštećenja
WHE	Svjetska stambena enciklopedija (engl. <i>World Housing Encyclopedia</i>)
WHO	Program za hitna zdravstvena stanja (engl. <i>Health Emergencies Programme</i>)
ZK	zidane konstrukcije s fleksibilnim stropom
ZKHS	zidane konstrukcije s horizontalnim serklažima i krutim stropom
ZKHVS	zidane konstrukcije s horizontalnim i vertikalnim serklažima
Δ	epicentralna udaljenost
ΔV_s	modifikator oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika temeljnog tla za skupinu zgrada
ΔI	prirast intenziteta
$\Delta I_{(s, n)}$	prirasta intenziteta za pojedinačne zgrade
ΔV_R	faktor regionalne oštećljivosti
$\Delta V_{s, n}$	modifikator oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika tipa temeljnog tla (s) za skupinu zgrada
ε	verojatnost da procijenjena vrijednost PGA neće biti nadmašena
μ_D	srednji stupanj oštećenja
σ	standardna devijacija
σ_{\log}	standardna devijacija dekadskog logaritma
Φ i λ	geografske koordinate

1. UVOD

Više od polovice svjetskog stanovništva živi u zonama velikog rizika izloženi barem jednoj vrsti geoopasnosti: poplavi, suši, uraganu ili potresu. Iz dana u dan raste ranjivost naše civilizacije od geoopasnosti, ne samo zbog njihove sve učestalije pojave, nego i zbog porasta broja elemenata izloženih riziku (zgrada, stanovništva, infrastrukture) te njihovog grupiranja na malim prostorima.

Potresi su zbog nedostataka vidljivih uzroka, nasumičnosti i jačine jedna od najrazornijih prirodnih katastrofa. Godišnje mogu uzrokovati gotovo dvije trećine svjetskih ekonomskih gubitaka (Ismail-Zadeh 2020, Ajmar i dr. 2019, Akamatsu i Yamamoto 2019, Zhai i dr. 2019, Chian i dr. 2019). Globalne procjene rizika koje su proveli Dilley i dr. (2005.) rezultirale su procjenom da su u sljedećih 50 godina mogući katastrofalni potresi (proračunana vjerojatnost 0,1) upravo u područjima na kojima živi više od milijardu ljudi.

Utjecaj potresa na urbana područja složen je problem koji istovremeno može nastati od više uzročno povezanih opasnosti i posljedičnih rizika (tsunamija, likvefakcija, klizišta i sl.) te prouzročiti ogromne materijalne štete i ljudske žrtve popraćene socio-ekonomskim problemima i krizama.

Republika Hrvatska se nalazi u području velike seizmičnosti, što potvrđuju katastrofalni potresi koji su se dogodili u prošlosti (Cissa, 361.; Dubrovnik, 1667.; Ston 1996.), ali i nedavni (2020.) u Zagrebu i Petrinji. Štete koje su nastale kao direktna posljedica dinamičkog odziva konstrukcija na potresno gibanje temeljnog tla ukazale su na nepouzdanosti i nepredvidivosti predviđanja potresa i šteta koje oni mogu izazvati.

Kao i u mnogim drugim zemljama svijeta, važno demografsko obilježje Republike Hrvatske je neravnomjerna raspodjela stanovništva. Gotovo dvije trećine ukupnog broja stanovnika Hrvatske živi na jednoj trećini teritorija zemlje, koju uglavnom čine urbana gradska područja, a upravo su ta područja, prema postojećim kartama potresne opasnosti, najizloženija potresnom riziku (engl. *earthquake risk*).

Rizik od potresa povezan je s potencijalnim gubitkom života, ozljedama te oštećenjem građevina i druge materijalne imovine. Utvrđen je vjerojatnom funkcijom triju sastavnica potresnog rizika: opasnosti (engl. *hazard*), izloženosti (engl. *exposure*) i oštetljivosti (engl. *vulnerability*). Promjena bilo

koje komponente rizika povećava ili smanjuje veličinu utjecaja rizika od potresa na elemente rizika zahvaćenog područja.

Dosta je toga još nedovoljno istraženo i nepoznato kada se promišlja o potresu kao potencijalnoj opasnosti: od naprezanja u Zemljinoj kori, sastava i dubine geoloških slojeva, načina na koji strukture Zemljine unutrašnjosti reagiraju na potresne valove, kako i u kojoj mjeri ih ubrzavaju ili prigušuju, do mogućih načina i razmjera utjecaja posljedica potresa na društveno-ekonomski razvoj i individualni život te mogućnosti njihovog otklanjanja ili ublažavanja.

Nedovoljno je osviještena i činjenica da oštećivanja i/ili rušenja zgrada čine većinu materijalnih i ljudskih gubitaka od potresa, kao i to da na veličinu štete koja može nastati, osim jačine i trajanja potresa, uvelike utječe pravilno projektiranje, izvedba te održavanje građevina.

Postoji hitna potreba za poboljšanjem potresnog projektiranja i izvedbe građevina, za definiranjem racionalnih strategija i tehnika obnove i/ili pojačanja postojećih građevina te za proaktivnim djelovanjem na realizaciji istih. Kao temelj trebaju poslužiti pouzdana predviđanja potresne opasnosti i racionalne procjene oštetljivosti zasnovani na znanstvenom pristupu, najnovijim spoznajama i metodologijama procjene potresnog rizika.

Sagledavši potresni rizik kao neupitnu međuovisnost potresne opasnosti i elemenata izloženih riziku, u ovom doktorskom radu predlaže se unaprjeđena metodologija procjene potresnog rizika za zgrade. Ona se temelji na multidisciplinarnom pristupu koji očekivanu štetu od potresa procjenjuje s obzirom na pouzdane podatke o geološkim, geofizičkim, građevinskim, statističkim i drugim karakteristikama potresne opasnosti i elemenata rizika povezujući ih s nepouzdanostima predviđanja potresne opasnosti, nedostatkom otpornosti i fizičke oštetljivosti građevina te društvenom izloženosti.

Kako je svrhovitost (krajnji cilj) temeljna odrednica svake aktivnosti i pretpostavka za uspješno djelovanje, krajnji cilj predložene metodologije je da postane pomoć za jasnije sagledavanje problema, brže donošenja odluka i uspješnije rješavanje aktivnosti vezanih za smanjenje rizika i zaštitu od potresa.

1.1. Problem i hipoteze

1.1.1. Potresna opasnost – problemi i hipoteze 1 i 2

Polazeći od nepobitne činjenice da potresi kao niti jedna druga prirodna opasnost mogu u kratkom vremenu dovesti do ogromnih razaranja i gubitaka materijalnih ali i narušavanja društvenih vrijednosti, pouzdana predviđanja potresne opasnosti predstavljaju polaznu točku za ublažavanje neizbježnih potresnih rizika. Osim kontinuiranog praćenja i proučavanje složenih potresnih zakona i pojava, pouzdanost procjena ovisi i o unaprjeđenju postojećih metodologija i modela procjene.

Za uobičajeno projektiranje zgrada otpornih na potrese složeno potresno ponašanje generira se u obliku spektra odziva. Većina postojećih empirijskih modela (Douglas 2011, 2003) za skaliranje spektara odziva uzima u obzir samo učinke karakteristika lokalnog temeljnog tla. Lokalno temeljno tlo definira se kao: plitki geološki slojevi promatranog područja - nekoliko gornjih desetaka metara tla, obično samo do dubine prvih slojeva tla, s prosječnom brzinom posmičnog vala, $V_s \geq 800$ m/s. Učinci dubljeg geološkog okruženja najčešće se zanemaruju i to uglavnom zbog nepostojanja podataka o njegovim karakteristikama ili nedostatka financijskih sredstava za njihovo generiranje (Bulajić i dr. 2013).

Kod projektiranja većine građevinskih konstrukcija na ubrzanje temeljnog tla i vjerojatnosti koje odgovaraju prihvatljivoj razini rizika od nastanka šteta u tijeku životnog vijeka konstrukcija upotrebljava se najčešće probabilistička procjena potresne opasnosti (engl. *Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA*) (McGuire 1995, McGuire 1993, Cornell 1968). Odabir empirijskih atenuacijskih jednadžbi gibanja temeljnog tla (u daljnjem tekstu skraćeno GMPE (engl. *Ground Motion Prediction Equations*) u kojima su koeficijenti dobiveni kroz regresijske proračune najviše utječu na preciznost rezultata probabilističke procjene potresne opasnosti.

Za Republiku Hrvatsku nedavno su sastavljene nove karte potresne opasnosti (Herak i dr. 2011, HRN EN 1998-1:2011/NA:2011) zasnovane na probabilističkoj procjeni potresne opasnosti (McGuire 1995), jedna za vrijednosti s povratnim razdobljem od 95 godina (10 % vjerojatnost prekoračenja za 10 godina), a druga za vršno ubrzanje temeljnog tla (u daljnjem tekstu skraćeno PGA (engl. *Peak ground acceleration*)) vrijednosti s povratnim razdobljem od 475 godina (10 % vjerojatnost prekoračenja za 50 godina). Karta od 95 godina odgovara zahtjevu ograničenog oštećenja, dok karta od 475 godina odgovara zahtjevu spriječavanja rušenja. Obje karte predstavljaju potresno djelovanje za tip temeljnog

tla A, definiran u HRN EN 1998-1:2011/NA:2011 kao „stijena ili slične geološke formacije“ s prosječnom brzinom posmičnih valova većom od 800 m/s, pri čemu se uzima u obzir samo gornjih 30 m temeljnog tla. Te su karte namijenjene za projektiranje konstrukcija otpornih na potrese, zajedno sa spektrima HRN EN 1998-1:2011 pa su kao takve uvrštene u Hrvatski nacionalni dodatak HRN EN 1998-1:2011/NA (HRN EN 1998-1:2011/NA:2011).

Nedavni potresni događaji u Republici Hrvatskoj potaknuli su još jednom sumnje u pouzdanosti postojećih predviđanja potresne opasnosti i ukazali na potrebu poboljšanja postojećih karata potresne opasnosti.

Akcelerogrami nekih mjernih stanica nakon potresa u Petrinji pokazali su gotovo dvostruko veće vrijednosti vršnih brzina (u daljnjem tekstu PGV (engl. Peak ground *velocity*) i ubrzanja temeljnog tla u odnosu na one predviđene kartama potresne opasnosti Republike Hrvatske. Jedan od mogućih razloga za neočekivano visoke vrijednosti PGV i PGA na pojedinim lokacijama je utjecaj lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva ispod njega na način širenja potresnih valova kroz iste (Miranda i dr. 2021, Tomac i dr. 2020). Drugi je mogući razlog da je petrinjski potres bio potres koji je povezan sa znatno duljim povratnim razdobljem (> 475 godina) od onoga na koji se zgrade projektiraju.

Potresna opasnost u područjima izražene potresne aktivnosti široko je istražena i shvaćena, međutim u područjima s umjerenom i malom seizmičnošću potresna opasnost nije u potpunosti prepoznata (Shohet i dr. 2014), kao ni izloženost izgrađenog okoliša i stanovništva potresnom riziku. Neki nedavno provedeni proračuni (Bulajić i dr. 2021a, b, Bulajić i dr. 2013b) pokazuju npr. da bi potresni valovi duljih perioda osciliranja izazvani snažnim dalekim potresom mogli zbog nedostatka saznanja te brige i pripreme za potresnu opasnost izazvati značajne posljedice i gubitke na područjima čije se temeljno tlo sastoji od dubokih naslaga sedimenata.

Također, istraživanja provedena u posljednjih nekoliko godina (Bulajić i dr. 2013, Bulajić 2013, Manić 2003) i niz studija seizmičkog mikrozoniranja u regiji (Bulajić i dr. 2018, Lee i dr. 2017a, b, c, d, Lee i dr. 2016a, b, Lee i dr. 2015,) pokazuju da se duboki geološki slojevi (Trifunac i Brady 1975a, b) i lokalni uvjeti temeljnog tla (na dubinama i do stotinjak metara (Seed i dr. 1976a, b) moraju istovremeno uzimati u obzir pri procjeni poredbenih vršnih ubrzanja temeljnog tla, inače su dobiveni rezultati procjene potresne opasnosti upitni (Lee i Trifunac 2010, Trifunac 1990, Lee 1987, Trifunac 1987). Duboki geološki slojevi na dubini od nekoliko stotina metara do nekoliko kilometara (Trifunac i Brady, 1975a, b) snažno utječe utječu na karakteristike kratkoperiodičnih i dugoperiodičnih potresnih valova

(Trifunac 1987). Amplitude kratkotrajnog jakog gibanja temeljnog tla s kratkim periodima osciliranja na duboko-geološkim stjenskim lokacijama dobivene u navedenim studijama bile su 30 do 70 % veće u odnosu na amplitude dobivene empirijskim jednadžbama predviđanja koje uzimaju u obzir samo učinke lokalnog tla (do dubine od nekoliko desetaka metara).

Norma HRN EN 1998-1:2011/NA:2011 elastični spektar odziva ne definira kao spektar jednolike opasnosti (engl. *Uniform Hazard Spectar*, UHS) (Bulajić 2019, Anderson i Trifunac 1978) nego kao normalizirani spektar skaliran faktorom temeljnog tla S (Bulajić i dr. 2012). Kod definiranja vrste temeljnoga tla prepoznata je važnost dubokog geološkog okruženja i ukoliko za određenu zemlju ili područje postoje geološki podatci, ostavljena je mogućnost uvrštavanja u Nacionalni dodatak sheme razredbe temeljnoga tla koja će uzeti u obzir duboke geološke slojeve (Bulajić 2019, Bulajić i dr. 2012).

Pouzdanije procjene potresne opasnosti podrazumijevaju provedbu seizmičkog mikrozoniranja za pojedine gradove i područja pristupom kojim se istovremeno uzimaju u obzir vjerojatnosti pojave potresa različite jakosti, prostorna razdioba žarišta, frekventno-zavisne atenuacije amplituda jakog gibanja temeljnog tla (za periode osciliranja od 0,04 do 2 s) te karakteristike dubljeg geološkog okruženja lokacije (na dubinama i do nekoliko kilometara) i lokalnog tla (dubine i do stotinjak metara). Rezultati ovakvog pristupa i modeliranja su spektri jednolike opasnosti (Bulajić 2019, Anderson i Trifunac 1978).

Na temelju opisanih problema i zapažanja iz područja potresne opasnosti u ovom doktorskom radu potvrđuju se sljedeće dvije hipoteze:

Hipoteza 1: Uzimanjem u obzir učinaka lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva moguće je odrediti regionalne empirijske koeficijente za skaliranje i razviti regionalne atenuacijske jednadžbe za preciznije i točnije procjene vrijednosti poredbenih vršnih ubrzanja temeljnog tla.

Hipoteza 2: Za područja umjerene do male seizmičnosti koja se nalaze na dubokim geološkim sedimentima i temeljnom tlu sastavljenom od dubokih slojeva sedimenata, uporabom UHS metodologije i specijalno razvijenih regionalnih atenuacijskih jednadžbi moguće je provesti mikrozoniranje promatranog područja.

1.1.2. Izloženost – problemi i hipoteza 3

Modeliranje potresnog rizika polazi od očekivanog oštećenja elemenata izloženih riziku (zgrada, infrastrukture, ljudi i dr.) na temelju kojeg se proračunavaju financijski gubitci zbog nastale štete i mogući razmjeri posljedica za ljudsko zdravlje i živote (Calvi i dr. 2006).

Najbitniji element izložen riziku su zgrade jer većinu ozljeda i smrtnih slučajeva ljudi ne uzrokuju potresi nego rušenje zgrada. Osim toga, brojna istraživanja i procjene štete nakon potresa pokazale su da je i većina ekonomskih gubitaka posljedica oštećivanja i rušenja zgrada (Nola i dr. 2013, Spence i dr. 2012, Bal i dr. 2010, Coburn i Spence 2002).

Cilj modeliranja izloženosti je: identifikacija glavnih pokazatelja izloženosti, određivanje karakteristika koje će najbolje opisati zgrade s obzirom na njihov utjecaj na potresni odziv te izrada modela izloženosti iz kojega će biti moguće generirati predominantne tipologije odabranog područja.

Procijeniti oštetljivost postojećeg fonda zgrada nije moguće bez postojanja baze podataka o konstrukcijskim i drugim karakteristikama zgrada koje najviše utječu na njezinu potresnu oštetljivost (Pavić i dr. 2019, Hadzima-Nyarko i dr. 2016, Galista i Hadzima-Nyarko 2015).

Prikupljeni parametri o elementima rizika sistematizirani u baze podataka čine modele izloženosti koji, osim boljeg razumijevanja ponašanja i potencijalnih gubitaka u potresima te osiguranja donošenja učinkovitijih preporuka za njihovo ublažavanje ili otklanjanje (Pavić i dr., 2020a), mogu činiti i bazu za izradu sustavne strategije njihovim upravljanjem (održavanjem, obnovom, pojačanjem, zbrinjavanjem i sl.).

Iako se štete koje nastaju u prirodnim katastrofama povećavaju u skladu s rastućim brojem novih zgrada i degradacijom materijala starih zgrada, prikupljanje podataka o zgradama koji su potrebni kao ulazni elementi za modele izloženosti obično ne čine dio ustaljenih procesa prikupljanja podataka (Pavić i dr. 2020b, Dell'Acqua i dr. 2013) i privilegija su uglavnom bogatijih i uređenijih društava.

Europski projekti koji istražuju potresni rizik i izloženost kao njegovu komponentu, NERA (engl. *Network of European Research Infrastructures for Earthquake Risk Assessment and Mitigation*) i SERA (engl. *Seismology and Earthquake Engineering Research Infrastructure Alliance for Europe*) obuhvatili su i područje Republike Hrvatske. Međutim, značajniji doprinosi na unaprjeđenju definiranja

izloženosti nisu učinjeni uglavnom zbog nedostatka ili nedostupnosti podataka o elementima izloženosti, većinom o zgradama (NERA 2020, Crowley i dr. 2019, Crowley i dr. 2014, Brzev i dr. 2013).

Postupci procjene potresne oštetljivosti zgrada oslanjaju se na različite parametre izloženosti koji nastoje vjerno opisati: prostornu određenost, raspodjelu, geometrijske karakteristike, konstrukcijski sustav, potresnu otpornost, namjenu i zauzetost kako bi se na osnovu njih dobila što realnija predviđanja procjene ponašanja konstrukcijskog sustava za moguća potresna djelovanja (Kassem i dr. 2020). Ovi parametri nedovoljno su definirani, osobito oni koji se odnose na najkritičnije karakteristike zgrada, u smislu očekivanog potresnog ponašanja. Nedostatna definiranost uzrokuje nedoumice tijekom pregleda zgrada na terenu i sumnje u pouzdanost procjena oštetljivosti za koje su ti podatci temeljni ulazni parametri.

Osim toga, najčešće su nedovoljno definirani načini prikupljanja i zahtijevana razina točnosti podataka koji su potrebni za izradu modela izloženosti. Uobičajeni pristupi prikupljanju podataka o zgradama su grube vizualne procjene zračnih snimki zgrada i dodjeljivanje skupnog identiteta zgradama na temelju poznavanja godine izgradnje ili konstrukcijskog sustava pojedinih zgrada iz skupa. Postupak se obično povjerava skupini odabranih i iskusnih stručnjaka, međutim njihova prosudba unatoč relevantnim kriterijima njihovog odabira, može biti približno točna i/ili totalno pogrešna (Pavić i dr. 2020b) prvenstveno zato jer je uvijek subjektivna.

Modeli izloženosti zasnovani na stvarnim podatcima prikupljenim na terenu danas su rijetki, a njihova izrada dugotrajna i financijski često neprihvatljiva za većinu društava.

Prvo organizirano znanstveno istraživanje, popisivanje i karakterizacija zgrada u Hrvatskoj pokrenuto je 2016. na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek, u sklopu internog projekta „Potresni rizik urbanih područja“ (engl. "*Earthquake risk of urban areas*") (Hadzima-Nyarko i dr. 2019, Antičević i dr. 2015, Ivandić i dr. 2015). Jedna od primarnih aktivnosti na projektu izrada je modela izloženosti grada Osijeka, zasnovanog na podatcima i zapažanjima o zgradama prikupljenim na licu mjesta (*in situ*).

Kvantificiranje zgrada u smislu konstrukcijskih karakteristika, prostornog smještaja ili zauzetosti složen je postupak koji gotovo nužno uključuje sumnje i probleme koji se mogu uspješno riješiti samo sustavno razrađenom i dobro organiziranom metodologijom razredbe zgrada. Metodologija podrazumijeva određivanje najkritičnijih obilježja - karakteristika zgrada u smislu očekivanog

potresnog ponašanja te definiranje pravila čija primjena rezultira usvajanjem konstrukcijskih tipologija (Pavić i dr. 2020b, Brzev i dr. 2013, Herrera i Soberon 2008).

Postojeće metodologije procjene potresnog rizika razlikuju se u ciljevima, području primjene i namjeni. Postavljene pretpostavke i parametri uzeti u obzir za procjenu pokazuje da su glavne klasične metodologije, modeli, razredbe i tipologije često povezane s njihovim razvojnim kontekstom, osobito s namjenom (Chever 2012).

Od prve razredbe zgrada, sredinom 17. stoljeća (za London), do danas u svijetu i Europi nastale su brojne taksonomije (tipološke razredbe zgrada) (PAGER-STR, HAZUS, FEMA, SYNER-G, RISK-UE, GEM i dr.) razvijene za upotrebu na regionalnim i globalnim razinama.

Tipologije pojedine karakteristike zgrada moraju obuhvatiti na ujednačen način, kako bi bila moguća provedba jednoznačne razredbe zgrada (Pavić i dr. 2020b).

Zbog specifičnih karakteristika projektiranja i gradnje u različitim dijelovima svijeta te postojanja još uvijek građevina izgrađenih tradicijskim tehnikama i materijalima, postoji potreba za specifičnim lokalnim tipologijama. Zato brojne države razvijaju taksonomije prilagođene svojim potrebama odnosno karakteristikama i stanju svojih modela izloženosti (Pavić i dr. 2020b).

Republika Hrvatska nema razrađenu i usvojenu taksonomiju na nacionalnoj razini, pa se za potrebe procjene potresnog rizika uglavnom upotrebljavaju grube razredbe napravljene za potrebe određenog projekta ili se upotrebljavaju taksonomije razvijene za globalnu razinu. Na razini gradova do danas razvijaju se taksonomije samo za grad Osijek i Zagreb, a za Dubrovnik je 80-tih godina prošlog stoljeća provedena je tipizacija zgrada povijesne jezgre (Aničić i dr. 1988).

Model izloženosti izrađen za ovo istraživanje pokazao je da su brojne karakteristike zgrada iz baze specifične za odabrano promatrano područje te da se kao takvi moraju uzeti u obzir kod definiranja predominantnih tipologija kako bi predviđanja oštetljivosti i potresnog rizika bila zadovoljavajuće pouzdanosti.

Na temelju stečenih iskustava i dostupne literature o „izloženosti“ te modela izloženosti susjednih područja i država uočene su slične karakteristike u projektiranju, gradnji, primijenjenim propisima i

upotrijebljenim materijalima, što je ukazalo na mogućnost upotrebe izrađenog modela izloženosti za proračune oštetljivosti tih područja.

Ovom disertacijom potvrđuje se **hipoteza 3** vezana uz komponentu potresnog rizika „izloženost“, a koja glasi: **prikupljanjem i obradom najkritičnijih karakteristika zgrada u smislu očekivanog potresnog ponašanja, moguće je izraditi model izloženosti koji predstavlja temelj za procjenu oštetljivosti postojećeg fonda zgrada područja sličnih geoloških i građevinskih karakteristika.**

Potresna izloženost kao temeljna komponenta potresnog rizika je u metodologijama procjene i kod istraživača potresnog rizika u odnosu na potresnu opasnost i oštetljivost zanemarena i nedovoljno proučavana. Već su navedene nedoumice i izazovi koji se javljaju zbog nedovoljne definiranosti načina prikupljanja podataka i karakteristika zgrada i u vezi s time upitna pouzdanost nastalih modela izloženosti. Osim toga, evidentna je nedovoljna istraženost odnosa između izloženosti i oštetljivosti te značajna neravnoteža u brojnosti istraživanja i literature, koja su više usredotočena na potresnu opasnost i oštetljivost. Najčešće se o izloženosti promišlja tek kao o da je u funkciji oštetljivosti.

1.1.3. Potresna oštetljivost – problemi i hipoteza 4

Potresi predstavljaju neizbježne opasnosti koje generiraju rizike. Iako je potresna opasnost dobro prepoznata, nitko ne može sa sigurnošću znati kolike će štete uzrokovati. O nepredvidivosti razmjera štete govore podatci da je od potresa u Nisqually (SAD, 2001) magnitude 6,8 šteta iznosila 2 milijarde dolara, dok je potres u Northridgu (SAD, 1994) magnitude 6,7 prouzročio štetu od čak 30 milijardi dolara (NESS 2003).

Veliki društveni i ekonomski gubitci iz dosadašnjih potresa nameću kvantifikaciju oštetljivosti kao primarni zadatak predviđanja i smanjenja potresnog rizika od budućih potresa (Calvi i dr. 2006, Spence i dr. 2012, Nola i dr. 2013).

Porastom urbanizacije izloženost zgrada i drugih građevina oštećenjima od potresa neprestano se povećava, stoga je smanjenje oštetljivosti građevina važan korak prema smanjenju ukupnog potresnog rizika (Ismail-Zadeh 2020).

Konstrukcije trebaju biti projektirane tako da zadovolje prihvatljivu vjerojatnost mjerljivih konstrukcijskih odziva koji premašuju odgovarajuće granične vrijednosti ispod određene razine

oštetljivosti. U određivanju prihvatljive vjerojatnosti treba postojati ravnoteža između sigurnosti i ekonomičnosti (Pavić i dr. 2000a).

Istraživanje i ocjena oštetljivosti elemenata rizika uobičajeni su zahtjevi kod svake procjene i upravljanja rizikom. Međutim, vrlo je teško i nepouzdana definirati ponašanje građevina u potresu (Page i dr. 1975) i kvantificirati neku sigurnosnu granicu njihove oštetljivosti. Naime, neke su zgrade izgrađene prije usvajanja potresnih propisa, druge su građene prema propisima nastalim kad se manje znalo o djelovanju potresa na zgrade, a treće su projektirane i građene uz primjenu najsuvremenijih potresnih propisa. Osim toga, za njihovu izgradnju upotrijebljeni su različiti građevinski materijali od onih pronađenih u prirodi i ugrađenih jednostavnim tehnikama i alatima do današnjih materijala proizvedenih najsuvremenijim tehnološkim procesima i ugrađenih gotovo u potpunosti strojnim postupcima gradnje.

U svrhu procjene potresnog rizika, odnosno procjene oštetljivosti elemenata rizika upotrebljavaju se dva temeljna pristupa: empirijski (statistički) i analitički. Odabir pristupa ovisi o načinu na koji se promatra oštetljivost konstrukcije i o tome kako je predstavljeno potresno gibanje temeljnog tla. Procjene potresnog rizika tradicionalno su se oslanjale na empirijske metode procjene štete makroseizmičkih intenziteta, temeljene na empirijskim opažanjima oštećenja kako bi se prikazalo gibanje temeljnog tla i matrice vjerojatnosti oštećenja (engl. *damage probability matrix*, DPM) koje predstavljaju oštetljivost zgrade (Rojahn i dr. 1985, Steinbrugge, 1982).

U novije vrijeme istraživači potresnog rizika najčešće upotrebljavaju analitičke metode (Dolce i dr. 1995, Whitman i dr. 1997) čije se funkcije temelje na fizičkim parametrima kao što su spektralna ubrzanja (S_a) ili spektralni pomaci (S_d) i koje su neovisne o dostupnosti podataka o statistici štete nakon potresa (Silva 2013, Douglas 2007, Kappos 1997).

Nisu rijetka istraživanja oštetljivosti koja zahtijevaju kombiniranje statističkih (empirijskih) podataka o oštećenjima s teorijskim rezultatima nelinearnih proračuna tzv. hibridni pristup procjeni oštetljivosti (Nikolić i dr. 2022, Nikolić i dr. 2021, Kappos i Panagopoulos 2010, Kappos i dr. 2008).

Unatoč rezultatima provedenih studija (Lang i dr. 2012, Edwards i dr. 2004) koji za oba pristupa predviđaju slične gubitke, njihova preporuka je kombinirana upotreba oba pristupa, osobito u područjima s malom seizmičnošću gdje su najčešće instrumentalna mjerenja jakosti potresa i ranija

zapažanja o oštećenjima nedostupna. Upotrebom oba pristupa olakšava se kalibracija modela i poboljšava procjena oštetljivosti (Lang i dr. 2012).

Danas se primjenjuju brojne metode procjene oštetljivosti, od empirijskih: matrice vjerojatnosti oštećenja (Eleftheriadou i Karabinis 2013, Whitman i dr. 1997), indeks oštetljivosti (Nikolić i dr. 2021, Hadzima-Nyarko i dr. 2016, Benedetti i Petrini 1984), makroseizmička (Lagomarsino i Giovinazzi 2006, Giovinazzi 2005), kontinuirane krivulje oštetljivosti (Işık 2016, Yakut 2004, Sabetta i dr. 1998), a od analitičkih: analitički izvedene krivulje oštetljivosti, matrice vjerojatnosti oštećenja (Farsangi i dr. 2015, Rossetto i Elnashai 2005), metode utemeljene na mehanizmu sloma (Bernardini i dr.1990), metode utemeljene na spektru sposobnosti nosivosti (Whitman i dr. 1997), metode utemeljene na pomacima (Crowley i dr. 2004) i druge. Napisani su i brojni radovi koji daju njihov pregled i karakteristike (D'Ayala i dr. 2015, Rossetto i dr. 2015, Silva i dr. 2014, Pitilakis i dr. 2014, Calvi i dr. 2006).

Iako su nakon potresa neki noviji tipovi zgrada pokazali veću otpornost nego što bi uobičajene procjene oštetljivosti podrazumijevale, svaki novi potres ponovno potvrđuje da velik broj zgrada i drugih građevina nije dovoljno otporan na potresna podrhtavanja temeljnog tla i dovodi u pitanje postojeća predviđanja oštetljivosti. Ove činjenice produbljuju i neslaganja istraživača potresnog rizika koji su parametri „najkritičniji“ kada je u pitanju ponašanje zgrada tijekom potresa i kako ih sve obuhvatiti proračunom oštetljivosti.

Sve učestalije su rasprave o potrebi modifikacije i unaprjeđenja modeliranja oštetljivosti (Page i dr. 1975) i to metodologije proračuna i kvantifikacije karakteristika zgrada. Uočena je potreba za identificiranjem nedostataka postojećih metodologija procjene kako bi poslužili kao smjernice za korekcije koje bi u konačnici osigurale pouzdanije, procjene oštetljivosti zgrada.

Često se usvojene tipologije temelje samo na općim karakteristikama koje ne mogu vjerno opisati karakteristike svih zgrada nekog područja pa se kod modeliranja izloženosti javljaju nedoumice koju tipologiju pojedinim zgradama dodijeliti. Uobičajeno je da se takvim zgradama dodjeljuju tipologije koje ih djelomično opisuju ili nerijetko ostaju nerazvrstane što dovodi u pitanje pouzdanost proračuna oštetljivosti zasnovanog na takvoj razredbi.

Stanja oštetljivosti zgrada opisuju se funkcijama oštetljivosti (engl. *vulnerability functions*) koje opisuju vjerojatnost ukupnih gubitaka (socijalnih ili ekonomskih) ili funkcijama vjerojatnosti oštećenja (engl.

fragility functions) koje opisuju vjerojatnost dostizanja ili prekoračenja graničnih stanja za određenu razinu intenziteta potresa (Pitilakis i dr. 2014).

Kako bi se olakšale i ubrzale procjene oštećljivosti, sve su učestalija razmišljanja o izradi baza krivulja oštećljivosti jer bi njihovo postojanje rezultiralo i pouzdanijim procjenama potresnog rizika. Organizacija postojećih krivulja oštećljivosti zamišljena je u obliku široko dostupnih i primjenjivih baza kao npr. GEM ili HAZUS. Međutim, upravo je primjenjivost takvih baza upitna zbog specifičnosti gradnje, materijala i propisa pojedinih država i tipologija vezanih uz njih.

Spoznati problemi i zapažanja iz područja potresne oštećljivosti generirani su kroz pretpostavke u **hipotezi 4** da je **na temelju dominantnih tipologija čije karakteristike vjerno opisuju i odražavaju stanje fonda zgrada promatranog područja moguće preciznije odrediti vjerojatne razrede oštećljivosti i proračunati oštećljivost zgrada**, koje se potvrđuju ovom doktorskom disertacijom.

Iako je predviđanje oštećljivosti važan alat za poduzimanje aktivnosti smanjenja rizika, neupitno je međutim da nepredvidivost veličine prirodne katastrofe te upitnost poštivanja sigurnosnih odredbi potresne gradnje i pravilnog održavanja zgrada najznačajnije utječu na veličinu oštećljivosti građevina, a time i na ukupni rizik od potresa (Işık i dr. 2019).

1.1.4. Potresni rizik – problemi i hipoteza 5

Nema područja na Zemlji za koje se može u potpunosti isključiti mogućnost pojave potresa i geodinamičkih pojava povezanih uz njega. Potresi su godišnje indirektan uzrok pogibelji gotovo 10000 ljudi (Yön i dr. 2017) i ekonomskih gubitaka koji se mjere se u milijardama dolara.

Potresi su događaji koji se ne mogu predvidjeti i kontrolirati, pa se najčešće povezuju s pojmom neizvjesnosti. Obično neizvjesnost upućuje na potencijalno nepovoljne utjecaje - opasnosti za ljude i materijalna dobra nastale iz događaja u tijeku ili onih za koje se pretpostavlja da bi se mogli dogoditi u budućnosti. Suočavanje s neizvjesnošću određenih ishoda i potencijalnim gubitkom kao jednim od mogućih ishoda je rizik. Potresni rizik može se definirati kao umnožak vjerojatnosti potresne opasnosti i vjerojatnosti potresne oštećljivosti.

Iako je Mohorovičić još početkom prošlog stoljeća ukazao na važnost potresnog građenja s građevinskog stajališta, o riziku od potresa u Republici Hrvatskoj počinje se promišljati tek šezdesetih

godina prošlog stoljeća kada se prvi put ozbiljnije uzima u obzir djelovanje potresa na zgrade i donosi Pravilnik o privremenim tehničkim propisima za građenje u seizmičkim područjima (Službeni list SFRJ 39/64).

Potresni događaji koji su tijekom vremena uslijedili intenzivirali su istraživanja i doveli do daljnjih promjena u propisima koje su uključivale promjene karata potresne opasnosti i postupaka proračuna konstrukcija otpornih na potrese (Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima)(Službeni list SFRJ 31/81, 49/82, 29/83, 20/88, 52/90).

Istraživačke aktivnosti vezane za procjene rizika od potresa u Hrvatskoj u proteklim desetljećima vežu se za projekte „Istraživanje seizmičnosti balkanske regije“ (engl. „*Survey of the Seismicity of the Balkan Region*“) (UNDP/ UNESCO) iz 70-tih godina prošlog stoljeća, „Smanjenje potresnog rizika u regiji Balkana“ (engl. „*Seismic Risk Reduction in the Balkan Region*“) (UNDP/UNESCO) iz 80-tih godina, „Izgradnja zgrada u seizmičkim uvjetima balkanske regije“ (engl. „*Building Construction under Seismic Conditions in the Balkan Region*“) (UNDP/UNIDO) od 1975-1985 i druge, a stečena iskustva i spoznaje sumirana su u brojnim knjigama, priručnicima, uputama i člancima (Milutinović 2019, Simeonov i dr. 1985, Penelis i dr. 1984).

Procjena rizika od katastrofa za područje Republike Hrvatske regulirana je Pravilnikom o smjernicama za izradu procjena rizika od katastrofa i velikih nesreća za područje Republike Hrvatske i jedinica lokalne i područne (regionalne) samouprave (Narodne novine broj 47/16). Pravilnik obuhvaća smjernice i kriterije za izradu procjena rizika, nositelje izrade procjene rizika te rokove i podatke za procjenu rizika.

Učinkovitost odluka za smanjenje rizika od potresa ovisi o preciznosti procjene potresnog rizika. Proces procjene zasnovan je na podacima, metodama i alatima komponenata potresnog rizika pri čemu prikupljanje, odabir i interpretacija podataka o zgradama i drugim elementima rizika čini temeljnu podlogu za provedbu procjene.

Proces procjene potresnog rizika može se promatrati kao unakrsna korelacija između komponenata potresnog rizika: potresne opasnosti, izložene fizičke i društvene vrijednosti te potresne oštetljivosti istih (Bal i dr. 2010, Calvi i dr. 2006).

Proračunavati potresni rizik znači integrirati procjene opasnosti i oštetljivosti izgrađenog okoliša kako bi se proračunali odgovarajući financijski gubitci zbog nastale štete te moguće opasnosti za ljudsko zdravlje i živote (Calvi i dr. 2006).

Da bi pripremljenost i odgovor na posljedice potresne opasnosti i rizik koji nastaje zbog nje bio pouzdan za područje na koje se procjena odnosi, potrebna je modifikacija i unaprjeđenje postojećih modela i metoda procjene potresnog rizika s obzirom na: vjerojatnost pojavnosti i intenziteta potresa, karakteristike temeljnog tla i duboke geologije ispod njega, specifične karakteristike građevinskih konstrukcija te tipologija i oštetljivosti vezanih uz njih.

Sumiranjem uočenih problema iz svih komponenata potresnog rizika i promišljanja o načinima povećanja preciznosti i pouzdanosti procjena potresnog rizika i svih njegovih komponenata u ovoj doktorskom radu potvrđena je i **hipoteza 5** za ovo istraživanje, kojom se pretpostavlja **da je pravilnim definiranjem odnosa između potresne opasnosti, izloženosti i oštetljivosti te raspolaganjem s lokalnom procjenom potresne opasnosti, modelom izloženosti i predominantnim tipologijama definiranim iz njega, moguće provesti točniju procjenu potresnog rizika.**

1.2. Cilj istraživanja i komponente za njegovu realizaciju

Procjena potresnog rizika složen je koncept koji se sastoji od potresne opasnosti, elemenata izloženih rizika te moguće oštetljivosti istih. Rezultat integriranja procjena potresne opasnosti s oštetljivošću elemenata rizika, proračunat je potresni rizik.

Razorni učinci potresa potaknuli su znanstvenike i institucije koje skrbe o dobrobiti društva na razvoj metoda i modela za predviđanje, ublažavanje, odgovaranje i oporavak od posljedica potresnog djelovanja. Brojni potresni događaji i posljedice koje su nastale nakon njih otkrili su nepouzdanosti postojećih procjena potresnog rizika, ne samo kod očekivano nepredvidive potresne opasnosti, nego i kod veličine oštetljivosti izgrađenog okoliša koje je potresna opasnost uzrokovala.

Ovo istraživanje temelji se na pretpostavci da odstupanja u smislu precjenjivanja ili podcjenjivanja u procjenama potresnog rizika proizlaze iz poopcenih i nedovoljno definiranih metoda i modela komponenata predviđanja potresnog rizika te da je smanjenje odstupanja i pouzdanije procjene moguće postići njihovim modificiranjem i unaprjeđenjem.

Kroz ovo istraživanje pokušavaju se postaviti i riješiti različita pitanja vezana za procjene potresnog rizika i svih njegovih komponenata. Pokušavaju se uočiti i razumjeti nedostatci postojećih metoda i metodologija, predložiti nove ideje i načini procjene, opisati potresnu uzbudu i elemente rizika učinkovitijim parametrima i karakteristikama, generirati sveobuhvatne, ali ne predetaljne razredbe (tipologija, razreda oštetljivosti) te kroz predložene metodologije pojedinih komponenata rizika stvoriti preduvjete za široko prihvatljivu i primjenjivu metodologiju procjene rizika za zgrade.

Cilj ovog istraživanja je modifikacija i unaprjeđenje modela i metoda predviđanja komponenata za procjenu potresnog rizika za područja male do srednje seizmičnosti koja se nalaze na dubokim geološkim sedimentima i temeljnom tlu sastavljenom od dubokih slojeva sedimenata. Predložena unaprjeđenja i modifikacije temelje se na izvornom istraživanju, a verifikacija njegove učinkovitosti izvršena je na izrađenom modelu izloženosti dijela grada Osijeka, čije temeljno tlo sačinjavaju lokalni i duboki geološki slojevi čiji su utjecaji na veličinu potresne opasnosti nedovoljno istraženi.

Ostvarenje cilja istraživanja i obrana postavljenih hipoteza za istraživanje realizirali su se kroz:

- predlaganje novih empirijskih regionalnih atenuacijskih jednadžbi gibanja temeljnog tla
- procjenu vrijednosti horizontalnih i vertikalnih vršnih ubrzanja za područja čije je temeljno tlo sastavljeno od dubokih slojeva lokalnog tla i dubokih geoloških sedimenata
- izradu karata seizmičkog mikrozoniranja promatranog područja
- izradu modela izloženosti promatranog područja
- generiranje predominantnih konstrukcijskih tipologija primjenjivih na svim područjima sa sličnom građevinskom praksom i primjenom građevinskih propisa
- predlaganje razreda oštetljivosti za predominantne tipologije zgrada
- izradu karata potresne opasnosti, izloženosti i oštetljivosti u GIS sustavu (engl. *Geographic Information System, GIS*)
- dvorazinsku analizu potresnog rizika za zgrade iz izrađenog modela izloženosti.

Republika Hrvatska je 2019. usvojila je Direktivu 2012/27/EU i time između ostalog preuzela obavezu izrade inventara nacionalnog fonda zgrada i pregleda njihovih građevinskih karakteristika. Realizacija ove obaveze za sada je tek u pripremnoj fazi, a brojne nepoznanice i nedoumice odgađaju njezinu realizaciju.

Ovaj rad, istraživanja vezana uz njega te predložena unaprjeđenja i modifikacije u području potresnog rizika, osobito njegove komponente „izloženosti“ daju poticaj za intenziviranje aktivnosti, pomoć su u

istraživanja te koristan alat za izradu nacionalnog modela izloženosti. U konačnici bi rezultat bile preciznije procjene potresnog i rizika drugih katastrofa u Republici Hrvatskoj i okolnim zemljama.

1.3. Metodologija i faze istraživanja

Za dio istraživanja koji se odnosi na pregled postojećih spoznaja (literature) u predmetnom području, kao i za postavljanje ciljeva i hipoteza istraživanja, upotrijebljene su teorijske i empirijske metode i tehnike istraživanja.

Sukladno definiranim predmetima istraživanja, u metodološkom pogledu, u radu su primijenjene opće dijalektičke znanstvene metode koje su kombinirane s posebnim metodama znanstvenog istraživanja. Od općih znanstvenih metoda za istraživanje su upotrijebljene: statističke, analitičko-deskriptivne, uzročno-komparativne i metoda modeliranja, a od posebnih: metode proračune i sinteze, metode apstrakcije i konkretizacije, metode definicije i razredbe te metode indukcije i dedukcije.

Sve regresijske proračune za potrebe istraživanja napravljene su pomoću višestrukih linearnih regresijskih analiza, upotrebom ugrađenih programa za statističke proračune u programskoj platformi MATLAB®. U svim regresijskim analizama upotrijebljeni su samo oni podatci jakog gibanja tla koji su zabilježeni na prostoru sjeverozapadnog Balkana, a za koje postoje pouzdani podatci o magnitudi potresa, udaljenosti od žarišta potresa do lokacije gdje je zabilježen akceleroگرام, kao i pouzdani podatci o uvjetima lokalnog tla i dubokog geološkog okruženja dane lokacije.

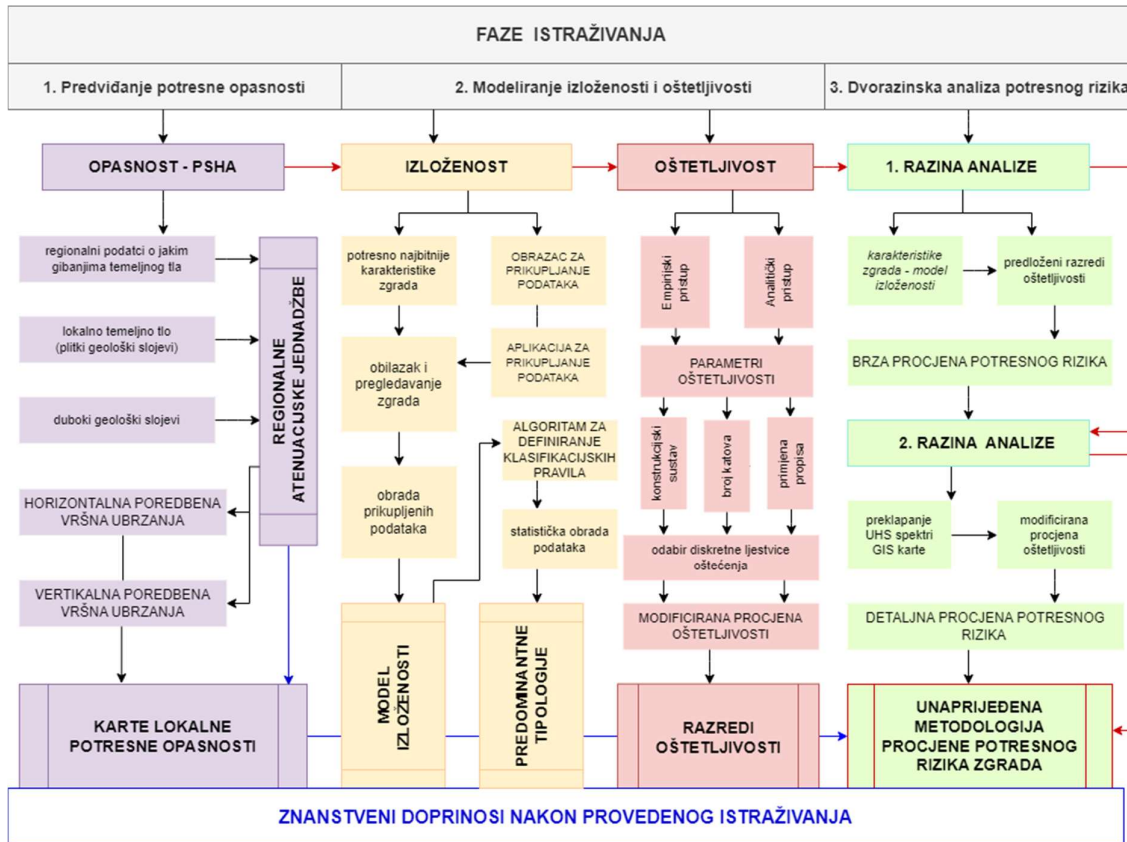
Za verificiranje rezultata istraživanja primijenjena je metoda modeliranja u obliku studije slučaja (engl. *case study*) kojom se istražio i procijenio potresni rizik za grad Osijek i koji je poslužio za verifikaciju primjenjivosti unaprijeđene metodologije procjene potresnog rizika za stambene zgrade.

Istraživanje je provedeno kroz tri faze. U prve dvije faze analizirane su komponente potresnog rizika (potresna opasnost, izloženost i oštetljivost) za odabrano promatrano područje (grad Osijek), dok je u trećoj fazi provedena dvorazinska analiza potresnog rizika na način kako je to predloženo unaprijeđenom metodologijom procjene potresnog rizika zgrada.

Na slici 1.1 shematski su prikazane provedene faze istraživanja. U prvoj fazi proračunata je i predviđena potresna opasnost za područje male do srednje seizmičnosti koje se nalazi na dubokim geološkim sedimentima i temeljnom tlu sastavljenom od dubokih slojeva sedimenata.

Područje male do srednje seizmičnosti odabrano je za istraživanje jer za predviđanje potresne opasnosti ovih područja nedostaju pouzdane jednadžbe za predviđanje potresnog gibanja tla, što otežava sastavljanje karata potresne opasnosti.

Nedavna istraživanja utjecaja slojeva tla na propagaciju potresnih valova pokazala su da potresni valovi od dalekih potresa, s dužim periodima osciliranja, mogu biti značajno pojačani dubokim geološkim sedimentima i izazvati velike štete u područjima koja su inače okarakterizirana kao umjereno seizmična. Odabir tla s dubokim geološkim sedimentima za istraživanje činio se logičan izbor i prilika za nastavak do sada provedenih istraživanja potresne opasnosti i mikrozoniranja na području sjeverozapadnog Balkana.



Slika 1.1 Faze za ostvarenje cilja istraživanja

Geološke i geomorfološke osobine tla odabrane za istraživanje karakteristične su za temeljno tlo na području grada Osijeka pa je zbog toga grad Osijek odabran za promatrano područje. Osim toga, za

širu regiju koja obuhvaća i promatrano područje postoje podatci o karakteristikama tla (baze podataka EQINFOS (Jordanovski i dr. 1987) i ISESD (Ambraseys i dr. 2004)) pa su za regresijske proračune postojali parametri tla na temelju kojih je moguće dobiti pouzdanije atenuacijske jednadžbe i rezultate predviđanja potresne opasnosti, odnosno, točnije, karte lokalne potresne opasnosti.

Modeliranje izloženosti i oštetljivosti reprezentativnog grada s promatranog područja provedeno je u drugoj fazi i to na način da rezultati modeliranja budu primjenjivi na sve gradove iz regije sa sličnim seizmičko-geološkim uvjetima temeljnog tla, načinima gradnje, građevinskim propisima i materijalima. Istraživanja i izrada modela izloženosti za ovaj doktorski rad te suradnja s istraživačima iz susjednih zemalja (ali i šire) koji se bave istom problematikom pokazali su da postoji velika sličnost u nacionalnim tehničkim propisima, tradiciji postupaka gradnje i urbanizacije, odabira materijala za gradnju i njihovih karakteristika.

Fond zgrada grada Osijeka tipičan je primjer fonda zgrada kontinentalnih dijelova Balkanskog poluotoka u kome su najčešće zakašnjeli procesi industrijalizacije i urbanizacije te nestabilne političke i financijske prilike oblikovale izgradnju i urbanizaciju. Između kuća namijenjenih za stanovanje jedne ili dvije obitelji postepeno se do 60-tih godina grade stambene zgrade s dva ili tri kata te s jednim ili dva stana po katu. Zatim se počinju graditi stambena naselja s višestambenim zgradama najčešće do 5 katova, a kasnije i do 12.

Za gradnju se odabiru lokalni lako dostupni, često jeftiniji građevinski materijali, a poštivanje građevinskih propisa i normi najčešće zadovoljava minimalnu razinu. Najviše se gradi opekom, a u skorije vrijeme opečnim blokom i predgotovljenim betonskim elementima. Neomeđeno ziđe je konstrukcijski sustav koji dominira, a pooštavanje kontrole i nadzora gradnje od 70-tih godina prošlog stoljeća osigurava minimalnu potresnu otpornost postojećih konstrukcijskih sustava.

U trećoj fazi provedena je dvorazinska analiza potresnog rizika za model izloženosti grada Osijeka koja je rezultirala brzom i detaljnom procjenom potresnog rizika za karakteristično naselje, utemeljena na predloženoj unaprijeđenoj metodologiji procjene potresnog rizika za zgrade.

Svaka od provedenih faza istraživanja rezultirala je znanstvenim doprinosima ovog doktorskog rada, u području potresne opasnosti: **regionalnim atenuacijskim jednadžbama i kartama lokalne potresne opasnosti**, u području izloženosti: **modelom izloženosti** grada Osijeka te **predloženim predominantnim tipologijama** i u području oštetljivosti: **razredima oštetljivosti** za promatrano područje primjenjivim na šire područje Republike Hrvatske i okolnih zemalja. Ovi znanstveni doprinosi

sastavnica su konačnog doprinosa ovog doktorskog rada: **unaprijeđenom metodologijom procjene potresnog rizika za zgrade.**

1.3.1. Predviđanje potresne opasnosti – 1. faza

Probabilistički pristup te probabilistička metoda procjena potresne opasnosti PSHA (engl. *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*, PSHA) odabrani su za modeliranje potresne opasnosti u ovom istraživanju.

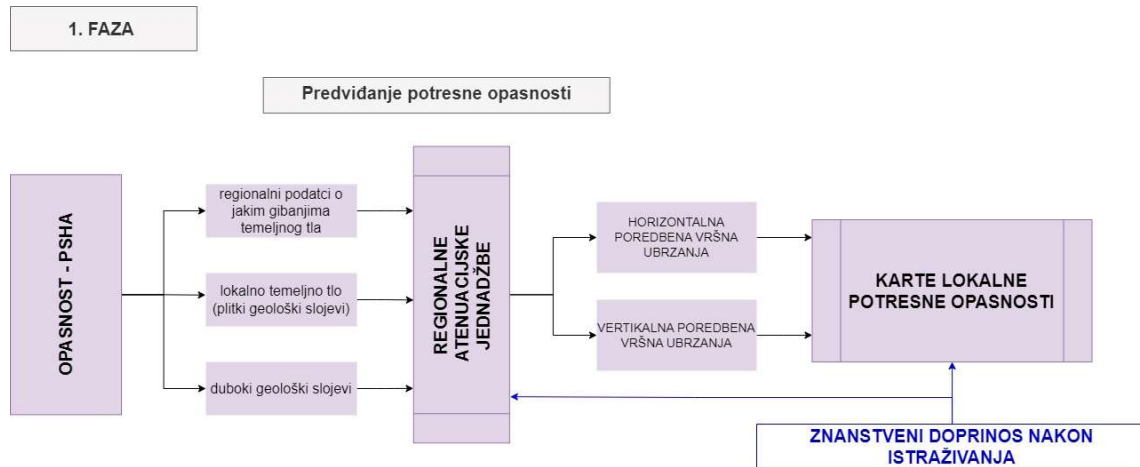
Za izradu regionalnih jednadžbi predviđanja jakog gibanja temeljnog tla upotrijebljeni su zapisi jakog gibanja temeljnog tla iz baza podataka EQINFOS (Jordanovski i dr. 1987) i ISESD (Ambraseys i dr. 2004), zabilježeni na prostoru sjeverozapadnog Balkana. Sukladno postavljenim odrednicama, kao što je već navedeno, odabrani su zapisi za koje postoje pouzdani podatci o magnitudi potresa, udaljenosti od žarišta te o uvjetima lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva.

Prikupljeni podatci su analizirani i sistematizirani kako bi se odabrali skupovi parametara koji se odnose na karakteristike jakog gibanja te sastava lokalnih i dubokih geoloških slojeva temeljnog tla. Kroz regresijske proračune, kombiniranjem vrijednosti parametara iz navedenih skupova, generirane su nove empirijske regionalne atenuacijske jednadžbe gibanja temeljnog tla za područja male do srednje seizmičnosti s temeljnim tlom sastavljenim od dubokih slojeva sedimentata i dubokim geološkim sedimentima.

Izrađenim novim regionalnim atenuacijskim jednadžbama procijenjene su vrijednosti horizontalnih i vertikalnih vršnih ubrzanja (kao i cijelih spektara odziva) temeljnog tla za usvojeno promatrano područje. Procijenjene vrijednosti vršnih ubrzanja poslužile su kao temelj za izradu karata seizmičkog mikrozoniranja za područja koja se nalaze na dubokim geološkim sedimentima i temeljnom tlu sastavljenom od dubokih slojeva sedimentata za povratna razdoblja 95, 475, 975 i 2475 godina.

Implementiranjem rezultata modeliranja potresne opasnosti u geografski informacijski sustav GIS, odnosno GIS softver QGIS (engl. *Quantum Geographic Information System*) za koji nije potrebno kupiti licencu, izrađene su karte lokalne potresne opasnosti za promatrano područje koje mogu biti primjenjive na sva područja sa sličnim ili istim karakteristikama seizmičnosti te sastava geoloških slojeva tla.

Na slici 1.2 shematski su prikazani koraci usvojenog postupka procjena potresne opasnosti u ovoj doktorskom radu.



Slika 1.2 Shematski prikaz – predviđanje potresne opasnosti

U poglavlju 3 prikazan je detaljan opis modeliranja potresne opasnosti za potrebe ove doktorskog rada.

1.3.2. Modeliranje izloženosti i oštetljivosti – 2. faza

Početni postupci provedeni u drugoj fazi istraživanja odnose se na modeliranje izloženosti odnosno na definiranje najkritičnijih karakteristika zgrada u smislu očekivanog potresnog ponašanja (konstrukcijski sustav, broj katova, pravilnost u visini i tlocrtu itd.) te kreiranje obrasca i izradu mobilne aplikacije pomoću kojih su prikupljeni podatci o zgradama na licu mjesta. Proces prikupljanja podataka najopsežniji je i najzahtjevniji dio istraživanja jer je, osim obilaska i pregleda velikog broja zgrada te posjedovanja inženjerskih znanja i vještina, zahtijevao ujednačenost kriterija uočavanja, zapažanja i procjene na terenu.

Evidentirani podatci sistematizirani su u model izloženosti kako bi se dobio pregled reprezentativnih skupova podataka o karakteristikama zgrada. Izrađen model izloženosti unesen je u QGIS u kome je kasnije moguća brza i jednostavna nadogradnja modela novim podacima ili korekcija postojećih. Osim toga, ovako pohranjeni podatci široko su dostupni ne samo neograničenom broju ovlaštenih korisnika nego i s neograničenog broja lokacija.

Provedena je gruba analiza sadržaja modela izloženosti kako bi se uočile ponavljajuće karakteristike i zakonitosti u modelu, što je poslužilo za izradu algoritma (Slika 4.2, poglavlje 4) kojim su definirana pravila razredbe i utvrđeni prioriteta za daljnje postupanje s podacima iz modela izloženosti.

Primjenom pravila iz algoritama za svaku razinu važnosti provedeni su statistički proračuni prema utvrđenim razredbama s ciljem dobivanja glavnih konstrukcijskih tipova zgrada iz izrađenog modela. Statistički rezultati poslužili su kao temelj za generiranje predloženih predominantnih tipologija koje je moguće primijeniti za procjene oštećljivosti u svim regijama i državama sa sličnim nacionalnim tehničkim propisima, tradicijom gradnje i upotrijebljenim materijalima.

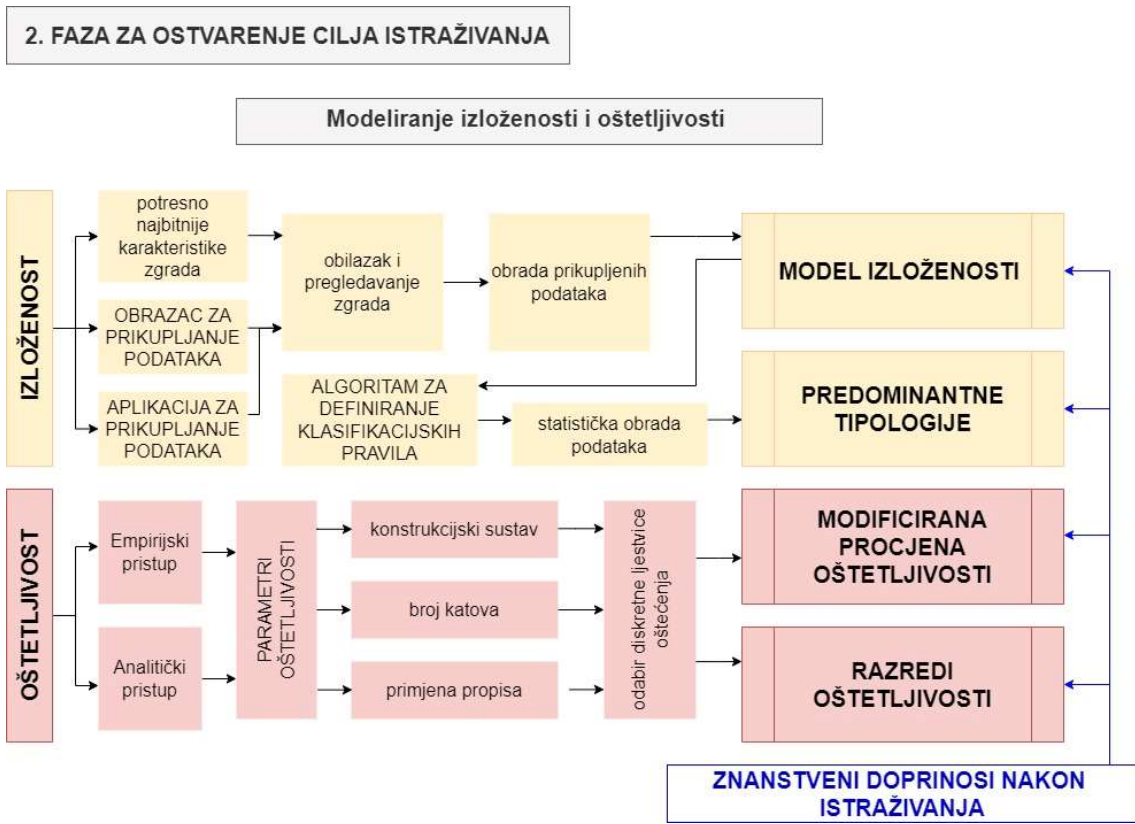
Modeliranje oštećljivosti u drugoj fazi započelo je proučavanjem prikladnosti upotrebe analitičkog ili empirijskog pristupa u daljnjem istraživanju oštećljivosti s obzirom na raspoložive podatke iz modela izloženosti i predložene predominantne tipologije.

Uočena je mogućnost kao i potreba za kreiranjem modela procjene oštećljivosti u kome se mogu integrirati čimbenici i aktivnosti oba pristupa. Zato su za modeliranje oštećljivosti iz modela izloženosti usvojeni parametri oštećljivosti koji mogu biti dostatni za procjene oštećljivosti bilo kojom (analitičkom ili empirijskom) metodom procjene oštećljivosti, a ta je mogućnost prepoznata kao jedan od doprinosa unaprjeđenju procjene oštećljivosti zgrada.

U pravilu svi postupci procjene oštećljivosti razvrstavaju oštećenja prema diskretnim ljestvicama oštećenja. Razvijena metodologija, ostavlja mogućnosti odabira bilo koje diskretne ljestvice oštećenja, a za ovaj rad usvojena je razredba oštećenja prema Europskoj makroseizmičkoj ljestvici EMS – 98 (Grunthal 1998) jer se smatra da bi opisi i vrednovanja potresnih oštećenja zgrada predloženih ovom ljestvicom najvjernije odražavali potencijalnu stvarnu potresnu oštećljivost zgrada promatranog područja usvojenog u radu.

Uvažavajući postupke ovako modificirane procjene oštećljivosti za predominantne tipologije iz modela izloženosti predloženi su razredi oštećljivosti. Detaljan opis razvoja predložene taksonomije, pripadnih tipologija i razreda oštećljivosti opisan je u poglavljima 4 i 5.

Usvojen postupak modeliranja izloženosti i oštećljivosti u ovom doktorskom radu shematski je prikazan na slici 1.3.



Slika 1.3 Shematski prikaz – modeliranje izloženosti i oštetljivosti

1.3.3. Dvorazinska analiza potresnog rizika – 3. faza

Svrha svakog istraživanja je provjera (potvrda ili odbacivanje) postavljenih hipoteza. Kako bi se potvrdile hipoteze postavljene u ovom doktorskom radu, u 3. fazi kroz dvorazinsku analizu potresnog rizika verificiraju se postupci i dobiveni rezultati predložene metodologije procjene potresnog rizika za zgrade iz prethodnih faza kroz završne proračune u ovoj fazi, koji s obzirom na potrebnu (zahtijevanu) razinu analize moraju dati dostatno precizne procjene oštetljivosti zgrada i ukupnog potresnog rizika kako bi postavljene hipoteze bile potvrđene.

Unaprjeđenje metodologije procjene potresnog rizika za zgrade u 3. fazi podrazumijeva mogućnost analize potresnog rizika samo na 1. ili samo na 2. razini, ali i mogućnost kombiniranja obje razine analize kada je to opravdano ili zahtijevano zbog preciznosti procjene. Prva razina analize modelirana je da rezultira brзом procjenom potresne oštetljivosti na temelju karakteristika analiziranih zgrada promatranog područja pohranjenih u modelu izloženosti i predloženih razreda oštetljivosti za iste.

Ovakvu procjenu oštećljivosti moguće je upotrijebiti kao konačan rezultat procjene potresnog rizika (npr. brze preliminarne procjene štete neposredno nakon potresa) ili kao ulazni podatak za 2. razinu analize potresnog rizika.



Slika 1.4 Shematski prikaz – unaprijeđena dvorazinska analiza potresnog rizika

Druga razina analize započinje preklapanjem karata/slojeva lokalne potresne opasnosti, izloženosti i potresne oštećljivosti zgrada za promatrano područje primjenom QGIS-a. Rezultat preklapanja su detektirane zgrade velikog potresnog rizika za koje su potrebni detaljni proračuni za određivanje sposobnosti nosivosti i vjerojatnosti dostizanja određenog graničnog stanja. Mogućnost izdvajanja određenih (potencijalno) oštećljivijih zgrada i provedbe detaljnije (preciznije) procjene oštećljivosti i ukupnog rizika unaprjeđenje je koje ova faza doprinosi predloženoj (unaprijeđenoj) metodologiji procjene potresnog rizika.

Izdvajanjem potencijalno oštećljivijih zgrada ne samo da se smanjuje obim proračuna i ubrzava postupak generiranja konačnih procjena rizika nego se otklanja mogućnost nepotrebnog „proširivanja“ oštećljivosti promatranog skupa zgrada ili u drugom slučaju „podcjenjivanja“ istog.

U proračunu oštećljivosti upotrebljavaju se koeficijenti oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika temeljnog tla proračunati iz koeficijenata za skaliranje spektralnih amplituda (za brzi proračun oštećljivosti) i UHS spektara (za detaljan proračun oštećljivosti) koji su generirani za promatrano područje uvažavajući karakteristike i plitkih i dubokih slojeva temeljnog tla.

Treća faza unaprjeđene analize potresnog rizika prikazana je shematski na slici 1.4. Predložene razine analiza potresnog rizika (brza i detaljna) provedene su za odabrano promatranog područja, a rezultati su prikazani u poglavlju 5.

1.4. Znanstveni doprinos doktorskog rada

Znanstveni doprinosi ovog doktorskog rada temelje se na izvornom istraživanju i predstavljaju nove rezultate primijenjenih istraživanja s novim znanstvenim činjenicama, zakonitostima i spoznajama. Svaki od generiranih doprinosa iz prve dvije faze istraživanja predstavlja ne samo doprinos unaprjeđenju i poboljšanju ukupne procjene potresnog rizika, nego i svake pojedine njegove komponente: potresne opasnosti, izloženosti i oštetljivosti. Kroz novo zapažene zakonitosti i spoznaje iz svih komponenata rizika omogućeno je još bolje razumijevanje uzroka i zakonitosti njihovih međudjelovanje što je rezultiralo razvojem predloženih modifikacija i unaprjeđenja procjene potresnog rizika.

Rezultati provedenih istraživanja omogućavaju detaljan uvid u specifičnosti i poboljšanja koja predložena metodologije za procjenu potresnog rizika zgrada kroz ovaj doktorski rad predstavlja.

Predloženu metodologiju moguće je upotrijebiti za procjene potresnog rizika zgrada urbanih, ali i ruralnih područja u širem okruženju promatranog područja ukoliko se temeljno tlo područja od interesa sastoji od dubokih geoloških sedimenata i lokalnog tla sastavljenog od dubokih slojeva sedimenata te ako je građevinski fond izgrađen primjenom istih ili sličnih građevinskih propisa, postupaka i materijala.

Kako predložena metodologija procjene rizika uzima u obzir veći broj parametara vezanih za proračun potresne opasnosti (npr. duboke geološke slojeve) i oštetljivosti (npr. specifične parametre vezane za određivanje pojedinih tipova zgrada, UHS spektre za proračun oštetljivosti), koji utječu na krajnje rezultate veličine procjenjenog rizika, rezultati su precizniji u odnosu na postojeće metodologije. Naime, u postojećim metodologijama se u proračunima potresne opasnosti uzimaju u obzir doprinosi karakteristika lokalnog temeljnog tla, dok se za procjenu oštetljivosti zgrada upotrebljavaju modeli izloženosti koji se temelje na općim parametrima zgrada kojima nije moguće obuhvatiti sve zgrade određenog područja. Osim toga u proračunima oštetljivosti upotrebljavaju se globalno generirani koeficijenti oštetljivosti koji ne mogu pouzdano karakterizirati oštetljivost zgrada na različitim područjima.

Primjenom predložene metodologije omogućit će se preciznije sagledavanje stvarne razine potresne opasnosti i rizika za različite, lokalno specifične tipove zgrada.

Unaprjeđenja i dobiveni rezultati mogu biti upotrijebljeni kao podrška ili temelj državnim i drugim institucijama, kod planiranja procesa sigurnosti ili njihovih unaprjeđenja te kod planiranja strategija urbanističkog razvoja gradova i županija. Nadalje, mogu biti korisni kao podrška investitorima u donošenju odluka o lokaciji novih stambenih naselja te tipu i karakteristikama zgrada koje su potrebne na određenom području za sigurne uvjete života i rada. Sadašnji stambeni uvjeti također trebaju biti poboljšani kroz poznavanje rizičnih potresnih zona i moguće oštetljivosti postojećeg fonda zgrada vezane uz njih. Stoga se odluke i procesi održavanja, sanacija i pojačanja stambenih, a osobito zgrada kulturne baštine također mogu temeljiti na znanstvenim doprinosima ovog rada.

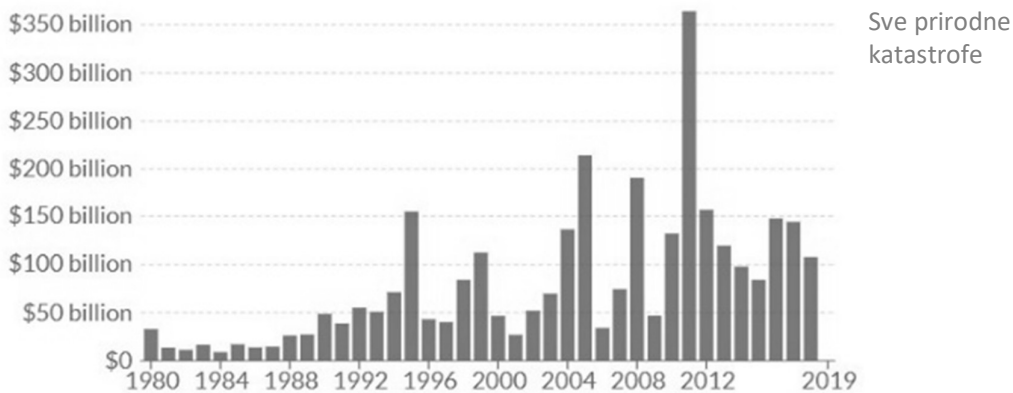
Implementiranje rezultata istraživanja unaprijeđene metodologije u geoinformacijski sustav omogućava budućim korisnicima i/ili donositeljima odluka jednostavan, brz i učinkovit način za izbor strategije zaštite od rizika, najpogodnije lokacije gradnje ili tipa zgrade i na taj način smanjuje nepouzdanost odluka i povećava razinu pouzdanosti zaštite od potencijalnih rizika za izgrađeni okoliš i stanovništvo.

Formiranjem jedinstvene karte rizika, uz pomoć geoinformacijskog sustava, za šire područje istih ili sličnih geoloških uvjeta tla i građevinskih karakteristika zgrada, omogućena je njezina široka upotreba kao temeljne karte za druga istraživanja: prostorne proračune, marketinške potrebe, proračune višestrukih rizika, proračune iz područja zaštite okoliša i slično.

2. PREGLED SPOZNAJA, METODOLOGIJA I METODA ISTRAŽIVANJA KOMPONENATA POTRESNOG RIZIKA

2.1. Zašto se procjenjuje potresni rizik?

Razvojem civilizacije raste broj stanovništva uz neplanirano brzu urbanizaciju te loše upravljanje zemljištem, što dovodi do akumulacije ljudi i imovine na ograničenim prostorima (UNDRR 2015, Oliveir i dr. 2006) pri čemu se najčešće ne razmišlja o izloženosti različitim katastrofama. Posljednjih nekoliko desetljeća rezultat ovakvog stanja odražava se kroz dramatičan porast (Kassem i dr. 2020), gospodarskih gubitaka (Slika 2.1) i ljudskih žrtava uzrokovanih prirodnim katastrofama. Ekonomski gubitci kao direktna posljedica potresa za razdoblje 1980. – 2019. mjere se stotinama milijardi (engl. *billion*) dolara (Slika 2.1).



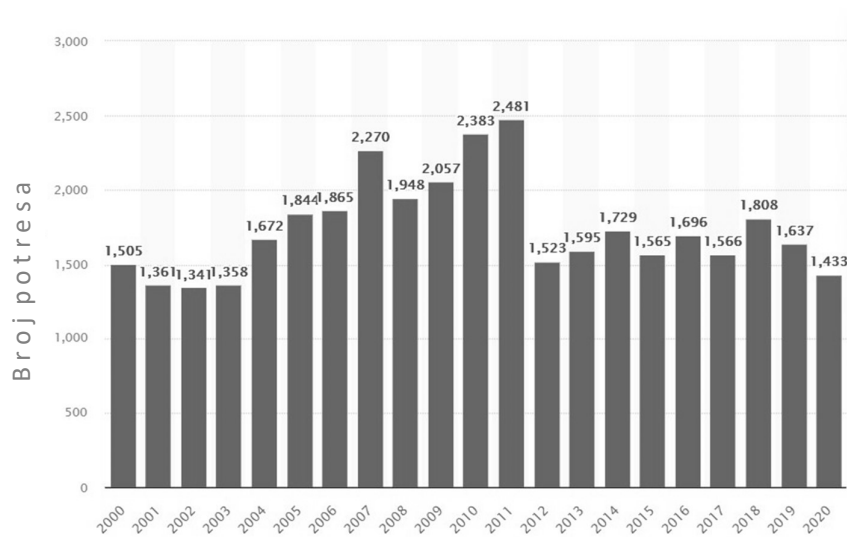
Slika 2.1 Porast globalnih ekonomskih gubitaka posljednjih desetljeća, kao rezultat prirodnih katastrofa i neplanirane urbanizacije (EMDAT 2020)

Među prirodnim katastrofama potres se smatra izvorom najvećih rizika (Kassem i dr. 2020). Ovako poimanje potresa polazi od činjenice da pouzdana predviđanja pojavnosti i snage potresa još uvijek nije moguće izraditi. Nadalje, znanstveno je potvrđena nelinearnost potresne pojave s posljedicama (Oliveira i dr. 2006) kao i postojanje mnogih izvora nesigurnosti u cijelom lancu procjene rizika (Baraschino i dr. 2020, Silva 2019, Iervolino 2017, Pinho i dr. 2008, Bazzurro i Luco 2007, Crowley i dr. 2005).

Po količini oslobođene energije, koja se u obliku potresnih valova propagira kroz stijensku masu, potres je jedna od najjačih prirodnih opasnosti (Ismail-Zadeh 2020, Hadzima-Nyarko i dr. 2018).

Tijekom najjačeg zabilježenog potresa u povijesti Zemlje (Čile 1960., M_w 9,5) u nekoliko sekundi prema procjenama oslobođeno je oko 8,3 kvintilijuna džula energije (Barrientos i dr. 1990).

Broj potresa koji su se dogodili posljednjih desetljeća prikazan je na slici 2.2. Najveći broj potresa dogodio se 2011., a godina s najvećim brojem jakih potresa bila je 2010. tijekom koje su se dogodila, 23 jaka potresa čija je magnituda iznosila $\geq 7,0$ (Szmigiera 2021). Privremeno povećanje ili smanjenje seizmičnosti dio je normalne neravnoteže broja potresa. Povećanje ili smanjenje broja potresa nije pozitivan pokazatelj da je veliki potres neizbježan niti da će se dogoditi.



Slika 2.2 Broj potresa (M_w 5 po Richterovoj ljestvici) koji su se dogodili u posljednja dva desetljeća (Szmigiera 2021)

Najteža posljedica potresa je gubitak ljudskih života (Maqsood i Schwarz 2011). Procjenjuje se da je u 20. stoljeću 61,5 milijuna ljudi pogođeno potresima pri čemu je oko 1,87 milijuna ljudi smrtno stradalo, prosječno 2052 smrtna slučaja po potresnom događaju (Doocy i dr. 2013).

Istraživanja mogućnosti djelovanja u cilju smanjenje rizika od katastrofa pokazala su da razvoj čovječanstva kao i rezultati tog razvoja predstavljaju pokretače rizika (UNISDR 2015). Uočeno je da gubitci predstavljaju ishod donesenih odluka o razvoju, a urbanizacija je prepoznata kao glavni nastali kontekst i pokretač rizika (Dickinson i dr. 2016, Pearson i Pelling 2015, Oliveira i dr. 2006, Dowrick 2003).

Države zakonom definiraju upravljanje rizicima, a kontinuirano i aktivno provođenje donesenih lokalnih strategija upravljanja rizicima na globalnoj razini prati se i podržava kroz okvirni program Sendai (engl. *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction, SFDRR*). Na Svjetskoj konferenciji UN-a o smanjenju katastrofa (2015.), potpisan je Sendai okvir za smanjenje rizika od katastrofa za razdoblje 2015. – 2030. koji predstavlja instrument za izgradnju otpornosti nacija i zajednica na katastrofe. Jedna od nekoliko središnjih ideja za oblikovanje politike i istraživanja smanjenja rizika je sistemski pristup riziku (UNISDR 2015) utemeljen na preklapanju više opasnosti, izloženosti i oštetljivosti/ranjivosti.

2.1.1. Pojam rizika

Krajem 19. stoljeća, započeo je proces procjene rizika sustavnim bilježenjem vremena, visina vodostaja, a potom i potresa (Charles 2005). Prvi koji je počeo istraživati prednosti ublažavanja rizika bio je John R. Freeman (1932.), čije je klasično djelo *Earthquake Damage and Earthquake Insurance*, napisano 1932., dalo pregled do tada poznate povijesti štetnih događaja.

Komponente koje sadržava rizik su potencijalni događaji i posljedice pri čemu su potencijalni događaji određeni vjerojatnošću pojave potresne opasnosti, a rizik je kombinacija vjerojatnosti i posljedice (Kaplan i dr. 1981). Bez postojanja posljedica (gubitaka, štete), nema rizika, bez obzira na vjerojatnost nekog događaja, suprotno, ako postoji vjerojatnost nekog događaja, tada postoji i rizik.

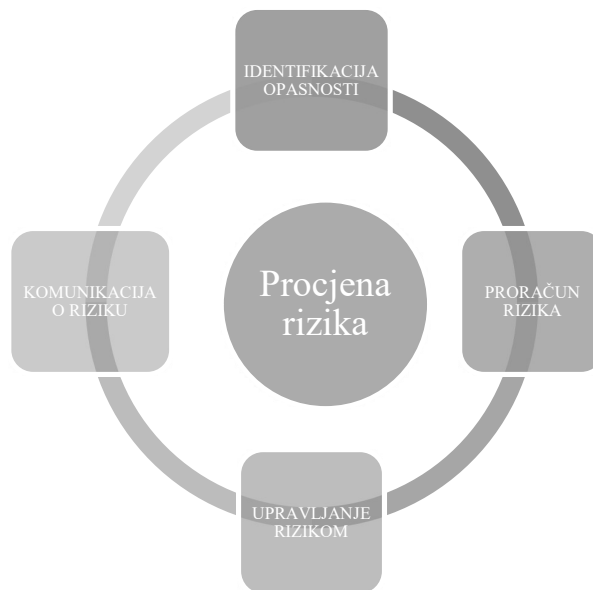
Rizik je kvantitativno izražena mogućnost (Bernstein 1996) da izvor štete dovede do gubitka i sustavan način (Beck 1992) rješavanja opasnosti.

Tijekom vremena rizik se pretvorio u alat matematičara za interpretaciju, organizaciju i analizu informacija s ciljem donošenja odluka (Suter 2007.) Razvoj metodologija procjene rizika koje su usmjerene prema identifikaciji i upravljanju zasnovan je na primjeni različitih matematičkih principa koji rizik promatraju kao funkciju veličine i vjerojatnosti štete (Bernstein 1996).

Razvoj analize rizika omogućio je promatranje i sagledavanje njegove pojavnosti s različitih gledišta. Prema German Advisory Council on Global Change, iz tehničke perspektive rizik se promatra u odnosu na dvije varijable: vjerojatnost pojavljivanja određenog događaja te stupnja štete i visine toga oštećenja. Društvene znanosti zanimaju društvene i psihološke karakteristike rizika, a društveno-ekonomske znanosti rizik promatraju u smislu preživljavanja, sigurnosti i zadovoljavanja osnovnih životnih potreba.

Metodologije proračuna rizika razrađuju se zasebno za različita područja ili situacije nastanka rizika, ali u osnovi svih je sličan, znanstveno zasnovan pristup. Raznovrsnost i složenost rizičnih procesa te ulaznih parametara koji ih opisuju zahtijevaju konstruktivan i zaokružen postupak (Knight, 2009) proračuna rizika.

Za procjenu potencijalno nepovoljnih učinaka koji proizlaze iz izloženosti opasnostima proces procjene rizika sastoji se prema agenciji Ujedinjenih naroda za hranu i poljoprivredu FAO (engl. *Food and Agriculture Organization*) od četiri međusobno povezane komponente (FAO 1995): identifikacije opasnosti, proračuna rizika, upravljanja rizikom i komunikacije (komunikacija - priopćavanje rezultata o riziku). Na slici 2.3 shematski je prikazan proces procjene rizika prema FAO.



Slika 2.3 Komponente FAO procesa procjene rizika (prema FAO 1995)

Procjene rizika oslanjaju se na numeričke izraze rizika (kvantitativan pristup procjeni rizika) ali uključuje i kvalitativne. Nadalje identificiraju se moguće nesigurnosti ulaznih parametara i samog proračuna te utvrđuju uzroci njihovog nastanka i proučavaju mogućnosti izbjegavanja u procjeni rizika.

Metodologijom proračuna osigurava se transparentnost postupaka, angažiranost različitih struka i interesnih dionika, analiza subjektivnosti procjena i odluka te permanentne mogućnosti unosa novih parametara i vrijednosti. Primarni cilj proračuna rizika je dobiti profil rizika koji vodi do procesa stvaranja odgovora na rizik.

2.1.2. Potresni rizik

Potresni rizik je, prema McGuire-u (2004.), vrhunac složenih i neželjenih učinaka na ljude i izgrađeni okoliš uzrokovanih potresnom opasnošću. Proces procjene potresnog rizika sastoji se od procjene te utvrđivanja vjerojatne štete, žrtava i troškova nastalih zbog potresa unutar promatranog geografskog područja tijekom određenog razdoblja (Ismail-Zadeh 2020, NIBS i FEMA 366 2009). Procjena potresnog rizika samo je jedan način uspostavljanja temelja za donošenje odluka o mogućim odgovorima na učinke potresa (McGuire 2004).

Za građevinsku struku doba procjene rizika i gubitaka od potresa započeli su Cornellovim radom iz 1968. (Cornell 1968) koji donosi koncept optimalnog projektiranja zgrada otpornih na potrese ostvariv kroz proračun vjerojatnosti pojave potresa, povezan s gibanjem temeljnog tla i podacima o nastalim inženjerskim oštećenjima iz prijašnjih potresa (McGuire 2008). Ovaj koncept i danas čini temelj svih suvremenih metodologija procjene potresnog rizika.

Rizik od katastrofa se sve do 1970-ih doživljava samo kao izravna posljedica prirodnih opasnosti, ali postupno se shvaćao kao složen događaj podložan interakciji opasnosti, izloženosti i oštetljivosti (Pezuzzi 2019). Coburn i Spence (2002.) potresni rizik matematički definiraju kao umnožak vjerojatnosti potresne opasnosti i vjerojatnosti potresne oštetljivosti i izražavaju jednadžbom:

$$R_{ij} = H_j \cdot V_{ij} \quad (2.1)$$

gdje je:

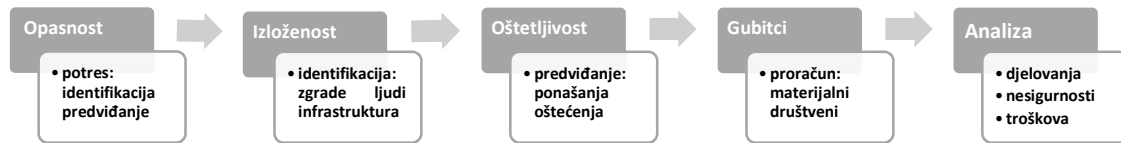
R_{ij} – rizik, vjerojatnost ili prosječna učestalost gubitka za element i zbog djelovanja potresnog gibanja jakosti j temeljnog tla

H_j – opasnost, vjerojatnost ili prosječna očekivana učestalost djelovanja potresnog gibanja jakosti j temeljnog tla

V_{ij} – oštetljivost, razina gubitka koja bi nastala na elementu i kao rezultat djelovanja.

Proces procjene potresnog rizika temelji se na potrebi kvantificiranja očekivanog potresanja tla, elemenata izloženih riziku te odgovarajućeg odziva konstrukcija (Pavić i dr. 2020b, Molina i dr. 2010). Osim toga, kroz postupke procjene potresnog rizika mjere se vjerojatne štete, žrtve i ostali troškovi rizika unutar određenog geografskog područja za određeno vremenskog razdoblje (NIBS i FEMA, 2009).

Proces procjene potresnog rizika ima svoju strukturu (Simmons i dr. 2001) koja obuhvaća (Slika 2.4) identifikaciju potresne opasnosti i elemenata izloženih riziku, predviđanje veličine opasnosti i oštetljivosti, proračun gubitaka te analizu potresnih djelovanja, mogućih nesigurnosti i troškova rizika (Pavić i dr. 2020b, Simmons i dr. 2001).



Slika 2.4 Proces procjene potresnog rizika (prema Pavić i dr. 2020b)

Metodologija potresnog rizika polazi od identifikacije i predviđanja potresne opasnosti (Pavić i dr. 2020b). Intenzitet, trajanje i učestalost karakteristike su koje definiraju potresnu opasnost (Ismail-Zadeh 2020, Bulajić 2019, Wang 2009). Razine potresne opasnosti određene su parametrima potresanja temeljnog tla, koji određuju intenzitet potresa. Intenzitet se procjenjuje upotrebom jednadžbi za predviđanje gibanja temeljnog tla, koje su u funkciji magnitude, udaljenosti i karakteristika temeljnog tla (Bulajić 2019, Barbat i dr. 2015).

Istraživane su i dalje se istražuju različite metodologije predviđanja potresne opasnosti (Jena i dr. 2020) kako bi se utvrdila prikladnost njihovih načela i primjene u procjeni rizika. Budući da se seizmičnost, jačina i vjerojatnost potresa ne mogu smanjiti i modificirati, upravljanje rizikom se sve više usredotočuje na smanjenje oštetljivosti kao učinkovite mjere ublažavanja šteta/gubitka koje se često u literaturi poistovjećuju sa smanjenjem rizika (Vahdat i dr. 2014).

Oštetljivost je unutarnji faktor elemenata rizika (fizičkih, ekonomskih, političkih ili društvenih) (Barbat i dr. 2010) izloženih potresnim događajima, a predstavlja mogućnost da isti budu osjetljivi na oštećenja (Hadzima -Nyarko i dr. 2018).

Povećanjem broja elemenata oštetljivosti povećava se stupanj rizika. Kapacitet i obrasci oštetljivosti variraju u prostoru i vremenu (Ismail-Zadeh 2020) te su kao takvi često pokazatelji nerazmjernih učinaka potresne opasnosti. Zbog toga su mnogi dijelovi svijeta još uvijek osjetljivi na potrese unatoč napretku postignutom u istraživanju potresa i potresnog inženjerstva.

Prema Hadzima-Nyarko i dr. (2018a), procjena potresne oštetljivosti predstavlja kvantitativnu procjenu nedostatka nosivosti konstrukcija kada su izložene potresnoj uzbuđi, izraženu određenim mjerama. Kvalitativno se izloženost može definirati (Pavić i dr. 2020a, Hadzima-Nyarko i dr. 2018b, Sandi 1998), kao stanje elemenata rizika da budu izloženi štetnim posljedicama potencijalnih potresnih opasnosti.

Izloženost se opisuje pomoću baza podataka o elementima rizika (zgradama, ljudima, infrastrukturi i dr.) koje na temelju podataka koje sadržavaju omogućavaju raspodjele elemenata rizika u različite razrede oštetljivosti (Dolce i dr. 2021, Pavić i dr. 2020a, Pavić i dr. 2019b, Pavić i dr. 2019a, Hadzima-Nyarko i dr. 2018b). Baze su povezane s modelom oštetljivosti tako da su elementi u riziku, na temelju svojih tipoloških karakteristika, grupirani u određeni broj "razreda" oštetljivosti s kojima je povezan određeni model oštetljivosti (Pavić i dr. 2020b, Hadzima-Nyarko i dr. 2018a).

Znanstveno područje potresnog rizika i procjena gubitaka rastuće je promatrano područje. Posljednjih godina razvijene su metodologije procjene oštetljivosti (Zuccaro i dr. 2011, Crowley i dr. 2004, McGuire 2004, Oliveira i dr. 2006) koje su ugrađene u znatan broju različitih računalnih programa. Pregled računalnih programa može se pronaći u radovima Molina i dr. (2010.), Crowley i dr. (2010.), Strasser i dr. (2008.).

Potreba za pouzdanijim procjenama rizika (npr. za planiranje upotrebe zemljišta ili procjenu potresno kritičnih zgrada) potaknula je razvoj modela zasnovanih na QGIS alatima. Njihovom upotrebom omogućeno je posjedovanje kvalitetnih podataka o prostornoj razlučivosti (Grützner i dr. 2013, Deligiannakis i dr. 2016), neotektonskim gibanjima (Papanikolaou i dr. 2015, Deligiannakis i dr. 2016) ili informacije o povratnim intervalima povezanih jakih potresa.

Desetljeća istraživanja težina, učestalosti i manifestacija prirodnih katastrofa rezultirala su potrebom za poboljšanjem razumijevanja rizika u svim njegovim oblicima te uvođenjem društvene dimenzije rizika od katastrofa (Peduzzi 2019). Znanstvenici iz područja društvenih znanosti nakon potresa u San Fernandu 1971. počinju provoditi istraživanja koja su stavila snažan naglasak na predviđanje ljudskih gubitaka (broj žrtava i ozlijeđenih) (Molina 2009). Primarna svrha većine preventivnih programa zaštite od potresa je zaštita i spašavanje ljudi (Maqsood i Schwarz 2011). Procjene mogućnosti stradanja od potresa ili brojnosti žrtava su vrlo varijabilne od jednog potresa do drugog, a podatci koji dokumentiraju ranjavanja i gubitke života u potresima koji su se dogodili često su nepouzdana (Coburn i Spence 2002).

Razvijeni su brojni empirijski (Turkan i Özel 2014, Jaiswal i Wald 2010, Anbarci i dr. 2005) i analitički (FEMA 2015, Maqsood i Schwarz 2011, Zuccaro i Cacace 2011, Yeh i dr. 2006) modeli za predviđanje žrtava potresa (Wang i dr. 2020).

Procjena potresnog rizika vrlo je složena. Nejasnoće i neizvjesnosti predstavljaju kritične izazove u procjeni, modeliranju i upravljanju rizikom (Pavić i dr. 2020b, Vahdat i dr. 2014). Precizno procijeniti vjerojatnost i ozbiljnost potresa nije moguće zbog nesigurne prirode informacija, međutim štetni učinci potresa mogu se učinkovito smanjiti ili izbjeći primjenom odgovarajuće procjene (Pavić i dr. 2020b, Pavić i dr. 2020a, Pavić i dr. 2019b, Pavić i dr. 2019a) i upravljanja rizicima (Bostrom i dr. 2006).

Samo jedan jak potres u potpunosti sposoban provjeriti ili opovrgnuti procijenjenu potresnu opasnost, odabranu metodologiju i definirane pretpostavke potresnog rizika (Molina 2010).

2.2. Predviđanja potresne opasnosti

Primarni cilj proračuna u potresnom inženjerstvu je osigurati da konstrukcije mogu izdržati određenu razinu potresanja tla zadržavajući željenu razinu otpornosti. Temelj za ostvarenje ovog cilja kroz postupke potresnog projektiranja, izvedbe, održavanja i rekonstrukcije građevina, poznavanje je i razumijevanje procesa i manifestacija potresa te događaja povezanih s njima.

Potresna opasnost može se definirati kao vjerojatnost pojavljivanja potresa odgovarajućih karakteristika, koji će se na određeni način manifestirati na promatranoj lokaciji (Bulajić 2019). Modeliranja potresne opasnosti smatraju se inženjerskim rješenjima (Geller 1997) za opisivanjem neizvjesnih potresnih procesa i predstavljaju polaznu točku za predviđanje nepovoljnih utjecaja koje potresi mogu imati na zgrade. Proračunati veličinu potresne opasnosti znači procijeniti vjerojatnosti prekoračenja parametara gibanja temeljnog tla (brzine, ubrzanja, pomaka) uzrokovanih potresnom uzbuđom (McGuire 2008, UNDRO 1979, Esteva 1969, Cornell 1968).

Osnovni pristupi (Costa i dr. 1993, 1992) u procjeni potresne opasnosti su deterministički i probabilistički. Oni uključuju dva najčešće upotrebljavana proračuna (Huang 2012, McGuire 2001): deterministički proračun potresne opasnosti (engl. *Deterministic seismic hazard analysis*, DSHA) i probabilistički proračun potresne opasnosti (engl. *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*, PSHA).

Bommer (2009. i 2002.) smatra da nije moguće niti korisno uspostaviti pristup procjeni potresne opasnosti koji će biti idealan alat za sve situacije. Pristup u svakoj procjeni treba biti odabran prema prirodi projekta te kalibriran prema seizmičnosti područja koje se proučava, uključujući količinu i kvalitetu dostupnih podataka za karakterizaciju seizmičnosti (Pailople 2009, Bommer 2009, 2002, Douglas 2008). Iako imaju različite temeljne pretpostavke i koncepte, obje metode ako se primjenjuju na ispravan i nepristran način mogu pružiti odgovarajuću razinu sigurnosti procjene potresne opasnosti (Douglas 2008, Krinitzsky 1995).

Dok se determinističkim pristupom na temelju maksimalno mogućeg (jednog ili nekoliko karakterističnih) potresa (engl. *Maximum Credible Earthquake*, MCE) (Richter 1958), za određenu lokaciju procjenjuje najnepovoljnije gibanje tla (Huang 2012), probabilističkim pristupom procjenjuje se vjerojatnost (proračunata na temelju niza potresa različitih jačina i udaljenosti (hipocentralnih, epicentralnih)) da će određena razina gibanja temeljnog tla zbog potresa biti dostignuta (Bulajić 2019, MCGuire 2001, Krinitzsky 1995).

Deterministički proračun uzima u obzir maksimalnu opasnost samo iz najvećeg "kontrolirajućeg" izvora (Doruo 2012, Todorovska i dr. 1995, Krinitzsky 1995) ne uzimajući u obzir vremenske faktore zbog neizvjesnosti pojave potresa u vremenu. Takav pristup analizi potresne opasnosti može umanjiti konzervativnost procjene (Huang 2012, Boot 2007), osobito kada postoji mogućnost da drugi nekontrolirani izvori stvore opasnosti gotovo ekvivalentne opasnostima kontrolnog izvora ili kada je projektni period zgrade duži od povratnog razdoblja potresa s kontroliranog izvora.

Probabilističkim proračunom potresna opasnost trebala bi se modelirati pristupom koji istovremeno uzimaju u obzir vjerojatnosti pojave potresa različite jakosti, prostorne razdiobe žarišta potresa, frekventno-zavisne atenuacije amplituda jakog gibanja temeljnog tla (za periode osciliranja od 0,04 do 2 s) te karakteristike dubokih geoloških slojeva (na dubinama i do nekoliko km) i lokalnog temeljnog tla (dubine i do stotinjak metara) (Bulajić i dr. 2021a, Bulajić i dr. 2021b, Pavić i dr. 2020a).

Nepouzdanosti probabilističkih proračuna najčešće nastaju zbog dva razloga. Prvi je nepreciznost podataka o mehanizmima raspucavanja (Douglas i Aochi 2008) pojedinih tipova rasjeda koji snažno utječu na vrijeme ponavljanja i jakost potresa. Odstupanja koja nastaju zbog promjene mehanizma sloma najveća su za potrese koji najviše zabrinjavaju inženjere, srednje jaki i jaki. Drugi razlog je uvođenje u proračune Gutenberg-Richterovog b koeficijenta, kako bi se „poboljšalo“

vjerojatnosno tumačenje potresa za koje je brojnost ponavljanja nepoznata (Krinitzsky 1995, Boomer 2002).

McGuire (1976.) je sredinom prošlog stoljeća za provedbu PSHA proračuna, koji se temelji na radu Cornella (1968.), izradio prvi javno dostupan računalni program za analizu potresnog rizika (pisan u jeziku za programiranje Fortran). Program je omogućio karakterizaciju geometrije izvora potresa neovisno o području procjene rizika, proračune rizika na različitim mjestima uzastopno te upotrebu atenuacijskih jednadžbi općih karakteristika (McGuire 1976).

Postoji nekoliko različitih metodologija koje se upotrebljavaju za PSHA proračune, međutim najčešće je prihvaćena deduktivna (Bulajić 2019, Manić i Bulajić 2006, McGuire 1976, Cornell 1968), kojom se, osim upotrebe kataloga povijesnih potresa i odgovarajućih empirijskih atenuacijskih jednadžbi, za promatrano područje pokušavaju definirati svi rasjedi i izvori potresa kao i potresne karakteristike ovih izvora. Svrha je za zadanu lokaciju detaljnije istražiti utjecaj jačine potresa i udaljenosti od žarišta na lokalno temeljno tlo i duboke geološke slojeve te u vezi s njima intenzitete gibanja temeljnog tla (Bulajić 2019, Manić i Bulajić 2006, McGuire 1993, McGuire 1976, Cornell 1968).

Prvu potpuno deduktivnu metodologiju za spektre odziva koji za sve periode osciliranja imaju konstantne vjerojatnosti prekoračenja, razvijaju Anderson i Trifunac (1978. i 1977.) samo godinu dana nakon McGuireovog programa. Spektri su prvobitno nazvani spektri jednolikog rizika (engl. *Uniform Risk Spectra*), a kasnije su preimenovani u spektre jednolike opasnosti (engl. *Uniform Hazard Spectra*, UHS). Spektri jednolike opasnosti danas predstavljaju temelj propisa za projektiranje potresno otpornih konstrukcija u SAD-u i Kanadi, a u skorijoj budućnosti se očekuje da budu i temelj za novu generaciju eurokodova.

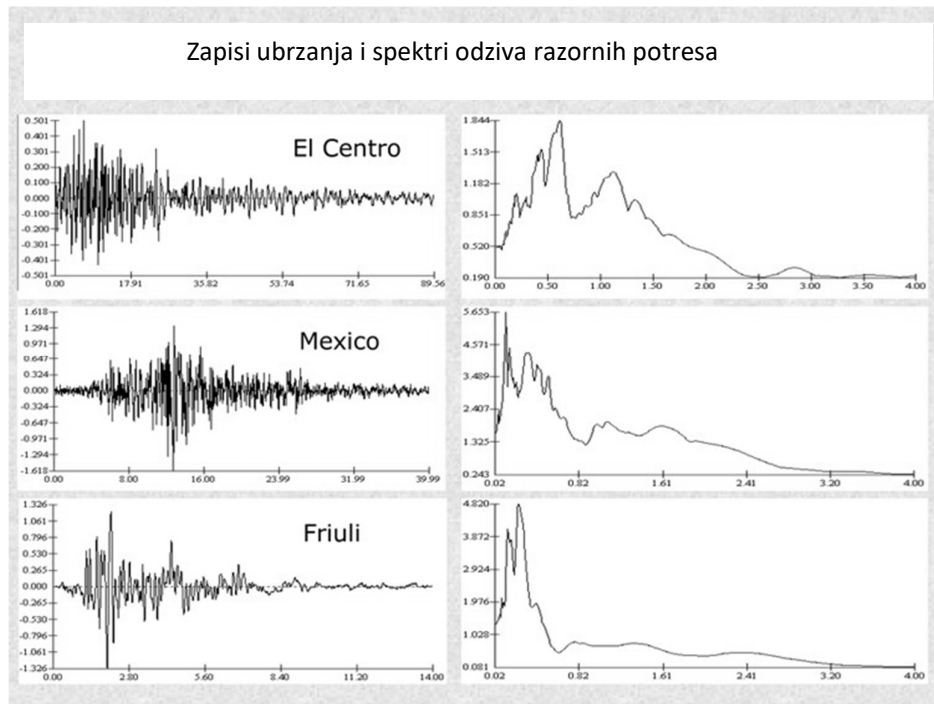
Ovi spektri predstavljaju anvelopu vrijednosti spektralnih ubrzanja za različite periode osciliranja, pri čemu svaka spektralna amplituda ima istu vjerojatnost da bude premašena. Prednost ovog pristupa je, da se na uravnotežen način, istovremeno razmatra doprinos svih čimbenika koji utječu na krajnji rezultat potresnog zoniranja i mikrozoniranja (Trifunac 2013).

2.2.1. Modeliranje odziva konstrukcija na potresnu uzбудu – spektre odziva

Jedan od najznačajnijih inženjerskih izazova modeliranje je ponašanja građevinskih konstrukcija kada su izložene potresnom djelovanju. Zbog velike složenosti potresnog gibanja i složene prirode

konstrukcija koje su od interesa za inženjere, precizno rješenje ovog problema i danas je rijetko moguće.

Jedan od pokušaja da se pojednostavi ovaj izazov i dostatno pouzdano predvidi međudjelovanje konstrukcije i tla, su „spektri odziva“ (Mahin Lin 1983, Hudson 1956). Na slici 2.5 prikazani su zapisi ubrzanja i spektri odziva ubrzanja nekoliko razornih potresa (El Centro (1940.), Friuli (1976.) i Mexico City (1985.).

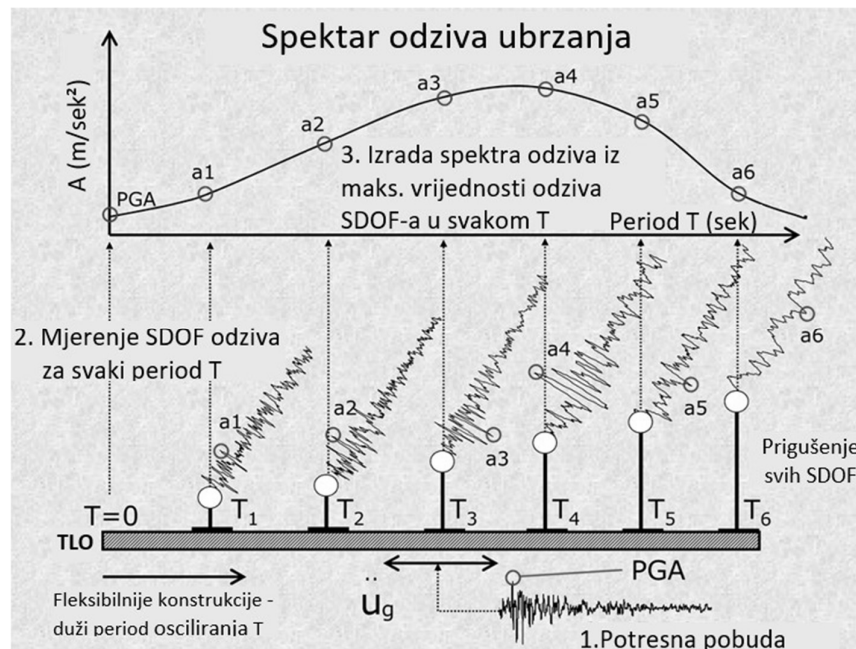


Slika 2.5 Zapisi potresa (lijevo) i spektri odziva ubrzanja (desno) za potrese koji su pogodili El Centro, Mexico City i Friuli

Počeci razvoja prve ideje o predstavljanju potresne uzbude spektrima odziva veže se za Bruksa i Cavallerija koji početkom 19. stoljeća (Trifunac 2011 2009b) upotrebljavajući njihalo proučavaju frekventni sastav potresnih valova (Trifunac 2011 2009b, Housner 1997). Njihala za analizu potresnih valova početkom 20. stoljeća (Trifunac 2011 2009b) upotrebljava i Suyehiro (1926.) što rezultira zapisima potresa nastalim na višenjihalskom snimaču koji se smatraju jednim od prvih spektara odziva. Ovi spektri definirani su za 13 vrijednosti perioda osciliranja, jednoliko raspoređenih između 0,22 do 1,81 s (Suyehiro 1926).

Daljni razvoj koncepta spektara odziva veže se za 30-te godine prošlog stoljeća (Trifunac 2011, 2009ba) i Anthony-a Biota utemeljitelja metode spektara odziva (Biot 1934, 1933, 1932), te 60-te kada Trifunac uvodi digitalizaciju u procese prikupljanja i obrade zapisa jakog gibanja temeljnog tla (Trifunac 2006). Prema Freemanu (2007.), spektri odziva temelj su za modeliranje odziva građevinskih konstrukcija koje reagiraju unutar linearno- elastičnog područja. Oni predstavljaju grube aproksimacije potresa (Mahin Lin 1983) koji bi se u određenom povratnom razdoblju mogli dogoditi u budućnosti. Koristan su alat za kvantificiranje zahtjeva potresnog gibanja temeljnog tla (Trifunac 2012, 2006, Mahin Lin 1983), za procjenu osnovnog perioda temeljnog tla (Seed i dr. 1974) ili za proračun umjetnih zapisa potresa (Lee 2002, Lee i Trifunac 2010). Tipično su polazište većine konvencionalnih metoda projektiranja potresno otpornih konstrukcija te procjene sigurnosti postojećih konstrukcija (Trifunac 2006, 2012).

Spektri odziva opisi su vršne linearne vrijednosti (pomaka, brzina ili ubrzanja) relativnih odziva prigušenih sustava s jednim stupnjem slobode (engl. *Single Degree of Freedom, SDOF*) na uzbuđu izazvanu potresnim gibanjem temeljnog tla (Trifunac 2009a, Trifunac 2009c, Trifunac 2008, Trifunac 2003). Na slici 2.6 prikazana je postupak generiranja spektra odziva.



Slika 2.6 Generiranje spektra odziva ubrzanja

Ordinate spektra odziva predviđaju se pomoću empirijskih atenuacijskih jednadžbi gibanja temeljnog tla i njihovih parametara procjene, proračunatih kroz regresijske proračune koje se provode neovisno za svaku spektralnu amplitudu i svaki period osciliranja (Graizer 2009).

Mjere intenziteta gibanja temeljnog tla, vrijednosti vršnog: ubrzanja (PGA), brzine (PGV) i pomaka (engl. *Peak Ground Displacement*, PGD) kvantificiraju potresnu opasnost (Akkar i Ozen 2005) i predstavljaju temeljne parametre procjene veličine potresne opasnosti. Odnosi između mjera intenziteta potresa i procjena oštećenja konstrukcija predmet su brojnih znanstvenih radova (Kadas i dr 2011, Riddell 2007, Kramer i Mitchell 2006, Wu i dr. 2004, Elenas 2000, 1997, Cabanas 1997).

Unatoč raširenom mišljenju da vršno ubrzanje temeljnog tla ima mali značaj za geofizička istraživanja i ograničenu vrijednost za potresno inženjerstvo, ono je najčešće upotrebljavana mjera intenziteta gibanja temeljnog tla. Kako bi se što pouzdanije predvidjelo vršno ubrzanje temeljnog tla, izvedeno je više od 120 atenuacijskih jednadžbi (Douglas, 2001a, 2002a), a paralelno s novim spoznajama i usvojenim znanjima nastaju nove. Smatra se da je jedan od razloga najčešće uporabe vršnog ubrzanja kao mjere intenziteta gibanja temeljnog tla taj što se većina projektnih potresnih propisa temelji na spektrima odziva ubrzanja. Osim toga, PGA je jednaka spektralnom ubrzanju za nulti period osciliranja ($T=0$) pa Booth (2007.) smatra da je to jednostavna i jasna veza između PGA i spektralnih vrijednosti (Boomer i Alarcon 2006, Douglas 2003).

Akkar i Ozen (2005.) istraživali su učinke vršnog ubrzanja na deformacijske zahtjeve sustava s jednim stupnjem slobode, upotrijebivši 60 zapisa jakog gibanja temeljnog tla s udaljenošću manjom od 23 km i momentnim magnitudama veličine između (M_w) 5,5 i 7,6. Opažanja na ovim zapisima pokazala su da PGV dobro korelira s magnitudom potresa i vjerno odražava potresno ponašanje tla, te da može poslužiti za pouzdana predviđanja potresnog odziva konstrukcija.

Mjere intenziteta koje predlažu Calvi i Andreotti (2019), Calvi (2018) i Calvi i dr.(2018) su vršno ubrzanje i pomak jer ih smatraju prikladnijim za uzimanje u obzir učinkovitih vrijednosti: udaljenosti od rasjeda, magnitude i amplifikacije tla. Vršne vrijednosti ubrzanje i pomaka od iznimne su važnosti kod predviđanja potresne otpornosti konstrukcija koje se odlikuju velikom i srednjom fleksibilnošću. Naime, potresni odziv visokih zgrada može biti takav da se gornji katovi ne gibaju zajedno s temeljnim tлом što može izazvati slom nosivih elemenata nižih katova (de Silva 2006). Upotreba vršnih pomaka kod dimenzioniranja potresno otpornih konstrukcija može biti pouzdana za konstrukcije s vrlo dugim

periodima osciliranja zato su za visoke zgrade mjerodavni pomaci osciliranja, ali ne i za srednje i visokofrekventne konstrukcije (Chopra 2001).

Iako je primjena spektara ubrzanja dominantna za proračun maksimalne vrijednosti deformacijske energije potresa, nerijetka su istraživanja koja pokazuju da PGA parametar pruža lošu korelaciju za prikaz konstrukcijskih oštećenja (Kostinakis i dr. 2018, Nau i dr. 1984, Takizawa i Jennings 1980).

Upotreba vršnog ubrzanja kao parametra projektiranja potresno otpornih građevina (Gupta i Trifunac 1992, Gupta i Trifunac 1988) mogla bi dati pouzdana predviđanja potresne otpornosti samo za visokofrekventne konstrukcije, ali ne i za konstrukcije koje čine većinu građevina, a to su zgrade sa srednjim i dugim periodima osciliranja (Bulajić 2013, Chopra 2001).

Iako je primjena spektara ubrzanja dominantna za proračun maksimalne vrijednosti deformacijske energije potresa, nerijetka su istraživanja koja ukazuju da je PGA parametar pruža lošu korelaciju za prikaz konstrukcijskih oštećenja (Kostinakis i dr. 2018, Nau i dr. 1984, Takizawa i Jennings 1980).

Upotreba vršnog ubrzanja kao parametra projektiranja potresno otpornih građevina (Gupta i Trifunac 1992, Gupta i Trifunac 1988) mogla bi dati pouzdana predviđanja potresne otpornosti samo za visokofrekventne konstrukcije, ali ne i za konstrukcije koje čine većinu građevina, a to su zgrade sa srednjim i dugim periodima osciliranja (Bulajić 2013, Chopra 2001).

Kada su u pitanju predviđanja konstrukcijskih oštećenja i geotehničkih učinaka, vršna brzina je prema Bommer i Alarcon (2006.), jedna od najboljih pojedinačnih mjera intenziteta gibanja temeljnog tla za njihovo precizno proračunavanje.

Provedena su istraživanja (Wolf 1985, Newmark i Hall 1982, 1969) koja imaju za cilj ukazati na potrebu učestalije primjene spektara odziva brzine (relativne brzine) (Trifunac 2012). Temelje se na tvrdnji da je brzina bolji pokazatelj za donošenje odluka o dimenzioniranju potresno otpornih konstrukcija i procjena oštetljivosti istih, osobito onih krutih (De Silva 2005) jer daje direktan uvid u energiju sadržanu unutar ukupnog odziva konstrukcije i osigurava pouzdaniju procjenu parametara kojima se opisuje odziv i moguće štete na konstrukcijama (Wolf 1985, Newmark i Hall 1982, 1969).

Spektri odziva relativne brzine nisu nužni za određivanje maksimalne deformacije i sile u konstrukcijskom sustavu pa je to prema Chopri (2007.) primarni razlog rjeđe upotrebe ovih spektara.

Upotreba vršnih vrijednosti mjera intenziteta gibanja temeljnog tla, kao glavnih ulaznih parametara za proračun maksimalne vrijednosti deformacijske energije potresa (Gupta i Trifunac 1992, Gupta i Trifunac 1988), ne dopušta za većinu konstrukcija, međudjelovanja ili usporedbe između konstrukcijskih odziva nastalih u dva različita potresa iste vršne amplitude (Trifunac i Todorovska 2000).

U HRN EN 1998-1:2011 amplitude spektara odziva proračunate su za periode osciliranja od 0,04 do 4 s (121 period) jednoliko raspoređene na razmacima od 0,03 s. Odabir raspona perioda odgovara frekvencijama od 0,25 do 25 Hz, koje pokrivaju većinu danas dostupnih zapisa akcelerometara (Boore i Bommer 2005, Ambraseys i dr. 2004), što osigurava precizno određivanje spektara i uzimanje u obzir velikog broja tipova konstrukcija.

Potrebe nastale iz prakse potaknule su prijedloge za proširenje raspona spektralnih amplituda, odnosno uzimanje u proračun perioda osciliranja između 0,01 i 5 s (Elnashai i Di Sarno 2008). Međutim, spoznaje da ovisno o karakteristikama potresa i lokalnog tla, konstantni dio spektra pomaka može započeti već pri periodu od 2 s (Fajfar 2000), da je pri periodima dužim od 3 s spektar pomaka konstantan i paralelan s apscisom (Newmark i Hall 1969), da se posljedično tome spektar ubrzanja pri dužim periodima osciliranja smanjuje s kvadratom perioda te da spektralna pseudo-brzina poprima maksimalnu i približno konstantnu vrijednost u srednjem dijelu spektra odziva što rezultira konstantnim trošenjem potresne energije u području između perioda od 0,30 do 3,30 s (Newmark i Hall 1969), dovode u pitanje opravdanost traženih proširenja i potrebe za njihovom upotrebom.

Temelj za projektiranje potresno otpornih konstrukcija su normalizirani proračunski spektri standardnog oblika, dani u HRN EN 1998-1:2011 (2011.), skalirani s referentnom vrijednošću vršnog ubrzanja tla. Ovi spektri imaju samo dva oblika u zavisnosti od magnitude potresa (jedan za $M > 5,5$ i drugi za $M \leq 5,5$) i ne zavise o udaljenosti od žarišta potresa.

Usporedbe spektara HRN EN 1998-1:2011 i spektara skaliranih primjenom različitih jednadžbi predviđanja (Bulajić i dr. 2013, Bulajić 2013, Manić 2003) pokazale su da spektri HRN EN 1998-1:2011 nedovoljno pouzdano predstavljaju sve važne spektralne karakteristike jakog gibanja temeljnog tla jer su nastali kombiniranjem empirijskih oblika sa samo jednim faktorom za skaliranje koji je dobiven kroz PSHA te kao takvi ne predstavljaju spektre jednolike opasnosti (Bulajić i Lađinović 2014, Bulajić 2013), Bulajić i dr. 2012).

2.2.2. Skaliranje mjera intenziteta gibanja temeljnog tla - atenuacijske jednadžbe

Učinkovitost empirijskih procjena spektara odziva zavisi od ukupnog broja i pouzdanosti podataka jakog gibanja tla promatranog područja upotrijebljenih u statističkom modeliranju za dobivanje empirijskih jednadžbi skaliranja - GMPE te o njihovoj ravnomjernoj raspoređenosti po ljestvici mogućih vrijednosti za svaki parametar skaliranja (Douglas 2003). Osim toga, pouzdanost spektara odziva uvjetovana je i sposobnošću atenuacijske jednadžbe obuhvatiti sve složene fizičke procese koji utječu na potresno gibanje temeljnog tla promatranog područja (Trifunac 2008, Todorovska i Trifunac 2008). Atenuacijske jednadžbe (Douglas 2011) igraju značajnu ulogu u analizi potresne opasnosti jer povezuju jačinu gibanja temeljnog tla s različitim neovisnim parametrima kao što su magnituda, udaljenost od žarišta karakteristike lokalnog tla i izvora potresa, propagacija potresnih valova kroz razne materijale i druge (Bulajić 2013, Douglas 2011, Douglas 2003). Koleraciju između PGA, PGV i PGD s neovisnim parametrima nije jednostavno matematički oblikovati zbog velike nelinearnosti u odnosima (Akkar i Bommer 2010, Ambraseys i dr. 1995, Trifunac i Brady 1976, 1975a, b).

Konvencionalni način konstruiranja GMPE-a je kroz regresijske proračune snimljenih podataka o jakom gibanju temeljnog tla (Boore i Atkinson 2007, Campbell i Bozorgnia 2007, Boore i dr. 1997, Ambraseys i dr. 1996). Regresijskim analizama proračunavaju se nepoznati empirijski koeficijenti (c_1, \dots, c_n) za skaliranje modela predviđanja atenuacijske jednadžbe (Bulajić i Lađinović 2014, Bulajić i dr. 2013, Bulajić i dr. 2012, Bulajić i Manić 2006, Ambraseys i dr. 2005, Douglas 2003a, Ambraseys i Bommer 1995). Njima se pokušava modelirati priroda odgovarajućeg problema pomoću unaprijed definirane linearne ili nelinearne jednadžbe (Gandomi i dr. 2010). Ovi parametri imaju različite razine utjecaja na procjenjene mjere intenziteta potresnog gibanja temeljnog tla s obzirom da na svaki od ovih parametara utječu različiti čimbenici koji pak definiraju stupanj točnosti predviđanja (Akkar i Bommer 2012, Ambraseys i dr. 1995, Trifunac i Brady 1976, 1975a,b)

Generiranje novih atenuacijskih jednadžbi započinje odabirom funkcionalne forme modela i definiranjem zavisnih i nezavisnih varijabli. Prikladna funkcionalna forma koja dobro modelira moguća gibanja dobije se na temelju probnih regresijskih analiza. Kako bi se dobili koeficijenti jednadžbe i standardne devijacije, provodi se za sve spektralne periode regresijska analiza s obzirom na odabrani skup podataka (Bulajić 2019, 2013). Ovisno o razmatranom rasponu perioda, (jednorazinska ili višerazinska) regresija ponavlja se onoliko puta koliko je spektralnih perioda obuhvaćeno uz pretpostavku da su oscilacije linearne. U mnogim studijama razmatra se logaritamska ljestvica za

periode osciliranja, što znači da se više regresijskih točaka nalazi na višim frekvencijama (Graizer 2011, 2009).

Jednadžbe prigušenja obično specificiraju srednje amplitude (tj. 50 postotne vrijednosti dobivene empirijskim kumulativnim funkcijama distribucije) dok se za raspršivanje vrijednosti amplituda oko srednje procjene pretpostavlja da slijede log-normalnu ili sličnu vjerojatnosnu distribuciju. Distribucije vjerojatnosti koje su povezane s jednadžbama prigušenja, obično nisu skraćene pa tako ni vrijednosti odabranog parametra gibanja tla koje se mogu predvidjeti takvim jednadžbama (Bender i Perkins 1987, Bender 1984). Prve logaritamske tipove atenuacijskih jednadžbi za modeliranje vršnih ubrzanja upotrebljavaju Trifunac, Brady i Ambraseys (Trifunac 1976, Ambraseys 1975, Trifunac i Brady 1975a, b).

Iako postoji veliki broj primjera uporabe PGV-a u potresnom inženjerstvu (npr. kod procjena likvefakcijskog potencijala (Orense 2005, Kostadinov 2002, Trifunac 1995, Kotoda 1988), kao parametar procjene makroseizmičkih intenziteta, konstrukcijske oštetljivosti ili spektara odziva), malo (Boot 2007) je jednadžbi gibanja temeljnog tla za PGV u usporedbi s onima za vršno ubrzanje temeljnog tla. Bommer i Alarcon (2006.) daju pregled 25 jednadžbi koje predviđaju PGV.

Sve se više posljednjih godina u istraživanjima upotrebljavaju spektralni pomaci što je rezultiralo razvojem jednadžbi predviđanja za skaliranje prigušenih elastičnih (Bommer i Elnashai 1991) i neelastičnih (Borzi i dr. 2001, Lawson i Krawinkler 1995) spektralnih ordinata pomaka.

Napravljeni su brojni pregledi procjena gibanja temeljnih tala koji pružaju sažetke upotrijebljenih metoda, dobivenih rezultata i problema povezanih s atenuacijskim jednadžbama. U svojim ranim radovima Trifunac i Brady (1976., 1975a, b.) daju kratak prikaz i usporedbu do tada objavljenih atenuacijskih jednadžbi. Detaljne prikaze jednadžbi za procjenu jakih gibanja temeljnog tla, parametara za njihovo generiranje i njihove usporedbe u novije vrijeme daje u svojim radovima Campbell (2002.a, b, c), a Douglas (2011., 2001.a, 2002.a) sažima preko 120 studija koje su prikazale jednadžbe za procjenu vršnog ubrzanja temeljnog tla i preko 80 studija koje izvode jednadžbe za predviđanje ordinata spektralnih odziva (Douglas 2003).

Nesigurnosti regresijskih analiza nastaju zbog idealizacije složenih procesa, aproksimacija i variranja uvjeta modela što često ograničava njihovu sposobnost da pouzdano simuliraju složeno ponašanje parametara gibanja tla.

U cilju povećanja točnosti i učinkovitosti u predviđanjima u posljednje vrijeme nastala je potreba za uključivanjem više neovisnih parametara (Douglas 2003) u jednadžbe procjene gibanja temeljnog tla. Graizer i Kalkan (2011.) predlažu razvrstavanje parametara atenuacijskih jednadžbi na primarne i sekundarne, razredba ovih parametara prikazana je u tablici 2.1.

Tablica 2.1 Razredba parametara upotrebljivanih u regresijskim jednadžbama, prema Graizer i Kalkan (2011.)

PARAMETRI REGRESIJSKIH JEDNADŽBI	
Primarni	Sekundarni
MAGNITUDA	Učinci temelja i ziđa
UDALIENOST	Dubina do površine pukotine
VRSTA RASJEDA	Učinci usmjerenosti rasjeda
KARAKTERISTIKE TLA - PLITKIH SLOJEVA I DUBOKIH SLOJEVA (SEDIMENATA)	Potresni izvori - parametri ravnina rasjeda (kosina i kut nagiba)

Pokrenute su i rasprave koje su aktualizirale pitanje smanjenja primjene sveobuhvatnih metoda regresije za procjenu parametara potresnog gibanja temeljnog tla (Douglas 2003, Douglas 2001, 2002).

Prema Douglasu (2011., 2007., 2003.) mnogo je još otvorenih pitanja, nedoumica i nepoznanica u procjeni potresnog gibanja temeljnog tla. Jedna nepoznanica su podatci o tome, za koja su područja svijeta jaka gibanja temeljnog tla drugačija od gibanja tala u drugim područjima. Podatke sličnih gibanja temeljnih tala iz različitih područja, moguće je ponekad kombinirati kako bi se poboljšala pouzdanost izvedenih atenuacijskih jednadžbi, ali je svakako najbolje upotrebljavati samo podatke iz jednog seizmo-tektonskog područja, ako postoje u dovoljnom broju.

Doprinos rješavanju ovog pitanja dali su Lee i Manić (Lee 1995, Lee i Manić 1994). Oni su, upotrijebivši podatke iz baze (EQINFOS) te iskustava i spoznaja pri razvoju atenuacijskih jednadžbi za skaliranje spektara odziva u Kaliforniji, razvili atenuacijske jednadžbe te ih usporedili s jednadžbama koje je prvotno razvio Manić (Manić 1998a, b). Usporedba je pokazala da se amplitude i frekvencijski sadržaj

jakog gibanja temeljnog tla mijenjaju (s jačinom potresa, udaljenošću hipocentra, geologiji tla itd.) na drugačiji način na sjeverozapadnom Balkanu i u zapadnom dijelu SAD-a (Manić 2003, Lee i Manić 1994, Lee i Trifunac 1993, 1992, Trifunac i dr. 1991).

Prve empirijske atenuacijske jednadžbe za područje Europe izradili su Ambraseys i dr. (Ambraseys i Bommer 1995), a nastankom dodatnih zahtjeva i uočenih mogućnosti poboljšanja izgleda spektralnih amplituda spektara odziva, s vremenom su ažurirane (Ambraseys i dr. 2005, Ambraseys i Bommer 1995). Primarni razlog bio je proširenje do tada obuhvaćenih perioda odziva koji je bio do 2,5 s.

Akkar i Bommer izveli su jednadžbe za skaliranje spektralnih amplituda na bazi najvećeg broja podataka u Europi (Akkar i Bommer 2010). Upotrijebljena su 532 akcelerograma od 131-nog potresa jačine od 5 do 7,6 M_w , zabilježena na udaljenostima do 100 km. Nedostatci ove baze su podatci iz više vrlo različitih seizmo-tektonskih područja (Italije, Turske, Grčke, Islanda, bivše SFRJ i zemalja Bliskog Istoka) te postojanje nejednake pouzdanost podataka koje su Ambraseys i njegovi suradnici primjenjivali za razredbu lokalnog tla u različitim područjima (Bulajić i Lađinović 2014, Manić i Bulajić 2006).

Atenuacijske jednadžbe na bazi najvećeg broja podataka iz samo jednog područja izveli su Binda i dr. (2009.). Upotrijebili su i poboljšali bazu podataka koju su upotrebljavali Sabetta i Pugliese (Sabetta i Pugliese 1996, 1987) za razvijanje atenuacijskih jednadžbi za Italiju. Baza je sadržavala 241 podatak jakog gibanja temeljnog tla od 27 potresa s M_w od 4,8 do 6,9 zabilježenih na 146 mjernih stanica potresa koje su bile na udaljenostima do 200 km.

Sjeverozapadni Balkan jedno je od rijetkih područja za koje postoje podatci o lokalnim uvjetima tla (dubine do stotinjak metara) i dubokim geološkim slojevima (do nekoliko kilometara) za mjerne stanice potresa na kojima su zabilježene stotine zapisa jakog gibanja temeljnog tla. Baza podataka sastoji se od 203 akcelerograma jakog gibanja temeljnog tla od 108 potresa (svaki s tri ortogonalne translatorne komponente), nastalih u razdoblju od 1976. do 1983. na području bivše Jugoslavije (Jordanovski i dr. 1987).

Na temelju akcelerograma zabilježenih na području bivše Jugoslavije Manić (1998.a, b) je razvio atenuacijske jednadžbe za skaliranje vrijednosti vršnih ubrzanja temeljnog tla za područje sjeverozapadnog Balkana. Upotrijebio je 276 horizontalnih komponenata zapisa jakog gibanja temeljnog tla iz EQINFOS baze podataka (Jordanovski i dr. 1987). Nekoliko godina kasnije podatke iz

iste baze upotrijebio je za razvoj atenuacijskih jednadžbi za skaliranje horizontalnih i vertikalnih komponenti pseudobrzine (Manić 2002a, b), što je rezultiralo spektrima koji obuhvaćaju 24 perioda oscilacije u rasponu od 0,04 do 2,0 s.

Novo empirijske jednadžbe za skaliranje različitih spektralnih ordinata vršnih ubrzanja za područje sjeverozapadnog Balkana izradio je Bulajić (2013.). One su razvijene na temelju 203 akcelrograma s područja bivše Jugoslavije.

Procjene jakog gibanja temeljnog tla koje su dobivene iz gotovo svih do sada poznatih atenuacijskih jednadžbi (Douglas 2011) potrebno je oprezno upotrebljavati na područjima koja se nalaze unutar nekoliko km udaljenosti od rasjeda (Trifunac 2016, 2009, Bulajić 2013) jer potres tamo izaziva najveća oštećenja. Blizu rasjeda dominantne frekvencije spektralnih amplituda: ubrzanja tla su od 2 Hz na više, brzine od 0,5 do 2 Hz i pomaka niže od 0,5 Hz (Page i dr. 1975). U tim područjima maksimalno ubrzanja tla ne ovisi o magnitudi i udaljenosti do epicentra na isti način kao za veće udaljenosti, a uslijed nelinearnog odziva tla i velikih deformacija u tlu, učinci lokalnog tla često ne dolaze do izražaja (Trifunac 2016, 2009, Lee i Trifunac 2010).

Osim što najčešće ne postoje podatci o parametrima jakog gibanja tla, zabilježeni vrlo blizu žarišta plitkih i potresa velike magnitude (Douglas 2003, Bulajić 2013), pouzdanost procjene uvjetovana je utjecajem složenog mehanizma rasjeda i načinom širenja pukotina na gibanje temeljnog tla što ukazuje na potrebu za razvoj posebnih jednadžbi skaliranja za područja u blizini rasjeda.

Prema do sada iznesenome atenuacijske jednadžbe moraju se ažurirati svaki put kada nastane značajan broj novih podataka o potresnom gibanju temeljnog tla.

2.2.3. Uloga temeljnog tla u predviđanju potresne opasnosti

Danas je općenito prihvaćeno (Calvi 2019, Trifunac 2016, Boomer 2011) da učinci jakog gibanja temeljnog tla, na izgrađeni okoliš i ostale prirodne potencijale Zemlje, u velikoj mjeri ovise o karakteristikama tla kroz koje prolaze potresni valovi. Tlo kao ishodište potresne opasnosti i ukupnog rizika je izrazito složen medij pa je njegov odziv na potresnu pobudu teško predvidjeti i jednoznačno odrediti. Slojevi tla iznad osnovne stijene različite su debljine, čine ih materijali različite krutosti, čvrstoće, prigušenja i hidrauličkih svojstava, a čest je slučaj da vrlo različitih tipova tla mogu biti raspodijeljeni na malim površinama.

Karakteristike tla koje utječu na potresnu pobudu trebaju odražavati glavne karakteristike proučavanog procesa međudjelovanja tla i potresnih valova, moraju biti relevantne s obzirom na zahtjeve potresnog inženjerstva te međusobno ovisne i usporedive (Douglas 2011, Aptikaev 2006). Razumijevanje utjecaja karakteristika temeljnog tla na potresne valove (Todorovska i Trifunac 2008) od posebne je važnosti za ublažavanje posljedica potresa na postojećim i izbjegavanje istih na konstrukcijama koje će se tek izgraditi (Douglas 2011, 2003). Proces potresnog projektiranja najčešće se temelji na proračunskim spektrima odziva čiji se oblik modelira karakteristikama temeljnog tla kroz postupke skaliranja. Kao najbolji način generiranja podataka o karakteristikama temeljnog tla pokazao se onaj koji za određenu lokaciju prvo definira zone dubljih geoloških slojeva promatrane lokacije, a zatim i zone slojeva lokalnog temeljnog tla (Lee i dr. 2017a,b, c, d, Bulajić i Manić 2016, Lee i dr. 2015).

Prva istraživanja o utjecaju karakteristika temeljnog tla na karakteristike potresnog odziva tla vežu se za Reid-a (1910.) i Duke-a (1958.) koji istražuju učinke temeljnog tla na oštećenja od potresa. Međutim, utjecaj temeljnog tla na potresni odziv zgrada privukao je značajniju pozornost tek 70-ih godina prošlog stoljeća, nakon potresa u Čileu (1960.), Aljasci (1964.), Japanu (1964.), Venezueli (1967.) i Kaliforniji (1971) (Calvi 2019) i provedenih analiza nastalih oštećenja koje su pokazale da su potresna oštećenja nepravilno raspoređena te da konstrukcijski slične zgrade, ali smještene na različitim vrstama tala i/ili geoloških naslaga, mogu doživjeti različite stupnjeve oštećenja (Trifunac 2009, 1990, Duke 1958, Reid 1910). Kao rezultat počinju se razvijati definicije problema, modeli za njihovo oblikovanje i rješavanje te prvi potresni propisi (Calvi 2019).

Geološke karakteristike lokalnih slojeva tla imaju značajnu ulogu u određivanju amplifikacije tla (Trifunac 1979, 1978, 1976, Trifunac i Anderson 1978a, b, Trifunac i Anderson 1977). Način propagacija potresnih valova uvjetovan je veličinom geoloških nehomogenosti, dužinom puta i valnom duljinom koja se povezuje s frekvencijama od interesa u potresnom inženjerstvu (od 0,05 do 50 Hz) (Trifunac 2016, 2012, 1990, Lee 1992, Trifunac i Brady 1975a, b). Plitke naslage koje odlikuje značajno nelinearno ponašanje mogu propustiti potresne valove vrlo širokog frekventnog područja te značajno doprinijeti višim frekvencijama potresa koje imaju izrazito nepovoljan učinak na krute konstrukcije (Lee i Trifunac 2010).

Međutim, ne treba zanemariti druge karakteristike jakog gibanja temeljnog tla, kao što su magnituda i trajanje potresa jer one također doprinose krajnjoj oštećljivosti zgrada. Istraživanja ovisnosti oblika spektralnih amplituda o magnitudi potresa (Trifunac 1979, 1978, Trifunac i Anderson 1978a, b, Trifunac i Anderson 1977, Trifunac i Lee 1978, 1979) pokazala su da uzimanje u obzir više parametra

jakosti potresa smanjuje raspršenost snimljenih zapisa potresa (u odnosu na regresijske modele) i pruža pouzdanije procjene učinaka lokalnog tla (Trifunac 1990).

Sabetta i Pugliese (1996.), modeliraju spektre odziva s obzirom na magnitudu, udaljenost i karakteristike geološke lokacije. Za modeliranje definiraju debljine: plitkog aluvijalnog tla vrijednošću \geq od 20 m i dubokog aluvijalnog tla vrijednošću $>$ od 20 m te brzine posmičnih valova između 400 i 800 m/s.

Rezultati modeliranja pokazali su da je izgled spektara ovisan u najvećoj mjeri o veličini magnitude, a gotovo je neovisan o udaljenosti. Nadalje, uočeno je da do amplifikacije neće doći kod tala koja se sastoje od dubokih naslaga aluvijalnog tla koja imaju niske periode osciliranja. Stjenovito tlo i tlo s dubokim aluvijalnim naslagama imat će iste spektre odziva, a do amplifikacije će doći samo kod tala sastavljenih od plitkih aluvijalnih naslaga. Za duža razdoblja osciliranja najveće vrijednosti spektara odziva imat će tla s dubokim aluvijalnim naslagama. Stjenovita i tla s plitkim aluvijalnim naslagama imat će iste spektre, dok će do pojave amplifikacija doći samo kod tala s dubokim aluvijalnim naslagama.

Trifunac i Brady (1975.) proveli su analizu mogućih utjecaja koje lokalni geološki uvjeti mogu imati na vršne vrijednosti ubrzanja, brzine i pomake. Analiza se temeljila na podacima jakog gibanja tla, koja su zabilježena na mjestima mjernih stanica s poznatim geološkim svojstvima tla. Rezultati su pokazali da je za određeni intenzitet potresa prosječno vršno ubrzanje tla zabilježeno na tvrdoj stijeni veće („za faktor manji od dva“) od prosječnog vršnog ubrzanje na aluvijalnom tlu, da učinci lokalnih slojeva tla na prosječnu vršnu brzinu dovode do neznatno većih vršnih vrijednosti brzine na aluvijalnom tlu te da je vršni pomak veći („za faktor manji od dva“) na aluvijalnom tlu nego na stijeni.

Studija koju su izradili Novikova i Trifunac (1995.) pokazala je da starost stijena i sedimenata ispod mjernih stanica za snimanje akceleroograma također utječe na amplitude i trajanje jakog gibanja tla. Učinci degradacije i/ili gubitaka svojstava stijena i sedimenata djeluju zajedno s ostalim parametrima tla i doprinose ukupnom trajanju jakog gibanja temeljnog tla. Predlažu, starost stijena kao dodatni parametar za opis karakteristika tla u cilju preciznijih predviđanja regresijskih modela.

Uloga karakteristika lokalnih slojeva tla u potresnom odzivu može se tumačiti kroz frekvencijski ovisne promjene oblika spektra odziva (Seed 1976, Seed 1974) ili amplifikacijske promjene potresne uzbude (Zhou 1965, Gutenberg 1957). Oba pristupa temelje se na lokalnim geološkim razredbama (Trifunac i

Brady 1976, Trifunac 1976) i/ili ukupnim dubinama slojeva sedimenata (Trifunac 1980, Trifunac i Lee 1979, 1978).

Za procjene veličina amplifikacije (Zhu i dr. 2018, Zhu i Thambiratnam 2016, Zhu i dr. 2016, Stamati i dr. 2016, Ermert i dr. 2014, Faccioli i Vanini 2003), dinamička svojstva tala uzimaju se u obzir preko srednje brzine širenja posmičnih valova v_s koja ujedno predstavlja i temelj za razredbe tipova temeljnog tla.

HRN EN 1998-1:2011 i brojne druge svjetske norme (AS 2870-2011 (Australija), E.030-2018 (Peru), NBCC (2015.) (Kanada)) obično karakteristike tla opisuju na temelju širenja posmičnih valova u gornjih 30 m tla, međutim neke norme uzimaju u obzir drugačiju referentnu dubinu, npr. za Kinesku normu GB50011- 2010 (2016.) prosječna brzina posmičnog vala proračunava se na dubini manjoj od 20 m (Tablica 2.2) (Zhiquan i dr. 2021, Ji i dr. 2017).

U tablici 2.2 prikazana je usporedba razredbe temeljnog tla i pripadnih prosječnih brzina posmičnih valova, prema HRN EN 1998-1:2011 i Kineskoj normi GB50011- 2010 (2016). Za definiranje tipa tla, HRN EN 1998-1:2011 upotrebljava samo jedan faktor – prosječnu brzinom posmičnog vala. Kineska norma, kod definiranja tipa tla, istodobno uzima u obzir prosječne brzine posmičnih valova i debljine slojeva temeljnog tla mjesta referentnog za definiranje tipa tla.

Lee i Trifunac (2010.) te Lee i dr. (1995.) smatraju da srednja brzina širenja posmičnih valova u gornjih 30 m tla ne smije biti jedini parametar koji se upotrebljava za razredbu tla jer je slaba zamjena za vrijednosti amplifikacije tla.

Vršno ubrzanje na površini temeljnog tla procjenjuje se množenjem vrijednosti PGA (očitanje s karata potresne opasnosti) s faktorom tla S koji ovisi o tipu tla (Tablica 2.2) i o tipu spektra - Tip 1 ili Tip 2 (HRN EN 1998-1:2011). Prema HRN EN 1998-1:2011 on se odabire s obzirom na magnitudu potresa "koja će najviše doprinijeti potresnoj opasnosti", međutim, za različite periode osciliranja to su različiti potresi, čak i za isto područje i isto povratno razdoblje (Bulajić 2013, Bulajić i dr. 2012). Bulajić i dr. (2012.) stoga smatraju da je ovakvo definiranje vršnog ubrzanja površno i nedostatno za pouzdanije predviđanje potresne opasnosti.

Empirijske atenuacijske jednadžbe razvijene sredinom prošlog stoljeće za Kaliforniju na temelju 1482 zapisa ubrzanja temeljnog tla iz potresa u zapadnom dijelu SAD-a, pokazuju da na dubokim

(sedimentnim) slojevima tla dolazi do deamplifikaciju potresnih valova (Lee i Trifunac 2010, Lee 1987, Trifunac 1987).

Predloženi tipovi tla u HRN EN 1998-1:2011, osim tipa A, imaju faktor tla veći od 1 što znači amplifikaciju, a ne deamplifikaciju potresnih valova. Prema rezultatima navedenih studija, faktor tla S u HRN EN 1998-1:2011/NA (HRN EN 1998-1:2011/NA:2011) trebao bi biti manji od 1, odnosno jednak 0,70 (Bulajić 2013, Bulajić i dr. 2012).

Tablica 2.2 Usporedba tipova tla i pripadnih prosječnih brzina posmičnih valova temeljnog tla prema HRN EN 1998-1:2011 i GB50011-2016

TIPOVI TLA HRN EN 1998-1:2011	TIPOVI TLA GB50011-2010 (2016)
<p>$v_{S,30} > 800$ m/s</p> <p>Tip tla A - stijena ili druga geološka formacija poput stijene s najviše 5 m slabijeg materijala na površini</p>	<p>$v_{S,<20} \geq 800$ m/s</p> <p>Stijena - kruta, tvrda i potpuna stijena</p>
<p>$v_{S,30} = 360 - 800$ m/s</p> <p>Tip tla B - nanosi vrlo gustog pijeska, šljunka ili vrlo krute gline, debljine najmanje nekoliko desetaka metara, s postupnim povećanjem mehaničkih svojstava s dubinom</p>	<p>$800 \geq v_{S,<20} > 500$ m/s</p> <p>Kruto tlo ili meka stijena - nehomogena i relativno nehomogena stijena, meka i relativno meka stijena, kompaktno šljunčano tlo</p>
<p>$v_{S,30} = 180 - 360$ m/s</p> <p>Tip tla C - duboki nanosi gustog ili srednje gustog pijeska, šljunka ili krute gline debljine do nekoliko desetaka metara do više stotina metara</p>	<p>$500 \geq v_{S,<20} > 250$ m/s</p> <p>Srednje kruto tlo - drobljeni kamen bilo koje vrste srednje ili guste zbijenosti, jako ili srednje zbijeni šljunak, krupniji ili srednje krupni pijesci, kohezivno tlo i mulj sa $f_{vk} > 150$ kPa, tvrdi les</p>
<p>$v_{S,30} < 180$ m/s</p> <p>Tip tla D - nanosi rahlog do srednje zbijenog nekoherentnog tla (s nešto mekih koherentnih slojeva ili bez njih), ili pretežno meko do koherentno tlo</p>	<p>$250 \geq v_{S,<20} > 150$ m/s</p> <p>Srednje meko tlo - slabo zbijen šljunak, krupniji ili srednje fin pijesak, fini i brašnasti pijesak (isključujući rastresiti pijesak), kohezivno tlo i mulj s $f_{vk} \leq 150$ kPa, zbijeno tlo s $f_{vk} > 130$ kPa, plastični mladi les</p>
<p>$v_{S,30} < 360$ m/s</p> <p>Tip tla E - profil tla koji se sastoji od površinskog aluvijskog sloja s $V_{S,30}$ za tipove C ili D i debljinom između 5 i 20 m ispod kojeg je krući materijal</p>	<p>$v_{S,<20} \leq 150$ m/s</p> <p>Meko tlo - blato i muljevito tlo, rastresiti pijesak, novo sedimentno kohezivno tlo i mulj, ispunjeno tlo s $f_{vk} \leq 130$ kPa, tekući plastični les</p>

U posljednjih nekoliko godina provedena su istraživanja (Bulajić i dr. 2013, Bulajić 2013, Manić 2003) i studije seizmičkog mikrozoniranja na području sjeverozapadnog Balkana (Bulajić i dr. 2018, Lee i dr.

2017a, b, c, d, Lee i dr. 2016a, b, Lee i dr. 2015) koje su pokazale da čak i ako se uzmu u obzir karakteristike lokalnog tla analizirane na dubini većoj od 30 m, empirijska predviđanja atenuacija i amplifikacija potresnih valova rezultirat će nepouzdanim procjenama spektara odziva, ukoliko se ne uzmu u obzir i duboki geološki slojevi promatranog područja (Trifunac 1987).

Duboki geološki slojevi koji se nalaze na dubinama od nekoliko stotina metara do nekoliko kilometara (Trifunac i Brady 1975a, b) snažno utječu na potresne valove sa srednjim i dugim periodima osciliranja (Bulajić 2013, Bulajić i dr. 2012). Amplitude vršnog ubrzanja temeljnog tla s kratkim periodama osciliranja na dubokim geološkim stjenskim lokacijama dobivene u navedenim istraživanjima bile su 30 do 70 % veće u odnosu na amplitude dobivene uzimanjem u obzir samo učinaka lokalnog temeljnog tla (do dubine od nekoliko desetaka metara) (Bulajić i dr. 2018).

Skaliranje spektara odziva atenuacijskim jednadžbama koje uzimaju u obzir samo karakteristike slojeva lokalnog tla, rezultiralo je, za veće udaljenosti od žarišta, potpuni nestanak vršnih spektralnih vrijednosti nastalih od utjecaja karakteristika dubokih geoloških slojeva. Vršne spektralne vrijednosti nastale uslijed utjecaja karakteristika lokalnog tla, potpuno će nestati za bilo koje udaljenosti ako se spektri modeliraju samo s karakteristikama dubokih geoloških slojeva. Karakteristike lokalnih slojeva tla utječu na spektralne amplitude čiji su periodi približno manji od 0,3 s, a duboki geološki slojevi na spektralne amplitude širokog raspona perioda osciliranja (Bulajić 2019, Bulajić 2013, Bulajić i dr. 2012).

Utjecaji karakteristika lokalnog tla i dubokih geoloških slojeva na amplitude u vertikalnom smjeru manje su izraženi.

HRN EN 1998-1:2011 prepoznaje važnost dubokog geološkog okruženja i ukoliko za određenu zemlju ili područje postoje geološki podatci, ostavlja mogućnost uvrštavanja u Nacionalni dodatak sheme razredbe tla koja će uzeti u obzir duboke geološke slojeve tla. Generiranje takvih spektara odziva treba izvesti analizom podataka o jakom gibanju temeljnog tla koji su zabilježeni u istom seizmo-tektonskom području s istim i/ili sličnom karakteristikama dubokih geoloških slojeva i lokalnog temeljnog tla (Bulajić i dr. 2013, Bulajić 2013).

2.3. Izloženost elemenata potresnog rizika

Danas polovica svjetsko stanovništvo živi u urbanim područjima (UN 2020), više od pola tih područja nalazi se u potresnim zonama. Potresi istodobno pogađaju različite kategorije/elemente rizika (zgrade, infrastrukturu, ljude) koji imaju sklonost da uslijed izloženosti potencijalnom potresu budu oštećeni uzrokujući kaos, gubitke života, izravne financijske gubitke na zgradama, komunalnim sustavima i sl. te neizravne gubitke zbog učinaka na društva i gospodarstva.

Izloženost je neophodna determinanta rizika jer ako elementi rizika nisu locirani (izloženi) potencijalnim potresnim opasnostima, ne postoji problem oštetljivosti niti rizika od potresa (Cordona i dr. 2012). Brojni su razlozi (situacije) koje zahtijevaju uporabu koncepta potresne izloženosti (Pavić i dr. 2020a, Giovinazzi 2005), međutim temeljni su (Sandi 1998):

- izloženost je jedan od glavnih čimbenika pri modeliranju potresnih scenarija
- podatci o izloženosti su primarni podatci za kreiranje ljestvica intenziteta
- razredba elemenata rizika temelji se na izloženosti
- izloženost je glavni čimbenik pri procjeni potresnog rizika
- izloženost je temelj za postavljanje strategije smanjenja rizika za zgrade i druge elemente rizika.

U procjenama potresnog rizika komponenta izloženosti pruža informacije o elementima rizika (Dolce i dr. 2021, Pavić i dr. 2020a, Pavić i dr. 2019b, Pavić i dr. 2019a, Hadzima-Nyarko i dr. 2018, Pittore i dr. 2018, Maluranda i dr. 2013, Coburn i dr. 1994, Algermissen 1989, Sandi 1998): ljudima, imovini (fondu stambenih i poslovnih zgrada, industrijskim objektima, infrastrukturi i dr.), gospodarskim, kulturnim i socijalnim aktivnostima koji su izloženi potresnoj aktivnosti i kao takvi podložni gubitku.

Izloženosti riziku su višedimenzionalne (Cardona i dr. 2012), a određuju ih količine i karakteristike materijalnih i prirodnih dobara te ljudi u određenom vremenu i na određenom prostoru izloženih potencijalnoj potresnoj opasnosti. Gubitci izloženih materijalnih i prirodnih dobara ograničeni su njihovom količinom i vrijednošću, a ljudski gubitci ograničeni su trenutnim brojem ljudi na mjestu potresne aktivnosti. Slijedom navedenog izloženost elemenata rizika može se definirati kao stupanj do kojeg su elementi rizika izloženi potresnoj opasnosti (Hadzima-Nyarko i dr. 2018, UN 2016, UNDRR 2015, UNISDR 2009).

Prema Algermissenu (1989.), izloženost je za modeliranje, na mnogo načina, najteži element procjene potresnog rizika. Jedan od razloga je taj što karakterizacija izloženosti zahtijeva identifikaciju pojedinačnih komponenata rizika (Marulanda i dr. 2013), a veliki problem za rješavanje ovog izazova predstavljaju nedostatni podatci o elementima rizika, osobito o zgradama. Moguće ih je generirati, ali postupak je ovisan o količini raspoloživih resursa za procjenu rizika koji su često nedostatni. Nadalje, nisu precizno definirane karakteristike zgrada ključne za procjenu oštetljivosti (Stone 2017), što uzrokuje nedoumice kod pregleda zgrada na terenu i izrada modela izloženosti. Osim toga, nije dovoljno proučen i definiran odnos između izloženosti i oštetljivosti (Stone 2017) te utvrđeno razgraničenje između njih.

Iako oštetljivost i izloženost treba tretirati odvojeno, u svakoj praktičnoj primjeni one su međusobno snažno povezane (Pittore i dr. 2020). Model izloženosti, npr. opisuje broj zgrada koje pripadaju u definirane tipologije određenog područja, međutim tipologije ne pružaju samo opis glavnih obilježja zgrada koje predstavljaju nego čine i poveznicu sa specifičnim modelom oštetljivosti.

Analiza potresne izloženosti zgrada sastoji se od nekoliko međusobno ovisnih (Giovinazzi 2005) koraka (Pavić i dr. 2020a): prikupljanju podataka o zgradama, obradi i pohrani istih, određivanju kriterija razredbe te izradi inventara – baze podataka o zgradama. Proces modeliranja izloženosti određen je s nekoliko važnih smjernica: usredotočiti se na karakteristike bitne za modeliranje potresne izloženosti zgrada, upotrijebiti ne dostupne, nego provjerene i pouzdane podatke te omogućiti (kako nastaju) zamjenu postojećih podataka kvalitetnijim i podacima veće razlučivosti.

2.3.1. Temelj za modeliranje izloženosti - podatci o zgradama

Iz velikih povijesnih potresa vidljivo je da oštetljivost građevina tijekom potresa kontrolira težinu ukupnih gubitaka. Doprinosi građevinskog fonda, njegova relativna oštetljivost i distribucija, kao vitalne komponente (Cardona i dr. 2012, Jaiswal i dr. 2009) za određivanje opsega gubitaka tijekom potresa, karakteriziraju se i kvantificiraju podacima o najkritičnijim obilježjima – karakteristikama zgrada u smislu očekivanog potresnog ponašanja. Brojniji i precizniji podatci o zgradama podrazumijevaju pouzdanije rezultate procjene oštetljivosti (Kohrangi i dr. 2021), a njihovo kombiniranje i primjena u proračunima s podacima o ostalim elementima izloženosti znače i pouzdanije procjene potresnog rizika.

Iako godina izgradnje, katnost, oblik tlocrta, položaj u prostoru, kao i neke druge nekonstrukcijske karakteristike imaju značajnu ulogu u potresnoj otpornosti zgrada te su kao takve nužne za procjene oštećljivosti i rizika, konstrukcijske karakteristike su, prema Jaiswalu i dr. (2009.), važniji od bilo koje druge varijable u modelu oštećljivosti.

Kroz faze prikupljanja podataka može se primijetiti i bilježiti veliki broj karakteristika zgrada, međutim to ne znači da su odabrane one koje će u potpunosti obuhvatiti svojstva promatranog fonda zgrada.

Kvalitetu podataka o izloženosti zgrada ali i procjene mogućeg utjecaja potresa na zgrade povećat će podatci (Pittore i dr. 2018, Yepes-Estrada i dr. 2017, Jaiswal i dr. 2010) koji se odnose na poznavanje: inženjerskih propisa usvojenih tijekom izgradnje, izvršenih rekonstrukcija i/ili pojačanja, učinkovitosti konstrukcijskih sustava zgrada u prošlim potresima te mjesta i načina distribucije nastalih oštećenja. Standardni inženjerski pristupi modeliranja oštećljivosti izgrađenog okoliša zahtijevaju poznavanje karakteristika i brojnosti modeliranjem obuhvaćenog fonda zgrada (Jaiswal i dr. 2008, Algermissen 1989). Zato je prikupljanje podataka o zgradama, iako vjerojatno najskuplji i najdugotrajniji dio istraživanja, vitalan dio (Dunbar i dr. 2003) svake procjene potresnog rizika.

Podatci o zgradama često ne postoje, nepotpuni su ili ako postoje, teško su dostupni (Jaiswal i dr. 2008, Algermissen 1989). Za njihovo prikupljanje upotrebljavaju se različiti načini i metode koje, uglavnom ovisno o količini utrošenog vremena i financijskih sredstava, daju podatke različitih razina valjanosti i pouzdanosti. Danas se najčešće podatci o zgradama „zaključuju“ (Gamba i Herold 2009) na temelju daljinskih snimki izgrađenih područja ili iz globalnih skupova informacija o stanovništvu i zgradama. Globalnih skupovi informacija mogu biti generirani iz tzv. sekundarnih izvora (Cardona i dr. 2012) npr. katastra, popisa stanovništva i sl. ili se mogu izvesti iz pojednostavljenih postupaka temeljenih na općim makroekonomskim i društvenim informacijama kao što su građevinske statistike (o namjeni, konstrukcijskom sustavu, glavnom materijalu izvedbe i sl.) ili gustoća naseljenosti.

Među istraživačima potresnog rizika uvriježen je stav da je najjednostavniji način (Stone 2017) prikupljanja informacija o zgradama upotreba podataka iz postojećih izvora podataka (najčešće iz već spomenutih popisa stanovništva ili katastra ali i iz različitih znanstvenih i dr. istraživanja). Upitna je pouzdanost i dostatnost ovako generiranih podataka kako bi se proizvele kvalitetne informacije o izloženosti potrebne za primjene u procjenama potresnog rizika. Naime, konstrukcijska oštećljivost i procjena potresnog rizika nisu središnji ciljevi prikupljanja podataka ovih izvora pa oni ne pružaju

izravan uvid (Dell'Acqua i dr. 2012, Gamba i dr. 2012) u potrebne karakteristike zgrada kojima bi se moglo modelirati njihovo potencijalno ponašanje i otpornost na potresnu uzbuđu.

Jedini pokazatelji koji karakteriziraju zgradu iz postojećih popisnih podataka su starost, vanjske najčešće geometrijske karakteristike zgrade i gustoća naseljenosti. Zato se često predlaže (Dell'Acqua i dr. 2012) identifikacija i upotreba pomoćnih – detaljnih skupova podataka (materijal izvedbe, konstrukcijski, stropni, krovni sustav i dr.) koji bi poboljšali i ubrzali procjenu oštetljivosti zgrada. Unatoč njihovom značaju za procjenu, prikupljanje detaljnih podataka rijetko je uključeno u tradicionalno uspostavljene procese modeliranja izloženosti.

Brojni istraživači izloženosti ističu uspješnost upotrebe (Kumar i dr. 2021, Daranagama i dr. 2021, Ploeger i dr. 2016, Erlich i dr. 2013, Wieland i dr. 2012, Taubenböck i dr. 2006, Saito i dr. 2004) zračnih/satelitskih snimki za modeliranje izloženosti, međutim postoji niz ključnih problema s podacima prikupljenim na ovaj način. Tehnikama koje se temelje na obradi slike moguće je prikupljanje samo prostornih karakteristika zgrada (oblik zgrade, položaj i visina), ali im je slaba sposobnost prepoznavanja karakteristika koje su ključne za procjenu oštetljivosti (konstrukcijski sustav, građevinski materijal ili starost zgrade) jer se one ne mogu jednostavno niti pouzdano definirati na temelju snimki.

Na slici 2.7 prikazana je zračna snimka naselja (Omarzadeh i dr. 2021). Slika 2.7a) prikazuje segmentacijski prikaz objekata - objektima je dodijeljena smisljena struktura - odvojeni su od podloge i međusobno razdvojeni odnosno određeni su prostorno.



a) segmentacijski prikaz objekata

b) razvrstani objekti sa slike a) s definiranim oblikom

c) stvarne karakteristike objekata snimljenog naselja

Slika 2.7 Prikupljanje podataka o zgradama na temelju zračnih snimki (Omarzadeh i dr.2021)

Isti objekti na slici 2.7b) razvrstani su i definirani im je oblik. Upitna je mogućnost da se ostale karakteristike prikazanih objekata pouzdano dodijele promatranim objektima na temelju slika 2.7a) i 2.7b). Dokaz upitnosti potvrđen je prikazom stvarnih karakteristika objekata snimljenog naselja na slici 2.7c).

Zbog brzine i velike količine podataka, prikupljanje podataka o zgradama na temelju zračnih/satelitskih snimki sve se više nameće kao primaran postupak. Istražuju se moguća unaprjeđenja u smislu tehnika za izdvajanje obrisa zgrada iz velike rezolucije optičkih satelitskih snimki (Kumar i dr. 2021, Erlich i dr. 2013, Taubenböck i dr. 2006, Saito i dr. 2004) i mogućnosti kombiniranja više izvora slike (Daranagama i dr. 2021, Ploeger i dr. 2016, Wieland i dr. 2012) kako bi se povećala pouzdanost generiranih podataka

Snimke izgrađenih područja mogu biti koristan alat za prikupljanje podataka o zgradama kada se kombiniraju s dodatnim tehnikama i podacima (Tocci i dr. 2021, Dell'Acqua i dr. 2012, Gamba i dr. 2012). Kako bi se okarakterizirala sva bitna svojstva zgrada (u smislu potresne otpornosti) te potpunost, za obradu ovih grubih skupova podataka potrebni su značajni naponi i vrijeme. Osim toga, javni izvori podataka koji bi trebali poslužiti kao podrška za njihovo generiranje su nepotpuni, raspršeni među institucijama i često sastavljeni u različitim formatima podataka.

Generiranje konstrukcijskih informacija može se riješiti terenskim istraživanjem ili analizom projektne dokumentacije. Popisivanje karakteristika zgrada pregledom na licu mjesta može pružiti vrijedne i kvalitetne informacije za procjene gubitaka i općenito su tako generirani podatci najcjelovitiji izvor za razredbu oštećljivosti (Tocchi i dr. 2021). Unatoč neupitnoj važnosti i pouzdanosti ovako prikupljenih podataka, generiranje podataka na licu mjesta je rijedak način i upotrebljavan uglavnom kada se opisuje fond zgrada ograničenog područja, gradova (Pavić i dr. 2019b, Pavić i dr. 2019a), manjih naselja (Hadzima-Nyarko i dr. 2020a), blokova zgrada (Hadzima-Nyarko i dr. 2020b, Hadzima-Nyarko i dr. 2018, Galista i Hadzima-Nyarko 2015) ili specifičnih tipova zgrada (Ademović i dr. 2020, Pavić i dr. 2019b, Pavić i dr. 2019a, Hadzima-Nyarko i dr. 2017, Hadzima-Nyarko i dr. 2016). U pravilu, prikupljanje podataka na ovaj način je ogroman zadatak (Torres i dr. 2019) jer zahtijeva značajno vrijeme i resurse za istraživanje u smislu priprema i provedbe terenskog istraživanja (Pavić i dr. 2020a), proračuna i obrade prikupljenih podataka, upravljanja brojnim bazama podataka (arhiva, katastar, državne institucije) za rješavanje nesigurnosti s terena i sl. Ovakva vrsta prikupljanja podataka danas se najčešće provodi nakon inicijativa za procjene uporabljivosti zgrada nakon potresa.

Razvoj i provedba mjera za smanjenje fizičkog utjecaja potresa na ljudske i ekonomske gubitke zahtijevaju razumijevanje potencijala pojedinačnih i skupnih utjecaja karakteristika zgrada (Yepes-Estrada i dr. 2017, Cardona i dr 2012) na oštetljivost.

2.3.2. Modeli izloženosti zgrada

Više od 75 % (Coburn i Spence, 2002) ljudskih žrtava povezanih s potresom uzrokovano je rušenjem zgrada i drugih građevina. Zato je temeljni korak (Jaiswal i dr. 2009) u procjeni rizika od potresa razvoj modela izloženosti zgrada kako bi se mogla procijeniti moguća oštetljivost te poduzeti postupci za njezino smanjenje ili prevenciju.

Za razvoj modela izloženosti mogu poslužiti globalni izvori podataka o zgradama koji općenito nisu prilagođeni (Dell'Acqua i dr. 2012) za procjenu ili ublažavanje gubitaka od potresa, ali mogu predstavljati baze na temelju kojih se mogu dalje izgrađivati modeli izloženosti. Neki od postojećih globalnih izvora podataka o zgradama ukratko su opisani u nastavku.

Baza podataka Svjetske stambene enciklopedije (engl. *World Housing Encyclopedia*, WHE) koju je razvio EERI (SAD) sadržava podatke o 110 konstrukcijskih tipova stambenih zgrada iz 37 zemalja (EERI 2007). Podatci o zgradama nastali su tijekom popisa stanovništva i stanova pojedinih zemalja (UN 2005) i dostupni su za javnu upotrebu.

Na temelju popisa stanovništva za 197 zemalja, agencija Ujedinjenih naroda koja se bavi statističkim podacima, sastavila je bazu podataka o stambenim i nestambenim zgradama (UN 1993).

Prikupljanje podataka UN-HABITAT-a o trajnom stanovanju (UN-HABITAT 2007) rezultiralo je podacima o stambenim zgradama, za 44 zemlje. Za popisane zgrade provedena je razredba koja se temelji na materijalu izvedbe nosivog zida (drvo, beton, opeka, kamen i dr.).

Inicijativa Europske komisije EUROSTAT (engl. *European Statistical Office*) izvor je podataka o zgradama za sve zemlje Europske unije. Na temelju podataka iz ovog izvora mogu se generirati uglavnom informacije u smislu jednoobiteljska (kuća) ili višeobiteljska stambena jedinica (zgrada). Za neke zemlje dostupni su podatci o prevladavajućim materijalima nosivog zida ili godini izgradnje (Hrvatska, Moldavija). Popisi s detaljnim informacijama o broju i karakteristikama zgrada izrađeni su za Italiju, Tursku, Portugal i Grčku, a za neke zemlje poput Rumunjske podatci su razvrstani u različite

razrede prema godini izgradnje, visini, građevinskom materijalu i sl., pri čemu je svaka kategorija kvantitativno određena (EUROSTAT).

Kao temelj za razvoj modela izloženosti moguće je upotrebljavati i baze podataka o zgradama koje za pojedine zemlje ili područja sastavljaju različite agencije (državne, financijske, osiguravajuće i sl.), međutim one su razvijene s različitim stupnjevima relevantnosti (Jaiswal i dr. 2008) koji se mogu odnositi na ograničenu pokrivenost u smislu zemljopisnog položaja ili primjenjivost za specifične, često ograničene vrste građevina.

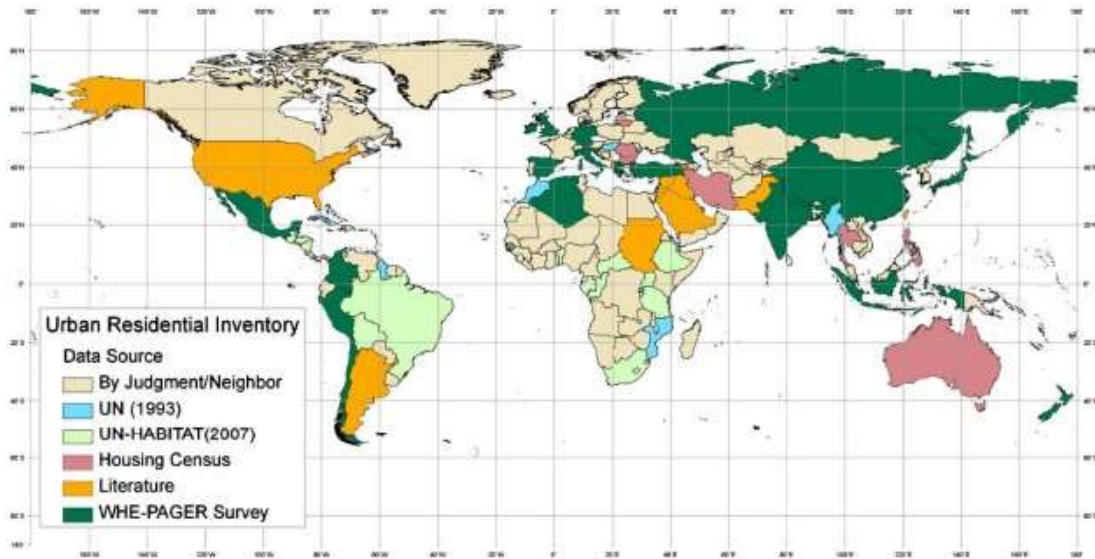
Podatci o zgradama mogu se izdvojiti i iz pojedinačnih istraživačkih studija (Cardona i dr. 2012) specifičnih za države ili regije, koji često sadržavaju i podatke sastavljene nakon potresa za procjene materijalnih i ljudskih gubitaka.

Izazov koji se javlja vezan uz većinu ovih izvora podataka o zgradama je taj što nisu lako dostupni ili nisu uopće dostupni za upotrebu zbog svoje vlasničke prirode (Dell'Acqua i dr. 2012). Agencija Ruske Federacije Emercom je npr. izradila globalnu bazu podataka o zgradama (Shakhramanian i dr. 2000) u kojoj se građevinski fond karakterizira prema potresnoj otpornosti, ali podatci nisu dostupni za javnu upotrebu.

Zbog nepostojanja (Jaiswal i dr. 2010, Jaiswal 2008) globalne, javne, otvorene baza podataka o brojnosti, karakteristikama, uporabi i zauzetosti zgrada, tim PAGER (engl. *Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response*) Američkog geološkog zavoda (engl. *United States Geological Survey, USGS*) izradio je procjenu statističke distribucije zgrada upotrebljavajući taksonomiju globalnih tipova zgrada. Za više od 35 zemalja svijeta, zgrade su kvantificirane i kategorizirane prema materijalu, otpornosti konstrukcijskog sustava na bočnu silu i tipu zauzetosti (Jaiswal i dr.2010). Distribucija varira između urbanih i ruralnih sredina te između stambene i nestambene namjene (Jaiswal i Wald 2008). Utemeljena je na postojećim globalnim skupovima podataka i objavljenj literaturi (istraživački članci, izvješća), koji daju podatke o građevinskom fondu za pojedine zemlje. Razina pouzdanosti i dostupnosti konstrukcijskih i inventarnih informacija pojedinih zemalja određuju kvalitetu (Gamba i dr. 2012) pojedinih profila distribucije.

Na slici 2.8 prikazana je globalna pokrivenost PAGER baze podataka o zgradama te različiti izvori podataka koji su poslužili za izradu baze.

Projekt modeliranja rizika HAZUS-MH (engl. *Hazards United States-Multi Hazard*) (FEMA 2012) sadrži, slobodno dostupnu i dobro dokumentiranu, globalnu bazu zgrada za Sjedinjene Američke Države. Tipovi zgrada prema HAZUS taksonomiji određeni su konstrukcijski visinom zgrade odnosno brojem katova, četiri definirane razine propisanog potresnog proračuna i kvalitetom gradnje te razvrstani na 36 tipova zgrada.

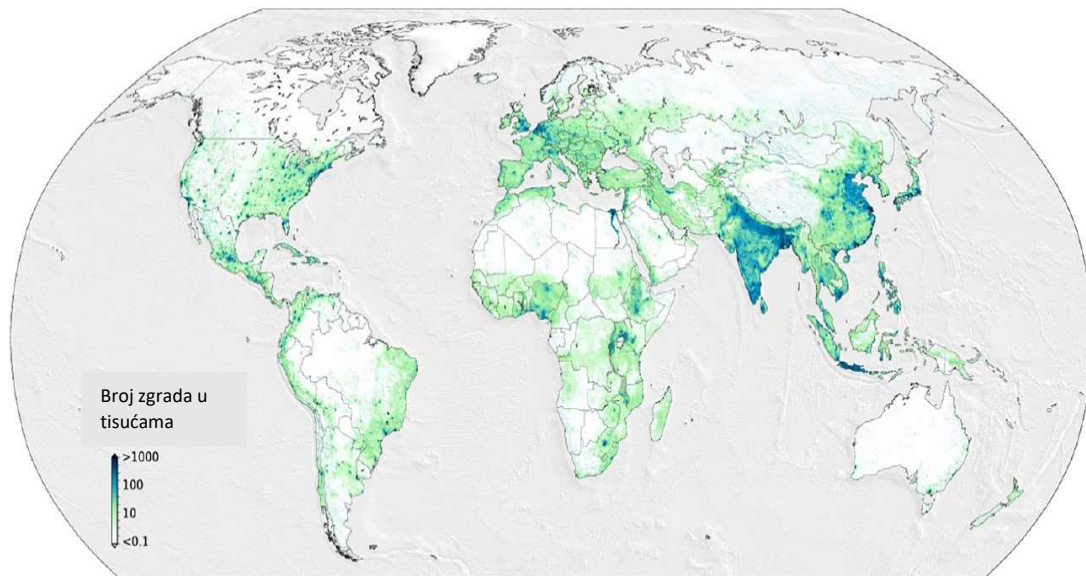


Slika 2.8 PAGER baza podataka o zgradama i izvori podataka (Jaiswal i dr. 2010)

Metodologija HAZUS-a za stvaranje baze podataka o građevinskom fondu je složena (Dell'Acqua i dr. 2012, Jaiswal i dr. 2010) jer uključuje upotrebu popisa stanovništva, gospodarskih i ekonomskih podataka. Prva HAZUS razredba zgrada sadržavala je 28 specifičnih razreda stambenih, komercijalnih, industrijskih i drugih zgrada, a kasnije je proširena na 33 razreda.

Zaklada GEM (engl. *Global Earthquake Model*, GEM) izradila je globalnu bazu izloženosti - GED (engl. *Global Exposure Database*) stambenih zgrada i stanovništva (Brzev i dr. 2012) s namjerom da posluži za modeliranje potresnog rizika i procjena gubitaka od potresa. Model sadržava 1,3 milijarde stambenih, 90,9 milijuna komercijalnih, i 35,5 milijuna industrijskih zgrada (Silva i dr. 2018, 2019, 2020, Gamba 2014, Gamba i dr. 2014). Podatci su dostupni za tri različite geografske razradbe (nacionalnu i dvije administrativne), a zgrada su opisane s 13 glavnih karakteristika (Brzev i dr. 2013, Brzev i dr. 2012). GED baza podataka (2015) je javno dostupna putem OpenQuake platforme (OpenQuake). Distribucija zgrada iz GED modela izloženosti prikazana je na slici 2.9.

Globalne baze podataka o zgradama brzo se razvijaju u cijelom svijetu, tijekom proteklog desetljeća osim za Sjedinjene Američke Države (FEMA 2012) izrađeni su za Australiju (Dunford i Power 2014, Nadimpalli i dr. 2002), Novi Zeland (Schmidt i dr. 2011, King i Bell 2006, Bell i King 2006), središnju Aziju (Wyss i dr. 2012), Južnu Ameriku (Yepes-Estrada i dr. 2017).



Slika 2.9 Distribucija zgrada iz GED modela izloženosti (Silva i dr. 2020)

Motivacija za izradu globalnih modela izloženosti nastaje iz praktične potrebe da se okarakterizira distribucija građevinskog fonda i procijeni njegova oštetljivost od potresa (Jaiswald i dr. 2010, Jaiswald i Wald 2008), međutim način generiranja podataka dovodi u pitanje njihovu pouzdanost (Dell'Acqua i dr. 2012) kao i subjektivnost prosudbe uključene u procese prepoznavanja i tumačenja karakteristika zgrada te nedovoljno poznavanja građevinske prakse u određenoj regiji ili u određenom vremenskom okviru.

Osim toga, Tyagunov i dr. (2004.) ukazuju na potrebu da se prilikom provođenja procjena oštetljivosti koje se temelje na modelima izloženosti izrađenim uz upotrebu vizualnih procedura, uzmu u obzir vjerojatne nesigurnosti u potresnim svojstvima zgrada. Ove nesigurnosti trebaju obuhvatiti karakteristike koji utječu na potresnu oštetljivost, ali ih nije moguće generirati na temelju zračnih snimki (kvaliteta izvedbe, geometrijska pravilnost po visini, lokalni uvjeti tla, stanje očuvanosti zgrada, projektna otpornost na potrese i sl.).

Globalne baze podataka zgrada mogu se usvojiti za procjene potresnog rizika velikih razmjera, međutim, kada se radi o nacionalnoj ili regionalnoj procjeni rizika, karakterizacija oštetljivosti i izloženosti može se poboljšati (Tocchi i dr. 2021), omogućujući opis karakteristika građevnog fonda i zemljopisne distribucije koja više odražava stvarno stanje područja koje se istražuje. Procjene potresnog rizika koje daju globalni model izloženosti grube su procjene koje ne zamjenjuju postojeće nacionalne ili regionalne procjene, ali mogu poslužiti kao temelj za razvoj i/ili kalibriranje lokalnih modela izloženosti i procjena rizika.

Prepoznavanje važnosti detaljnijih i pouzdanih informacija o elementima izloženosti potaklo je uglavnom rijetke istraživače izloženosti na razvoj modela izloženosti koji se temelje na terenskom ispitivanju pojedinačnih zgrada.

Baza podataka zgrada djelomično nastala terenskim ispitivanjem pojedinih zgrada postoji za grad Istanbul (Turska). Izrađena je terenskim popisivanjem podataka uz upotrebu modificiranog oblika FEMA (ATC 2002) metodologije i instrumenata za brzi vizualni pregled (Yakut i dr. 2012, Yakut 2004).

Istraživači potresnog rizika s Građevinskog i arhitektonskog fakultetu Osijek, u sklopu projekta „Potresni rizik urbanih područja“ (engl. *"Earthquake risk of urban areas"*) od 2016. izrađuju bazu podataka zgrada grada Osijeka pojedinačnim pregledima zgrada na licu mjesta.

Iako se pretpostavlja da je zbog manjeg prostora i broja zgrada na nacionalnoj, gradskoj ili lokalnoj razini kvantifikacija i karakterizacija fonda zgrada lakše provediva javljaju se različita ograničenja (Dell'Acqua i dr. 2012) prvenstveno s obzirom na dostupnost materijalnih i tehnoloških resursa kada je u pitanju prikupljanje podataka na daljinu te organizacijskih i kadrovskih izazova kada je u pitanju prikupljanje podataka na licu mjesta. Postoje i dodatne složenosti kod oblikovanja prikupljenih podataka na daljinu zbog ograničene dostupnosti projekata te kod prikupljanja podataka na terenu zbog ograničenog pristupa/ulaska u unutrašnjost zgrade te subjektivnosti u tumačenju karakteristika zgrada.

Zbog ovih problema i praktičnih izazova, brojna se modeliranja gubitaka oslanjaju na globalne strategije procjene izloženosti upotrebljavajući pridružene statističke podatke o građevinskim fondovima i modele konstrukcijske oštetljivosti temeljene na uobičajenim obrascima potresnog ponašanja zgrada (Crowley i dr. 2020, Brzev i dr. 2013, Dell'Acqua i dr. 2012, Gamba i dr. 2012, Jaiswal

i dr. 2010). Na ovaj način nastoje se ponuditi rješenja za izazove procjene gubitaka, međutim upitna je relevantnost i pouzdanost ovakvog rješenja ne samo na lokalnoj nego i na globalnoj razini.

Čak i kada nisu izložene katastrofalnim događajima te kada su projektirane i građene po propisima, zgrade se oštećuju i ruše zbog različitih razloga: loše izvedbe, slabe kvalitete materijala, starenja materijala u njima i sl. što se uočava tek nakon nastale štete. Postojanje modela izloženosti zgrada može poslužiti za predviđanje i/ili izbjegavanje ovakvih scenarija, a presudni su i za utvrđivanje smjernica i prioriteta u dugoročnoj strategiji prevencije i ublažavanje gubitaka uzrokovanih katastrofalnim događajima na koje ne možemo utjecati.

Modeli izloženosti zgrada izuzetno su važni jer ne samo da olakšavaju i ubrzavaju procjene mogućih oštećenja ili rušenja zgrada, nego pomažu u razumijevanju utjecaja zgrada i ostalih građevina na živote ljudi u prirodnim katastrofama. Unatoč njihovoj važnosti i korisnosti, prikupljanja podataka koji kvantitativno i kvalitativno opisuju zgrade rijetko su uključena kao dio sustavno uspostavljenih procesa prikupljanja podataka.

2.3.3. Tipologije zgrada i taksonomija

Kvantitativno i kvalitativno opisivanje zgrada u smislu konstrukcijskih karakteristika, prostornog smještaja ili zauzetosti složen je postupak zbog postojanja široke varijabilnosti zgrada i njihovih karakteristika. Za potrebe procjene oštetljivosti u modelima izloženosti zgrade se razvrstavaju u tipološke razrede – tipologije, na temelju sličnih konstrukcijskih i dr. karakteristika, uz pretpostavku da će zgrade sličnih konstrukcijskih karakteristika imati slično potresno ponašanje.

Gotovo nužno ovaj postupak uključuje sumnje i izazove koji se mogu uspješno riješiti samo sustavno razrađenom i dobro organiziranom metodologijom razredbe zgrada. Između ostalog, metodologija podrazumijeva i definiranje pravila čija primjena rezultira usvajanjem konstrukcijskih tipologija.

GEM predlaže sljedeća pravila za generiranje tipologija zgrada:

1. vidjeti razlike u karakteristikama potresne otpornosti zgrada odnosno razlikovati:

- zgrade otporne na potrese
- varijante zgrada otpornih na potrese
- stanje zgrada prije potresne rekonstrukcije

- stanje zgrada nakon potresne rekonstrukcije
 - duktilne konstrukcije
 - neduktilne konstrukcije
2. prepoznati karakteristike koje definiraju određeni razred zgrada kako bi se razvrstale u valjan razred
 3. u potpunosti integrirati sve inženjerske karakteristike relevantne za ukupnu potresnu otpornost zgrade kako bi se obuhvatila sva svojstva otpornosti na potres i karakteristike gubitaka za cijelu zgradu, uključujući konstrukcijske i nekonstrukcijske elemente
 4. kako bi se osigurala jednostavnost razredbe usvojiti što manje tipologija, a da se pritom zadovoljavaju drugi zahtjevi, posebno sposobnost kombiniranja grupa tipologija, uz zadržavanje dovoljnog broja rezultirajućih kombinacija za razlikovanje razlika u potresnim odzivima
 5. uključiti u razredbene skupine (koliko je to moguće) gotovo svaki konstrukcijski sustav
 6. upoznati inženjere i arhitekte sa sustavom razredbe (kako bi mogli lako i točno identificirati karakteristike zgrada) te s nomenklaturom koju treba definirati kako bi se izbjegle nejasnoće
 7. građevine poput brana, mostova i tunela u budućnosti uključiti u tipologije
 8. osigurati primjenjivost na druge prirodne opasnosti (poplave, uragani i vulkanske erupcije) i prilagodljivost različitih zajednica s obzirom na te opasnosti
 9. postići razumljivost, intuitivnost i jednostavnost upotrebe od strane onih koji prikupljaju podatke, od strane onih koji organiziraju njihovu analizu i krajnjih korisnika
 10. osigurati međunarodna primjenjivost u bilo kojoj regiji svijeta.

Tipologije pojedine karakteristike, zgrada moraju obuhvatiti na ujednačen način, kako bi se mogla provesti jednoznačna razredba istih (Pavić i dr. 2020a). One su temeljni deskriptori modela izloženosti izvedeni iz podataka svakog od njih. Starost, konstrukcijska, geometrijska i svojstva materijala, stanje tla i detalji temelja, razina primjene potresnih propisa gradnje itd. su uobičajeni parametri tipologije (Pitilakis i dr. 2013).

Taksonomija predstavlja razredbu koja sadržava definirane tipove sličnih zgrada - tipologije, grupirane na temelju usporedivih potresnih odziva. Svaka taksonomija mora omogućiti razvrstavanje zgrada u razrede, sukladno s bar osnovnim karakteristikama za pretpostavljeni razred taksonomije na koji se odnos (Pavić i dr. 2020a, Hadzima-Nyarko i dr. 2018a, Stone 2017).

Stručnom prosudbom i smjernicama iz recenziranih publikacija (Crowley i dr. 2020), na temelju kombinacije mjerodavnih podataka (iz statistika, popisa, snimki ili prikupljenih podataka na terenu) iz modela izloženosti, razvija se taksonomija koja dodjeljuje svakoj zgradi (Pittore i dr. 2018) jednu od unaprijed definiranih tipologija.

Taksonomije mogu imati ograničen geografski opseg i stoga se možda neće lako primijeniti na područja za koja nisu izrađene (Tocchi i dr. 2021, Jaiswal i dr. 2010). Naime, distribucija tipologija zgrada može se uvelike razlikovati za različita područja ili zemlje, a širenje tipologije jedne zgrade, a ne druge, može ovisiti o dostupnosti građevinskih materijala na tom području, razvoju tehnika i propisa gradnje koji su bili na snazi u vrijeme gradnje i sl. (Tocchi i dr. 2021, Pittore i dr.2018).

Razvijeno je nekoliko modela izloženosti koji predlažu pravila dodjele tipologija koje su kalibrirane na temelju karakteristika zgrada dostupnih iz podataka istraživanja oštećenja nakon potresa. Međutim, ovaj pristup ima nedostatak jer se temelji na podacima iz određenog geografskog područja (Tocchi i dr. 2021, Pittore i dr.2018) (pogođenog potresom) i što kao takvi nisu sposobni obuhvatiti sve karakteristike zgrada potrebne za generiranje tipologije primjenjive za šira područja.

Počeci razvoja modeliranja izloženosti zgrada (Brzev i dr. 2013) vežu se za 1666. i grad London koga je te godine zahvatio „Veliki požar“ (engl. „*Great Fire*“). Utvrđivanje šteta i donešen Zakon o obnovi koji je imao je za cilj iskorijeniti rizike koji su pomogli katastrofalnim razmjerima požara, zahtijevao je popis inventara zgrada, što je rezultiralo razvojem i izradom prve razredbe zgrada i taksonomije.

Za procjene potresnog rizika velikih razmjera, kako bi se model oštetljivosti nedvosmisleno dodijelio pojedinim tipologijama zgrada, obično se razvijaju i upotrebljavaju specifične globalne taksonomije orijentirane na rizik.

2.3.4. Globalne taksonomije

Temeljom za oblikovanje i razvoj drugih taksonomija u svijetu (Pittore i dr. 2018), smatra se HAZUS taksonomija (FEMA 2012, Kircher i dr. 2006), jer je relativno jednostavno koncipirana (Aguirre i dr. 2018). Zasnovana je na razredbenom sustavu FEMA (Graber i dr. 1999, Barthel i dr. 1998). U ovoj taksonomiji zgrade su razvrstane prema namjeni (zauzetosti) u 7 općih i 28 specifičnih razreda te konstrukcijskom sustavu (6 razreda) koji se smatra ključnim čimbenikom u ocjenjivanju ukupne oštetljivosti zgrade.

HAZUS taksonomija definira ukupno 132 konstrukcijske tipologije jer se na osnovnu konstrukcijsku razredu primjenjuju podrazredbe s obzirom na građevinski materijal, broj katova (niske zgrade (do 3 kata), srednje visoke zgrade (4 do 7 katova) i visoke zgrade (do 20 katova) prema smjernicama NEHRP (FEMA 2012, 2014) i 4 razine usklađenosti s potresnim projektiranjem (prije potresnih normi, mala, srednja, velika). Fokusrana je na područje SAD-a (Aguirre i dr. 2018, Gulati 2006) zbog čega neke njezine pretpostavke nisu u potpunosti primjenjive na široj svjetskoj razini. Unatoč tome, upotrebljava se u cijelom svijetu sa ili bez lokalnih prilagodbi (npr. u Kanadi (Nastev 2014), Indiji (Gulati 2006), Venezueli (Bendito i dr. 2014)).

Najcjelovitija razredba zgrada orijentirana na rizik razvijena za globalnu razinu je PAGER-STR taksonomija (Jaiswal i dr. 2010, Wald i dr. 2010, Earle i dr. 2009), nastala iz nekoliko postojećih taksonomija FEMA (ATC-14, FEMA 154), WHE i EMS – 98, njihovim spajanjem, usklađivanjem postojećih tipologija te dodavanjem novih, kako bi se uspio obuhvatiti i opisati globalni fond zgrada (Jaiswal i dr. 2010). Taksonomija ima ukupno 103 tipologije, koje se temelje na osnovnoj razredbi od 16 tipova zgrada definiranih prema materijalima zidova i sustavu otpornosti na bočno opterećenje.

Daljnja razredba provodi se prema visini, tipu dijafragme, specifičnim vrstama upotrijebljenih materijala, tehnikama gradnje i razinama duktilnosti. Posljednji put ažurirana je 2014., a zbog velikog broja tipologija koje pokriva nije prikladna za opisivanje manjih područja i zgrada jednostavnih konstrukcija (EPISCOPE, Earle i dr. 2009). Uglavnom se upotrebljava za modeliranje izloženosti velikih razmjera.

Razredba zgrada prema Europskoj makroseizmičkoj ljestvici (engl. *European Macroseismic Scale*, EMS – 98) (Grunthal, 1998) smatra se temeljnom za razvoj taksonomija u Europi (Pittore i dr. 2018, Bindi i dr. 2011, Lagomarsino i Giovinazzi 2006, Tyagunov i dr. 2004). Ova razredba zgrade primarno razvrstava prema materijalu izvedbe u 4 osnovna razreda: zidane, armiranobetonske, metalne i drvene. Sustav EMS – 98 prilično je jednostavan, a njegov fokus na europski fond zgrada rezultira većom pozornošću pri razredbi zidanih i armiranobetonskih zgrada.

Prema razini potresnog projektiranja, otpornosti konstrukcija na bočno opterećenje, razini armiranja i/ili materijala stropa, EMS zidane zgrade razvrstava u 7, a armiranobetonske u 6 podrazreda. Sve čelične i sve drvene zgrade grupirane su zajedno bez ikakvih razlika osim primarnog konstrukcijskog materijala. Taksonomija je razvijena u svrhu procjene oštetljivosti pa je svakom razredu i podrazredu dodijeljeno šest razreda oštetljivosti, od A do F, sukladno smanjenju oštetljivosti.

Europski projekt RISK-UE (Napredni pristup scenarijima rizika od potresa s primjenom u različitim europskim gradovima) razvija tipologiju (Lagomarsino i Giovinazzi 2006) s dva sustava tipološke razredbe. Prvi se temelji na oštećljivost tzv. matrica tipologije zgrada (engl. *Building Typology Matrix*, BTM), u kojoj se razredba provodi s obzirom na sličnosti u ponašanju zgrada tijekom potresne uzbude. U drugom sustavu razredbe zgrade se razvrstavaju prema gustoći nastanjenosti kako bi se mogli utvrditi čimbenici koji utječu na odnos između štete i žrtava. Tipologija se temelji na sustavu razredbe EMS – 98 (Grunthal 1998), ali je proširena uvođenjem armiranobetonskog dvojnog sustava (tipologije RC3) i podtipologija. Razredba na podtipologije provodi se s obzirom na: visinu (niske, srednje visoke i visoke) definiranu prema broju katova, razrede duktilnosti (bez duktilnosti, mala, srednja i velika duktilnost) te razinu potresnog djelovanja ovisno o seizmičnosti promatranog područja.

Nedostatci taksonomija orijentiranih na rizik su: subjektivnost i pristranost kod izravne dodjele tipologije zgradi, „gubljenje“ (Pittore i dr. 2018) većine informacija o konstrukcijskim i nekonstrukcijskim karakteristikama zgrada (kada je tipologija već dodijeljena), nemogućnost mijenjanja ili poništavanja dodijeljenog razreda nakon završetka istraživanja, te pretpostavke da će se zgrada u potresu ponašati sukladno pretpostavkama definiranim za tipologiju.

Iako je uobičajena upotreba globalno razvijenih taksonomija u zemljopisnim okruženjima za koja nisu razvijene, njihova primjena u nekim područjima može izazvati epistemičke nesigurnosti (Jaiswal i dr. 2010) u kasnijem modelu oštećljivosti i pogrešne procjene potresnog rizika.

Kako bi se osigurali standardiziraniji opisi analiziranih zgrada na temelju većeg skupa osnovnih karakteristika (Pittore i dr. 2018) razvijene su taksonomije zasnovane na popisnim kategorijama (tzv. facetirane taksonomije) (Pitilakis 2014, Brzev i dr. 2013, Franchin i dr. 2011, Tzitzikas, 2009). Ove taksonomije čine skup popisnih kategorija (engl. *faceta*) od kojih svaka opisuje određenu domenu s različitog aspekta ili popisne kategorije. Svaka popisna kategorija je imenovana i ima određeni raspon.

Taksonomije zasnovane na popisnim kategorijama vrlo su fleksibilne (Pittore 2018) jer pružanju prilagođene opise zgrada koji su uglavnom neovisni o geografskom području i specifičnoj potresnoj opasnosti. Posjeduju potrebne karakteristika za jasan opis pojedinačnih zgrada koji se odnosi na potresnu oštećljivost, ali ih nije moguće izravno upotrijebiti za generiranje modela izloženosti orijentiranih na rizik. Zato se uglavnom upotrebljavaju se za opisivanje standardnih, regionalno dominantnih zgrada i nisu u potpunosti iskorištene u modeliranju potresnog rizika.

S ciljem da se u Europi zgrade detaljno opišu i razvrstaju s konstrukcijskog i funkcionalnog kriterija na temelju iste temeljne razredbene sheme, SYNER-G (engl. Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain) projekt (Pitilakis i dr. 2016, Pitilakis i dr. 2014, Pitilakis i dr. 2013, Franchin i dr. 2011) predlaže taksonomiju zasnovanu na popisnim kategorijama za zidane i armiranobetonske zgrade koja se temelji na 15 popisnih kategorija kao što su mehanizam otpornosti na bočnu silu, materijal zidova, pravilnost u tlocrtu i po visini, krovni sustav i dr. Taksonomija je izgrađena s modularnom strukturom što znači da je moguće naknadno dodavati kategorije i podkategorije za opisivanje zgrada.

GEM projekt takođe razvija globalnu taksonomiju zasnovanu na popisnim kategorijama (Brzev i dr. 2013) za opisivanje tipologija zgrada. Primarni cilj kod razvoja GEM taksonomija je dobivanje fleksibilnog standardiziranog opisa različitih tipologija zgrada primjenjivog na velikim geografskim područjima. Konstrukcije zgrada se GEM taksonomijom detaljno opisuju s funkcionalnog i konstrukcijskog stajališta. Taksonomija se temelji na 13 glavnih karakteristika (smjer, položaj, oblik tlocrta, konstrukcijska nepravilnost, vanjski zidovi, tip stropa, tip krova, namjena, godina izgradnje, visina, bočni nosivi sustav, materijal bočnog nosivog sustava, temelj i gustoća nastanjenosti), različitim karakteristikama zgrada koje se mogu odabrati za svaku karakteristiku te pojmovniku koji definira sve karakteristike te ih ilustrira slikama (Brzev i dr. 2013).

GEM taksonomija organizirana je kao niz proširivih karakteristika uređenih kao sintetički tekstualni nizova (Pittore i dr. 2018) koji mogu uspješno opisati širok raspon zgrada (Yepes-Estrada i dr. 2017). Međutim, upravo zbog brojnosti atributa često se smatra preopširnom jer se u većini slučajeva samo dio (Pittore i dr. 2018) karakteristika upotrebljava za razvrstavanje zgrada u tipologije, naročito kada su u pitanju pojednostavljene taksonomije.

Ne postoji metodologija (Pittore i dr. 2018) za dosljednu procjenu kompatibilnosti skupa konstrukcijskih karakteristika za pojedinačne zgrade s obzirom na jednu ili više definiranih tipologija orijentiranih na rizik. Zbog toga se kod izrade taksonomija zasnovanih na popisnim kategorijama stvara nesrazmjer između faze prikupljanja podataka, gdje se može uočiti i zabilježiti veliki broj karakteristika i fazi obrade, gdje se većina ovih podataka odbacuje upotrebom pojednostavljenih taksonomija koje možda neće u potpunosti obuhvatiti sva svojstva građevinskog fonda.

Za rješavanje ovog problema Pittore i dr. (2018.) predlažu pristup modeliranja izloženosti „odozdo prema gore“, koji iskorištava potencijal taksonomija zasnovanih na popisnim kategorijama, ali provodi

kodiranje tipologija zgrada orijentiranih prema riziku u smislu tipova karakteristika i vrijednosti koje su najvjerojatnije (ili manje vjerojatno) povezane sa samom tipologijom (Kavgic i dr. 2010). Nadalje proračunava definirane razine kompatibilnosti ispitane zgrade sa svojim taksonomskim opisom orijentiranim na rizik.

U tablici 2.3 prikazan je sažet pregled prednosti i nedostataka taksonomija orijentiranih na rizik i taksonomija koje se temelje na popisnim kategorijama.

Tablica 2.3 Prednosti i nedostaci taksonomija orijentiranih na rizik i taksonomija koje se temelje na popisnim kategorijama (prema Pavić i dr. 2020a)

TAKSONOMIJE	PREDNOSTI	NEDOSTATCI
ORIJENTIRANE NA RIZIK	<ul style="list-style-type: none"> – predefinirane tipologije – kombinacija vjerodostojnih podataka, stručne procjene i podataka prikupljenih na licu mjesta 	<ul style="list-style-type: none"> – pristranost rezultirajućih modela – može imati ograničen geografski raspon: → ne može se lako primijeniti na druge regije → epistemičke neizvjesnosti u kasnijem modelu oštećljivosti
ZASNOVANE NA POPISNIM KATEGORIJAMA	<ul style="list-style-type: none"> – standardizirani opis zgrada na temelju velikog skupa osnovnih karakteristika – opisi različitih tipologija zgrada na širem zemljopisnom području 	<ul style="list-style-type: none"> – ne može se izravno upotrebljavati za izradu modela izloženosti orijentiranih na rizik – razredba je subjektivna i kao takva može biti pristrana – razredba ovisi o vještinama i iskustvu klasifikatora – nakon dodjele razreda gubi se većina podataka o konstrukcijskim i nekonstrukcijskim karakteristikama zgrada koje se razmatraju – dodijeljeni razred ne može se dalje mijenjati ili dopunjavati po završetku razredbe

Ovakvim pristupom (Ignjatović i dr. 2021, Pittore i dr 2018, Kavgic i dr. 2010) smanjuje se količina subjektivne prosudbe, istovremeno osigurava dosljedno razmatranje temeljnih nesigurnosti i omogućava izravno integriranje terenskih podataka u model izloženosti. Osim toga, odvojeno je prikupljanje podataka o zgradama od dodjele tipologija, čime se osigurava potpuna ponovljivost rezultata rizika i ponovna upotreba podataka prikupljenih na licu mjesta.

Za neke od najčešće upotrebljivanih taksonomija, GEM je izradio kvantifikaciju koja se temelji na procjeni dostatnosti ispunjavanja 10 bitnih zahtjeva koji svaka taksonomija treba zadovoljiti (Tablica 2.4).

Tablica 2.4 Kvantifikacija postojećih taksonomija (prema Brzev i dr. 2013)

TAKSONOMIJA	RAZLIKUJE POTRESNA PONAŠANJA	DOSTUPNOST	POTPUNOST	JEDNOSTAVNOST I SKLOPIVOST	ISCRPNOST	PREPOZNTLJIVOST	OSTALE GRAĐEVINE	UPOTREBLJIVA ZA DRUGE OPASNOSTI	JEDNOSTAVNA ZA UPOTREBU	INTERNACIONALNO PRIMJENJIVA	UKUPNO	KOMENTAR
ATC-13 (ATC 1985)	1	1	1	1	0	2	2	0	2	0	10	Fokusrana na Kaliforniju
FEMA 154 (ATC-21) (FEMA 1998)	1	1	0	1	0	2	0	0	2	0	7	Za SAD konstrukcije
EMS – 98 (Grünthal 1998)	1	1	0	1	0	2	0	0	2	2	9	Preopširna metodologija
WHE (WHE 2019)	1	1	2	1	2	2	0	0	2	2	13	Općeniti podatci o konstrukcijama
Coburn and Spence (Coburn i Spence 2002)	1	1	1	2	2	2	0	0	2	2	13	Za inženjerske i neinženjerske zgrade
HAZUS (FEMA 2003)	2	1	1	1	0	2	0	2	2	0	11	Za SAD konstrukcije
Gunel and Ilgin (Gunel i Ilgin 2007)	1	1	1	1	0	1	0	0	2	0	7	Razredba ograničena na visoke zgrade
CEQID (Lee i dr. 2011)	2	1	1	1	1	2	0	0	1	2	11	Za EQ bazu podataka o oštećenjima
PAGER –STR (Jaiswal i Wald 2008)	2	1	2	2	2	2	0	0	2	2	15	Najopširnija metodologija
SYNER-G (SYNER-G 2011)	2	1	2	2	2	1	2	1	2	2	17	Najbolji potencijal

Prema predloženim kriterijima SYNER-G taksonomija ima najveći potencijal za daljnji razvoj i široku upotrebljivost.

Zbog specifičnosti gradnje, materijala izvedbe i propisa gradnje, pojedine države razvijaju svoje taksonomije čije je generiranje uglavnom vezano za različite projekte najčešće za potrebe procjene energetske učinkovitosti i rizika.

Metodološki okvir IEE projekta TABULA (TABULA) omogućio je temelj za razvoj taksonomija zgrada za 16 europskih zemalja. Cilj projekta je definiranje zajedničkih načela za stvaranje nacionalnih tipologija stambenih zgrada (Jovanović-Popović i dr. 2013). Generiranje tipologija u TABULI primarno je namijenjeno procjeni energetske učinkovitosti zgrada pa dva osnovna parametra razredbe čine veličina zgrade i razdoblje izgradnje (TABULA, Ignjatović i dr. 2021, Kadrić i dr. 2018, Jovanović-Popović i dr. 2013). Primjena ovih kriterija razredbe rezultirala je s npr. za Srbiju generiranih 39, a za Bosnu i Hercegovinu 29 tipologija zgrada (Kadrić i dr. 2018). Najveća vrijednost razvijene metodologije je što omogućava uvažavanje (Ignjatović i dr. 2021) specifičnosti graditeljskog naslijeđa kod određivanja tipologija zgrada, pa tako npr. u taksonomiji razvijenoj za Njemačku postoje tipologija „stambeni objekti karakteristični za vrijeme i načina gradnje u Istočnoj Njemačkoj“ (TABULA).

2.3.5. Taksonomije u Republici Hrvatskoj

Taksonomije i tipološke razredbe unutar njih osmišljene i izrađene kako je opisano u prethodnim poglavljima treba uzeti s rezervom kod modeliranja oštetljivosti manjih područja (gradova, manjih područja unutar nacionalnih granica, pa čak manjih država). Međutim mogu poslužiti kao polazni okvir za razvoj nacionalnih taksonomije koje će tipološkom razredbom obuhvatiti sve specifičnosti promatranog nacionalnog područja.

Republika Hrvatska nema razvijenu nacionalnu taksonomiju. Početci razmišljanja o tipologijama zgrada i razvoju taksonomije mogu se povezati s 80-tim godinama prošlog stoljeća kada je provedena tipizacija zgrada (Aničić i dr. 1988) povijesne jezgre grada Dubrovnika. Inicijative za razvoj taksonomija do danas provode se uglavnom u sklopu i za potrebe različitih projekata. Europski projekt HORIZON 2020 iz SERA programa (SERA) npr. napravio je grubu taksonomiju za fond stambenih zgrada Republike Hrvatske, čija se razredba temelji na četiri osnovne tipologije: nearmirano žiđe, omeđeno žiđe, armiranobetonski okvirni dvojni sustavi i armiranobetonski okvirni sustavi s ispunskim žiđem.

Taksonomije nastale za potrebe projekata temelje se uglavnom na globalnim kvantitativnim procjenama fonda zgrada i iz njih generiranim tipologijama koje ne odražavaju stvarno stanje i ne zadovoljavaju potrebe koje bi nacionalna taksonomija zgrada trebala zadovoljiti. Prema procjeni koja je napravljena u okviru HORIZON 2020 projekta nearmirano ziđe čini čak 45 %, a omeđeno ziđe 31 % (Šavor-Novak i dr. 2019) ukupnog fonda stambenih zgrada Republike Hrvatske. Upitna je pouzdanost ovih odnosa. Napori koji bi mogli osigurati pouzdanu procjenu potresne oštetljivosti vezanu uz uvažavanje specifičnosti materijala, gradnje i primjene potresnih propisa su taksonomije koje se razvijaju u Republici Hrvatskoj za pojedine gradove i područja. Do danas razvijaju se taksonomije samo za gradove Osijek i Zagreb, te taksonomija zgrada ruralnih područja istočne Hrvatske.

Prvobitno je za grad Zagreb napravljena gruba taksonomija koja je sadržavala 14 karakterističnih tipologija međutim „Studija za saniranje posljedica potresa u Gradu Zagrebu“ (Šavor- Novak i dr. 2018), ukazala je na potrebu razredbe koja preciznije odražava stanje karakteristika zgrada u gradu pa je izrađena detaljnija razredba na 42 tipologije nastale detaljnijom raščlambom 6 osnovnih tipova zgrada (nearmirano ziđe, omeđeno ziđe i 4 tipa armiranobetonskih zgrada).

Predložena taksonomija za grad Osijek (Pavić i dr. 2020a) temelji se na modelu izloženosti grada koga čine postojeće zgrade sa svim pripadajućim geometrijskim, konstrukcijskim i ostalim karakteristikama koje određuju njihovu izloženost. Na temelju terenski prikupljenih podataka utvrđene su dominantne karakteristike zgrada te definirane prevladavajuće tipologije koje čine osnovu razredbu taksonomije na 15 tipova zgrada (Pavić i dr. 2020a). U poglavlju 4 detaljnije je opisan razvoj predložene taksonomije i pripadnih tipologija.

Zahvaljujući zalaganju i trudu istraživača s HAZU projekta „Preliminarna istraživanja u području potresnog rizika ruralnih područja istočne Hrvatske“ (voditeljica izv. prof. dr. sc. Marijana Hadzima-Nyarko, dipl. ing. građ. - Građevinski i arhitektonski fakultet u Osijeku) u razdoblju od 01.01.2021. do 31.12.2021. razvijena je taksonomija ruralnih područja Istočne Hrvatske koja može biti primjenjiva na sva ruralna područja koja imaju sličnu tradiciju gradnje uključujući zemalje koje graniče s ovim dijelom Hrvatske (Završno izvješće projekta „Preliminarna istraživanja u području potresnog rizika ruralnih područja istočne Hrvatske“ 2022.).

2.4. Potresna oštećljivost zgrada

U potresnom inženjerstvu oštećljivost predstavlja stupanj oštećenja ili gubitka danoga elementa rizika kao posljedica određene razine opasnosti (Coburn i Spence 2002). Iskazuje se kao omjer očekivanoga gubitka i najvećega mogućeg gubitka na ljestvici od 0 do 1 (ili od 0 do 100 %) (Coburn i Spence 2002, 1994). Sposobnost pouzdane procjene oštećljivosti od potresa ključna je za procjenu potresnog rizika jer se na temelju nje mogu predvidjeti štete i žrtve potencijalnog potresa te planirati postupci i mjere za njihovo ublažavanje ili otklanjanje.

U mnogim slučajevima, socijalni aspekti oštećljivosti – ranjivost uzrokovana je fizičkom dimenzijom oštećljivosti. Broj žrtava uzrokovanih oštećenjima zgrada u potresima posljednjih godina je ogroman, i raste paralelno s porastom urbanizacije i brojnošću ljudske populacije. U tablici 2.5 prikazan je broj žrtava globalnih potresa u proteklih desetak godina prema istraživanju Xia i dr. (2020.).

Tablica 2.5 Broj žrtava uzrokovanih globalnim potresima posljednjih godina (Xia i dr. 2020)

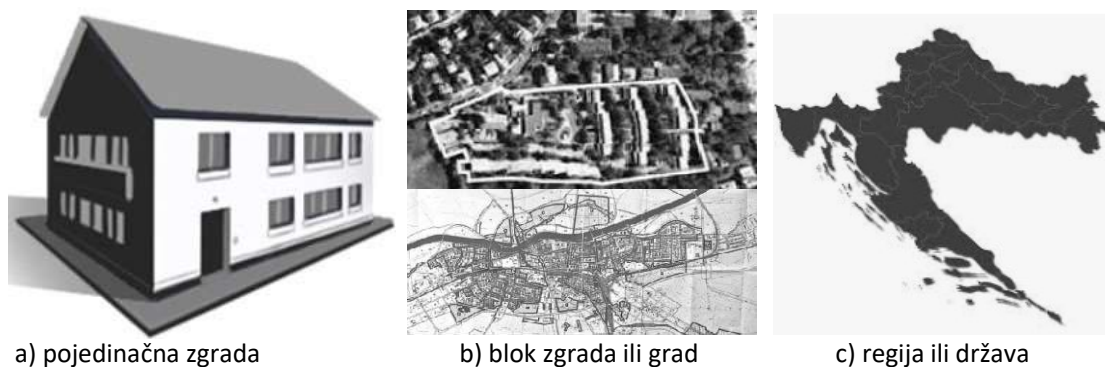
GODINA POTRESA	BROJ ŽRTAVA	NESTALI	BROJ ŽRTAVA UKUPNO
2010	240 000		240 000
2011	20 321	3 485	23 806
2012	486		486
2013	1 100		1 100
2014	643	112	755
2015	9 563		9 563
2016	1 145		1 145
2017	1 164		1 164

Počeci istraživanja potresne oštećljivost vežu se za Freemana koji još 1932. u knjizi *Potresna oštećljivost i sigurnost*, ukazao na činjenice i nedoumice vezane uz potresnu oštećljivost i gubitke koje uzrokuje (Kircher i dr. 1997). Potresni rizik i oštećljivost predmet su studija i znanstvenih radova Esteve (1967. i 1968.) i Cornella (1968) iz 60-tih godina prošlog stoljeća. Značajniji koraci u pokušaju karakteriziranja oštećljivosti zgrada učinjeni su početkom 1980-ih godina u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD) te u srednjoj i istočnoj Europi, posebno u zemljama čiji je teritorij potresno više aktivan poput Grčke, Italije, Bugarske, Turske i Rumunjske.

Ovi napori rezultirali su devedesetih godina prošlog stoljeća razvojem npr. u Italiji, brze metode procjene oštećljivosti (Servizio Sísmico Italiano) koja se tijekom vremena kalibrirala prema

informacijama o oštećenjima zgrada prikupljenim nakon potresa (GNDT 1994) i u SAD-u, HAZUS metodologije (HAZUS 1999) za procjene gubitaka od potresa u smislu izgrađenog okoliša i stanovništva urbanih područja.

Procjene oštetljivosti provode se za različite potrebe, različitim metodologijama i tehnikama, različitih su opsega u rasponu od globalnih, nacionalnih ili lokalnih razina do kvalitativnih sveobuhvatnih procjena oštetljivosti pojedinačnih konstrukcija. Na slici 2.10 prikazane su različite razine procjene oštetljivosti s obzirom na veličinu područja odnosno broj elemenata rizika izloženih potresu.



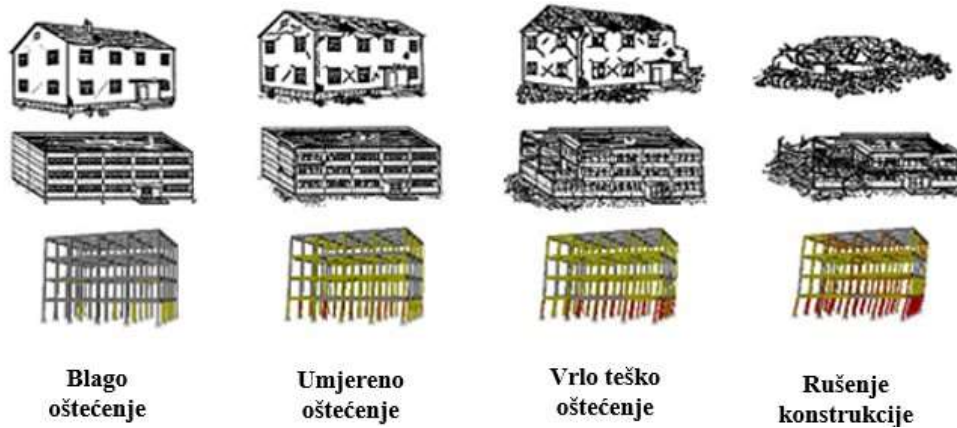
Slika 2.10 Različite razine veličine promatranog područja

Temeljni pristupi procjeni oštetljivosti su empirijski, analitički te kombinacija temeljnih pristupa tzv. hibridni pristup. U poglavljima koja slijede detaljnije su objašnjeni navedeni pristupi te svrha i uloga metodologija procjene oštetljivosti.

Postupci procjena potresne oštetljivosti postojećih zgrada oslanjaju se na različite parametre koji se usredotočuju na konstrukcijski sustav, sposobnost nosivosti, uvjete tla, tlocrtnu i visinsku pravilnost zgrade te druge podatke o zgradama prikupljene na terenu. Ovi parametri predstavljaju temelj za određivanje mogućeg stupnja konstrukcijske oštetljivosti.

Za modeliranja oštetljivosti upotrebljavaju se diskretne ljestvice stanja oštećenja (HAZUS99, EMS – 98, ATC-13, FEMA273 i dr.). Na slici 2.11 grafički su prikazana četiri stupnja oštećenja prema EMS – 98, prerađena prema D'Ayala i dr. (2015.). Upotrebom kvalitativnih opisa ili varijabli provodi se razredba zgrade u razrede oštetljivosti s obično od tri do šest kategorija (mala, srednja, velika, itd. tj. A, B, C, itd.) (Barbat i dr.2008, Goretti i Di Pasquale 2002, Panoutsopoulou i Ioannides 1998, Dolce i dr. 1995).

Proračunata oštećljivost može se predstaviti funkcijama (krivuljama) vjerojatnosti oštećenja, kada se opisuje vjerojatnost dostizanja ili prekoračenja graničnih stanja za neku razinu potresnog intenziteta ili funkcijama (krivuljama) oštećljivosti kada se opisuje vjerojatnost ukupnih gubitaka (socijalnih ili ekonomskih gubitaka).



Slika 2.11 Stanja oštećenja prema EMS – 98, prerađena prema D'Ayala i dr. (2015.)

Svrha procjene oštećljivosti je identificirati gubitke kao ekonomski indeks koji treba vratiti u sustav za procjenu stanja prije nego se dogodi potresni događaj (Kassem i dr. 2020). Procjena oštećljivosti zgrada ima veliku važnost, ne samo zbog očitih socijalnih i fizičkih posljedica u eventualnoj pojavi potresnog događaja, nego i zato što je to jedan od rijetkih potencijalnih aspekata u kojem inženjersko istraživanje može intervenirati (Vicente i dr. 2011, Comerio 1992).

2.4.1. Metodologije procjene potresne oštećljivosti

Razvoj metodologija za procjenu potresne oštećljivosti građevinskih fondova počinje 1970-ih godina. Najpoznatije relevantno djelo iz tog doba je o izvođenju matrica vjerojatnosti oštećenja Whitmana i dr. iz 1973. (Whitman i dr. 1973.). Izazovi poput nepostojanja podataka o elementima izloženosti ili nesigurnosti u procjenama stupnja oštećenja pojedinih tipologija zgrada unose brojne neizvjesnosti uključene u procese razvoja metodologija procjene oštećljivosti i značajno usporavaju njihov razvoj. U radu Dolceza i dr. (1995.), opisan je razvoj metodologija i studija oštećljivosti do 1994., a među relativno novijim radovima, vjerojatno najopsežniji rad Calvija i dr. (2006.) koji pokriva istraživanja do 2005. Razvoj suvremenih metodologija procjena potresne oštećljivosti usko je povezan s uspostavljanjem znanstvenih pristupa u analizi i identifikaciji uzročnih veza između štetnih učinaka i različitih vrsta opasnih događaja (Covello i Mumpower 1985).

Odabir metodologije uvjetovan je i postojanjem, raspoloživošću, kvalitetom i vrstom podataka o potresnoj opasnosti i elementima rizika područja za koje se oštetljivost proračunava (Hadzima-Nyarko i dr. 2018a, Stone 2017). Osim toga, na odabir metodologije utječe stručnost analitičara, raspoloživost tehničkih i materijalnih sredstava te vrsta i opseg procjene. Svaki pristup ima određene prednosti i ograničenja (Kwon i Elnashai 2006), koja se zavisno o funkciji i cilju procjene oštetljivosti mogu korisno upotrijebiti ili izbjeći. Optimalna ili idealna metodologija procjene potresne oštetljivosti trebala bi sadržavati sljedeće glavne karakteristike (Calvi i dr. 2009, Calvi i dr.2006):

- u procjene potresne opasnosti uključiti najnovija dostignuća
- eksplicitno uzeti u obzir sve izvore nesigurnosti
- upotrebljavati modele oštetljivosti prilagodljive različitim građevinskim praksama diljem svijeta kako bi se omogućilo uključivanje novih tipova gradnje i utjecaj naknadnih rekonstrukcija i pojačanja na odziv postojećih konstrukcija
- uspostaviti ravnotežu između predviđenog intenziteta potresa i količine detaljnih podataka koji su potrebni sa stupnjem zahtijevane pouzdanosti rezultata procjene oštetljivosti.

Malo je vjerojatna izrada jedinstvene metodologije koja ispunjava sve ove zahtjeve. Pouzdana procjena oštetljivosti određenog područja vjerojatno će zahtijevati upotrebu najmanje dva različita pristupa, koji bi se trebali međusobno nadopunjavati i/ili verificirati (Calvi i dr. 2009, Calvi i dr.2006). Metodologije procjene potresne oštetljivosti zgrada temelje se na jednom od dva osnovna pristupa: empirijskom i analitičkom. Zbog slučajeva procjena oštetljivosti koje zahtijevaju kombiniranje temeljnih pristupa (Porter 2003, Rossetto i dr. 2014) razvijen je hibridni pristup (Kappos i dr. 2006, Kappos i dr. 1998, Dolce i dr. 1995) kojim se može npr. kombinirati statistički (empirijski) podatci o oštećenjima s teorijskim rezultatima iz nelinearnog proračuna konstrukcija.

Usvajanje vrste pristupa ovisi o načinu na koji je predstavljeno potresno gibanje temeljnog tla, o tome kako se promatra potresna oštetljivost te kakva je funkcija i ciljevi izrade procjena oštetljivosti, vidi npr. El- Masai i dr. (2021.), Zhang i dr. (2019.), Cardona i dr. (2012.), Peduzzi i dr. (2009.), Dilley (2006.), Birkmann (2006.), Rashed i Weeks (2003.).

Istražujući važnost nesigurnosti u procjenama potresnog rizika i oštetljivosti od potresa Rohmer i dr. (2014.) nesigurnosti razvrstavaju u dvije kategorije: nesigurnosti parametara i nesigurnosti metodologije. Prve proizlaze iz poteškoća u prikupljanju i proračunu vrijednosti ulaznih parametara za procjenu, a druge nastaju kod odabira odgovarajućeg pristupa. Definicije i vrste nesigurnosti

potresnog rizika unutar inženjerske zajednice su široke i često sukobljene (Tasfamariam i Goda 2013), međutim najčešće se kategoriziraju kao aleatoričke i epistemičke.

Epistemičke nesigurnosti mogu povećati širenje oštetljivosti i rizika općenito (Erdik 2017), a posljedica su subjektivnosti ili neznanja u metodologiji (Baker i Cornell 2008). Odnose se na nedostatak spoznaja o veličini potresne opasnosti i/ili karakteristika temeljnog tla te o konstrukcijskim karakteristikama i/ili dinamičkom odzivu zgrada i to u svakoj fazi ocjenjivanja potresnog rizika (FEMA 2010, Crowley i dr. 2005). Povećanjem broja i dostupnosti podataka ili poboljšanjem razumijevanje fizičkih procesa i potresnog odziva zgrada moguće ih je smanjiti.

Aleatoričke nesigurnosti nastaju zbog nasumičnosti podataka upotrijebljenih u proračunima (Baker i Cornell 2008), a posljedica su prirodne heterogenosti i stohastičnosti fizičkog procesa (Erdic 2017, Crowley i dr. 2005). Utječu na distribuciju gubitaka i krivulja oštetljivosti (Erdik 2017) i moguće ih je reducirati.

Metodologije vjerojatnosnih procjena pouzdanosti potresne otpornosti konstrukcija temelje se na simulaciji ponašanja konstrukcija putem nelinearne dinamičke analize računalnih modela. Cilj je izrada modela konstrukcijskih odziva za procjene razina štete kako bi se omogućilo proračunavanje vjerojatnosti oštetljivosti uslijed rizika. Prema Iervolinu (2017.), sam postupak modeliranja implicira da nesigurnosti procjene utječe na probabilističke rezultate.

Metodologije procjene potresnih gubitaka trebale bi sadržavati komponente analize koje uzimaju u obzir epistemičke nesigurnosti svih elemenata rizika, te smanjiti mogućnost nasumičnog odabira podataka u analizama kako bi se smanjile aleatoričke nesigurnosti (Zuccaro i Caca ce 2011, Masquod i Schwartz 2011, FEMA 2010, Molina 2010, Jaiswald i Wald 2010, Oliveira i dr. 2006, McGuire 2004, Crowley 2004). Definiranjem i kvantificiranjem nesigurnosti umanjila bi se varijabilnost rezultata između procjena rizika koje proizlaze iz različitih modela procjena gubitaka od potresa.

Smanjenje nesigurnosti u procjenama potresnog rizika važno je pitanje (Peduzzi 2019, Doocy i dr. 2013, Masquod i Schwartz 2011, Stafford i dr. 2007) jer se njegovim rješavanjem povećava pouzdanost procjena i na taj način smanjuje mogućnost podcjenjivanja/precjenjivanja potresne oštetljivosti te mjera za prevenciju i ublažavanje njegovih posljedica.

2.4.2. Empirijski pristup za procjene oštećljivosti zgrada

Upotrebom empirijskog pristupa procjena potresne oštećljivosti zgrada (velikog geografskog područja) prvi put je provedena ranih 70-ih. Upotrijebljena metodologija razvijena je i kalibrirana kao funkcije makroseizmičkih intenziteta jer je u to vrijeme velika većina karata potresne opasnosti bila definirana u smislu diskretnih ljestvica oštećenja pa je prema Calvi i dr. (2009.) te Calvi i dr. (2006.) ovakav (empirijski) pristupi bio jedini razuman i mogući pristup koji bi se mogao primijeniti za procjene potresnog rizika. Iako je makroseizmički intenzitet direktno vezan uz oštećenja zgrada, u odnosima predviđanja uzima se kao kontinuirana varijabla, što je pogrešno jer je on diskretni indeks s nejednolikim intervalima (Mussonu 2000). Osim makroseizmičkog intenziteta, za istraživanja procjene gubitaka upotrebljava se i vršno ubrzanje temeljnoga tla (PGA) za koje je dokazana mala povezanost oštećenja i gibanja temeljnog tla (Crowley 2005) te veliko rasipanje rezultata. Pristup se oslanja na pretpostavku da će se povijest potresa ponoviti odnosno da je na temelju podataka dobivenih iz prethodnih potresa moguće predvidjeti oštećljivost građevina za buduće potresne događaje.

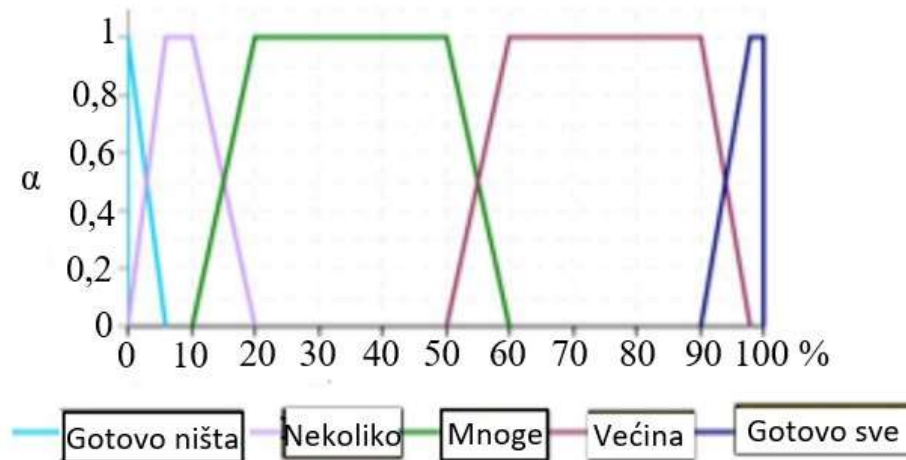
Najčešće se upotrebljava nekoliko ljestvica intenziteta: modificirana Mercallijeva ljestvica intenziteta (engl. *Modified Mercalli intensity scale*, MMI) (Wood i Neumann 1931), MSK (Medvedev–Sponheuer–Karnik) ljestvica (Medvedev i dr. 1965, Sponheuer i Karnik 1964), Europska makroseizmička ljestvica EMS – 98 (engl. *European Macroseismic Scale*) (Grünthal 1998) i ljestvica potresnog intenziteta bez parametara (engl. *Parameterless Scale of Seismic Intensity*, PSI) (Spence i dr. 1991).

Neki od prvih empirijskih pristupa razvijenih za ljestvice intenziteta, npr. Risk-UE (2003.), FEMA (2003.), GNDT (1986.), temelje se na stručnom mišljenju i podacima iz prijašnjih potresa (Hadzima-Nyarko i dr. 2018a, Rodenas i dr. 2018, Stone 2017). Empirijski (statistički) pristupi temelje se na statističkim podacima nastalim iz promatranja oštećenja građevina u dogođenim potresima kako bi zaključili odnose između varijable (štete ili ekonomskog gubitka) i intenziteta potresa (Kassem 2020, Hadzima-Nyarko i dr. 2018a). Iz niza karakteristika vezanih uz tipologiju i konstrukcijsko oblikovanje svake zgrade, ovi pristupi procjenjuju potresnu oštećljivost prema razredima oštećljivosti, opisno tj. kvalitativnim varijablama (Grünthal 1998, Benedetti i dr. 1988) ili prema indeksima oštećljivosti, numeričkom procjenom kao rezultat kvantifikacije parametara oštećljivosti.

Kvalitativne varijable koje se upotrebljavaju u empirijskim metodama u svrhu određivanja oštećenja zgrada najčešće su: jačina očekivanoga potresa, podatci o potresnom ponašanju lokalnog tla te podatci o konstrukcijskome tipu zgrade (Hadzima-Nyarko i dr. 2018a, Rodenas i dr. 2018). Sukladno usvojenoj

varijabli, razina oštećenja može se utvrditi kao funkcija ubrzanja, tipa konstrukcijskoga sustava ili tipa temeljnoga tla.

Kada je potresna opasnost definirana intenzitetom, najčešće upotrebljavan oblik za predstavljanja oštetljivosti zgrada su matrice vjerojatnosti oštećenja (engl. *damage probability matrix*, DPM). Matrice vjerojatnosti oštećenja daju procjenu donje i gornje granice oštećenja jer ljestvice intenziteta upotrebljavaju kvalitativne pojmove kao što su npr. "nekoliko", "mnogo", "većina" i dr. (Slika 2.12) kako bi se procijenio postotak zgrada istog razreda koje će pretrpjeti određeni stupanj oštećenja (Whitman i dr. 1973). Ovi kvalitativni pojmovi, koji su čisto subjektivni, ne mogu se prevesti u brojčane vrijednosti pa se definiraju kao susjedni rasponi postotaka (Slika 2.12) npr. 0 – 20 %, 10 – 60 % i 50 – 100 % (Grünthal 1998).



Slika 2.12 Procjena donje i gornje granice oštećenja kvalitativnim pojmovima ljestvice intenziteta definirane kao rasponi postotaka, prema ljestvici EMS – 98 (Bernardini i dr. 2007)

Procjenu gornje i donje granice očekivane štete omogućuje kombiniranje vjerojatnosti oštećenja i podataka o zgradama. Kako je svaki stupanj oštećenja povezan s objektivnim omjerom troškova popravka i cijene zamjene zgrade, ovakve procjene daju više informacija o kumulativnoj šteti ili gubitku (Whitman i dr. 1973), a izražavaju se srednjim omjerom oštećenja (engl. *Mean Damage Ratio*, MDR).

Oštetljivost proračunata empirijskim metodama temelji se na velikome broju podataka i razmjerno jednostavnom izražavanju traženih odnosa između štete i njezinih uzročnika (Hadzima-Nyarko i dr. 2018a, Calvi i dr. 2009, Calvi i dr. 2006). Ovo se smatra prednošću u odnosu na ostale metode,

međutim, ključna prednost ovih metoda je ta da se aleatorne nesigurnosti koje model ne može smanjiti, neovisno o znanju i količini dostupnih podataka, poput podrhtavanja tla (u smislu npr. broja ciklusa, frekventnog sastava ili prirode vibracija zbog različitog sastava temeljnog tla ili reakcije na promet, gradnju) i sl. nerazdvojivo razmatraju (Rossetto i dr. 2013). Empirijski pristupi nemaju sposobnost da odražavaju razlike u inženjerskom i tektonskom okruženju, odnosno nisu u mogućnosti uzeti u obzir specifične konstrukcijske detalje i pojačanja zgrada (Kwon i Elnashai, 2006).

Epistemičke nesigurnosti nastaju uglavnom zbog razredbe zgrada prema oštećljivosti te određivanja općeg ponašanja konstrukcije za svaki od definiranih razreda (Spence i dr. 2003). Naime, rezultati dobiveni empirijskim pristupom odnose se na "prosječne konstrukcije" (Hadzima-Nyarko i dr. 2018a) za određenu razinu nezavisne varijable te ne sadržavaju čimbenike kao što su karakteristike odnosa opterećenje – deformacija konstrukcije ili rasipanje energije.

Nedostatak podataka o jačim (inače rjeđim) potresima, sličnim zgradama te usporedivim seizmološkim i plitkim geološkim uvjetima može utjecati na širu primjenjivost rezultata dobivenih empirijskim pristupima. Osim toga, dostupne baze podataka koje bilježe podatke o šteti od potresa mogu biti nepotpune, loše kvalitete, izrađene upotrebom grubih ili dvosmisleno definiranih stanja oštećenja i/ili tipologija zgrada (Rossetto i dr. 2013, Douglas 2007, Kappos i dr. 2006), što ih čini nedostatno pouzdanim za procjene oštećljivosti. Metode nastale iz empirijskog pristupa najčešće se primjenjuju u makroekonomskim studijama kojima je primarni cilj utvrditi učinke potresnih šteta na velikome broju zgrada jednog područja.

Pouzdanost rezultata empirijskih pristupa ovisi uglavnom o potpunosti i raznolikosti empirijskih podataka prikupljenih iz prošlih potresa. Upotrijebivši svoja znanja i iskustva, 58 stručnjaka razvilo je za ATC (engl. Applied Technology Council) krivulje odnosno matrice vjerojatnosti oštećenja za 78 tipologija građevina, od kojih se 36 odnosilo na zgrade. Izrađene su procjene srednje vrijednosti (engl. *mean*) faktora oštećljivosti koje predstavljaju omjere gubitka i cijene zamjene (postotno izražene) za potresne intenzitete od VI. do XII. prema modificiranoj Mercallijevoj ljestvici intenziteta (MMI) (Meslem i Lang 2017, Lang 2012, Calvi 2006). Velike varijacije u empirijski dobivenim krivuljama oštećljivosti mogu nastati zbog razlika u opaženim oštećenjima vezano s brojem promatranih uzoraka i/ili tipologija, vrste tla i raspona gibanja temeljnog tla (El-Masai i dr. 2021).

Razvijene su brojne metode za procjenu oštećljivosti koje se oslanjaju na empirijski pristup, općenito Calvi i dr. (2006.) dijele ih na metode u kojima se primjenjuju matrice vjerojatnosti oštećenja i metode

u kojima se primjenjuju funkcije oštećljivosti. Brojni su radovi objavljeni o empirijskim metodama, npr. za one koje upotrebljavaju matrice vjerojatnosti oštećenja: Eleftheriadou i Karabinis (2013.), Whitman (1997.), Braga i dr. (1982.), ATC (1985.), Whitman i dr. (1973.), za one koje upotrebljavaju indeks oštećljivosti: Bernardini i dr. (2007.), GNDT (1993.), Benedetti i dr. (1988.), Angelettiju i dr. (1988.), Benedetti i Petrini (1984.), za makroseizmičku metodu (Giovinazzi i Lagomarsino 2004, Giovinazzi i Lagomarsino 20019), za one koje upotrebljavaju kontinuirane krivulje oštećljivosti: Isik (2016.), Yakut (2004.), Sabetta i dr. (1998.), Spence i dr. (1992.).

2.4.3. Analitički pristup procjene oštećljivosti zgrada

Razvoj više atenuacijskih jednadžbi (za više spektralnih ordinata i specifična potresna područja) i izrada karata potresne opasnosti u smislu spektralnih ordinata rezultirali su razvojem analitičkih/mehaničkih metoda ali i poboljšanjem empirijskih (D'Ayala 2013, Calvi i dr. 2009, Calvi i dr. 2006).

Analitički pristupi za određivanje potresne oštećljivosti zgrada mogu se smatrati teoretskim pristupima (Kassem i dr. 2020, Hadzima-Nyarko i dr. 2018b). Usredotočuju se na simuliranje jakih potresnih gibanja temeljnog tla upotrebom fizičkih parametara gibanja tla (npr. spektralne akceleracije S_a ili spektralnih pomaka S_d), a oštećenja se povezuju s mehaničkim svojstvima koja se odnose na granična stanja nosivosti konstrukcija. Za proračun odziva konstrukcija podvrgnutih potresnom opterećenju analitički pristupi upotrebljavaju linearne statičke i dinamičke te nelinearne statičke (metoda postupnog guranja (engl. *Pushover Analysis*), npr. N2 (Fajfar 2000, Fajfar i Fischinger 1988)) i dinamičke proračune (Kassem i dr. 2020, Stone 2017, D'Ayala 2013, Calvi i dr. 2006).

Odziv građevinskih konstrukcija na potresnu uzbuđu složen je problem. Dostatna nosivost i uporabljivost trebaju se osigurati kroz ekonomični proračun koji mora dopustiti određena oštećenja, izbjeći nepopravljiva te spriječiti rušenje. Osim toga proračunom se treba omogućiti i kontrola oštećenja nastalih od djelovanja potresa (Fajfar 2000, Fajfar i Fischinger 1988). Zato je primarna svrha projektiranja sukladnog očekivanom ponašanju (engl. *Performance Based Design*) stvoriti konstrukcije koje će imati očekivano potresno ponašanje unutar propisanih ograničenja, za vjerojatnu razinu ubrzanja temeljnog tla (Hadzima-Nyarko i dr. 2018a).

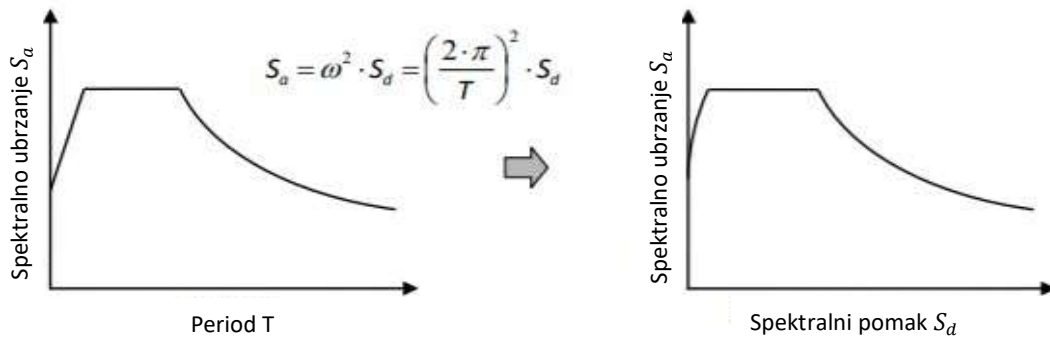
Oštećljivost zgrade se izražava krivuljama sposobnosti nosivosti (Slika 2.13c) koje predstavljaju nelinearno ponašanje konstrukcija uslijed potresnog djelovanja (Hadzima-Nyarko i dr. 2018). Identifikacija krivulje sposobnosti nosivosti, koju definira omjer između posmične sile i bočnog pomaka

kontrolnog čvora, tzv. točke ponašanja (engl. *Performance Point*) zgrade (Slika 2.13c)) (Freeman 1978, Freeman i dr. 1975), provodi se nelinearnim statičkim proračunom kao što je metoda postupnog guranja (ATC 1996, U.S. Army 1986).

Potresno gibanje temeljnog tla ili potresni zahtjev predstavlja se spektrom odziva u smislu fizičkih parametara, ubrzanja i pomaka (Hadzima-Nyarko i dr. 2018b). Potresni zahtjev predstavlja srednju vrijednost štete koja će nastati na zgradi promatrane tipologije. Spektar odziva povezuje se s krivuljom sposobnosti nosivosti, tako da se pretvore iz konvencionalne $S_a - T$ domene (Slika 2.13a)) u domenu krivulje sposobnosti nosivosti, tj. domenu spektralno ubrzanje – spektralni pomak ($S_a - S_d$) (Slika 2.13b)) (Freeman 1978, Freeman i dr. 1975). Ovisno o odabranoj metodologiji, može se korelirati potresni zahtjev sa zahtjevom zgrade na način kako je prikazano na slici 2.13c) ili spektri odziva mogu biti nasumično oblikovani na temelju zabilježenih ili predviđenih gibanja tla i primijenjeni s pretpostavljenim potresnim ponašanjem zgrade.

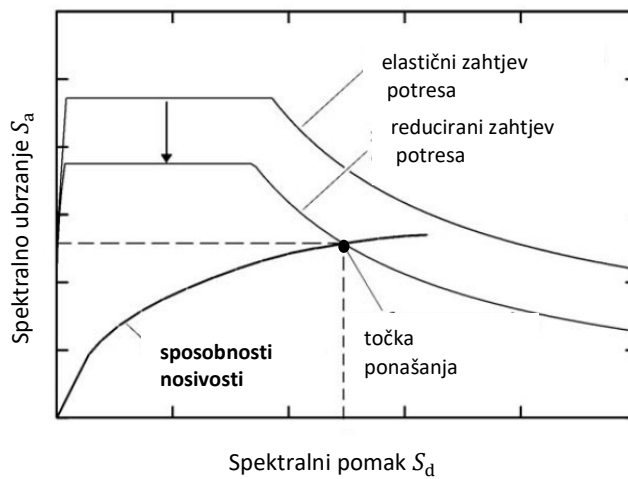
Potresno gibanje temeljnog tla ili potresni zahtjev predstavlja se spektrom odziva u smislu fizičkih parametara, ubrzanja i pomaka (Hadzima-Nyarko i dr. 2018b). Potresni zahtjev predstavlja srednju vrijednost štete koja će nastati na zgradi promatrane tipologije. Spektar odziva povezuje se s krivuljom sposobnosti nosivosti, tako da se pretvore iz konvencionalne $S_a - T$ domene (Slika 2.13a)) u domenu krivulje sposobnosti nosivosti, tj. domenu spektralno ubrzanje – spektralni pomak ($S_a - S_d$) (Slika 2.13b)) (Freeman 1978, Freeman i dr. 1975). Ovisno o odabranoj metodologiji, može se korelirati potresni zahtjev sa zahtjevom zgrade na način kako je prikazano na slici 2.13c) ili spektri odziva mogu biti nasumično oblikovani na temelju zabilježenih ili predviđenih gibanja tla i primijenjeni s pretpostavljenim potresnim ponašanjem zgrade.

Za proračun odgovarajuće vjerojatnosti oštećenja upotrebljavaju se funkcije vjerojatnosti oštećenja koje su usko povezane s krivuljama sposobnosti nosivosti promatrane tipologija zgrade (Molina i dr. 2010). One mogu uključivati različite nesigurnosti kao što su sposobnost nosivosti, kvantitativne geometrijske karakteristike modela zgrade, parametre materijala i sl.



a) Konvencionalni prikaz spektra odziva

b) Transformirani spektar odziva u $S_a - S_d$ domenu



c) Točka ponašanja i krivulja sposobnosti nosivosti

Slika 2.13 Grafički prikaz oštećljivost zgrade a) i b) pretvorba projektnog spektra odziva u $S_a - S_d$ domenu, c) konstruiranje krivulje sposobnosti nosivosti

Analitički pristupi imaju detaljnije i transparentnije algoritme procjene oštećljivosti s izravnim fizičkim značenjem, što omogućuje detaljnije istraživanje oštećljivosti te osigurava jednostavnu kalibraciju prema različitim karakteristikama građevinskog fonda i potresne opasnosti (Hadzima-Nyarko i dr. 2018a, D'Ayala 2013, Calvi i dr. 2009, Calvi i dr. 2006). Npr. za razliku od empirijskih studija koje gibanje temeljnog tla prikazuju samo jednim parametrom, intenzitetom gibanja temeljnog tla ili PGA, u analitičkom pristupu spektar odziva omogućuje razmatranje spektralnog sadržaja gibanje temeljnog tla.

Međutim, prednosti koje upotreba analitičkog pristupa i naprednih modela potresne opasnosti i oštećljivosti nude, treba uzeti s rezervom zbog povećane količine informacija, vremena i novca, koji su potrebni za izradu modela gubitaka od potresa na temelju takvih analiza. Naime, za kalibraciju

analitičkog modela potrebne su baza podataka o građevinskom fondu i informacije o konstrukcijskim karakteristikama istog, a za provođenje procjene potresne opasnosti u smislu izrade spektralnih ordinata, potrebne su baze podataka o potresnoj aktivnosti, jednadžbe prigušenja i podatci o karakteristikama temeljnog tla (Calvi i dr. 2009, Calvi i dr. 2006).

Nadalje, Kwon i Elnashai (2006.) ukazuju na već poznatu činjenicu da se u većoj ili manjoj mjeri konstrukcijski modeli mogu idealizirati, ali će ta idealizacija uvijek uključivati pretpostavke koje mogu uzrokovati značajna odstupanja u rezultatima procjena oštećljivosti. Modeliranje oštećljivosti analitičkim pristupom može varirati na mnogo načina, uključujući upotrebu različitih ulaznih podataka, načina za dodjelu karakteristika modelu oštećljivosti, upotrebu i/ili kombiniranje različitih tehnika modeliranja i sl. (Stone 2017).

Jednostavniji analitički modeli oštećljivosti su brži za proračun, međutim oni se oslanjaju na velik broj pretpostavki. U posljednje vrijeme pouzdanost jednostavnih modela dovodi se u pitanje jer su uočena značajna odstupanja u procjenama oštećljivosti, uzrokovana izborom metode proračuna i pretpostavkama. Međudjelovanja između tla i konstrukcije npr. uključuje nelinearnost tla, koja se još uvijek ne upotrebljava u praksi kao parametar koji utječe na oštećljivost (Foerster i dr. 2009), iako su dokazani brojni učinci međudjelovanja tla i konstrukcije (vidi poglavlje 2.2.3) koji mogu značajno promijeniti rezultate proračuna oštećljivosti. Složeniji analitički modeli procjene oštećljivosti zahtijevaju složenije proračunske postupke te dublja inženjerska znanja i iskustva te daju točnije rezultate procjene. Složeniji proračuni prikladniji su za upotrebu kada je potrebna točna procjena oštećljivosti jedne zgrade (škole, bolnice, crkve, mosta) (D'Ayala i dr. 2013, Foerster i dr. 2009). Bez obzira na složenost analitičkog modela, za provjeru valjanosti rezultata procjene važna je usporedba s opažanjima oštećenja na terenu ili tijekom eksperimenata, kod kojih se mora uzeti u obzir nesigurnosti u odnosu na gibanje temeljnog tla, nedostatak podataka ili subjektivnosti u stručnim prosudbama (Crowley i dr. 2008, Douglas 2007).

Karakteristike analitičkih pristupa omogućavaju uspješne procjene potresnih gubitaka u npr. parametarskim studijama koje imaju za cilj definiranje i kalibriranje urbanističkog planiranja, nadogradnje, osiguranja i drugih sličnih politika ili inicijativa (Foerster i dr. 2009, Bommer i dr. 2005). Nedostatak većine analitičkih modela, smatra D'Ayala (2013.), je taj što razmatraju samo ponašanje konstrukcija u ravnini, zanemarujući mehanizme prevrtanja i ponašanje izvan ravnine, koji se često javljaju na nižim razinama potresanja temeljnog tla i time značajno utječu na potresnu oštećljivost zgrada.

Metode utemeljene na analitičkom pristupu mogu se razvrstati u nekoliko razreda i to na metode koje se temelje na: spektrima sposobnosti nosivosti (Fema 2005, Whitman i dr. 1997, ATC 1996, Freeman i dr. 1975), pomaku (Rossetto i Elnashai 2005, Crowley i dr. 2004, Miranda 1999), koeficijentima pomaka (FEMA 2000, FEMA 1997), mehanizmu sloma (Cosenza i dr. 2005, D'Ayala i Speranza 2003, D'Ayala i Speranza 2002, Bernardin i dr. 1990), inkrementalnom dinamičkom proračunu (engl. *Incremental Dynamic analysis*, IDA) (Vamvatsikos i Cornell 2002, Shome i Cornell 1999) i jednostavnije metode (Cardone i Flora 2017, Borzi i dr. 2008, Calvi i dr. 2006).

Istraživači uglavnom upotrebljavaju analitičke metode jer su neovisne o dostupnosti podataka o oštećenjima. Međutim, Calvi i dr. (2006.) smatraju da još uvijek postoje neka neriješena pitanja u nekim analitičkim metodama koja moraju biti definirana i riješena, kao npr. sposobnost numeričkih modela da točno predvide odziv stvarnih konstrukcija, točnost pretvaranja brojčanih indeksa oštećenja u oštećenja stvarnih građevina, sposobnost proračuna ljudskih pogrešaka u projektiranju i izgradnji zgrada (koje su često glavni uzroci rušenja zgrada) i potreba proširenja rezultata dobivenih za nekoliko referentnih modela na velik broj konstrukcija.

2.4.4. Hibridni pristup za procjene oštetljivosti zgrada

Kako bi se nadoknadili, zaobišli ili otklonili nedostaci temeljnih pristupa odnosno metoda i postupaka unutar njih u smislu npr. subjektivnosti stručnih prosudbi, nedostatnosti ili neadekvatnosti empirijskih podataka o šteti nakon potresa, nesigurnosti vezanih uz modeliranja u analitičkim postupcima i sl., razvijeni su hibridni pristupi (Nikolić i dr. 2022, Nikolić i dr. 2021, El-Maissi i dr. 2021, Andreotti i Lai 2019, Hadzima-Nyarko i dr. 2018, Muntasir Billah i Shahria Alam 2015, Barbat i dr. 2008, Dolce i dr. 1995).

Hibridni pristup često se upotrebljava i zbog nedostatka sveobuhvatnih podataka za upotrebu jednog od temeljnih pristupa (Kwon i Elnashai 2006), a prema Kappos i dr. (2006.), njime se pokušavaju smanjiti obimni računski postupci analitičkog modeliranja i kompenzirati subjektivna pristranost empirijskih metoda koje se temelje na stručnoj prosudbi. Postojeći hibridni pristupi procjenjuju potresnu oštetljivost upotrebom različitih metoda, od pojednostavljenih do složenih koje se inače upotrebljavaju u temeljnim pristupima pa se može reći da ih karakteriziraju značajke oba temeljna pristupa.

Oslanjajući se na više od jedne metode za procjenu potresne oštećljivosti, hibridni pristupi su vrlo prilagodljivi heterogenim podacima, jer omogućavaju, s obzirom na dostupne podatke o elementima rizika, odabrati onaj pristup/metodologiju koja će najbolje procijeniti potresno ponašanje promatranih zgrada. Naime, ako je razina informacija o zgradi detaljna, daje se prednost najnaprednijoj metodi u hibridnom pristupu, inače se usvaja pojednostavljen pristup (Novelli 2017).

Penelis i dr. (1989.) prvi su primijenili hibridni pristup i razvili krivulje oštećljivosti kombinirajući neelastične dinamičke proračune i bazu podataka o oštećenjima zgrada, nastalu nakon potresa u Solunu 1978. Za daljnje potrebe procjene oštećljivosti u Grčkoj nastavlja se razvijati metodologija utemeljena na hibridnom pristupu (Kappos i Panagopoulos 2010, Kappos i dr. 2006, Kappos i dr. 2002, Kappos i dr. 1998), a uključuje dostupne podatke o oštećenjima i konstrukcijskim tipologijama promatranog područja koji se kroz standardne postupke prema Whitmanu i dr. (1973.) kombiniraju s analitičkom statistikom štete dobivenom kroz nelinearne proračune tipičnih zgrada (Kappos i dr. 2006).

U hibridnom pristupu se za generiranje hibridnih matrica vjerojatnosti oštećenja i funkcija oštećljivosti kombiniraju statistike oštećenja nakon potresa s analitičkim statističkim proračunima oštećenja iz matematičkog modela određene tipologije zgrada (Calvi i dr. 2006). Na temelju prikupljenih podataka o oštećenjima zgrada nakon potresa u grčkim gradovima Solunu (Kappos i dr. 1998) i Volosu (Kappos i dr. 2002) generiran je velik broj tipologija zgrada koje mogu obuhvatiti većinu uobičajenih tipologija zgrada u južnoj Europi. Empirijski podatci o oštećenjima iz ovih potresa upotrijebljeni su i za izradu hibridnih krivulja oštećljivosti, kalibracijom analitičkih krivulja vjerojatnosti oštećenja, za zgrade od armiranog betona i nearmiranog ziđa koje mogu biti dostatne za upotrebu na spomenutom području Europe.

Pristup je usvojen i za procjenu potresnog rizika grada Soluna (Kappos i dr. 2006, 2008, 2010), gdje se krivulje sposobnosti nosivosti izvode metodom postupnog guranja i reduciraju proračunskim krivuljama sposobnosti nosivosti (engl. *capacity design curves*), a zatim upotrebljavaju zajedno s krivuljama vjerojatnosti oštećenja za izvođenje vjerojatnosti oštećenja. Kappos (1997.) zaključuje da je hibridni pristup još jedna opcija za razvoj pouzdanih krivulja sposobnosti nosivosti, ali ima nekoliko nedostataka. Jedan je npr. ekstrapolacija podataka o oštećenjima, zatim odnos između intenziteta potresa i razine oštećenja konstrukcije te velike aleatorne i epistemičke nesigurnosti koje rezultiraju značajnom disperzijom u vjerojatnosnom modelu.

Barbat i dr. (1996.) hibridni pristup primjenjuju za procjenu oštećljivosti tipologija zidanih zgrada u Barceloni (Španjolska) nakon potresa 1995. jačine VII. prema MSK ljestvici. Podatci o konstrukcijskim i nekonstrukcijskim oštećenjima prikupljeni su na licu mjesta te povezani s pripadnim indeksima oštećljivosti, proračunatim izrazima koje su predložili Benedetti i Petrini (1984.) za talijanske regije. Funkcije oštećljivosti za potrese intenziteta različitog od VII. izvedene su Monte Carlo simulacijom. Hibridni pristup upotrijebljen je i za procjenu oštećljivosti 60 hipotetskih najučestalijih tipova španjolskih zgrada. Također je upotrijebljena nasumična simulacija za generiranje karakteristika tipologija, a krivulje sposobnosti nosivosti izrađene su upotrebom pojednostavljenih analitičkih modela (Abrams 1992), za koje se smatra da nisu uvijek prikladni za simulaciju složenosti i varijabilnosti karakteristika i potresnog ponašanja zgrada.

Kako bi povezali upotrebu različitih pristupa s različitim razinama prikupljanja i kvalitete podataka dostupnih za određeno istraživanje, Lagomarsino i Giovinazzi (2006.) za projekt Risk-UE (www.risk-ue.net) predlažu hibridni pristup kojim se, s obzirom na razinu preciznosti koja se traži pri prikupljanju podataka, razmatraju i definiraju tri razine oštećljivosti (Lagomarsino 2006):

- razina 0: na temelju brze procjene pojedinačne zgrade
- razina 1: na temelju brzog istraživanja malog uzorka zgrade
- razina 2: na temelju detaljnog istraživanja pojedinačne zgrade.

Za analizu podataka razine 0 i razine 1 usvojen je empirijski pristup koji se temelji na makroseizmičkim modelima, dok se za podatke razine 2 upotrebljava mehanički model. Nedostatak specifične procedure za usporedbu rezultata dobivenih od različitih metoda koje nisu izravno povezane jedna s drugom, primarni je nedostatak ovog pristupa. Giovinazzi (2005.) predlaže hibridni pristup za proračun efektivnih troškova gubitka pojednostavljenim bilinearnim spektrima sposobnosti nosivosti. Krutost, nosivosti i duktilnost izvedeni su ovim pojednostavljenim pristupom, u odnosu na potresne propise.

Maiorani i dr. (2015.) predlažu hibridni pristup koji se temelji na integraciji softvera TREMURI (Lagomarsino i dr. 2013) s metodom indeksa oštećljivosti (engl. *Vulnerability Index Method* - VIM) (Vicente i dr. 2011, Formisano 2012). Pristup je primijenjen nakon potresa 2009. u L'Aquila za procjenu oštećenja bloka zgrada San Pio delle Camere u Abruzzu (Italija). Nedostatak ovog hibridnog pristupa je što program TREMURI zanemaruje izvanravnijske načine oštećenja na zidanim zgradama.

Nikolić i dr. (2022.) usvojili su hibridni pristup kao temeljni u razvoju inovativne metodologije za prevenciju, upravljanje i prevladavanje višestrukih opasnosti od prirodnih katastrofa. Ovim pristupom procijenili su indeksa oštećljivosti 110 zgrada u Kaštel Kambelovcu u okviru projekta PMO-GATE (engl. *Preventing, Managing and Overcoming Natural - Hazards Risk to miti GATE economic and social impact*) kombinirajući indekse oštećljivosti s vršnim ubrzanjem temeljnog tla, za različita granična stanja, proračunatim metodom postupnog guranja.

Metode koje se temelje na hibridnom pristupu mogu uključivati rezultate velikih eksperimentalnih testova koji mogu dostatno pouzdano oponašati stvarne konstrukcijske odzive (Muntasir Billah i Shahria Alam 2015). Mreža NEES (engl. *Network for Earthquake Engineering Simulation*) razvila je hibridnu metodu za generiranje krivulja oštećljivosti koja se temelji na kalibriranim analitičkim odzivima i hibridnoj simulaciji rezultata (Lin i dr. 2012). Razvijen je analitički 2D model armiranobetonskog okvira kome su testirani stupovi manjih dimenzija. U proračunu je upotrijebljeno srednje vršno ubrzanje temeljnog tla (PGA), a hibridne krivulje oštećljivosti razvijene su uz pretpostavku lognormalne distribucije.

Prema Langu (2012.), hibridne metode su prikladan alat za izradu studija procjene gubitaka čak i za područja s malo empirijskih podataka, međutim smatra da se ove metode trebaju temeljiti na nekim pojednostavljenjima (Lang 2012):

- (i) oštećljivosti dobivene na temelju analitičkih istraživanja moraju biti pretvorene upotrebom empirijskog korelacijskog odnosa iz fizičkog parametra (potresnog gibanja temeljnog tla) u parametar intenziteta
- (ii) za odgovarajuće tipove zgrada potrebno je generirati modele koji odražavaju stvarno oštećenje konstrukcija
- (iii) doprinosi karakteristika temeljnoga tla ne mogu se kvantificirati empirijskim procjenama oštećljivosti, predlaže se uklanjanje karakteristika tla i izrada prosječnog proračunskog modela odziva konstrukcije usporedivog s empirijskim matricama vjerojatnosti oštećenja
- (iv) procjene oštećljivosti dobivene na temelju empirijskih i analitičkih metoda nisu izravno usporedive (Calvi i dr. 2006).

Hibridni pristup može biti koristan za kalibraciju analitičkih rezultata, eksperimentalnih ili empirijskih podatke pri čemu se smanjuju proračunski postupci uz istovremeno povećanje pouzdanosti modela oštećljivosti (El- Maissi i dr. 2021). On može biti učinkovitiji od drugih jer spaja različite izvore podataka,

što omogućuje prevladavanje ograničenja i smanjenje pogrešaka drugih metoda (Andreotti i Lai 2019, Muntasir Billah i Shahria Alam 2015), osim toga uzima u obzir sve vrste nesigurnosti, što nije moguće empirijskim i analitičkim pristupom. Rezultati nastali iz ovog pristupa mogu biti subjektivni, ali pouzdaniji zbog validacija s rezultatima iz različitih pristupa (Rossetto i dr. 2014).

O primjeni hibridnog pristupa u različitim procjenama potresne oštećljivosti može se pročitati npr. u radovima Nikolić i dr. (2022.), Nikolić i dr. (2021.), El- Maissi i dr. (2021.), Andreotti i Lai (2019.), Muntasir Billah i Shahria Alam (2015.), Frankie (2013.), Lin i dr. (2012.), Dolce i dr. (2002.), Kappos i dr. (2002.), Barbat i dr. (1996.), Singhal i Kiremidjan (1996.).

Iako hibridni pristupi usvajaju upotrebu različitih metoda kako bi se prvenstveno prevladali nedostaci podataka, dosadašnja iskustva primjene ovoga pristupa (osobito u Grčkoj) pokazala su da ovaj pristup pouzdano procjenjuje potresnu oštećljivost zgrada samo ako su one detaljno pregledane i ako su podatci o konstrukcijskim karakteristikama i nastaloj šteti točno zabilježeni (Novelli 2017).

3. MODELIRANJE POTRESNE OPASNOSTI ZA PROMATRANO PODRUČJE

Dijelovi ovog poglavlja objavljeni su u sljedećim publikacijama:

Bulajić, Borko Đ.; Pavić, Gordana; Hadzima-Nyarko, Marijana.2022a.

PGA vertical estimates for deep soils and deep geological sediments – A case study of Osijek (Croatia).

Computers and Geosciences 158. 104985. doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104985.

Bulajić, Borko Đ. ; Hadzima-Nyarko, Marijana; Pavić, Gordana. 2022b.

PGA estimates for deep soils atop deep geological sediments—An example of Osijek, Croatia. Geomechanics and Engineering 30 /3. 233-246. doi:10.12989/gae.2022.30.3.233.

Bulajić, Borko Đ.; Hadzima-Nyarko, Marijana; Pavić, Gordana.2021a.

Horizontal UHS Amplitudes for Regions with Deep Soil Atop Deep Geological Sediments—An Example of Osijek, Croatia. Applied Sciences 11 /14. 6296. doi:10.3390/app11146296.

Bulajić, Borko Đ.; Hadzima-Nyarko, Marijana; Pavić, Gordana.2021b.

Vertical to Horizontal UHS Ratios for Low to Medium Seismicity Regions with Deep Soil atop Deep Geological Sediments—An Example of the City of Osijek, Croatia.

Applied Sciences, 11 /14. 6296. doi:10.3390/app11156782.

Pavić, Gordana; Hadzima-Nyarko, Marijana; Bulajić, Borko Đ.; Jurković, Željka. 2020a.

Development of Seismic Vulnerability and Exposure Models—A Case Study of Croatia.

Sustainability 12/3. 973. doi:10.3390/su12030973.

Pavić, Gordana; Hadzima-Nyarko, Marijana; Bulajić, Borko Đ. 2020b.

A Contribution to a UHS-Based Seismic Risk Assessment in Croatia—A Case Study for the City of Osijek.

Sustainability 12/5. 1796. doi:10.3390/su12051796.

U poglavlju su detaljno objašnjena predložena unaprjeđena metodologije predviđanja potresne opasnosti te njezina primjena na promatranom području. Prikazani su rezultati provedenog probabilističkog predviđanja potresne opasnosti: UHS spektri i karte potresne opasnosti te atenuacijske jednadžbe predložene za generiranje istih.

Proučavanje postojećih istraživanja i predviđanja potresne opasnosti ukazala su na nepostojanje istih za područja s malom do umjerenom seizmičnošću pa je zbog toga za promatrano područje odabrano šire područje koje obuhvaća i grad Osijek, a koje karakterizira manja potresna aktivnost u odnosu na ostale dijelove Republike Hrvatske. Osim toga, temeljno tlo grada Osijeka sastavljeno je od slojeva

dubokih naslaga lokalnog tla i dubokih geoloških sedimenata čije se istodobno uzimanje u obzir kod procjena potresne opasnosti najčešće zanemaruje, zato je naglasak provedenih proračuna potresne opasnosti u ovom radu na ovakvim geološkim uvjetima u okruženju promatrane lokacije.

3.1. Zašto istraživanje potresne opasnosti za područja male do umjerene seizmičnosti?

Sve se više naglašava potreba za pouzdanijim procjenama potresne opasnosti. Novija istraživanja potresnog rizika ukazuju na prilično veliku potresnu oštetljivost brojnih starijih zgrada koje su izgrađene prije prvih propisa za građenje u potresnim područjima na području Republike Hrvatske i šire regije (Pavić i dr. 2020a, Pavić i dr. 2020b). To zahtijeva preispitivanje postojećih karata potresne opasnosti i ponovnu procjenu horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA te spektralnih ordinata pseudoubzranja (u daljnjem tekstu skraćeno PSA (engl. *Peak spectral amplitude*)) za ova područja.

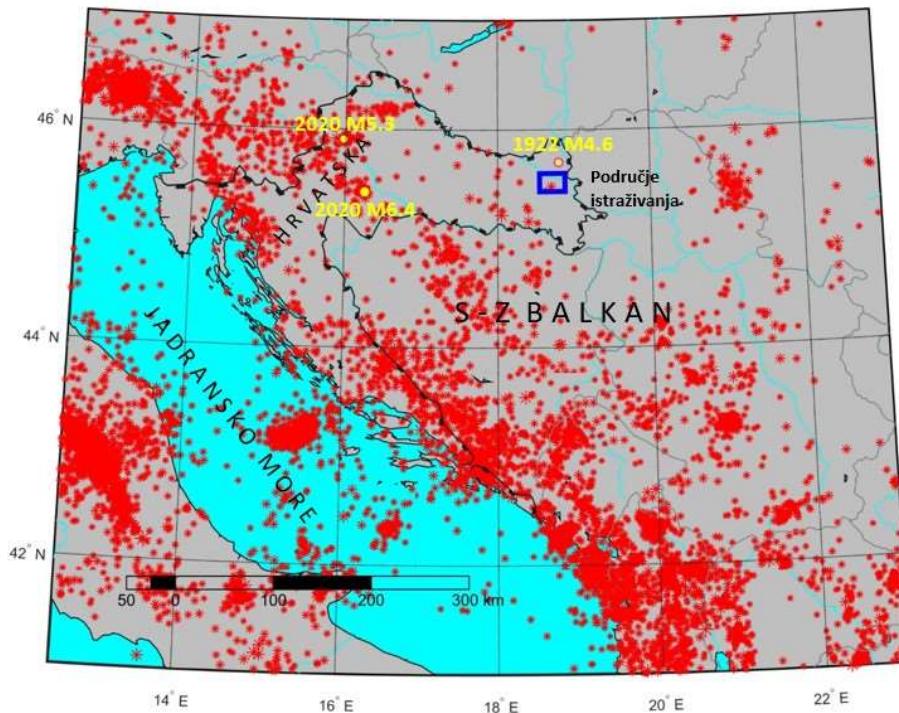
Temelj za pouzdanu realizaciju toga izazova unaprjeđenje je postojećih metodologija procjena potresne opasnosti te generiranje nove poboljšane metodologije, koja mora upotrijebiti napredne pristupe i tehnike, uvažiti najnovije spoznaje, obuhvatiti sve potresne scenarije koji mogu nastati, uzeti u obzir geološke, tektonske, seizmološke te sve druge bitne i specifične parametre promatranog područja koji utječu na preciznost rezultata predviđanja potresne opasnosti.

Promatrano područje smješteno je u dodirnoj zoni između središnjeg i južnog dijela Panonskog bazena. Karakterizira ga mala do umjerena seizmičnost, što potvrđuju i podatci prikazani na slici 3.1. Crvenim kružićima prikazani su epicentri regionalnih potresa zabilježeni između 1900. i travnja 2021. (USGS 2021) i to samo oni s $M_w \geq 3,0$. Epicentar najvećeg povijesnog potresa na promatranom području (1922. s $M = 4,6$) te nedavni (2020.) potresi u Zagrebu ($M = 5,3$) i Petrinji ($M = 6,4$) prikazani su žutim kružićima.

Gotovo na cijelom području Republike Hrvatske vrijednostima PGA/PSA u najvećoj mjeri doprinosi lokalna seizmičnost. Na temelju rezultata nekoliko provedenih studija (Lee i dr. 2016a, Lee i dr. 2016b) zaključeno je da potresni valovi jakih udaljenih potresa s kratkim periodima oscilacija, poput onih koje se događaju npr. u području Vrancea u Rumunjskoj, ne utječu značajno na vrijednosti PGA/PSA.

Potresni valovi s kratkim periodima oscilacija brzo slabe i kada se šire od udaljenih izvora njihov je doprinos ukupnoj potresnoj opasnosti manji (čak i u slučaju vrlo jakih potresa) od doprinosa koji daju

lokalni potresni događaji. Međutim, dominantan doprinos ukupnoj seizmičnosti područja očekuje se od potresnih valova dugih i srednjih perioda oscilacija tih istih snažnih udaljenih potresa.



Slika 3.1 Epicentri regionalnih potresa zabilježeni između 1900. i travnja 2021. (USGS 2021), granice centralnog promatranog područja (plavi okvir), epicentri: najvećeg povijesnog potresa na promatranom području (1922. s $M = 4,6$) te nedavnih (2020.-te) potresa u Zagrebu ($M = 5,3$) i Petrinji ($M = 6,4$) (prema Pavić i dr. 2020a)

Većina potresa koji mogu doprinijeli lokalnoj seizmičnosti promatranog područja su plitki potresi s dubinom žarišta manjom od 18 km (Herak i dr. 1996, Herak i Herak 1990).

Na intenzitet potresnog djelovanja značajno utječe sastav temeljnog tla. Temeljno tlo promatranog područja sastavljeno je od slojeva dubokih naslaga lokalnog tla i dubokih geoloških sedimenata. Duboki geološki sedimenti ispod promatranog područja imaju dubine od 1,2 do 2,7 km, a sastavljeni su od slojeva lapora, pješčenjaka, konglomerata i vapnenca (Magaš i dr. 1996) koji potječu iz Panonskog mora. Prema razredbi dubokih geoloških slojeva Trifunca i Bradyja (Trifunac i Brady 1975a, b), ti slojevi mogu se razvrstati kao duboki geološki sedimenti.

Iako se čini da su procjene PGA pouzdano definirane, HRN EN 1998-1:2011 u pristupu zanemaruje uključivanje i istodobno razmatranje varijacija dubokih geoloških slojeva ispod lokalnog temeljnog tla,

koje snažno utječe osobito na spektralne amplitude s dugim periodima oscilacija. Ovo zanemarivanje može rezultirati velikim razlikama između stvarnih i predviđenih vrijednosti PGA/PSA za odabrano područje.

Proračun potresne opasnosti za određeno područje procjena je vjerojatnosti prekoračenja odabranog parametra koji karakterizira gibanje temeljnog tla. Vršno ubrzanje temeljnog tla i spektralne ordinate pseudoubrzanja, parametri su koji se najčešće odabiru kod procjene potresne opasnosti. Najveći utjecaj na pouzdanost rezultata njihove procjene ima odabir empirijskih atenuacijskih jednadžbi koje povezuju očekivane iznose PGA (ili PSA) s magnitudom potresa, udaljenosti lokacije od izvora potresa, dubinom žarišta, sastavom temeljnog tla i tipom rasjeda.

Atenuaciju potresnih valova koja nastaje u sedimentnim bazenima, kakvo je promatrano područje, istraživali su mnogi istraživači upotrebljavajući različite analitičke i proračunske modele (Zhu i dr. 2018, Zhu i Thambiratnam 2016, Zhu i dr. 2016, Stamati i dr. 2016, Ermert i dr. 2014, Faccioli i Vanini 2003). Međutim, i danas su karte potresne opasnosti izrađene na temelju podataka o potresnom ponašanju samo plitkih slojeva temeljnog tla. Za njihovu izradu i dalje se upotrebljavaju empirijske atenuacijske jednadžbe za skaliranje vršnih vrijednosti ubrzanja temeljnog tla koje uključuju samo učinke nekoliko desetaka metara lokalnog tla zanemarujući utjecaj dubljih geoloških slojeva (Douglas 2003), unatoč postojanju istraživanja koja ukazuju da rezonancija temeljnog tla nije povezana samo s prosječnom brzinom posmičnih vala u gornjih 20 ili 30 m temeljnog tla (Peng i dr. 2019).

Osim toga, za proračune potresne opasnosti najčešće se odabiru atenuacijske jednadžbe koje su izvedene upotrebom podataka s područja koja su geološki i tektonski slična ili dostatno usporediva te koje su izvedene za veliki raspon relativno relevantnih magnituda i udaljenosti (netočni ili nepouzdana podaci, upotreba ljestvica različitih veličina i sl.), kako bi se potrebne ekstrapolacije svele na minimum.

Nekoliko nedavno provedenih regionalnih mikrozoniranja (Bulajić i dr. 2018, Lee i dr. 2017a, Lee i dr. 2017b, Lee i dr. 2017c, Lee i dr. 2016a, Lee i dr. 2016b) pokazalo je da se empirijska predviđanja temeljena na jednadžbama skaliranja koje uzimaju u obzir duboke geološke slojeve i lokalno tlo izvrsno slažu sa zabilježenim gibanjima tla u regiji.

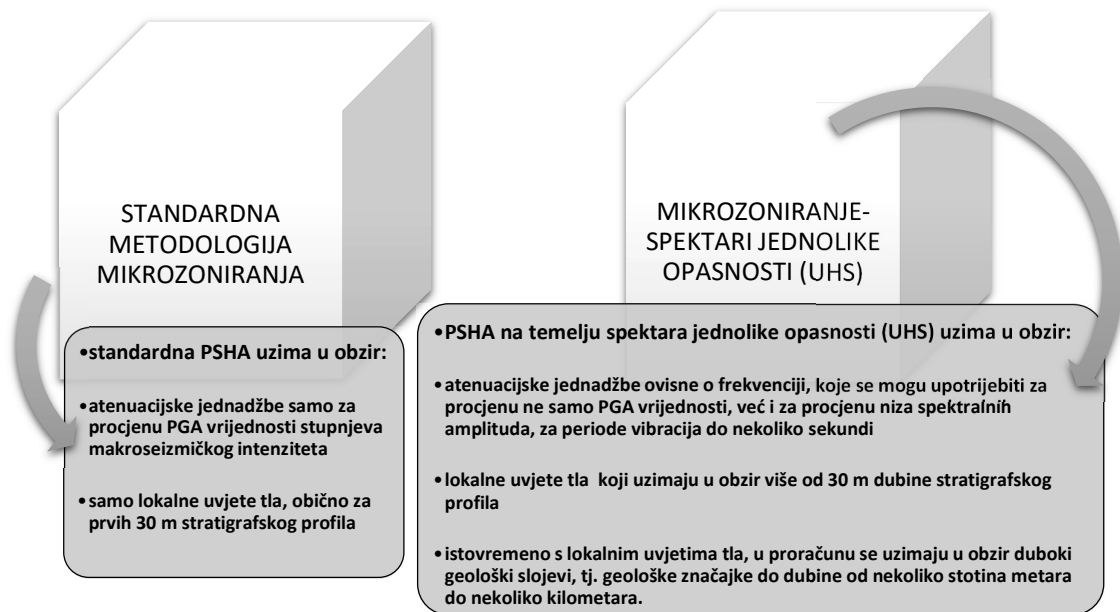
Na temelju navedenog može se zaključiti da su procjene potresne opasnosti, ne samo za područja s malom do umjerenom seizmičnošću, upitne pouzdanosti, da ih treba preispitati i poboljšati te da se

aktivnosti na ostvarenju ovih ciljeva trebaju temeljiti na poboljšanoj metodologiji procjene potresne opasnosti, a u konačnici i potresnog rizika.

Sažeta grafička usporedba između standardne metodologije mikrozoniranja i unaprjeđene metodologije mikrozoniranja utemeljene na spektrima jednolike opasnosti (UHS) i atenuacijskim jednadžbama koje istovremeno uzimaju u obzir karakteristike lokalnog tla i dubokih geoloških slojeva, a koja je primijenjena u ovom istraživanju te se predlaže kao unaprjeđenje postojeće metodologije, prikazana je na slici 3.2.

Područja male do umjerene lokalne seizmičnosti najčešće nisu interesantna istraživačima potresnog rizika zbog manjeg broja potresa, osobito onih „značajnijih“ magnituda, međutim i manja snaga potresa uz određene kombinacije lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva može izazvati znatne materijalne i ljudske štete.

Ne treba zanemariti ni snažne udaljene potresne događaje čiji valovi dugih i srednjih perioda oscilacija na dubokim lokalnim i geološkim slojevima temeljnog tla promatranog područja, mogu otkriti svu veličinu zanemarivanja značaja potresne opasnosti područja, kako na starijim tako i na novijim zgradama. Stoga je neupitna potreba za izradom novih karata mikrozoniranja promatranog područja.

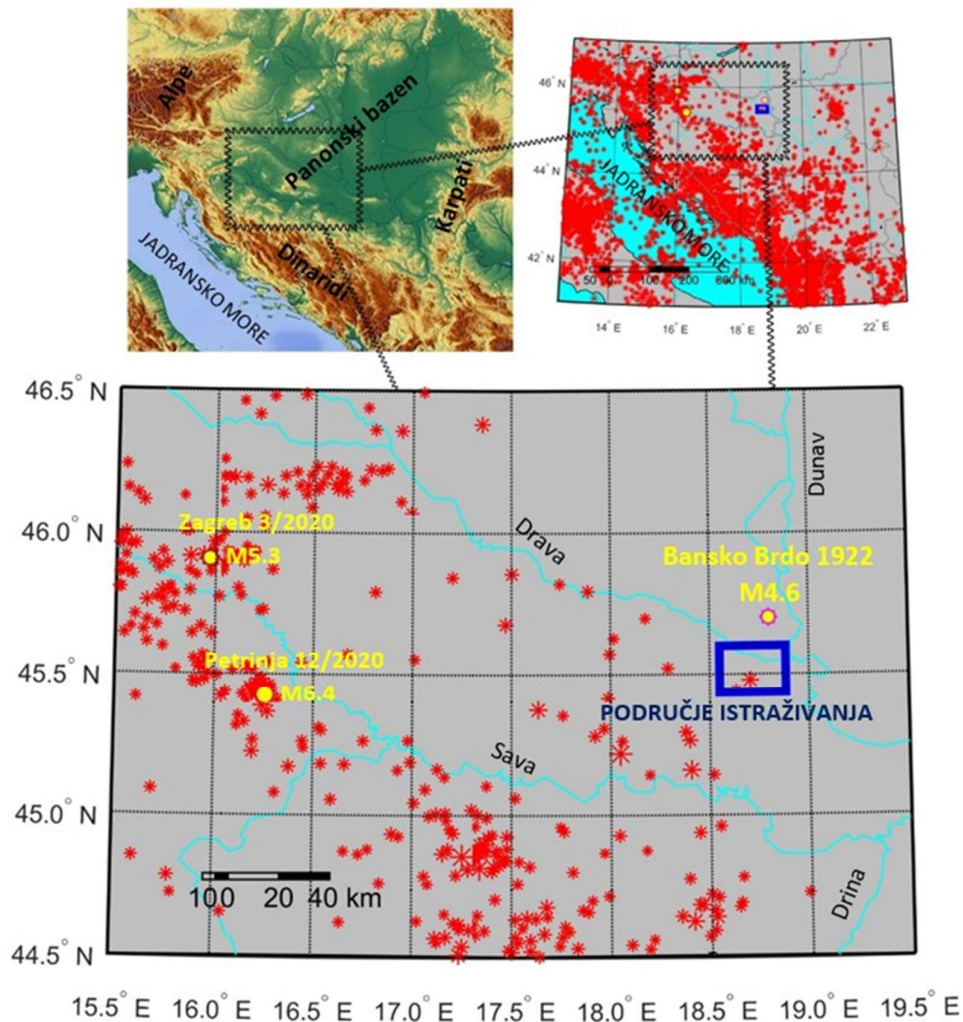


Slika 3.2 Usporedba standardne metodologije mikrozoniranja i prijedloga unaprjeđenja
(prema Pavić i dr. 2020b)

Pouzdanije definiranje potencijalnog potresnog djelovanja za promatrano područje, u ovom radu uključuje pažljivije tumačenje i istodobno uzimanje u proračun karakteristika lokalnih i dubokih geoloških slojeva promatranog područja i njihovog utjecaja na PGA i spektralne oblike PSA, suvremenim PSHA pristupom koji se temelji na spektrima jednolike opasnosti.

3.2. Promatrano područje

Za promatrano područje odabrano je šire područje grada Osijeka (označeno na slici 3.3 plavim okvirom) smješteno u sjeveroistočnom dijelu Republike Hrvatske.



Slika 3.3 Promatrano područje, smještaj te seizmološko-geološke karakteristike (prema Bulajić i dr. 2021a)

Globalno geografski promatrano područje je u dodirnoj zoni između Središnjeg i Južnog dijela Panonskog bazena, područja čija se pojavnost seizmičnosti može okarakterizirati kao rijetka, a jakosti potresnih događaja kao male do umjerene (Markušić i dr. 2016, Markušić 2008, Markušić i Herak 1999, Herak i dr. 1996).

Panonski bazen, smješten između Alpa, Dinarida i Karpata (vidi sliku 3.3 gore lijevo) je ravnica nastala kad je Panonsko more (koje je geografski dostiglo svoj najveći doseg tijekom pliocena) presušilo. Bazen je sliv koji se proširio tijekom miocena u kojemu i danas ima mnogo rijeka i jezera, a rijeke Dunav i Tisa ga dijele otprilike na pola (Balázs i dr. 2016). Zato je temeljno tlo promatranog područja sastavljeno od dubokih slojeva pjeskovito-ilovasto-lesnog lokalnog tla i dubokih naslaga geoloških sedimenata (Banak i dr. 2016).

3.2.1. Seizmološke karakteristike

Promatrano područje (Slika 3.3, gore desno) smješteno je u dodirnoj zoni između Središnjeg i Južnog dijela Panonskog bazena, u području male do umjerene seizmičnosti (Markušić i dr. 2016, Markušić 2008, Markušić i Herak 1999, Herak i dr. 1996).

Većina teritorija Republike Hrvatske nalazi se u području potresno jako aktivnog mediteransko transazijskog pojasa, što potvrđuju razorni potresi zabilježeni u prošlosti (u gradu Cissu 361., Dubrovniku 1667., Zagrebu 1880., Stonu 1996.), ali i nedavni u Zagrebu i Petrinji. Nepravilno izdužen „U“ geografski oblik teritorija Republike Hrvatske i različitosti koje nosi sa sobom razlog su velikih varijacija seizmičnosti. Dok su jugoistočna (priobalna) i sjeverozapadna (kontinentalna) područja Republike Hrvatske područja velike seizmičnosti, sjeveroistočno područje (koje je dio Panonskog bazena) karakterizira rijetka pojava jačih potresnih događaja (Markušić i Herak 1999), međutim ovo područje je zbog geoloških karakteristika temeljnog tla osjetljivo na jake potresne događaje iz nerijetkih udaljenih potresnih izvora koji ga okružuju.

Priobalno potresno područje koje se prostire od granice sa Slovenijom do Dubrovnika, područje je u kojem su se događali, ali su mogući i u budućnosti potresi razornih intenziteta zbog sudara Jadranske ploče i Dinarida (Aljinović i dr. 1984). Prema opisima razaranja potresa na Pagu (koji je grad Cissu potpuno srušio u more) i u Dubrovniku (koji je gotovo potpuno uništio grad i u kojemu je poginulo između 3000 do 5000 ljudi), može se zaključiti da su intenziteti ovih potresa prema MCS ljestvici iznosili

između X. – XII. stupnja. Najjači potres u novijoj prošlosti Republike Hrvatske dogodio se također u priobalnoj potresnoj zoni, u Stonu, s intenzitetom koji je iznosio IX. stupnjeva prema MCS ljestvici.

U sjeverozapadnoj kontinentalnoj potresnoj zoni osobito je trusno Zagrebačko područje koje je pogodilo nekoliko osobito jakih potresa 1502., 1880., 1905., 1906., od kojih je najjači onaj iz 1880. čija je magnituda iznosila $M = 6,3$ po Richteru (Prelogović i Cvijanović 1981). Svi navedeni zagrebački potresi imali su epicentar u istočnim dijelovima Zagrebačke gore, nedaleko od Kašine i Markuševca.

Značajniji potresi u sjeverozapadnoj kontinentalnoj zoni zabilježeni su 1511. u Slunju (stupnjeva intenziteta IX. – X. prema MCS ljestvici), 1738. u Međimurju (u blizini Šenkovca) stupanj intenzitet potresa u epicentru iznosio je VII prema MSK ljestvice, 1757. u Virovitici (stupanj intenziteta IX prema MCS) (Nola i dr. 2013) i najnoviji u Petrinji 2020. stupnja intenziteta u epicentru VIII. prema EMS-u (vidi sliku 3.1) na kojoj su, osim za navedene potresne događaje, prikazani epicentri svih regionalnih potresa s $M_w \geq 3,0$ zabilježeni između 1900. i travnja 2021.).

Promatrano područje kao središnji dio Panonskog bazena slabije je izražene unutarpločne tektonske i potresne aktivnosti. Najbliža područja pojačane potresne aktivnosti nalaze se jugozapadno od promatranog područja (≈ 70 km) na Dilj gori i sjeverno prema Belom Manastiru (≈ 30 km) na Banskom brdu, gdje su do sada zabilježeni potresi magnituda od $M = 5,0 - 5,7$ prema Richteru, odnosno stupnja intenziteta u epicentralnom području oko VIII. prema MCS ljestvice (Markušić i dr. 2016, Markušić 2008, Markušić i Herak 1999, Herak i dr. 1996).

U tablici 3.1 prikazani su podatci za nekoliko rijetkih „značajnijih“ potresa zabilježenih u posljednjim desetljećima u radijusu ≈ 30 km oko promatranog područja koji se mogu okarakterizirati kao slabi. Najvećim intenzitetom na promatranom području manifestirao se potres koji se je dogodio 24. studenoga 1922. u okolici Kneževih Vinograda. Intenzitet u epicentralnom području iznosio je VII. – VIII. stupnjeva prema MCS, a u Osijeku oko VII stupnjeva prema MCS. Prema europskom katalogu potresa SHARE (Stucchi i dr. 2013), imao je magnitudu $M_l = 4,9$, dok je prema UNESCO-ovom katalogu iz 1974. (UNESCO 1974), magnituda procijenjena na $M = 5,1$ prema Richteru.

Dubine Mohorovičićeva diskontinuiteta povećavaju se s približno 25 km ispod Panonskog bazena do približno 45 km pod Dinaridima (Stipčević i dr. 2020, Bielik i dr. 2018, Aljinović i dr. 1987, Skoko i dr. 1987) pa potresni događaji na području Republike Hrvatske nastaju na plitkim hipocentralnim

dubinama do približno 18 km (Herak i dr 1996, Herak i Herak 1990), a na promatranom području i manjim, što je vidljivo i iz tablice 3.1.

Tablica 3.1 Potresi na promatranom području (Φ i λ geografske koordinate, h dubina hipocentra, M magnituda (Richterova), Δ epicentralna udaljenost, I_0 epicentralni intenzitet)

Datum godina	Datum		Epicentar		h (km)	M	Δ (km)	I_0 (°MCS)
	dan	mjesec	Φ	λ				
1911	1	5	45,52	18,67	10	3,2	28	IV
1922	11	24	45,7	18,8	18	5,1	39	VII-VIII
1926	7	19	45,35	18,94	10	3,1	4	IV
1972	8	24	45,22	19,00	10	3,5	16	IV-V
1993	10	13	45,27	18,74	20	2,8	23	V
2003	5	22	45,51	18,86	1	1,8	19	-

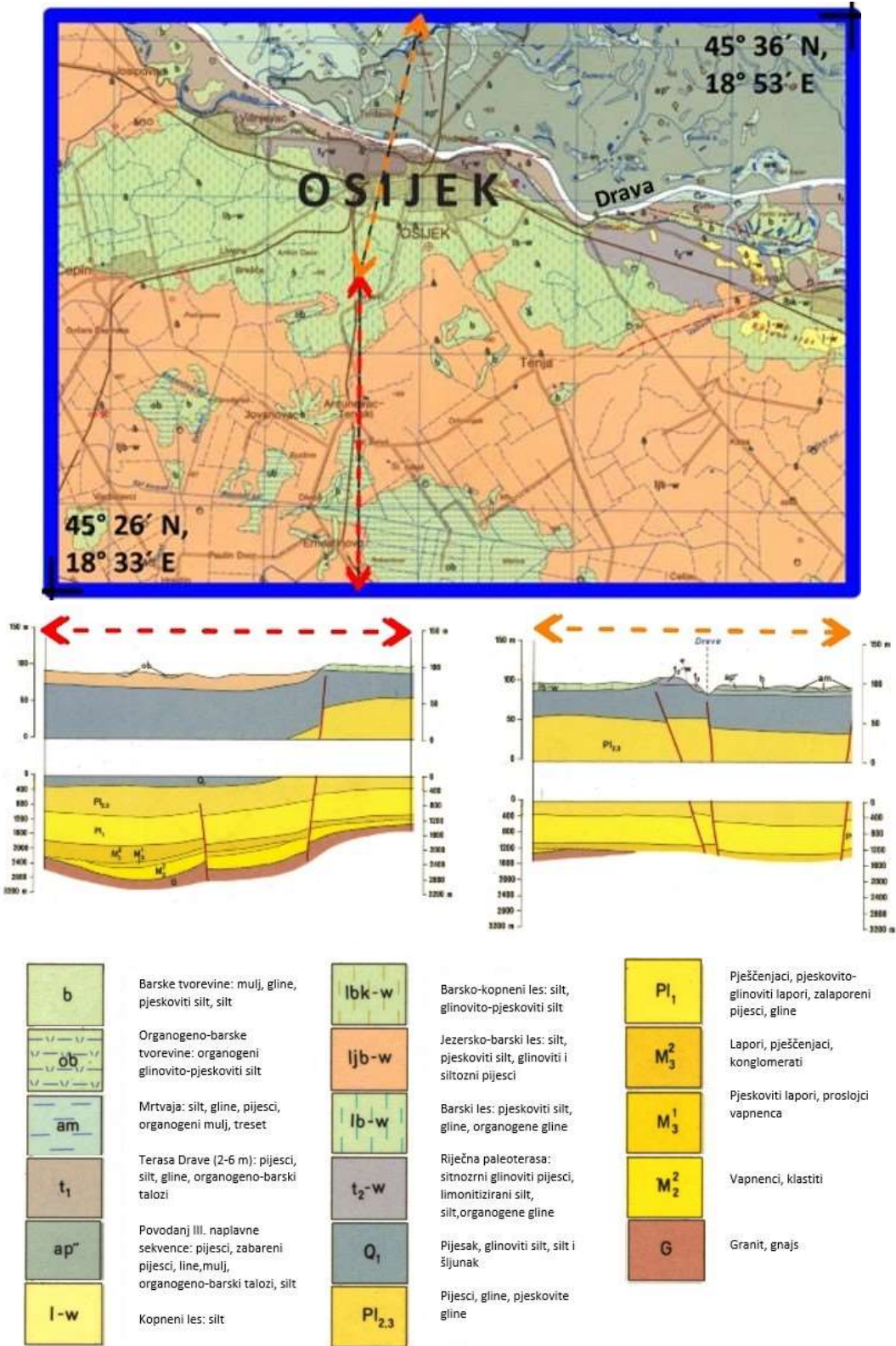
3.2.2. Geološko-strukturne karakteristike

Reljef promatranog područja pretežno je nizinski, oblikovan rijekama Dunavom, Dravom i Savom te njihovim pritocima. Geomorfološki može se definirati kao oblik riječne terase.

Područje je određeno hidrogeološki, naime leži na aluvijalnom vodonosniku Drave i Dunava, debljine uglavnom više od 150 m, koji je prekriven ilovasto lesnim slojem, debljine 10 – 50 m, u kojem se izmjenjuju dominantni slojevi srednje do sitno zrnatog pijeska te slojevi gline i praha. Najgušći lesni slojevi debljine više od 50 m nalaze se u blizinama rijeka (Banak i dr. 2016). Ovi plitki geološki slojevi, osim velikih razlika u konzistenciji tla, često su izloženi visokim razinama podzemne vode.

Uzdužni geološki profili promatranog područja prikazan je na slici 3.4. Tlo uz porječje rijeke Drave, tzv. Terasa Drave, pojas je pjeskovitog tla koji se poput granice proteže između sjevernih pjeskovitih, glinovitih i šljunkovitih tala i tala južno od rijeke koja sačinjavaju barsko-organske tvorevine poput mulja i silta te južnije jezersko barski les s glinovitim i sitnozrnatim pijescima.

U lokalnim slojevima temeljnog tla, od mlađih naslaga, posebno se ističu pleistocenski, nastali procesima smrzavanja, odmrzavanja i trošenja tadašnjeg površinskog tla, stvarajući pokrov koji je u doba otapanja klizio prema nižim krajevima.



Slika 3.4 Uzdužni geološki profili promatranog područja (Magaš i dr. 1987).

Prema geološko-litološkoj karti Osječko-baranjske županije (Geološka karta RH), površinske slojeve područja čine kvartarne naslage (pretežito pijesci, gline, mjestimice šljunci i uz površinu kopneni i barski prapor) debljina između 150 – 180 m (Pikija i dr. 1991, Magaš i dr. 1987). Na kvartarne naslage nastavljaju se slojevi lapora, pješčenjaka, konglomerata i u padinskom dijelu vapnenci neogenske starosti. U nekim područjima, njihove debljine dosežu 3000 m (Velić i Vlahović 2009).

Duboki geološki sedimentni slojevi nalaze se gotovo ispod cijelog promatrano područje, rijetka iznimka nalazi se približno 30 km sjeverno od Osijeka, na Banskom brdu, koje je jedino povišeno područje u blizini i čije se temeljno tlo sastoji od krutog lokalnog tla na geološkoj stijeni. Proteže se 20 km, u smjeru SI-JZ, smatra se dijelom istaknute strukture Villany u Mađarskoj. Na njemu su pronađeni izdanci geoloških stijena bazalt-andezit i piroklastika (Pikija i dr. 1991).

Promatrano područje se prema geološko strukturnim pokazateljima nalazi na Dravskom rasjedu koji je nastavak rasjeda Vukovar – Novi Sad. Na površini rasjeda odražavaju se terasasti dijelovi osobito duž ravnjaka. Na boranje stijena u dubini i kompresiju prostora utječu uzdignute strukturne jedinice Krndija – Dilj Gora – Đakovački ravnjak i Vukovarski ravnjak – Fruška gora te spuštene jedinice Dravski, Bački i Slavonsko-srijemski bazen.

Položaji stijena različite gustoće, koji izgrađuju prostore strukturnih jedinica, preduvjet su za moguće deformacije strukturnog sklopa. Prema Grünthalu i Stormeyeru (1992.), te Badeu (1999.), u promatranom području maksimalno tlačno naprezanje ima orijentaciju oko 35 – 215°.

Duž krila strukturnih jedinica Krndija – Dilj gora – Đakovački ravnjak i Vukovarski ravnjak – Fruška gora, prisutno je stlačivanje prostora uz pojavu reversnih rasjeda. Maksimalno tlačno naprezanje orijentirano je uglavnom dijagonalno do poprečno na smjer pružanja strukturnih jedinica. Posljedica toga je boranje stijena u dubini i reversni pomaci krovinskih krila rasjeda.

Pojava dodatnih rasjeda prema sjeveru ili jugu u prostorima strukturnih jedinica uzrokovana je stlačivanjem prostora. Najveći tlak javlja se na Dilj gori, u lokalnim strukturama oko Đakova, duž Dravskog rasjeda sjeverno od Đakova, u prostoru lokalne strukture Vukovar i u Fruškoj gori.

Seizmotektonski najaktivnijim dionicama smatraju se rasjedi duž kojih se događaju reversni pomaci krila poprečni na njihovo pružanje. Najaktivniji rasjedi, odnosno njihovi dijelovi su:

– Dravski rasjed između sela Budimci i Semeljci

- rasjed Vukovar – Novi Sad između Vukovara i Šarengrada
- rasjed Slavonski Brod – Vinkovci – Fruška gora između sela Mirkovci i Đeletovci
- rasjed Požega – Levanjska Varoš duž sjevernih obronaka Dilj gore.

Stlačivanje prostora izazivaju tektonski pomaci, boranje i reversni pomaci kompleksa stijena u dubini duž područja rasjeda koji dopiru do površine. Upravo se stlačivanje povezuje s potresnim izvorima koji obuhvaćaju prostore koncentracije potresa i pojave potresa relativno veće jakosti.

Na temelju seizmoloških i geoloških parametara, najjači potres u potresnim izvorima koji obuhvaćaju prostore strukturnih jedinica Krndija – Dilj gora – Đakovački ravnjak i Vukovarski ravnjak – Fruška gora, prema Wells i dr. (1994.), mogu biti potresi magnitude $M = 6,2$ prema Richteru. Ako se ovakvim predviđanjima potresnih djelovanja pribroje relativno loši uvjeti tla, s obzirom na djelovanje potresnih sila (rastresito tlo u dolini rijeke i visoka razina podzemne vode), utjecaj djelovanja potresnih sila na tlo i građevine može biti znatan i treba ga ozbiljno uvažavati kod planiranja namjene prostora, projektiranja novih i pojačanja i obnove postojećih zgrada.

3.3. Karte potresne opasnosti

U bivšoj SFRJ (Socijalističkoj Federativnoj Republici Jugoslaviji) izrađen je 1964. prvi Privremeni tehnički propis za građenje u potresnim područjima (Službeni list SFRJ 39/64 1964). Za njegovu izradu upotrijebljena je Karta potresnog zoniranja iz 1950. sastavljena na temelju najvećih povijesnih makroseizmičkih intenziteta koji su do tada zabilježeni. Privremena potresna karta zoniranja, također sastavljena na temelju najvećih uočenih intenziteta, postala je 1982. sastavni dio Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju visokih zgrada u potresnim područjima iz 1981. (Službeni list SFRJ 31/81, 49/82 1982).

Šest novih karata za povratna razdoblja od 50, 100, 200, 500, 1000 i 10 000 godina izrađeno je 1987. i službeno uvršteno u propis 1990. Karta potresnog zoniranja za povratno razdoblje od 500 godina (Službeni list SFRJ 31/81, 49/82, 29/83, 21/88, 52/90 1990) usvojena je 1990. kao mjerodavna za projektiranje objekata visokogradnje i postala je sastavni dio Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima iz 1981. zamijenivši privremenu kartu iz 1982.

Karta iz 1990. bila je prva koja je sastavljena upotrebom PSHA pristupa, međutim potresna opasnost još uvijek se izražavala kroz stupnjeve makroseizmičkog intenziteta i uzimajući u obzir prosječne uvjete temeljnog tla. Vrijednosti PGA koje odgovaraju intenzitetima s karte iz 1990. upotrebljavane su za projektiranje zgrada I. i II. razreda (stambenih zgrada, škola, hotela, muzeja, kina itd.) (Službeni list SFRJ 31/81, 49/82, 29/83, 21/88, 52/90 1990, Službeni list SFRJ 31/81, 49/82 1982, Službeni list SFRJ 39/64 1964).

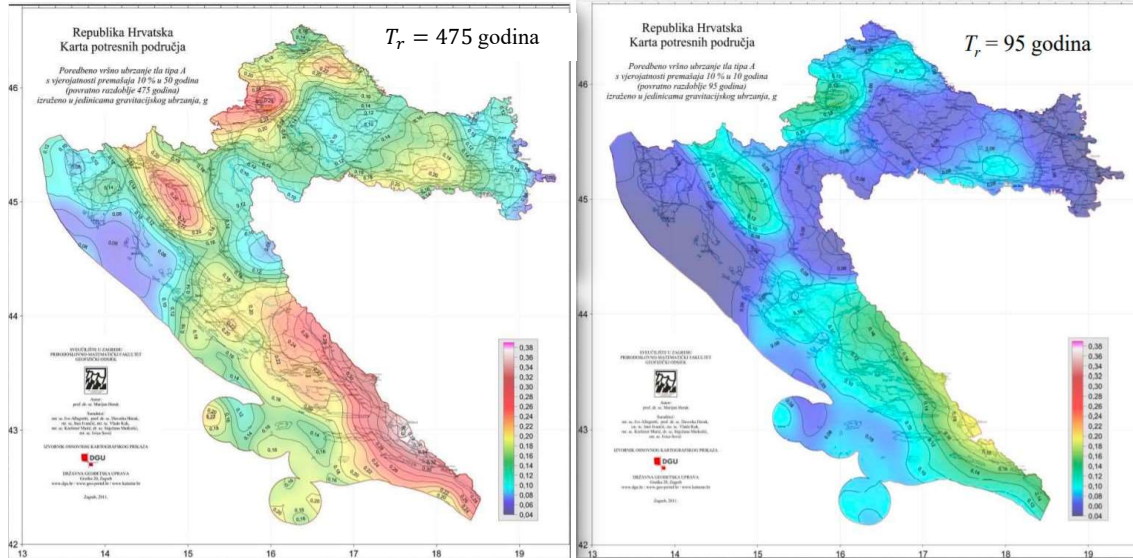
U tablici 3.2 prikazani su stupnjevi makroseizmičkih intenziteta za pet najnaseljenijih gradova u Hrvatskoj koji su prikazani na kartama potresnog zoniranja iz 1950., 1982. i 1990.

Tablica 3.2 Stupnjevi makroseizmičkih intenziteta za pet najnaseljenijih gradova u Hrvatskoj, prema kartama potresnog zoniranja iz 1950. (Službeni list SFRJ 39/64 1964), 1982. (Službeni list SFRJ 31/81, 49/82 1982) i 1990. (Službeni list SFRJ 31/81, 49/82, 29/83, 21/88, 52/90 1990) (prema Pavić i dr. 2020b)

Grad	1950.	1982.	1990.					
			50 god.	100 god.	200 god.	500 god.	1000 god.	10000 god.
Zagreb	VIII-IX	VIII	VII	VII-VIII	VIII	VIII-IX	IX	IX
Rijeka	IX	VII	VI	VII-VIII	VIII	VIII	VIII-IX	IX
Split	VII	VI	VII	VII	VII	VIII	VIII	VIII
Osijek	VIII	VII	VI	VII	VII	VIII	VIII	VIII
Zadar	IX	VIII	VI	VII	VII	VIII	VIII	VIII

Nove karte potresne opasnosti za Republiku Hrvatsku (Herak i dr. 2012) izrađene 2011. utemeljene su na PSHA pristupu, pri čemu je potresna opasnost po prvi puta direktno predstavljena vrijednostima PGA (vršnog ubrzanja temeljnog tla). Ove su karte namijenjene za upotrebu kod projektiranja potresno otpornih građevina zajedno sa spektrima Eurocoda 8 pa su usvojene i za upotrebu s Hrvatskim nacionalnim dodatkom HRN EN 1998-1:2011 (HRN EN 1998-1:2011/NA:2011). U skladu s HRN EN 1998-1:2011 sastavljene su dvije karte (Slika 3.5), jedna za PGA vrijednosti s povratnim razdobljem od 95 godina, tj. s 10 % vjerojatnosti prekoračenja u 10 godina, a druga za PGA vrijednosti s povratnim razdobljem od 475 godina, odnosno 10 % vjerojatnosti prekoračenja u 50 godina. Karta potresnih područja Republike Hrvatske za povratno razdoblje od 95 godina odgovara zahtjevu HRN EN 1998-

1:2011 za ograničenim oštećenjem, dok karta potresnih područja Republike Hrvatske za povratno razdoblje od 475 godina odgovara zahtjevu da ne smije doći do rušenja.



Slika 3.5 Karte potresne opasnosti Republike Hrvatske za povratna razdoblja 475 (lijevo) i 95 (desno) godina (Herak 2012)

Obje karte predstavljaju potresno djelovanje za tlo tipa A, definirano u HRN EN 1998-1:2011 kao stijena ili slične geološke formacije (uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini) s prosječnom brzinom posmičnog vala u gornjih 30 m većom od 800 m/s. Niti jedna od najnovijih karata ne uzima u obzir karakteristike dubokih geoloških slojeva ispod promatranih lokacija.

Prema karti potresne opasnosti Republike Hrvatske, horizontalne vrijednosti PGA za promatrano područje su do 0,12 g za povratno razdoblje od 475 godina, a za povratno razdoblje od 95 godina 0,04 – 0,06 g. Proračunske vrijednosti PGA u vertikalnom smjeru, a_{vg} , procjenjuju se množenjem horizontalnih vrijednosti PGA, a_g , očitanih s karata potresne opasnosti s koeficijentom za procjene vrijednosti PGA koji ovisi o tipu spektra (Tablica 3.3).

Vrijednosti PGA u vertikalnom smjeru za promatrano područje za spektar Tipa 2 ($M_s \leq 5,5$), su od 0,045 – 0,054 g za povratno razdoblje od 475 godina i 0,018 – 0,027 g za povratno razdoblje od 95 godina.

U slučaju spektra Tipa 1 ($M_s > 5,5$), određen je omjer koji iznosi 0,90 (Tablica 3.3) pa su vertikalne vrijednosti PGA 0,09 – 0,108 g za povratno razdoblje od 475 godina i 0,036 – 0,054 g za povratno razdoblje od 95 godina.

Tablica 3.3 Koeficijenti za procjene vertikalne vrijednosti PGA prema različitim normama i istraživačkim studijama, gdje je a_g vrijednost PGA u horizontalnom smjeru (prema Bulajić i dr. 2022a)

Normama / istraživačka studija	PGA u vertikalnom smjeru
HRN EN 1998-1:2011/NA:2011 – za sve tipove tla, spektar odziva tipa 1: “potres koji najviše doprinosi” s $M_s > 5,5$ (EN 1998-1:2004)	$a_g \times 0,90$
HRN EN 1998-1:2011/NA:2011 – za sve tipove tla, spektar odziva tipa 2: “potres koji najviše doprinosi” s $M_s \leq 5,5$ (EN 1998-1:2004)	$a_g \times 0,45$
Bivša SFRJ – 1964. Pravilnik o privremenim tehničkim propisima za građenje u seizmičkim područjima (Službeni list SFRJ 39/64 1964)	$a_g \times 0,33$
Bivša SFRJ – 1981. Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima (Službeni list SFRJ 31/81 1981)	$a_g \times 0,70$
Empirijske atenuacijske jednadžbe za Kaliforniju (Lee 1987), geološki sedimenti, svi tipovi lokalnog temeljnog tla	$a_g \times 0,68$
Empirijske atenuacijske jednadžbe za bivšu SFRJ (Lee i Manić 1994), svi tipovi dubokih geoloških slojeva i lokalnog temeljnog tla	$a_g \times 0,72$

Osim koeficijenata za procjene vertikalne vrijednosti PGA prema HRN EN 1998-1:2011, tablica 3.3 sadržava analogne konstante (a_{vg}/a_g) koje su upotrebljavali tehnički propisi u bivšoj SFRJ (Službeni list SFRJ 1964, 1981), kao i omjere horizontalnih i vertikalnih PGA za dvije empirijske atenuacijske jednadžbe koje istovremeno uzimaju u obzir učinke dubokih geoloških slojeva i lokalnog temeljnog tla (Lee i Manić 1994, Lee 1987).

Iako obje atenuacijske jednadžbe ne prepoznaju nikakve učinke lokalnog tla na vertikalno gibanje tla, jednadžba koja je razvijena za Kaliforniju na temelju 1482 komponente vršnog ubrzanja tla ukazuje da duboka geologija utječe na pojačavanje potresnih valova u vertikalnom smjeru (Lee i Manić 1994, Lee 1987).

3.3.1. Procjene horizontalnih vrijednosti PGA postojećim GMPE

procjenjene vrijednosti potresne opasnosti sa starih karata potresne opasnosti (izražene makroseizmičkim intenzitetom), za nekoliko najvećih gradova u Republici Hrvatskoj, uspoređene su s

procjenama horizontalnih vrijednosti PGA, proračunatim empirijskom jednadžbom razvijenom za sjeverozapadni Balkan (Trifunac i dr. 1991):

$$\log_{10}(\text{PGA}) = -0,079 \cdot I + 0,290 \pm P \cdot \sigma \quad \sigma = 0,049 \quad (3.1)$$

gdje je:

PGA (cm/s²) – PGA u horizontalnom smjeru

I (°MCS) – makroseizmički intenzitet

σ – standardna devijacija

P – vjerojatnost koja je jednaka 0 za medijan procjene.

Rezultati provedene empirijske procjene PGA prikazani su u tablici 3.4. Oni predstavljaju empirijske procjene medijana sa standardnom devijacijom +/- 1 za makroseizmičke intenzitete sukladno kartama potresne opasnosti iz 1950., 1982. i 1990.

Tablica 3.4 Stupnjevi makroseizmičkog intenziteta, prema kartama potresnog zoniranja iz 1950. (Službeni list SFRJ 1964), 1982. (Službeni list SFRJ 1982) i 1990. (Službeni list SFRJ 1990), te odgovarajuće empirijske vrijednosti PGA procijenjene pomoću jednadžbe 3.1 za pet gradova u Republici Hrvatskoj (prema Pavić i dr. 2020b, Bulajić i dr. 2021a)

Grad	Mjera	1950.	1982.	1990.					
				50 godina	100 godina	200 godina	500 godina	1000 godina	10 000 godina
Zagreb	I [°MCS]	VIII - IX	VIII	VII	VII - VIII	VIII	VIII - IX	IX	IX
	PGA [g]	0,159 - 0,388	0,159 - 0,199	0,081 - 0,102	0,081 - 0,199	0,159 - 0,199	0,159 - 0,388	0,309 - 0,388	0,309 - 0,388
Rijeka	I [°MCS]	IX	VII	VI	VII-VIII	VIII	VIII	VIII-IX	IX
	PGA [g]	0,309 - 0,388	0,081 - 0,102	0,042 - 0,052	0,081 - 0,199	0,159 - 0,199	0,159 - 0,199	0,159 - 0,388	0,309 - 0,388
Split	I [°MCS]	VII	VI	VII	VII	VII	VIII	VIII	VIII
	PGA [g]	0,081 - 0,102	0,042 - 0,052	0,081 - 0,102	0,081 - 0,102	0,081 - 0,102	0,159 - 0,199	0,159 - 0,199	0,159 - 0,199
Osijek	I [°MCS]	VIII	VII	VI	VII	VII	VIII	VIII	VIII
	PGA [g]	0,159 - 0,199	0,081 - 0,102	0,042 - 0,052	0,081 - 0,102	0,081 - 0,102	0,159 - 0,199	0,159 - 0,199	0,159 - 0,199
Zadar	I [°MCS]	IX	VIII	VI	VII	VII	VIII	VIII	VIII
	PGA [g]	0,309 - 0,388	0,159 - 0,199	0,042 - 0,052	0,081 - 0,102	0,081 - 0,102	0,159 - 0,199	0,159 - 0,199	0,159 - 0,199

U tablici 3.5 napravljena je usporedba horizontalnih vrijednosti PGA iz tablice 3.4 za karte iz 1990. za povratna razdoblja 100 i 500 godina s horizontalnim vrijednosti PGA prikazanim na najnovijim kartama potresne opasnosti Republike Hrvatske. Horizontalne PGA vrijednosti s karata iz 2011. pomnožene su s najvećim faktorom tla S .

Za grad Osijek upotrijebljene su vrijednosti za spektar Tip 2 jer se prema mjerodavnim kartama potresne opasnosti na promatranom području mogu dogoditi potresi magnitude manje od 5.5 te razred tla D^* koji ima najveću vrijednost faktora tla ($S = 1,8$) kako bi se proračunao „najnepovoljniji“ - najveći PGA. Za ostala četiri grada upotrijebljene vrijednosti za spektar Tip 1, razred tla E^* te faktor tla $S = 1,4$.

Tablica 3.5 Horizontalne vrijednosti PGA koje odgovaraju kartama iz 1990. (Službeni list SFRJ 31/81, 49/82, 29/83, 21/88, 52/90 1990) za povratna razdoblja 100 i 500 godina, kao i PGA vrijednosti prikazane na najnovijim službenim kartama potresne opasnosti (Herak 2012) za Republiku Hrvatsku (prema Pavić i dr. 2020b)

Grad	1990.		2011.			
	100 god.	500 god.	Tr = 95 god.		Tr = 475 god.	
			Stijena	Razred tla*	Stijena	Razred tla*
Zagreb	0,081 - 0,199	0,159 - 0,388	0,12 - 0,14	0,168 - 0,196	0,22 - 0,26	0,308 - 0,364
Rijeka	0,081 - 0,199	0,159 - 0,199	0,1	0,14	0,18 - 0,20	0,252 - 0,28
Split	0,081 - 0,102	0,159 - 0,199	0,12	0,168	0,22	0,308
Osijek	0,081 - 0,102	0,159 - 0,199	0,04 - 0,06	0,072 - 0,108	0,10 - 0,12	0,18 - 0,216
Zadar	0,081 - 0,102	0,159 - 0,199	0,08	0,112	0,18	0,252

Procjene horizontalnih vrijednosti PGA izvedene iz odgovarajućih potresnih intenziteta u skladu su s vrijednostima proračunatim iz najnovijih karata potresne opasnosti Republike Hrvatske.

Procjenjene vrijednosti PGA povezane s intenzitetima koji su prikazani na kartama potresne opasnosti za grad Osijek iz 1990. izvrsno se slažu s vrijednostima PGA koje su dane na novim kartama potresne opasnosti iz 2011. Međutim, potrebno je ova podudaranja uzeti s rezervom jer stupnjevi intenziteta

prikazani na kartama iz 1950., 1982. i 1990. odgovaraju prosječnom lokalnom temeljnom tlu i geološkim uvjetima, dok najnovije karte potresne opasnosti Republike Hrvatske ne uzimaju u obzir učinke dubokih geoloških slojeva na odziv temeljnog tla.

3.3.2. Procjene vertikalnih vrijednosti PGA postojećim GMPE

Vertikalne vrijednosti PGA procijenjene su pomoću empirijske jednadžbe (Trifunac i dr. 1991):

$$\log_{10}(\text{PGA}) = -0,593 \cdot I + 0,331 \pm P \cdot \sigma \quad \sigma = 0,016 \quad (3.2)$$

gdje je:

PGA (cm/s²) – PGA u vertikalnom smjeru

I (° MCS) – makroseizmički intenzitet

σ – standardna devijacija

P – vjerojatnost koja je jednaka 0 za medijan procjene.

Rasponi koji predstavljaju empirijske PGA procjene medijana sa standardnom devijacijom +/- 1 te makroseizmičke intenzitete sukladno kartama potresne opasnosti iz 1950., 1982. i 1990. prikazani su u Tablici 3.6. Vrijednosti prikazane PGA su za prosječne karakteristike temeljnog tla, pri čemu nije razmatran faktor tla S (koji za vertikalni smjer prema HRN EN 1998-1:2011 ne postoji, tj. jednak je 1 za sve tipove tla).

Prema karti potresne opasnosti Republike Hrvatske za grad Osijek, proračunate su vertikalne vrijednosti PGA za oba tipa spektra. Za spektar Tipa 1 proračunate su vertikalne vrijednosti PGA u rasponu od 0,09 g – 0,108 g za povratno razdoblje od 475 godina i u rasponu od 0,036 g – 0,054 g za povratno razdoblje od 95 godina. Rasponi proračunatih vertikalnih vrijednosti za spektar Tipa 2 su 0,045 g – 0,054 g za povratno razdoblje od 475 godina te 0,018 g – 0,027 g za povratno razdoblje od 95 godina.

Rezultati u tablici 3.6 upućuju na zaključak da se procjene vertikalnog PGA izvedene iz seizmičkih intenziteta s karata grada Osijeka iz 1990. izvrsno slažu s vertikalnim vrijednostima PGA koje određuju najnovije karte opasnosti Republike Hrvatske za spektar Tip 1, koji se upotrebljava za područja s većom potresnom aktivnošću. Za spektar Tip 2, koji bolje odgovara potresnim uvjetima promatranog područja, vertikalne vrijednosti PGA dvostruko su niže od procjena na temelju makroseizmičkih intenziteta.

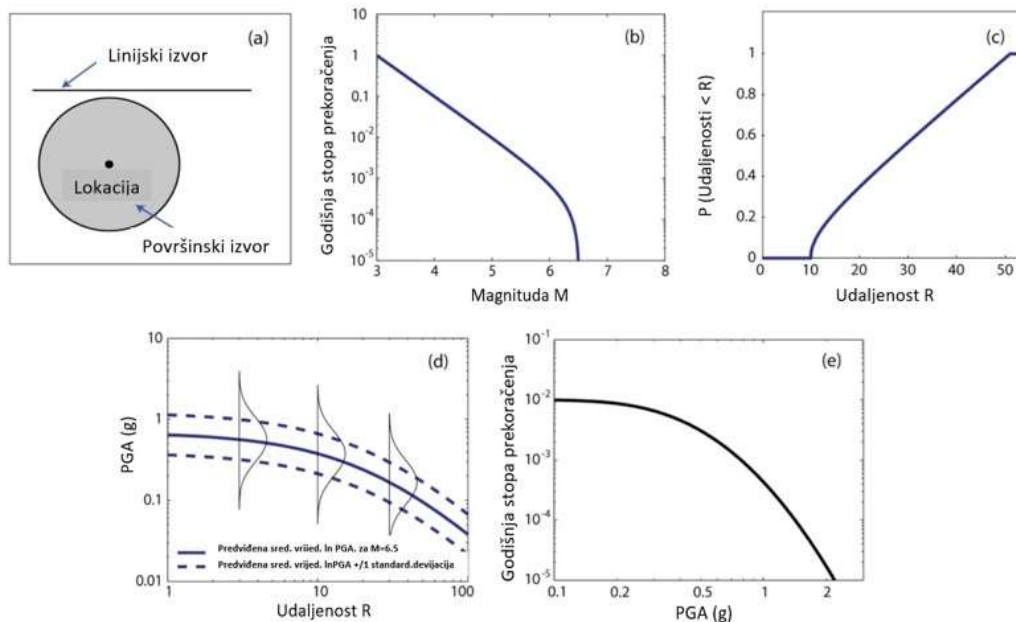
Izmjenom HRN EN 1998-1/NA:2021 određeno je da pri proračunu potresnih sila treba uzeti u obzir oba spektra (Tip 1 i Tip 2) međutim da za provjeru otpornosti elemenata građevina na potresne sile treba u obzir uzeti one vrijednosti koje su nepovoljnije za građevine.

Tablica 3.6 Stupnjevi makroseizmičkog intenziteta, dani na kartama potresnog zoniranja iz 1950. (Službeni list SFRJ 1976), 1982. (Službeni list SFRJ 1982) i 1990. (Službeni list SFRJ 1990) i odgovarajuća empirijska procjena vertikalnih vrijednosti PGA proračunate jednadžbom 3.2 za pet gradova u Republici Hrvatskoj (prema Bulajić i dr. 2022a)

Grad		1950.	1982.	1990.					
				50 godina	100 godina	200 godina	500 godina	1000 godina	10 000 godina
Zagreb	I [°MCS]	VIII - IX	VIII	VII	VII - VIII	VIII	VIII - IX	IX	IX
	PGA [g]	0,112 - 0,257	0,112 - 0,120	0,052 - 0,056	0,052 - 0,120	0,112 - 0,120	0,112 - 0,257	0,239 - 0,257	0,239 - 0,257
Rijeka	I [°MCS]	IX	VII	VI	VII - VIII	VIII	VIII	VIII - IX	IX
	PGA [g]	0,239 - 0,257	0,052 - 0,056	0,024 - 0,026	0,052 - 0,120	0,112 - 0,120	0,112 - 0,120	0,112 - 0,257	0,239 - 0,257
Split	I [°MCS]	VII	VI	VII	VII	VII	VIII	VIII	VIII
	PGA [g]	0,052 - 0,056	0,024 - 0,026	0,052 - 0,056	0,052 - 0,056	0,052 - 0,056	0,112 - 0,120	0,112 - 0,120	0,112 - 0,120
Osijek	I [°MCS]	VIII	VII	VI	VII	VII	VIII	VIII	VIII
	PGA [g]	0,112 - 0,120	0,052 - 0,056	0,024 - 0,026	0,052 - 0,056	0,052 - 0,056	0,112 - 0,120	0,112 - 0,120	0,112 - 0,120
Zadar	I [°MCS]	IX	VIII	VI	VII	VII	VIII	VIII	VIII
	PGA [g]	0,239 - 0,257	0,112 - 0,120	0,024 - 0,026	0,052 - 0,056	0,052 - 0,056	0,112 - 0,120	0,112 - 0,120	0,112 - 0,120

3.4. Probabilistički pristup za modeliranje potresne opasnosti na promatranom području

Za modeliranje potresne opasnosti promatranog područja odabran je deduktivni probabilistički pristup kojim se procjenjuje vjerojatnost da će određena razina gibanja temeljnog tla uslijed potresa (procijenjena na temelju niza potresa različite jačine i različitih hipocentralnih udaljenosti), koja se može dogoditi na promatranom području, biti dostignuta ili nadmašena tijekom pretpostavljenog razdoblja.



Slika 3.6 a) – e) Probabilistički proračun potresne opasnosti- PSHA
(prema Nitish i Ashwani 2020)

PSHA previđanja potresne opasnosti promatranog područja u ovom doktorskom radu provodena su kroz nekoliko osnovnih faza, grafički prikazanih na slici 3.6:

a) U prvoj fazi definiraju se oblici žarišnih izvora (točkasti, linijski, površinski), na temelju spoznaja o postojećim rasjedima i zabilježenim povijesnim potresima te određenog žarišnog područja i maksimalne magnituda svakog područja koje mogu utjecati na seizmičnost promatranog područja (Anderson 1979, Anderson 1981, Anderson i dr. 1987).

b) Zatim se definira seizmičnost područja odnosno očekivana stopa pojave potresa različite veličine koja se očekuje u svakoj zoni tijekom određenog razdoblja. Izrađuju se krivulje ponovljivosti potresa, kojima se opisuje odnos između broja jakih i slabih dogođenih potresa (na temelju zabilježenih povijesnih potresa za svako žarišno područje). Procjenjuje se seizmičnost, obično pomoću regresijske analize najmanjeg kvadrata podataka o prošlim potresima. Definiiraju se parametri a i b za Gutenberg-Richterov izraz (Gutenberg 1944):

$$\log N_{GR}(M) = a - bM \quad (3.3)$$

gdje je:

$N_{GR}(M)$ – broj potresa s magnitudama većim od M

M – magnituda

a i b – koeficijenti krivulje ponovljivosti; procjenjuju se pomoću statističke analize povijesnih potresa s dodatnim ograničavajućim podacima koje pružaju druge vrste geoloških dokaza

a – ukupan broj potresa žarišnog područja

b – definira odnos između logaritma broja potresa s velikim i malim magnitudama (za potpune kataloge potresa, njegova prosječna vrijednost je 0,75 – 1,15).

c) Sukladno geometriji žarišnog područja, za svako žarište, proračunavaju se krivulje vjerojatnosti za razmak kojima se opisuje vjerojatnost da će se na određenoj udaljenosti od zadane lokacije izvor potresa nalaziti u žarišnom području.

d) Odabire se atenuacijska krivulja (dobivena empirijskim statističkim regresijskim proračunom stvarno zabilježenih vršnih ubrzanja temeljnog tla od potresa u promatranom području), za odabrani parametar jačine gibanja tla (PGA/PSA), upotrebom njezine standardne devijacije proračunava se vjerojatnost različitih empirijskih procjena ubrzanje tla PGA ako se potres magnitude M dogodi na udaljenosti R .

e) Za proračun srednjeg očekivanog godišnjeg broja potresa $N(pga)$ uslijed kojih će amplituda ubrzanja tla PGA, biti veća od zadane vrijednosti pga , upotrebljava se Cornell-McGuireov izraz (Cornell 1968, McGuire 1976, 1993):

$$N(pga) = \sum_{i \in I} v_i \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} GMP \{PGA > pga | M, R\} f_{m_i}(M) f_{r_i | m_i}(R | M) dM dR \quad (3.4)$$

kojim se za svaku žarišno područje:

1) Za svaki par parametara magnituda – udaljenost (tj. vjerojatnosti za M s krivulje ponovljivosti, vjerojatnosti za R s krivulja vjerojatnosti za razmak i vjerojatnosti za M i R s atenuacijske krivulje za zadani parametar) međusobno množe vjerojatnosti:

- da će se unutar promatranog žarišnog područja dogoditi potres određene magnitude
- da se potres dogodi na točno pretpostavljenoj udaljenosti i
- da za određenu magnitudu i udaljenost, ubrzanje tla PGA, dostigne očekivane vrijednosti pga .

2) Provodi integracija svih prethodno proračunatih vjerojatnosti

3) Sumiraju svi rezultati, po svim žarišnim područjima.

Izraz (3.4) za proračunavanje ukupne potresne opasnosti dobiven je na temelju zakona ukupne vjerojatnosti prema kojem se vjerojatnost da maksimalno ubrzanje tla (PGA) bude veće od neke unaprijed zadane vrijednosti pga , ako se dogodi niz n međusobno isključivih događaja H_i (pri čemu je H_i cjelovit sustav hipoteza u odnosu na događaj u kome će PGA biti veće od pga), može proračunati izrazom (Ang i Tang 2006):

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A | H_i) \cdot P(H_i) \quad (3.5)$$

U Cornell-McGuireovom izrazu (3.4) i označava broj žarišnih područja (u skupu I), v je godišnji broj potresa jačine veće od zadane donje vrijednosti M_{\min} , a proračunava se kao:

$$v = e^{a \ln 10 - (b \ln 10) M_{\min}} \quad (3.6)$$

gdje je:

a i b – koeficijenti "Gutenberg-Richterove" krivulje ($\log N_{GR}(M) = a - bM$), kojom se za svako

žarišno područje i definira ponovljivost potresa određene jačine

M_{\min} i M_{\max} – minimalna odnosno maksimalna magnituda za svako žarišno područje i

R_{\min} i R_{\max} – granične vrijednosti za udaljenost od promatrane lokacije do žarišta potresa za svako područje i

GMPE (PGA > pga / M , R) – uvjetna kumulativna krivulja raspodjele kojom se na temelju atenuacijske jednadžbe (vidi jednadžbe (3.4) i (3.5), i obratiti pozornost na standardno odstupanje „ σ “) definira vjerojatnost da će ubrzanje tla PGA imati vrijednost veću od očekivane vrijednosti pga , pod uvjetom da se potres magnitude M dogodi na udaljenosti R .

f_m – funkcija gustoće vjerojatnosti za magnitudu (M):

$$f_m(M) = \beta \frac{e^{-\beta(M-M_{\min})}}{1 - e^{-\beta(M_{\max} - M_{\min})}}, \quad M_{\min} \leq M \leq M_{\max} \quad (3.7)$$

$$\beta = (\ln 10) b$$

f_{r_i/m_i} – funkcija gustoće vjerojatnosti za udaljenost od žarišta potresa.

Ovako provedenom probabilističkom procjenom potresne opasnosti za određenu lokaciju za svako žarišno područje i provedena je integracijom po svim vrijednostima magnituda i udaljenosti unutar zadanih granica, a zatim su zbrojeni doprinosi od različita područja.

Proračunata je ukupna vjerojatnost za zadanu vrijednost odabranog parametra, a spajanjem dobivenih vjerojatnosti za različite zadane vrijednosti odabranog parametra jačine gibanja tla, generiraju se krivulje opasnosti odabranog parametra jačine gibanja tla.

Vjerojatnosne razine potresne opasnosti mogu se izraziti različitim mjerama. Potencijalni potresi događaji mogu se promatrati kao događaji koji su neovisni u prostoru i vremenu (Poissonova distribucija).

Za proračun vjerojatnosti (koja se ne mijenja tijekom vremena) da će ubrzanje tla PGA bar jednom tijekom godinu dana imati vrijednost veću od p_{ga} u ovom radu se upotrebljava izraz (Ang i Tang 2006):

$$P(pga) = 1 - e^{-N(pga)} \quad (3.8)$$

Izrazom (3.8) za binomnu distribucija događaja (Ang i Tang 2006), proračunate su vjerojatnost da će ubrzanje tla PGA barem jednom tijekom t godina imati vrijednost veću od p_{ga} , gdje je $p(pga)$ postavljena ciljna razina vjerojatnosti za koju se proračunavaju procjene PGA:

$$p(pga) = 1 - [1 - P(pga)]^t \quad (3.9)$$

Recipročne vrijednosti očekivanog godišnjeg broja potresa uslijed kojih će amplituda ubrzanja tla PGA biti veća od neke zadane vrijednosti p_{ga} tj. povratno razdoblje Tr proračunate su izrazom:

$$Tr = N(pga)^{-1} \quad (3.10)$$

Povratno razdoblje ne povezuje se sa samo jednim potresom koji se u nekom od žarišnih područja događa svakih Tr godina. Naime srednji očekivani godišnjeg broja potresa $N(pga)$ proračunat je

uzimajući u obzir sve moguće buduće potrese u području promatrane lokacije, pa i njegova recipročna vrijednost - povratno razdoblje podrazumijeva sve moguće buduće potrese u području promatrane lokacije i u stvari je statistička veličina koja nema precizno fizikalno značenje, svrha joj je intuitivno razlikovanje veličine potresne opasnosti (veći T_r = veća opasnost, manji T_r = manja opasnost).

Za određivanje potresa koji najviše doprinose potresnoj opasnosti promatranog područja usvojen je postupak razdvajanja potresne opasnosti (Bazzurro i Cornell 1999) koji je obrnut postupku predstavljenom jednadžbom (3.4). Razdvajanjem je moguće odrediti pojedinačne doprinose različitih vrijednosti parova magnituda-udaljenosti u očekivanom godišnjem broju potresa $N(pga)$.

U proračunima potresne opasnosti (prema jednadžbi (3.4)) razmatraju se empirijske GMPE procjene za različite vrijednosti ε definirane u jednadžbama za skaliranja horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA/PSA, stoga je postupkom razdvajanja moguće za svaki par magnituda – udaljenost definirati vrijednosti brojeva standardnih devijacija za koje je $\log(pga)$ udaljen od srednje empirijske procjene (McGuire 1995).

3.4.1. Predviđanje vrijednosti PGA promatranog područja atenuacijskom jednadžbom Sabetta i Pugliese (1996.)

Preliminarna procjena vrijednosti PGA promatranog područja, provedena je upotrebom empirijske atenuacijske jednadžbe (3.11) koju su predložili Sabetta i Pugliese (1996.) te koeficijenta usvojenih za promatrano područje.

Jednadžba je nastala kao rezultat proučavanja prigušenja spektara odziva i simulacija umjetnih akceleroograma u funkciji veličine, udaljenosti i geoloških uvjeta lokacije. Razvijena je na temelju baze podataka o jakim potresnim gibanjima temeljnog tla za područje Italije, koja se sastoji od 95 akcelerografskih snimki 17 potresa čije su magnitude u rasponu od 4,6 do 6,8. Ova baza prvotno je namijenjena za proučavanje prigušenja vršnih ubrzanja temeljnog tla (PGA) i brzina uzrokovanih potresnim djelovanjem.

Pomoću višestrukih regresijskih proračuna, Sabetta i Pugliese razvili su empirijske prediktivne jednadžbe za vertikalne i horizontalne komponente spektara odziva koji odgovaraju 14 frekvencija u rasponu od 0,25 do 25 Hz.

Jednadžba Sabetta i Pugliese (1996.):

$$\log_{10}(Y) = a + bM + c \cdot \log_{10}(R^2 + h^2)^{\frac{1}{2}} + e_1 \cdot S_1 + e_2 \cdot S_2 \pm \sigma \quad (3.11)$$

$$\log_{10}PGA(g) = -1,845 + 0,363M - 1 \cdot \log_{10}(R^2 + 5^2)^{\frac{1}{2}} + 0,195 \cdot S_1 + 0 \cdot S_2 \pm 0,190$$

gdje je:

a – koeficijent koji se odnosi na ukupan broj potresa žarišnog područja

b – koeficijent koji definira odnos između logaritma broja potresa s velikim i malim magnitudama

c – koeficijent za udaljenost (od rasjeda ili epicentra)

M – lokalna (Richterova) magnituda

R – udaljenost (od rasjeda ili epicentra) u km

h – dubina hipocentra u km.

e_1 i e_2 – koeficijenti za određeni razred temeljnog tla

S_1 i S_2 – varijable za razrede temeljnog tla.

σ_{\log} – standardna devijacija logaritma Y

Sabetta i Pugliese (1987.) prema dostupnim geološkim i geotehničkim podacima te debljini slojeva tla mjesta mjerenja, temeljno tlo razvrstavaju u tri razreda:

1. kruto tlo: $S_1 = S_2 = 0$

prosječna brzina posmičnih valova veća od 800 m/s

2. plitko aluvijalno tlo: $H \leq 20$ m

$$S_1 = 1$$

$$S_2 = 0$$

prosječna brzina posmičnih valova između 400 i 800 m/s

3. duboko aluvijalno tlo: $H > 20$ m

$$S_1 = 0$$

$$S_2 = 1$$

prosječna brzina posmičnih valova između 400 i 800 m/s

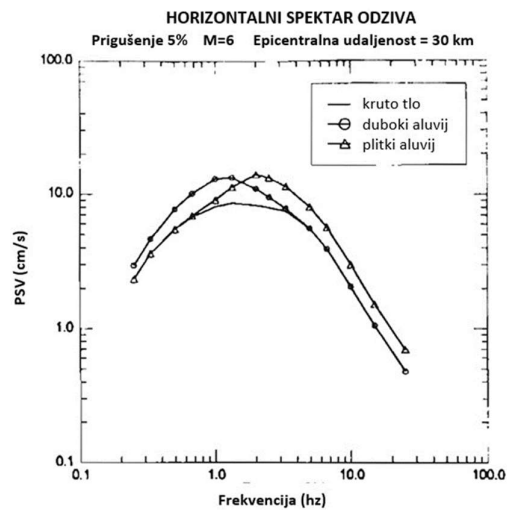
U jednadžbi (3.11) vrijednost 0,190 je standardna devijacija logaritma od Y , a koeficijenti S_1 i S_2 koji se odnose na razredbu tla poprimaju vrijednosti od 1 za plitka i duboka aluvijalna tla, odnosno 0 za ostala tla.

Sabetta i Pugliese (1996.) definiraju plitko aluvijalno tlo kao ono koje se nalazi na dubinama manjim ili jednakim 20 m s brzinom posmičnih valova između 400 i 800 m/s, dok je duboko aluvijalno tlo na dubinama preko 20 metara.

Prema jednadžbama Sabetta i Pugliese (1996.), kod dubokog aluvijalnog tla neće doći do amplifikacije u odnosu na stjenovito tlo za maksimalno ubrzanje temeljnog tla i kratke periode oscilacija, odnosno za kratke periode oscilacija će stjenovito tlo i duboko aluvijalno tlo imati iste spektre odziva, dok će amplifikacija postojati samo za plitko aluvijalno tlo (Slika 3.7).

Kod dužih perioda oscilacija najveći spektri odziva bit će se za duboko aluvijalno tlo, a stjenovito i plitko aluvijalno temeljno tlo imat će iste spektre. Do nastanka amplifikacije potresnih valova doći samo na dubokim aluvijalnim tlima (Slika 3.7).

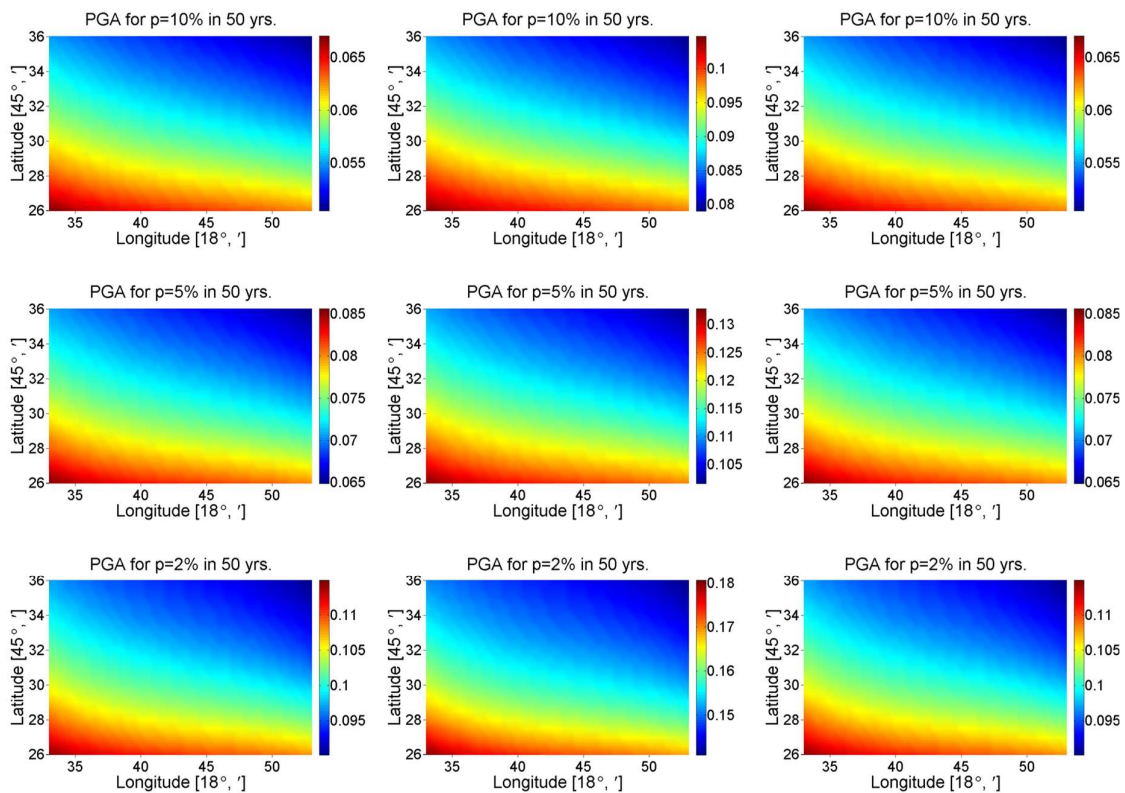
Na slici 3.7, prikazan je predloženi (Sabetta i Pugliese 1996) horizontalni spektar odziva brzine generiran jednadžbom (3.11) za kruta temeljna tla te duboke i plitke aluvijalne slojeve. Umjesto perioda oscilacija na horizontalnoj osi prikazane su frekvencije.



Slika 3.7 Ovisnost horizontalnog spektra odziva o geološkim karakteristikama tla
(prema Sabetta i Pugliese 1996)

3.4.2. Rezultati preliminarnog proračuna PGA atenuacijskom jednadžbom Sabetta i Pugliese (1996.)

Na temelju provedene PSHA za promatrano područje, upotrebom atenuacijske jednadžbe Sabetta i Pugliese (1996.) izrađene su preliminarne karte potresne opasnosti za horizontalno maksimalno ubrzanje tla (PGA), pri čemu su razmatrana tri tipa temeljnog tla: stijena (Slika 3.8, lijevo), plitko aluvijalno tlo (Slika 3.8, sredina), duboko aluvijalno tlo (Slika 3.8, desno).

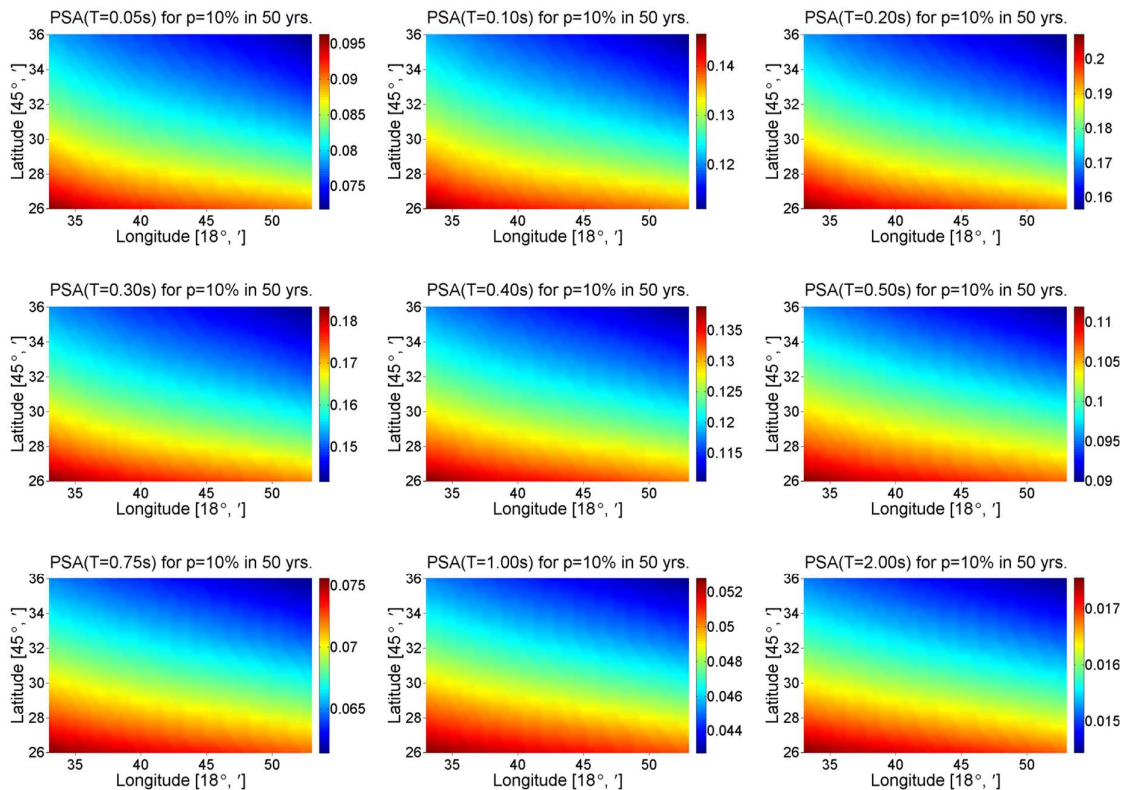


Slika 3.8 Vrijednosti PGA za stijenu (lijevo), plitko aluvijalno tlo (sredina) i duboko aluvijalno tlo (desno), dobivene probabilističkim proračunom potresne opasnosti za promatrano područje, upotrebom atenuacijske jednadžbe Sabetta i Pugliese (1996.), za vjerojatnost 10 % u 50 godina (tj. povratno razdoblje od 475 godina), 5 % u 50 godina (povratno razdoblje od 975 godina) i 2 % u 50 godina (povratno razdoblje od 2475 godina)

Na slici 3.8 prikazane su karte potresnog mikrozoniranja za različite razine vjerojatnosti ponovljivosti potresa odnosno za povratna razdoblja T_r od 475, 975 i 2475 godina.

Upotrebom atenuacijskih jednadžbi koje su Sabetta i Pugliese (1996.) izveli za različite horizontalne spektralne amplitude, izrađene su preliminarne karte potresne opasnosti za horizontalna spektralna ubrzanja na promatranom području.

Karte potresnog mikrozoniranja za duboko aluvijalno tlo, za 9 različitih spektralnih amplituda PSA (odnosno za periode oscilacija: 0,05 s, 0,1 s, 0,2 s, 0,3 s, 0,4 s, 0,5 s, 0,75 s, 1,0 s i 2,0 s) i povratno razdoblje T_r od 475 godina, prikazane su na slici 3.9.



Slika 3.9 Vrijednosti niza spektralnih amplituda za duboko aluvijalno tlo, dobivene probabilističkim proračunom potresne opasnosti za promatrano područje, upotrebom atenuacijskih jednadžbi za spektralne amplitude Sabetta i Pugliese (1996.), za vjerojatnost 10 % u 50 godina (povratno razdoblje od 475 godina)

3.5. UHS spektri za modeliranje potresne opasnosti promatranog područja

Potresno djelovanje se pri projektiranju najučestalijih vrsta građevinskih konstrukcija obično modelira kao normalizirani projektni spektar standardnog izgleda koji se zatim skalira s referentnom vrijednošću maksimalnog ubrzanja tla za određenu lokaciju. Međutim, standardnim izgledom spektara ne uzima se u obzir činjenica, da potresi različite magnitude uzrokuju gibanja tla različitim frekventnim sastavom, kao i to da atenuacija potresnih valova s udaljenosti od žarišta potresa, pored ostalog ovisi i o frekvenciji potresnih valova.

Do sedamdesetih godina prošlog stoljeća postojale su samo atenuacijske jednadžbe za PGA vrijednosti i makroseizmičke intenzitete, pa su se PSHA proračunima mogli generirati rezultate samo za ove dvije mjere gibanja tla, uzimajući u obzir vjerojatnosti pojave potresa i prostornu geometriju potresa.

Nakon nastanka prvih neposrednih empirijskih jednadžbi za skaliranje spektralnih amplituda jakog gibanja tla, sredinom 1970-ih, potresno zoniranje i mikrozoniranje sve se češće provodi pristupom koji uzima u obzir vjerojatnost pojave potresa, prostornu raspodjelu potresnih žarišta, frekventno-ovisne atenuacije amplituda jakog gibanja tla i karakteristike lokalne geologije i lokalnog tla.

Rezultati navedenog pristupa su spektri jednolike opasnosti (UHS) (Lee i dr. 2010, 2011, Todorovska i dr. 1996a, b, Todorovska i dr. 1995, 2005, Trifunac 1988, 1990a) kod kojih će svaka UHS amplituda imati istu vjerojatnost prekoračenja u t godina.

Postupku izrade spektara jednolike opasnosti pristupa se nakon što se za odabranu lokaciju napravi nekoliko proračuna potresne opasnosti, za ista žarišna područja i ponovljivosti potresa u njima, ali s različitim atenuacijskim jednadžbama, koje odgovaraju različitim periodima oscilacija.

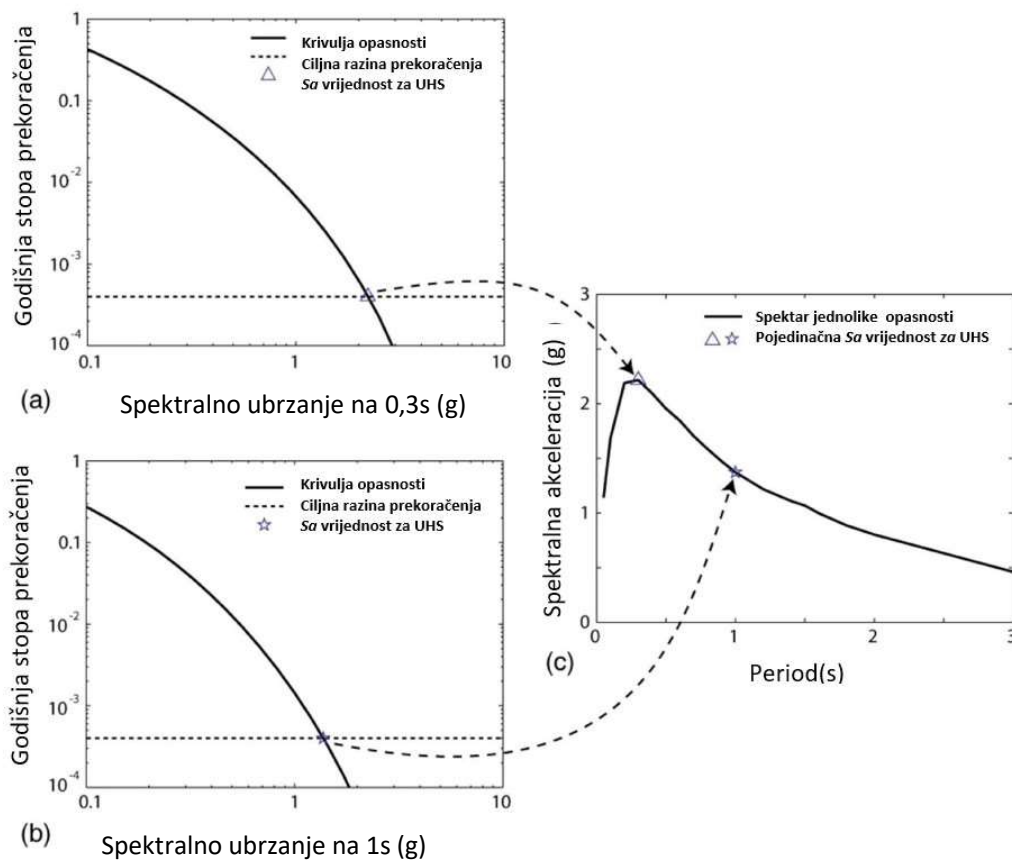
U proračunu potresne opasnosti, za određivanje vrijednosti $G(a_{cc} > A | M, R)$ u jednadžbi (3.4), upotrijebe se jednadžbe za skaliranje različitih spektralnih amplituda umjesto jednadžbi za maksimalno ubrzanje tla.

Za svaku spektralnu amplitudu proračunavaju se vrijednosti za traženu razinu potresne opasnosti $Pt(A)$, a spajanjem vrijednosti različitih spektralnih amplituda za istu razinu opasnosti dobije se spektar jednolike opasnosti, čije sve ordinate imaju istu vjerojatnost $Pt(A)$ (Anderson 1978, Anderson i dr. 1977, 1978, 1979, 1987, Lee i dr. 1985, Todorovska 1995a, b).

Ovi spektri predstavljaju anvelopu odvojenih vrijednosti spektralnih ubrzanja za različite periode i različite potresne događaje, a svaka koordinata ima istu učestalost biti premašena. Prednost ovog pristupa je, da se na uravnotežen način, istovremeno razmatra doprinos svih čimbenika koji utječu na krajnji rezultat zoniranja i mikrozoniranja.

Na slici 3.10 a) – c) grafički je prikazan postupak izrade jednolikog spektra opasnosti. Provodi se PSHA proračun za odabrani set atenuacijskih jednadžbi i niz spektralnih amplituda (npr. $S_a(T = 0,1 \text{ s})$, $S_a(T = 0,3 \text{ s})$, $S_a(T = 1,0 \text{ s})$, itd.) koji rezultira krivuljama potresne opasnosti za $S_a(T = 0,1 \text{ s})$, $S_a(T = 0,3 \text{ s})$, $S_a(T = 1,0 \text{ s})$, itd.

Odabire se željena razina vjerojatnosti (npr. 0,002105, što odgovara 10 % u 50 godina), koja se uzima u obzir za svaku krivulju opasnosti (Slika 3.10 a) i b)). Spajanjem proračunatih vrijednosti dobiven je spektar jednolike opasnosti za vjerojatnost od 10 % u 50 godina odnosno za povratno razdoblje $T_r = 475$ godina (Slika 3.10 c)).



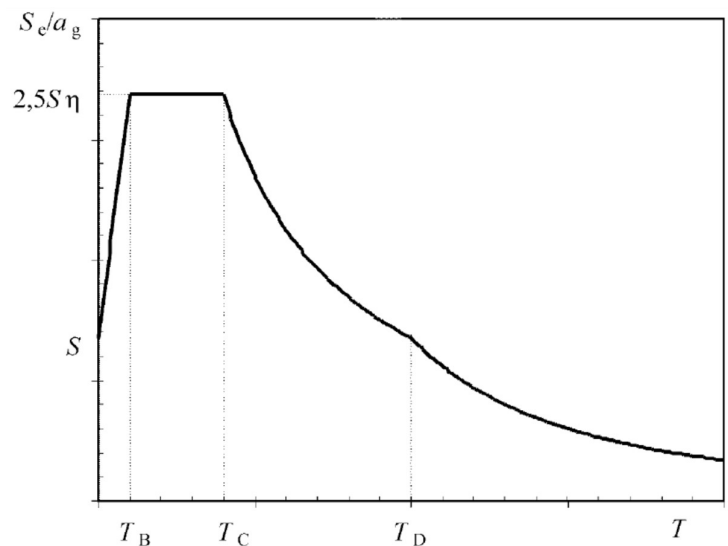
Slika 3.10 a) – c) Izrada spektra jednolike opasnosti (UHS)

Oblik/izgled spektra jednolike opasnosti ovisan je u najvećoj mjeri od veličina magnitude, a u manjoj mjeri o udaljenosti. Na područjima s aluvijalnim tlom, pojačan je atenuacijski učinak u odnosu na stjenovita tla, u različitim frekvencijskim rasponima ovisno o debljini naslaga tla.

3.5.1. Osnovne značajke i nedostaci spektra odziva u normi HRN EN 1998-1:2011

Norma HRN EN 1998-1:2011 (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) (u dijelu 1: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade), prikazuje potresna djelovanja za zgrade, u obliku normaliziranog standardnog spektra odziva (koji se skalira referentnom vrijednošću maksimalnog ubrzanja tla) ili u obliku snimljenih ili umjetno generiranih akcelerograma.

Na slici 3.11 prikazan je elastični spektra odziva prema HRN EN 1998-1:2011, a u tablici 3.7 faktori kojim se ovaj spektar skalira.



Slika 3.11 Elastični spektar odziva tip 1 (HRN EN 1998-1:2011/NA:2011)

Horizontalni elastični spektri odziva, $S_e(T)$, opisani u točki 3.2.2.2 HRN EN 1998-1:2011, predstavljaju dijagrame pseudo-apsolutnog ubrzanja (sustava s jednim stupnjem slobode), za vlastite periode oscilacija T , između 0 i 4 s, s koeficijentom viskoznog prigušenja referentne vrijednosti od 5 %.

Koeficijentom η skalira se čitav spektar u slučaju koeficijenta prigušenja različitog od 5 %. Za nulti period ($T = 0$) spektralno ubrzanje u elastičnom spektru HRN EN 1998-1:2011 jednako je maksimalnom ubrzanju tla a_g na tlu tipa A (stijena) pomnoženo s vrijednošću faktora tla S .

Dva su tipa elastičnog spektra koji se razlikuju ovisno o jakosti potresa: tip 1 za potrese koji će najviše doprinijeti potresnoj opasnosti s magnitudom površinskih valova $M_s > 5,5$ i tip 2 za potrese koji će najviše doprinijeti potresnoj opasnosti s magnitudom površinskih valova, $M_s \leq 5,5$. Faktor tla ovisi o vrsti tla (A, B, C, D ili E) i različit je ovisno o tipu spektra.

Spektri odziva se na kraju skaliraju s vrijednostima maksimalnih ubrzanja tla koja su određena za promatrano područje kroz probabilističku procjenu potresne opasnosti.

Ostavljena je i mogućnost da svaka zemlja može upotrebljavati svoj oblik spektra nakon što ga definira u svom nacionalnom dodatku (HRN EN 1998-1:2011/NA:2011: točka 3.2.2.1 (4)) kako bi se nadoknadili vjerojatnosni nedostaci predloženih oblika spektra odziva HRN EN 1998-1:2011.

Izmjenom nacionalnog dodatka primjenjuju se oba spektra, neovisno o magnitudi, a za proračun je mjerodavan onaj koji je nepovoljniji za zgradu za koju se proračun provodi.

Tablica 3.7 Parametri za skaliranje elastičnog spektra odziva (HRN EN 1998-1:2011/NA:2011)

Spektri odziva HRN EN 1998:2011	PGA	Konstanta	Faktor korekcije prigušenja η [ζ u %] HRN EN 1998:2011	Koeficijent tla S , za različite tipove tla				
				A	B	C	D	E
Horizontalni spektar Tip 1	a_g	2,5	$\sqrt{10/(5+\zeta)}$	1	1,2	1,15	1,35	1,4
Horizontalni spektar Tip 2	a_g	2,5	$\sqrt{10/(5+\zeta)}$	1	1,35	1,5	1,8	1,6
Vertikalni spektar Tip 1	$a_g \times 0,90$	3	$\sqrt{10/(5+\zeta)}$	1	1	1	1	1
Vertikalni Spektar Tip 2	$a_g \times 0,45$	3	$\sqrt{10/(5+\zeta)}$	1	1	1	1	1

Karte potresne opasnosti koje su izrađene za uporabu s HRN EN 1998-1:2011 i drugim nacionalnim normama koje se temelje na EN 1998-1:2004, definirane su za tip tla A (stijena ili druga geološka formacija slična stijeni, uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini), s brzinom posmičnih valova $V_{s,30} > 800$ m/s u gornjih 30 m profila temeljnog tla (Tablica 2.2, poglavlje 2).

Vršno ubrzanje na površini temeljnog tla procjenjuje se množenjem vrijednosti vršnog ubrzanja, očitano sa karte potresne opasnosti, s faktorom tla S koji ovisi o tipu tla i o tip spektra (HRN EN 1998-1:2011/NA:2011). Prema tablici 3.7 za sve predložene tipove tla, osim za tipa A, faktor tla je veći od 1, što ukazuje na obvezno pojačavanje potresnih valova na tipovima temeljnog tla različitim od kategorije tla A.

Empirijska jednadžba prigušenja koja je razvijena sredinom 1980-ih za Kaliforniju na temelju 1482 komponente ubrzanja temeljnog tla iz potresa koji su se dogodili u zapadnom dijelu SAD-a, ukazuje da u slučaju dubokog tla dolazi do deamplifikacije potresnih valova (Trifunac 2010, Lee i Trifunac 1987, Lee 1987), te da bi faktor tla za duboka tla trebao iznositi 0,70.

U Europi su također provedena slična istraživanja (Bulajić i dr. 2021a,b, 2022a,b) koja su potvrdila navedena i koja predlažu da se spektri odziva HRN EN 1998-1:2011 trebaju ponovno proračunati i doraditi kako bi dostatno precizno odražavali potresno djelovanje područja za koje su namijenjeni.

Postojeći HRN EN 1998:2011 spektri skalirani su prema PGA vrijednostima koje su rezultat probabilističke proračune potresne opasnosti čija se provedba temelji na vjerojatnostima i diferencijacijama.

Proračunsko ubrzanje (a_g) temeljnog tla tipa A (stijena), kojim su skalirani elastični spektri odziva je vjerojatnosna vrijednost proračunata za vjerojatnost opasnosti promatranog područja. Ono predstavlja umnožak referentnog vršnog ubrzanja tla (a_{gR}) i faktora važnosti (Y_1) kojim se također implementira diferencijacija pouzdanosti razvrstavanjem konstrukcija u različite razrede važnosti povezane s različitim namjenama zgrada.

Referentno ubrzanje povezano je s referentnom vjerojatnošću prekoračenja $Pt(A) = 10\%$ u $t = 50$ godina (povratno razdoblje $T_r = 475$ godina), za zahtjev da ne smije doći do rušenja i s referentnom vjerojatnošću $Pt(A) = 10\%$ u $t = 10$ godina (povratno razdoblje $T_r = 95$ godina), za zahtjev ograničenog oštećenja.

Spektri odziva u HRN EN 1998-1:2011 generirani su kombiniranjem empirijskih oblika s jednim PSHA faktorom za skaliranje i kao takvi nisu spektri jednolike opasnosti. Oblici elastičnog spektra odziva (za Tip 1 i Tip 2) izrađeni su uzimajući u obzir magnitudu onog ili onih potresa koji će najviše doprinijeti potresnoj opasnosti određenoj za potrebe probabilističke procjene opasnosti. Prema Bulajić i dr. (2012.) ova definicija je nejasna (ili nije pravilno izvedena) jer će prema njoj potresi koji najviše utječu na porast potresne opasnosti za neku lokaciju, čak i za istu vjerojatnost pojave P_t (A), tj. za isto povratno razdoblje, biti različiti za različite periode oscilacija, a spektri HRN EN 1998-1:2011 su skalirani samo s PSHA procjenom vršnog ubrzanja tla. Pouzdanija alternativa spektrima HRN EN 1998-1:2011 su spektri jednolike opasnosti generirani kroz probabilistički proračun potresne opasnosti proveden za svaku spektralnu ordinatu upotrebom regionalnih atenuacijskih jednadžbi.

3.5.2. Preliminarni UHS spektri za promatrano područje

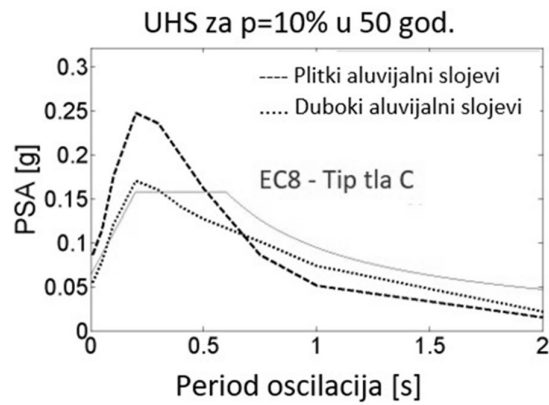
Kao bi se definiralo pouzdanije projektno potresno djelovanje za područja s malom do umjerenom seizmičnošću za potrebe ovog rada provedena je preliminarna procjena potresne opasnosti promatranog područja atenuacijskom jednadžbom Sabetta i Pugliese (1996.).

Izrađeni su spektri jednolike opasnosti (Slike 3.12, 3.13 i 3.14) za lokaciju s geografskim koordinatama 45,55 °N, 18,70 °E koja je centralna na promatranom području. koji su uspoređeni sa spektrima koje predlaže HRN EN 1998-1:2011 (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011).

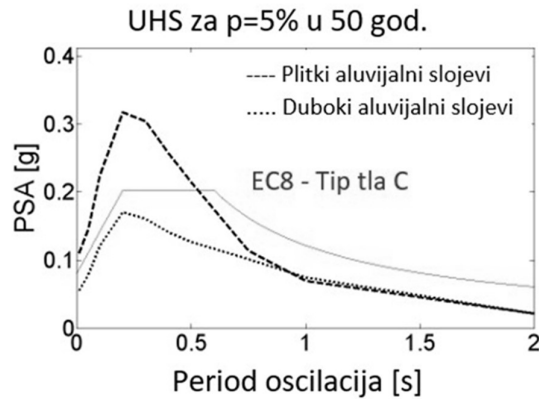
Sukladno realno mogućem sastavu temeljnog tla, za ovaj proračun pretpostavlja se da se temeljno tlo na promatranom lokaciji sastoji od lokalnog tla koje sačinjavaju duboki aluvijalni slojevi (na slikama 3.12, 3.13 i 3.14 su zbog usporedbe prikazani i spektri proračunati za plitke aluvijalne slojeve).

Izrađeni su spektri za povratna razdoblja od 475 godina (vjerojatnost 2 % u 50 godina), 975 godina (vjerojatnost 5 % u 50 godina) i 2475 godina (vjerojatnost 2 % u 50 godina).

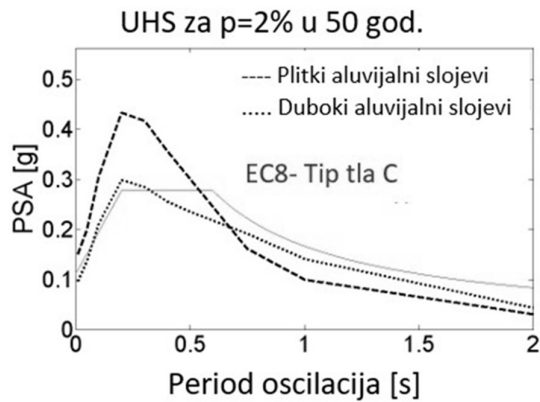
S ciljem uspoređivanja na slikama 3.12, 3.13 i 3.14 prikazani su i spektri prema HRN EN 1998-1:2011 za Tip 1 ($M_s > 5,5$) i tlo tipa C, koje je dominantno prisutno na promatranom području i koje približno odgovara karakteristikama plitkih i dubokih naslaga aluvijalnog tla koje su definirali Sabetta i Pugliese (1996.).



Slika 3.12 Spektri jednolike opasnosti za lokaciju 45,55 °N, 18,70 °E, proračunati uporabom atenuacijske jednadžbe Sabetta i Pugliese (1996.), za povratno razdoblje od 475 godina



Slika 3.13 Spektri jednolike opasnosti za lokaciju 45,55 °N, 18,70 °E, proračunati uporabom atenuacijske jednadžbe Sabetta i Pugliese (1996.), za povratno razdoblje od 975 godina



Slika 3.14 Spektri jednolike opasnosti za lokaciju 45,55 °N, 18,70 °E, proračunati uporabom atenuacijske jednadžbe Sabetta i Pugliese (1996.), za povratno razdoblje od 2475 godina

Prikazani spektri prema HRN EN 1998-1:2011 su normalizirani pomoću probabilistički proračunatih vrijednosti maksimalnog ubrzanja za stjenovito tlo, upotrebom atenuacijske jednadžbe Sabetta i Pugliese (1996.), a zatim su pomnoženi s odgovarajućim faktorom S za tlo tipa C.

Usporedba spektara odziva za promatrano područje izrađenih upotrebom atenuacijske jednadžbe Sabetta i Pugliese (1996.) i spektra odziva prema HRN EN 1998-1:2011 upućuje na zaključak da može doći do podcjenjivanja ili precjenjivanja projektnog potresnog djelovanja, odnosno do značajnih poddimenzioniranja ili predimenzioniranjem potresne otpornosti građevinskih konstrukcija.

HRN EN 1998-1:2011 spektri, osobito za lokalno temeljno tlo s plitkim (tanjim) aluvijalnim slojem i periode veće od 0,2 s, značajno precjenjuju vrijednost potresnog opterećenja, uz pretpostavku da atenuacijska jednadžba Sabetta i Pugliese (1996.) daju realne procjene jačine gibanja temeljnog tla uslijed potresa.

Za kratke periode oscilacija i to one koji su manji od 0,2 s je obrnuto, UHS spektri za plitko aluvijalno tlo daju mnogo veće vrijednosti nego HRN EN 1998-1:2011 spektri, dok za duboko aluvijalno tlo i UHS spektri i HRN EN 1998-1:2011 spektri daju slične vrijednosti.

Na temelju ovih preliminarnih rezultata može se zaključiti da bi se oblik spektara za tlo tipa C u HRN EN 1998-1:2011 trebao drugačije definirati u Nacionalnom dodatku za promatrano područje te da je daljnje istraživanje potresne opasnosti za promatrano područje u ovom radu ne samo opravdano nego i nužno.

3.6. Razvoj atenuacijskih jednadžbi za skaliranje vrijednosti PGA i PSA na dubokim lokalnim tlima i dubokim geološkim slojevima

Većina postojećih empirijskih jednadžbi za skaliranje vrijednosti PGA uzimaju u obzir samo učinke temeljnog tla do dubine gornjih 30 m stratigrafskog profila tla, dok se učinci dubokih geoloških slojeva zanemaruju. Upotreba ovog pristupa učestala je uglavnom zato što podatci o dubokim geološkim slojevima najčešće nisu dostupni, a istraživanja profila tla na dubinama većim od nekoliko desetina metara su najčešće preskupa za uobičajene svrhe gradnje.

Za potrebe istraživanja u ovom doktorskom radu razvijaju se nove empirijske jednadžbe za predviđanje vrijednosti PGA i PSA, koje istodobno uzimaju u obzir učinke lokalnog temeljnog tla i

dubokih geoloških slojeva, a koje će biti moguće upotrijebiti i na područjima s dubokim lokalnim temeljnim tlima i dubokim geološkim sedimentima koji su odabrani kao reprezentativni u ovom istraživanju.

Slijedi se postupak upotrijebljen u istraživanju Bulajić i dr. (2013.), koji omogućava implementaciju regionalnih podataka, uzimanje u obzir i učinaka dubokih geoloških slojeva te mogućnost lakog ažuriranja i ponovne procjene opasnosti kako broj novih potresnih zapisa raste. Za atenuacijske jednadžbe upotrijebljeni su sljedeći matematički oblici:

- za predviđanje horizontalnih i vertikalnih vrijednosti *PGA*:

$$\log[PGA] = c_1 + c_2 \cdot M + c_3 \cdot \log(\sqrt{R^2 + R_0^2}) + c_4 \cdot S_{L1} + c_5 \cdot S_{L2} + c_6 \cdot S_{G1} + c_7 \cdot S_{G2} + \sigma_{\log} \cdot \varepsilon \quad (3.12)$$

- za predviđanje horizontalnih i vertikalnih vrijednosti *PSA*:

$$\log[PSA(T)] = c_1(T) + c_2(T) \cdot M + c_3(T) \cdot \log(\sqrt{R^2 + R_0(T)^2}) + c_4(T) \cdot S_{L1} + c_5(T) \cdot S_{L2} + c_6(T) \cdot S_{G1} + c_7(T) \cdot S_{G2} + \sigma_{\log}(T) \cdot P \quad (3.13)$$

gdje je:

PGA – vršno ubrzanja tla (g)

PSA(T) – amplitude pseudo ubrzanja za period oscilacija *T* (g) za viskozno prigušenje 5 %

T – period oscilacija

M – magnituda potresa (*M_s*)

σ_{\log} – standardna devijacija dekadskog logaritma *PGA/PSA(T)*

ε – vjerojatnost da procijenjena vrijednost *PGA* neće biti nadmašena

(pri čemu je $\varepsilon = 0$ za 50 %-tnu, $\varepsilon = 1$ za 84 %-tnu i $\varepsilon = 2$ za 98 %-tnu vjerojatnost da procijenjena vrijednost za *PGA* neće biti nadmašena)

P – vjerojatnost da procijenjena vrijednost *PSA(T)* neće biti nadmašena

(pri čemu je $P = 0$ za 50 %-tnu i $P = 1$ za 84 %-tnu vjerojatnost da procijenjena vrijednost za *PSA(T)* neće biti nadmašena)

R – epicentralna/hipocentralna udaljenost

R₀ – parametar koji se iterativno određuje za svaku jednadžbu (i za svaku amplitudu *PSA(T)*) tako da standardna devijacija za tu jednadžbu ima najmanju moguću vrijednost)

c_1 do c_7 – nepoznati parametri koji se dobiju kao rezultat regresijskog proračuna

S_{L1} i S_{L2} – varijable za lokalne slojeve temeljnog tla

S_{G1} i S_{G2} – varijable za duboke geološke slojeve.

Vrijednosti varijabli slojeva temeljnog tla prikazane su u tablici 3.8. Lokalno temeljno tlo razvrstano je s obzirom na razredbu Seed i dr. (1976a, b), pri čemu je razredna promjenljiva varijabla $s_L = 0$ za stjenovita tla, $s_L = 1$ za kruta tla i $s_L = 2$ za duboke slojeve lokalnog tla.

Razredba Trifunca i Bradyja (1975.) usvojena je za razredbu dubokih geoloških slojeva, a odgovarajuće razredne promjenjive varijable definirane su kao: $S_{G1} = S_{G2} = 0$ za geološku stijenu $S_{G1} = 1$ i $S_{G2} = 0$ za mješovite duboke geološke slojeve, a $S_{G1} = 0$ i $S_{G2} = 1$ za duboke geološke sedimente istraživanog područja.

Tablica 3.8 Kategorijske varijable za različite tipove lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva, koje se upotrebljavaju za jednadžbe skaliranja u ovom doktorskom radu

PARAMETRI LOKALNIH SLOJEVA TEMELJNOG TLA	VARIJABLE ZA LOKALNE SLOJEVE TEMELJNOG TLA	PARAMETRI DUBOKIH GEOLOŠKIH SLOJEVA	VARIJABLE ZA DUBOKE GEOLOŠKE SLOJEVE
Stjenovito tlo $s_L = 0$	$S_{L1} = S_{L2} = 0$	Geološka stijena $s = 2$	$S_{G1} = S_{G2} = 0$
Kruto tlo $s_L = 1$	$S_{L1} = 1$ i $S_{L2} = 0$	Mješoviti duboki geološki slojevi $s = 1$	$S_{G1} = 1$ i $S_{G2} = 0$
Duboka lokalna tla $s_L = 2$	$S_{L1} = 0$ i $S_{L2} = 1$	Duboki geološki sedimenti $s = 0$	$S_{G1} = 0$ i $S_{G2} = 1$

Za razvoj jednadžbi za skaliranja horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA i PSA sastavljena je baza podataka jakog gibanja temeljnog tla koja se sastoji od 436 horizontalnih i 218 vertikalnih komponenata akcelerograma zabilježenih na području sjeverozapadnog Balkana. Ovi akcelerogrami su zabilježeni za vrijeme 112 različitih potresa s magnitudom $3 \leq M_s \leq 6,8$ od kojih je većina (418 horizontalnih i 209 vertikalnih zapisa) zabilježena za vrijeme potresa u razdoblju 1976. – 1987., a ostatak (18 horizontalnih i 15 vertikalnih zapisa) su zabilježeni za vrijeme potresa u razdoblju 2010. – 2011.

Temeljni izvor za bazu podataka jakog kretanja temeljnog tla je baza EQINFOS (Jordanovski i dr. 1987) iz koje je preuzeto 406 horizontalnih i 203 vertikalne komponente zapisa. Baza podataka EQINFOS (Jordanovski i dr. 1987) sadržava akcelerografske zapise niza potresa s područja sjeverozapadnog Balkana. Upotrijebljena je jer za mjesta akcelerografskih mjernih stanica koje su bilježile zapise potresa iz baze, postoji razredba tla koju su izradili Trifunac i dr. (1991.), a kasnije usavršili i ažurirali Lee i Trifunac (1993.) te Lee i Manić (1994.).

Kako među odabranim komponentama zapisa iz baze EQINFOS nije bilo onih koje su snimljene na dubokim temeljnim tlima (vidi tablicu 3.8), odabrane su dodatne komponente akceleroograma. Preuzeto je 30 horizontalnih i 15 vertikalnih komponenata zapisa potresa zabilježenih na temeljnim tlima koja se sastoje od dubokih aluvijalnih slojeva. Dio zapisa preuzet je iz ISESD baze podataka (Ambraseys i dr. 2004, Ambraseys i dr. 2002), iz razdoblja 1976. – 1987., a ostali iz baze podataka Republičkog seizmološkog zavoda Srbije (<http://www.seismo.gov.rs/>) iz razdoblja 2010. – 2012.

Kod odabira zapisa potresa za bazu izuzeti su oni čiji su podaci o epicentralnim ili hipocentralnim udaljenosti bili nepouzdana, nedostupni ili nisu postojali. Od ukupnog broja zapisa, 180 je zabilježeno na epicentralnim udaljenostima manjim od 100 km, a 149 na udaljenostima manjim od 30 km. Jake amplitude gibanja temeljnog tla koje su zabilježene na epicentralnim udaljenostima većim od 100 km uglavnom su povezane s površinskim valovima, čije je slabljenje sporije te regionalno ovisno i zahtijeva dodatne analize u budućnosti kada veći bude postojao veći broj zapisa na ovim udaljenostima.

Postupak razvoja novih empirijskih jednadžbi za predviđanje vrijednosti PGA i PSA proveden je višestrukim linearnim regresijskim proračunima u dvije faze.

U prvoj fazi u jednadžbu (3.12) (za predviđanje horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA) odnosno (3.13) (za predviđanje horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PSA) ugrađen je model s prvim skupom podataka koji je za horizontalni smjer sadržavao 406, a za vertikalni 203 komponenata ubrzanja iz baze podataka EQINFOS (Jordanovski i dr. 1987). U odabranim skupovima nije bilo komponenata snimljenih na dubokim temeljnim tlima (vidi tablicu 3.8), zato u jednadžbe nije ugrađen koeficijent c_5 , odnosno procijenjeni su samo koeficijenti c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_6 , i c_7 . Vrijednosti R_0 su iterativno prilagođene kako bi se maksimizirale R^2 statistike PGA predviđanja tj. da bi se umanjila srednja kvadratna pogreška empirijskog predviđanja.

U drugoj fazi su kalibrirani generirani predikcijski modeli ograničavanjem koeficijenta c_5 (linearnom regresijskom analizom), na temelju dodatnih 30 horizontalnih komponenta za skaliranje horizontalnih vrijednosti PGA/PSA i 15 vertikalnih komponenta za skaliranje horizontalnih vrijednosti PGA/PSA snimljenih na temeljnim tlima s dubokim naslagama lokalnog tla koje leži na dubokim geološkim slojevima.

Kako je većina komponenta ubrzanja zabilježena na manjim udaljenostima, proveden je sekundaran proračun u kojemu su upotrijebljene samo komponente zabilježene na epicentralnim udaljenostima manjim od 30 km. Za ove proračune upotrijebljeni su isti koeficijenti za lokalno temeljno tlo koji su proračunati u prethodnom proračunu za sve udaljenosti, a za sve regresijske proračune pretpostavlja se da rezultati slijede log-normalnu distribuciju.

3.6.1. Prijedlog jednadžbi za skaliranja horizontalnih vrijednosti PGA

Za skaliranje horizontalnih vrijednosti PGA predlažu se slijedeće atenuacijske jednadžbe:

- 1) jednadžba s R kao epicentralnom udaljenosti, koeficijenti određeni na temelju horizontalnih komponenta ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od epicentra do mjernog mjesta (akcelerografske stanice).

$$\log[\text{PGA}] = -1,2864 + 0,3937 \cdot M - 1,3820 \cdot \log(\sqrt{R^2 + 19,5^2}) + \\ + 0,1764 \cdot S_{L1} - 0,0820 \cdot S_{L2} - 0,1498 \cdot S_{G1} - 0,1085 \cdot S_{G2} + 0,2692 \cdot \varepsilon \quad (3.14)$$

- 2) jednadžba s R kao hipocentralnom udaljenosti, koeficijenti određeni na temelju horizontalnih komponenta ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od hipocentra do mjernog mjesta:

$$\log[\text{PGA}] = -0,8793 + 0,3730 \cdot M - 1,5096 \cdot \log(\sqrt{R^2 + 25,2^2}) + \\ + 0,1961 \cdot S_{L1} - 0,1435 \cdot S_{L2} - 0,1303 \cdot S_{G1} - 0,1066 \cdot S_{G2} + 0,2764 \cdot \varepsilon \quad (3.15)$$

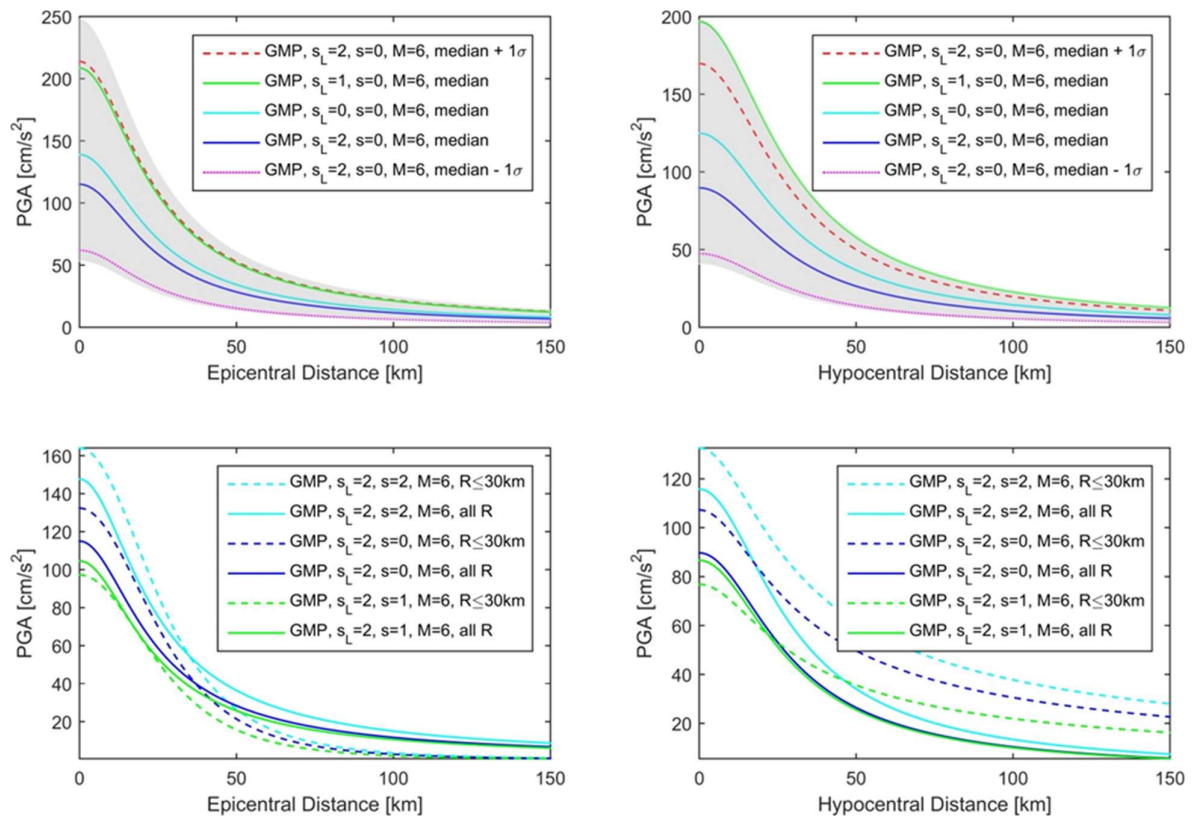
- 3) jednadžba s R kao epicentralnom udaljenosti, koeficijenti određeni na temelju horizontalnih komponenta ubrzanja snimljenih na epicentralnim udaljenostima manjim od 30 km:

$$\log[\text{PGA}] = 3,1399 + 0,3864 \cdot M - 3,8132 \cdot \log(\sqrt{R^2 + 40,0^2}) + \\ + 0,1015 \cdot S_{L1} - 0,0820 \cdot S_{L2} - 0,2387 \cdot S_{G1} - 0,0893 \cdot S_{G2} + 0,2689 \cdot \varepsilon \quad (3.16)$$

- 4) jednadžba s R kao hipocentralnom udaljenosti, koeficijenti određeni na temelju horizontalnih komponenta ubrzanja snimljenih na hipocentralnim udaljenostima manjim od 30 km:

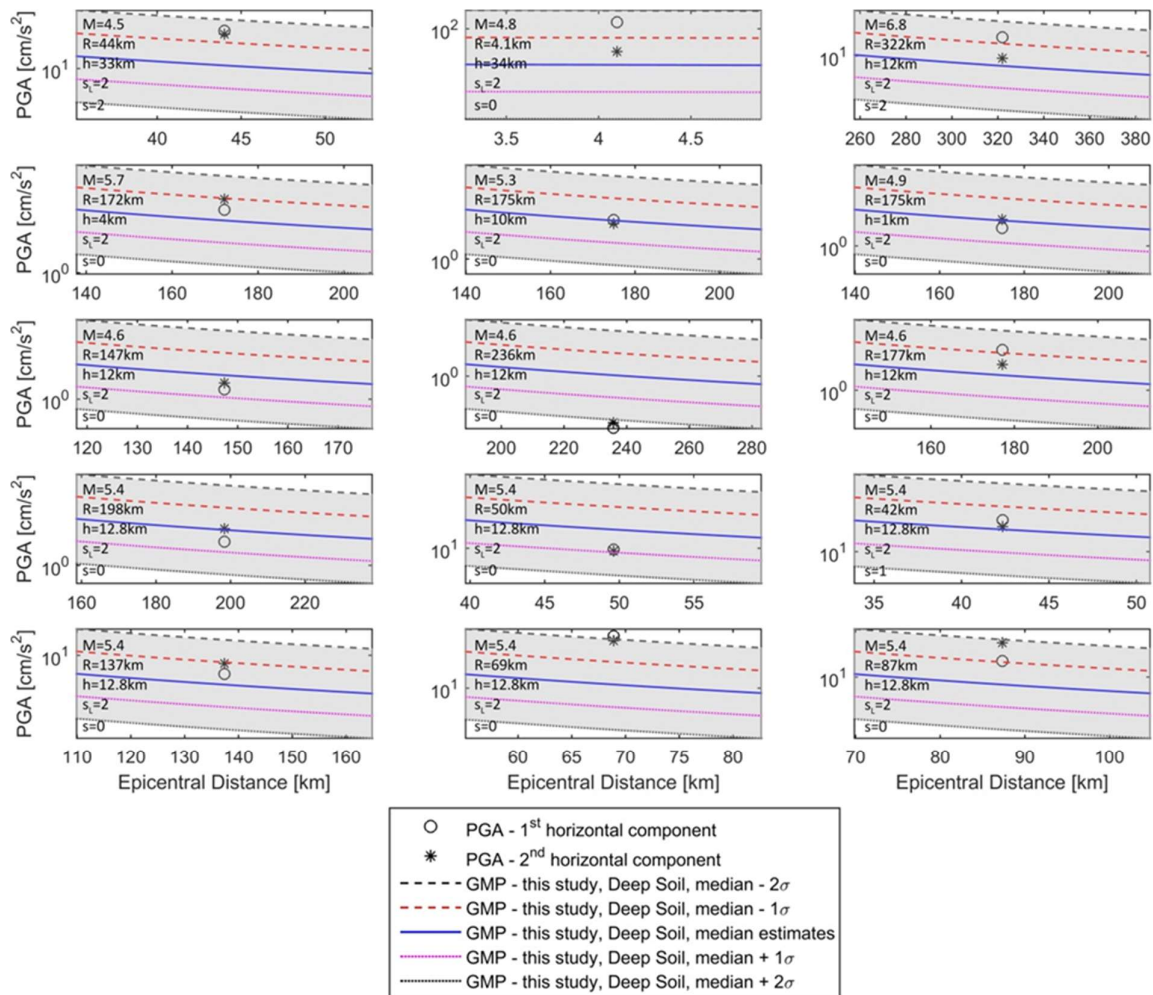
$$\log[PGA] = -2,0081 + 0,3698 \cdot M - 0,7030 \cdot \log(\sqrt{R^2 + 18,5^2}) + 0,1044 \cdot S_{L1} - 0,1435 \cdot S_{L2} - 0,2497 \cdot S_{G1} - 0,0884 \cdot S_{G2} + 0,2765 \cdot \varepsilon \quad (3.17)$$

U jednadžbama (3.16) i (3.17) upotrijebljeni su isti koeficijenti za duboke slojeve lokalnog temeljnog tla kao i u jednadžbama (3.14) i (3.15). Proračunate su atenuacije horizontalnih vrijednosti PGA s obzirom na udaljenost, prema jednadžbama (3.14) do (3.17), za različite slojeva lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva. Rezultati proračuna prikazani su empirijskim atenuacijskim krivuljama na slici 3.15 iz kojih se vide različiti utjecaji nekoliko kombinacija slojeva lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva na vrijednosti PGA u horizontalnom smjeru. Razlike u vrijednostima procjena istom atenuacijskom jednadžbom za različite uvjete temeljnog tla postižu se u proračunu odabirom različitih koeficijenata kategorijskih varijabli S_L i S_G (Tablica 3.8).



Slika 3.15 Empirijske atenuacijske krivulje horizontalnih vrijednosti PGA proračunate jednadžbama (3.14) do (3.17), za različite uvjete lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva (Bulajić i dr. 2022b)

Gornja dva dijagrama (Slika 3.15) prikazuju horizontalne vrijednosti PGA koje su skalirane jednadžbom (3.14 i 3.15) (za epicentralne odnosno hipocentralne udaljenosti i koeficijente određene na temelju horizontalnih komponenta ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od epicentra tj. hipocentra do mjernog mjesta), uz pretpostavku istih dubokih geoloških uvjeta – dubokih geoloških sedimentata i variranje uvjeta lokalnog temeljnog tla. Proračuni su rezultirali npr. vrijednošću $10^{0.1764}$ za duboke geološke sedimente i kruto lokalno tlo koja je 1,5 puta veća od horizontalnih vrijednosti za duboke geološke sedimente i stjenovito lokalno tlo te vrijednošću $10^{-0.0820}$ za duboke geološke sedimente i duboke slojeve lokalnog tla koja je 1,20 puta manja od horizontalnih vrijednosti PGA za duboke geološke sedimente i stjenovito tlo.



Slika 3.16 Usporedba medijana $\pm 1\sigma_{\log}$ i medijana $\pm 2\sigma_{\log}$ (sivo područje) procijenjenih horizontalnih vrijednosti PGA proračunatih jednadžbama (3.14) i (3.16), s vrijednostima PGA snimljenim na dubokim lokalnim temeljnim tlima ($s_L = 2$) i različitim dubokim geološkim slojevima (Bulajić i dr. 2022b)

Na dubokim lokalnim tlima iznad dubokih geoloških sedimenta došlo je do deamplifikacije potresnih valova jer je raspršivanje potresne energije na dubokim lokalnim tlima veće od lokalnog povećanja ubrzanja temeljnog tla, što je u skladu je s nalazima mnogih drugih istraživačkih studija o nelinearnom ponašanju mekih sedimenata tijekom snažnog potresnog gibanja temeljnog tla.

Na donja dva dijagrama (Slika 3.15) razmatran je i odnos istih lokalnih uvjeta tla (dubokog lokalnog tla) s različitim kategorijama dubokih geoloških slojeva. Horizontalne vrijednosti PGA na dubokim lokalnim tlima i geološkoj stijeni iznosile su su $1/10^{-0.1085}$, što je 1,28 puta veće od horizontalnih vrijednosti PGA na dubokim lokalnim tlima i dubokim geološkim sedimentima.

Za duboka lokalna tla i mješovite duboke geološke slojeve proračunata je horizontalna vrijednost PGA koja iznosi $1/10^{-0.1498}$, što je 1,41 puta veće od horizontalnih vrijednosti PGA na dubokim lokalnim tlima i geološkim sedimentima.

Amplifikacija na temeljnim tlima koja leže na dubokim geološkim stijenskim slojevima može se objasniti činjenicom da se visokofrekvencijski valovi lakše prenose kroz kompaktnije i tvrde medije (poput npr. stijena od bazalta i granita) nego kroz duboke geološke sedimente ili mješovite geološke slojeve.

Za procijenjene horizontalne vrijednosti PGA proračunate jednadžbama (3.14) i (3.16), uspoređeni su medijani, medijan ± 1 standardne devijacije (σ_{\log}) i medijan ± 2 standardne devijacije (σ_{\log}), s horizontalnim vrijednostima PGA snimljenim na dubokim slojevima lokalnog temeljnog tla. Na slici 3.16 vidi se izvrsno podudaranje empirijskih predviđanja proračunatih generiranim jednadžbama za skaliranje horizontalnih vrijednosti PGA s horizontalnim vrijednostima PGA na dubokim lokalnim tlima, snimljenim u širem području relevantnom za promatrano područje.

3.6.2. Prijedlog jednadžbi za skaliranja vertikalnih vrijednosti PGA

Postupak za razvoja novih empirijskih jednadžbi za predviđanje horizontalnih vrijednosti PGA, višestrukim linearnim regresijskim proračunima u dvije faze, usvojen je i za razvoja novih empirijskih jednadžbi za predviđanje vertikalnih vrijednosti PGA.

Za skaliranje vertikalnih vrijednosti PGA predlažu se sljedeće atenuacijske jednadžbe:

- 1) jednadžba s R kao epicentralnom udaljenosti, koeficijenti određeni na temelju vertikalnih komponenta ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od epicentra do mjernog mjesta:

$$\log[PGA] = -1,6732 + 0,3938 \cdot M - 1,3197 \cdot \log(\sqrt{R^2 + 16,9^2}) + \\ + 0,1548 \cdot S_{L1} - 0,0443 \cdot S_{L2} - 0,1207 \cdot S_{G1} - 0,0682 \cdot S_{G2} + 0,2429 \cdot \varepsilon \quad (3.18)$$

- 2) jednadžba s R kao hipocentralnom udaljenosti, koeficijenti određeni na temelju vertikalnih komponenta ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od izvora do mjernog mjesta:

$$\log[PGA] = -1,2631 + 0,3706 \cdot M - 1,4410 \cdot \log(\sqrt{R^2 + 22,5^2}) + \\ + 0,1749 \cdot S_{L1} - 0,0494 \cdot S_{L2} - 0,1034 \cdot S_{G1} - 0,0676 \cdot S_{G2} + 0,2533 \cdot \varepsilon \quad (3.19)$$

- 3) jednadžba s R kao epicentralnom udaljenosti, koeficijenti određeni na temelju vertikalnih komponenta ubrzanja snimljenih na epicentralnim udaljenostima manjim od 30 km:

$$\log[PGA] = 3,9188 + 0,3990 \cdot M - 4,4899 \cdot \log(\sqrt{R^2 + 40,0^2}) + \\ + 0,1116 \cdot S_{L1} - 0,0443 \cdot S_{L2} - 0,2036 \cdot S_{G1} - 0,0595 \cdot S_{G2} + 0,2520 \cdot \varepsilon \quad (3.20)$$

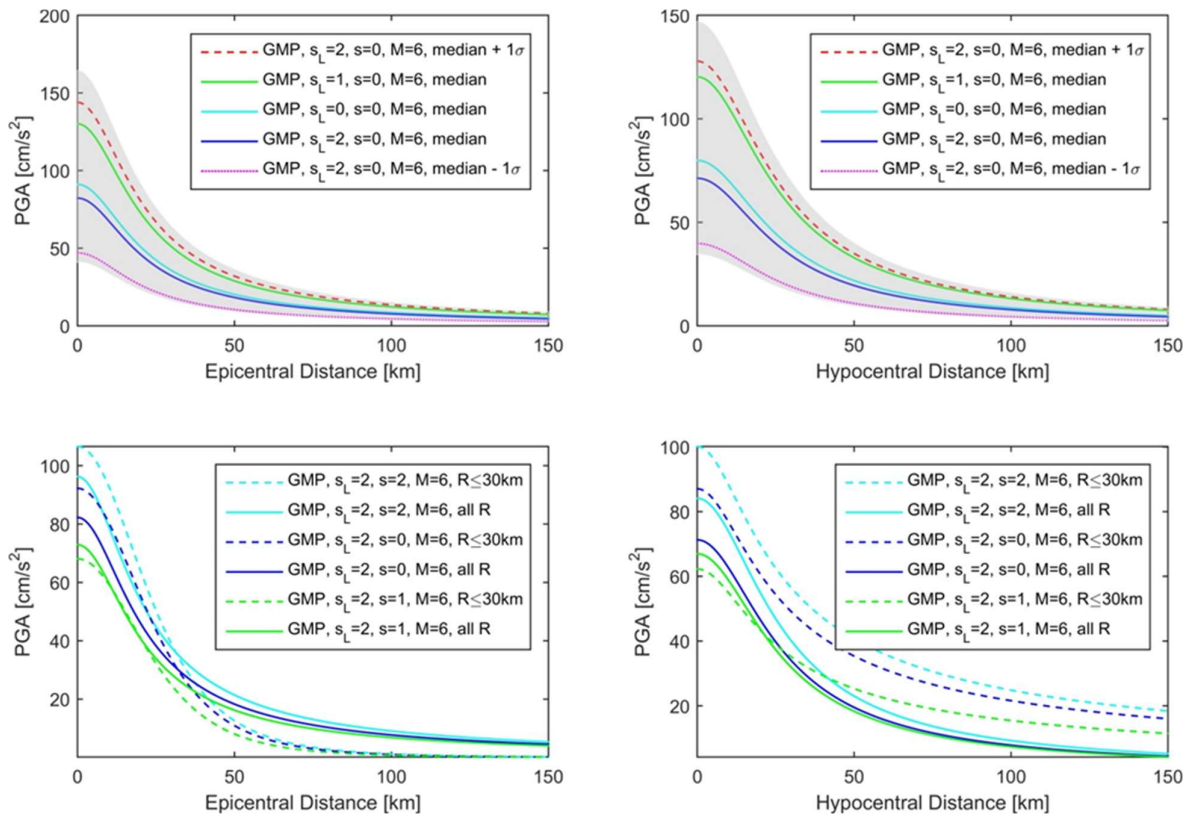
- 4) jednadžba s R kao hipocentralnom udaljenosti, koeficijenti određeni na temelju vertikalnih komponenta ubrzanja snimljenih na hipocentralnim udaljenostima manjim od 30 km:

$$\log[PGA] = -2,3298 + 0,3799 \cdot M - 0,7178 \cdot \log(\sqrt{R^2 + 15,3^2}) + \\ + 0,1140 \cdot S_{L1} - 0,0494 \cdot S_{L2} - 0,2160 \cdot S_{G1} - 0,0576 \cdot S_{G2} + 0,2632 \cdot \varepsilon \quad (3.21)$$

U jednadžbama (3.20) i (3.21) upotrijebljeni su isti koeficijenti za duboke lokalne slojeve temeljnog tla kao i u jednadžbama (3.18) i (3.19).

Prema jednadžbama (3.18) do (3.21), za različite slojeva lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva proračunate su atenuacije vertikalnih vrijednosti PGA s udaljenošću.

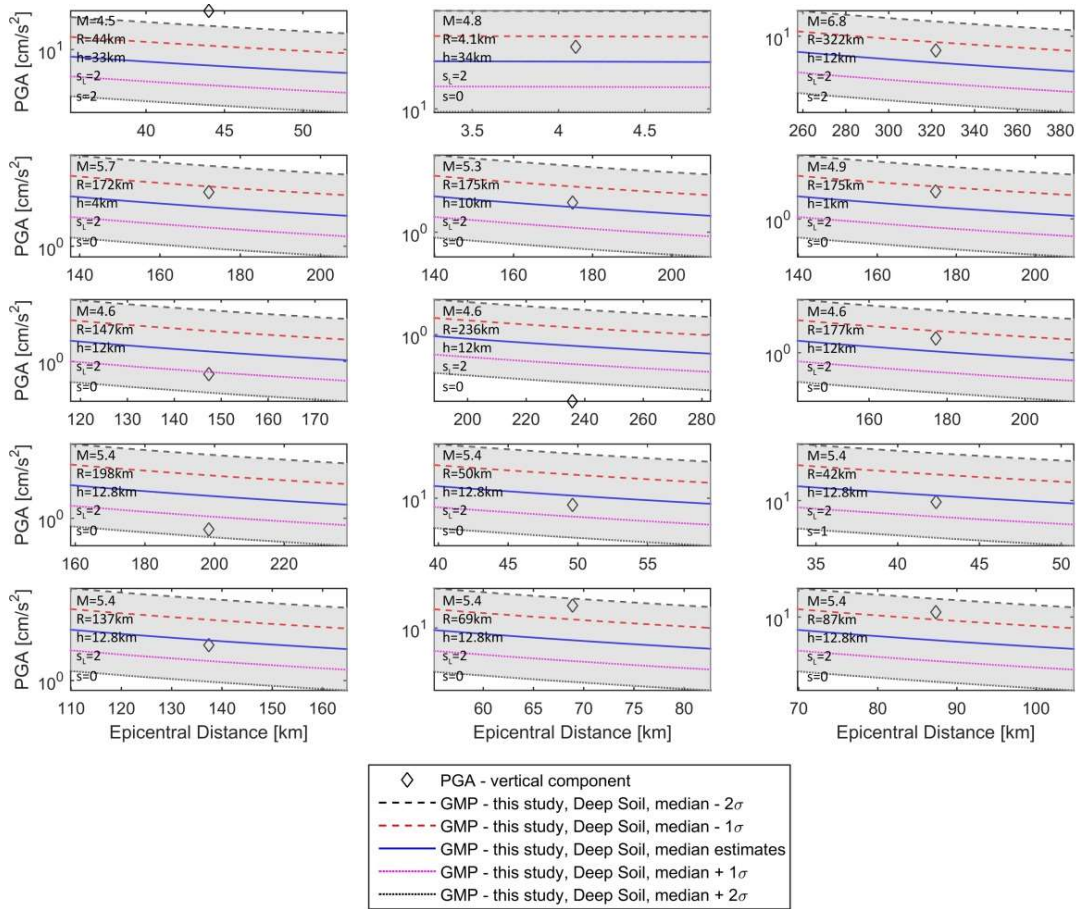
Na slici 3.17 prikazani su rezultati provedenog proračuna predloženim empirijskim atenuacijskim jednadžbama na temelju kojih se može zaključiti o postojanju utjecaja različitih slojeva lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva na jakost vršnog ubrzanja temeljnog tla u vertikalnom smjeru.



Slika 3.17 Empirijske atenuacijske krivulje vertikalnih vrijednosti PGA za različite lokalne i duboke geološke uvjete tla (vidi tablicu 3.8), proračunate jednadžbama (3.18) do (3.21) (Bulajić i dr. 2022a)

Razlike između vrijednosti PGA procijenjene istom jednadžbom za različite uvjete temeljnog tla mogu se izračunati upotrebom koeficijenata kategorijskih varijabli S_L i S_G (Tablica 3.8).

Jednadžbom (3.18) za epicentralne udaljenosti na temelju vertikalnih komponenta ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od epicentra do mjernog mjesta, skalirane su vertikalne vrijednosti PGA, u kojima su pretpostavljeni istih uvjeti dubokih geoloških slojeva koji leže na dubokim geološkim sedimentima. Proračun je rezultirao iznosom $10^{0.1548}$ za vertikalnu vrijednost PGA na dubokim geološkim sedimentima i lokalnom krutom tlu, što je 1,43 puta veće od vertikalne vrijednosti PGA za duboke geološke sedimente i lokalno stjenovito tlo. Za duboke geološke sedimente i duboke slojeve lokalnog tla vrijednost PGA iznosi $10^{-0.0443}$ i manja je od iste za duboke geološke sedimente i lokalno stjenovito tlo 1,11 puta. Kao i u horizontalnom smjeru, na dubokim lokalnim aluvijalnim slojevima dolazi do deamplifikacije potresnih valova i u vertikalnom smjeru jer je disipacija potresne energije veća od lokalne amplifikacije temeljnog tla.



Slika 3.18 Usporedba medijana $\pm 1 \sigma_{\log}$ i medijana $\pm 2 \sigma_{\log}$ (sivo područje) procijenjenih vertikalnih vrijednosti PGA proračunatih jednadžbama (3.18) i (3.20), s vrijednostima PGA snimljenim na dubokim lokalnim temeljnim tlima ($s_L = 2$) i različitim dubokim geološkim slojevima (Bulajić i dr. 2022a)

Slično već navedenom, za iste lokalne uvjete temeljnog tla (duboki aluvijalni slojevi), vrijednost PGA u vertikalnom smjeru će se smanjiti na dubokim geološkim sedimentima i mješovitim dubokim geološkim slojevima dok će se na dubokim geološkim stijenama povećati jer se valovi velike frekvencije lakše prenose kroz tvrde i zbijene stijene.

Vertikalna vrijednost PGA proračunata za duboke slojeve lokalnog tla i geološku stijenu iznosi $1/10^{0.0682}$, što je 1,17 puta veće od vertikalnih vrijednosti PGA proračunate za duboke slojeve lokalnog tla i geološke sedimente. Za duboke slojeve lokalnog tla i mješovite duboke geološke slojeve vertikalna vrijednost PGA iznosi $1/10^{0.1207}$ i 1,32 puta je veća od PGA na dubokim lokalnim tlima i geološkim sedimentima.

Uspoređeni su medijani, medijan ± 1 standardne devijacije (σ_{\log}) i medijan ± 2 standardne devijacije (σ_{\log}), za procijenjene vertikalne vrijednosti PGA proračunate jednadžbama (3.18) i (3.20), s vertikalnim vrijednostima PGA snimljenim na dubokim slojevima lokalnog temeljnog tla.

Na slici 3.18 vidi se izvrsno podudaranje vertikalnih vrijednosti zapisa potresa snimljenih na dubokim temeljnim tlima s empirijskim predviđanjima proračunatim generiranim jednadžbama za skaliranje vertikalnih vrijednosti PGA.

3.6.3. Skaliranja horizontalnih amplituda PSA

Horizontalne amplitude PSA, za različite periode oscilacija, skalirane su atenuacijskom jednadžbom sljedećeg matematičkog oblika:

$$\begin{aligned} \log[PSA_{hor}(T)] = & c_1(T) + c_2(T) \cdot M + c_3(T) \cdot \log(\sqrt{R^2 + R_0(T)^2}) + c_4(T) \cdot S_{L1} \\ & + c_5(T) \cdot S_{L2} + c_6(T) \cdot S_{G1} + c_7(T) \cdot S_{G2} + \sigma_{\log}(T) \cdot P \end{aligned} \quad (3.22)$$

Tablica 3.9 Koeficijenti skaliranja i standardne devijacije, proračunati na temelju horizontalnih komponenta ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od epicentra do mjernog mjesta, za empirijsku atenuacijsku jednadžbu (3.22) u kojoj je R epicentralna udaljenost, izvedeni za šire promatrano područje (Bulajić i dr. 2021a)

T	c_1	c_2	c_3	R_0	c_4	c_5	c_6	c_7	σ_{\log}
0,050	-0,921	0,352	-1,371	20,3	0,120	-0,058	-0,198	-0,143	0,272
0,075	-0,511	0,337	-1,466	22,1	0,071	-0,032	-0,212	-0,147	0,286
0,100	-0,467	0,360	-1,552	23,5	0,092	-0,003	-0,168	-0,096	0,287
0,150	-0,406	0,396	-1,638	25,8	0,188	0,056	-0,232	-0,188	0,283
0,200	-0,699	0,433	-1,611	24,5	0,256	0,113	-0,203	-0,186	0,290
0,300	-1,643	0,480	-1,391	18,6	0,327	0,203	-0,025	-0,013	0,297
0,400	-2,499	0,540	-1,226	13,8	0,318	0,248	0,100	0,087	0,313
0,500	-2,883	0,579	-1,201	12,3	0,279	0,238	0,134	0,136	0,315
0,750	-3,410	0,596	-1,044	10,9	0,198	0,057	0,066	0,162	0,323
1,000	-3,792	0,604	-0,911	8,9	0,141	-0,098	-0,021	0,129	0,322
1,500	-4,110	0,590	-0,768	8,6	0,077	-0,227	-0,085	0,054	0,323
2,000	-4,295	0,599	-0,825	9,0	0,063	-0,184	-0,077	0,052	0,322

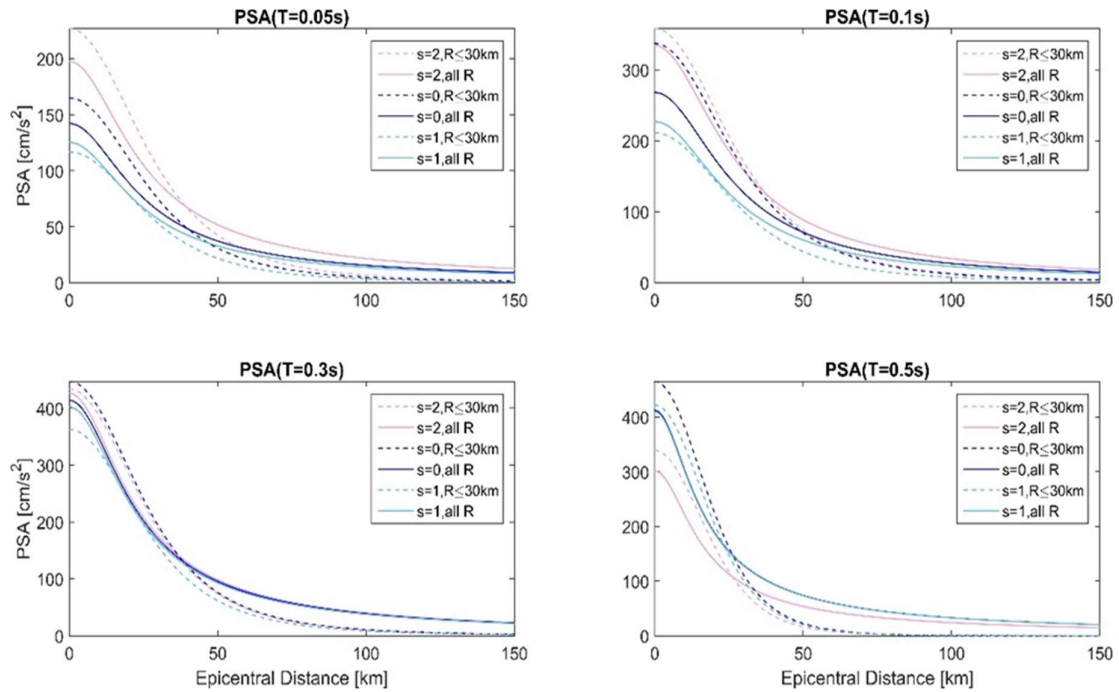
Za jednadžbu (3.22), u kojoj je R epicentralna udaljenost, koeficijenti za skaliranje horizontalnih amplituda PSA, proračunati na temelju horizontalnih komponenata ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od epicentra do mjernog mjesta prikazani su u tablici 3.9.

Koeficijenti za skaliranje horizontalnih amplituda PSA, proračunati na temelju horizontalnih komponenata ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od hipocentra do mjernog mjesta, za atenuacijsku jednadžbu (3.22) u kojoj je R hipocentralna udaljenost, prikazani su u tablici 3.10.

Tablica 3.10. Koeficijenti skaliranja i standardne devijacije za empirijsku atenuacijsku jednadžbu (3.22) u kojoj je R hipocentralna udaljenost, proračunati na temelju horizontalnih komponenata ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od hipocentra do mjernog mjesta, izvedeni za šire promatrano područje (Bulajić i dr. 2021a)

T	c_1	c_2	c_3	R_0	c_4	c_5	c_6	c_7	σ_{\log}
0,050	-0,503	0,333	-1,513	26,2	0,144	-0,056	-0,174	-0,144	0,279
0,075	-0,042	0,317	-1,626	28,8	0,094	-0,021	-0,189	-0,148	0,293
0,100	0,056	0,340	-1,733	30,7	0,109	0,012	-0,146	-0,095	0,294
0,150	0,245	0,375	-1,875	34,8	0,204	0,075	-0,208	-0,191	0,292
0,200	-0,059	0,413	-1,849	33,0	0,272	0,130	-0,179	-0,191	0,298
0,300	-1,116	0,459	-1,580	25,6	0,355	0,210	0,002	-0,022	0,307
0,400	-2,117	0,516	-1,341	18,1	0,338	0,244	0,124	0,081	0,325
0,500	-2,514	0,552	-1,296	16,1	0,293	0,227	0,154	0,132	0,330
0,750	-3,083	0,569	-1,115	14,5	0,210	0,034	0,081	0,158	0,337
1,000	-3,502	0,578	-0,963	11,7	0,142	-0,109	-0,013	0,127	0,335
1,500	-3,904	0,568	-0,795	10,4	0,083	-0,255	-0,076	0,054	0,332
2,000	-4,063	0,576	-0,862	11,3	0,073	-0,226	-0,067	0,051	0,332

Za četiri perioda oscilacija $T = 0,05, 0,10, 0,30$ i $0,50$ s, na slikama 3.19 i 3.20, prikazana je atenuacija horizontalnih amplituda PSA s udaljenosti proračunata atenuacijskom jednadžbom (3.22) za epicentralne udaljenosti. Koeficijenti koji odgovaraju kategorijskim varijablama S_L i S_G (Tablica 3.8) upotrijebljeni su za proračunavanje točnih razlika između vrijednosti procijenjenih za različite uvjete temeljnog tla.



Slika 3.19 Empirijske atenuacijske krivulje za četiri različita perioda oscilacija proračunata pomoću jednadžbe (3.22) i koeficijenata iz tablica 3.9 i 3.8, za duboke slojeve lokalnog tla ($s_L = 2$) i različite parametre dubokih geoloških slojeva (Bulajić i dr. 2021a)

Empirijske procjene vrijednosti PSA za tri različita tipa dubokih geoloških slojeva ($s = 2$ za geološku stijenu, $s = 1$ za mješovite duboke geološke slojeve i $s = 0$ za geološke sedimente) koji se nalaze ispod dubokih lokalnih slojeva temeljnog tla ($s_L = 2$), prikazane su na slici 3.19. Punim linijama prikazane su srednje empirijske procjene proračunate atenuacijskom jednadžbom (3.22) za epicentralne udaljenosti i koeficijentima iz tablice 3.9, dok su isprekidanim linijama prikazane procjene proračunate istom atenuacijskom jednadžbom (3.22) za epicentralne udaljenosti, ali upotrebom koeficijenata proračunatih na temelju podataka snimljenih na epicentralnim udaljenostima manjim od 30 km.

Za tri različita tipa dubokih geoloških slojeva ($s = 2$ za geološku stijenu, $s = 1$ za mješovite duboke geološke slojeve i $s = 0$ za geološke sedimente) koji se nalaze ispod dubokih lokalnih slojeva temeljnog tla ($s_L = 2$) skalirana je horizontalna vrijednost spektralne amplitude za $T = 0,05$ s jednadžbom (3.22) za epicentralne udaljenosti i koeficijentima iz tablice 3.9.

Horizontalna vrijednost spektralnih amplituda za $T = 0,05$ s (koja se može smatrati gornjom granicom za PGA procjene) za „ $s_L = 2$ “ i „ $s = 0$ “ procijenjena je na $1/10^{-0.143}$, što je 1,39 puta manje od procijenjene

vrijednosti za „ $s_L = 2$ “ i „ $s = 2$ “ (gornji lijevi dijagram na slici 3.19). Razlog ovakvih rezultata procjene lakši je prolazak valova s kratkim periodima oscilacija kroz tvrde stijene (granite i bazalte). Procjena horizontalnih vrijednosti spektralne amplitude za $T = 0,5$ s za „ $s_L = 2$ “ i „ $s = 2$ “ iznosila je $10^{0.137}$, što je 1,37 puta manje od „ $s_L = 2$ “ i „ $s = 0$ “ (donji desni dijagram na slici 3.19).

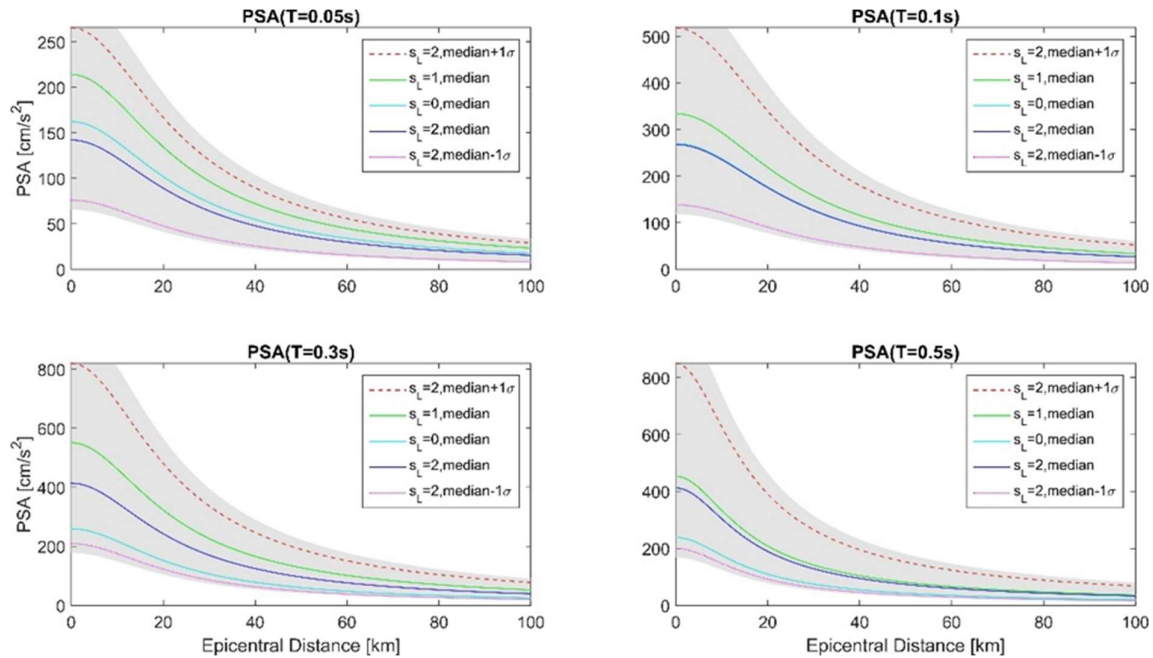
Proračunato je predviđanje horizontalnih vrijednosti PSA, za tri različita tipa lokalnog temeljnog tla ($s_L = 0$ za stjenovito tlo, $s_L = 2$ za kruto tlo i $s_L = 2$ za duboke slojeve lokalnog tla) koja se nalaze iznad dubokih geoloških slojeva sedimenata ($s = 0$).

Upotrijebljena je jednadžba (3.22) za epicentralne udaljenosti i koeficijentima iz tablice 3.9. Za duboke lokalne slojeve temeljnog tla ($s_L = 2$) iznad dubokih geoloških sedimenata ($s = 0$) vrijednosti horizontalne spektralne amplitude za $T = 0,05$ s iznosi $10^{-0.058}$, što je 0,88 puta manje od vrijednosti za stjenovito tlo ($s_L = 0$) iznad dubokih geoloških sedimenata ($s = 0$). Kao što se može vidjeti na gornjem lijevom dijagramu na slici 3.20 dolazi do deamplifikacije potresnih valova.

Rezultati upućuju na zaključak da disipacija potresne energije nadilazi prirast potresne energije na dubokim lokalnim tlima što je u skladu s rezultatima brojnih drugih istraživanja nelinearnog ponašanja dubokih slojeva tla izloženih jakom gibanju tla. Za veće periode oscilacija neće doći do deamplifikacije, npr. horizontalna vrijednost spektralne amplitude za $T = 0,5$ s na temeljnom tlu sastavljenom od „ $s = 0$ “ i „ $s_L = 2$ “ iznosi $10^{0.238}$, što je 1,73 puta manje od vrijednosti za lokacije sa „ $s = 0$ “ i „ $s_L = 0$ “ (donji desni dijagram na slici 3.20).

Na slici 3.20 prikazani su medijani provedene procjene, medijana $\pm 1 \sigma_{\log}$ i medijana $\pm 2 \sigma_{\log}$ (zasjenjeno područje). Zajednički učinak dubokog lokalnog tla i dubokih geoloških sedimenata procijenjen je uzimajući u obzir istodobno oba koeficijenta skaliranja, c_5 i c_7 .

Jednadžbom (3.22) i koeficijentima iz tablice 3.9 proračunata je vrijednost horizontalne spektralne amplitude za $T = 0,05$ s za duboko lokalno tlo i duboke geološke sedimente od $10^{-0.058} \times 10^{-0.143}$ što je 0,63 vrijednosti proračunatog iznosa za stjenovito lokalno tlo iznad geološke stijene. Rezultati ukazuju na još veću deamplifikaciju nego kada se analiziraju samo učinci dubokog lokalnog tla (tj. samo c_5).



Slika 3.20 Empirijske procjene medijana horizontalnih amplituda PSA, medijana $\pm 1 \sigma_{\log}$ i medijana $\pm 2 \sigma_{\log}$ (zasjenjeno područje) za $s_L = 0$ za stjenovito tlo, $s_L = 2$ za kruto tlo i $s_L = 1$ za duboke slojeve lokalnog tla) koja leže na dubokim geološkim sedimentima ($s = 0$) (Bulajić i dr. 2021a)

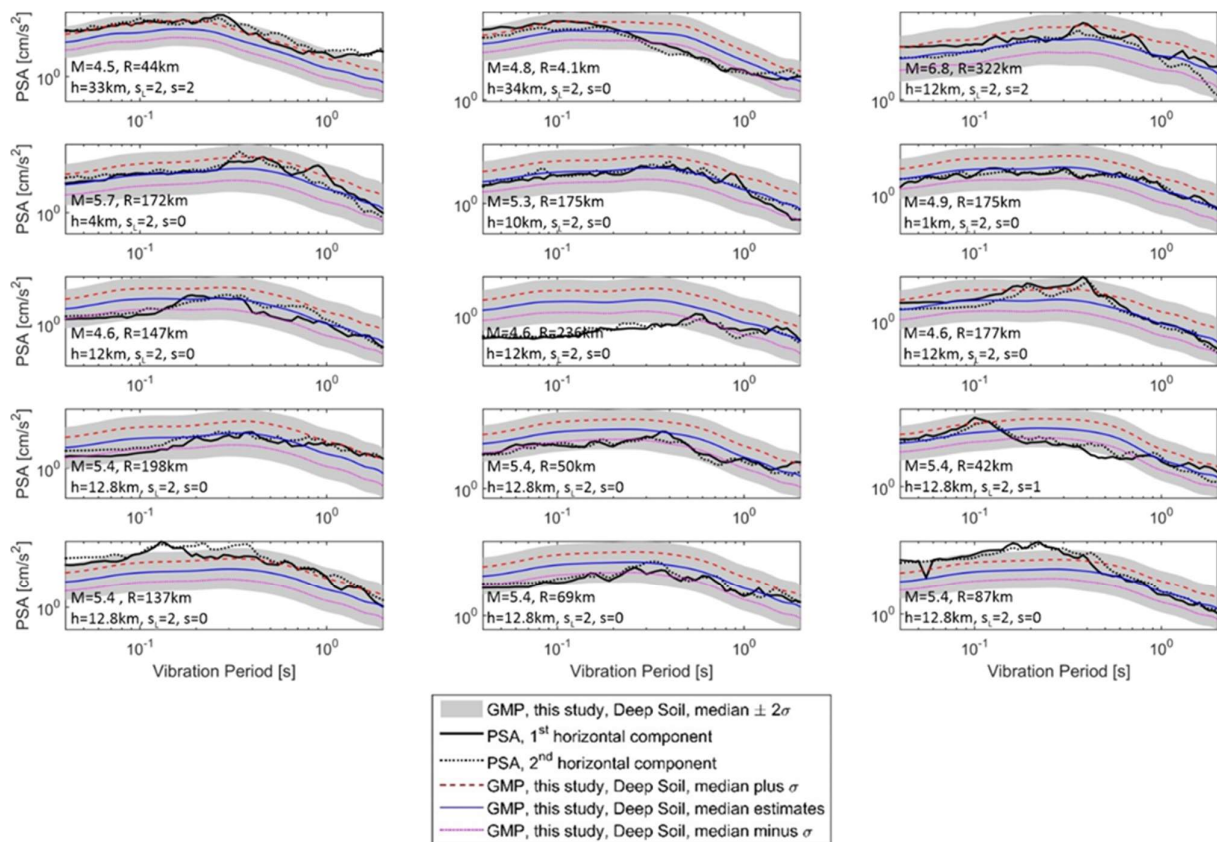
Amplifikacija horizontalnih amplituda PSA nastaje za periode oscilacija između $\sim 0,3$ s i ~ 1 s, a horizontalna vrijednost spektralne amplitude za $T = 0,5$ s, za duboka lokalna tla iznad dubokih geoloških sedimenata, procijenjena je na $10^{0.238} \cdot 10^{0.136} = 2,37$.

Jedine atenuacijske jednadžbe s kojima se mogu usporediti dobiveni rezultati (s obzirom na to da istovremeno razmatraju i učinke dubokog lokalnog tla i dubokih geoloških sedimenata) su one razvijene za Kaliforniju na temelju 1482 zapisa snažnog kretanja tla od potresa u zapadnim dijelovima Sjedinjenih Američkih Država (Lee 1987).

Lee (1987.) je upotrijebio iste kategorijske varijable za temeljno tlo kao što su upotrijebljene u ovom istraživanju (Tablica 3.8). Vrijednosti atenuacija su također procijenjene jednostavnim proračunom odgovarajućih koeficijenata skaliranja.

Za period oscilacija od npr. $T = 0,04$ s, proračuni provedeni s kalifornijskim atenuacijskim jednadžbama (Lee 1987) daju 30 % manje amplitude PSA na dubokom lokalnom tlu iznad dubokih geoloških sedimenata nego na stjenovitom lokalnom tlu iznad geološke stijene, što je vrlo slično onome što je proračunato u ovom istraživanju za $T = 0,05$ s.

Nadalje, prema kalifornijskim atenuacijskim jednadžbama (Lee 1987), amplifikacija postoji za periode oscilacija dulje od 0,3 s, a maksimalna amplifikacija je približno 1,7, što je nešto manje od proračunatog u ovom istraživanju.



Slika 3.21 Usporedba između regionalnih horizontalnih spektara pseudoubrzanja snimljenih na dubokim lokalnim tlima ($s_L = 2$) i empirijska predviđanja jednadžbom (3.22) i koeficijentima iz tablice 3.10 (Bulajić i dr. 2021a)

Na slici 3.21 uspoređeni su regionalni spektri obje ortogonalne horizontalne komponente 15 akcelorograma snimljenih na dubokim lokalnim tlima ($s_L = 2$) s empirijskim predviđanjima generiranim jednadžbom (3.22) i koeficijentima skaliranja iz tablice 3.10.

Iz usporedbe se može zaključiti da se regionalni horizontalni spektri pseudoubrzanja i spektri generirani u ovom istraživanju značajno podudaraju.

3.6.4. Skaliranje vertikalnih amplituda PSA

Za skaliranje vertikalnih amplituda PSA, upotrijebljen je sljedeći matematički oblik atenuacijske jednadžbe:

$$\log[PSA_{vert}(T)] = c_1(T) + c_2(T) \cdot M + c_3(T) \cdot \log(\sqrt{R^2 + R_0(T)^2}) + c_4(T) \cdot S_{L1} + c_5(T) \cdot S_{L2} + c_6(T) \cdot S_{G1} + c_7(T) \cdot S_{G2} + \sigma_{\log}(T) \cdot P1 \quad (3.23)$$

Koeficijenti za skaliranje vertikalnih amplituda PSA, za jednadžbu (3.23) u kojoj je R epicentralna udaljenost, a koeficijenti skaliranja su određeni na temelju vertikalnih komponenata ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od izvora potresa do mjernog mjesta, prikazani su u tablici 3.11.

Tablica 3.11 Koeficijenti skaliranja i standardne devijacije, za empirijsku atenuacijsku jednadžbu (3.23) u kojoj je R epicentralna udaljenost, proračunati na temelju vertikalnih komponenata ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od epicentra do mjernog mjesta, izvedeni za šire promatrano područje (Bulajić i dr. 2021b)

T	c_1	c_2	c_3	R_0	c_4	c_5	c_6	c_7	σ_{\log}
0,050	-1,399	0,364	-1,326	15,2	0,136	0,052	-0,090	-0,021	0,264
0,075	-1,006	0,371	-1,484	18,4	0,143	0,074	-0,104	-0,055	0,272
0,100	-0,774	0,377	-1,551	21,6	0,183	0,090	-0,170	-0,181	0,267
0,150	-0,974	0,396	-1,486	20,2	0,201	0,107	-0,219	-0,178	0,271
0,200	-1,408	0,449	-1,493	19,9	0,188	0,111	-0,080	-0,041	0,272
0,300	-2,214	0,482	-1,265	16,7	0,172	0,088	0,093	0,083	0,259
0,400	-2,902	0,533	-1,093	12,5	0,109	0,046	0,094	0,123	0,277
0,500	-3,220	0,548	-1,004	12,1	0,064	0,005	0,108	0,147	0,288
0,750	-3,679	0,554	-0,852	10,8	0,034	-0,064	0,068	0,161	0,303
1.000	-4,058	0,550	-0,702	9,3	0,008	-0,095	0,050	0,140	0,301
1.500	-4,322	0,531	-0,637	9,6	-0,017	-0,175	0,052	0,142	0,298
2.000	-4,504	0,534	-0,662	9,8	-0,044	-0,278	0,037	0,147	0,308

Za jednadžbu (3.23) u kojoj je R hipocentralna udaljenost tablica 3.12 sadržava koeficijente za skaliranje vertikalnih amplituda PSA, za različite periode oscilacija. Koeficijenti su proračunati na temelju vertikalnih komponenata ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od hipocentra do mjernog mjesta.

Skalirana je vertikalna vrijednost spektralne amplitude za $T = 0,05$ s, za temeljno tlo koje se sastoji od dubokih lokalnih slojeva temeljnog tla ($s_L = 2$) i različitih tipova dubokih geoloških slojeva ($s = 2$ za geološku stijenu, $s = 1$ za mješovite duboke geološke slojeve i $s = 0$ za duboke geološke sedimente), jednadžbom (3.23) za epicentralne udaljenosti i koeficijentima iz tablice 3.11.

Tablica 3.12 Koeficijenti skaliranja i standardne devijacije, za empirijsku atenuacijsku jednadžbu (3.23) u kojoj je R hipocentralna udaljenost, za vertikalne amplitude PSA, izvedeni za šire promatrano područje s R kao hipocentralnom udaljenosti (Bulajić i dr. 2021b)

T	c_1	c_2	c_3	R_0	c_4	c_5	c_6	c_7	σ_{\log}
0,050	-1,023	0,342	-1,440	19,7	0,167	0,068	-0,065	-0,025	0,276
0,075	-0,471	0,346	-1,660	25,4	0,174	0,091	-0,079	-0,061	0,285
0,100	-0,137	0,353	-1,776	30,5	0,212	0,107	-0,144	-0,188	0,278
0,150	-0,382	0,372	-1,690	28,1	0,216	0,124	-0,198	-0,182	0,282
0,200	-0,868	0,425	-1,674	26,9	0,202	0,126	-0,059	-0,043	0,283
0,300	-1,786	0,458	-1,392	22,5	0,183	0,096	0,112	0,081	0,272
0,400	-2,615	0,508	-1,149	15,2	0,105	0,046	0,107	0,127	0,288
0,500	-2,985	0,527	-1,045	13,9	0,060	-0,001	0,120	0,152	0,296
0,750	-3,482	0,533	-0,874	12,0	0,025	-0,070	0,077	0,168	0,310
1,000	-3,903	0,531	-0,708	9,3	-0,007	-0,088	0,056	0,148	0,306
1,500	-4,236	0,516	-0,629	7,9	-0,019	-0,170	0,064	0,149	0,300
2,000	-4,416	0,519	-0,656	8,5	-0,041	-0,282	0,049	0,154	0,311

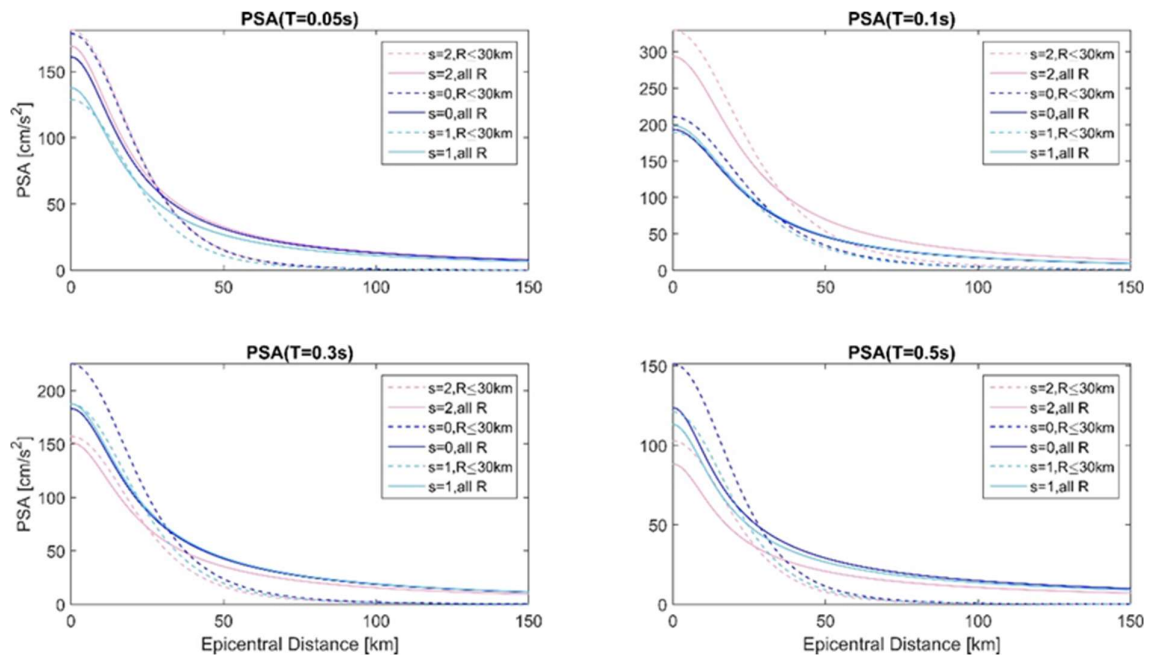
Atenuacija vertikalnih amplituda PSA s udaljenosti, proračunata atenuacijskom jednadžbom (3.23) za epicentralne udaljenosti, za četiri perioda oscilacija $T = 0,05, 0,10, 0,30$ i $0,50$ s, prikazana je na slikama 3.22 i 3.23

Rezultati su grafički prikazani na slici 3.22, punim linijama prikazane su srednje empirijske procjene proračunate atenuacijskom jednadžbom (3.23) za epicentralne udaljenosti i koeficijentima iz tablice 3.11, dok su isprekidanim linijama prikazane procjene proračunate atenuacijskom jednadžbom (3.23) za epicentralne udaljenosti i koeficijentima proračunatim na temelju podataka snimljenih na epicentralnim udaljenostima manjim od 30 km.

Procijenjena vertikalna vrijednost spektralne amplitude za $T = 0,05$ s za „ $s_L = 2$ “ i „ $s = 0$ “ iznosi $1/10^{0.021}$ što je 1,05 puta manje od procijenjene vrijednosti za „ $s_L = 2$ “ i „ $s = 2$ “ (gornji lijevi dijagram na slici

3.22). Procjena horizontalnih vrijednosti spektralne amplitude za $T = 0,5$ s za „ $s_L = 2$ “ i „ $s = 2$ “ iznosi $1/10^{0.147}$ što je 1,40 puta manje od ($s_L = 2$) i ($s = 0$) (donji desni dijagram na slici 3.22).

Razlike između atenuacijskih krivulja prigušenja PSA za različite uvjete temeljnog tla proračunate su upotrebom koeficijenata c_4 , c_5 , c_6 ili c_7 . Za duboke lokalne slojeve temeljnog tla ($s_L = 2$) iznad dubokih geoloških sedimenata ($s = 0$) skalirana procjena vrijednosti vertikalne spektralne amplitude za $T = 0,05$ s iznosi $1/10^{0.052}$, što je 1,13 puta veće od stjenovitog tla ($s_L = 0$) iznad dubokih geoloških sedimenata ($s = 0$).



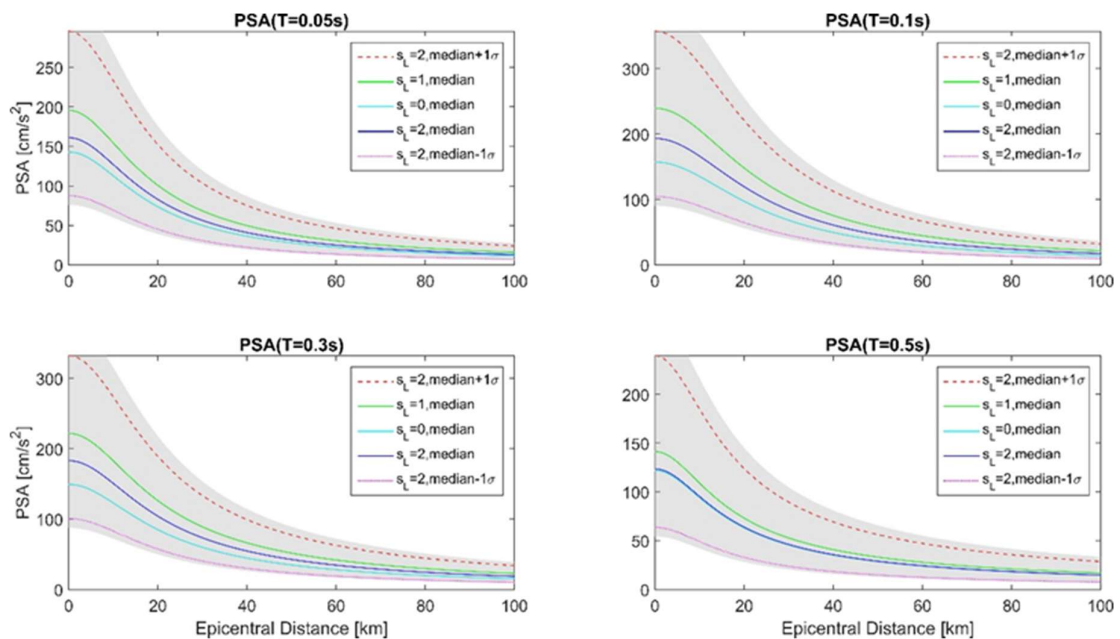
Slika 3.22 Empirijske atenuacijske krivulje za četiri različita perioda oscilacija proračunata pomoću jednadžbe (3.23) i koeficijenata iz tablice 3.11 i 3.8, za duboke slojeve lokalnog tla ($s_L = 2$) i različite parametre dubokih geoloških slojeva (Bulajić i dr. 2021b)

Iz rezultata se može zaključiti da je nastala deamplifikacija potresnih valova (gornji lijevi dijagram na slici 3.23). Vrijednost spektralne amplitude za $T = 0,3$ s (vertikalnih potresnih valova) na temeljnom tlu sastavljenom od „ $s = 0$ “ i „ $s_L = 2$ “ iznosi $1/10^{0.088}$ što je 1,73 puta veće od vrijednosti za tlo sastava „ $s = 0$ “ i „ $s_L = 0$ “ (donji lijevi dijagram na slici 3.23). Prema generiranim rezultatima koeficijent c_5 doprinosi pozitivnim vrijednostima za sve periode oscilacija do 0,5 s. To ukazuje da kod dubokog temeljnog tla dolazi do amplifikacije vertikalnih potresnih valova za sve periode oscilacija $\geq 0,5$ s, dok kod dubokih lokalnih tala dolazi do deamplifikacije horizontalnih potresnih valova.

Uzimajući u obzir istodobno oba koeficijenta skaliranja c_5 i c_7 procijenjen je zajednički učinak dubokog lokalnog tla i dubokih geoloških sedimentata na amplifikaciju temeljnog tla, upotrebom jednadžbe (3.23) te koeficijenata iz tablice 3.11.

Procijenjena vrijednost vertikalne spektralne amplitude za $T = 0,05$ s i duboko lokalno tlo iznad dubokih geoloških sedimentata iznosi $10^{0.052} \times 10^{-0.021}$ što je 1,48 vrijednosti za stjenovito lokalno tlo iznad geološke stijene. Koeficijenti c_5 i c_7 utječu na amplitude PSA na dubokom lokalnom tlu iznad dubokih geoloških sedimentata tako da deamplifikacija iznosi do 26 %.

Proračunate su veličine deamplifikacije za nekoliko perioda oscilacija: za 0,1 s iznosi ($10^{0.090} \times 10^{-0.181}$) = 0,81, za 0,15 s iznosi ($10^{0.107} \times 10^{-0.178}$) = 0,85, za 1,5 s iznosi ($10^{-0.175} \times 10^{0.142}$) = 0,93 i za 2,0 s iznosi ($10^{-0.278} \times 10^{0.147}$) 0,74.

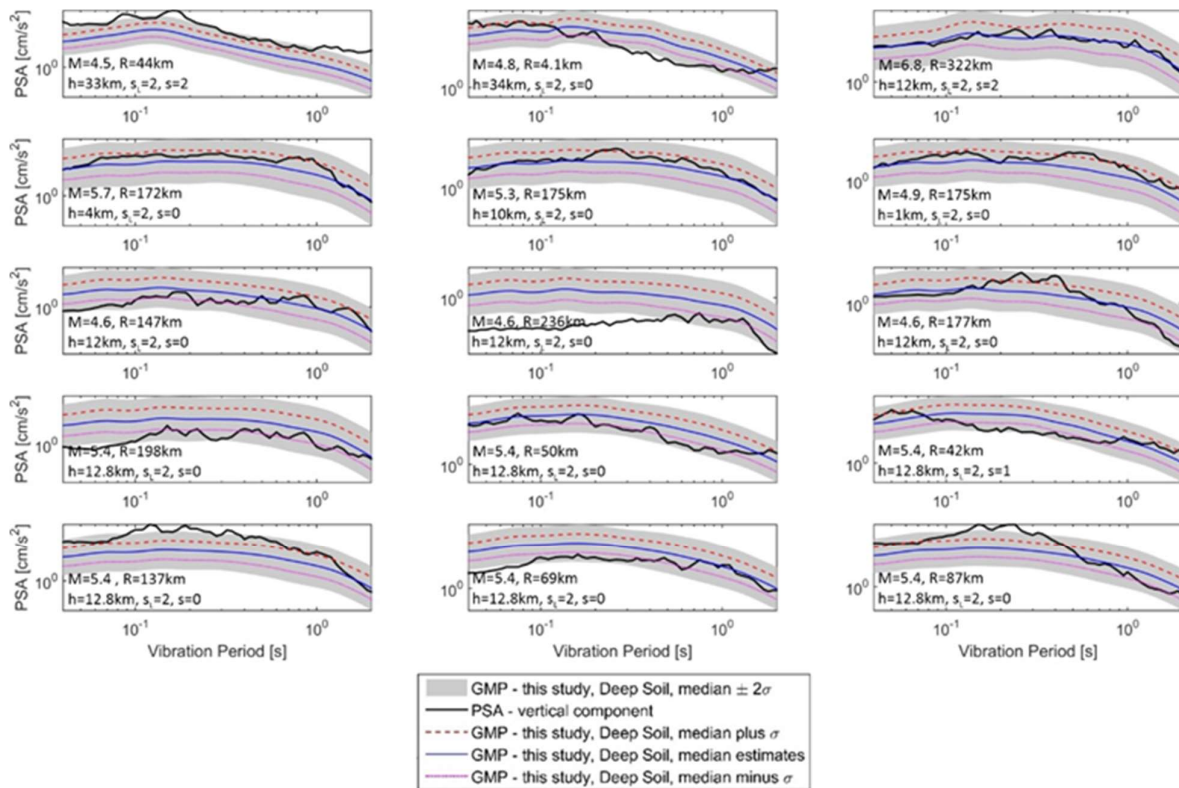


Slika 3.23 Medijani provedenih empirijskih procjena vertikalnih vrijednosti PSA, medijana $\pm 1 \sigma_{\log}$ i medijana $\pm 2 \sigma_{\log}$ (zasjenjeno područje) za $s_L = 0$ za stjenovito tlo, $s_L = 2$ za kruto tlo i $s_L = 2$ za duboke slojeve lokalnog tla) koja leže na dubokim geološkim sedimentima ($s = 0$) (Bulajić i dr. 2021b)

Uspoređeni su regionalni spektri 15 vertikalnih akcelerograma snimljenih na 10 različitih lokacija s dubokim lokalnim temeljnim tlima s empirijskim predviđanjima generiranim jednadžbom (3.23) i

koeficijentima skaliranja iz tablice 3.12 i prikazani na slici 3.24 iz koje se može zaključiti da stvarni i očekivani spektri imaju visok stupanj podudaranja.

Predložene jednadžbe skaliranja ne uzimaju u obzir mogućnost usmjerenosti pucanja rasjeda (engl. *source directivity*) tj. mogućnost promjene vrijednosti PGA sa smjerom. Iako promjene vrijednosti PGA sa smjerom može značajno utjecati na veličinu gibanja temeljnog tla (Verros i dr. 2017), zbog nedostatka podataka o usmjerenosti pucanja rasjeda u dostupnim zapisima jakog gibanja tla, promjene vrijednosti PGA sa smjerom su zanemarene u ovom istraživanju.



Slika 3.24 Odnos između regionalnih vertikalnih spektara pseudoubzranja na slojevima lokalnog temeljnog tla ($s_L = 2$) i empirijskih predviđanja definiranih jednadžbom (3.23) (Bulajić i dr. 2021b)

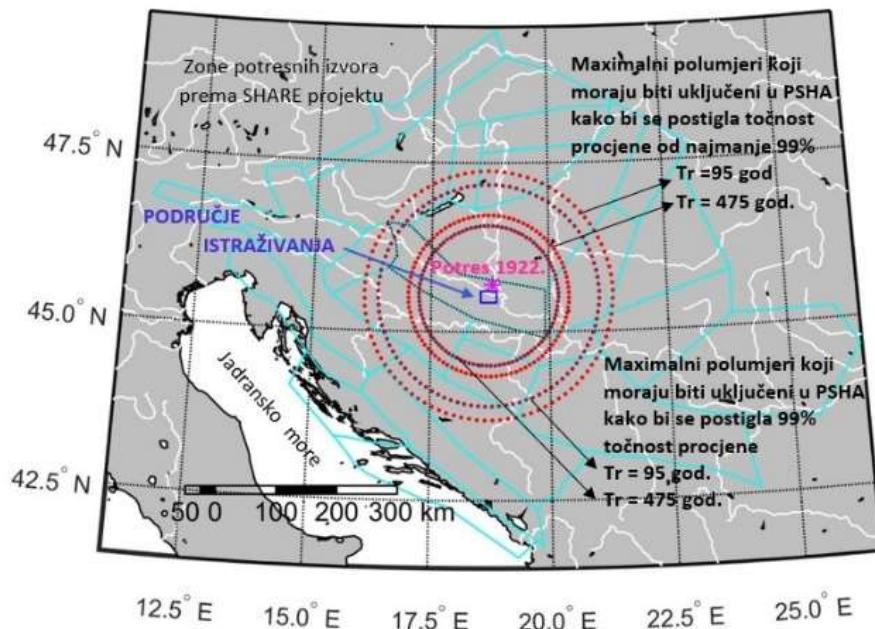
3.7. Mikrozoniranje promatranog područja

Provedeno je potresno mikrozoniranje promatranog područja, prikazano unutar plavog pravokutnika na slikama 3.1 i 3.3, pretpostavljajući primarno da se cijelo promatrano područje sastoji od temeljnog tla koje se sastoji od dubokog lokalnog tla i dubokih geoloških sedimenata, ali su radi usporedbi i istraživanja planiranih u budućnosti provedene i PSHA za druge kombinacije slojeva temeljnog tla za koje se smatra da su moguće na promatranom području.

Za predviđanje potresne opasnosti primijenjena je PSHA opisana u poglavlju 3.4. i to klasični Cornell (1968.) i McGuire (1976.) pristup, slijedeći numerički postupak Chioccarelli i dr. (2019.).

Pretpostavljeno je da ukupnu potresnu opasnost unutar analiziranog područja čini zbroj doprinosa svih područja potresnih izvora (iz cijelog skupa područja I). PSHA proračunom procijenjene su vjerojatnosti dostizanja određene vrijednosti parametra jakog gibanja tla (PGA i PSA) te razmatrani doprinosi svih potresa koji se mogu dogoditi na analiziranom području tijekom procijenjenog životnog razdoblja zgrade koje trebaju biti projektirane ili procijenjene zbog potresne sigurnosti.

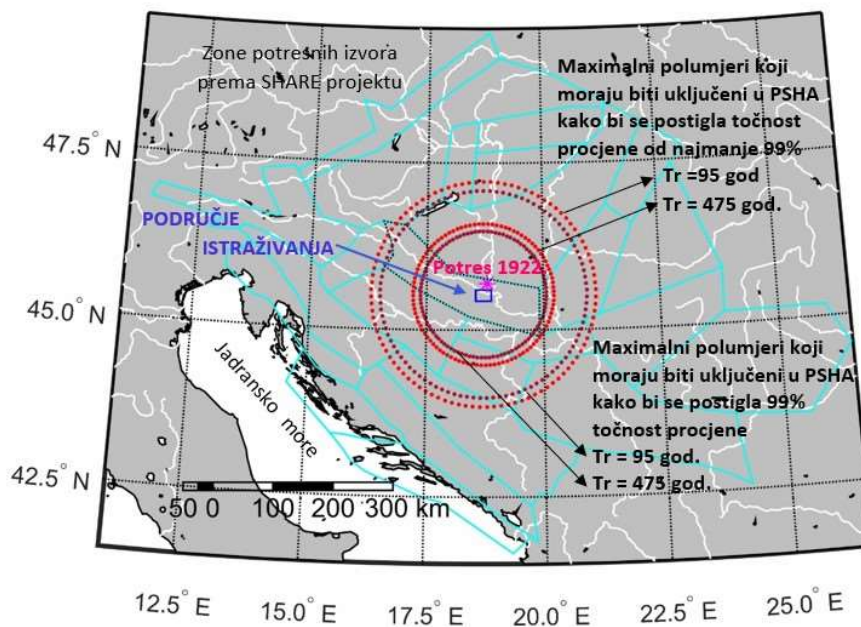
Za izradu PSHA procjena upotrijebljen je program REASSES V2.0 (Chioccarelli i dr. 2019). Iako se područja potresnih izvora mogu definirati na temelju dostupnih seizmoloških podataka (Amaro-Mellado i dr. 2021, Amaro-Mellado i dr. 2020, Amaro-Mellado i dr. 2017), zbog mogućnosti daljnje usporedbe rezultata upotrijebljen je paneuropski model područja potresnih izvora koji je bio jedan od rezultata projekta, „Harmonizacija potresne opasnosti u Europi“ (engl. *Seismic Hazard Harmonization in Europe*, SHARE) (Pagani i dr. 2018, Wössner i dr. 2015, Giardini i dr. 2013). Na temelju područja potresnih izvora iz SHARE projekta na slikama 3.25, 3.26, 3.27 i 3.28 prikazane su granice odabranih područja potresnih izvora za proračun potresne opasnosti u ovom istraživanju.



Slika 3.25 Maksimalni polumjeri za promatrano područje koji moraju biti uključene u PSHA proračune horizontalnih vrijednosti PGA kako bi se postigla točnost ukupne procjene potresne opasnosti od: najmanje 99 % za Tr 95 god. = 205 km, za Tr 475 god. = 132,5 km točno 99 % za Tr 95 god. = 182,5 km, za Tr 475 god. = 115 km (Bulajić i dr. 2022b)

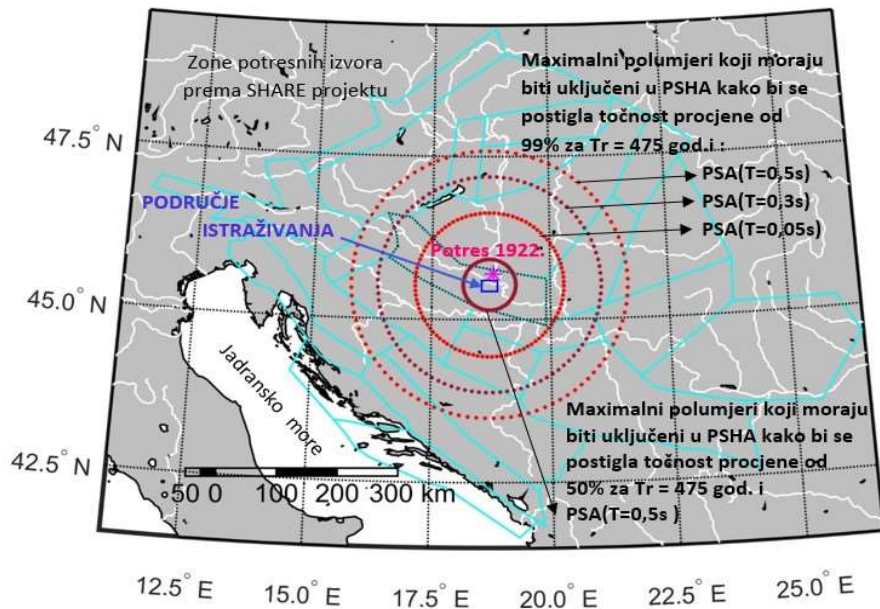
Za mikrozoniranje promatranog područja iz skaliranih horizontalnih/vertikalnih vrijednosti PGA, dvije veće kružnice s polumjerima od 182,5 km i 205 km (za horizontalni smjer, slika 3.25) odnosno 172,5 km i 187,5 km (za vertikalni smjer, slika 3.26) označavaju udaljenosti koje moraju biti uključene u PSHA proračune za promatrano područje kako bi se postiglo najmanje 99 postotna, odnosno točno 99 postotna točnost procjene ukupne potresne opasnosti za povratno razdoblje od 95 godina.

Dvije manje kružnice s polumjerima 115 km i 132,5 km (za horizontalni smjer) odnosno 105 km i 117,5 km (za vertikalni smjer) označavaju iste udaljenosti samo za povratno razdoblje od 475 godina. Granice područja potresnih izvora upotrijebljenih u proračunima potresne opasnosti iz skaliranih horizontalnih/vertikalnih vrijednosti PSA prikazane su, na slikama 3.27 i 3.28. Tri veće kružnice oko analiziranog područja predstavljaju maksimalne polumjere za postizanje 99 %-tne točnosti procjena za $T_r = 475$ godina za periode oscilacija od 0,05, 0,3 i 0,5 s.

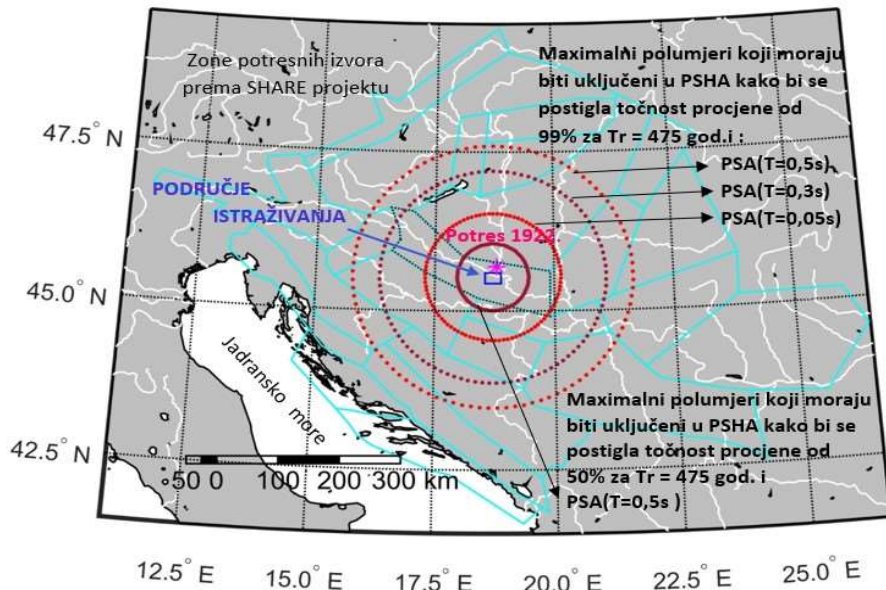


Slika 3.26 Maksimalni polumjere za promatrano područje koji moraju biti uključene u PSHA proračune vertikalnih vrijednosti PGA kako bi se postigla točnost ukupne procjene potresne opasnosti od: najmanje 99 % za $T_r = 95$ god. = 187,5 km, za $T_r = 475$ god. = 117,5 km točno 99 % za $T_r = 95$ god. = 172,5 km, za $T_r = 475$ god. = 105 km (Bulajić i dr. 2022a)

Radijusi prikazanih kružnica za horizontalni smjer i 99 % vjerojatnosti iznose 123, 184 i 228 km, a za vertikalni 111, 185 i 229 km. Najmanje kružnice na slikama 3.27 i 3.28 prikazuju maksimalne polumjere za postizanje 50 % vjerojatnosti za $T_r = 475$ godina za period oscilacija od 0,5 s, a iznose 43 km za horizontalni i 58 km za vertikalni pravac.



Slika 3.27 Maksimalni polumjeri za promatrano područje koji moraju biti uključene u PSHA proračune horizontalnih vrijednosti spektralnih amplituda kako bi se postigla točnost ukupne procjene od: 99 % za T_r 475 god. za $PSA(T = 0,5 s) = 228$ km, $PSA(T = 0,3 s) = 184$ km, $PSA(T = 0,05 s) = 123$ km 50 % za T_r 475 god. i za $PSA(T = 0,5 s) = 43$ km (Bulajić i dr. 2021a)



Slika 3.28 Maksimalni polumjeri za promatrano područje koji moraju biti uključene u PSHA proračune vertikalnih vrijednosti spektralnih amplituda kako bi se postigla točnost ukupne procjene od: 99 % za T_r 475 god. za $PSA(T = 0,5 s) = 229$ km, $PSA(T = 0,3 s) = 185$ km, $PSA(T = 0,05 s) = 111$ km 50 % za T_r 475 god. i za $PSA(T = 0,5 s) = 58$ km (Bulajić i dr. 2021b)

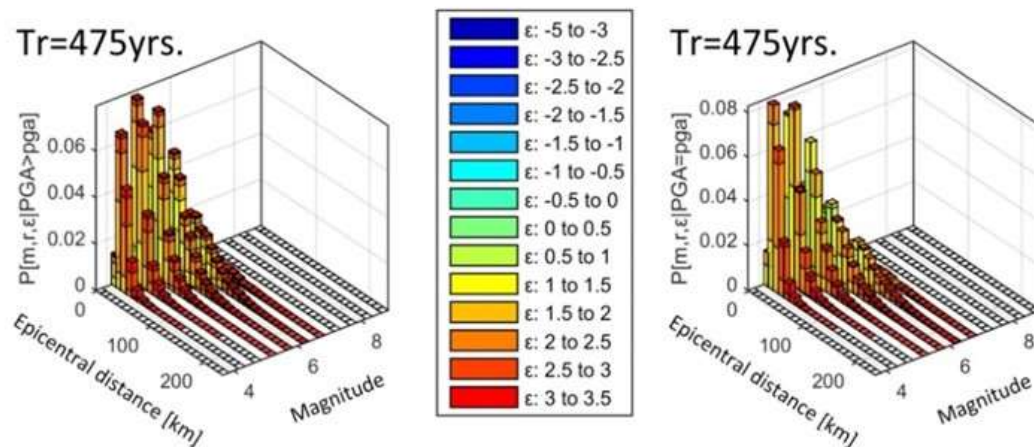
3.7.1. Karte mikrozoniranja iz skaliranih horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA

U provedenom PSHA proračunu za promatrano područje upotrijebljene su jednadžbe (3.14) i (3.18) s R kao epicentralnom udaljenosti u kojima su koeficijenti skaliranja određeni na temelju horizontalnih/vertikalnih komponenta ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od epicentra do mjernog mjesta.

3.7.1.1. PSHA razdvajanje potresne opasnosti

Kako bi se odredili potresi koji najviše utječu na veličinu potresne opasnosti promatranog područja, provedeno je PSHA razdvajanja potresne opasnosti. Razdvajanje je provedeno za lokaciju s koordinatama: 45 32' N, 18 23' E koja je centralna u promatranom području (Slike 3.29 i 3.30), za povratna razdoblja $T_r = 2475, 975, 475$ i 95 godina.

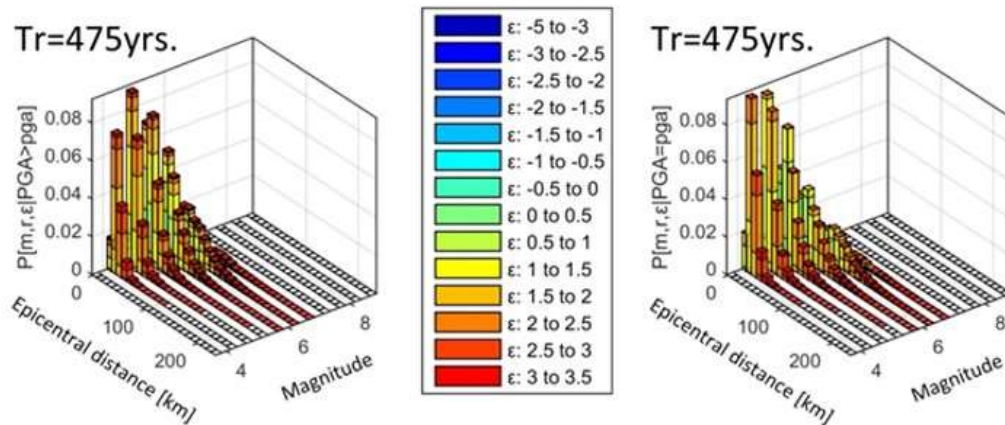
Na slikama 3.29 i 3.30 prikazane su vjerojatnosti doprinosa, potresa različitih epicentralnih udaljenosti i magnituda, u vrijednostima prekoračenja ($PGA > pga$) odnosno dostizanja ($PGA = pga$), komponenta (horizontalnih/vertikalnih) potresne opasnosti za povratno razdoblje od 475 godina.



Slika 3.29 Razdvajanje potresne opasnosti za centralnu lokaciju promatranog područja - vjerojatnosti doprinosa potresa različitih epicentralnih udaljenosti i magnituda u vrijednostima prekoračenja ($PGA > pga$) / dostizanja ($PGA = pga$) horizontalnih komponenta potresne opasnosti, za $T_r = 475$ godina

(Bulajić i dr. 2022b)

Na slici 3.29 lijevo vidi se da je najveća vjerojatnost za doprinos vrijednosti prekoračenja horizontalne komponente PGA na promatranom području od potresa s M između 4,5 i 5, čiji su epicentralne udaljenosti između 10 – 20 km.

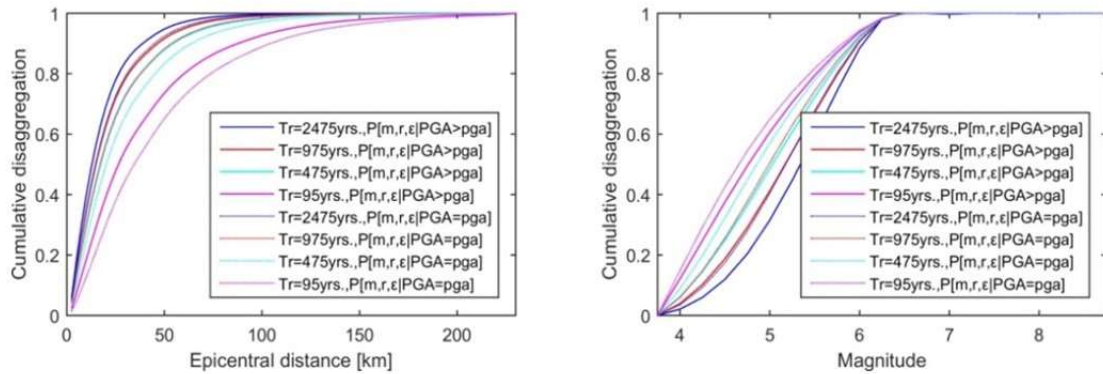


Slika 3.30 Razdvajanje potresne opasnosti za centralnu lokaciju promatranog područja - vjerojatnosti doprinosa potresa različitih epicentralnih udaljenosti i magnituda u vrijednostima prekoračenja (PGA > pga) / dostizanja (PGA = pga) vertikalnih komponenata potresne opasnosti, za $Tr = 475$ godina (Bulajić i dr. 2022a)

Najveća vjerojatnost za doprinos vrijednosti dostizanja vertikalne komponente PGA na promatranom području je od potresa čije su epicentralne udaljenosti između 10 i 30 km s M između 4 i 5,5 (Slika 3.30, desno).

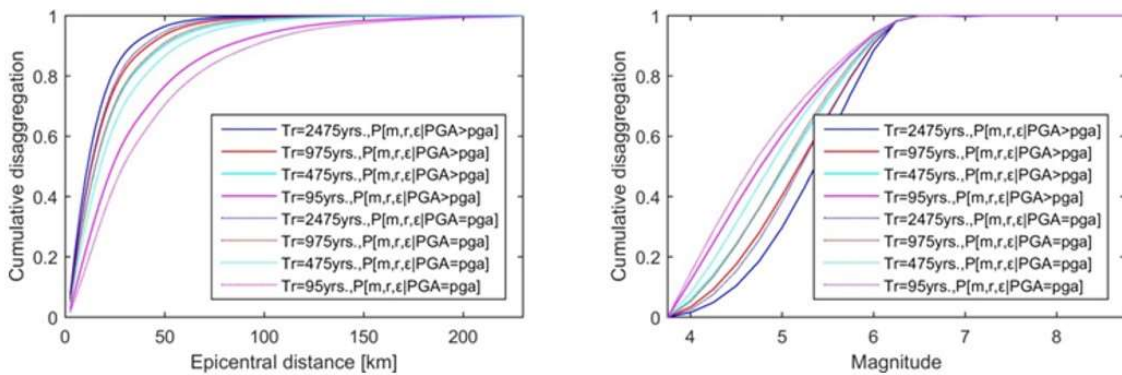
Razdvajanje doprinosa, epicentralnih udaljenosti i magnituda u kumulativnoj vrijednosti prekoračenja (PGA > pga) odnosno dostizanja (PGA = pga) komponenata potresne opasnosti, za povratna razdoblja $Tr = 2475, 975, 475$ i 95 godina, prikazano je na slikama 3.31 i 3.32.

Iz lijevog dijagram (Slika 3.31) može se zaključiti da za promatrano područje, ako npr. promatramo vjerojatnosti prekoračenja $PGA > pga$ na udaljenostima do 15 te 15, 17,5 i 27,5 km (za Tr : 2475, 975, 475 i 95 godina) vrijednosti procijenjenih horizontalnih komponenata čine 50 % ukupne procijenjene vrijednosti potresne opasnosti. Rezultati prikazani na desnom dijagramu (za vjerojatnost da $PGA > pga$) upućuju na zaključak da magnitude do 5,5 te 5,25 i 5,5 (za Tr : 2475, 975, 475 i 95 godina) doprinose vrijednosti procijenjenih horizontalnih komponenata potresne opasnosti 50 %.



Slika 3.31 Razdvajanje doprinosa, epicentralnih udaljenosti i magnituda u kumulativnoj vrijednosti prekoračenja (PGA > pga) / dostizanja (PGA = pga) horizontalnih komponenata potresne opasnosti, za različita povratna razdoblja (Bulajić i dr. 2022b)

Razdvajanje doprinosa prekoračenja (PGA > pga) vertikalnih komponenata potresne opasnosti za centralnu lokaciju promatranog područja, prikazano na lijevom dijagramu na slici 3.32 upućuje na zaključak da udaljenosti do 12,5 te 15, 17,5 i 25 km (za Tr: 2475, 975, 475 i 95 godina) čine čak 50% vrijednosti procijenjenih vertikalnih komponenata potresne opasnosti. Iz rezulta prikazanih na donjem desnom dijagramu može se zaključiti da je doprinos magnituda do 5,5, te 5,25 i 5,5 (za Tr: 2475, 975, 475 i 95 godina), ako se promatra vjerojatnost da je PGA > pga, ukupnoj vrijednosti procijenjenih vertikalnih komponenata potresne opasnosti, 50 %.

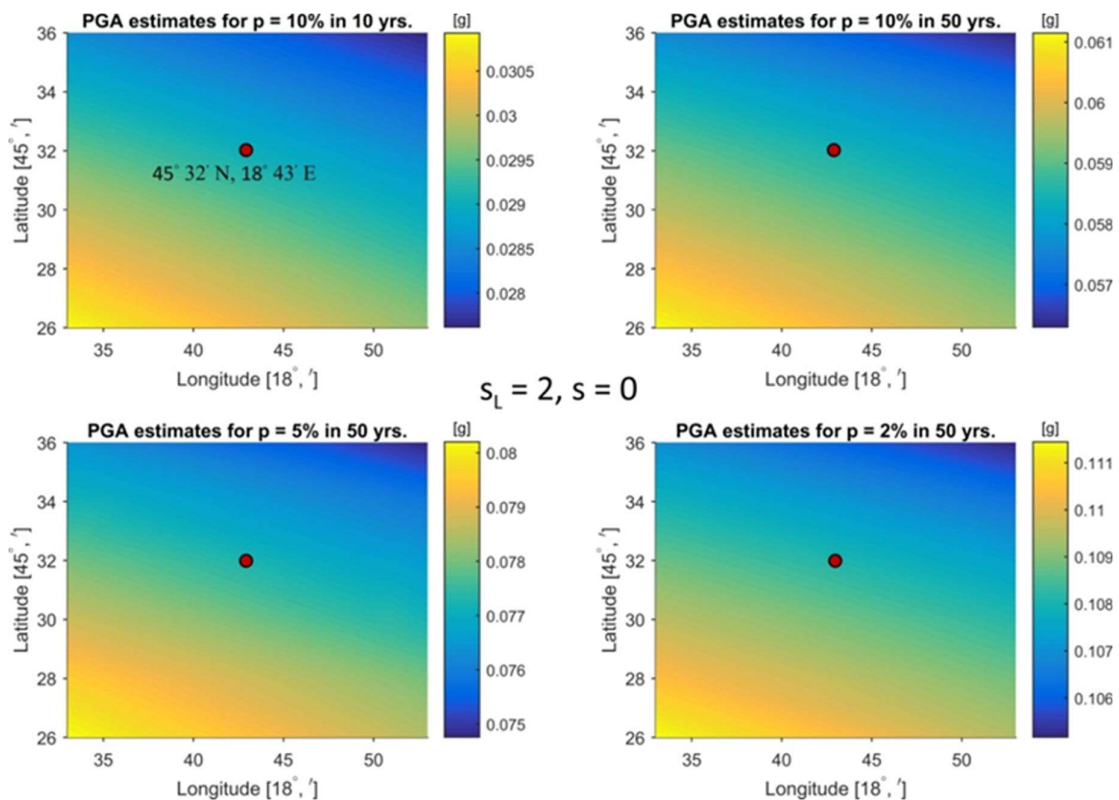


Slika 3.32 Razdvajanje doprinosa, epicentralnih udaljenosti i magnituda u kumulativnoj vrijednosti prekoračenja (PGA > pga) / dostizanja (PGA = pga) vertikalnih komponenata potresne opasnosti, za različita povratna razdoblja (Bulajić i dr. 2022a)

Rezultati provedenog PSHA razvrstavanja, predstavljeni su na slikama 3.29, 3.30, 3.31 i 3.32. Na temelju njih može se zaključiti da horizontalne i vertikalne amplitude PGA nisu osjetljive na daleke snažne potrese tj. da njihov izgled modeliraju lokalne potresne aktivnosti.

3.7.1.2. Karte potresne opasnosti za promatrano područje

Nakon provedenog razdvajanja potresne opasnosti za lokaciju s koordinatama: 45° 32' N, 18° 23' E koja je centralna u promatranom području (vidi slike 3.33 i 3.34), provedena je PSHA.



Slika 3.33 Karte potresnog mikrozoniranja za vjerojatnosti od p u t godina koje odgovaraju povratnim razdobljima od 95 (gore lijevo), 475 (gore desno), 975 (dolje lijevo) i 2475 (dolje desno) godina za duboko lokalno temeljno tlo i duboke slojeve geoloških sedimenata u (Bulajić i dr. 2022a)

Usvojene su sljedeće kombinacije lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva:

$s_L = 0$ (stjenovito tlo) i $s = 1$ (mješoviti duboki geološki slojevi)

$s_L = 0$ (stjenovito tlo) i $s = 2$ (geološka stijena)

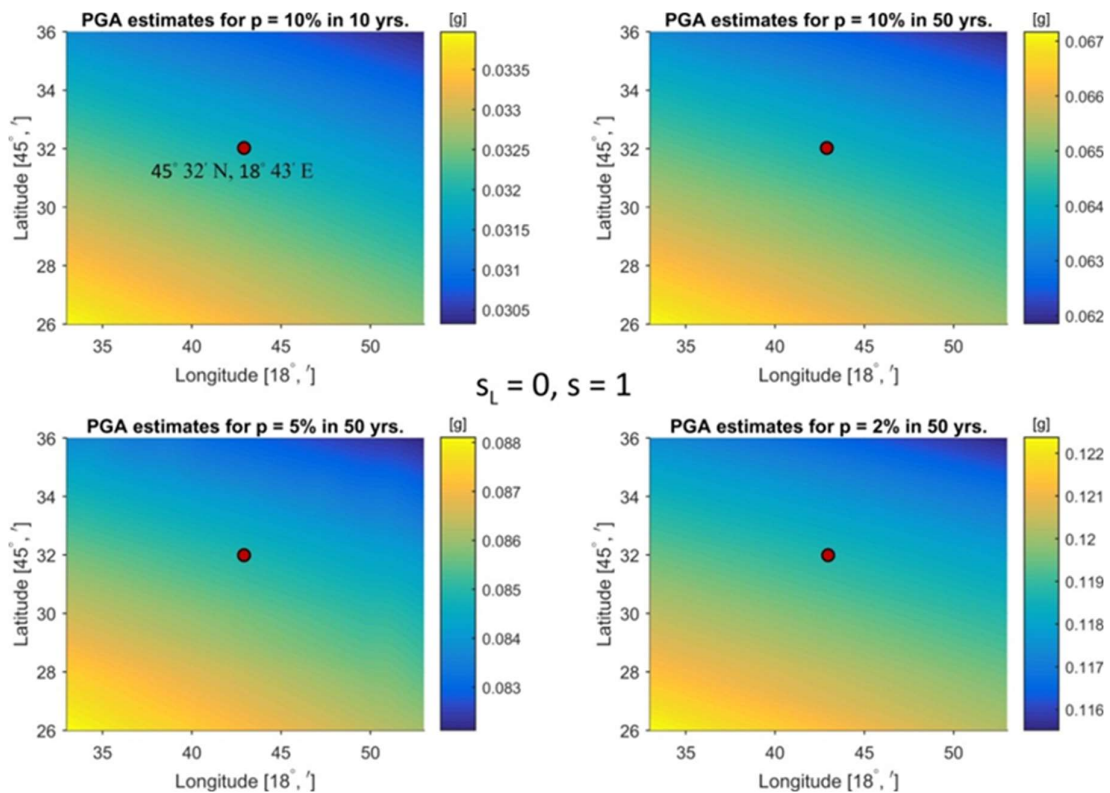
$s_L = 1$ (kruto tlo) i $s = 2$ (geološka stijena)

$s_L = 1$ (kruto tlo) i $s = 0$ (geološki sedimenti)

$s_L = 2$ (duboka lokalna tla) i $s = 2$ (geološka stijena)

$s_L = 2$ (duboka lokalna tla) i $s = 0$ (geološki sedimenti).

Ove kombinacije sastava temeljnog tla usvojene su jer se smatraju mogućim na mjestima mjernih stanica akceleroografa promatranog područja i šire te zato što su neke od njih i mjerodavne za usporedbe s postojećim procjenama PGA.



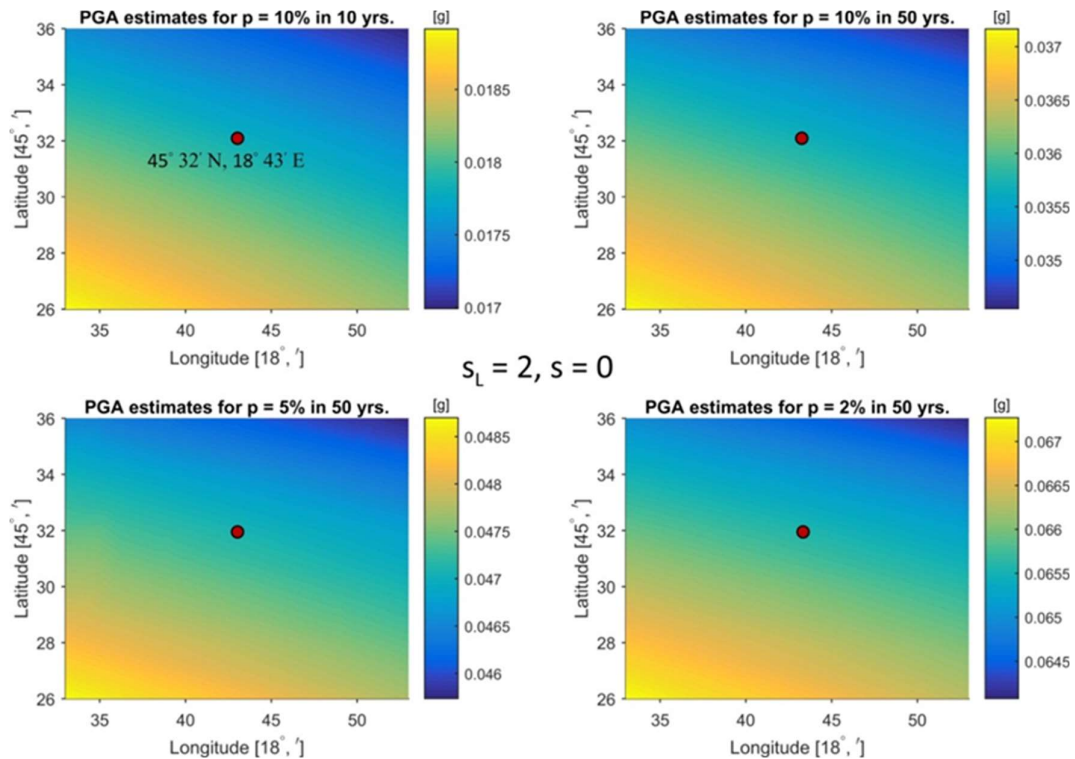
Slika 3.34 Karte potresnog mikrozoniranja za vjerojatnosti od p u t godina koje odgovaraju povratnim razdobljima od 95 (gore lijevo), 475 (gore desno), 975 (dolje lijevo) i 2475 (dolje desno) godina za stjenovito temeljno tlo iznad mješovitih dubokih geoloških sojeva (Bulajić i dr. 2022b)

Dodatno je provedena i PSHA za kombinaciju lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva:

$s_L = 0$ (stjenovito tlo) i $s = 2$ (geološka stijena) jer je ova kombinacija slojeva temeljnog tla, inače neuobičajena za promatrano područje, utvrđena (poglavlje 3.2.2.) na Banskom Brdu, samo 30 km sjeverno od centralne lokacije (45 32' N, 18 23' E) promatranog područja. Na slikama 3.33, 3.34 i 3.35 prikazani su rezultati provedene PSHA (karte potresnog mikrozoniranja) promatranog područja, za

horizontalne i vertikalne komponente PGA i to za sljedeće kombinacije temeljnog tla: $s_L = 2$ (duboka lokalna tla) i $s = 0$ (duboki geološki sedimenti); $s_L = 0$ (stjenovito tlo) i $s = 1$ (mješoviti duboki geološki slojevi)

Karte mikrozoniranja za horizontalne komponente PGA i to za $T_r = 95, 475, 975$ i 2475 godina, generirane jednadžbom (3.14) prikazane su na slikama 3.33 i 3.34. Karte mikrozoniranja za temeljno tlo sastavljeno od slojeva dubokog lokalnog tla i dubokih geoloških sedi menata koje je karakteristično za promatrano područje, prikazane su na slici 3.33, dok su na slici 3.34 prikazane karte opasnosti za stjenovito temeljno tlo iznad najčešćeg tipa dubokih geoloških slojeva (Bulajić i dr. 2013, Manić 2003) stanica akcelerograma u regiji - mješovitih dubokih geoloških slojeva. Na slici 3.35 prikazane su karte mikrozoniranja za vertikalne komponente PGA promatranog područja generirane pomoću jednadžbe (3.18) za temeljno tlo koje se sastoji od dubokog lokalnog tla i dubokih geoloških sedimenata, za povratna razdoblja od 95, 475, 975 i 2475 godina.



Slika 3.35 Karte potresnog mikrozoniranja za vjerojatnosti p u t godina koje odgovaraju povratnim razdobljima od 95 (gore lijevo), 475 (gore desno), 975 (dolje lijevo) i 2475 (dolje desno) godina za temeljno tlo sastavljeno od dubokog lokalnog tla i dubokih geoloških sedimenata (Bulajić i dr. 2022a)

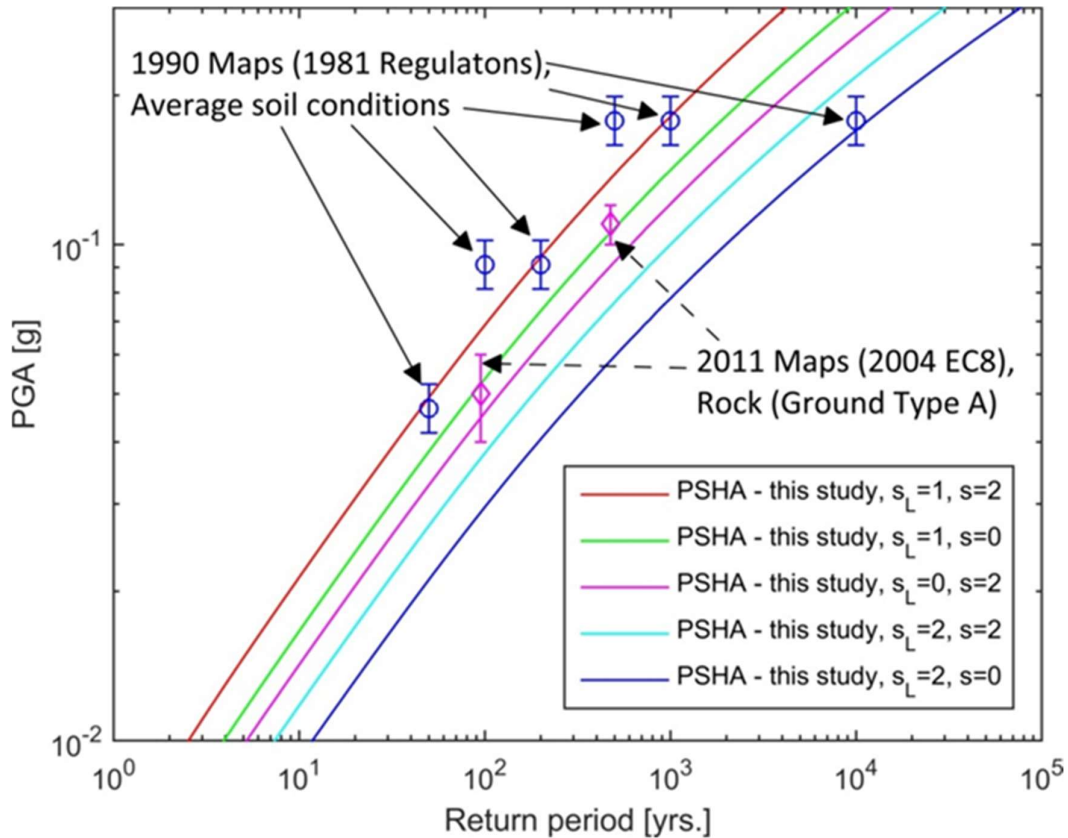
3.7.2. Usporedba različitih krivulja potresne opasnosti proračunatih u ovom istraživanju

Provjera pouzdanosti rezultata provedenih PSHA u ovom istraživanju, provedena je usporedbom dobivenih krivulja potresne opasnosti za promatrano područje tj. mjesto 45° 32' N, 18° 23' E s vrijednostima danim na važećim službenim hrvatskim kartama potresne opasnosti (HRN EN 1998-1:2011/NA:2011) te s vrijednostima proračunatim u tablicama 3.4 i 3.6 (poglavlja 3.3.1. i 3.3.2).

Zbog objektivnosti donošenja zaključaka usporedbe još jednom treba napomenuti da karte potresne opasnosti koje su dio Hrvatskog nacionalnog dodatka HRN EN 1998-1:2011/NA prikazuju vrijednosti PGA za tip tla A (stijena ili druga geološka formacija poput stijene koja uključuje najviše 5 m slabijeg materijala na površini) (EN 1998-1, 2004) dok su karte potresne opasnosti u propisima bivše SFR Jugoslavije (Službeni list SFRJ, 1964; 1982; 1990) sastavljene za prosječne lokalne uvjete tla, a opasnost je procijenjena kroz stupnjeve intenziteta MCS-a ljestvice. Nijedna od spomenutih karata ne uzima u obzir učinke dubokih geoloških slojeva, kao ni lokalnu razredbu temeljnog tla koja prepoznaje duboke geološke slojeve.

Vjerojatnosne procjene horizontalnih vrijednosti PGA za lokalno stjenovito ($s_L = 0$) i kruto tlo ($s_L = 1$) iznad geološke stijene ($s = 2$) izvrsno se slažu s vrijednostima PGA procijenjenim iz makroseizmičkih intenziteta i u iznimno dobrom skladu su s vrijednostima PGA danim na hrvatskim kartama potresne opasnosti iz 2011. (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) (Slika 3.36). Međutim, procjene PGA za duboke slojeve temeljnog tla ($s_L = 2$) iznad dubokih geoloških sedimenata ($s = 0$) i dubokih mješovitih geoloških slojeva ($s = 1$) manje su od svih gore navedenih. Jedina vrijednost koja se slaže s procjenama ovog istraživanja za duboka lokalna tla je ona koja odgovara karti opasnosti iz 1990. za povratno razdoblje od 10.000 godina.

Stupnjevi intenziteta VII. i VIII. ° MCS procijenjeni za promatrano područje na kartama iz 1950. (Službeni list SFRJ, 1964.) i 1982. (Službeni list SFRJ, 1982.) odgovaraju rasponu horizontalnih vrijednosti PGA dobivenih u ovom istraživanju za lokalno stjenovito ($s_L = 0$) i kruto tlo ($s_L = 1$) iznad geološke stijene ($s = 2$).

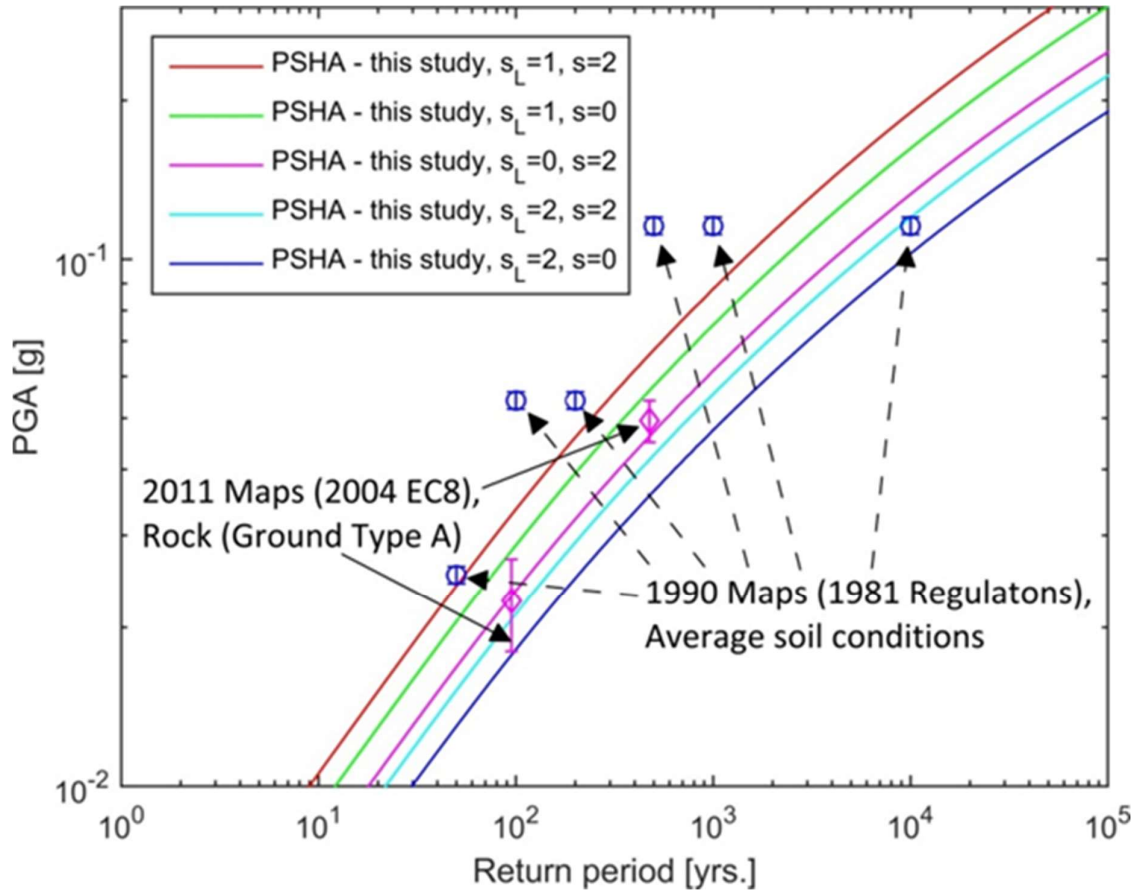


Slika 3.36 Usporedba različitih krivulja potresne opasnosti, generiranih iz skaliranih horizontalnih vrijednosti PGA u ovom istraživanju, s horizontalnim vrijednostima PGA danim na hrvatskim kartama potresne opasnosti (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) i s vrijednostima PGA iz tablice 3.4 (poglavlje 3.3.1.), na temelju stupnjeva intenziteta danih u bivšim propisima SFRJ (Službeni list SFRJ, 1964; 1982; 1990) (Bulajić i dr. 2022b)

Krivulje potresne opasnosti (horizontalne vrijednosti PGA) za duboke slojeve lokalnog tla iznad dubokih mješovitih i sedimentnih geoloških slojeva manjih su vrijednosti od krivulja za sve ostale kombinacije tipova temeljnog tla i dubokih geoloških karakteristika, međutim daljnja validacija ovih procjena nije moguća dok se ne prikupi više zapisa potresa na dubokim temeljnim tlima i provede daljnja kalibracija atenuacijskih jednadžbi.

Procjene vrijednosti PGA za vertikalni smjer temeljene na hrvatskim kartama potresne opasnosti iz 2011. (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) u određenoj mjeri se slažu s procjenama vrijednosti PGA za vertikalni smjer na dubokim lokalnim temeljnim tlima ($s_L = 2$) iznad geoloških stijena ($s = 2$) i dubokih geoloških sedimenata ($s = 0$) (Slika 3.37). Navedene usporedbe izuzetno se dobro slažu s procjenama

vrijednosti PGA za vertikalni smjer iz ovog istraživanja za stjenovito tlo ($s_L = 0$) iznad geološke stijene ($s = 2$), međutim, vrijednosti PGA za vertikalni smjer procijenjene iz makroseizmičkih intenziteta mnogo su većih vrijednosti, osim za povratno razdoblje od 10 000 godina.



Slika 3.37 Usporedba različitih krivulja potresne opasnosti, generiranih iz skaliranih vertikalnih vrijednosti PGA, s vrijednostima PGA za vertikalni smjer danim na hrvatskim kartama potresne opasnosti (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) te usporedba vertikalnih/horizontalnih omjera PGA predloženih u EN 1998-1:2004 s vertikalnim vrijednostima PGA iz tablice 3.6, na temelju stupnjeva intenziteta iz bivših propisa SFRJ (Službeni glasnik SFRJ, 1964; 1981; 1990) (Bulajić i dr. 2022a)

3.7.3. Spektri jednolike opasnosti i karte potresne opasnosti iz skaliranih horizontalnih i vertikalnih amplituda PSA

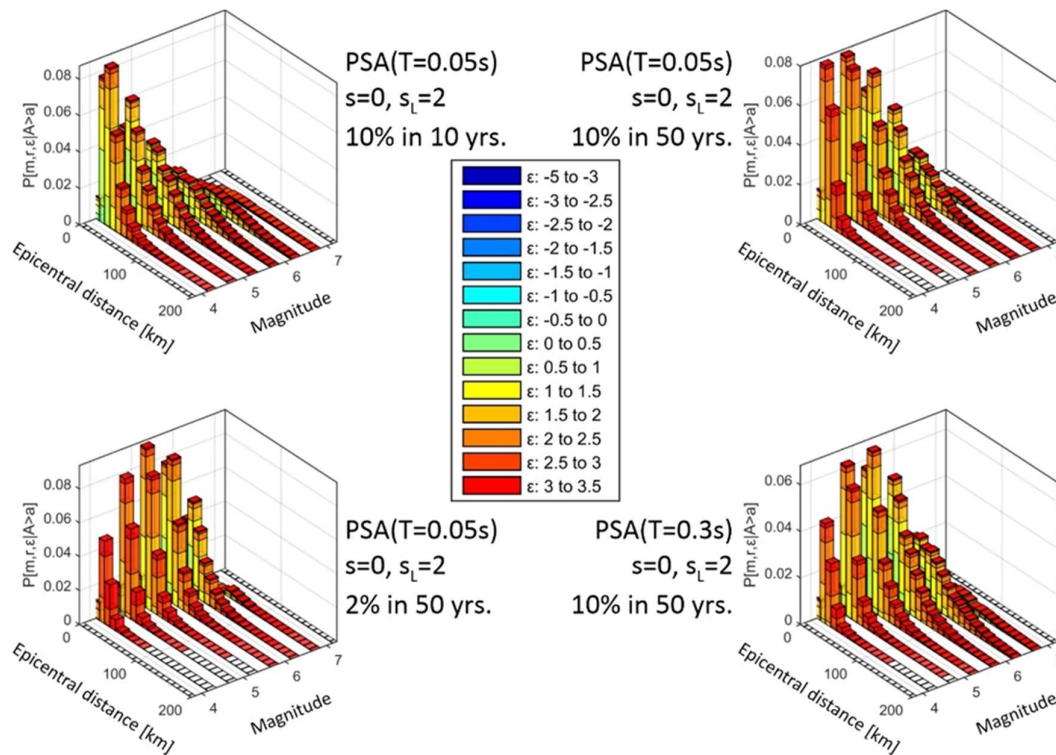
Za generiranje spektara jednolike opasnosti i karte potresne opasnosti iz horizontalnih i vertikalnih amplituda PSA provedeni su PSHA proračuni za promatrano područje upotrebom jednadžbi (3.22) i

(3.23) u kojima je R epicentralna udaljenost te koeficijentna skaliranja i standardnih derivacija iz tablice 3.9 za horizontalne te tablice 3.11 za vertikalne amplitude PSA.

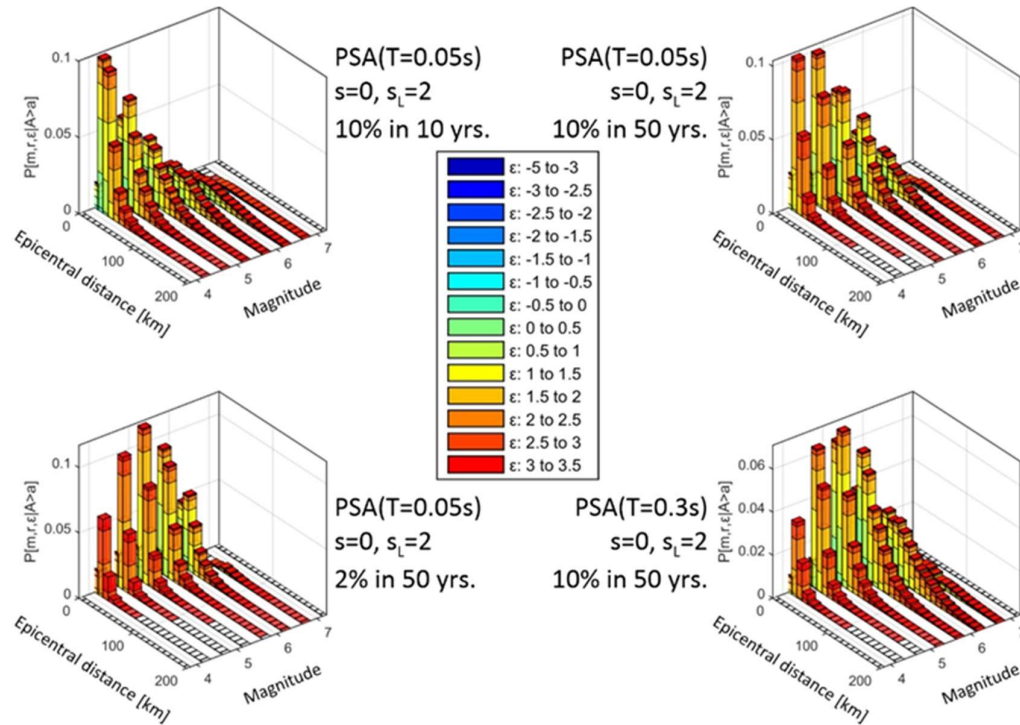
3.7.3.1. Razdvajanje potresne opasnosti spektralnih amplituda pseudoubznanja

PSHA razdvajanjem potresne opasnosti određeni su potresi koji najviše doprinose potresnoj opasnosti centralne lokacije promatranog područja ($45^{\circ} 32' N$, $18^{\circ} 23' E$) za povratna razdoblja $T_r = 2475, 975, 475$ i 95 godina.

Na slikama 3.38 i 3.39 prikazane su vjerojatnosti doprinosa, s obzirom na različite epicentralne udaljenosti i magnitude, vrijednostima prekoračenja horizontalnih i vertikalnih PSA s $T = 0,05$ i $0,3s$ na temeljnom tlu sastavljenom od dubokog lokalnog tla ($s_L = 2$) iznad dubokih geoloških sedimenata ($s = 0$), za različita povratna razdoblja.



Slika 3.38 Primjeri rezultata razdvajanja potresne opasnosti horizontalnih amplitude PSA za centralnu lokaciju promatranog područja (Bulajić i dr. 2021a)

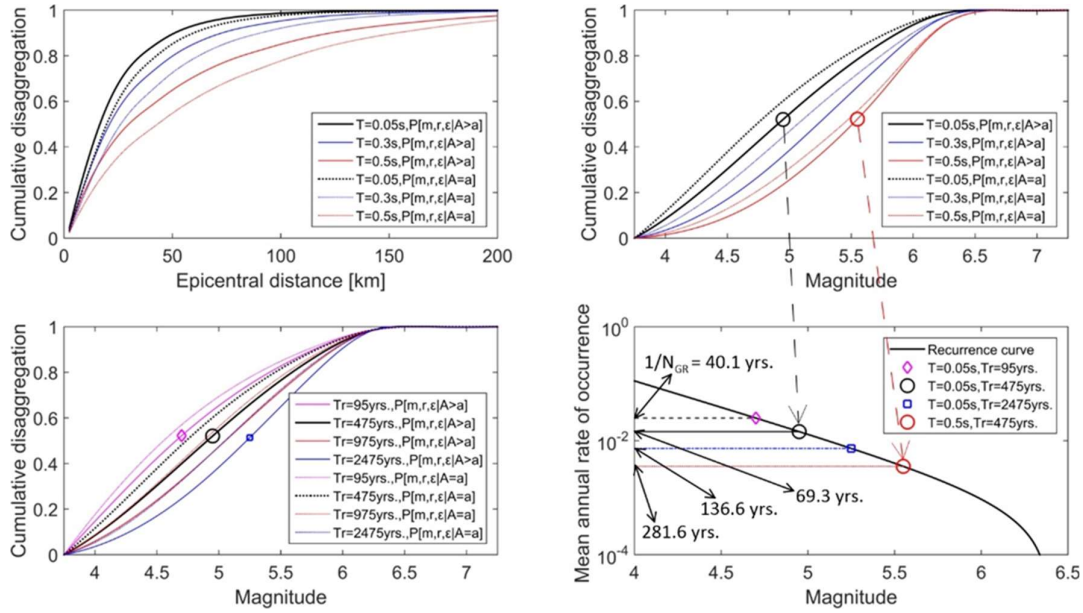


Slika 3.39 Primjeri rezultata razdvajanja potresne opasnosti vertikalnih amplitude PSA za centralnu lokaciju promatranog područja (Bulajić i dr. 2021b)

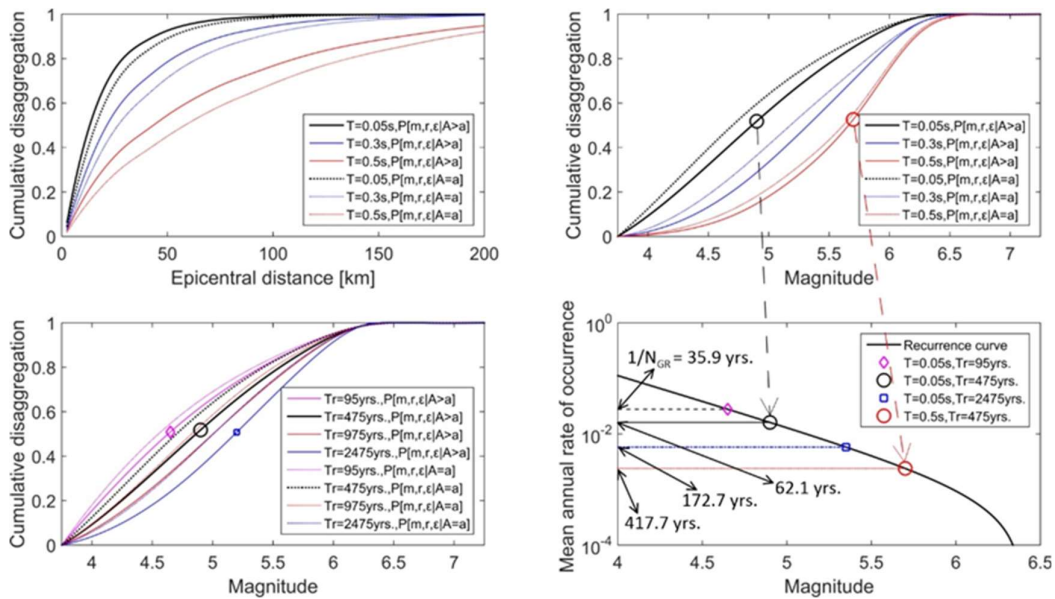
Za centralnu lokaciju promatranog područja razdvajanje doprinosa, epicentralnih udaljenosti i magnituda u kumulativnoj vrijednosti prekoračenja ($A > a$), odnosno dostizanja ($A = a$), horizontalnih i vertikalnih spektralnih amplituda pseudoubzranja s $T = 0,05$ i $0,3$ s, prikazano je na gornjim dijagramima na slikama 3.40 i 3.41. Dijagrami dolje lijevo prikazuju razdvajanje doprinosa magnituda u kumulativnoj vrijednosti prekoračenja ($A > a$), odnosno ponovljivosti ($A = a$) istih magnituda za povratna razdoblja $T_r = 2475, 975, 475$ i 95 godina.

Krivulje ponovljivosti magnituda za područje potresnog izvora koji najviše doprinosi potresnoj opasnosti za centralnu lokaciju promatranog područja prikazane su na donjim desnim dijagramima na slikama 3.40 i 3.41.

Na slikama 3.40 i 3.41 može se primijetiti da povratna razdoblja potresa koji najviše doprinose potresnoj opasnosti za centralnu lokaciju promatranog područja, variraju ovisno o periodu oscilacija i znatno su kraća od povratnog razdoblja T_r , definiranog kao recipročna vrijednost srednje godišnje stope pojave potresnih događaja $N(PSA)$ koji će uzrokovati amplitude PSA koje će premašiti očekivanu vrijednost.



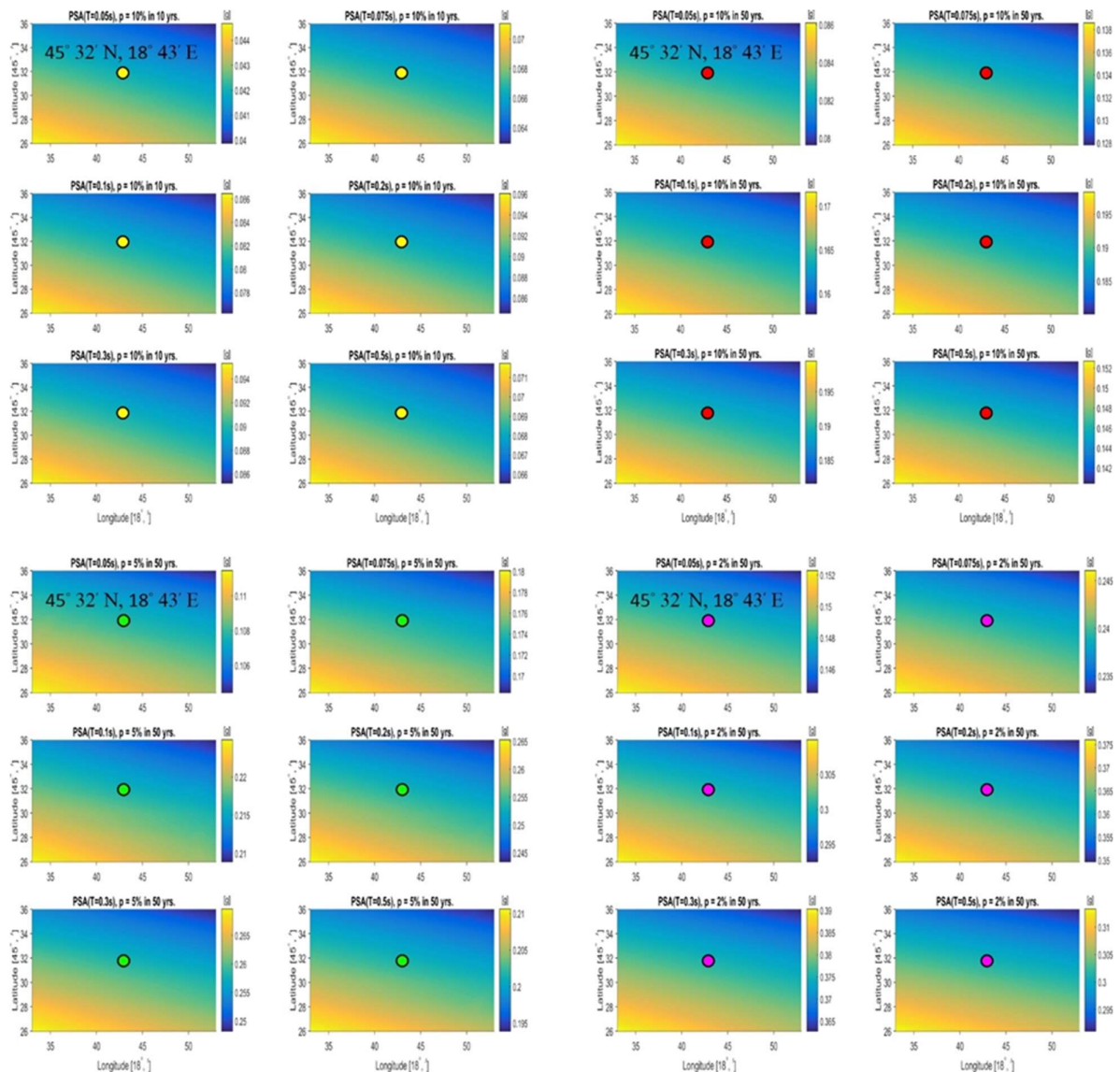
Slika 3.40 Primjeri razdvajanje doprinosa za udaljenost i magnitude, u kumulativnoj vrijednosti prekoračenja ($A > a$) / dostizanja ($A = a$), horizontalnih spektralnih amplituda pseudoubznanja te krivulja ponovljivosti magnitude za područje potresnog izvora koji najviše doprinosi seizmičnosti za centralnu lokaciju promatranog područja (Bulajić i dr. 2021a)



Slika 3.41 Primjeri razdvajanje doprinosa za udaljenost i magnitude, u kumulativnoj vrijednosti prekoračenja ($A > a$) / dostizanja ($A = a$), vertikalnih spektralnih amplituda pseudoubznanja te krivulja ponovljivosti magnitude za područje potresnog izvora koji najviše doprinosi seizmičnosti za centralnu lokaciju promatranog područja (Bulajić i dr. 2021b)

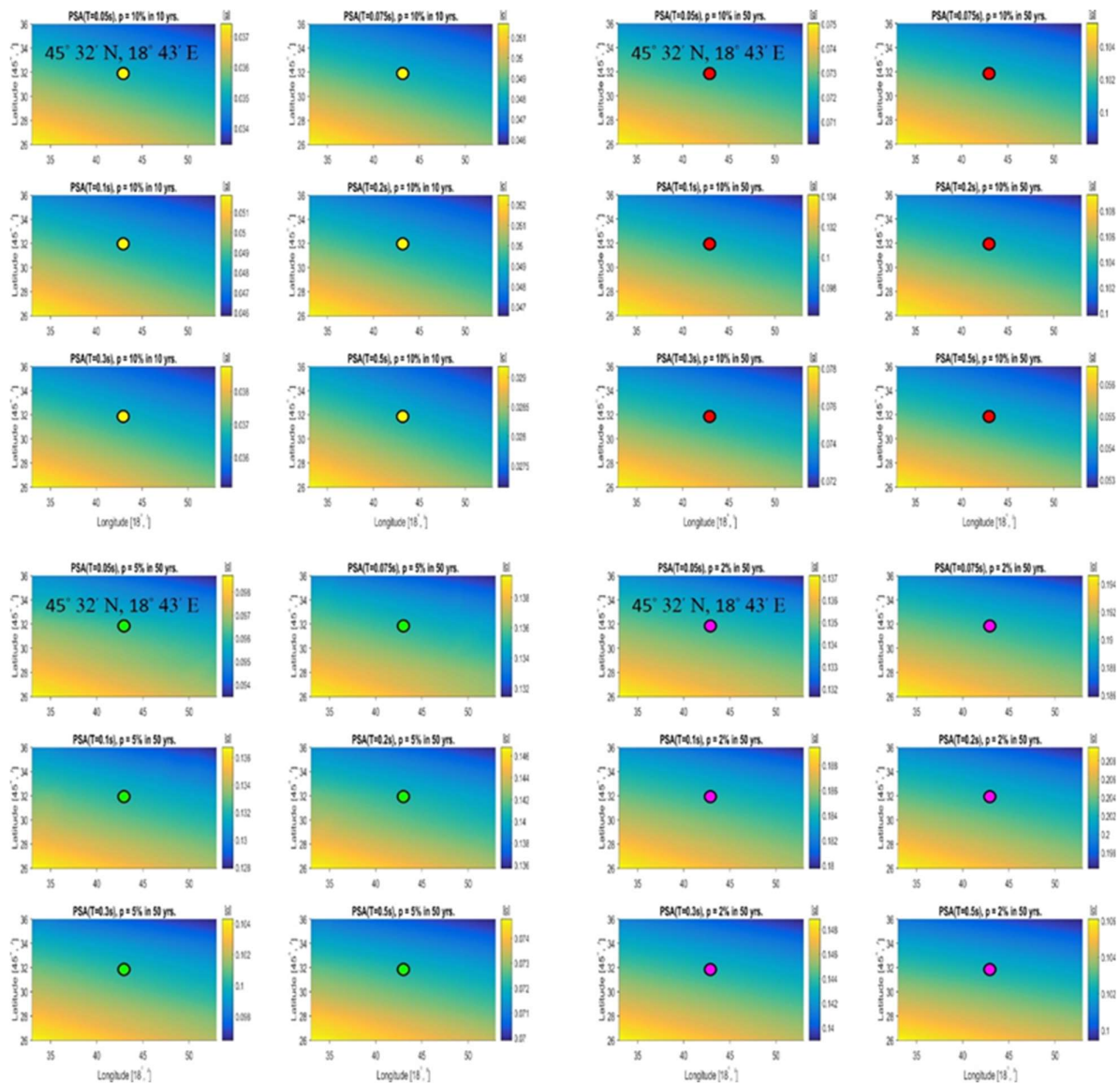
3.7.3.2. Karte potresne opasnosti promatranog područja generirane iz spektralnih ubrzanja

Provedena je PSHA koja je uzela u obzir potrese koji se mogu dogoditi na promatranom području te temeljno tlo koje se sastoji od dubokih slojeva lokalnog tla ($s_L = 2$) iznad dubokih geoloških sedimenata ($s = 0$). Horizontalna i vertikalna spektralna ubrzanja skalirana su jednadžbama (3.22) i (3.23) u kojima je R epicentralna udaljenost te koeficijenta skaliranja i standardnih derivacija iz tablica 3.9 i 3.11.



Slika 3.42 Karte potresne opasnosti za horizontalna ubrzanja za 6 amplituda PSA i vjerojatnosti prekoračenja od 10 % u 10 godina (6 gornjih lijevih slika), 10 % u 50 godina (6 gornjih desnih slika), 5 % u 10 godina (6 donjih lijevih slika), i 2 % u 50 godina (6 donjih desnih slika) (Bulajić i dr. 2021a)

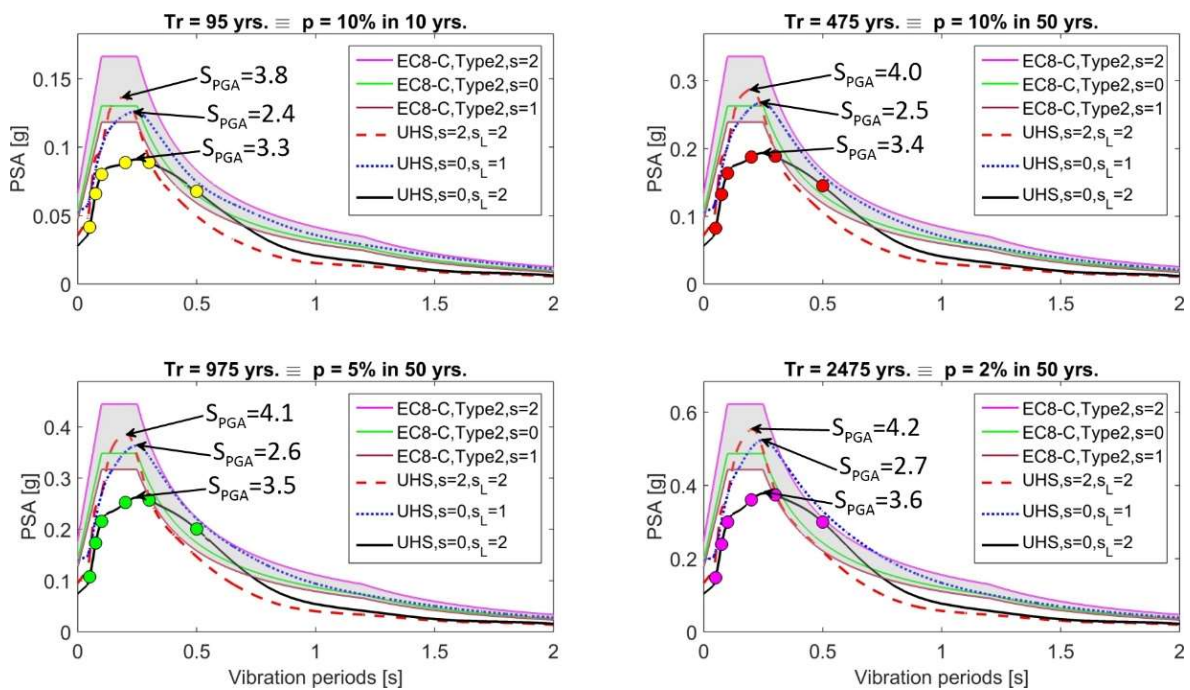
Izrađene su karte potresne opasnosti za horizontalna i vertikalna spektralna ubrzanja u području studije. Na slikama 3.42 i 3.43 prikazane su karte potresnog mikrozoniranja za 6 različitih amplituda PSA (0,05 s, 0,075 s, 0,1 s, 0,2 s, 0,3 s i 0,5 s) za različite razine vjerojatnosti ponovljivosti tj. povratna razdoblja T_r od 95, 475, 975 i 2475 godina. Krugovima na kartama istaknute su vrijednosti PSA (T) za promatrano područje tj. centralnu točku s koordinatama (45° 32' N, 18° 23' E) odabranu za izradu spektara jednolike opasnosti.



Slika 3.43 Karte potresne opasnosti za vertikalna spektralna ubrzanja u promatranom području za 6 različitih amplituda PSA i vjerojatnosti prekoračenja od 10 % u 10 godina (6 gornjih lijevih slika), 10 % u 50 godina (6 gornjih desnih slika), 5 % u 10 godina (6 donjih lijevih slika), i 2 % u 50 godina (6 donjih desnih slika) (Bulajić i dr. 2021b)

3.7.3.3. Spektri jednolike opasnosti promatranog područja

Za koordinate 45 32' N, 18 23' E generirani su spektri jednolike opasnosti za razine vjerojatnosti ponovljivosti od 10 % u 10 godina, 10 % u 50 godina, 5 % u 10 godina te 2 % u 50 godina. Napravljena je usporedba sa spektrom Tipa 2 iz HRN EN 1998:2011 (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) za tlo tipa C, skaliranim prema vrijednostima PGA na dubokim lokalnim tlima ($s_L = 2$) za tri različita tipa dubokih geoloških slojeva ($s = 0$, $s = 1$ i $s = 2$). Na slikama 3.44 i 3.45 prikazana je usporedba rezultirajućih spektara jednolike opasnosti generiranih iz skaliranih vrijednosti PSA na dubokim lokalnim slojevima tla ($s_L = 2$) iznad geološke stijene ($s = 2$) i geoloških sedimenata ($s = 0$) te za kruto tlo ($s_L = 1$) iznad geoloških sedimenata ($s = 0$) sa spektrima prema HRN EN 1998:2011.

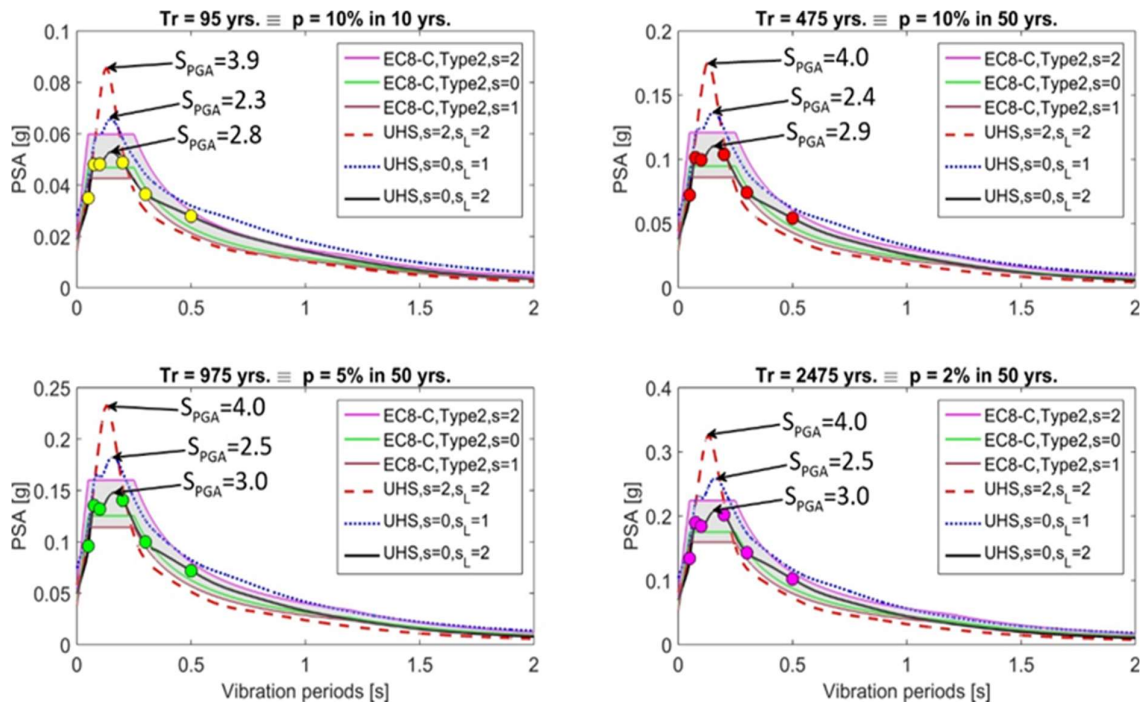


Slika 3.44 Usporedba spektara jednolike opasnosti iz horizontalnih amplituda PSA proračunatih za centralnu lokaciju promatranog područja za četiri različite razine vjerojatnosti ponovljivosti sa spektrima Tip 2 prema HRN EN 1998:2011 (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) za tlo tipa C (Bulajić i dr. 2021a)

Omjeri maksimalnih horizontalnih amplituda spektara jednolike opasnosti i PGA (S_{PGA}), odstupaju od faktora 2,5 određenog u HRN EN 1998:2011 (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) za generiranje horizontalnih elastičnih spektara odziva (Slika 3.44). Razlika između S_{PGA} i faktora 2,5 neznatno se povećava s povećanjem povratnih razdoblja. Za duboka lokalna tla iznad geoloških sedimenata ($s_L = 2$ i $s = 0$), S_{PGA} je veći od faktora koji određuje HRN EN 1998:2011 (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011), 37 %

za povratno razdoblje od 475 godina te 46 % za povratno razdoblje od 2475 godina. Razlike su još veće kod amplituda spektara jednolike opasnosti za duboka lokalna tla iznad na geološke stijene ($s_L = 2$ i $s = 2$). Za povratno razdoblje od 475 godina S_{PGA} će biti 60 % veći od faktora koji određuje HRN EN 1998:2011 (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) te 67 % veći za povratno razdoblje od 2475 godina. Proračunati S_{PGA} u ovom istraživanju sličan je faktoru 2,5 jedino kod spektara jednolike opasnosti proračunatih za kruta lokalna tla iznad dubokih geoloških sedimenata ($s_L = 1$ i $s = 0$).

Na slici 3.45 vidi se da postoje i odstupanja maksimalnih vertikalnih amplituda spektara jednolike opasnosti i PGA (S_{PGA}) proračunatih u ovom istraživanju od faktora 3,0 koji određuje HRN EN 1998:2011 (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) za vertikalne elastične spektre odziva. Razlika između S_{PGA} za vertikalni smjer i faktor 3,0 najmanja je (do 7 %) za duboka lokalna tla iznad geoloških sedimenata ($s_L = 2, s = 0$) te postoji samo za povratna razdoblja od 95 i 475 godina. S_{PGA} za kruta lokalna tla iznad dubokih geoloških sedimenata ($s_L = 1, s = 0$) je do 23 % manji od faktora 3,0 dok je za duboka lokalna tla na geološkoj stijeni ($s_L = 2, s = 2$) veći do 33 %.



Slika 3.45 Usporedba spektara jednolike opasnosti iz vertikalnih amplituda PSA za centralnu lokaciju promatranog područja za četiri različite razine vjerojatnosti ponovljivosti sa spektrima Tip 2 prema HRN EN 1998:2011 (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) za tlo tipa C

(Bulajić i dr. 2021b)

3.8. Zaključak poglavlja

Proučavanjem dosadašnjih spoznaja u području potresne opasnosti uočena je potreba za preispitivanjem do sada upotrebljivanih metodologija procjene te mjera sposobnosti potresa da ošteti određenu vrstu zgrada. Nadalje,

Zato je u ovom doktorskom radu, u dijelu koji se odnosi na potresnu opasnost, istražen utjecaj karakteristika dubokog temeljnog tla na vrijednosti PGA/PSA, predložene su nove empirijske atenuacijske jednadžbe za promatrano područje te je provedeno mikrozoniranje promatranog područja predloženom unaprijeđenom metodologijom koja se temelji na spektrima jednolike opasnosti te predloženim atenuacijskim jednadžbama koje istodobno uzimaju u obzir slojeve lokalnog tla i dubokih geoloških slojeva.

Odabrano je promatrano područje (u kojemu grad Osijek zauzima centralni položaj) koje je unatoč maloj do umjerenoj seizmičnosti interesantno za istraživanje zbog temeljnog tla koje se sastoji od dubokog lokalnog tla i dubokih geoloških sedimenata. Utjecaj ove kombinacije geoloških slojeva na odstupanja u predviđanjima PGA/PSA još uvijek je nedovoljno istražen pa istraživanja u ovom radu mogu doprinijeti novim pouzdanijim predviđanjima potresne opasnosti te novim spoznajama o načinima i veličini utjecaja ove kombinacije temeljnog tla i dubokih geoloških uvjeta na vrijednosti PGA/PSA.

Kako bi se osiguralo što više rezultata, kojima bi se u konačnici valorizirala predložena metodologija te usporedili i vrednovali rezultati istraživanja generirani iz nje, provedene su preliminarne procjene horizontalnih i vertikalnih vrijednosti vršnih ubrzanja temeljnog tla (PGA) postojećim atenuacijskim jednadžbama (Sabetta i Pugliese 1996) te napravljene usporedbe s postojećim procjenama prema EN 1998-1:2004 i HRN EN 1998-1:2011 i drugim.

Za 5 gradova u Republici Hrvatskoj provedene su procjene vrijednosti PGA izvedene iz odgovarajućih potresnih intenziteta empirijskom jednadžbom Trifunca i dr. (1991.). Rezultati procjena uspoređeni su s vrijednostima procjena PGA za horizontalni i vertikalni smjer iz najnovijih karata potresne opasnosti Republike Hrvatske. Iako se procjene PGA empirijskom jednadžbom Trifunca i dr. (1991.) iz odgovarajućih potresnih intenziteta uglavnom izvrsno podudaraju s najnovijim hrvatskim kartama potresne opasnosti, treba ih uzeti s rezervom jer stupnjevi intenziteta odgovaraju prosječnom lokalnom temeljnom tlu i geološkim uvjetima, dok su nove karte potresne opasnosti proračunate za

stjenovito temeljno tlo i ne uzimaju u obzir učinke dubokih geoloških slojeva na odziv temeljnog tla. Na potrebu uzimanja ovih podudaranja s rezervom ukazuju i rezultati procjena vertikalnih vrijednosti PGA za Tip 2, koji su dvostruko niži od procjena na temelju makroseizmičkih intenziteta.

Provedeno je preliminarno modeliranje potresne opasnosti promatranog područja jednadžbom Sabetta i Pugliese (1996.), a rezultati su uspoređeni sa spektrima odziva prema HRN EN 1998:2011. Usporedba je generirala zaključak da može doći do podcjenjivanja ili precjenjivanja potresnog djelovanja (Slike 3.12, 3.13 i 3.14).

Početni korak u predviđanju potresne opasnosti promatranog područja provedba je višestrukih linearnih regresijskih proračuna utemeljenih na 436 komponenata ubrzanja temeljnog tla uslijed potresa, koji su rezultirali koeficijentima za skaliranje horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA/PSA te predlaganjem novih empirijskih atenuacijskih jednadžbi za promatrano područje.

Prije upotrebe za modeliranja potresne opasnosti promatranog područja, nove atenuacijske jednadžbe upotrijebljene su za prikazivanje razlika u vrijednostima procjena, s obzirom na variranje različitih uvjeta lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva u njima.

Iz rezultata proračuna horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA može se zaključiti da nastaje deamplifikacija potresnih valova na svim lokacijama koje uključuju duboke slojeve lokalnog tla ($s_L = 2$) i duboke geološke sedimente ($s = 0$) jer raspršivanje potresne energije na dubokim tlima nadilazi amplifikaciju potresnih valova. Ako se npr. iznad dubokih geoloških sedimenata ($s = 0$) nalaze duboka lokalna tla ($s_L = 2$), deamplifikacija vertikalnih vrijednosti PGA bit će 10 % veća od deamplifikacije za iste duboke geološke uvjete i stjenovito lokalno tlo ($s = 2$), dok će deamplifikacija na dubokim geološkim sedimentima ispod dubokih lokalnih tla iznositi ~15 % više u usporedbi s geološkom stijenom ispod dubokih lokalnih tla. Najveće vrijednosti deamplifikacije, naravno, bilježe se za kombinaciju tla: duboka lokalna tla iznad dubokih geoloških sedimenata, a značajno je primijetiti i veći doprinos veličini deamplifikacije od dubokih lokalnih tla u odnosu na duboke geološke sedimente.

Na dubokim lokalnim temeljnim tlima ($s_L = 2$) iznad dubokih geoloških sedimenata ($s = 0$) npr. proračunate su za ~17 % manje horizontalne vrijednosti PGA u odnosu na vrijednosti za lokalno stjenovito tlo ($s_L = 0$) iznad dubokih geoloških sedimenata. Rezultati su nadalje pokazali da će vrijednosti horizontalnih i vertikalnih PGA na različitim slojevima lokalnog tla iznad geološke stijene amplificirati jer se visokofrekvencijski valovi lakše prenose kroz kompaktnije i kruće medije.

Proračuni vrijednosti horizontalnih amplituda PSA predloženim atenuacijskim jednadžbama ukazali su na zaključak da do deamplifikacije potresnih valova dolazi na svim područjima čije se temeljno tlo sastoji od dubokih slojeva lokalnog tla ($s_L = 2$) i dubokih geoloških sedimenata, ali samo za spektralne amplitude čiji su periodi oscilacija $< 0,3$ s. Proračunate empirijske procjene za duboke slojeve lokalnog tla iznad dubokih geoloških sedimenata za horizontalne spektralne amplitude s kratkim periodima oscilacija su do 37 % manje od istih proračunatih za duboke slojeve lokalnog tla iznad geološke stijene. Amplifikacija horizontalnih spektralnih amplitude nastaje za periode oscilacija $> 0,3$ s i značajno se pojačava do ~ 1 s. Ovi rezultati podudaraju se s rezultatima u radu Bijelić i dr. (2019.) koji istražuje utjecaj učinaka dubokog temeljnog tla na rušenja konstrukcija i predstavlja rezultate na temelju kojih periodi oscilacija dulji od 1,2 s povećavaju mogućnost rušenja konstrukcije za do 20 %. U ovom istraživanju, maksimalna proračunata vrijednost amplifikacije na dubokim slojevima lokalnog tla iznad dubokih geoloških sedimenata bila je 237 % veća u odnosu na vrijednosti za lokalno stjenovito tlo, za periode oscilacija $T = 0,5$ s.

Deamplifikacija vertikalnih amplitude PSA na dubokim lokalnim tlima, za periode oscilacija od 0,10 s do 0,15 s i periode dulje od 1,50 s, je do 26 %, a za sve ostale periode oscilacija dolazi do amplifikacije. Vrijednosti PSA u vertikalnom smjeru za periode oscilacija od 0,3 s na dubokom tlu iznad dubokih geoloških sedimenata čak su 1,48 puta veće od vrijednosti PSA zabilježene na stjenovitom tlu.

Svi generirani rezultati u skladu su s nalazima mnogih drugih istraživačkih studija npr. Derras i dr. (2020.) i Bijelić i dr. (2019.) o nelinearnom ponašanju temeljnog tla uslijed jakog potresnog gibanja, što dodatno potvrđuje valjanost i pouzdanost predloženih empirijskih atenuacijskih jednadžbi i generiranih koeficijenata skaliranja.

Određivanje potresa koji najviše doprinose potresnoj opasnosti početni je korak modeliranja potresne opasnosti promatranog područja. Provedeno je PSHA razdvajanje potresne opasnosti odnosno razdvojeni su doprinosi epicentralnih udaljenosti i magnituda u kumulativnoj vrijednosti prekoračenja, odnosno dostizanja ($PGA/PSA > pga$; $PGA/PSA = pga$) horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA/PSA za povratna razdoblja $T_r = 2475, 975, 475$ i 95 godina.

Utvrđeni su najveći doprinosi vrijednostima prekoračenja horizontalnih komponenata PGA i to od potresa s M_s između 4,5 i 5, čiji se epicentri nalaze na udaljenostima između 10 i 20 km, a za vertikalne komponente najveći doprinos vrijednostima prekoračenja je od potresa čije su epicentralne udaljenosti između 10 do 30 km s M_s između 4 i 5,5. Razdvajanje doprinosa horizontalnih i vertikalnih

spektralnih amplituda pokazalo je da povratna razdoblja onih potresa koja najviše doprinose potresnoj opasnosti promatranog područja, variraju ovisno o periodu oscilacija i znatno su kraća od povratnog razdoblja T_r definiranog kao recipročna vrijednost srednje godišnje stope pojave potresnih događaja $N(PSA)$ koji će uzrokovati amplitude PSA koje će premašiti očekivanu vrijednost.

Potresno mikrozoniranje promatranog područja provedeno je PSHA pristupom za različite kombinacije slojeva temeljnog tla za koje se smatra da su moguće na području studije, upotrebom koeficijenata skaliranja i atenuacijskih jednadžbi generiranih u ovom istraživanju za povratna razdoblja $T_r = 95, 475, 975$ i 2475 godina.

Izrađene su karte potresne opasnosti iz skaliranih horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA/PSA.

Vrednovanje rezultata provedenih PSHA u ovom istraživanju provedeno je usporedbom dobivenih krivulja potresne opasnosti za promatrano područje s vrijednostima PGA danim na važećim službenim hrvatskim kartama potresne opasnosti (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) te s vrijednostima proračunatim u tablicama 3.4 i 3.6.

Usporedba je rezultirala zaključkom da se procjene horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA u ovom istraživanju dobro slažu s usporednim procjenama za različite kombinacija slojeva temeljnog tla osim za kombinaciju dubokog temeljnog tla ($s_L = 2$) iznad dubokih geoloških sedimenata ($s = 0$) i dubokih mješovitih geoloških slojeva ($s = 1$) koje su značajno manje od svih usporednih procjena što je očekivano jer niti jedna od njih ne uzima u obzir učinke dubokih geoloških slojeva, kao ni klasifikaciju temeljnog tla koja prepoznaje duboke slojeve temeljnog tla (Slike 3.42 i 3.43).

Omjeri maksimalni horizontalnih amplituda spektara jednolike opasnosti i PGA (S_{PGA}), odstupaju od faktora 2,5 određeno u HRN EN 1998-1:2011 ovisno o kombinaciji slojeva temeljnog tla između 40 % i 60 % te se povećavaju s povećanjem povratnih razdoblja za ~ 10 %. Za vertikalni smjer odstupanja od faktora 3,0 određenog u HRN EN 1998-1:2011 su manja, od 7 % – 33 % te ne postoje za neka (veća) povratna razdoblja.

Preispitivanje do sada upotrebljavanih metodologija procjene i mjera sposobnosti potresa da ošteti određenu vrstu zgrada jedan je od načina za povećanje pouzdanosti postojećih procjena potresne opasnosti. Procjene potresne opasnosti trebaju se usmjeriti na izradu regionalnih: atenuacijskih jednadžbi, projektnih spektra odziva i karata potresne opasnosti koji bi bili pouzdaniji od današnjih,

kao i na stvaranje pouzdanih baza „umjetne povijesti“ vršnih ubrzanja temeljnog tla koje će se upotrebljavati kao potresni ulaz za nelinearne konstrukcijske proračune. Skaliranja vršnih ubrzanja temeljnog tla potrebno je temeljiti na pažljivo odabranim i provjerenim bazama podataka o zabilježenim potresnim gibanjima tla te na istovremenom uzimanju u obzir karakteristika lokalnog tla ali i dubokih geoloških slojeva u okruženju područja koje se istražuje.

4. IZLOŽENOST ELEMENATA RIZIKA PROMATRANOG PODRUČJA

Dijelovi ovog poglavlja objavljeni su u sljedećim publikacijama:

Pavić, Gordana; Hadzima-Nyarko, Marijana; Bulajić, Borko Đ. 2020b.

A Contribution to a UHS-Based Seismic Risk Assessment in Croatia—A Case Study for the City of Osijek.

Sustainability 12/5. 1796. doi:10.3390/su12051796

Pavić, Gordana; Hadzima-Nyarko, Marijana; Bulajić, Borko Đ.; Jurković, Željka. 2020a.

Development of Seismic Vulnerability and Exposure Models—A Case Study of Croatia.

Sustainability 12/3. 973. doi:10.3390/su12030973

Pavić, Gordana; Hadzima-Nyarko, Marijana; Bulajić, Borko Đ. 2019.

The Vulnerability of Buildings From the Osijek Database.

Frontiers in Built Environment 5. doi.org/10.3389/fbuil.2019.00066

Pavić, Gordana; Hadzima-Nyarko, Marijana; Plaščak, Ivan; Pavić, Sven. 2019a.

Seismic Vulnerability Assessment of Historical Unreinforced Masonry Buildings in Osijek using Capacity

Spectrum Method. Acta Physica Polonica A 135. 1138–1141.

Hadzima - Nyarko, Marijana; Pavić, Gordana; Lešić, Marija. 2016.

Seismic Vulnerability of Old Confined Masonry Buildings in Osijek, Croatia.

Earthquakes and Structures 1/4. 629-648. doi:10.12989/eas.2016.11.4.629

Različiti su pristupi i ciljevi modeliranja izloženosti. U ovom radu primarni cilj je dokazati da je prikupljanjem i obradom najkritičnijih karakteristika zgrada u smislu očekivanog potresnog ponašanja, moguće izraditi model izloženosti koji predstavlja pouzdan temelj za procjene potresne oštećljivosti zgrada. Pristup koji je detaljno objašnjen u ovom poglavlju, a koji se temelji na podacima o karakteristikama zgrada prikupljenim na terenu, predlaže se kao unaprijeđenje metodologija modeliranja izloženosti za zgrade.

U poglavlju je detaljno opisano generiranje modela izloženosti grada Osijeka i na temelju njega predloženih tipologija zgrada koje se mogu primjeniti na svim područjima sa sličnom građevinskom praksom izvedbe, upotrijebljenih materijala i razine primjene građevinskih propisa.

4.1. Uvod

Podatci o dosadašnjim društvenim i gospodarskim gubitcima od potresa pokazuju da su najčešći i najveći gubici uzrokovani oštećenjima i/ili rušenjem zgrada. Kako bi se uspostavilo racionalno polazište za strategije smanjenja rizika te pouzdano procijenila oštetljivost prije potresnih događaja, potrebno je identificirati podatke o izloženim zgradama te njihovim karakteristikama relevantnim za procjenu potresne oštetljivosti.

Identificirane podatke treba organizirati u modele izloženosti – detaljne baze podataka o broju zgrada te njihovim konstrukcijskim i drugim karakteristikama koje omogućuju brze procjene šteta i gubitaka na zgradama te razumijevanje utjecaja zgrada na živote ljudi u slučaju prirodnih i drugih katastrofa. Postupak identifikacije zgrada i njihovih karakteristika dugotrajan je i složen proces zbog sustavnog zanemarivanja izrade inventara zgrada. Iako zadnjih desetljeća osobito bogatije zemlje nastoje izraditi, ažurirati ili kontinuirano popunjavati inventare zgrada, primjenjivani postupci nerijetko generiraju modele izloženosti upitne dostatnosti i pouzdanosti.

Do podataka o zgradama najčešće se dolazi grubim procjenama brojnosti iz baza podataka napravljenih za različite (često nesrodne) svrhe ili na temelju satelitskih i drugih zračnih snimki, dok se karakteristike zgradama dodjeljuju otprilike i na upitne načine npr. skupno blokovima zgrada na temelju poznavanja godine izgradnje i karakterističnog konstrukcijskog sustava vezanog uz nju. Uobičajeno je postalo da su izvori podataka o zgradama različiti popisi, npr. stanovništva, statistička izvješća ili završna izvješća različitih projekata čija primarna svrha nije prikupljanje podataka o zgradama. Tijekom generiranja ovih podataka nije razmatrana njihova potencijalna uporaba za procjene izloženosti potresu ili drugim nepovoljnim utjecajima, odnosno uporaba za procjene oštetljivosti zgrada.

Navedeni izvori najčešće ne sadrže niti opće podatke, npr. o godini izgradnje, broju etaža, bruto ploštini i slično, a ponajmanje podatke o konstrukcijskim karakteristikama zgrada koje su potrebne za procjene potresnog ponašanja zgrada. Osim toga, ovako prikupljeni podatci uglavnom se odnose na stambene jedinice, a ne na zgrade, pa kao takvi mogu biti samo djelomično upotrebljivi za pouzdano opisivanje pojedinih karakteristika cijele zgrade.

4.2. Izloženost u Republici Hrvatskoj

Nedvojbena je velika fizička i materijalna izloženost prirodnim katastrofama u Republici Hrvatskoj. Unatoč dugoj povijesti istraživanja i razvoju potresnog inženjerstva, čiji se početci mogu pratiti kroz radove Mohorovičića i Kišpatića već od druge polovice 19. stoljeća, procjene izloženosti i oštetljivosti zgrada predstavljaju prilično novi koncept. O važnosti i potencijalu za njihovo poboljšanje raspravlja se povremeno (najčešće nakon nastanka posljedice katastrofalnih djelovanja) i to bez koordinirane i razrađene strategije (Pavić i dr 2019b, Pavić i dr 2019a).

Kao i u mnogim drugim zemljama u svijetu, važna značajka koja karakterizira izloženost u Republici Hrvatskoj je neravnomjerna teritorijalna raspodjela stanovništva i građevinskih konstrukcija.

Iako je prema najnovijem Popisu stanovništva, kućanstva i stanova, Državnog zavoda za statistiku (DZS) iz 2021., prosječna gustoća naseljenosti 68,7 stanovnika/km², gotovo dvije trećine od 3 888 529 stanovnika (DZS 2022) živi na jednoj trećini teritorija zemlje, od čega najveći dio čine urbana gradska područja. Problem grupiranja stanovništva u urbanim područjima vidljiv je i iz zadnjih podataka o broju stambenih jedinica koji se u posljednjih 10 godina povećao za 4,61 % unatoč smanjenju broja stanovnika za 9,25 % (Tablica 4.1) (DZS 2022). Važnost preciznog definiranja svih elemenata rizika i uzroka koji doprinose izloženosti dodatno potencira i činjenica da se najveće urbane cjeline Republike Hrvatske nalaze u područjima visokog rizika od pojave potresa.

Tablica 4.1 Grupiranja stanovništva u urbanim područjima (DZS 2022)

	2011.	2021.	Razlika 2021./ 2011.	Promjena (%)
Stanovništvo	4 284 889	3 888 529	-396 360	-9,25
Stambene jedinice	2 246 910	2 350 444	103 534	4,61

Republika Hrvatska nema nacionalnu bazu s podacima o broju postojećih zgrada, konstrukcijskim tipologijama i karakteristikama postojećih zgrada koji bi se mogli upotrijebiti za pouzdane procjene potresne oštetljivosti. Postoje različiti pokušaji izrade takve baze, međutim oni se temelje na neadekvatnim načinima prikupljanja podataka, podacima o zgradama koji ih nedostavno karakteriziraju jer se prikupljaju za različite potrebe pri čemu se ne razmatra potencijalna uporaba

prikupljenih podataka za kvantitativno i kvalitativno opisivanje izloženosti i procjene oštetljivosti zgrada (Pavić i dr 2019b, Pavić i dr 2019a).

Jedna od inicijativa za izradu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske, npr. realizirana je 2019. kada je Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine izradilo pregled nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske koji sadržava podatke o broju, namjeni, ploštini, građevinskim te energetske karakteristika zgrada. Međutim, podatci za pregled generirani su na temelju prikupljenih, obrađenih i procijenjenih podataka o zgradama preuzetih iz statističkih popisa stanovništva Državnog zavoda za statistiku (DSZ RH) do 2011. i stručnih procjena o broju izgrađenih zgrada u statističkim popisima do 1952.

Primarni cilj pregleda bio je omogućiti procjenu energetske učinkovitosti te izraditi dugoročnu strategiju za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda. Zgrade su u pregledu razvrstane prema namjeni, vlasništvu, klimatskim zonama, razdoblju gradnje, području (urbano/ruralno) te energetske svojstvima i karakteristikama zgrada.

Izrađeni pregled nacionalnog fonda zgrada sadržava samo mali broj upotrebljivih podataka (brojnost, razdoblje izgradnje, ploštine) za procjene oštetljivosti, ali ne one najbitnije o nosivom konstrukcijskom sustavu, katnosti, stropnim i krovnim konstrukcijama i sl. (Pavić i dr 2019b, Pavić i dr 2019a).

Osim toga, postupak razvrstavanja zgrada u pregledu trebao bi se oslanjati na konstrukcijske karakteristike, građevinske materijale i specifične nacionalne tehnike gradnje koji se upotrebljavaju ili su se upotrebljavali u gradnji, a ne na sekundarno bitne podatke o zgradama (namjena, vlasništvo, klimatska zona).

Iako su podatci o zgradama u izrađenom pregledu samo djelomično upotrebljivi za procjene potresne oštetljivosti, moguće ih je upotrijebiti kao temelj za izradu nacionalnog modela izloženosti ili mogu poslužiti kao ogledni za usporedbe.

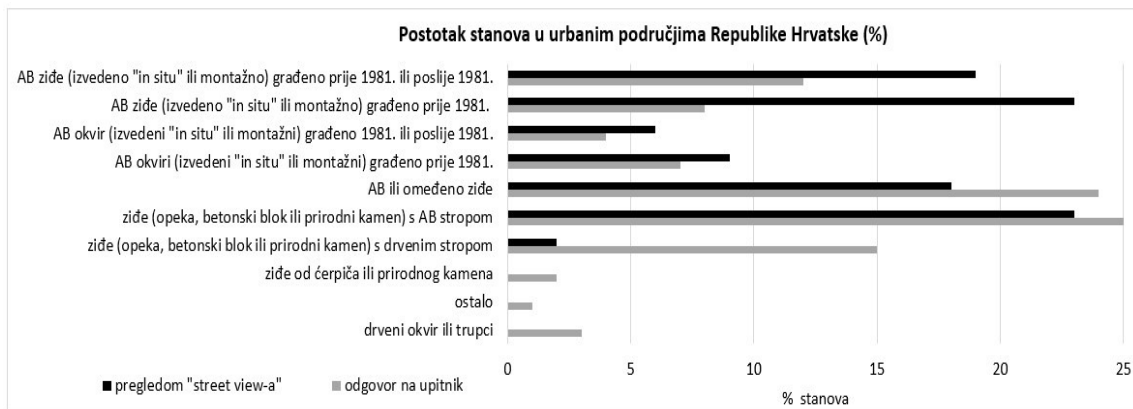
Nedostatak preciznih podataka o broju postojećih zgrada i karakteristikama bitnim za procjene potresne oštetljivosti nije jedina prepreka pouzdanijem definiranju izloženosti u Republici Hrvatskoj. Do danas na nacionalnoj razini jednoznačno nisu određeni parametri izloženosti niti definirane konstrukcijske tipologije kojima bi bilo moguće pouzdano opisati i obuhvatiti nacionalni fond zgrada iako Europska unija kroz Europsku politiku upravljanja rizicima od katastrofa (engl. *European Disaster*

Risk Management) već godinama potiče države članice da razviju nacionalne tipologije te pristupe i procedure za modeliranje izloženosti i oštetljivosti.

Značajan poticaj razvoju nacionalnog modela izloženosti je i Direktiva EU 2012/27, kojom se Republika Hrvatska obvezala donijeti „Dugoročnu strategiju za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske“. Strategija, između ostalog, podrazumijeva izradu Nacionalne baze podataka o građevnom fondu i pregled karakteristika tih zgrada, što bi trebalo stvoriti temelj za generiranje lokalnih i nacionalnog modela izloženosti (Pavić i dr 2019b, Pavić i dr 2019a).

Rješavanje problema nedostatka podataka o postojećem građevinskom fondu pokušalo se realizirati i kroz projekt NERA (engl. *Network of European research infrastructures for earthquake risk assessment and mitigation*) (NERA 2011) kojim je, osim Republike Hrvatske, obuhvaćeno još 5 zemalja Europe (Island, Švicarska, Srbija, Bosna i Hercegovina, Crna Gora). Primijenjene su dvije razine prikupljanja podataka o postojećim građevinskim fondovima: pregledom aplikacije Google Street View i ispunjavanjem upitnika koje su na nacionalnim razinama ispunjavale skupine građevinskih stručnjaka.

Na slici 4.1 prikazan je postotak stambenih jedinica u urbanim sredinama Republike Hrvatske prema projektu NERA. Crni stupci na dijagramu generirani su na temelju vizualnih procjena iz Google Street pregleda, a sivi na temelju odgovora stručnjaka u upitnicima. Dvije su osnovne karakteristike zgrada na kojima se temelji razredba prikupljenih podataka: materijal bočnog nosivog sustava (ziđe, armirani beton, drvo i drugo) te godina izgradnje koja je povezana s potresnim normama, što je nadalje izravno povezano s razinom inženjerskog projektiranja (Slika 4.1).



Slika 4.1 Postotak stambenih jedinica u urbanim sredinama Republike Hrvatske prema projektu NERA (prema NERA 2011)

Postupak razvrstavanja zgrada u nacionalnim bazama podataka o građevinskom fondu trebao bi se oslanjati na građevinske materijale i specifične nacionalne tehnike gradnje koje su prisutne u suvremenoj ili tradicijskoj gradnji (Pavić i dr 2019b, Pavić i dr 2019a). Kao što se vidi iz slike 4.1 razvoj ove baze podataka zgrada, a i brojnih drugih, oslanja se na dostupne sekundarne podatke na temelju kojih se „zaključuje“ o nepoznatim karakteristikama zgrada. Iz godina izgradnje npr. identificira se građevinski materijal, tehnike gradnje specifične za određeno vrijeme na promatranom području, primijenjene građevinske norme i sl. Niti ovaj projekt nije značajnije unaprijedio problem definiranja izloženosti u Republici Hrvatskoj.

4.2.1. Razdoblja gradnje i pripadna obilježja

S obzirom na materijale, tehnike gradnje i primijenjene tehničke norme, nacionalni fond zgrada Republike Hrvatske može se podijeliti na sedam karakterističnih povijesnih razdoblja:

1. razdoblje – između 1860. i 1920. – zgrade su građene prirodnim materijalima: kamenom, drvom, zemljom te drugim pogodnim i dostupnim materijalima. Građevinsku praksu pojedinih područja Republike Hrvatske osim dostupnosti građevinskih materijala oblikuju prirodni te klimatski uvjeti područja na kojemu se gradilo. Tako se npr. u južnim priobalnim područjima Republike Hrvatske najčešće kao građevinski materijal upotrebljavao kamen koji je zbog svoje težine i masivnosti ziđa zimi uspješno odolijevao jakim naletima vjetrova, a ljeti dugo štutio unutrašnjost prostorija od pregrijavanja. Kako bi se zimi zadržala toplina grijanih prostorija, u kontinentalnim dijelovima zemlje grade se drvene kuće – drveni okvir s ispunom od šiblja, blata, sirove ili pečene opeke temeljene na zidanim temeljima (od kamena ili opeke), a kasnije osnovni gradivni element postaje opeka (sirova i pečena).

Unatoč starosti brojne drvene kuće u ruralnim područjima Banovine, Slavonije, Baranje, Zagorja i Međimurja i danas su u upotrebi i odlično odolijevaju zubu vremena i prirodnim nepogodama (vidi sliku 4.2a)). Poseban tip zgrada u Republici Hrvatskoj građen je u poplavnim područjima uz veće rijeke (Pokuplje, Turopolje, Posavina, zapadna Slavonija), gdje su kuće građene na drvenim ili zidanim stupovima tzv. sohama (Slika 4.2b)).



a) drvena zgrada na Banovini snimljena
nakon potresa 28. 12. 2020.



b) zgrada na sohama

Slika 4.2 Zgrade iz razdoblja 1860. – 1920.

Stropne konstrukcije i dvostrešna krovništva izvode se kao fleksibilna drvena, pokrivena slamom, drvom, vapnenačkim pločama ili crijepom. Podovi su izrađivani uglavnom od nabijene zemlje ili kamena između podnih greda, a u urbanijim područjima su na podne grede polagane daske (drveni podovi). Sve zgrade iz ovog razdoblja građene su bez uzimanja u obzir mogućnosti potresnog djelovanja te imaju minimalnu razinu potresne otpornosti, koja je, pokazalo se to i nakon nedavnog potresa na Banovini, najviša kod zgrada izgrađenih samo od drva. Naime, drvo je izvrstan građevinski materijal, otporan na savijanje okomito na vlakna, kao i na tlak u smjeru vlakana, a drvena konstrukcija kao elastični sustav, izvrsno rasipa energiju potresa.

2. razdoblje – između 1920. i 1948. obilježeno je postupnim napuštanjem gradnje prirodnim materijalima jer se pojavljuju novi i unaprijeđeni materijali gradnje (čelik, armirani beton, staklo) i tehnike.



a) zgrada u Osijeku



b) zgrada u Petrinji snimljena nakon
potresa 28.12. 2020.

Slika 4.3 Zgrade iz razdoblja 1920. – 1948.

Građevinski priručnici, uglavnom na njemačkom jeziku, za gradnju opekam, drvom, betonom i željezom postaju sve upotrebljavanija literatura graditeljske zajednice.

Grade se i dalje nearmirane zidane zgrade čiji su zidovi debljine 25, 38 ili 51 cm (opeka), a u urbanim sredinama od 1930-te upotrebljava se armirani beton za izvedbu stupova i stropnih greda (rebričasti stropovi) (Slika 4.3a)). Zbog same prirode materijala ove zgrade su otpornije na potrese u odnosu na zgrade iz prethodnog razdoblja, ali ih većina nema stabilizacijske – ukrutne elemente pa nisu otporne na jaka potresna djelovanja (Slika 4.3b)).

3. razdoblje – između 1948. i 1964. karakterizira pojava i upotreba novijih materijala, tanjih i laganijih konstrukcija za tadašnje tehničke propise zadovoljavajuće statičke nosivosti. Ugrađuju se veći prozori i vrata, uglavnom drveni, ustakljeni s jednim ili dva stakla po krilu. Prozori su jednostruki ili dvostruki s razmakom paralelnih krila većim od 10 cm (Slika 4.4a)).

Podovi se najčešće izvode na sloju nabijene zemlje, a kao hodna obloga upotrebljavale su se daske, drvene kocke ili opekarski elementi položeni u nasip. Upotreba betona i armiranog betona, gradnja „tanjih“ konstrukcija i većih ustakljenih otvora omogućila je bržu izgradnju većeg broja zgrada, međutim sa stajališta toplinske zaštite i uštede energije ove zgrade imaju velike toplinske gubitke (Vrček 2012).

Iako se pri projektiranju zgrada u ovom razdoblju počinje uzimati u obzir potresno opterećenje, zgrade iz ovog razdoblja imaju minimalnu razinu potresne otpornosti (Furundžić 1969) koja se pokazala nedostatna kod Petrinjskog potresa (Slika 4.4b)).



a) zgrada u Osijeku



b) zgrada u Petrinji snimljena nakon
potresa 28.12. 2020.

Slika 4.4 Zgrade iz razdoblja 1948. – 1964.

4. razdoblje – između 1964. – 1981. – nakon potresa u Skoplju 1963. zidane zgrade grade se sustavom horizontalnih greda (horizontalnih serklaža) i vertikalnih veznih stupova (vertikalnih serklaža) kako bi se dobilo omeđeno zide (Akamatsu i Yamamoto 2019), a nosivi sustavi u armiranobetonskih konstrukcija izvode se kao armiranobetonski okviri i nosivi zidovi, u skladu s odredbama potresne regulative uvedene 1964 (Slika 4.5a i b)).

Sve veća potreba za stanovima rješava se upotrebom različitih industrijskih montažnih sustava gradnje. Armiranobetonski zidovi izvode se minimalnih debljina od 16 i 18 cm. Ispune između nosive konstrukcije rade se često kao stolarski elementi ili predgotovljeni betonski parapetni paneli s izuzetno lošim toplinskim i zvučnim karakteristikama. Zidane konstrukcije izvode se uglavnom od šuplje blok opeke 25 x 19 x 19 cm koja se obostrano žbuka. Otvori za staklene površine se još povećavaju, prozori se ustakljavaju jednim staklom po krilu, smanjuje se razmakom paralelnih krila (do 1 cm) ili se ugrađuje izostaklo.



a) zgrada u Osijeku

b) zgrada u Petrinji snimljena nakon potresa 28.12. 2020.

Slika 4.5 Zgrade iz razdoblja 1964. – 1981.

Sve veća potreba za stanovima rješava se upotrebom različitih industrijskih montažnih sustava gradnje. Armiranobetonski zidovi izvode se minimalnih debljina od 16 i 18 cm. Ispune između nosive konstrukcije rade se često kao stolarski elementi ili predgotovljeni betonski parapetni paneli s izuzetno lošim toplinskim i zvučnim karakteristikama. Zidane konstrukcije izvode se uglavnom od šuplje blok opeke 25 x 19 x 19 cm koja se obostrano žbuka. Otvori za staklene površine se još povećavaju, prozori se ustakljavaju jednim staklom po krilu, smanjuje se razmakom paralelnih krila (do 1 cm) ili se ugrađuje izostaklo.

Osim drvenih krovšta, sve se češće izvode ravni krovovi s betonskom pločom i minimalnom izolacijom. Potresna otpornost zgrada u ovom razdoblju se povećava, ali još uvijek nije dovoljno velika, što se može vidjeti na primjeru zgrade na slici 4.5b).

5. razdoblje – između 1981. – 2005. – za gradnju se upotrebljavaju svi dostupni materijali na tržištu (Slika 4.6). Zgrade se grade od vitkih okvirnih konstrukcija ili betonskih nosivih zidova pa konstrukcije postaju još tanje i lakše. Grade se armiranobetonski konstrukcijski sustavi s nosivim i vanjskim armiranobetonskim zidovima debljine 20 cm te armiranobetonskim pločama debljine 18 cm.

Karakteristične zidane zgrade imaju nosivo ziđe debljine 25 cm od pune opeke s vertikalnim armiranobetonskim serklažima 25/25 cm na svim spojevima konstrukcijskih zidova, te armiranobetonskim serklažima 25/30 cm za horizontalno povezivanje. Međukatne konstrukcije su krute izrađene od armiranobetonskih ploča ili predgotovljenih betonskih gredica s opečnom ispunom i tlačnom pločom debljine 4 cm. Za toplinsku izolaciju najčešće se upotrebljava kamena vuna i polistiren (stiropor), u debljinama od 4 – 8 cm za vanjsko ziđe te 8 do 12 cm za kosi krov u kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske, dok se u primorskom dijelu najčešće primjenjuju toplinske žbuke, bez dodatne toplinske izolacije.

Dvije su razine potresne otpornosti u ovom razdoblju, srednja koju imaju zgrade građene do 1998. i velika za zgrade građene nakon tog razdoblja.



Slika 4.6 Zgrada iz razdoblja 1981. – 2005. (Osijek)

6. razdoblje – između 2005. – 2012. – montažni sustavi koji su se masovno upotrebljavali kod gradnje zgrada 90-tih godina prošlog stoljeća napuštaju se i zamjenjuju kombiniranim, poboljšanim tradicionalnim sustavima gradnje.

Grade se zidane, armiranobetonske (Slika 4.7), čelične te rjeđe lamelirane drvene konstrukcije, pri čemu je nosiva konstrukcija najčešće armiranobetonska.



Slika 4.7 Zgrada iz razdoblja 2005. – 2012. (Osijek)

Otvori čine više od 50 % uličnog i dvorišnog ziđa, prizemlja su visoka na stupovima, uglavnom ustakljena (meki kat), poslovne ili druge nestambene namjene. Otpornost zgrada projektiranih od 1998. do 2012., proračunata uzimajući u obzir 75 – 100 %-tno mjerodavno potresno opterećenje.

7. razdoblje – poslije 2012. – upotrebljavaju se najsuvremeniji materijali i tehnike građenja (Slika 4.8a i b)). Zgrade su čistih, minimalističkih linija, jednostavnih oblika i namjernih asimetrija.

Potencira se recikliranje i ponovna upotreba građevinskih materijala te upotreba ekološki prihvatljivijih, zdravijih i materijala iz obnovljivih izvora. Maksimizira se mogućnost demontaže zgrada i njihovih komponenata te mogućnost njihove ponovne uporabe. Stavlja se snažan naglasak na važnost i potiče gradnja energetski učinkovitih zgrada. Projektiranje zgrada provodi se sukladno europskim normama koje propisuju uzimanje u obzir 100 % vrijednosti mjerodavnog potresnog opterećenja.



a) zgrada u Osijeku



b) zgrada u Petrinji izgrađena 2015. snimljena
nakon potresa 28.12. 2020.

Slika 4.8 Zgrade izgrađene poslije 2012.

4.2.2. Građevinski propisi

Građevinske norme skup su tehničkih pravila čija je svrha osigurati ispunjenje zahtjeva koji se odnose na kvalitetu, elastičnost, sigurnost, trajnost i učinkovitost. Ispunjavanje ovih zahtjeva posebno je važno kada je u pitanju potresna sigurnost zgrada, jer navedeni zahtjevi izravno dovode do smanjenja šteta i gubitaka od potresa (Pavić i dr 2019b, Pavić i dr 2019a).

Usporedno s porastom stanovništva i potrebom za novim zgradama, raste i potreba za sve pouzdanijim građevinskim normama. Unatoč tome što se povremeno dorađuju i prilagođavaju, norme nikada ne mogu predvidjeti sve moguće pojave, posebice kada je riječ o potresnoj aktivnosti.

Projektiranje i izgradnja zgrada u Republici Hrvatskoj uređeno je Zakonom o gradnji, Tehničkim propisom za građevne konstrukcije, Zakonom o prostornom uređenju, Zakonom o zaštiti i očuvanju kulturnih dobara i nizom drugih zakona i pravilnika.

U tablici 4.2 prikazan je razvoj primjene građevinskih propisa vezanih uz gradnju zgrada u Republici Hrvatskoj s naglaskom na potresne norme, karakteristične konstrukcije za pojedina razdoblja gradnje, načini razmatranja potresnog opterećenja pri proračunu potresne otpornosti zgrada te pripadne razine potresne otpornosti.

Tablica 4.2 Razvoj primjene građevinskih propisa i norma vezanih uz gradnju zgrada u Republici Hrvatskoj

RAZDOBLJE	PRIMIENJENI PROPISI	KARAKTERISTIČNE KONSTRUKCIJE	POTRESNO PROJEKTIRANJE	POTRESNA OTPORNOST
2012. do danas	Norma HRN EN 1998-1:2011 (EC 8)	armiranobetonske, omeđeno ziđe, metalne, drvene lamelirane	složeno potresno projektiranje, povećanje proračunskog opterećenja, 2012. nove karte potresne opasnosti	100 % za mjerodavno potresno opterećenje
2005. – 2012.	Pred norma HRN ENV 1998-1 (EC 8)	omeđeno ziđe, armiranobetonske, metalne, drvene lamelirane	propisano potresno projektiranje, povećanje proračunskog opterećenja	75 – 100 % za mjerodavno potresno opterećenje
1981. – 2005.	Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima	omeđeno ziđe, armiranobetonski okviri i zidovi, dvojni sustavi	jednostavni proračuni potresne otpornosti, od 1990. karte potresne opasnosti utemeljene na vjerojatnosnom pristupu	srednja od 1998. velika
1964. – 1981.	Pravilnik o privremenim tehničkim propisima za građenje u seizmičkim područjima	neomeđeno ziđe s armiranobetonskim podovima (kuće) omeđeno ziđe, armiranobetonske konstrukcije (zgrade)	prvi proračuni potresne otpornosti, 1950. karta potresne opasnosti	mala
1948. – 1964.	Privremeni tehnički propisi za dopuštena opterećenja zgrada	neomeđeno ziđe bez serklaža, krute stropne konstrukcije (prevladavaju RC)	potresno djelovanje uzima se u obzir kao sila koja djeluje na vrh zgrade	minimalna
1920. – 1948.	“Građevinski zakon Kraljevine Jugoslavije”	neomeđeno ziđe, drvene podne konstrukcije, od 1930. armiranobetonski stupovi i stropne grede	potresna otpornost ne uzima se u obzir	pojačana minimalna
1860. – 1920.	Austrougarski građevinski pravilnik “Red građenja” za konstrukcijske i oblikovne parametre zgrada	drveni okviri s ispunom (blato, šiblje, daska, opeka), neomeđeno ziđe	potresna otpornost ne uzima se u obzir	minimalna

Iako je još od 1857. za primjenu na području današnje Republike Hrvatske postojao austrougarski građevinski pravilnik „Red građenja“ (Kahle 2006) koji je između ostalog propisivao konstrukcijske i oblikovne parametre zgrada, izgradnja zgrada do 1920. temeljila se uglavnom na iskustvenim znanjima graditelja, tradicijskom oblikovanju i tehnikama.

Krajem razdoblja (oko 1905.) u urbanim sredinama počinje se upotrebljavati armirani beton za izvedbu betonskih stropnih greda (sustav Siegart). Naputkom (Hrvatskim propisom) za armiranobetonske konstrukcije iz 1910. – 1917. (Kahle 2020, Kušević 1925) propisuju se načini proizvodnje i ugradnje konstrukcijskih dijelova od nabijenog i armiranog betona. Zgrade iz ovog razdoblja nisu izvedene tako da se mogu oduprijeti većim horizontalnim pomacima tla (npr. od potresa), niti su postojeći tehnički propisi uzimali u obzir potresno opterećenje iako je još 1911. Andrija Mohorovičić u svojoj raspravi o djelovanju potresa na zgrade, predložio projektiranje, proračun i gradnju konstrukcija otpornih na potrese.

U razdoblju 1920. – 1948. radi se na unifikaciji tehničkih propisa tadašnje države, normiraju se proračunska opterećenja, koeficijenti sigurnosti i način proračuna konstrukcijskih dijelova.

Generiranje građevinske regulative započinje objavljivanjem djela „Jugoslavenska tehnička terminologija“ 1920., zatim je 1931. donesen „Građevinski zakon Kraljevine Jugoslavije“, a 1936. usvojeni su Propisi za armirani beton i upotrebu čelika za armiranobetonske konstrukcije.

Od 1948. pri projektiranju i gradnji primjenjuju se Privremeni tehnički propisi za proračun dozvoljenih opterećenja zgrada, koji kroz pojednostavljenu metodologiju uzimaju u obzir potresno opterećenje.

Značajno bogatstvo saznanja o ponašanju zgrada i oštećenjima na njima od potresa stečeno je nakon najvećih potresa u regiji, posebice nakon razornog potresa u Skoplju 1963. Stečene spoznaje rezultirale su razvojem, ažuriranjem i usavršavanjem propisa i standarda vezanih za potresnu otpornost zgrada. Prvi potresni propis, tj. Pravilnik o privremenim tehničkim propisima za građenje u seizmičkim područjima donesen je 1964., a nakon potresa u Crnoj Gori 1981. dorađen i dopunjen.

U Republici Hrvatskoj se europske prednorme ENV postupno uvode između 1992. – 1998. kao preporučene norme za projektiranje konstrukcija. U tom razdoblju imaju status prednorme zbog potreba usklađivanja sa starim nacionalnim regulativama.

Od 1998. počinje se uvoditi konačna verzija europskih norma, EN, ali je implementacija započela 2005. uvođenjem tehničkih propisa za betonske i druge konstrukcije (NN 101/05). Te norme u službenoj su uporabi od 2011. iako se do kraja 2012. paralelno primjenjuju prednorme.

Suvremene norme za projektiranje i izgradnju potresno otpornih konstrukcija utječu na smanjenje potresne oštetljivosti ukupnog fonda zgrada, ali potresna otpornost novih zgrada neće smanjiti oštetljivost starih zgrada koje se ne mogu uspješno prilagoditi suvremenim normama gradnje, osobito ne u kontekstu stalnih adaptacija i obnova koje često zahtijevaju rušenje velikih dijelova zida.

Iako su potresne norme čvrsto povezane s procjenom štete i gubitaka, često nisu uključene niti sadržavaju preporuke za pojačanje starih zgrada koje čine veliku većinu građevinskog fonda Republike Hrvatske (i drugih zemalja), koje će zbog starosti i načina projektiranja/izvedbe imati najveći utjecaj na oštetljivost i očekivane gubitke u slučaju budućih potresa (Pavić i dr 2019b, Pavić i dr 2019a).

U tablici 4.3 prikazan je pregled stambenih jedinica prema godini izgradnje u Republici Hrvatskoj prema popisu stanovništva iz 2011 (DZS 2013). Iz tablice se vidi da starije stambene jedinice, izgrađene do 1981., čine čak 63,5 % stambenog fonda Republike Hrvatske. Za preciznije usporedbe, broj stambenih jedinica u tablici moguće je grubo pretvoriti u broj zgrade, međutim ovdje je pretvorba zanemarena jer vraćanjem u prošlost broj stambenih jedinica po zgradi se smanjuje što u konačnici znači jedna stambena jedinica je jedna zgrada (kuća) tako da bi ukupna postotna razlika između stambenih jedinica i zgrada za ova razdoblja bila zanemariva.

Tablica 4.3 Broj stambenih jedinica prema godini izgradnje (DZS 2013)

Razdoblje gradnje	Broj stambenih jedinica	Udio (%)
do 1919.	112 217	7,5
1919. – 1945.	84 963	5,7
1946. – 1960.	138 858	9,3
1961. – 1970.	288 563	19,3
1971. – 1980.	325 203	21,7
1981. – 1990.	247 084	16,5
1991. – 2000.	129 687	8,7
2001.– 2005.	70 463	4,7
od 2006.	73 072	4,9
nepoznato	24 640	1,6
nedovršeno	1 808	0,1
ukupno	1 496 558	100

Zgrade u kojima se nalaze promatrane stambene jedinice su stare zgrade građene bez uzimanja u obzir potresnog opterećenja ili je u najpovoljnijem slučaju proveden jednostavan potresni proračun. Razine potresne otpornosti ovih zgrada su minimalne do male.

Stambene jedinice iz razdoblja 1981. – 1990. čine značajnih 16,5 % od ukupnog broja što zbrojeno s prethodnim razdobljima iznosi 80 % stambenih jedinica Republike Hrvatske kojima je potresna otpornost minimalna do srednja.

Na problematiku potresne otpornosti starih zgrada, neriješene i neprilagođene građevinske regulative te nepostojanje zakona koji bi propisali obavezu njihovog održavanja i pojačanja još jednom su ukazali nedavni potresi, naročito onaj zagrebački (2020.) koji je oštetiio značajan broj zgrade u starim dijelovima grada.

4.2.3. Pregled nacionalnog fonda zgrada

Prema podacima iz prijedloga Dugoročne strategije za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada, iz ožujka 2019., Republika Hrvatska ima 887 321 zgradu koje su ukupne ploštine 192 519 039 m², od toga je 762.397 stambenih zgrada (višestambenih i obiteljskih kuća) ukupne ploštine 142 176 678 m² (Ministarstvo graditeljstva i prostornoga uređenja 2017).

Ukupna ploština nacionalnog fonda zgrada do 1940. procijenjena je na temelju podatka da je 16,4 % od ukupnog fonda zgrada izgrađeno prije 1940. i pretpostavci da je udio stambene izgradnje iznosio 65 % od ukupno izgrađenog fonda zgrada.

Za razdoblje od 1953. do 1970. ukupni broj i ploština nacionalnog fonda zgrada preuzeti su iz Statističkih ljetopisa Republike Hrvatske (DZS 2022), službene statističke evidencije Državnog zavoda za statistiku.

Pojmovi razreda zgrada usvojeni u pregledu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske definirani su sukladno pojmovima u Zakonu o gradnji (NN 153/13, 20/17) i Zakonu o prostornom uređenju (NN 153/13, 65/17 i 114/18):

- višestambena zgrada je zgrada koja je u cijelosti ili u više od 50 % bruto ploštine namijenjena stambenoj namjeni i ima tri ili više stambenih jedinica kojima upravlja upravitelj zgrade (pravna ili fizička osoba)
- obiteljska kuća je zgrada u kojoj je više od 50 % bruto tlocrtno ploštine namijenjeno stanovanju i ispunjava jedan od uvjeta: ima najviše tri stambene jedinice i/ili bruto građevinsku ploštinu manju ili jednaku 600 m²
- javne zgrade su zgrade namijenjene društvenoj djelatnosti i djelatnosti državnih jedinica/tijela i organizacija, zajednički stanovi, te zgrade za okupljanje i djelovanje udruga građana i vjerskih zajednica
- poslovne zgrade su one koje su u privatnom vlasništvu i u kojima je više od 50 % bruto ploštine namijenjeno za poslovne i/ili uslužne djelatnosti.

U tablici 4.4 prikazana je brojnost i pripadna ploština višestambenih zgrada i obiteljskih kuća razvrstanih prema razdobljima gradnje usvojenim u strategiji. U ukupnom broju stambenih zgrada, 290 689 je višestambenih zgrada čija je ukupna stambena ploština 55 438 063 m². Taj je udio dobiven proračunavanjem omjera broja stanova u zgradama s tri ili više stanova prema broju svih stanova u stambenim zgradama i množenjem dobivenog omjera s ukupnim brojem izgrađenih zgrada (Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske 2018).

Tablica 4.4 Stambene zgrade u Republici Hrvatskoj razvrstane prema godini izgradnje (Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske 2018)

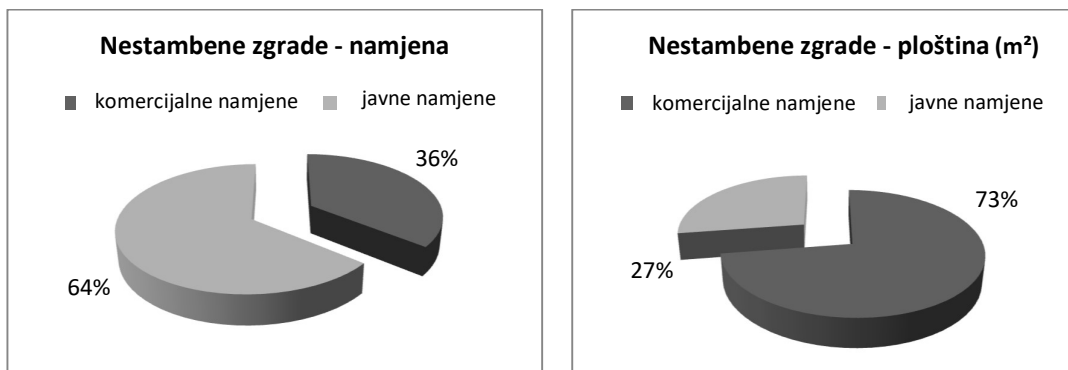
Razdoblje gradnje	Višestambene zgrade		Obiteljske kuće	
	Broj zgrada	Ploština (m ²)	Broj zgrada	Ploština (m ²)
do 1940.	37 201	5 830 983	64391	10 092 805
1941. – 1970.	85 595	13 473 337	151 507	23 747 572
1971. – 1980.	59 882	10 398 113	93 109	16 167 887
1981. – 1987.	44 434	9 401 527	68 348	14 461 473
1988. – 2005.	38 358	8 177 401	75 615	16 120 249
2006. – 2009.	18 256	6 199 252	13 762	4 673 079
2010. – 2011.	6 600	1 957 449	4 976	1 475 551
Ukupno	290 690	55 438 062	471 708	86 738 616

Broj obiteljskih kuća je 471 708 ukupne ploštine 86 738 615 m², pri čemu postoji realna mogućnost da kuće za odmor i slični sadržaji nisu uzeti u obzir (Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske 2018).

Na temelju podataka prikazanim u tablici 4.4 može se zaključiti da je najviše je višestambenih zgrada ali i obiteljskih kuća izgrađeno u razdoblju 1941. – 1970. (nakon 1945. tj. poslije drugog svjetskog rata). U razdobljima koja su zatim uslijedila broj izgrađenih kako stambenih zgrada tako i obiteljskih kuća se smanjuje da bi u razdoblju 2010. – 2011. brojnost novoizgrađenih zgrada bila najmanja.

Prema argumentiranim zapažanjima profesora Aničića (privatna komunikacija), postoji više informacija u strategiji (Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske 2018) koje su upitne i/ili nejasne. Npr. iz podataka prikazanih u tablici 4.4 prosječna bruto ploština višestambene zgrade iznosi 190,71 m² ($55\,438\,062 : 290\,690 = 190,71\text{ m}^2$), što znači da bi višestambena zgrada u prosjeku imala samo 153 m² neto prostora ($0,80 \times 190,71 = 153\text{ m}^2$) odnosno samo dva stana od 76,5 m². Nejasno je također odnosi li se pojam kompleks zgrada na višestambene zgrade, zgrada s više kućnih brojeva/ulaza ili se radi o samo jednoj zgradi odnosno samo jednom kućnom broju.

U ukupnom broju zgrada Republike Hrvatske, 124 924 zgrade su nestambene, njihova ploština iznosi 50 342 361 m² (Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske 2018). Nestambene zgrade se prema namjeni dijele se na poslovne i javne, a njihov postotni udio u ukupnom broju zgrada odnosno ploštini koju zauzimaju prikazani su na slici 4.9a) i b).



a) postotni udio prema namjeni

b) postotni udio ploštine nestambenih zgrada

Slika 4.9 Nestambene zgrade u Republici Hrvatskoj (prema Pavić i dr. 2020a)

U tablici 4.5 prikazana je brojnost i ploština nestambenih zgrada Republike Hrvatske do 2011., zgrade su razvrstane prema godini izgradnje. Prema podacima prikazanim u tablici 4.5 najviše je poslovnih ali i javnih zgrada izgrađeno u razdoblju 1941. – 1970. dok je zamjetna stagnacija izradnje osobito javnih zgrada u razdobljima izgradnje koja se odnose na 21. stoljeće.

Tablica 4.5 Nestambene zgrade u Republici Hrvatskoj razvrstane prema godini izgradnje (Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske 2018)

Razdoblje gradnje	Poslovne zgrade		Javne zgrade	
	Broj zgrada	Ploština (m ²)	Broj zgrada	Ploština (m ²)
do 1940.	2 338	1 498 159	12 365	1 545 813
1941. – 1970.	12 587	8 064 602	22 525	2 815 845
1971. – 1980.	6 733	5 251 934	19 021	1 882 000
1981. – 1987.	4 323	5 108 279	10 158	2 152 000
1988. – 2005.	10 596	8 107 287	11 059	2 722 497
2006. – 2009.	6 199	6 352 000	3 673	2 073 747
2010. – 2011.	1 952	2 158 198	1 395	610 000
Ukupno	44 728	36 540 459	80 196	13 801 902

Državni zavod za statistiku definira grad kao mjesto s više od 10 000 stanovnika koje predstavlja urbanu, povijesnu, prirodnu, gospodarsku i društvenu cjelinu. Sukladno definiciji, u urbanim područjima Republike Hrvatske ima 514 005 zgrada s ukupnom ploštinom od 107 855 294 m², dok je u ruralnim područjima 373 317 zgrada ukupne ploštine 84 663 745 m² (DZS 2011).

U ukupnom fondu zgrada, 426 071 stambenih zgrada ukupne ploštine 72 419 263 m² nalazi se u urbanim područjima, a 336 327 zgrada ukupne ploštine 69 757 414 m² u ruralnim područjima (Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske 2018) (Tablica 4.6).

Tablica 4.6 Pregled nacionalnog fonda stambenih zgrada u urbanim i ruralnim područjima gradnje (Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske 2018)

Područje	Višestambene zgrade		Obiteljske kuće	
	Broj zgrada	Ploština (m ²)	Broj zgrada	Ploština (m ²)
urbano	162 454	28 237 990	263 617	44 181 273
ruralno	128 236	27 200 072	208 091	42 557 342
Ukupno	290 690	55 438 062	471 708	86 738 615

Od nestambenih zgrada nacionalnog fonda, njih 87 934 ukupne ploštine 35 436 031 m² nalaze se u urbanim područjima, a 36 990 ukupne ploštine 14 906 331 m² u ruralnim područjima (Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske 2018) (Tablica 4.7).

Tablica 4.7 Pregled nacionalnog fonda nestambenih zgrada prema područjima urbano/ruralno (Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske 2018)

Područje	Poslovne zgrade		Zgrade javne namjene	
	Broj zgrada	Ploština (m ²)	Broj zgrada	Ploština (m ²)
urbano	31 484	25 720 860	56 450	9 715 171
ruralno	13 244	10 819 599	23 746	4 086 732
Ukupno	44 728	36 540 459	80 196	13 801 903

4.3. Grad Osijek – područje za modeliranje izloženosti

Osijek je tipično panonsko naselje, smješteno u ravnici uz rijeku, prostorno izduženo, visinski vrlo nisko. O postojanju tradicije gradnje stalnih građevina (zgrada) na području grada, čija je namjena stanovanje i/ili obavljanje neke djelatnosti, svjedoče ilirska i andizetska naselja, od kojih je najznačajnija keltska Mursa iz 2. st.pr. Kr., locirana na području današnjeg Donjeg Grada.

Početakom 18 st. gradi se vojna utvrda na desnoj obali Drave, današnja Tvrđa, a unutar nje naselje s kućama u baroknom stilu. Tvrđa postaje centralno naselje oko kojeg se razvija grad, u početku linearno, u pravcu istok-zapad.

Prema zapadu razvija se Gornji grad, vjersko, političko i gospodarsko središte izgrađeno vrhunskom arhitekturom secesije, najvećim dijelom krajem 19. i početkom 20. stoljeća. Gotovo u isto vrijeme na istoku nastaje Donji grad nekad ribarsko – obrtničko – trgovačko naselje koje je unatoč gradnji niza industrijskih zgrada (npr. Osječka tvornica kože 1873., Schicht/Saponia 1894., Kandit 1920. i dr.) i danas zadržao vizure malih prizemnica.

Kako je prostora za širenje bilo dovoljno, grad je tijekom vremena poprimio policentričnu strukturu. Oko prvotne 3 gradske cjeline u smjeru zapada i juga nastaju nove, Retfala prema zapadu te Industrijska četvrt, Jug II i Novi grad prema jugu.

Grad se počeo širiti i na lijevu obalu Drave, međutim izazovi vezani uz izgradnju komunalne i prometne infrastrukture usporili su te procese, pa se danas šire postojeće gradske cjeline, uglavnom prema jugu (npr. Retfala – jug).

Danas je područje grada Osijeka administrativno podijeljeno na 7 gradskih četvrti: Tvrđa, Gornji grad, Donji grad, Novi grad (uključujući naselje Sjenjak), Industrijska četvrt, Retfala i Jug II te 8 mjesnih odbora: Višnjevac, Josipovac, Cvjetno naselje, Brijest, Osijek lijeva obala, Tenja, Klisa i Sarvaš. Temelj podjele čine, urbanim razvojem nastale, u gornjem tekstu spomenute, gradske cjeline i četvrti koje su se razvile oko njih (Slika 4.10). Ova podjela usvojena je i kod izrade modela izloženosti kako bi se lakše pronašle zgrade te kasnije pojednostavila organizacija i pronalazak prikupljenih podataka.



Slika 4.10 Gradske četvrti i mjesni odbori grada Osijeka

4.3.1. Karakteristike gradnje i izloženih elemenata rizika

Različite potrebe kroz povijest oblikovale su gradnju zgrada u Osijeku, od iskonskih za skloništem i zaštitom do suvremenih za rekreacijom i zabavom. Grade se zgrade različitih veličina, oblika i funkcija koje se prilagođavaju velikom broju čimbenika od dostupnih građevinskih znanja, materijala i tehnologija, do specifične namjene i estetskih razloga.

Prve zgrade na području današnjeg grada građene su prirodnim tradicijskim materijalima (ilovača, slama, trska, drvo, kamen), njihovo oblikovanje, konstrukcija i organizacija prostora prilagođavani su tadašnjim znanjima, namjeni ali i okolišu.

Upotreba drva kao građevnog materijala dominirala je kod izgradnje obrambenih zidova i zgrada prvobitne Tvrdče. Međutim, potreba za trajnijim gradivnim materijalom, većim visinama i rasponima rezultira gradnjom potpuno nove utvrde, u drugom desetljeću 18. stoljeća, od kamena i opeke (Nujić 2014). Gradilo se na temelju iskustvenih tehnika i spoznaja tog vremena koje se u pogledu konstrukcijske otpornosti mogu sagledati kroz promišljanje i praksu: deblje zide – veća nosivost. Konstrukcijske ukrute građene su na uglovima i u sredini ziđa velikih duljina, a stropne konstrukcije bile su drvene (fleksibilne).

Tijekom 19. st. gradnja novih zgrada regulirana je „Građevinskim pravilnikom“ koji propisuje upotrebu tvrdog i suhog građevinskog kamena te propisno proizvedene i dimenzionirane (duljina 29 cm, širina 14 cm i visina 6,5 cm) opeke.

Propisuje se i izvedbu „dovoljno“ jakog nosivog (40 cm debljine) i pregradnog ziđa te za svaku zgradu izvedbu vlastitog nosivog ziđa na međi. U urbanim sredinama zabranjuje se (osim za podizanje privremenih šupa, žitnica i vrtnih paviljona) podizanje zgrada s drvenim kosturom i ispunom od opeke te zidova od drvenih greda.



a) starija zidana zgrada – nearmirano ziđe,
fleksibilan (drveni) strop



b) novija zidana zgrada – omeđeno ziđe,
kruti strop



c) starija armirnobetonska zgrada
(armirnobetonski okvir)



d) novija armirnobetonska zgrada
(armirnobetonski okvir)

Slika 4.11 Prevladavajući konstrukcijskih tipova zgrada postojećeg fonda zgrada grada Osijeka (Pavić i dr. 2020b)

Industrijalizacija grada početkom 20. stoljeća ubrzala je primjenu novih tehnika i materijala gradnje. Konstrukcije postaju tanje i lakše, ali im se povećava otpornost i nosivost. Npr. 1912. gradi se glavna tvornička zgrada OLT-a kao okvirna konstrukcija sa stupovima (pilonima) od armiranog betona i zidnom ispunom od opeke. Krov nosi čelična rešetka koja je omogućila pokrov od betona, pod je zemljani, a otvori (prozori, vrata) od fazonskog čelika (Martinčić i Hackenberger 2006).

Osim veličine grada i arhitekture zgrada, paralelno s razvojem tehnologije gradnje, građevinskih propisa i materijala gradnje, kroz povijest su se mijenjali i konstrukcijski sustavi zgrada. Nekoliko je prevladavajućih konstrukcijskih tipova zgrada, s kojima se može opisati postojeći fond zgrada u gradu Osijeku, a prikazani su na slikama 4.11a), b), c) i d)).

Obilje raspoloživog građevinskog zemljišta učinilo je u prošlosti rast građevina u visinu gotovo potpuno nepotrebnim pa su se gradile prizemne ili jednokatne zgrade. Međutim, zbog rasta gradske populacije te potrebe grupiranja na malim prostorima (blizina posla, škole, trgovina, zdravstvenih i drugih ustanova), grade se sve više zgrade, u početku do 4 kata, da bi se od sredine 20. st. gradile zgrade do 15 katova.

Danas sve učestalije gradsko vodstvo, arhitektonska zajednica, ali i građani razmišljaju o potrebi ograničenja visine zgrada na 4 – 5 katova, ne samo zbog devastacije vizure grada nego i zbog komunalne infrastrukture koja nije projektirana niti do danas prilagođena za novonastale potrebe. Prema *Izvešću o stanju u prostoru Grada Osijeka (2013. – 2017.)*, zajedno s okolnim naseljima grad zauzima ploštinu od 174,85 km², dok je ploština samog naselja Osijek 59,11 km².

Iako je planom namjene ploština predviđena izgrađenost ukupne gradske ploštine od 27,22 %, do izrade izvješća izgrađeno je 2 326,90 ha ili 13,39 % dozvoljene građevinske ploštine, što znači da u gradu postoji još više od 50 % ploština predviđenih za gradnju (Službeni glasnik Grada Osijeka 18/2018).

Nakon što je Republika Hrvatska postala članicom Europske unije, na cijelom prostoru države bilježi se kontinuirani pad broja stanovnika. Prema prvim rezultatima najnovijeg popisa (iz 2021.), u gradu Osijeku je manje 10,36 % (ili 11 200) (Državni zavod za statistiku 2022) stanovnika u odnosu na popis iz 2011.

Unatoč padu broja stanovništva, porastao je broj stambenih jedinica s 51 123 na 51 556 (Tablica 4.8).

Tablica 4.8 Broj stanovnika i stambenih jedinica prema popisima stanovništva iz 2011. i 2021. (DZS 2013)

	Broj stanovnika		Broj stambenih jedinica	
	2011.	2021.		
Osječko-baranjska županija	305 032	259 481	138 252	139 936
Osijek	108 048	96 848	51 556	51 556

Iako se u tablici razmatra povećan broj stambenih jedinica (u odnosu na pad broja stanovnika), a ne broj zgrada, opravdano je zaključiti da je paralelno s brojem stambenih jedinica porastao i broj zgrada, što je uočljivo i po brojnim gradilištima koja se mogu vidjeti po gradskim ulicama, osobito posljednjih nekoliko godina.

4.4. Unaprjeđena metodologija modeliranja izloženosti

Modeliranje izloženosti nekog područja složen je i opsežan posao. Pravilno postavljanje ciljeva i dobro planiranje njihovog ostvarenja može unaprijediti strategiju modeliranja izloženosti.

Planiranje mogućih unaprjeđenja u prvom redu temelji se na proučavanju postojećih metodologija i iskustava na provedbi, a zatim i na promišljanju kako ih unaprijediti i poboljšati.



Slika 4.12. Shema za unaprjeđenja metodologije modeliranja izloženosti

Uočena je potreba da se modeli izloženosti trebaju prilagoditi građevinskim prilikama područja za koje se izrađuju, a određivanje prioriternih podataka o zgradama i prikladno organiziranje načina i

postupaka njihovog prikupljanja prepoznato je kao presudno za valjanost i učinkovitost metodologije te njezino unaprjeđenje. Temeljna organizacijska shema za unaprjeđenje metodologije modeliranja izloženosti prikazana je na slici 4.12.

U ovom doktorskom radu za bolje kvantitativno i kvalitativno modeliranje izloženosti predlaže se unaprijeđena metodologija modeliranja izloženosti kojoj su primarni ciljevi:

- a) prikupljanje podataka na licu mjesta
- b) višerazinsko prikupljanje podataka ovisno o procjeni gubitaka koja se želi primijeniti
- c) odabir i prikupljanje samo podataka o zgradama relevantnih za procjene rizika
- d) vrednovanje važnosti prikupljenih podataka/karakteristika zgrada i mogućnost odabira samo potrebnih s obzirom na željenu razinu procjene oštećljivosti
- e) utvrđivanje korelacija između prikupljenih podataka/karakteristika zgrada kako bi se generirale konstrukcijske tipologije i pripadna taksonomija
- f) upotrebu QGIS-a za jednostavniju i bržu upotrebu i prezentaciju podataka iz modela izloženosti.

Ova metodologija primijenjena je kod izrade modela izloženosti grada Osijeka

4.5. Razvoj modela izloženosti grada Osijeka

Cilj ovog istraživanja je razvoj modela izloženosti grada Osijeka koji će osigurati pouzdane i korisne informacije o karakteristikama koji opisuju konstrukcijske i druge karakteristike zgrada, a koji će zadovoljiti potrebe za točnim i kvalitetnim procjenama rizika od potresa i drugih rizika ne samo za grad Osijek, kao centralno područje i najveće izgrađeno naselje na promatranom području nego i za druga naselja sa istim ili sličnim procjenama potresne opasnosti i elementima rizika.

U ovom istraživanju polazi se od dokaza da potresni rizik nekog područja nije moguće pouzdano procijeniti ako precizno nije procijenjen rizik svakog elementa rizika, osobito nije moguće pouzdano procijeniti oštećljivost fonda zgrada ako precizno nije procijenjena oštećljivost svake zgrade.

Nadalje, predviđanje oštećljivosti svake zgrade ne može biti pouzdano ako su podatci o njezinim karakteristikama definirani na temelju statističkih podataka, generiranih za drugu namjenu ili zračnih

snimki koje daju, najčešće zbirne podatke o konturama snimljenih objekata koji nužno ne moraju biti zgrade (vidi sliku 2.7).

Stoga je namjera kod izrade ovog modela izloženosti prikupiti što više stvarnih podataka na razini zgrade i to samo o određenim, vrijednim karakteristikama koje su najvjerojatnije (ili dostatno vjerojatno) povezane s tipologijama zgrada promatranog područja i koje će omogućiti proračun rizika za svaku istraženu zgradu, u skladu s jednom ili više relevantnih tipologija.

4.5.1. Karakteristike zgrada za model izloženosti

Temelj svakog istraživanja čiji je krajnji cilj procijeniti oštetljivost postojećeg fonda zgrada odabir je karakteristika zgrada relevantnih za procjenu.

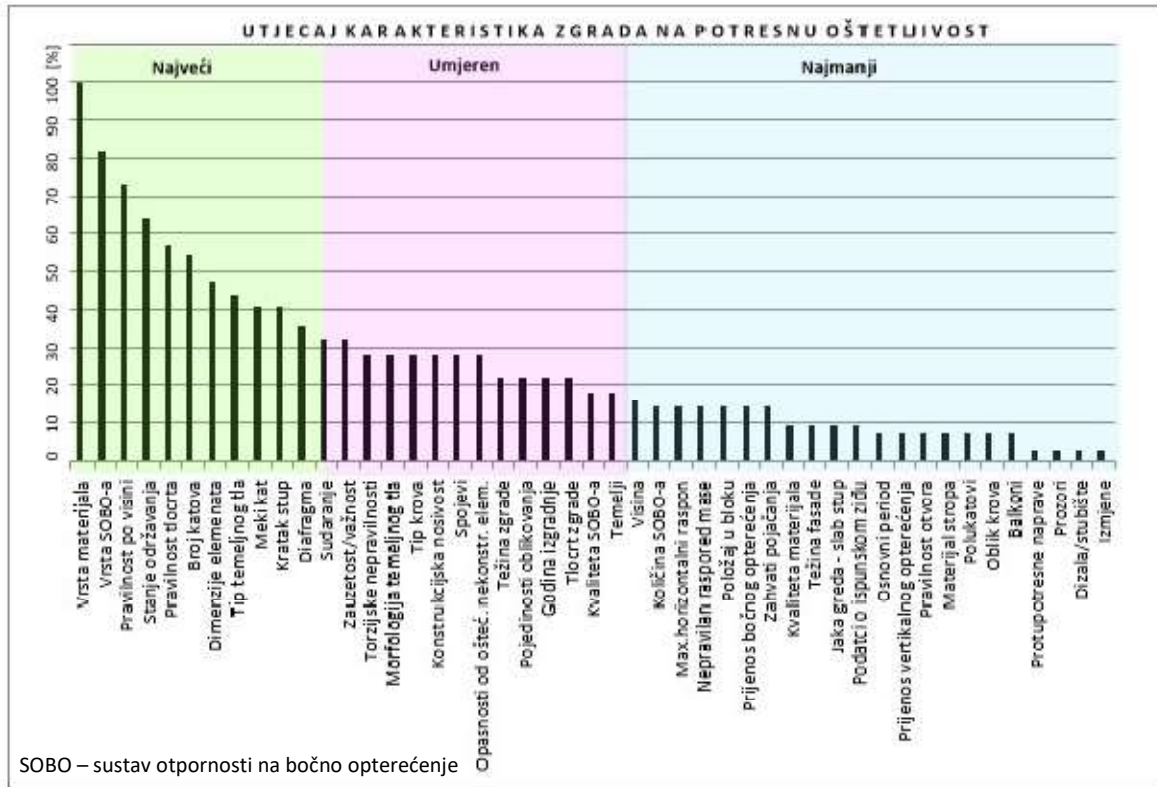
Oštećenja na zgradama nakon potresa te provedena istraživanja njihovog potresnog ponašanja pokazuju da neke karakteristike zgrade (materijal izvedbe, bočna otpornost, visinska pravilnost i dr.) imaju veći utjecaj na potresnu otpornost kao i da neke konstrukcije (npr. drvene) uspješnije odgovaraju na potresnu uzbuđu od drugih.

Zgrade s armiranobetonskim nosivim zidovima, zgrade s metalnim okvirima i drvene zgrade npr. pokazuju veliko rasipanje potresne energije za razliku od nearmiranog ziđa i armiranobetonskih okvira s ispunskim zidom. Od karakteristika zgrada za potresnu otpornost vrlo je značajan utjecaj bočne otpornosti konstrukcija i prevladavajući materijal od kojeg je konstrukcija izvedena (opeka, armirani beton, metal, drvo).

Proučavanje literature vezane uz odabir najznačajnijih karakteristika zgrada kada je u pitanju potresna otpornost (Stone 2017) rezultiralo je sa zabilježenih gotovo 50-tak karakteristika zgrada koje se upotrebljavaju u različitim modelima izloženosti za opisivanje potresnog ponašanja zgrada.

S obzirom na veličinu utjecaja pojedine karakteristike na potresnu oštetljivost, provedena je trodijelna razredba prikazana na slici 4.13. Na temelju ove razredbe može se zaključiti i koji bi podatci o zgradama trebali biti prioritetni u fazi prikupljanja podataka.

U zelenom području (Slika 4.13) opisani su najkorisniji parametri, tj. oni koji najviše utječu na dobar odziv zgrada na potresnu uzbuđu. Primarni konstrukcijski materijal i sustav otpornosti na bočno opterećenje (SOBO) ističu se kao dva ključna ulazna podatka za procjene potresne oštećljivosti.



Slika 4.13 Razredba karakteristika zgrada prema veličini utjecaja na ukupnu potresnu oštećljivost (prema Stone 2017)

Karakteristike zgrada koje sa znatnih 45 – 75 % određuju potresnu otpornost su: nepravilnosti po visini i u tlocrtu, stanje održavanja zgrade, broj katova, dimenzije nosivih elemenata zgrade i izvedba mekog kata. Iako se tip tla može smatrati obilježjem potresne opasnosti, brojne studije oštećljivosti modificiraju procjene prema lokalnom tlu, za koje se smatra da doprinosi više od 40 % potresnoj otpornosti zgrada. Na temelju poznavanja ovih parametara, iskusni procjenitelj može provesti brze procjene moguće štete od potresa.

U području označenom kao umjerenom (Slika 4.13, ružičasto područje), nalaze se geometrijske, konstrukcijske i druge karakteristike korisne za određivanje preciznijeg ponašanja zgrade, prepoznavanje drugih svojstava ili za završne analize i procjene. Njihovo poznavanje i uključivanje u

analizu produbljuje, poboljšava i specificira rezultate proračuna oštetljivosti osobito brzih procjena oštetljivosti.

U treću skupinu (Slika 4.13, plavo područje) svrstavaju se parametri manjeg značaja za potresni odziv zgrada, ali poznavanje tih parametara i uvrštavanje u proračun može osigurati rezultate za ciljane ili specifične procjene potresne oštetljivosti.

Istraživački projekt GEM za razvoj svoje taksonomije također proučava karakteristike zgrada i njihov utjecaj na oštetljivost te predlaže usvajanje 13 karakteristika koji sami ili u međusobnoj sinergiji, mogu značajno odrediti potresno ponašanje zgrada (Brzev 2013):

- 1) smjer: orijentacija zgrada s obzirom na bočnu otpornost u dva glavna horizontalna smjera tlocrta okomito jedan na drugi
- 2) materijal sustava otpornog na bočno opterećenje (opeka, metal, drvo, armirani beton)
- 3) konstrukcijski sustav otporan na bočno opterećenje: pruža otpornost na horizontalne potresne sile kroz vertikalne i horizontalne konstrukcijske komponente (zid, okvir itd.)
- 4) visina zgrade iznad razine tla: broj etaža i podatci o postojanju podruma i/ili nagiba terena
- 5) datum izgradnje i/ili rekonstrukcije: godina završetka izgradnje/nadogradnje
- 6) namjena: vrsta djelatnosti (funkcija) unutar zgrade (stambena, poslovna itd.)
- 7) položaj zgrade u bloku: položaj zgrade unutar bloka zgrada (samostojeća, u nizu, na uglu)
- 8) izgled tlocrta zgrade (pravokutnik, L, U oblik, itd.)
- 9) konstrukcijske nepravilnosti (jedna etaža znatno viša od ostalih, nepravilan oblik zgrade ili izmjena konstrukcijskog sustava ili materijala); zgrada može imati više od jedne nepravilnosti; mogu se identificirati/prepoznati primarne i sekundarne nepravilnosti
- 10) vanjski zidovi: materijal vanjskih zidova (opeka, staklo, itd.)
- 11) krov: oblik krova, materijal krovnog pokrova, krovna konstrukcija i zabatni zid
- 12) strop: stropni materijal, vrsta stropnog sustava i spoja strop-zid
- 13) konstrukcija temelja: dio konstrukcije, baza zgrade se spaja s tlom i sl.

Mnogi znanstvenici uključeni u razvoj modela izloženosti u svijetu, slažu se da GEM preporuka kao i tipologija razvijena na temelju nje, imaju dobro definirane i opisane atribute, ali da ih je nemoguće sve prikupiti u praksi. Tijekom kreiranja modela izloženosti za grad Osijek u ovom istraživanju došlo se do istog zaključka. Osim toga, uočena je potreba za usklađivanjem razine procjene oštećljivosti s vrstom i brojnošću odabranih atributa ne samo zbog nedostupnosti nekih podataka nego i kako bi se izbjegla mogućnost da prikupljeni podatci nisu uvijek cjeloviti ili dovoljno pouzdani.

Bitno je nadalje odabrati ne preopširan nego dovoljan broj atributa kojima se zgrade mogu dostatno pouzdano opisati te da je s tim karakteristikama moguće obuhvatiti građevinske specifičnosti područja za koje se izrađuje model izloženosti.

4.5.2. Usvojene karakteristike zgrada za model izloženosti grada Osijeka

Uvažavajući iskustva iz proučene literature, preporuke GEM projekta, uzevši u obzir uočene nedostatke i moguća poboljšanja, prilagodivši potrebe za podacima s pretpostavljenom razinom za proračun oštećljivosti grada Osijeka, za model izloženosti usvojene su karakteristike koje će najbolje opisati postojeći fond zgrada (Pavić i dr. 2019):

- opći podatci: podatci o lokaciji zgrade (adresa, broj katastarske čestice), namjena zgrade (stambena, poslovna, javna, industrijska), broj osoba koje žive/rade/borave u zgradi
- godina izgradnje i/ili rekonstrukcije (ako su rađene)
- pozicija zgrade u bloku i/ili ulici: samostojeća, u nizu, na kraju niza, na uglu
- podatci o obliku: oblik tlocrta (pravokutnik, L, U, H, E)
- tlocrtna pravilnost i pravilnost po visini
- ploštine i visine etaža
- podatci o glavnom konstrukcijskom sustavu zgrade (neomeđeno/omeđeno zide, armiranobetonske konstrukcije, metalne konstrukcije, drvene konstrukcije)
- podatci o upotrijebljenim građevinskim materijalima (beton, opeka, metal, drvo)
- podatci o stropnoj konstrukciji (kruta, fleksibilna), krovu (kosi – dvostrešni/jednostrešni, ravni) i pokrovu (biber, različite vrste glinenih ili betonskih crijepova).

Na slici 4.14 prikazan je dio prvotnog radnog lista iz program za tablično računanje Microsoft Excel.

Usvojeni stupci (karakteristike zgrada) tijekom rada su se mijenjali – dodavali s obzirom na uočene potrebe analiza i/ili proračuna kao i načini popunjavanja. Stupac broj katova npr. zbog statističke analize morao se pretvoriti u brojčane vrijednosti, ali je zadržan i prvotni oblik kako bi se zadržali podatci o postojanju podruma u zgradama.

Prikupljanje podataka o postojanju podruma u zgradama npr. pokazalo se kao izazov osobito kod obiteljskih kuća jer se uglavnom nije moglo utvrditi njegovo postojanje bez ulaska u kuću što nije bilo moguće u većini slučajeva tako da ovaj podatak nije pridružen velikom broju zgrada u modelu izloženosti i zbog toga za sada nije uzet u obzir kod procjene oštetljivosti.

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Ulica	Kućni broj	Namjena	Razdoblje izgradnje	Polozaj u bloku	Širina	Duljina	Površina kata	Bruto površina	Pravilnost u tlocrtu	Broj katova	Katna visina	Ukupna visina *bez krovšta	Materijal zidova	Strop
Adama Reisnera	1	Stambena	od 1920. do 1948.	Na uglu	15.96	11.06	123.54	247.08	DA	2	2.6	5.2	Opeka	Fleksibilan strop
Adama Reisnera	3	Stambena	od 1920. do 1948.	U nizu	8.09	13.83	111.06	111.06	DA	1	2.6	2.6	Opeka	Fleksibilan strop
Adama Reisnera	5	Stambena	od 1920. do 1948.	U nizu	6.26	16.27	99.61	99.61	DA	1	2.6	2.6	Opeka	Fleksibilan strop
Adama Reisnera	7	Stambena	od 1920. do 1948.	U nizu	21.32	14.65	169.85	169.85	DA	1	2.6	2.6	Opeka	Fleksibilan strop
Adama Reisnera	9	Stambena	od 1920. do 1948.	U nizu	16.56	12.01	120.78	120.78	NE	1	2.6	2.6	Opeka	Fleksibilan strop
Adama Reisnera	11	Stambena	od 1920. do 1948.	U nizu	9.94	11.92	113.28	113.28	DA	1	2.6	2.6	Opeka	Fleksibilan strop
Adama Reisnera	13	Stambena	od 1920. do 1948.	U nizu	9.3	12.1	113.24	113.24	NE	1	2.6	2.6	Opeka	Fleksibilan strop
Adama Reisnera	14	Stambena	od 1920. do 1948.	U nizu	20.7	11.5	200.00	200.00	DA	1	2.85	2.85	Opeka	Fleksibilan strop
Adama Reisnera	15	Stambena	od 1920. do 1948.	U nizu	14.09	10.77	167.58	167.58	NE	1	2.6	2.6	Opeka	Kruti strop
Adama Reisnera	17	Stambena	od 1920. do 1948.	U nizu	10.27	18.19	219.74	439.48	DA	2	2.6	5.2	Opeka	Fleksibilan strop
Adama Reisnera	19	Stambena	od 1920. do 1948.	U nizu	11.57	10.83	141.55	141.55	DA	1	2.6	2.6	Opeka	Fleksibilan strop
Adama Reisnera	21	Stambena	od 1920. do 1948.	U nizu	11.15	11.81	132.00	132.00	DA	1	2.6	2.6	Opeka	Fleksibilan strop
Adama Reisnera	23	Stambena	od 1920. do 1948.	U nizu	10.73	12.97	148.37	148.37	DA	1	2.6	2.6	Opeka	Fleksibilan strop
Adama Reisnera	25	Stambena	od 1920. do 1948.	U nizu	9.18	12.2	127.50	255.00	DA	2	2.6	5.2	Opeka	Fleksibilan strop
Adama Reisnera	27	Stambena	od 1920. do 1948.	U nizu	8.27	16.93	149.48	149.48	DA	1	2.6	2.6	Opeka	Fleksibilan strop
Adama Reisnera	29	Stambena	od 1920. do 1948.	U nizu	17.54	11.98	162.92	325.84	NE	2	2.6	5.2	Opeka	Fleksibilan strop
Adama Reisnera	31	Stambena	od 1920. do 1948.	Na uglu	9.02	12.76	133.12	266.24	DA	2	2.6	5.2	Opeka	Fleksibilan strop
Adama Reisnera	33	Stambena	od 1920. do 1948.	U nizu	8.91	12.22	108.88	217.76	DA	2	2.6	5.2	Opeka	Fleksibilan strop

Slika 4.14 Dio radnog lista iz Excela s karakteristikama zgrada koje se prikupljaju za bazu podataka postojećeg fonda zgrada grada Osijeka

Iako su opći podatci sekundarni za procjene oštetljivosti zgrada, odabrani su za model izloženosti grada Osijeka prije svega kako bi se zgrade prostorno odredile i adresom imenovale.

Osim toga, prostorna određenost kao i namjena te broj korisnika važni su s gledišta potresnog rizika, jer pružaju osnovne informacije za predviđanja gubitaka (broja smrtnih slučajeva ili ozljeda). Ovi podatci nužni su i sustavima koji upravljaju kriznim situacijama za provedbu organizacijskih i drugih aktivnosti prije i nakon potresa i drugih štetnih događaja.

Podatci o godini izgradnje i/ili rekonstrukcije predstavljaju izvor relevantnih informacija za određivanje drugih atributa ili se mogu upotrijebiti za konačne procjene i evaluacije u nedostatku drugih podataka.

Na temelju godine izgradnje može se zaključiti o nosivom konstrukcijskom sustavu, primjeni građevinskih propisa ili upotrijebljenim materijalima za gradnju.

Položaj zgrada u bloku odabran je za modeliranje izloženosti kao atribut važan za oštetljivost. Zgrade u gusto naseljenim urbanim središtima su npr. u opasnosti od udara jedna u drugu tijekom potresnog djelovanja jer potresne dilatacije (kao zračni prostor) između zgrada gotovo da ne postoje ili su nedovoljno velike, pa se teorijski zamišljeno ponašanje zgrada (koje imaju različite periode osciliranja) u potresu ne može realizirati. Osim toga i trenje na površinama spoja dviju zgrada onemogućuje pomake okomite na smjer niza što takođe doprinosi sudaranju zgrada koje se nalaze jedna do druge u istom nizu.

Zgrade koje se nalaze na kraju niza uvijek su podložnije oštećenju od onih u sredini, a osobito su oštetljive zgrade na uglovima na koje se prenose sile iz dva međusobno okomita smjera pri čemu dolazi do povećanja inercijske sile zgrade na uglu.

Neke od najkritičnijih karakteristika zgrada u pogledu potresne otpornosti i očekivanog ponašanja tijekom potresa su prisutnost konstrukcijskih nepravilnosti (tlocrtnih i visinskih) jer impuls potresa uzrokuje složeno ponašanje nepravilnih konstrukcija, osobito u neelastičnom području (González i Gómez 2008).

U konstrukcijama se često nepravilnosti kombiniraju, a zanemarivanje samo jedne od njih može rezultirati značajno netočnim predviđanjem potresnog odziva.

Nepravilnosti tlocrta te asimetrija raspodjele mase, čvrstoće i krutosti, neki su od najčešćih izvora oštećenja u zgradama u potresu jer uzrokuju translaciju i rotaciju stropova. Istraživanja potresnog odziva vertikalno nepravilnih konstrukcija pokazuju da diskontinuiteti mase, čvrstoće ili krutosti po visini ne rezultiraju nužno povećanjem zahtjeva za otpornosti i općenito lošijim potresnim ponašanjem (Behnam i Shojaei 2018, Lavan i De Stefano 2013, De Stefano i Pintucchi 2008).

Geometrijske karakteristike zgrada, osnovne su karakteristike ne samo za proračun oštetljivosti nego i za procjene potresnog i drugih rizika. Općenito visoke i vitke konstrukcije manje su otporne na bočne sile od nižih i masivnijih. Iako su visoke zgrade fleksibilnije i imaju dulje periode oscilacija, to ne znači da će pretrpjeti manje štete od nižih zgrada. Visina zgrade jedna je od karakteristika koja određuje

dinamička svojstva zgrada (osnovni period vibracije) koja u sinergiji s karakteristikama tla i potresnih valova može nepredvidivo utjecati na potresno ponašanje zgrade.

U normalnim uporabnim uvjetima, zidovi, stupovi i grede zgrade primarno su samo vertikalno tlačno opterećeni uz određene momente savijanja, međutim tijekom potresa dolazi do bočnog i posmičnog opterećenja, što rezultira vlačnim i torzijskim silama na nosivim elementima. Te sile rezultiraju velikim naprezanjima na uglovima zgrade i kroz različite spojeve.

Konstrukcije otporne na potrese obično uključuju sposobnost zgrade da se savija, ljulja i deformira bez rušenja (duktilnost) njezinih nosivih elemenata. Podatci o konstrukcijskom sustavu zgrade omogućavaju brza predviđanja vrste, veličine i slijeda oštećenja od potresa u različitim konstrukcijskim elementima.

Za predviđanje je važna i orijentacija nosivih zidova, međutim ovaj podatak nije uvršten u model izloženosti jer se vizualnim pregledom izvana (koji je primaran način prikupljanja podataka o zgradama u ovom istraživanju) ne može utvrditi bez raspoloživih projektnih planova i dokumentacije.

Geometrijske karakteristike zgrada (tlocrtne i visinske dimenzije, ploštine i dr.) ali i geometrijske karakteristike zidova, osnovni su podatci ne samo za proračun oštetljivosti nego i za procjenu ukupnog potresnog rizika.

Do druge polovice 20. stoljeća smatralo se da su zgrade s masivnim zidovima otpornije na potresnu uzbuđu, međutim prouzročene štete na njima i brojna provedena istraživanja dokazale su da masivni i teški zidovi nepovoljno djeluju na ukupan odziv zgrade na potresnu uzbuđu. Naime, kako se zemlja pomiče, ukupna težina zgrade udara o konstrukcijske dijelove s jedne i druge strane, a što je zgrada teža to veće sile djeluje na konstrukcijske elemente i veća je vjerojatnost oštećenja i/ili rušenja.

Na raspodjelu sila potresa u zgradi značajno utječe vrsta krova i stropa odnosno tip dijafragme koji može biti krut ili fleksibilan u vlastitoj ravnini. Zato su podatci o krovnoj/stropnoj konstrukciji i pokrovu odabrani za model.

Zgrade s krutim dijafragmama imaju veću potresnu otpornost i bolje ponašanje od zgrada s fleksibilnim dijafragmama, međutim takve zgrade obično imaju težu krovnu konstrukciju koja često uzrokuje bez obzira na vrstu nosivog horizontalnog sustava i materijala zidova lošije ponašanje krovne ali i cijele konstrukcije u potresu.

Nemoguće je opisati svaku zgradu sa svim njezinim konstrukcijskim i nekonstrukcijskim karakteristikama, ne samo zbog broja i raznolikosti zgrada već i zbog različitih nesigurnosti vezanih uz postojanje i točnost podataka o tim karakteristikama. Kod odabira karakteristika za modele izloženosti često se rade kompromisi kako bi se dobile tipologije primjenjive na najširoj (globalnoj) razini.


Za regionalne razine, određeni broj istraživača usvaja i predlaže postupke istraživanja i modele izloženosti koji su jednostavniji i koji isključuju nepotpune i/ili nepouzdanе podatke, podatke koje je teško pronaći ili podatke koji predstavljaju samo grube varijacije lokalnih građevinskih karakteristika (Uva i dr. 2017).

Iako se detaljnijim odabirom karakteristika za opis zgrada u prvom redu nastoji obuhvatiti što više zgrada s određenom tipologijom, krajnji cilj svakog modela izloženosti je osigurati što točnije procjene očekivane potresne oštetljivosti zgrada.

4.5.3. Metodologija prikupljanja podataka

Metodologija prikupljanja podataka o zgradama za model izloženosti grada Osijeka temelji se na prikupljanju podataka o zgradama na licu mjesta (*in situ*). Evidencija iz katastra nekretnina Osijek o zemljišnim česticama i zgradama na njima polazni su podatci koji se upotrebljavaju za prikupljanje podataka na licu mjesta. Svaka zgrada na katastarskoj čestici opisuje se kao zasebna ako između dvije zgrade postoji najmanje dilatacijski razmak. Broj ulaza ne određuje broj zgrada, odnosno jedna zgrada može imati jedan ili više ulaza ako čini jednu konstrukcijsku cjelinu tj. ako nema dilatacije (Pavić i dr. 2019).

Na licu mjesta nastoji se prikupiti sve ili što veći broj karakteristika usvojenih za prikupljanje. Pojedine karakteristike konstrukcija i materijala koje nije moguće prikupiti na licu mjesta generirane su iz projektne dokumentacije (izvori: privatni, tijela državne uprave, Državni arhiv u Osijeku), a ako ona nije bila dostupna, provedene su procjene s obzirom na ono što je poznato o lokalnim načinima gradnje (vrste nosivih konstrukcija), najčešće upotrebljavanim materijalima i njihovim svojstvima, postojećim normama i sl. Vrijedni, a najčešće službeno nepostojeći podatci, osobito o rekonstrukcijama, obnovi ili dogradnji zgrada, prikupljeni su od vlasnika kuća i predstavnika stanara u stambenim zgradama.

OPĆI PODACI:			KONSTRUKCIJSKI SUSTAV:		
Namjena zgrade:	STAMBENA		AB okvirna konstrukcija	<input type="checkbox"/>	Kameni zid - dobra gradnja
Godina izgradnje:	1966.	AB okvir s jezgrom	<input type="checkbox"/>	AB zidovi	<input type="checkbox"/>
Da li je bilo rekonstrukcije:	Da <input type="checkbox"/> Ne <input checked="" type="checkbox"/>	AB okvir sa zidovima	<input type="checkbox"/>	Panelni AB sustavi	<input type="checkbox"/>
Rekonstruirano je:	ne	Čelični okviri	<input type="checkbox"/>	Mješoviti tip konstrukcije	<input type="checkbox"/>
Godina rekonstrukcije:	-	Armirano zide	<input type="checkbox"/>	Stara drvena konstrukcija	<input type="checkbox"/>
Broj osoba s prebivalištem na predmetnom kućanstvu:	87	Kameni subozid	<input type="checkbox"/>	Moderna drvena konstrukcija	<input type="checkbox"/>
LOKACIJA ZGRADE:		Kameni zid - loša gradnja	<input type="checkbox"/>	Zidana konstrukcija od betonskih elemenata	<input type="checkbox"/>
Adresa i broj:	NASELJE LJUBE BABIĆA 1/2/3/4	Zidana konstrukcija - drveni strop	<input type="checkbox"/>	Zidana konstrukcija s horizontalnim serklažima	<input type="checkbox"/>
Broj katastarske čestice:	3663/2	Zidana konstrukcija s horizontalnim i vertikalnim serklažima	<input checked="" type="checkbox"/>	Ostalo	<input type="checkbox"/>
Orijentacija:	S-J	MATERIJAL:			
Podizanje zgrade u odnosu na blok: Samostojeća <input checked="" type="checkbox"/> Dvojna <input type="checkbox"/> U nizu <input type="checkbox"/>		Podovi:	Lamel, parket/teraco/vinaz	Stropne ploče:	AB ploče
GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE:		Zidovi:	Opeka	Temeљи:	AB
Tlocrtna dimenzije:	60,73x11,08 [m]	DEBLJINE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA:			
Duljina: kraće stranice-orijet	11,08 [m] orijet I-Z	Podovi:	4 [cm]	Stropne ploče:	12 [cm]
Duljina: duže stranice-orijet	60,73 [m] orijet S-J	Zidovi: Unutarnji	25 i 7 [cm]	Temeљи:	201 [cm]
Omjer duže i kraće stranice	5	Vanjski	25 i 38 [cm]	VANJSKI I UNUTARNJI OTVORI:	
Bruto površina nosivih zidova u dužem smjeru / bruto površina tlocrta		Ukupani broj: Vanjskih otvora	173	Površina: Vanjskih otvora	648,59 [m ²]
Bruto površina nosivih zidova u kraćem smjeru / bruto površina tlocrta		Unutarnjih otvora	312	Unutarnjih otvora	[m ²]
Bruto površina pregradnih zidova u dužem smjeru / bruto površina tlocrta		Površina vanjskih otvora u prizemlju / površina vanjskih zidova			0,045
Bruto površina pregradnih zidova u kraćem smjeru / bruto površina tlocrta		Površina vanjskih otvora prvog kata / površina vanjskih zidova			0,049
Oblik tlocrta: a) Pravilan <input type="checkbox"/> Kvadrati <input type="checkbox"/> Pravokutni <input checked="" type="checkbox"/>		Površina unutarnjih otvora u prizemlju / površina unutarnjih zidova			
b) Nepravilan <input type="checkbox"/>		Površina unutarnjih otvora prvog kata / površina unutarnjih zidova			
Visina: Ukupna	15,0 [m]	Omjer površine unutarnjih i vanjskih otvora			
Međukatna	2,7 [m]				
Broj katova:	4				

Slika 4.15 Obrazac za prikupljanje podataka na licu mjesta (Galista i Hadzima-Nyarko 2015)

Prvotno su za prikupljanje podataka na licu mjesta u „Wordu“ izrađeni obrasci prikazani na slici 4.15 koji su printani i u papirnatom obliku upotrebljavani za evidentiranje karakteristika zgrada tijekom pregleda. Kod izrade ovih obrazaca vodilo se računa da se unos podataka u obrazac na licu mjesta, koliko je god to moguće pojednostavi, olakša i ubrza (Pavić i dr. 2019). Tekstualno su u obrascu navedeni svi podatci koji se prikupljaju te su vidljivo raspoređeni u 7 razreda logično povezanih karakteristika (opći podatci, lokacija zgrade, geometrijske karakteristike, konstrukcijski sustav, materijal, debljine konstrukcijskih elemenata i vanjski i unutarnji otvori). Dijelovi obrazca osmišljeni su i izrađeni tako da popisivač neke podatke može unijeti samo pomoću oznake X u kućici ispred ponuđenih mogućih karakteristika zgrade.

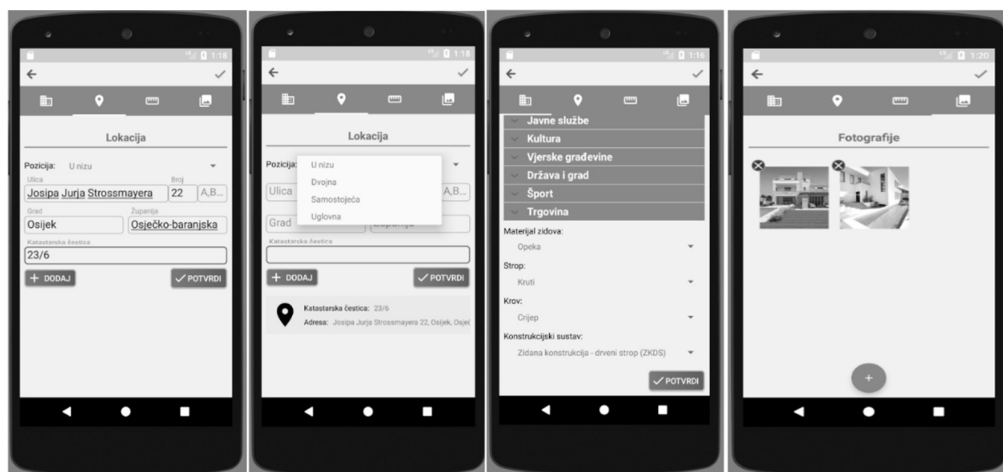
Nakon završenih terenskih istraživanja ispunjeni obrasci računalno se ažuriraju u Excel tablicama, ponajprije kako bi se svakoj zgradi mogle pridružiti snimljene fotografije zgrade i/ili korisnih detalja o njoj, a zatim i zato da se objedine i ažuriraju svi prikupljeni podatci o zgradi (vidi sliku 4.14 u poglavlju 4.4.2.).

Obrađeni i sistematizirani podatci u Excel tablicama formiraju osnovnu bazu podataka koja se može kako se prikupljaju novi podatci stalno ažurirati, mijenjati ili dopunjavati novim karakteristikama za koje je empirijski uočeno da bi bile korisne za predviđanje potresnog ponašanja zgrade (Pavić i dr. 2019).

Iz ovako organiziranog modela izloženosti moguće je izdvojiti niz kumulativnih i statističkih podataka o zgradama i drugim elementima potresnog rizika evidentiranim u njoj.

Kako bi se olakšao proces prikupljanja podataka, ali i omogućio njihov automatski prijenos u Excel tablice, za potrebe projekta „Potresni rizik urbanih područja“ i ovog istraživanja u suradnji s tvrtkom EM2 d.o.o. (www.em2.solutions) razvijena je mobilna aplikaciju za operativni sustav Android (Slika 4.16). Dizajnirana je za upotrebu na mobitelu ili tabletu, a sastoji se od nekoliko zaslona za unos podataka koji se odnose na stvaranje baza podataka o građevinskim fondovima. Odlikuje ju jednostavnost i fleksibilnost upotrebe. Tijekom terenskog rada, svi podatci koje unose korisnici pohranjuju se u središnju bazu podataka na poslužitelju.

Aplikacija je također dizajnirana za rad u izvanmrežnom načinu rada što omogućuje korisniku da unese podatke u područjima gdje je pristup internetu loš i/ili ne postoji. U tom slučaju, podatci se pohranjuju lokalno na mobilni uređaj, a zatim se sinkroniziraju sa središnjom bazom podataka na poslužitelju kada uređaju bude dostupan internetski signal.



Slika 4.16 Android aplikacija za kreiranje baze podataka koju je razvio EM2 d.o.o.

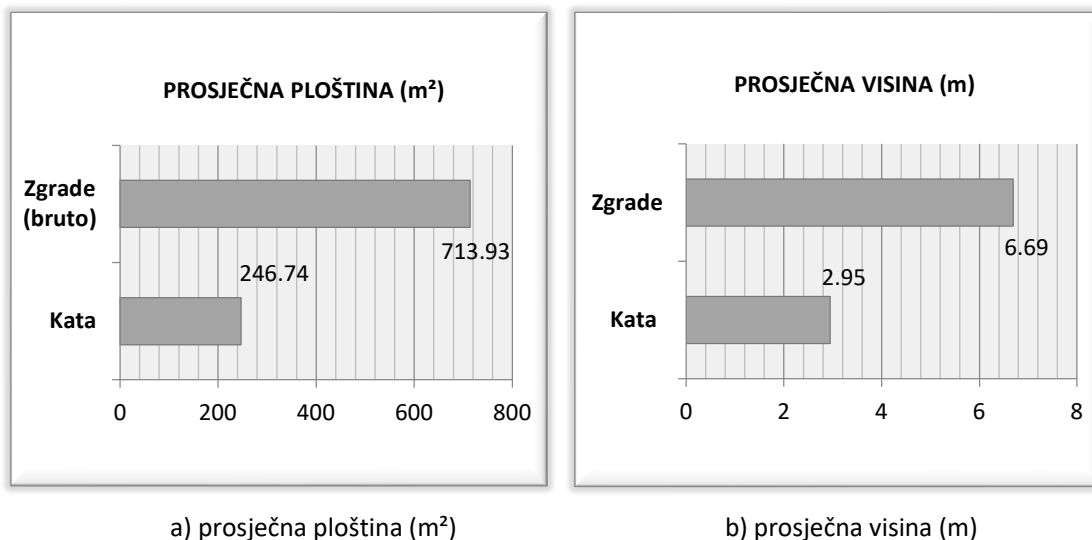
(Pavić i dr. 2020b)

Korisnici aplikaciju mogu upotrebljavati kao: standardni korisnici što znači da mogu pregledavati i uređivati samo podatke zgrada koje su oni unijeli u aplikaciju ili kao administratori. Administratori mogu izvršavati sve radnje u aplikaciji kao i standardni korisnik, ali i pristupiti središnjoj bazi podataka te uređivati ili modificirati sve podatke putem mobilne ili web aplikacije. Nakon instalacije aplikacije na mobilni uređaj, korisnik se registrira i automatski mu se dodjeljuje uloga "standardni korisnik".

4.6. Model izloženosti grada Osijeka – rezultati

Cilj je izrade modela izloženosti utvrditi brojnost i karakteristike zgrada i na temelju njih procijeniti mogući stupanj oštećenja za potresno djelovanje i promatrano povratno razdoblje. Međutim, kako su zgrade glavni uzročnici stradavanja ljudi i materijalnih šteta u potresima, modeli izloženosti predstavljaju i temelj za procjenu u kojoj mjeri zgrade pružaju zaštitu odnosno predstavljaju opasnost za ljude te ostale žive i materijalne dionike potresnog rizika.

U modelu izloženosti grada Osijeka do sada (1. 6. 2023.) su popisani i obrađeni podatci o karakteristikama 1860 zgrada. Aktivnosti na popunjavanju modela izloženosti se nastavljaju. Kompletiraju se podatci za približno još 1800 zgrada koje se nalaze u Donjem gradu, Cvjetnom naselju i Industrijskoj četvrti.



Slika 4.17 Prosječne vrijednosti ploštine i visine u modelu izloženosti grada Osijeka

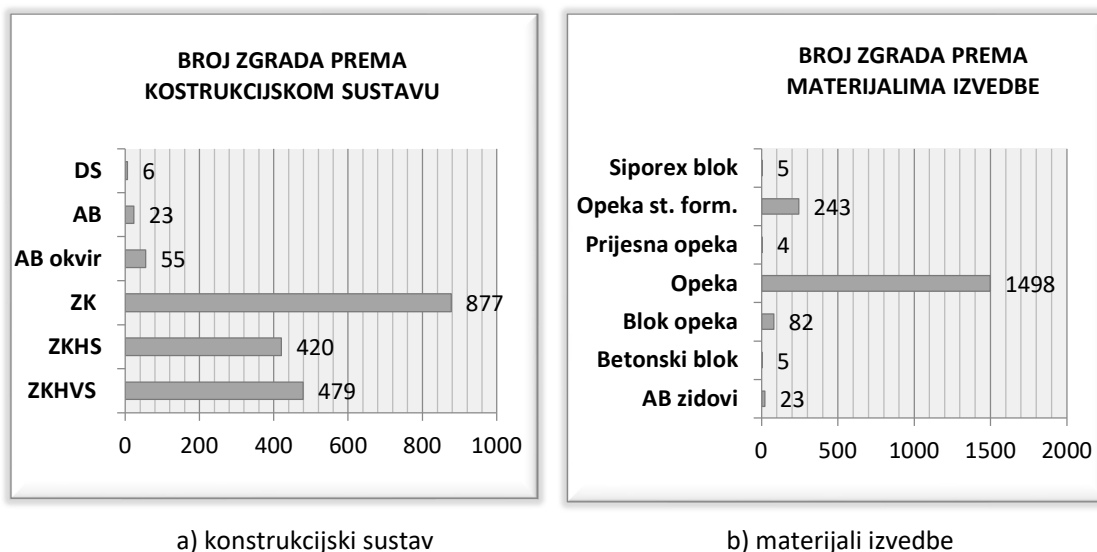
Ukupna bruto ploština svih zgrada popisanih u bazi iznosi 1 327 912,05 m². Na slici 4.17a) prikazana je proračunata prosječna ploština jednog kata zgrade odnosno prosječna bruto ploština jedne zgrade. Na temelju podataka iz modela izloženosti proračunata je i prosječna visina jednog kata zgrade te prosječna visina zgrade kao cjeline (Slika 4.17b)).

4.6.1. Statističke karakteristika zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka

Po konstrukcijskom sustavu zgrade su u modelu izloženosti razvrstane na:

- ZK – zidane konstrukcije s fleksibilnim stropom (npr. drveni grednik))
- ZKHS – zidane konstrukcije s horizontalnim serklažima i krutim stropom
- ZKHVS – zidane konstrukcije s horizontalnim i vertikalnim serklažima (omeđeno ziđe)
- AB okvir – armiranobetonske okvirne konstrukcije
- AB – armiranobetonske konstrukcije (zidovi)
- DS – dvojni sustavi

Na slici 4.18a) može se vidjeti da je u modelu izloženosti velika zastupljenost zidanih zgrada (1776) što je 95% svih popisanih zgrada. Najviše je zidanih konstrukcija bez serklaža (ZK), čak 877, a zbroj zidanih konstrukcija s horizontalnim serklažima i zidanih konstrukcija s horizontalnim i vertikalnim serklažima (ZKHS i ZKHVS) gotovo je isti broju zidanih konstrukcija bez serklaža (899).



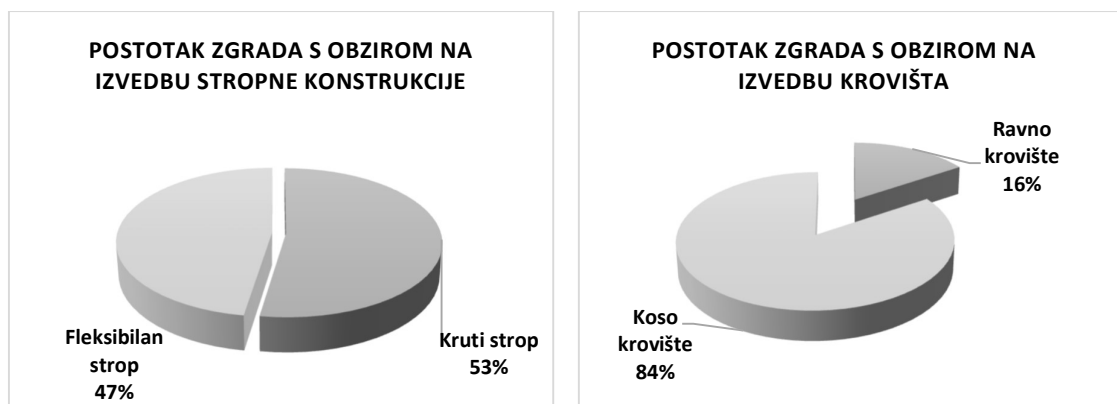
Slika 4.18 Brojnost zgrada prema konstrukcijskom sustavu i materijalima izvedbe u modelu izloženosti grada Osijeka

Iako je armirani beton sve popularniji kao građevinski materijal među za sada popisanim zgradama njegova je upotreba zanemariva (Slika 4.18b)). Građevinski materijal s kojim se najviše gradilo je obična opeka, njome je zidano 80 % popisanih zgrada u modelu izloženosti.

Opeka starog formata kao građevinski materijal također je zastupljena u značajnom udjelu (13 %) do sada popisanih zgrada, međutim stanje je takvo jer su među popisanim zgradama nalaze gotovo sve zgrade iz starih dijelova grada (Tvrđa, Europska avenija i dr.)(Slika 4.18b).

Način izvedbe stropnih konstrukcija i konstrukcija krovišta imaju značajnu ulogu u otpornosti zgrada na potresnu uzbuđu. Energija potresnih valova pomiče masu zgrade, što je krovište lakše, to je središte mase zgrade niže pa je i stupanj oštećljivosti zgrade manja. Statistika načina izvedbe krovišta zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka nije povoljna kada je u pitanju uloga krovišta u potresnoj otpornosti jer čak 84% zgrada ima koso (teško) krovište (Slika 4.19b).

Jedan od načina da se zgrada učini otpornijom na bočne sile potresa je povezivanje zidova, stropnih i konstrukcije krovišta te temelja u krutu cjelinu koja se drži zajedno tijekom potresa. Fleksibilnim stropnim konstrukcijama, kojih je u modelu izloženosti čak 47% (Slika 4.19a) krutost zgrada nije osigurana pa je i mogućnost njihove oštećljivosti veća.



a) stropne konstrukcije

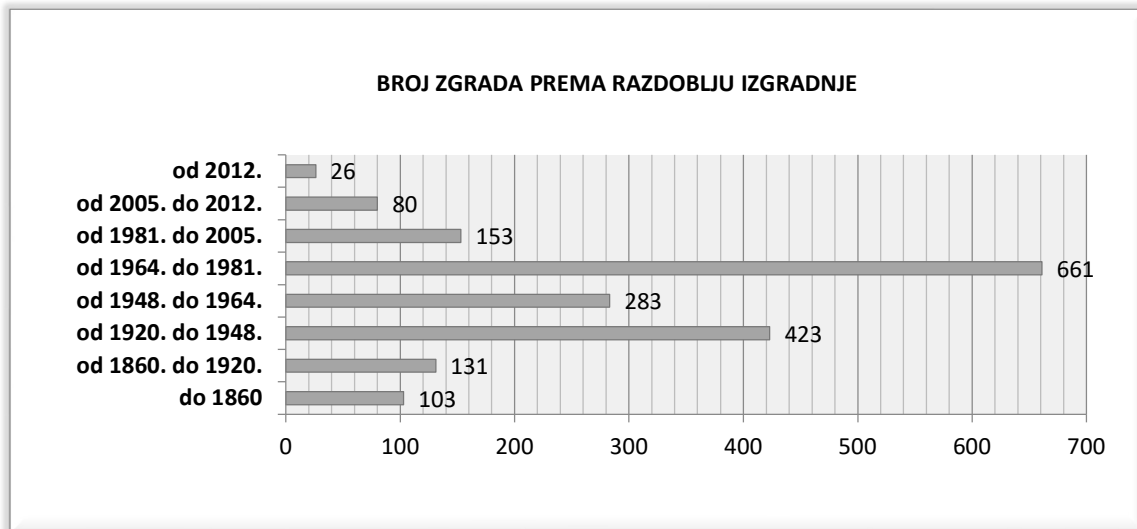
b) krovište

Slika 4.19 Postotak zgrada prema izvedbi stropne konstrukcije i konstrukcije krovišta u modelu izloženosti grada Osijeka

Iako je naglasak kod prikupljanja podataka stavljen na podatke o konstrukcijskim karakteristikama zgrada, model izloženosti sadržava i druge podatke koji, kako je prikazano u prethodnim poglavljima, u velikoj mjeri mogu utjecati na ukupan odziv zgrade na potresnu uzbuđu ili mogu na drugi način

doprinijeti u predviđaju njezine potresne oštetljivosti. Svakako je najznačajniji podatak o godini izgradnje zgrade. Za većinu zgrada bilo je teško prikupiti točne podatke o godini izgradnje pa su zgrade razvrstane u karakteristična razdoblja koja je s obzirom na prepoznatljive karakteristike gradnje svakog razdoblja bilo lakše dodijeliti zgradama.

Na slici 4.20 prikazana su usvojena karakteristična razdoblja izgradnje te je grafički predočena brojnost do sada popisanih zgrada prema njima. Najviše popisanih zgrada u bazi je iz razdoblja izgradnje 1964. – 1981., ukupno 36 % što je više od trećine svih popisanih zgrada. Najveći postotak zastupljenosti u bazi nadalje imaju zgrade izgrađene u razdoblju 1920. – 1948. (23 %), te zgrada iz razdoblja 1948. – 1964. (15 %). Manje od 1 % popisanih zgrada u bazi su nove zgrade odnosno one izgrađene poslije 2012.

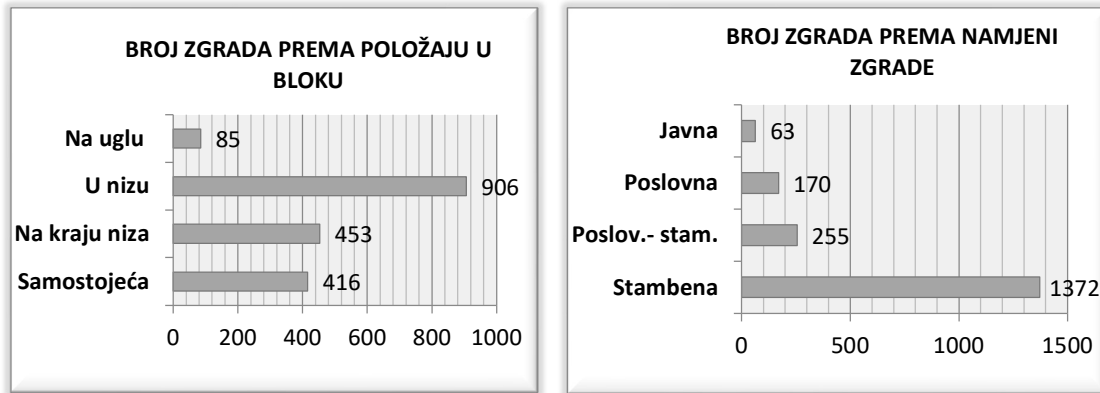


Slika 4.20 Brojnost zgrada prema razdobljima izgradnje u modelu izloženosti grada Osijeka

U posljednje vrijeme sve je više novih zgrada osobito onih koje zamjenjuju stare obiteljske kuće pa će se vjerojatno u budućnosti ovi postotci promijeniti u korist novih zgrada.

Najznačajniji nekonstrukcijski podatci o zgradama koji u velikoj mjeri utječu na oštetljivost zgrada u potresu su podatci o položaju zgrada u odnosu na druge zgrade u bloku (Poglavlje 4.4.2.). Brojnost zgrada u modelu izloženosti s obzirom na položaj u bloku zgrada grafički je prikazana na slici (4.21a)). Među popisanim zgradama 49 % je zgrada u nizu (2 ili više zgrada), što je logično s obzirom da su popisane zgrade s urbanog područja na kojem je uobičajen ovakav razmještaj zgrada s obzirom na

potrebu uštede prostora. Približno je isti postotak samostojećih (22 %) i zgrada na kraju niza (24 %) među do sada popisanim zgradama u modelu izloženosti grada Osijeka.



a) položaj u bloku

b) namjena zgrade

Slika 4.21 Brojnost zgrada prema nekonstrukcijskim karakteristikama u modelu izloženosti grada Osijeka

Na slici 4.22 grafički je prikazan postotak zgrada u modelu izloženosti s obzirom na tlocrtnu pravilnost. Među do sada popisanim zgradama najzastupljenije su tlocrtno pravilne zgrade (67 %) dok je tlocrtno nepravilnih 33% zgrada.



Slika 4.22 Postotak zgrada s obzirom na tlocrtnu pravilnost u modelu izloženosti grada Osijeka

4.7. Generiranje konstrukcijskih tipologija modela izloženosti grada Osijeka

Razredba građevinskog fonda u različite razrede – tipologije zgrada, te definiranje temeljite sheme razredbe zgrada – taksonomije na tom temelju, glavni je preduvjet za modeliranje izloženosti.

Generiranje konstrukcijskih tipologija modela izloženosti grada Osijeka polazi u ovom istraživanju od premisa da:

- se konstrukcijska tipologija temelji na sustavno sastavljenom skupu karakteristika građevine koji mora omogućiti jednostavno i jasno definiranje tipološke klase svake građevine na temelju uočenih konstrukcijskih karakteristika
- se idealan tipološki model stvara identificiranjem ponavljajućih karakteristika, analizom sličnosti i promjena u konstrukcijskom odzivu te njihovim dokumentiranjem
- usvajanje tipologija treba slijediti priznate metodologije i postupke ali dati priliku i novim, što vodi daljnjem poboljšanju sagledavanja korelacija između karakteristika zgrada i preciznijem predviđanju oštetljivosti svake tipologije.

Za generiranje konstrukcijskih tipologija u ovoj doktorskom radu razvijen je algoritam čija je namjena pomoć za unaprjeđenje metodologije modeliranja izloženosti kroz definiranje razredbi i klasifikacijskih pravila za usvajanje konstrukcijskih tipologija.

4.7.1. Algoritam za definiranje klasifikacijskih pravila i usvajanje konstrukcijskih tipologija

Modeliranje izloženosti predloženim algoritmom omogućava razredbu važnosti karakteristika zgrada, njihovu integraciju unutar razreda važnosti, sinkronizaciju, mijenjanje te nadopunjavanje svih sadržaja koherentnog sustava algoritma.

Shemom algoritma koja je razinski prilagodljiva, ovisno o tome koliko se precizna metoda procjene oštetljivosti želi primijeniti, obuhvaćaju se svi bitni elementi za generiranje sveobuhvatnih široko primjenjivih konstrukcijskih tipologija koje će osigurati dostatno pouzdanu analizu oštetljivosti zgrada za svaku primijenjenu metodu oštetljivosti.

Razredba važnosti u predloženom algoritmu sadržava 5 razina prikazanih na slici 4.23.



Slika 4.23 Algoritam za definiranje razredbenih pravila i usvajanje konstrukcijskih tipologija
(prema Pavić i dr. 2020a)

Prve dvije razine važnosti odnose se na konstrukcijske karakteristike zgrade – materijal i konstrukcijski sustav jer se potresna oštećljivost zgrada primarno predstavlja kao osjetljivost konstrukcija na oštećenja (Preciado i dr. 2020, Hadzima-Nyarko i dr. 2018, Calvi i dr. 2006, Whitman i dr 1997, Braga i dr. 1982), pri čemu je veličina oštećenja određena kvalitetom i unutarnjom čvrstoćom materijala i konstrukcijskog sustava.

Na trećoj i četvrtoj razini važnosti razmatraju se modifikatori – karakteristike zgrade koje utječu na otpornost zgrade kada je izložena potresnom djelovanju npr. godina izgradnje ili primijenjeni građevinski propisi na trećoj razini te na četvrtoj razini npr. dinamička karakteristika – broj katova. Na temelju karakteristika treće i četvrte razine važnosti moguće je zgradi direktno dodijeliti pripadnu tipologiju.

Modifikatori pete razine važnosti su dodatne karakteristike zgrada koje mogu utjecati na povećanje ili smanjenje potresne oštećljivosti. U sinergiji s modifikatorima treće i četvrte razine važnosti ovi modifikatori modeliraju maksimalne i minimalne vjerojatnosne raspone razreda oštećljivosti. Zato su za modeliranje oštećljivosti na petoj razini usvojene tlocrtna i visinske nepravilnosti zgrade te nepravilnosti u rasporedu masa. Značajan broj oštećenja uzrokuje i postojanje mekog kata/stupa te pozicija zgrade u odnosu na druge zgrade u bloku pa su i ovi modifikatori uvršteni u petu razinu važnosti.

Još uvijek u potresnom inženjerstvu postoje nedovoljno istraženi izazovi kao što su međudjelovanje temeljnog tla i građevine, utjecaji: amplifikacije potresnih valova, promjene debljine slojeva tla ili oblika rasjeda na veličinu potresne uzbude, a time i na moguću oštećljivost elemenata potresnog rizika. Kao što je vidljivo iz prijašnjih poglavlja u ovom doktorskom radu istražena je amplifikacija potresnog djelovanja za promatrano područje i provedeno mikrozoniranje. Dobiveni rezultati upotrijebit će se za modeliranje vrijednosti modifikatora za oštećljivost zbog utjecaja temeljnog tla koji je također uvršten u petu razinu važnosti.

4.7.2. Prijedlog konstrukcijskih tipologija iz modela izloženosti grada Osijeka

Velik je broj građevina (u svijetu) koje su bile izložene jakom potresnom djelovanju analogno tome i broj prikupljenih podataka koji se odnose na njihov potresni odziv te nastale štete. Zaključak koji se može izvesti analizom zabilježenih podataka i opažanja s različitih, geografsko relativno bliskih područja, je da bez obzira na sličnosti jačine potresnog djelovanja i usvojenih tipologija nema sličnosti u efektima i obujmu fizičke štete.

Zgrade nekog područje imaju specifične karakteristike nastale iz lokalne prakse projektiranja i građenja te upotrebe materijala pa tipologija izloženosti koja se primjenjuje za to područje treba odražavati te specifične karakteristike postojećeg građevinskog fonda.

Osnova za definiranje konstrukcijskih tipologija zgrada za model izloženosti grada Osijeka su tijekom dosadašnjih istraživanja utvrđeni prevladavajući tipovi postojećih zgrada sa specifičnim konstrukcijskim i oblikovnim karakteristikama zapaženim i zabilježenim na promatranom području.

Tri su osnovna prevladavajuća tipa: zidane, armiranobetonske i drvene zgrade koje su dalje razvrstane s obzirom na materijale od kojih su građene, prema konstrukcijskom sustavu i prema visini.

Za model izloženosti grada Osijeka, konstrukcijski sustavi postojećih zgrada razvrstani su uvažavajući prijedloge EMS – 98 sustava razredbe zgrada, a za razredbu tipologija s obzirom na broj katova usvojen je prijedlog prema Giovinazzi (2005.) (Tablica 4.9).

Tablica 4.9 Razredba konstrukcijskih sustava EMS – 98 i visine zgrada prema broju katova Giovinazzi (2005.)

Tipologija zgrada EMS – 98		Broj katova Giovinazzi (2005.)	
Zidane zgrade	Nearmirano ziđe		
	Nepečena opeka (zemljana opeka)	Niske	1 - 2
	Nearmirano ziđe (stara opeka)	Srednje visoke	3 - 5
	Neramirano ziđe (ab strop)	Visoke	≥ 6
	Armirano/omeđeno ziđe		
AB zgrade	Armiranobetonski okviri	Niske	1 - 3
	Armiranobetonski posmični zidovi	Srednje visoke	4 - 7
	Dvojni sustavi	Visoke	≥ 8

AB - armiranobetonske

Za zidane zgrade usvojena je tipologijska razredba koja razlikuje nearmirano ziđe zidano opekam starog formata (NAZ_OSF) i opekam (NAZ_O) te omeđeno ziđe (OZ). Prema konstrukcijskom sustavu razredbom se razlikuju krute (K) i fleksibilne (F) zidane zgrade, a prema visini niske (N) - zgrade s 1-3 kata, srednje visoke (S) - zgrade s 3-5 katova i visoke (V) - zgrade s 6 i više katova.

Armiranobetonske zgrade razvrstane su kao okvirne (AB_O), zgrade građene armiranobetonskim zidovima (AB_Z) i zgrade građene kao dvojni sustavi (AB_DS), a unutar ovih razredbi razlikuju se prema visini sukladno usvojenom prijedlogu iz tablice 4.9 za armiranobetonske zgrade.

Za drvene zgrade predložena je jedna tipologija i to tipologija niskih zgrada - visine 1-3 kata.

Prijedlog konstrukcijskih tipologija generiranih na temelju modela izloženosti grada Osijeka prikazan je u tablici 4.10.

Tablica 4.10 Konstrukcijske tipologije iz modela izloženosti grada Osijeka (prema Pavić i dr. 2020a)

Tipologija		Konstrukcijski sustav	Zgrade prema visini	Predložena tipologija	
ZIDE	Nearmirano zide	Opeka starog formata	HORIZONTALAN	Fleksibilan	NAZ_OSF_F_N NAZ_OSF_F_S
	Omeđeno zide	Opeka		Fleksibilan	NAZ_O_F_N NAZ_O_F_S
Omeđeno zide		Omeđeno zide		Krut	NAZ_O_K_N NAZ_O_K_S NAZ_O_K_V
ARMIRANI BETON			VERTIKALAN	Okvir	AB_O_N AB_O_S AB_O_V
				AB zid	AB_Z_N AB_Z_S AB_Z_V
				Dvojni sustav	AB_DS_S AB_DS_V
DRVO		Drvene konstrukcije	Niske 1 – 3 kata	DK_N	

4.7.3. Usporedba predložene tipologije s postojećim tipologijama

Predložena tipologija općenito je bliska postojećim tipologijama (HAZUS i EMS – 98), ali vjernije opisuje i odražava stanje građevinskog fonda na prostoru za koji je izrađena. Usporedba predložene tipologije za grad Osijek s postojećim tipologijama HAZUS-a, EMS – 98 prikazana je u tablici 4.11.

Tipologije prikazane u tablici 4.11 ne razlikuju se u smislu definiranja osnovnih tipova konstrukcija građevina, već samo u različitim pristupima definiranju pojedinih podkonstrukcijskih tipova. Određivanje tipologija za određeno područje ne znači samo precizniju razredbu fonda zgrada

promatranog području, već i točniji prikaz izloženosti te točnije predviđanje i/ili procjenu šteta od potresa.

Tablica 4.11 Usporedba tipologije HAZUS i EMS – 98 s predloženom tipologijom (prema Pavić i dr. 2020a)

HAZUS	EMS – 98	PREDLOŽENA TIPOLOGIJA
Nearmirano zid	Nearmirano zid	Nearmirano zid
Nosiva konstrukcija nearmirano zid	Lomljeni kamen Čerpić (nepečena opeka) Kamen Krupni kamen Nearmirano zid (stara opeka) Nearmirano zid – armiranobetonski strop	Nearmirano zid (opeka starog formata) Nearmirano zid – kruti strop
Armirano/omeđeno zid	Armirano/omeđeno zid	Omeđeno zid
Nosiva konstrukcija nearmirano zid s drvenim ili metalnim dijafragmama		
Nosiva konstrukcija nearmirano zid s predgotovljenim betonskim dijafragmama	Armirano/ omeđeno zid	Omeđeno zid
Armirani beton	Armirani beton	Armirani beton
AB okvirna konstrukcija		
Nosivi armiranobetonski zid	Armiranobetonski okvir	Okvir
Betonski okvir s ispunom od nearmiranog zida	Nosivi zidovi	Zid
Zidovi		Dvojni sustav

4.7.4. Rezultati raspodjele predloženih tipologija u modelu izloženosti

Predložene tipologije dodjeljene su zgradama popisanim u modelu izloženosti grada Osijeka, a njihova raspodjela prikazana je u tablici 4.12. Osim brojnosti zgrada po pojedinim tipologijama tablica sadržava i podatke o udjelu zgrada s obzirom na broj katova u svakoj tipologiji.

Tablica 4.12 Raspodjela zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka prema tipologiji i zastupljenost zgrada s obzirom na broj katova u pojedinoj tipologiji.

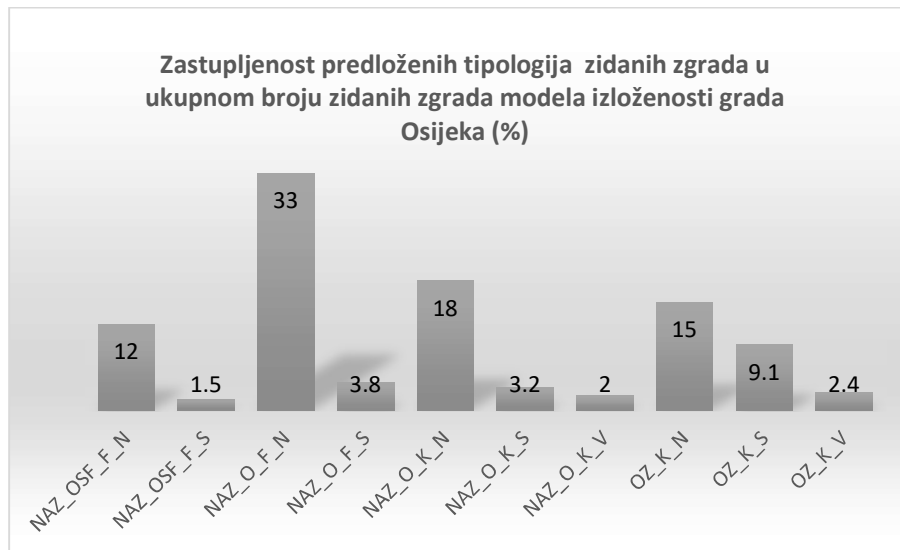
Tipologije zidanih zgrada	Broj zgrada u tipologiji	Broj katova	Zastupljenost zgrada u tipologiji prema broju katova (%)	Tipologije armirano-betonskih zgrada	Broj zgrada u tipologiji	Broj katova	Zastupljenost zgrada u tipologiji prema broju katova (%)		
NAZ_OSF_F_N	206	1	39	AB_Z_N	8	1	62		
		2	61			2	25		
						3	13		
NAZ_OSF_F_S	28	3	61	AB_Z_S	7	4	29		
		5	28			5	71		
		4	11			6	0		
NAZ_O_F_N	575	1	74			7	0		
		2	26						
NAZ_O_F_S	68	3	70	AB_Z_V	8	8	0		
		4	13			9	100		
		5	13			AB_O_N	13	1	15
		2	46						
NAZ_O_K_N	327	1	33			3	39		
		2	67						
NAZ_O_K_S	57	3	28	AB_O_S	41	4	20		
		4	47			5	46		
		5	25			6	32		
NAZ_O_K_V	36	6	75	AB_O_V	1	8	0		
		7	14			9	100		
		8	11						
OZ_K_N	271	1	37	AB_DS_S	2	4	0		
		2	63			5	0		
						6	100		
OZ_K_S	163	3	36			7	0		
		4	6			AB_DS_V	4	8	0
		5	58					9	100
OZ_K_V	45	6	55						
		7	28						
		8	16						
Ukupno zidane zgrade:	1776			Ukupno AB Zgrade:	84				

Ukupan broj do sada popisanih i obrađenih zgrada u modelu izloženosti grada Osijeka: 1860

Već na temelju brzog pregleda tablice 4.12 može se zaključiti da prevladavaju tipologije zidanih zgrada (i to zgrade zidane opekom, vidi sliku 4.18b i brojnost zgrada zidanih opekom starog formata i opekom), naime ove tipologije dodjeljene su 95 % popisanih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka.

Tradicionalno, opeka je oduvijek najupotrebljavaniji materijal za gradnju na području grada Osijeka, ne samo zbog dobrih građevinskih i drugih svojstava ili postojanje ciglane, nego i zbog velikih količina „besplatnog“ građevinskog materijala – vrlo kvalitetne pečene opeke, koja je bila dostupna početkom dvadesetog stoljeća kada su se rušili bedemi Tvrđe.

Na slikama 4.24 i 4.25 prikazana je zastupljenost predloženih tipologija zidanih i armiranobetonskih zgrada u ukupnom broju popisanih zidanih i armiranobetonskih zgrada izrađenog modela izloženosti.



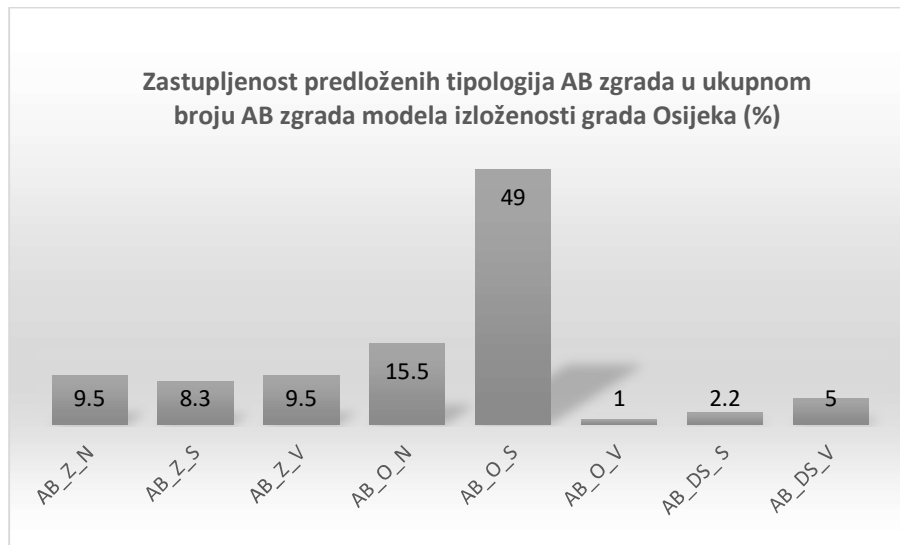
Slika 4.24 Zastupljenost predloženih tipologija zidanih zgrada u ukupnom broju do sada popisanih zidanih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka

Prema prikazanim rezultatima na slici 4.24 dominiraju tipologije niskih zgrada (1 – 2 kata). Naime, zbroj postotnih udjela zgrada u svim predloženim tipologijama niskih zidanih zgrada, čini čak 78 % od svih popisanih zidanih zgrada.

Većina tih zgrada su obiteljske kuće te niske stambene zgrade s 2 do 4 stana. Izgradnja stambenih zgrada s 2 do 4 stana karakteristična je za dvadesete godine 20-tog stoljeća kada je tadašnja gradska uprava, kako bi potakla oporavak građevinske djelatnosti i ubrzala urbani razvitak grada, poticala

izgradnju novih (najamnih) stambenih zgrada s većim brojem stanova. Utjecaj ove inicijative vidljiv je i u modelu izloženosti u brojnosti zgrada iz razdoblja izgradnje 1920. – 1948. (Slika 4.20).

Među armiranobetonskim zgradama najviše je u modelu izloženosti onih kojima je dodjeljena tipologija armiranobetonski okvir, a prema visini dominiraju srednje visoke zgrade, osobito kod tipologije armiranobetonski okvir koja sadržava gotovo 50 % svih popisanih armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti.



Slika 4.25 Zastupljenost predloženih tipologija armiranobetonskih zgrada u ukupnom broju do sada popisanih armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka

4.8. QGIS za obradu i vizualizaciju podataka iz modela izloženosti

Iako je primarna svrha modela izloženosti da sadržavaju sve potrebne podatke o zgradama koji ih opisuju te određuju njihovu potresnu otpornost, cilj izrade modela izloženosti je i taj da se prikupljeni podatci upotrebljavaju za što veći raspon područja upotrebe i od strane što većeg broja korisnika. Jednostavnost u upotrebi, kontinuirana aktualnost podataka i sposobnost vizualne prezentacije dodatni su kriteriji koje modeli izloženosti trebaju posjedovati. Kako bi izrađeni model izloženosti za grad Osijek ispunio navedene ciljeve i kriterije, implementiran je u geoinformacijski sustav – QGIS.

QGIS-om se mogu prikupljati, pohranjivati, analizirati, ažurirati karakteristike zgrada, ali što je još značajnije za istraživanja poput ovog, koje se temelji na prostornim podacima, oni se mogu vizualno prikazivati. Osim atributnih podataka koji kvalitativno opisuju zgrade, QGIS može vizualno prikazati

prostornu distribuciju i međusobne odnose zgrada nakon georeferenciranja prostornih podataka (Neteler i Mitasova 2008). Georeferencirani prostorni i geometrijski elementi (zgrade) definirani su točnije u QGIS-u upotrebom najnovijih ortorektificiranih slika iz zraka koje su javno dostupne (DOF5 2019/20) (Republika Hrvatska, Državna geodetska uprava).

Osigurana je cjelovitost podataka za svaku zgradu i spriječena nehomogenost i redundancija podataka tako što je unutar uspostavljenog sustava izgrađena automatizirana kontrola s vidljivim upozorenjima kako bi se izbjegle ljudske pogreške tijekom procesa unosa i promjene podataka.

Ovakav način obrade, organizacije i prezentacije podataka ima značajnu prednost u odnosu na tradicionalne metode jer osigurava i vizualnu komponentu predmeta proučavanja, distribuciju njegovog položaja i brže snalaženje u prostoru. Primjenjiv je za bilo koju dinamičku prostornu analizu zgrada i druge srodne aktivnosti (brze procjena oštećenja zgrada ili drugih gubitaka, planiranje evakuacije ili spašavanja, planiranje uklanjanja ruševina ili sanacija i sl.) koje se mogu provoditi na temelju ovako izrađene i organizirane baze podataka.

4.8.1. Vizualizacija modela izloženosti grada Osijeka u QGIS-u

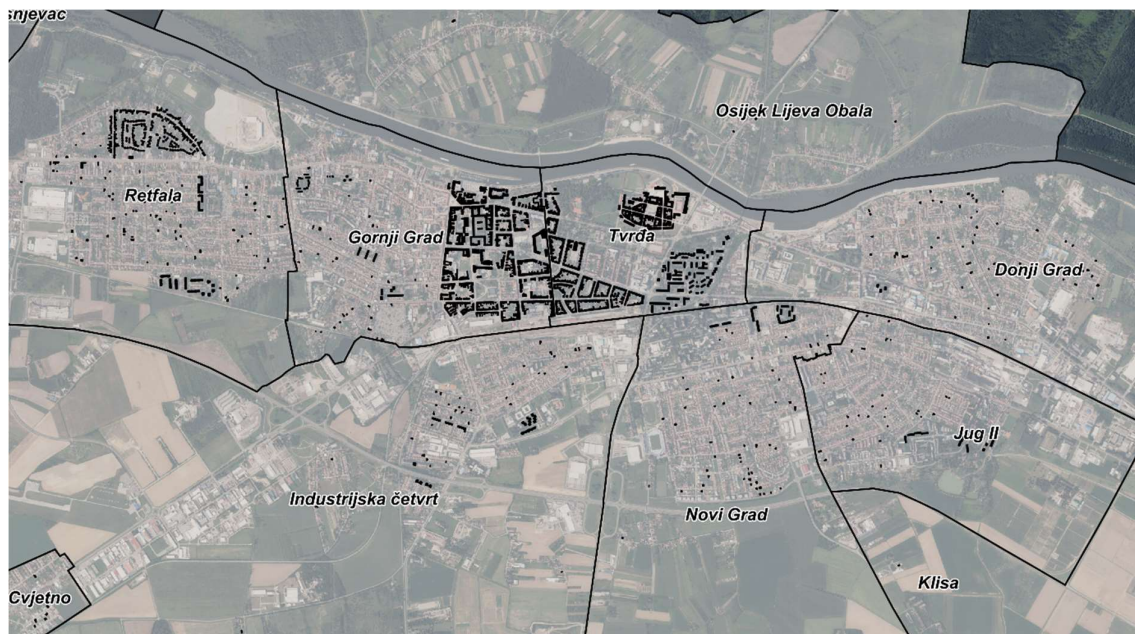
Na slikama 4.26 – 4. 28 prikazane su različite mogućnosti vizualizacije zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka u QGIS-u. Zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka su u QGIS-u geometrijski definirane, a georeferenciranjem prostornih podataka izrađena je distribucija i međusobni odnosi zgrada. Na slici 4.26a prikazane su zgrade geometrijski određene, a na slici 4.26b prikazana je prostorna distribucija i međusobni odnosi zgrade do sada popisane i obrađene u modelu izloženosti grada Osijeka.

Atributni podaci o karakteristikama zgrada preuzeti su u QGIS iz prikupljenih i obrađenih podataka iz modela izloženosti grada Osijeka. Različitim bojama zgrade se vizualno u QGIS-u mogu prikazati s obzirom na željene karakteristike. Na slici 4.27a - f vizualno su prikazane neke od usvojenih za prikupljanje i prikupljene karakteristike zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka.

Kao što je već navedeno, u ovom istraživanju podatci su u QGIS implementirani nakon što su prikupljeni i uređeni u modelu izloženosti, međutim moguće ih je direktno (s različitih lokacija i od strane različitih odobrenih popisivača) unositi, uređivati, mijenjati u QGIS-u. Svi unešeni atributi - podatci o zgradi mogu se pregledati i prikazati alatima QGIS-a „Identify Features“ i „Shoe Map Tips“. Na slikama 4.28 a i b prikazane su mogućnosti prikaza atributa - karakteristika pojedinačnih zgrada.

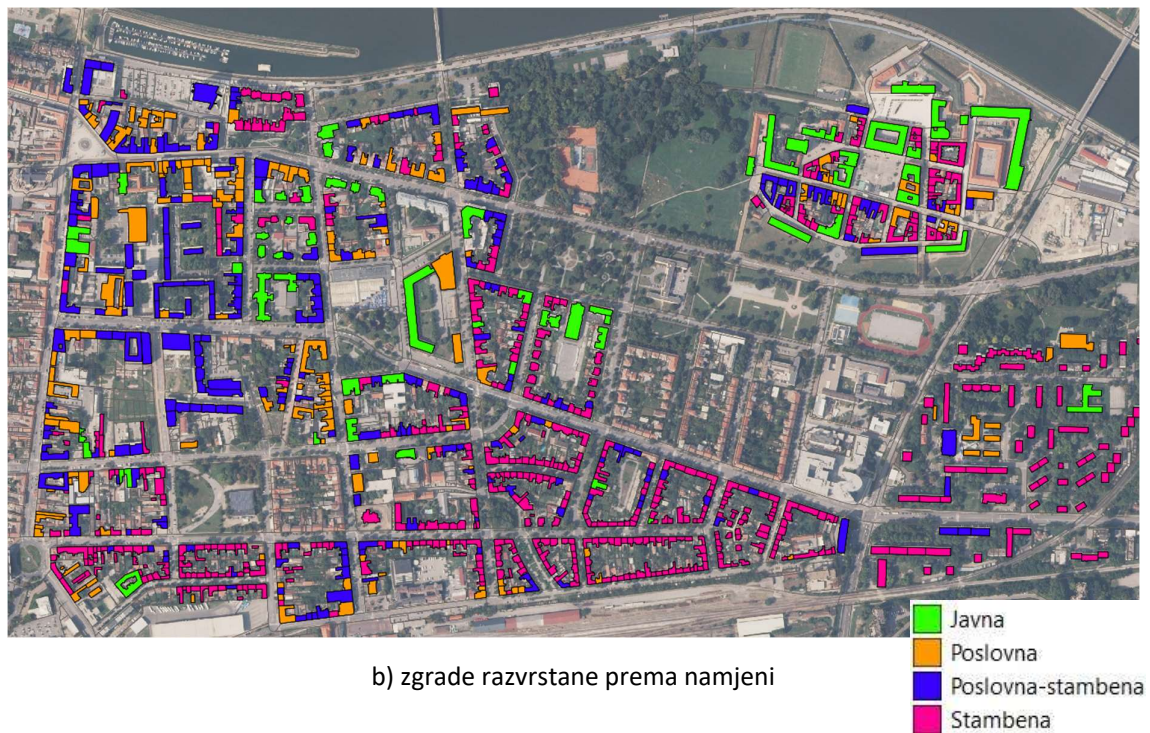
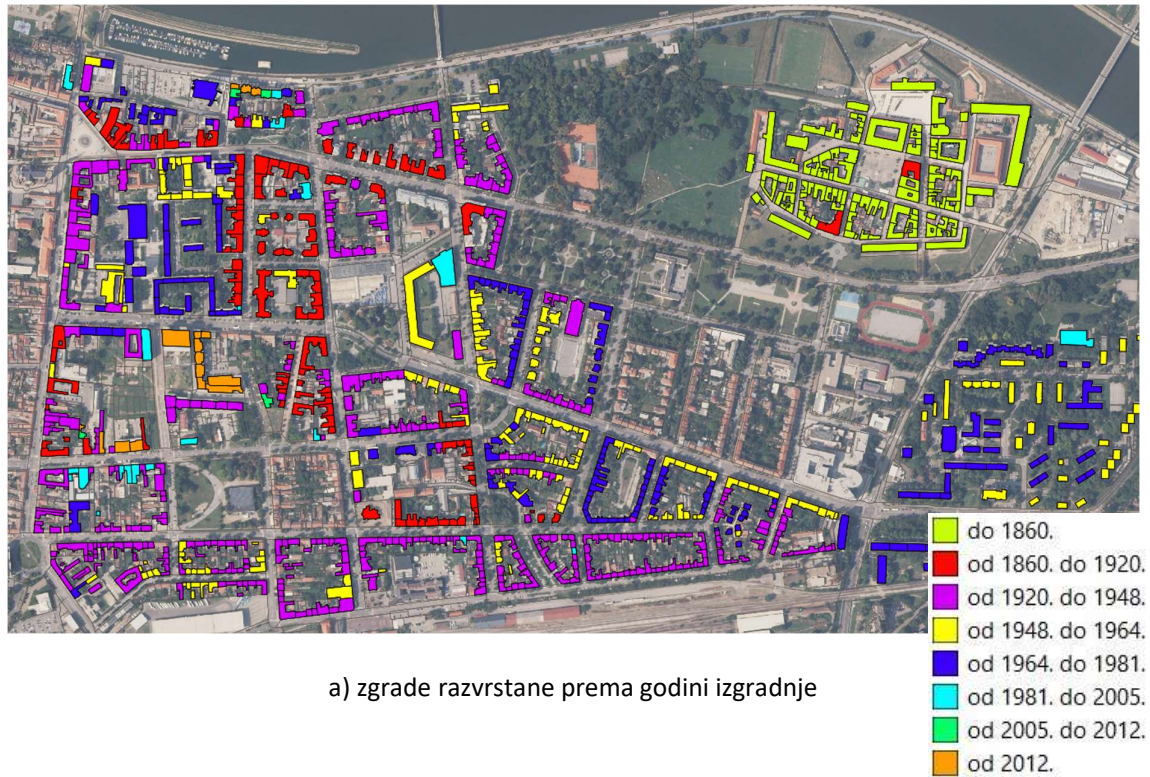


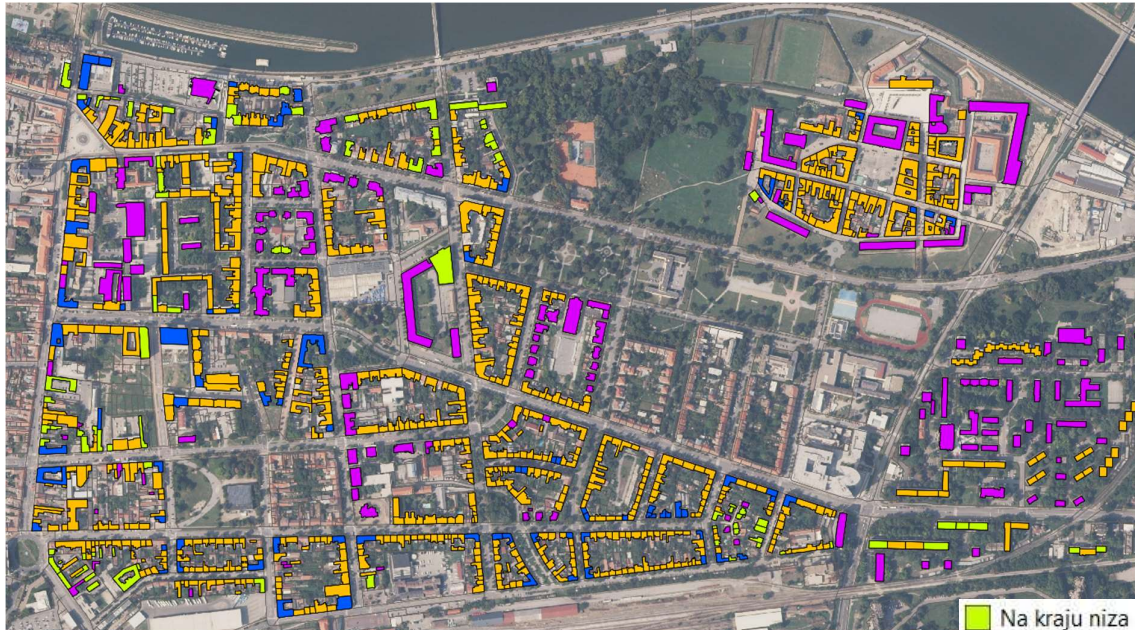
a) geometrijski definirane zgrade u QGIS-u



b) prostorna distribucija i međusobni odnosi zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka

Slika 4.26 Mogućnosti vizualizacije modela izloženosti grada Osijeka u QGIS-u





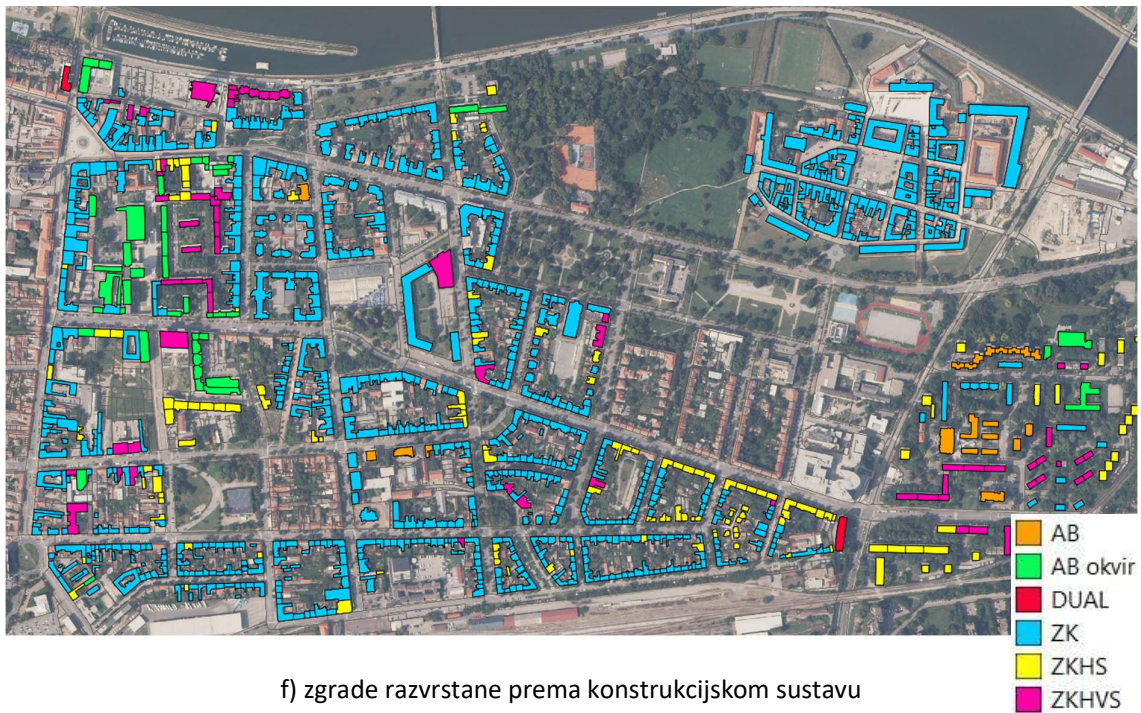
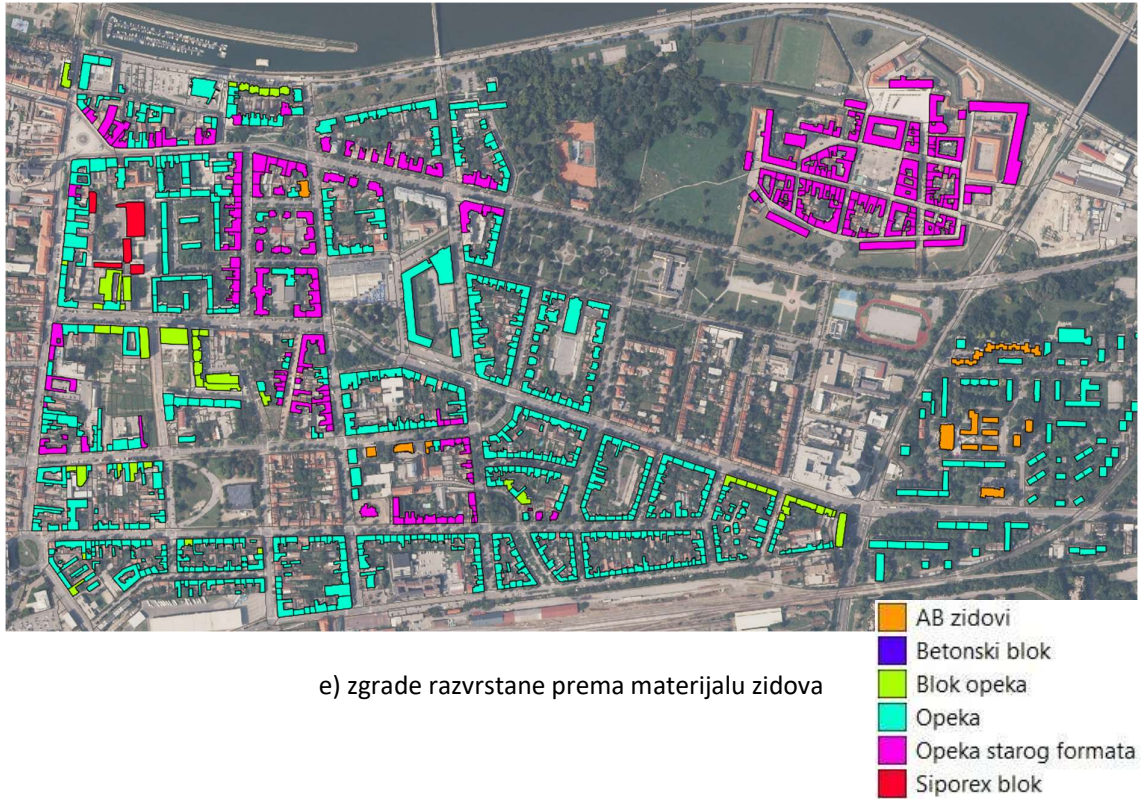
c) zgrade razvrstane prema poziciji u bloku zgrada

- Na kraju niza
- Na uglu
- Samostojeća
- U nizu



d) zgrade razvrstane prema broju katova

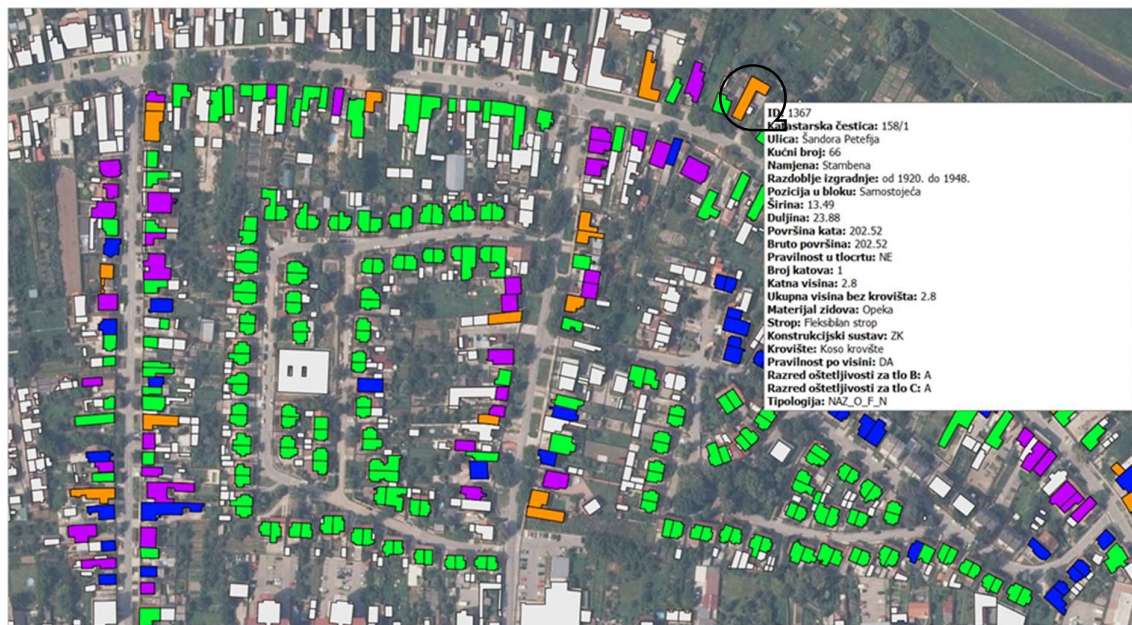
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 9
- 10
- 11
- 12
- 14
- 15
- 19



Slika 4.27a - f Vizualizacija karakteristika zgrada iz modela izloženosti grada osijeka u QGIS-u



a) karakteristike zgrade prikazane alatom „Identify Features“



b) karakteristike zgrade prikazane alatom „Shoe Map Tips“

Slika 4.28 Prikaz karakteristika zgrade u QGIS-u

4.9. Zaključak

Izloženost je temeljna komponenta potresnog rizika koja elemente rizika, kvantitativno i kvalitativno promjenjive s vremenom, pokušava definirati i odrediti kako bi se izradilo što pouzdanije predviđanje potresnih gubitaka, za vjerojatna potresna djelovanja na području izloženosti elemenata. U tradicionalnom kontekstu, primarni je cilj procjene potresnog rizika procjena oštetljivosti zgrada, jer su one najveći uzročnik žrtava i materijalnih gubitaka uslijed potresa.

Iz dosadašnjih spoznaja i iskustva u području potresne izloženosti može se zaključiti da je izloženost sustavno zanemarivana, a metodologije za njezino modeliranje zastarjele i/ili površne.

Podatci o zgradama uglavnom ne postoje, a ako postoje prikupljeni su stihijski tijekom utvrđivanja oštećenja nakon potresa ili na temelju popisa koji nemaju izvornu svrhu prikupljanja podataka o zgradama. Ne postoji niti suradnja među istraživačima potresnog rizika pa često različiti timovi prikupljaju i obrađuju iste podatke, a ono što je prikupljeno rijetko je dostupno za široku upotrebu ili razmjenu.

U posljednje vrijeme javljaju se projekti kojima je primaran cilj modeliranje izloženosti međutim zbog ograničenog vremena trajanja projekata i financijskih sredstava izloženost se modelira na globalnoj razini toliko površnoj da generirani podatci često ne zadovoljavaju niti minimalne kriterije uporabljivosti (vidi poglavlje 2.3.1. i sliku 2.7).

Često se izloženost i oštetljivost pogrešno spajaju tako što se definira obrnuto proporcionalan odnos između njih, međutim takav odnos ne postoji, naime, moguće je biti izložen ali ne i oštetljiv (moguće je izgraditi zgradu koja će ostati neoštećena iako je izložena potresnoj opasnosti). Oštetljivost od ekstremnog događaja uvjetovana je izloženošću i ne postoji povratni odnos koji bi odredio izloženost.

Neupitna je potreba za preispitivanjem do sada upotrebljivanih metodologija modeliranja izloženosti, postojećih podataka o zgradama i načina kako se znanstvena zajednica odnosi prema problemu izloženosti. U ovom doktorskom radu, u dijelu koji se odnosi na potresnu izloženost, nastojalo se na temelju uočenih nedostataka u području, razviti sveobuhvatnu i široko primjenjivu metodologiju modeliranja izloženosti te ju primijeniti u razvoju modela izloženosti grada Osijeka.

Postavljeni su ciljevi koji se unaprijeđenom metodologijom trebaju moći ostvariti, a zatim isplanirani načini za njihovu realizaciju.

Kako bi se osigurala pouzdanost i kvaliteta podataka koji se prikupljaju postavljen je cilj prikupljanja podataka na licu mjesta. Osmišljeni su i izrađeni pomoćni alati za prikupljanje podataka: obrazac za prikupljanje podataka, a kasnije i mobilna aplikacija koja je značajno unaprijedila i ubrzala ne samo postupak prikupljanja podataka nego i kasnije objedinjavanje i ažuriranje istih.

Modeli izloženosti trebaju omogućiti ne samo procjene oštećljivosti zgrada nego i procjene ljudskih gubitaka zato je metodologijom omogućeno višerazinsko prikupljanje podataka onih koji se odnose samo na zgrade i onih koji se odnose na njihove korisnike (broj korisnika i namjena zgrade) kako bi se na temelju prikupljenih podataka osim oštećljivosti zgrada mogao proračunati ukupni potresni rizik.

Kroz faze prikupljanja podataka, može se primijetiti i bilježiti veliki broj karakteristika zgrada, međutim to ne znači da su sve relevantne za procjene rizika. Unaprijeđena metodologija postavlja pravila za odabir i prikupljanje samo onih podataka o zgradama koji će sustavno okarakterizirati zgrade s obzirom na potresnu otpornost.

Kod izrade modela izloženosti grada Osijeka usvojeno je za prikupljanje 15 karakteristika i podataka o zgradama opisanih u poglavlju 4.4.2. Niz je tehničkih i drugih izazova koji su nastajali tijekom njihovog prikupljanja međutim uspostavljena je takva organizacijska shema koja je omogućila njihov naknadni unos ili izmjene. Razvijenom metodologijom do danas su popisani i obrađeni podatci o karakteristikama 1860 zgrada, a približno isti broj zgrada još je u obradi.

Razvijena metodologija osigurava vrednovanje važnosti prikupljenih karakteristika zgrada i omogućava odabir samo potrebnih s obzirom na željenu razinu procjene oštećljivosti. Nadalje osigurava i utvrđivanje korelacija između prikupljenih podataka o zgradama kako bi se mogle generirati konstrukcijske tipologije i pripadna taksonomija. Zato je izrađen, vrednovan i usvojen algoritam (Poglavlje 4.7.1.; Slika 4.23.) kojim su definirana razredbena pravila karakteristika zgrada i razine važnosti karakteristika za usvajanje konstrukcijskih tipologija.

Na temelju podataka o zgradama iz razvijenog modela izloženosti razvijena je i predložena tipologija zgrada koja se zbog sveobuhvatnosti i ujednačenosti može biti primjenjiva na svim područjima sa sličnim tradicijama gradnje i primjene tehničkih propisa.

Proučavanje izloženosti izgrađenog okoliša rizicima počinje od elementarne stanice urbanog okoliša – zgrade i njezinog odnosa s drugim elementima. Zato je svrha modela izloženosti je generirati točne i pouzdane, široko primjenjive, lako dostupne podatke o karakteristikama zgrada i drugih elemenata potresnog rizika.

Sposobnost vizualizacije ne samo elemenata rizika nego i njihovih karakteristika, kriteriji su koje dodatno suvremeni modeli izloženosti trebaju posjedovati. Za jednostavniju i bržu upotrebu te prezentaciju podataka iz modela izloženosti unaprijeđena metodologija predlaže upotrebu QGIS-a. Svi podatci o prikupljenim karakteristikama zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka implementirani su u QGIS.

Podatci iz izrađenog modela izloženosti grada Osijeka mogu se upotrijebiti za različite svrhe, od planiranja prevencije mogućih šteta od potresa (ili drugih katastrofa) do urbanističkih, društvenih i drugih planiranja.

5. OŠTETLJIVOST ZGRADA ODREĐENA IZ MODELA IZLOŽENOSTI GRADA OSIJEKA

Dijelovi ovog poglavlja objavljeni su u sljedećim publikacijama:

Pavić, Gordana; Hadzima-Nyarko, Marijana; Bulajić, Borko Đ. 2020b.

A Contribution to a UHS-Based Seismic Risk Assessment in Croatia — A Case Study for the City of Osijek. Sustainability 12/5. 1796. doi:10.3390/su12051796

Pavić, Gordana; Hadzima-Nyarko, Marijana; Bulajić, Borko Đ.; Jurković, Željka. 2020a.

Development of Seismic Vulnerability and Exposure Models — A Case Study of Croatia. Sustainability 12/3. 973. doi:10.3390/su12030973

Hadzima-Nyarko, Marijana; Pavić, Gordana; Bulajić, Borko Đ.; Kukaras, Danijel. 2020.

Characteristics of Buildings and Seismic Vulnerability Assessment for the Specific Area of the City of Osijek. IOP conference series. Materials science and engineering 789. 0120237/11. doi:10.1088/1757-899X/789/1/012023

Pavić, Gordana; Hadzima-Nyarko, Marijana; Bulajić, Borko Đ. 2019b.

The Vulnerability of Buildings From the Osijek Database. Frontiers in Built Environment 5. doi.org/10.3389/fbuil.2019.00066

Pavić, Gordana; Hadzima-Nyarko, Marijana; Plaščak, Ivan; Pavić, Sven. 2019a.

Seismic Vulnerability Assessment of Historical Unreinforced Masonry Buildings in Osijek using Capacity Spectrum Method. Acta Physica Polonica A 135. 1138–1141.

Hadzima-Nyarko, Marijana; Kalman Šipoš, Tanja; Pavić, Gordana; Trbojević, Monika; Markasović, Dorotea.

2018b. Potresna oštetljivost i karakteristike zgrada gradskog bloka u Osijeku Zbornik radova VII. Konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa . Ur. Holcinger, Nataša. Zagreb: Državna uprava za zaštitu i spašavanje. 92-100.

Hadzima-Nyarko, Marijana; Pavić, Gordana; Lešić, Marija. 2016.

Seismic Vulnerability of Old Confined Masonry Buildings in Osijek, Croatia. Earthquakes and Structures 1/4. 629-648. doi:10.12989/eas.2016.11.4.629

U 5. poglavlju detaljno je objašnjena predložena unaprijeđena metodologija procjene potresne oštetljivosti zgrada. Unaprijeđenja su implementirana u makroseizmičku metodu jer se za proračun oštetljivosti zgrada ovom metodom potresna opasnost može modelirati kao kontinuirani parametar vrednovan s obzirom na karakteristike temeljnog tla.

Za usvojeno promatrano područje i predložene tipologije iz modela izloženosti grada Osijeka prikazani su rezultati proračuna modifikatora potresnog ponašanja zgrada te modifikatori oštećljivosti zgrada zbog utjecaja karakteristika temeljnog tla za tipove tla C i B koji su, prema dostupnim geološkim kartama (Pikija i dr. 1991, Magaš i dr. 1987), najzastupljeniji na promatranom području.

Nadalje prikazani su rezultati proračuna ukupnog indeksa oštećljivosti te na temelju omjera razreda oštećljivosti i ukupnog indeksa oštećljivosti (Martinez-Cuevas i dr. 2016) provedena raspodjela EMS – 98 razreda oštećljivosti predloženim tipologijama, generiranim iz modela izloženosti grada Osijeka. Dodijeljeni razredi mogu dostatno pouzdano karakterizirati oštećljivost svih zgrada građenih sličnom građevinskom praksom na područjima sa sličnom seizmičnošću i karakteristikama temeljnog tla.

U ovom poglavlju želi se pokazati da je pravilnim definiranjem odnosa između potresne opasnosti, izloženosti i oštećljivosti moguće provesti točniju procjenu potresne oštećljivosti zgrada i primarnog cilja zbog koga se oštećljivost zgrada i procjenjuje, procjene potresnog rizika.

5.1. Uvod

Promatrati oštećljivost moguće je u fizičkom smislu kao vjerojatnost nastanka i utjecaja fizičkih događaja (prirodnih i drugih opasnosti) ili kao socio-ekonomski čimbenik koji određuju sposobnost ljudi nositi se s posljedicama štetnih događaja (Agarwal 2013). Međutim, potresna oštećljivost je daleko sveobuhvatniji koncept od navedenog jer u slučaju potresa, osim fizičkih i socio-ekonomskih, postoje i političke i društvene predispozicije osjetljivosti elemenata rizika da pretrpe štete u slučaju potresa (Barbat i dr. 2010).

U potresnom inženjerstvu oštećljivost predstavlja stupanj oštećenja ili gubitka danoga elementa rizika kao posljedica određene razine opasnosti (Hadzima-Nyarko i dr. 2018b, Hadzima-Nyarko i dr. 2018a). Sposobnost pouzdane procjene oštećljivosti od potresa ključna je za procjenu potresnog rizika jer se na temelju nje mogu predvidjeti štete i žrtve potencijalnog potresa te planirati postupci i mjere za njihovo ublažavanje ili otklanjanje.

Pouzdanost procijeniti odziv zgrada na potresnu uzbuđu i u vezi s tim njihovu oštećljivost složen je problem. Potresna oštećljivost zgrada predstavljena je osjetljivošću konstrukcija na oštećenja, uglavnom kvalitetom i otpornošću konstrukcijskih sustava i materijala. Dostatna nosivost osigurava se

kroz pouzdan ali ekonomičan proračun koji mora dopustiti određena oštećenja, izbjeći nepopravljiva te spriječiti rušenje.

Arhitektonske dispozicije poput tlocrtnih i visinskih nepravilnosti, položaja u prostoru ili u odnosu na susjedne zgrade također su neke od komponenata koje utječu na potresnu oštetljivost. Nepostojanje npr. dostatnih seizmičkih razdjelnica između susjednih zgrada može izazvati značajna lokalna oštećenja ili čak rušenja dijelova zgrada zbog velikog intenziteta sila udara koje se javljaju u potresu.

Kada su izložene potresnom opterećenju, zgrade osciliraju ne samo ovisno o temelju ili krutosti nadzemne konstrukcije, nego i o nosivom i okolnom tlu. Brojna su istraživanja (već spomenuta u ovom radu) koja su pokazala i dokazala da dinamički odziv zgrada na potresnu uzбудu u velikoj mjeri ovisi o karakteristikama tla na kome su izgrađene (temeljene), odnosno da se npr. odziv zgrada temeljenih na mekom tlu može značajno razlikovati od odziva zgrada temeljenih na stjenovitom ili krutom tlu.

U poglavlju 3 dokazano je da na potresni odziv zgrada utječu i karakteristike dubokih geoloških slojeva kao i njihova međudjelovanje s lokalnim slojevima temeljnog tla te da je njihovo istodobno uzimanje u obzir kod predviđanja potresne opasnosti, poboljšanja potresnog odziva zgrada ili kod procjene njihove oštetljivosti sve više nužnost, a ne mogućnost.

Svrha je projektiranja zgrada na potresno djelovanje generirati njihove konstrukcijske, geometrijske i arhitektonske karakteristike tako da imaju očekivano potresno ponašanje unutar propisanih ograničenja, za pretpostavljenu vjerojatnosnu razinu ubrzanja temeljnog tla. Na ovim činjenicama temelje se i istraživanja u ovom doktorskom radu međutim, krajnji cilj i svrha im je pokazati da se jedino uzimanjem u obzir svih činjenica može dobiti dostatno pouzdani proračun oštetljivosti zgrada, a onda i dostatna procjena potresnog rizika.

U radu se predlaže unaprjeđenje proračuna oštetljivosti modelom koji podrazumijeva dvorazinsku analizu oštetljivosti kroz brze i detaljne postupke procjene koji se, ovisno o zahtijevanoj razini žurnosti i preciznosti procjene, mogu provoditi zasebno ili zajedno.

Unaprjeđenje se nadalje odnosi na proračun oštetljivosti u kojem se za proračun modifikatora ponašanja zgrada zbog utjecaja karakteristika temeljnog tla upotrebljavaju UHS spektri i parametri potresne opasnosti izrađeni/proračunati istodobnim uzimanjem u obzir karakteristika lokalnih i dubokih geoloških slojeve temeljnog tla i to područja za koje se procjena potresne oštetljivosti provodi.

Preliminarna istraživanja oštetljivosti ovom metodom pokazala su neprihvatljive rezultate zbog upotrebe faktora regionalne oštetljivosti (ΔV_R) pa se predlaže i ispituje opravdanost izostavljanja ovog faktora u jednadžbi za proračun ukupnog indeksa oštetljivosti (V) (Giovinazzi i Lagomarsino 2001, 2004).

5.2. Makroseizmička metoda za proračun oštetljivosti

Za proračun oštetljivosti zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka odabrana je makroseizmička metoda jer se u njoj potresna opasnost može modelirati kao kontinuirani parametar evaluiran i s obzirom na karakteristike temeljnog tla, unutar modifikatora potresnog ponašanja ΔV_m .

Makroseizmička metoda predložena je u okviru projekta Risk-UE (Giovinazzi i Lagomarsino 2004), a izvorno je izvedena od Giovinazzi i Lagomarsino (2001.) iz definicija koje određuju Europsku makroseizmičku ljestvicu EMS – 98 (Grunthal 1998). Na slici 5.1. prikazana je tablica oštetljivosti (Grunthal 1998) generirana na temelju makroseizmičke ljestvice EMS – 98 (Grunthal 1998). Postupci proračuna koji se upotrebljavaju u ovoj metodi temelje se na klasičnoj teoriji vjerojatnosti i teoriji neizrazitih skupova (engl. *fuzzy set theory*) (Dubois i Parade 1980), a provjera i kalibriranje njezine učinkovitosti provedena je uzimajući u obzir podatke o štetama iz različitih potresa.

Tablica 5.1 Razredi oštetljivosti i vrijednosti pripadnih indeksa oštetljivosti prema EMS – 98 (Giovinazzi 2005)

Razredi oštetljivosti EMS – 98	V_{min}	V^*	V_0	V^+	V_{max}
A	0,78	0,86	0,90	0,94	1,02
B	0,62	0,70	0,74	0,78	0,86
C	0,46	0,54	0,58	0,62	0,70
D	0,30	0,38	0,42	0,46	0,54
E	0,14	0,22	0,26	0,30	0,38
F	-1,02	0,06	0,10	0,14	0,22

gdje je:

V_{min} i V_{max} – gornja i donja granica mogućih vjerojatnosti

V_0 – najvjerojatnija vrijednost za određeni tip zgrade – tipologijski indeks oštetljivosti

V^* i V^+ – vjerojatna područja indeksa V_0 za određeni tip zgrade.

Metoda je modelirana s obzirom na jedinstvenu tipološku razredbu građevina (EMS – 98), reprezentativnu za karakteristike europskih građevina prema kojoj se građevine razvrstavaju u četiri opće tipologije (zidane, armiranobetonske, čelične i drvene) kojima se dodjeljuje šest razreda oštećljivosti od najoštećljivijih (razred A) do najmanje oštećljivih (razred F) (Slika 5.1).

Ova metoda omogućuje procjene oštećljivosti za različite brojne skupove zgrada, od procjena oštećljivosti samo jedne zgrade do procjena nacionalnih, regionalnih i sl. mnogobrojnih fondova zgrada.

Tip konstrukcije		RAZRED OŠTEĆLJIVOSTI					
		A	B	C	D	E	F
ZIDE	lomljeni kamen	Red					
	nepečena opeka	Red	Orange				
	kamen	Yellow	Red				
	krupni kamen		Orange	Red	Yellow		
	nearm. zide s proizved. zidnim elem. od kamena	Yellow	Red	Yellow			
	nearm. zide s armir. bet. stropovima		Orange	Red	Yellow		
	armirano ili omeđeno zide			Yellow	Red	Orange	
ARMIRANI BETON	armir. bet. okviri, neproračun. na djelovanje potresa	Yellow	Orange	Red	Yellow		
	arm. bet. okviri, proračun. na djelov. umjer. potresa		Yellow	Orange	Red	Orange	
	armir. bet. okviri, proračun. na djelov. jakog potresa			Yellow	Orange	Red	Orange
	nosivi zidovi neproračun. na djelov. potresa		Yellow	Red	Orange		
	nosivi zidovi proračun. na djelov. umjer. potresa			Yellow	Red	Orange	
	nosivi zidovi proračun. na djelov. jakog potresa				Yellow	Red	Orange
ČELIK Čelične konstrukcije			Yellow	Orange	Red	Orange	
DRVO Drvene konstrukcije		Yellow	Orange	Red	Orange		
najvjerojatniji razred oštećljivosti		Red					
vjerojatni raspon		Orange					
raspon male vjerojatnosti, iznimni slučajevi		Yellow					

Slika 5.1 Oštećljivosti prema EMS – 98 (Grünthal, 1998)

Oštećljivost se procjenjuje indeksom oštećljivosti (V) s obzirom na tipološke karakteristike zgrada. Makroseizmička metoda pretpostavlja upotrebu karata potresne opasnosti, a opasnost se opisuje makroseizmičkim intenzitetom. Za predviđanje oštećljivosti metoda upotrebljava koncept opažajuće oštećljivosti koji povezuje makroseizmički intenzitet sa srednjim stupnjem oštećenja μ_D .

Međudjelovanje između potresnog djelovanja i očekivane štete izražava se kao srednji stupanj oštećenja μ_D i opisuje zatvorenom analitičkom funkcijom intenziteta. U tablici 5.2 prikazani su izrazi za modeliranje krivulja oštetljivosti predloženi prema različitim autorima. Ove funkcije intenziteta su poluempirijske (Feriche i dr. 2008) jer na temelju uočenih oštećenja u prošlim potresima koreliraju srednji stupanj oštećenja μ_D s potresnom opasnosti na svakom mjestu, koje je iskazano makroseizmičkim intenzitetom I (EMS – 98) i oštetljivošću zgrade tj. indeksom oštetljivosti V .

Tablica 5.2 Izrazi za srednji stupanj oštećenja μ_D predloženi prema različitim autorima

Referenca	Jednadžba
Giovinazzi i Lagomarsino (2001.) Lantada i dr. 2010 Mairo 2015 Azizi-Bondarabadi i dr. 2016	Bernardini i dr. 2007 Vicente i dr. 2014 Athmani i dr. 2015 Athmani i dr. 2018
	$\mu_D = 2,5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6,25V - 13,1}{Q} \right) \right]$ (5.1)
Vicente i dr. 2011 Ferreira i dr. 2017a	$\mu_D = 2,5 + 3 \tanh \left(\frac{I + 6,25V - 12,7}{Q} \right)$ (5.2)
Ferreira i dr. 2017b	$\mu_D = 2,838 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 10,79V - 11,6}{Q} \right) \right]$ (5.3)

gdje je:

I – potresna opasnost definirana makroseizmičkim intenzitetom

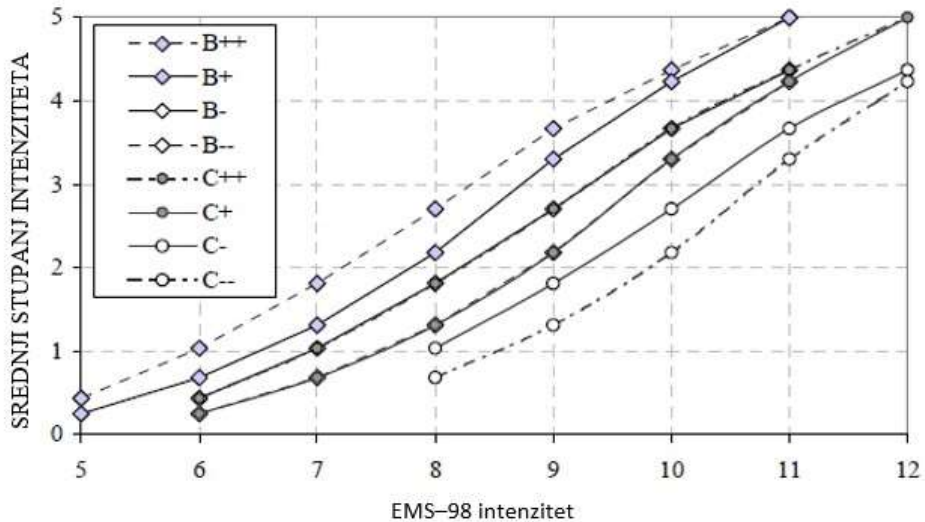
V – indeks oštetljivosti

Q – indeks duktilnosti određenog konstrukcijskog tipa.

Na slici 5.2 (Giovinazzi i Lagomarsino 2006) prikazano je izvođenje krivulja vjerojatnosti oštećenja iz matrica vjerojatnosti oštećenja (EMS – 98) upotrebom izraza (5.1) iz tablice 5.2. Matrice vjerojatnosti oštećenja sadržavaju potresni odziv skupine zgrada generiran kroz statističke raspodjele stupnjeva oštećenja za različite makroseizmičke intenzitete. U diskretnom obliku matrice vjerojatnosti oštećenja, predstavljaju uvjetnu vjerojatnost dobivanja stupnja oštećenja uzrokovanog potresom određenog intenziteta za definirani razred zgrada.

EMS – 98 određeni stupanj oštećenja izražava se lingvističkim pristupom, upotrebljavajući pridjeve „nekoliko“ (engl. *few*), „mnoge“ (engl. *many*) i „većina“ (engl. *most*) u intervalu od 0 – 100 %. Pridjevom „nekoliko“ definira se 5 % zgrada od ukupnog broja oštećenih zgrada, pridjevom „mnoge“ oko 50 %, a pridjevom „većina“ oko 75 % zgrada od ukupnog broja oštećenih zgrada.

Krivulje na slici 5.2 definiraju vjerojatna područja ponašanja i preklapanja za razrede oštećljivosti B i C (EMS – 98).



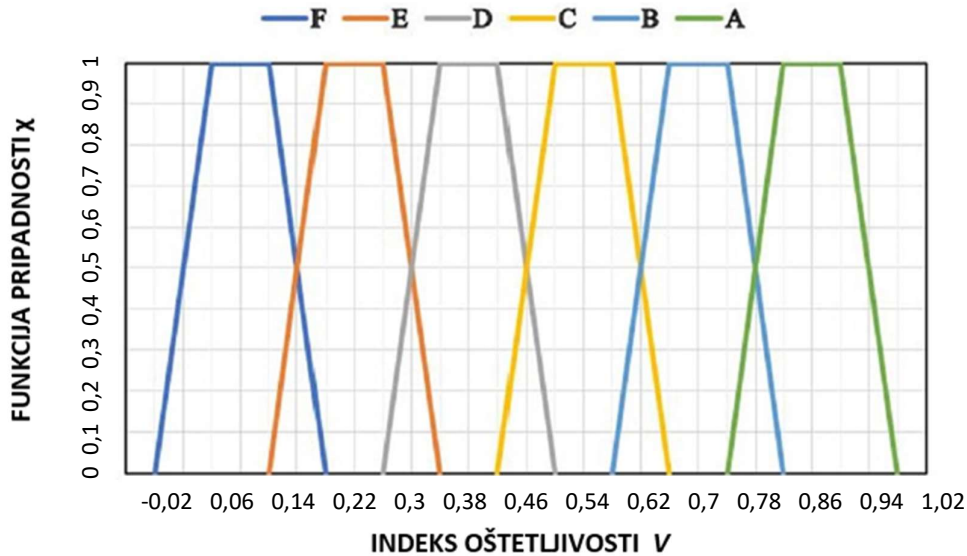
Slika 5.2 Krivulja vjerojatnosti oštećljivosti za razrede oštećljivosti B i C (EMS – 98) (Giovinazzi i Lagomarsino 2006)

Za svaki razred oštećljivosti postoji prihvatljivo područje oštećljivosti i srednje prihvatljivo područje za susjedni razred, odnosno područje između B+ i B- je karakteristično - prihvatljivo za razred B, dok je susjedno područje srednje prihvatljivo za zgrade razreda oštećljivosti B i neprihvatljivo za zgrade razreda oštećljivosti C. Položaj krivulja vjerojatnosti oštećenja određen je vrijednostima indeksa oštećljivosti V . Porast indeksa oštećljivosti za vrijednost $\Delta V = 0,16$ znači isti razred oštećenja za potres čiji je intenzitet manji za jedan stupanj (Giovinazzi 2005).

Indeksom duktilnosti Q procjenjuju se, uzimajući u obzir tipologiju zgrade, i njezine konstrukcijske karakteristike (Lagomarsino i Giovinazzi 2006). Njime se određuje veličina porasta oštećenja s porastom intenziteta te on predstavlja nagib funkcije oštećljivosti. Krivulje oštećljivosti za stambene zgrade, izvedene iz ljestvice EMS – 98, karakterizira indeks duktilnosti $Q = 2,3$ (Basaglia i dr. 2018, Lantada i dr. 2010, Giovinazzi 2005).

Kako bi se razlikovale raspršene distribucije štete, ovisno o broju nesigurnosti koje utječu na procjenu oštećljivosti, Lagomarsino i Giovinazzi (2006.) predlažu upotrebu teorije neizrazitih skupova. Pripadnost zgrade određenom razredu oštećljivosti, primjenom teorije neizrazitih skupova, definira se indeksom oštećljivosti, pri čemu funkcija pripadnosti χ (Lantada i dr. 2010, Giovinazzi 2005) ima

najvjerojatniji (siguran) raspon ($\chi = 1$), koji je linearan i kao takav prikladan za prijelaz između dva susjedna razreda oštećljivosti. Za indeksa oštećljivosti V na slici 5.3 prikazana je funkcija pripadnosti za EMS – 98 razrede oštećljivosti F, E, D, C, B i A.



Slika 5.3 Funkcija pripadnosti indeksa oštećljivosti V za razrede oštećljivosti prema EMS – 98 (Lagomarasino i Giovinazzi 2006)

Neizraziti skup nije ograničen na $-0,02$ kao minimalnu vrijednost niti na $1,02$ kao najveću vrijednost jer se ne želi isključiti mogućnost postojanja zgrade manje potresne otpornosti od one koja pripada razredu A odnosno postojanja zgrada bolje projektiranih od onih u razredu oštećljivosti F.

Sukladno ideji EMS – 98, prema kojoj potresno ponašanje zgrade ne ovisi samo o ponašanju njezinog konstrukcijskog sustava nego uključuje i druge čimbenike, Giovinazzi i Lagomarsino (2001, 2004) te Giovinazzi (2005.) predlažu jednadžbu za ukupni indeks oštećljivosti (V) koji je zbroj najvjerojatnije vrijednosti tipologijskog indeksa, faktora regionalne oštećljivosti i svih modifikatora ponašanja zgrada i drugih karakteristika koje utječu na isto:

$$V = V_0 + \Delta V_R + \Delta V_m \quad (5.4)$$

gdje je:

V – ukupni indeks oštećljivost

V_0 – najvjerojatnija vrijednost tipologijskog indeksa oštećljivosti

ΔV_R – faktor regionalne oštećljivosti

ΔV_m – modifikator potresnog ponašanja zgrade.

Promjenjivost najvjerojatnije vrijednosti tipologijskog indeksa oštećljivosti (V_0) modelira se uvođenjem modifikatora potresnog ponašanja i regionalnog faktora oštećljivosti.

5.2.1. Tipologijski indeks oštećljivosti (V_0)

Najvjerojatnije vrijednosti tipologijskog indeksa oštećljivosti (V_0) ovise o osnovnom konstrukcijskom sustavu odnosno njegovoj otpornosti na horizontalno potresno djelovanje (Milutinović i Trendafilovski 2003). U tablici 5.3 prikazane su vrijednosti indeksa oštećljivosti V_0 prema RISK-UE (Milutinović i Trandafilovski 2003.) za različite tipologije zgrada.

Vrijednosti tipologijskog indeksa oštećljivosti određene su granicama (V^- , V^+) mogućeg područja ($\chi = 1$) te gornjim i donjim granicama mogućih vrijednosti (V_{min} , V_{max}) za ziđe, armiranobetonske, čelične i drvene zgrade. U skladu s vjerojatnim i manje vjerojatnim područjem ponašanja građevina, indeks oštećljivosti konvencionalno se definira u rasponu od $-0,02$ do $1,02$ (Lagomarsino i Giovinazzi 2006). Najoštetljivijim zgradama pridružene su vrijednosti bliske 1, dok vrijednosti blizu 0 odražavaju oštećljivost konstrukcija izgrađenih sukladno najvišim protupotresnim propisima.

Tablica 5.3 Vrijednosti indeksa oštećljivosti V_0 za različite tipove zgrada prema RISK-UE (Lagomarsino i Giovinazzi 2006, Giovinazzi 2005)

Oznaka tipa	Konstrukcijski sustav - materijal	Indeksi oštećljivosti					
		V_{min}	V^-	V_0	V^+	V_{max}	
M1	Lomljeni kamen	0,62	0,81	0,873	0,980	1,02	
M2	Nepečena opeka	0,62	0,687	0,840	0,980	1,02	
M3	Obični kamen	0,46	0,65	0,74	0,830	1,02	
Ziđe	M4	Krupni kamen	0,30	0,49	0,616	0,793	0,86
	M5	Nearmirano ziđe	0,46	0,65	0,740	0,8300	1,02
	M6	Nearmirano ziđe – armirani strop	0,30	0,49	0,616	0,79	0,86
	M7	Armirano/omeđeno ziđe	0,14	0,33	0,451	0,633	0,70

Nastavak tablice 5.3 na sljedećoj stranici

Nastavak tablice 5.3

Oznaka tipa	Konstrukcijski sustav - materijal	Indeksi oštećljivosti					
		V_{min}	V^-	V_0	V^+	V_{max}	
Armirani beton	RC1	Armiranobetonski okviri, neproračunani na djelovanje potresa	0,30	0,49	0,644	0,80	1,02
	RC2	Armiranobetonski okviri proračunani na djelovanje umjerenog potresa	0,14	0,33	0,484	0,64	0,86
	RC3	Armiranobetonski okviri proračunani na djelovanje jakog potresa	-0,02	0,17	0,324	0,48	0,70
	RC4	Nosivi zidovi neproračunani na djelovanje potresa	0,30	0,367	0,544	0,67	0,86
	RC5	Nosivi zidovi proračunani na djelovanje umjerenog potresa	0,14	0,21	0,384	0,51	0,70
	RC6	Nosivi zidovi proračunani na djelovanje jakog potresa	-0,02	0,047	0,224	0,35	0,54
Čelik	S	Čelične konstrukcije	-0,02	0,17	0,324	0,48	0,70
Drvo	W	Drvene konstrukcije	0,14	0,207	0,447	0,64	0,86

5.2.2. Regionalni faktor oštećljivosti (ΔV_R) u proračunu oštećljivosti zgrada

Regionalni faktori oštećljivosti modeliraju oštećljivost zgrada kroz oštećenja koja mogu nastati zbog primjene tradicionalnih konstrukcijskih tehnika i/ili materijala gradnje određene regije. Njima se uzimaju u obzir karakteristike zgrada koje pripadaju određenoj tipologiji regionalne razine (Hadzima-Nyarko i dr. 2018b, Hadzima-Nyarko i dr. 2018a).

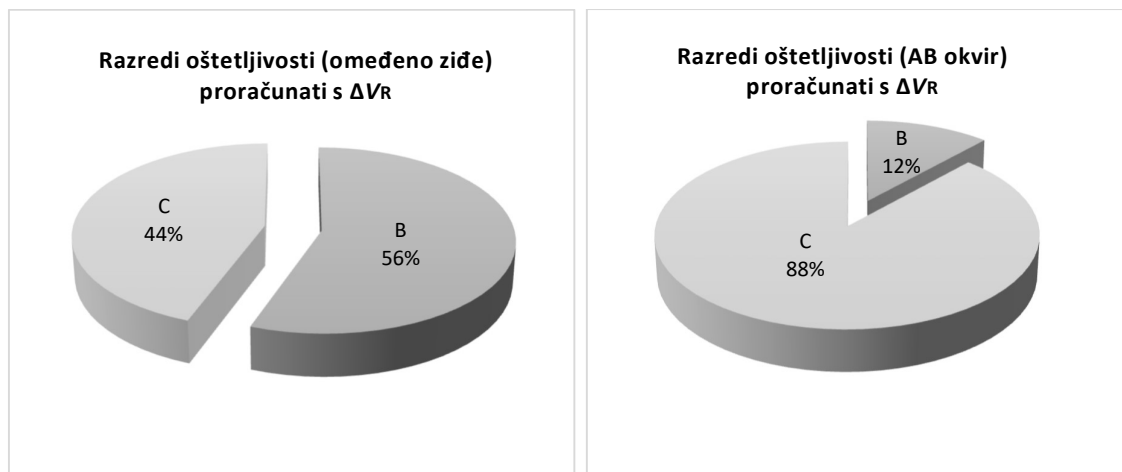
Određuju se empirijski, stručnom prosudbom regionalnih karakteristika zgrada i/ili uočenih podataka o šteti nakon potresa (Milutinović i Trendafiloski 2003) koje ukazuju na bolje ili lošije prosječno potresno ponašanje zgrada u odnosu na ono koje je pretpostavljeno kao uobičajeno. Stručna prosudba treba se temeljiti na preciznim informacijama o regionalnim načinima gradnje, upotrijebljenim materijalima, konstrukcijskim karakteristikama i primijenjenim građevinskim normama. Njihova izmjena je dopuštena pa su do sada predložene granice raspona njihovih vrijednosti prilično različite. Kako bi se moglo bolje opisati potresno ponašanje masivnog kamenog ziđa starih zgrada grada Lisabona, Oliveira i Mendes Victor (1984.) predlažu vrijednost regionalnog faktora oštećljivosti $\Delta V_R = 0,12$.

Ferichou i dr. (2012.) te Feriche (2008.), preporučene vrijednosti ΔV_R , određuju na temelju proračuna oštećenja zgrada nakon potresa u Lorci (Španjolska) 2011. Prema njihovim proračunima, vrijednosti faktora regionalne oštećljivosti trebale bi se nalaziti u intervalu između 0,08 i 0,16, ovisno o tipu zgrade i primjeni potresnih propisa.

Za zgrade Azerbajdžana i dijela Rusije, Tsereteli i dr. (2014.) predlažu sljedeće regionalne faktore oštećljivosti:

- $\Delta V_R = 0,25$ za zidane zgrade i za zgrade koje su zidane običnim kamenom
- $\Delta V_R = 0,15$ za zidane zgrade s armiranobetonskim stropovima koje su građene u skladu s niskom razinom primjene potresnih propisa
- $\Delta V_R = 0,12$ za zidane zgrade s armiranobetonskim stropovima koje su građene u skladu sa srednjom razinom primjene potresnih propisa
- $\Delta V_R = 0$ za armiranobetonske zgrade.

Hadzima-Nyarko i dr. (2016.) proveli su za 111 karakterističnih zidanih zgrada (konstrukcijski sustav - omeđeno zide) iz modela izloženosti grada Osijeka preliminarnu procjenu oštećljivosti. Kako za promatrano područje ne postoje dostupni podaci o oštećenim zgradama u potresima, za modeliranje oštećljivosti usvojene su vrijednosti modifikatora ponašanja karakteristika zgrada prema Milutinović i Trendafiloski (2003.), a regionalni faktori oštećljivosti prema Ferichou i dr. (2012.) za omeđeno zide (0,08). Na slici 5.4 prikazani su postotci zgrada s obzirom na razrede oštećljivosti koji su generirani iz proračuna koji je uzeo u obzir ΔV_R .



Slika 5.4 Postotak zgrada s obzirom na razrede oštećljivosti generirane iz proračuna koji je uzeo u obzir ΔV_R

Prema ukupnom indeksu oštećljivosti koji je proračunan bez ΔV_R svim zidanim i armiranobetonskim zgradama dodijeljen je razred oštećljivosti C, što znači da je 56 % zidanih i 12 % armiranobetonskih zgrada promijenilo razred oštećljivosti za jedan razred kada je u proračunu dodan ΔV_R .

Razmatrajući samo primjenu regionalnih modifikatora ponašanja, uočeno je povećanje oštećljivosti za vrijednost dva razreda i to kod više od polovice razmatranih zgrade. Ovaj rezultat ne može odražavati stvarno stanje ovih zgrada i realno opisati oštećljivost izvedenih razreda oštećljivosti. Većina tih zgrada starija je od 40 godina i više su od pet katova, pa bi trebale imati značajno povećanje, a ne smanjenje potresne otpornosti.

Između ostalih ova zapažanja rezultirala su u posljednje vrijeme da istraživačia potresne oštećljivosti (Rodenas i dr. 2018, Tomas i dr. 2017) prijedlažu uklanjanje parametara čija je kalibracija povezana s određenim područjem, tj. faktorom regionalne oštećljivosti (ΔV_R).

Za proračun oštećljivosti u ovom radu ne uzima se u obzir faktor regionalne oštećljivosti (ΔV_R).

5.2.3. Modifikator potresnog ponašanja (ΔV_m)

Potresno ponašanje zgrada ne ovisi samo o odzivu konstrukcijskog sustava već na njega utječu mnogi drugi čimbenici čiji se utjecaji na ukupno potresno ponašanje zgrada uzimaju u obzir modifikatorom potresnog ponašanja (ΔV_m).

Prvi prijedlozi definiranja i kvantificiranja modifikatora potresnog ponašanja vežu se uz Milutinovića i Trendafilosku (2003.). Njime se kalibrira utjecaj na oštećljivost brojnih čimbenika prepoznatih unutar određene zgrade (Feriche 2012, Martínez-Cuevas 2011, Lantada i dr. 2010, Giovanazzi 2005), kao što su: procjena očuvanosti, razina potresnog projektiranja, nepravilnosti u tlocrtu ili visini, relativan položaj i visinska razlika između obližnjih zgrada, nagib zemljišta i sl. na potresnu uzbudu zgrada (Tomas i dr. 2017).

Modifikatori ponašanja identificirani su empirijski na temelju uočavanja tipičnih obrazaca oštećenja, uzimajući u obzir postojeće baze oštećenja (ATC21 1988, Benedetti i Petrini 1984, UNDP/UNIDO 1985) ili prijedloge stručnjaka (Coburn i Spence 1992).

Za potrebe proračuna oštećljivosti zgrada na području Europe u okviru projekta RISK-UE, Milutinović i Trendafiloski (2003.) predlažu vrijednosti modifikatora ponašanja karakteristika zgrada prikazane u tablicama 5.4 i 5.5 za zidane i armiranobetonske zgrade. Pripadne vrijednosti za modifikaciju dodjeljuju se na temelju stručne prosudbe ili su djelomično kalibrirane usporedbama s prethodnim procjenama oštećljivosti (Giovinazzi i Lagomarsino 2004).

Tablica 5.4 Vrijednosti modifikatora ponašanja zidanih zgrada (Milutinović i Trendafiloski 2003)

KARAKTERISTIKA ZGRADE	OPIS	V_m
Stanje očuvanosti	dobro održavanje	-0,04
	loše održavanje	+0,04
Broj katova	mali (1 ili 2)	-0,02
	srednji (3 – 5)	+0,02
	velik (≥ 6)	+0,06
Konstruktivski sustav	debljina zidova	-0,04 ÷ +0,04
	udaljenost zidova	
	spojevi zidova	
	spojevi horizontalnih dijafragmi i zidova	
Meki kat	rušenje/transparentnost	+0,04
Tlocrtna nepravilnost		+0,04
Nepravilnost po visini		+0,02
Teško opterećeni stropovi		+0,04
Krov	težak krov i krov s potiskom	+0,04
Zahvati pojačanja		-0,08 ÷ +0,08
Protupotresne naprave		-
Položaj prema okolnim zgradama	u nizu	-0,04
	na uglu	+0,04
	na kraju niza	+0,06
Okolne zgrade: visina	izmaknuti stropovi	+0,02
	zgrade s različitim visinama	-0,04 ÷ +0,04
Temelji	različite razine temelja	+0,04
Morfologija tla	nagib	+0,02
	litica	+0,04

Tablica 5.5 Vrijednosti modifikatora ponašanja armiranobetonskih zgrada (Milutinović i Trendafiloski 2003)

KARAKTERISTIKA ZGRADE		RAZINA PROTUPOTRESNOG PRORAČUNA		
		Prije donošenja norme	Norma s umjerenim zahtjevima	Norma s velikim zahtjevima
Razina norme		+0,16	0	-0,16
Loše održavanje		+0,04	+0,02	0
Broj katova	mali (1 ili 2)	-0,04	-0,04	-0,04
	srednji (3 – 5)	0	0	0
	velik (≥ 6)	+0,08	+0,06	+0,04
Tlocrtna nepravilnost	oblik	+0,04	+0,02	0
	torzija	+0,02	+0,01	0
Nepravilnost po visini		+0,04	+0,02	0
Kratki stup		+0,02	+0,01	0
Prozori istureni iz pročelja		+0,04	+0,02	0
Susjedne zgrade (nedovoljan broj čvorova)		+0,04	0	0
Temelji	tračni temelji	-0,04	0	0
	povezani tračni temelji	0	0	0
	temelji samci	+0,04	0	0
Morfolologija tla	kosina	+0,02	+0,02	+0,02
	litica	+0,04	+0,04	+0,04

Poželjna je i daljnja kalibracija modifikatora potresnog ponašanja na temelju novo prikupljenih podataka o šteti i oštetljivosti nakon potresa.

Za proračun modifikatora potresnog ponašanja Giovinazzi (2005.) predlaže izraz:

$$\Delta V_m = \sum_k \Delta V_{m,k} \quad (5.5)$$

gdje je:

ΔV_m – ukupni modifikator potresnog ponašanja zgrade

$V_{m,k}$ – modifikator pojedine karakteristike zgrade.

Prema zahtjevima projekta RISK-UE koeficijenti za modeliranje oštećljivosti moraju biti u stanju predstaviti i pouzdano procijeniti oštećljivost svih tipologija zgrada Europe. Zato su usvajanjem novih spoznaja i na temelju novo prikupljenih podataka o štetama nakon potresa provedene različite validacije i prilagodbe predloženih modifikatora potresnog ponašanja.

U tablicama 5.4 i 5.5 prikazani su temeljni (Milutinović i Trendafiloski 2003), ali i kasnije usvojeni prijedlozi (Martínez-Cuevas i Gaspar-Escribano 2016, Feriche 2012, Lantada i dr. 2010, Giovinazzi 2005) usmjereni prvenstveno na analizu onih parametara koji se odnose na utjecaj različitih arhitektonskih dispozicija u potresnom odzivu zgrada, kao što su: tlocrtne i visinske nepravilnosti, visina u odnosu na susjedne zgrade, duljina pročelja, kratki stupovi i meke prve etaže.

Analizirajući podatke o oštećenjima armiranobetonskih zgrada nakon potresa 2011. u Lorci (Španjolska), Tomas (2017.) zaključuje da parametre RISK-UE za armiranobetonske zgrade (Tablica 5.5) vezane uz razine protupotresnih normi i utjecaj potresa na osnovni period vibracije zgrade treba prilagoditi stvarnom potresnom ponašanju armiranobetonskih zgrade, kako bi se one razlikovale od ponašanja nearmiranog zida. Predložene modifikacije vrijednosti modifikatora potresnog ponašanja armiranobetonskih zgrada prikazane su u tablici 5.6.

Tablica 5.6 Prijedlog novih vrijednosti pojedinih modifikatora ponašanja armiranobetonskih zgrada (Tomas 2017.)

KARAKTERISTIKA ZGRADE		RAZINA PROTUPOTRESNOG PRORAČUNA			
		Prije donošenja norme	Norma s malim zahtjevima	Norma s umjerenim zahtjevima	Norma s velikim zahtjevima
Razina norme		+0,16	+0,08	0	0
Broj katova	0 – 3	+0,04	+0,04	+0,04	0
	4 – 7	0	0	0	0
	≥ 8	+0,04	+0,04	+0,04	+0,04
Susjedne zgrade (nedovoljan broj čvorova)		+0,04	+0,04	+0,04	0
Meki kat		+0,2	+0,2	+0,2	+0,2

5.3. Utjecaj karakteristika temeljnog tla na oštetljivost zgrada

Oštetljivost zgrada ovisi o konstrukcijskim i drugim svojstvima analiziranih zgrada, međutim za generiranje preciznijih podataka o oštetljivosti, važno je uzeti u obzir i učinke koje potresna uzbuda izaziva u slojevima temeljnog tla. Utjecaj karakteristika temeljnog tla na intenzitet potresnog djelovanja (posljedično i na oštetljivost zgrada) detaljno je opisan u poglavlju 3, a stečene spoznaje i proračunati rezultati upotrijebit će se za modeliranje oštetljivosti u ovom poglavlju.

Kako se makroseizmičkom metodom potresna opasnost definira kao kontinuirani parametar generiran s obzirom na karakteristike tla, mogući učinci amplifikacije zbog različitih svojstava slojeva temeljnog tla, u ovoj metodi uzimaju se u obzir unutar modifikatora potresnog ponašanja ΔV_s .

5.3.1. Intenzitet kao parametar potresne opasnosti za predviđanje oštetljivosti zgrada

Koncept makroseizmičke metode za predviđanje potresne oštetljivosti upotrebljava makroseizmički intenzitet kao parametar koji predstavlja potresnu opasnost. Makroseizmički intenzitet se generira iz empirijskih postavki koje kvantificiraju međuodnos površinske geologije i prirasta intenziteta (TC4-ISSMGE 1993, 1999).

Upotreba makroseizmičkog intenziteta za modeliranje procjene potresne oštetljivosti često se osporava (Kassem i dr. 2020, Lagomarasino i Giovinazzi 2006) jer je:

- makroseizmička ljestvica po definiciji diskretna - dopušta samo cjelobrojne vrijednosti
- intenzitet kontinuirani parametar
- makroseizmička mjera subjektivna - temelji se na sintezi osobnih prosudbi mnogih promatrača što rezultira kvalitativnim mjerama
- makroseizmička mjera ograničena - ovisi o procjeni pojedinih tipologija zgrada i njihovoj pojavnosti (brojnosti) te određenoj razini štete.

Prema Giovinazzi (2005.), prigovor da intenzitet nije valjan parametar za karakterizaciju potresne opasnosti jer je diskretna veličina, može se prevladati imajući na umu da se čak i srednje vrijednosti, koje nemaju značenje u makroseizmičkom istraživanju, mogu upotrijebiti za predviđanje oštetljivosti.

Zanemaruje se nadalje da u proračunima potresne opasnosti zakoni atenuacije daju kontinuirane vrijednosti, dok se intenzitet kao kontinuirani parametar osporava.

Činjenica je, međutim, da procjena potresne opasnosti intenzitetom ne može iskoristiti nove spoznaje seizmoloških istraživanja fizikalno-mehaničkih karakteristika mehanizama potresa niti dostatno precizno fizički karakterizirati potresnu opasnost (PGA, pomake i spektra ubrzanja).

Nadalje, makroseizmički intenzitet kao parametar koji predstavlja potresnu opasnost ne uzima u obzir moguće utjecaje dubokih slojeva temeljnog tla na veličinu potresne opasnosti kao ni njihovu interakciju s lokalnim slojevima temeljnog tla te njihov utjecaj na povećanje/smanjenje intenziteta.

Još od 60-tih godina prošlog stoljeća postoje inicijative Medvedeva (1962.), Everdndena i Thomsona (1985.) i dr. kojima je cilj bio preciznije određivanje makroseizmičkog intenziteta. Kako bi pouzdanije definirali korelaciju između geoloških slojeva i prirasta intenziteta, Medvedev (1962.), Everdnden i Thomson (1985.) i dr. tlo razvrstavaju u različito definirane razrede tla, međutim te razredbe, ali niti današnje, ne uzimaju u obzir duboke geološke slojeve tako da proračunati prirasti sadržavaju samo doprinose moguće amplifikacije/deamplifikacije lokalnih (plićih) slojeva tla.

Uobičajena je praksa da se amplifikacije lokalnih slojeva temeljnog tla uzimaju u obzir tako da se za jedan stupanj poveća intenzitet procijenjen na stijeni (TC4-ISSMFE 1993). Giovinazzi i Lagomarsino (2004.) ukazuju da je nediferencirano povećanje intenziteta za određenu vrstu tla netočno jer ne dopušta uzimanje u obzir razlika u dinamici amplifikacije povezane s osnovnom frekvencijom tla i zgrade, te predlažu uzimanje u obzir mogućeg dinamičkog pojačanja u smislu modifikatora oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika tla (ΔV_s).

5.3.2. Modifikator oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika tla (ΔV_s)

Modifikatorom oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika tla (ΔV_s) uzimaju se u obzir učinci amplifikacije tla (prema Giovinazzi i Lagomarsino (2004.) samo lokalnih slojeva temeljnog tla) te karakteristike izgrađenog okoliša, pri čemu se razmatraju odvojeno učinci na zidane i armiranobetonske zgrade razvrstane po visini.

Promjena indeksa oštećljivosti ΔV_s odgovara, prema formuli predloženoj u makroseizmičkoj metodi za opisivanje krivulja oštećljivosti (5.1), promjeni tj. prirastu makroseizmičkog intenziteta ΔI te se proračunava prema izrazu (Giovinazzi i Lagomarsino 2004):

$$\Delta V_s = \frac{\Delta I}{6,25} \quad (5.6)$$

gdje je:

ΔV_s – modifikator oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika tla

ΔI – prirast intenziteta.

Prirast intenziteta ΔI odgovara množitelju faktora ubrzanja (Midorikawa 1987) f_{PGA} kojim se opisuje korelacija površinske geologije i PGA. Guagenti i Petrini (1989.) za odnos između prirasta intenziteta i množitelja faktora ubrzanja predlažu izraz:

$$\Delta I = \frac{\ln(f_{PGA})}{0,602} \quad (5.7)$$

gdje je:

f_{PGA} – množitelj faktora ubrzanja.

Giovinazzi i Lagomarsino (2004.) preporučuju proračun množitelja faktora ubrzanja f_{PGA} s obzirom na elastični spektar odziva HRN EN 1998-1:2011/NA koji se odnosi na stjenovito tlo (tip tla A (HRN EN 1998-1:2011/NA)) tako da se za osnovni period oscilacije zgrade generira vrijednost iste potresne uzbude koja bi bila izazvana na promatranom tlu (koje nije stjenovito). Predlažu izraz za f_{PGA} koji predstavlja omjer mogućeg potresnog djelovanja na promatranu tipologiju zgrade (osnovnog perioda oscilacije T) izgrađenu na određenom tipu tla (k) i za istovjetnu zgradu kao da je izgrađen na stijeni (tip tla A, prema HRN EN 1998-1:2011/NA):

$$f_{PGA} = \frac{S_{ae}(T)_{(k)}}{S_{ae}(T)_{(A)}} \quad (5.8)$$

gdje je:

$S_{ae}(T)_{(k)}$ – amplituda elastičnog spektra odziva perioda T za promatrani tip tla

$S_{ae}(T)_{(A)}$ – amplituda elastičnog spektra odziva perioda T za referentni tip tla A (stijena) prema HRN EN 1998-1:2011/NA.

Proučavajući koncept makroseizmičke metode, povlačeći paralelu s istraživanjima provedenim u ovom radu i mogućnostima primjene dosadašnjih rezultata, predlaže se u ovom dijelu unaprjeđenje proračuna makroseizmičke metode. Za proračun množitelja faktora ubrzanja f_{PGA} predlaže se, umjesto HRN EN 1998-1:2011/NA spektara, upotreba spektralnih amplituda UHS spektara, promatranog

područja generiranih iz regionalnih atenuacijskih jednadžbi predloženih u ovom radu koje istovremeno uzimanju u obzir karakteristike lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva područja koje se istražuje.

Nadalje, za brze procjene oštećljivosti ili procjene koje ne zahtijevaju maksimalan stupanj pouzdanosti, predlaže se kod proračuna f_{PGA} upotreba empirijskih koeficijenata za skaliranje spektralnih amplituda proračunatih za područja za koje se proračun oštećljivosti izrađuje. Vrijednosti ovako proračunatog f_{PGA} ne razlikuju se značajno od vrijednosti proračunatih na temelju UHS spektara, ali se znatno ubrzava postupak proračuna zaobilazeći kompletni postupak mikrozoniranja. Osim toga, upotrebom ovih koeficijenata moguća je procjena oštećljivosti na područjima na kojima nije provedeno mikrozoniranje, a koja imaju slične ili iste karakteristike temeljnog tla i seizmičnosti.

5.4. Proračun parametara oštećljivosti pojedinačnih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka

Jedno od predloženih unaprjeđenja metodologije procjene potresnog rizika za zgrade podrazumijeva mogućnost analize potresnog rizika na dvije razine. Zato su parametri oštećljivosti u ovom poglavlju paralelno proračunati za obje razine procjene.

Proračun ukupnog indeksa oštećljivosti proveden je prema reduciranom izrazu (5.4) koji su predložili Giovinazzi i Lagomarsino (2001, 2004) te Giovinazzi (2005.). Iz usvojenog izraza izostavljen je faktor regionalne oštećljivosti (ΔV_R) zbog rezultata preliminarnih proračuna oštećljivosti i analize utjecaja faktora regionalne oštećljivosti na njih, opisanih u poglavlju 5.2.2.

Nadalje, kod proračuna ukupnog indeksa oštećljivosti zgrada usvojen je kao jedan od modifikatora oštećljivosti, modifikator oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika temeljnog tla ($V_{s,n}$) (Giovinazzi i Lagomarsino 2001, 2004, Giovinazzi 2005). Za proračun $V_{s,n}$ uvedena je modifikacija upotrebom koeficijenata za skaliranje horizontalnih amplituda PSA i UHS spektara, proračunatih u poglavlju 3 i prikazanih u tablici 3.9. Ovi koeficijenti i UHS spektri generirani su uzimajući istodobno u obzir karakteristike plitkih i dubokih lokalnih geoloških slojeva temeljnog tla.

Kako bi se oštećljivost mogla procijeniti s obzirom na stvarne karakteristike temeljnog tla, $V_{s,n}$ je proračunat za oba moguća tipa temeljnog tla na promatranom području (C i B).

Proračun ukupnog indeksa oštećljivosti za pojedinačnu zgradu proveden je prema izrazu:

$$V = V_0 + \sum_k V_{m,k} + V_{s,n} \quad (5.5)$$

gdje je:

V – indeks oštećljivosti

V_0 – najvjerojatnija vrijednost tipologijskog indeksa oštećljivosti za zgradu

$V_{m,k}$ – modifikator potresnog ponašanja pojedine karakteristike (k) zgrade

$V_{s,n}$ – modifikator oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika tipa temeljnog tla (s) zgrade s brojem katova (n).

5.4.1. Najvjerojatnije vrijednosti tipologijskih indeksa oštećljivosti (V_0)

Najvjerojatnije vrijednosti tipologijskih indeksa oštećljivosti V_0 za proračun ukupnog indeksa oštećljivosti zidanih i armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka usvojene su prema tablici 5.3 (Milutinović i Trandafilovski 2003, Lagomarsino i Giovinazzi 2006, Giovinazzi 2005). Zgrade su u tablici 5.7 razvrstane prema tipologijama predloženim u ovom radu.

Tablica 5.7 Usvojene vrijednosti indeksa oštećljivosti V_0 za zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka (prema Milutinović i Trandafilovski 2003, Lagomarsino i Giovinazzi 2006, Giovinazzi 2005)

Tipologija		Konstruktivni sustav	Predložena tipologija	V_0			
ZIDE	Nearmirano zide	Opeka starog formata	Fleksibilan	NAZ_OSF_F_N NAZ_OSF_F_S	0,740 0,740		
			HORIZONTALAN	Fleksibilan	NAZ_O_F_N NAZ_O_F_S	0,740 0,740	
		Opeka		Krut	NAZ_O_K_N NAZ_O_K_S NAZ_O_K_V	0,616 0,616 0,616	
				Omeđeno zide	Krut	OZ_K_N	0,451
						OZ_K_S	0,451
		OZ_K_V	0,451				

Nastavak tablice 5.7 na sljedećoj stranici

Nastavak tablice 5.7

Tipologija	Konstrukcijski sustav	Predložena tipologija	V_0			
			Neproračunan na djelovanje potresa	Proračunan na djelovanje umjerenog potresa	Proračunan na djelovanje jakog potresa	
ARMIRANI BETON	VERTIKALAN	Zid	AB_Z_N	0,544	0,384	0,224
			AB_Z_S			
			AB_Z_V			
		Okvir	AB_O_N	0,644	0,484	0,324
			AB_O_S			
			AB_O_V			
Dvojni sustav	AB_DS_S	0,644	0,484	0,324		
	AB_DS_V					

5.4.2. Rezultati proračuna modifikatora potresnog ponašanja zgrada (ΔV_m)

Prema tablicama 5.4 i 5.5 (Milutinović i Trendafiloski 2003) za modeliranje potresnog ponašanja zgrada, predlaže se 14 karakteristika za zidane i 10 karakteristika za armiranobetonske zgrade. Iako su karakteristike zgrada za model izloženosti grada Osijeka prikupljane na licu mjesta, neki podatci koji se prema tablicama 5.4 i 5.5 predlažu za modeliranje ukupnog modifikatora potresnog ponašanja zgrada (ΔV_m), npr. debljina zidova, karakteristike temelja, podatci o pojačanjima i sl. nisu mogli biti evidentirani bez uvida u projektnu i drugu dokumentaciju pa ih model izloženosti ne sadržava i zato nisu upotrijebljeni u proračunu.

Za modeliranje ukupnog modifikatora potresnog ponašanja zgrada iz modela izloženosti usvojene su prema tablicama 5.4 i 5.5 sljedeće karakteristike zgrada:

- za zidane zgrade: stanje očuvanosti krov
 broj katova morfologija tla
 tlocrtna nepravilnost položaj u bloku zgrada
 nepravilnost po visini

- za armiranobetonske zgrade: razina norme nepravilnost po visini
 broj katova morfologija tla
 tlocrtna nepravilnost

Zbrajanjem pripadnih vrijednosti $V_{m,k}$ usvojenih modifikatora ponašanja svake zgrade, proračunate su vrijednosti ukupnog modifikatora potresnog ponašanja ΔV_m svih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka.

Tablica 5.8 Rasponi proračunatih vrijednosti i prosječne vrijednost ΔV_m , niskih zidanih i srednje visokih armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka

Modifikatori potresnog ponašanja zgrada (ΔV_m) iz modela izloženosti grada Osijeka							
Niske zidane zgrade	Katnost zgrada	Raspon vrijednosti	Prosječna vrijednost	Srednje visoke AB zgrade	Katnost zgrade	Raspon vrijednosti	Prosječna vrijednost
NAZ_OSF_F_N	1	0,02 – 0,10	0,061	AB_Z_S	4	-0,16 – 0,02	-0,07
	2	0,02 – 0,06	0,059		5	0,02 – 0,04	0,04
NAZ_O_F_N	1	-0,16 – 0,16	0,056	AB_O_S	4	0,02 – 0,20	0,11
	2	-0,02 – 0,16	0,055		5	-0,16 – 0,02	-0,004
NAZ_O_K_N	1	-0,02 – 0,02	0,069	AB_DS_S	6	-0,10 – 0,28	-0,009
	2	-0,06 – 0,16	0,096		6	0,024	0,024
OZ_K_N	1	-0,06 – 0,16	0,034				
	2	-0,06 – 0,16	0,029				

U tablici 5.8 prikazani su rasponi proračunatih vrijednosti i prosječne vrijednost ΔV_m niskih zidanih i srednje visokih armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka. Rasponi su prikazani s obzirom na pripadnosti zgrada u usvojene tipologije.

Iz prikazanih rezultata u tablici 5.8 može se zaključiti da najveći raspon vrijednosti modifikatora potresnog ponašanja imaju nearmirane, opekom zidane zgrade, s fleksibilnom stropnom konstrukcijom (NAZ_O_F_N) koje imaju samo 1 kat. Najveća prosječna vrijednost ΔV_m je 0,096 za zgrade s 2 kata tipologije NAZ_O_K_N, dok je najmanja prosječna vrijednost ΔV_m od -0,07 proračunata za armiranobetonske zgrade sa zidovima visine 4 kata.

5.4.3. Proračun modifikatora oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika tla ($V_{s,n}$)

Makroseizmičkom metodom potresna opasnost definirana je kao kontinuirani parametar generiran s obzirom na karakteristike tla, a mogući učinci amplifikacije zbog različitih karakteristika temeljnog tla uzimaju se u obzir unutar indeksa oštećljivosti V_m .

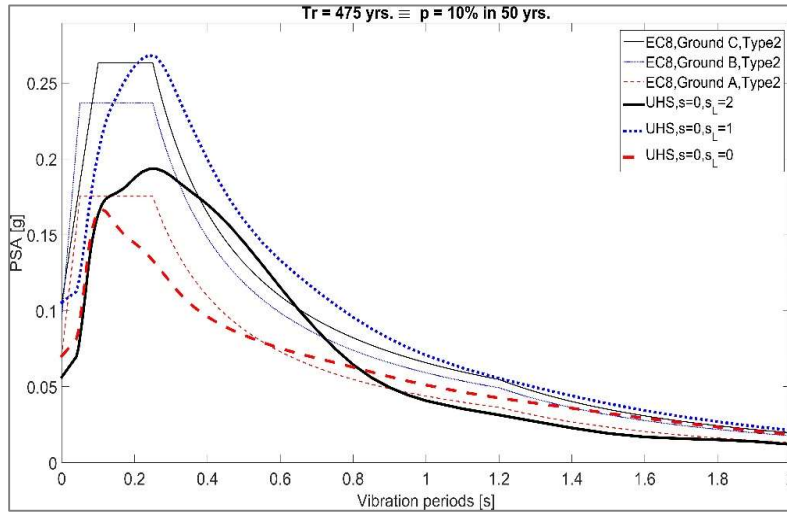
Iako je postojećim postupkom proračuna oštećljivosti tlo uvršteno kao parametar oštećljivosti, u obzir se uzimaju učinci samo plitkih slojeva temeljnog tla (do 30 m). Za proračun oštećljivosti zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka uzeti su u obzir i duboki slojevi temeljnog tla.

Temeljno tlo usvojenog promatranog područja sastoji se uglavnom od pjeskovito-ilovasto-lesnog lokalnog tla i dubokih naslaga geoloških sedimenata (Banak i dr. 2016) što je približno prema razredbi HRN EN 1998:2011 tlo tip C. Pretpostavlja se da bi temeljno tlo nekih dijelova promatranog područja možda moglo biti i tip B prema istoj razredbi.

Za proučavanje utjecaja karakteristika lokalnih i dubokih slojeva temeljnog tla na oštećljivost zgrada promatranog područja odabrane su kombinacije dubokih geoloških sedimenata ($s = 0$) s lokalnim slojevima temeljnog tla i to krutim tlom ($s_L = 1$) i dubokim lokalnim tlom ($s_L = 2$) koje bi se približno mogle okarakterizirati kao tipovi tla B i C prema HRN EN 1998:2011.

Kao referentna kombinacija slojeva temeljnog tla, približno jednaka tipu tla A prema HRN EN 1998:2011 usvojena je kombinacija dubokih geoloških sedimenata ($s = 0$) s lokalnim stjenovitim tlom ($s_L = 0$).

Za promatrano područje i usvojene referentne kombinacije lokalnih i dubokih slojeva temeljnog tla izrađeni su UHS spektri (Slika 5.5) pri čemu je upotrijebljena u poglavlju 3.6.3. predložena jednadžba 3.22 u kojoj je R epicentralna udaljenost, a koeficijenti za skaliranje određeni su na temelju horizontalnih komponenta ubrzanja snimljenih na raznim udaljenostima od epicentra do mjernog mjesta (akcelerografske stanice). Izrađeni UHS spektri na slici 5.5 uspoređeni su s elastičnim spektrima odziva tipa 2 prema HRN EN 1998:2011.



Slika 5.5 Spektri jednolike opasnosti proračunati za koordinate 45°32' N, 18°23' E za $T_r= 475$ godina i spektri HRN EN 1998:2011 tip 2 za tlo tipa A, B i C

Kako je navedeno u prijašnjim poglavljima, promatrano područje male je do srednje seizmičnosti s do sada zabilježenim magnitudama manjim od 5,5 pa je za usporedbu s dobivenim UHS spektrima za promatrano područje upotrijebljen preporučeni elastični spektar odziva tipa 2 (HRN EN 1998:2011). Vrijednosti parametara tipova temeljnog tla koje u HRN EN 1998:2011 opisuju elastični spektar odziva tipa 2 ($M_s \leq 5,5$), a koje su usvojene za potrebe ovog istraživanja prikazane su u tablici 5.9.

Tablica 5.9 Vrijednosti parametara za spektar odziva tipa 2 (HRN EN 1998:2011)

Tip temeljnog tla	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,05	0,25	1,2
B	1,35	0,05	0,25	1,2
C	1,5	0,10	0,25	1,2
D	1,8	0,10	0,30	1,2
E	1,6	0,05	0,25	1,2

Za predložene tipologije zidanih i armiranobetonskih zgrada (Tablica 4.9, Poglavlje 4.7.2.) proračunati su osnovni periodi oscilacija T_1 prema izrazu (5.10) danom u nacionalnom dodatku HRN EN 1998:2011 za zidane zgrade te izrazu (5.11) koji su predložili Jalali i Milani (2005.) za armiranobetonske zgrade:

$$T_1 = 0,016 \cdot H \quad (5.10)$$

$$T_1 = 0,026 \cdot H^{0,85} \quad (5.11)$$

gdje je:

H – visina zgrade u metrima od temelja ili gornjeg ruba krutog podruma (HRN EN 1998:2011).

U tablici 5.10 prikazani su proračunati osnovni periodi oscilacija T_1 prema izrazu (5.10) za zidane zgrade, a u tablici 5.11 osnovni periodi oscilacija T_1 proračunati za armiranobetonske zgrade prema izrazu 5.11.

Tablica 5.10 Osnovni periodi oscilacija T_1 prema izrazu (5.10) (HRN EN 1998:2011) za zidane zgrade

Osnovni periodi oscilacija - zidane zgrade					
broj katova	T_1	broj katova	T_1	broj katova	T_1
1	0,048	4	0,192	7	0,336
2	0,096	5	0,240	8	0,384
3	0,144	6	0,288	9	0,432

Tablica 5.11 Osnovni periodi oscilacija T_1 prema izrazu (5.11) za armiranobetonske zgrade

Osnovni periodi oscilacija - armiranobetonske zgrade							
broj katova	T_1	broj katova	T_1	broj katova	T_1	broj katova	T_1
1	0,066	6	0,303	11	0,508	16	0,698
2	0,119	7	0,346	12	0,547	17	0,735
3	0,168	8	0,387	13	0,585	18	0,770
4	0,215	9	0,428	14	0,623	19	0,808
5	0,260	10	0,468	15	0,661		

5.4.3.1. Rezultati proračuna množitelja faktora ubrzanja pojedinačnih zgrada ($f_{PGA,S,n}$)

Za proračun $f_{PGA,S,n}$ – množitelja faktora ubrzanja na tipu temeljnog tla (s) za zgradu s brojem katova (n) koji predstavlja omjer spektralnih amplituda ubrzanja i osnovnog perioda oscilacije zgrade (T_1), upotrijebljeni su koeficijenti za skaliranje horizontalnih amplituda PSA, prikazani u tablici 3.9 (Poglavlje 3.6.3.). Ovi koeficijenti generirani su kroz regresijske proračune upotrebom horizontalnih komponenta ubrzanja snimljenih na svim udaljenostima od epicentra do mjernog mjesta.

Množitelji faktora ubrzanja proračunati su za obje kombinacije slojeva temeljnog tla:

($s = 0$) ($s_L = 1$) za potrebe usporedbe \approx tlo B (HRN EN 1998-1:2011)

($s = 0$) ($s_L = 2$) za potrebe usporedbe \approx tlo C (HRN EN 1998-1:2011).

Unaprjeđenje metodologije procjene potresne oštetljivosti zgrade koja se predlaže u ovom radu, predlaže i mogućnost procjene oštetljivosti na 2 razine ovisno o zahtjevu (samo brza, samo detaljna ili kombinirana procjena) ili potrebnoj preciznosti procjene.

Tablica 5.12 Vrijednosti množitelj faktora ubrzanja ($f_{PGA,s,n}$) za brzu i detaljnu procjenu oštetljivosti zidanih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka

Množitelj faktora ubrzanja ($f_{PGA,s,n}$) za zidane zgrade						
Broj katova	Zgrade	T_1	Brza procjena oštetljivosti		Detaljna procjena oštetljivosti	
			c_5 $s = 0$ $s_L = 2$	c_4 $s = 0$ $s_L = 1$	UHS $s = 0$ $s_L = 2$	UHS $s = 0$ $s_L = 1$
1	Niske	0,048	0,872	1,338	0,873	1,337
2		0,096	0,992	1,237	0,993	1,237
3	Srednje visoke	0,144	1,107	1,480	1,107	1,480
4		0,192	1,265	1,761	1,264	1,761
5		0,240	1,424	1,976	1,424	1,976
6	Visoke	0,288	1,542	2,098	1,543	2,009
7		0,336	1,687	2,140	1,687	2,140
8		0,384	1,750	2,109	1,751	2,109
9		0,432	1,778	2,006	1,778	2,005

Kako bi se mogli generirati rezultati za obje razine procjene potresnog rizika i oštetljivosti, vrijednosti množitelja faktora ubrzanja proračunate su za brzu i preciznu procjenu oštetljivosti. Proračun $f_{PGA,s,n}$ za detaljnu procjenu oštetljivosti temelji se na provedenom mikrozoniranju promatranog područja i UHS spektrima. Proračunate vrijednosti $f_{PGA,s,n}$ za brzu i detaljnu procjenu oštetljivosti prikazane su u tablici 5.12 za zidane zgrade i u tablici 5.14 za armiranobetonske zgrade.

Iz rezultata proračuna množitelja faktora ubrzanja za zidane zgrade prikazanih u tablici 5.10 može se primijetiti bitno drugačije ponašanje usvojenih kombinacija slojeva temeljnog tla, odnosno znatno veće vrijednosti amplifikacije za kombinaciju tla ($s = 0$) ($s_L = 1$).

Za tlo C ($s = 0$) ($s_L = 2$) vrijednosti $f_{PGA,s,n}$ su najmanje za zgrade čiji su osnovni periodi oscilacija blizu 0 s, zatim se povećavaju do $T_1 = 0,432$ s i postepeno smanjuju nakon tog perioda. Najniža vrijednost $f_{PGA,s,n}$ za tlo B ($s = 0$) ($s_L = 1$) je oko $T_1 = 0,144$ s, zatim se nelinearno povećava do $T_1 = 0,366$ s te postepeno smanjuje nakon tog perioda.

Tablica 5.13 Vrijednosti f_{PGA} na temelju geoloških karakteristika temeljnog tla (Midorikawa 1987)

Midorikawa (1987.)	f_{PGA} na temelju geoloških karata
Tlo iz razdoblja holocena	3,0
Tlo iz razdoblja pleistocen	2,1
Tlo iz razdoblja kvartara (vulkanske stijene)	1,6
Tlo iz razdoblja miocena	1,5
Tlo iz razdoblja pred - tercijara	1,0

Za generiranje vrijednosti množitelja faktora ubrzanja smatra se primjenjivim i pristup u kome se vrijednosti amplifikacije proračunavaju na temelju podataka o karakteristikama tla iz široko dostupnih geoloških karata. Vrijednosti f_{PGA} proračunate na temelju geoloških karata koje predlaže Midorikawa (1987.) prikazane su u tablici 5.13.

Za promatrano područje dostupni su geološki podatci (poglavlje 3.2.2.) pa je provedena usporedba (Tablica 5.12) proračunatih vrijednosti $f_{PGA,s,n}$ s vrijednostima f_{PGA} koje predlaže Midorikawa (1987.) za temeljno tlo usporedivo s temeljnim tlom promatranog područja. Usporedba je rezultirala zaključkom da se proračunati rezultati slažu s prijedlozima u tablici 5.13 te da je osobito velika podudarnost s vrijednostima koje se odnose na kombinaciju tla ($s = 0$) ($s_L = 2$).

Drugačije ponašanje usvojenih kombinacija slojeva temeljnog tla može se uočiti i iz rezultata proračuna množitelja faktora ubrzanja za armiranobetonske zgrade prikazanih u tablici 5.14.

Za obje kombinacije temeljnog tla najmanje vrijednosti $f_{PGA,s,n}$ su za zgrade čiji su osnovni periodi oscilacija blizu 0 s, zatim se povećavaju do $T_1 = 0,468$ s. Nakon tog perioda vrijednosti $f_{PGA,s,n}$ postepeno se smanjuju prema vrijednostima sličnim za $T_1 = 0$.

Provedena je i usporedba proračunatih vrijednosti $f_{PGA,s,n}$ za armiranobetonske zgrade s vrijednostima f_{PGA} na temelju geoloških karata (Midorikawa 1987). Zaključeno je da se i ove proračunate vrijednosti slažu s prijedlozima u tablici 5.13 te da je i kod f_{PGA} za armiranobetonske

zgrade osobito velika podudarnost s vrijednostima koje se odnose na kombinaciju temeljnog tla ($s = 0$) ($s_L = 2$).

Tablica 5.14 Vrijednosti množitelj faktora ubrzanja ($f_{PGA,s,n}$) za brzu i detaljnu procjenu oštećljivosti armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka

Množitelj faktora ubrzanja ($f_{PGA,s,n}$) za armiranobetonske zgrade						
Broj katova	Zgrade	T_1	Brza procjena oštećljivosti		Detaljna procjena oštećljivosti	
			c_5 $s = 0 \quad s_L = 2$	c_4 $s = 0 \quad s_L = 1$	UHS $s = 0 \quad s_L = 2$	UHS $s = 0 \quad s_L = 1$
1	Niske	0,066	0,918	1,192	0,919	1,193
2		0,119	1,048	1,350	0,148	1,351
3		0,168	1,200	1,662	1,200	1,662
4	Srednje visoke	0,215	1,297	1,804	1,297	1,804
5		0,260	1,485	2,048	1,485	2,049
6		0,303	1,596	2,125	1,596	2,124
7		0,346	1,687	2,140	1,687	2,140
8	Visoke	0,387	1,750	2,109	1,751	2,109
9		0,428	1,778	2,043	1,778	2,042
10		0,468	1,769	1,970	1,770	1,971
11		0,508	1,730	1,902	1,729	1,902
12		0,547	1,646	1,829	1,645	1,830
13		0,585	1,533	1,770	1,534	1,769
14		0,623	1,533	1,770	1,534	1,769
15		0,661	1,404	1,710	1,404	1,710
16		0,698	1,269	1,644	1,269	1,644

5.4.3.2. Rezultati proračuna prirasta intenziteta pojedinačnih zgrada ($\Delta I_{s,n}$)

Izraz (5.7) upotrijebljen je za proračun omjera prirasta intenziteta i množitelja faktora ubrzanja. Vrijednosti prirasta intenziteta proračunate su za temeljno tlo tipa B i C, a rezultati proračuna prikazani su u tablici 5.15.

Vrijednosti prirasta intenziteta pojedinačnih zidanih i armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka ($\Delta I_{s,n}$), prikazane u tablici 5.15 proračunate su s obzirom na broj katova (n) i tip temeljnog tla (s) na kome su temeljene. Vrijednosti prikazane u tablici proračunate su iz vrijednosti $f_{PGA,s,n}$ generiranih na temelju UHS spektara.

Za područje na kojem se nalaze zgrade kojima se procjenjuje oštećljivost provedeno je mikrozoniranje pa su za daljnje proračune $\Delta I_{s,n}$ i $V_{s,n}$ usvojene vrijednosti množitelja faktora ubrzanja proračunate na temelju izrađenih UHS spektara za promatrano područje (slika 5.4 i tablice 5.12 i 5.14).

Tablica 5.15 Vrijednosti prirasta intenziteta pojedinačnih zidanih i armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka

Prirast intenziteta ($\Delta I_{s,n}$) za zidane i armiranobetonske zgrade							
Broj katova	Zidane zgrade	$\Delta I_{s,n}$ $s = 0 \quad s_L = 2$	$\Delta I_{s,n}$ $s = 0 \quad s_L = 1$	Broj katova	AB zgrade	$\Delta I_{s,n}$ $s = 0 \quad s_L = 2$	$\Delta I_{s,n}$ $s = 0 \quad s_L = 1$
1	Niske	-0,228	0,483	1	Niske	-0,142	0,292
2		-0,007	0,353	2		0,077	0,500
				3		0,303	0,844
3	Srednje visoke	0,101	0,651	4	Srednje visoke	0,432	0,980
4		0,235	0,940	5		0,657	1,192
5		0,354	1,132	6		0,777	1,252
				7		0,869	1,264
6	Visoke	0,434	1,232	8	Visoke	0,930	1,239
7		0,523	1,264	9		0,956	1,186
8		0,560	1,239	10		0,948	1,127
9		0,575	1,156	11		0,910	1,068
				12		0,827	1,003
				13		0,710	0,947
				14		0,710	0,947
				15		0,563	0,891
				16		0,396	0,825

Izraz (5.7) upotrijebljen je za proračun omjera prirasta intenziteta i množitelja faktora ubrzanja. Vrijednosti prirasta intenziteta proračunate su za temeljno tlo tipa B i C, a rezultati proračuna prikazani su u tablici 5.15. Vrijednosti prirasta intenziteta pojedinačnih zidanih i armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka ($\Delta I_{s,n}$), prikazane u tablici 5.15 proračunate su s obzirom na broj katova (n) i tip temeljnog tla (s) na kome su temeljene. Vrijednosti prikazane u tablici proračunate su iz vrijednosti $f_{PGA,s,n}$ generiranih na temelju UHS spektara.

Za područje na kojem se nalaze zgrade kojima se procjenjuje oštećljivost provedeno je mikrozoniranje pa su za daljnje proračune $\Delta I_{s,n}$ i $V_{s,n}$ usvojene vrijednosti množitelj faktora ubrzanja proračunate na temelju izrađenih UHS spektara za promatrano područje (slika 5.4 i tablice 5.12 i 5.14).

Prirasta intenziteta može se generirati i na temelju geoloških karakteristika temeljnog tla. Za različite geološke slojeve tla vrijednosti prirasta intenziteta generirane iz geoloških karata predlažu Medvedev (1962.) te Evernden i Thomson (1985.). Predložene vrijednosti prirasta intenziteta prikazane su u tablici 5.16.

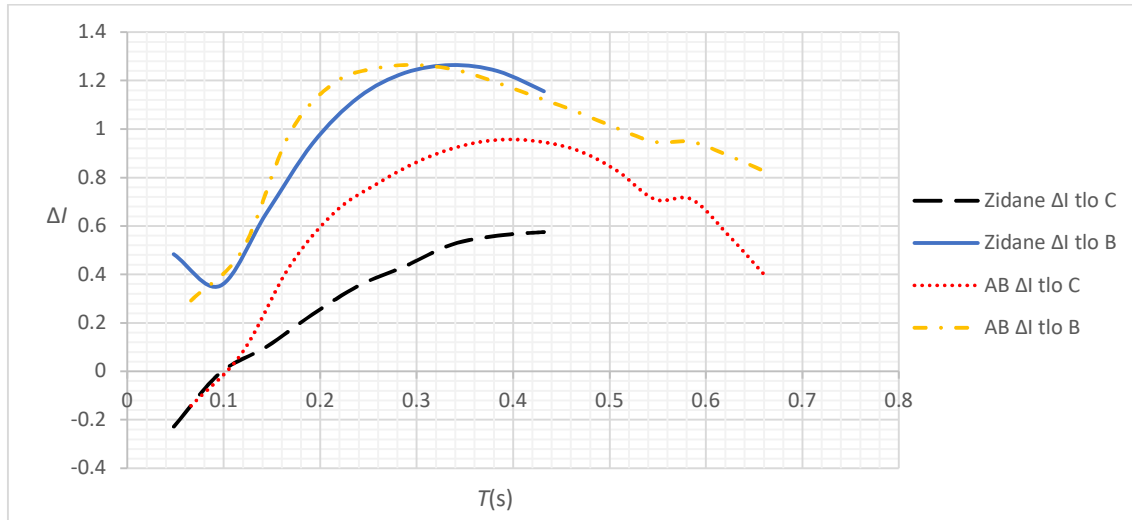
Tablica 5.16 Vrijednosti ΔI proračunate na temelju geoloških karakteristika temeljnog tla

ΔI Evernden i Thomson (1985.)	ΔI Medvedev (1962.)
Granitne i metamorfne stijene	0,0
Stijene iz razdoblja paleozika	0,4
Stijene ranog mezozoika	0,8
Stijene iz razdoblja krede do eocena	1,2
Nerazdijeljene tercijarne stijene	1,3
Stijene iz razd. oligocena do sredine pliocena	1,5
Pliocensko - pleistocenske stijene	2,0
Tercijarne vulkanske stijene	0,3
Kvartarne vulkanske stijene	0,3
Aluvij (GGPV < 10 m)	3,0
Aluvij (10 m < GGPV < 30 m)	2,0
Aluvij (100 m < GGPV)	1,5
GGPV – gornja granica podzemne vode	

Geološki podatci o promatranom području opisani u poglavlje 3 (Slika 3.4) upotrijebljeni su kao relevantni kako bi se mogla napraviti usporedba vrijednosti $\Delta I_{s,n}$ proračunatih u ovom radu s vrijednostima ΔI proračunatim na temelju geoloških karakteristika temeljnog tla. Zaključeno je da se proračunati rezultati slažu s prijedlozima u tablici 5.16.

Najveći prirasti intenziteta su za zidane zgrade koje imaju osnovne periode oscilacija između 0,2 i 0,4 s na temeljnom tlu tipa B, a na tlu tipa C za one koje imaju osnovne periode oscilacija između 0,3 i 0,5 s (visoke zgrade).

Na slici 5.6 grafički su uspoređene vrijednosti prirasta intenziteta za temeljno tlo B i C za zidane i armiranobetonske zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka. Na temelju grafičkog prikaza može se zaključiti da su veći prirasti intenziteta za zgrade koje su temeljene na tlu tipa B, da je na tlu tipa C veća razlika između prirasta intenziteta za zidane i armiranobetonske zgrade.



Slika 5.6 Grafička usporedba prirasta intenziteta $\Delta I_{s,n}$ za zidane i armiranobetonske zgrade

Prirast intenziteta za armiranobetonske zgrade najveći je na tlu tipa C za zgrade koje imaju osnovne periode oscilacija između 0,3 i 0,5 s (visoke zgrade), a na temeljnom tlu tipa B za zgrade koje imaju osnovne periode oscilacija između 0,2 i 0,4 s (srednje visoke).

5.4.3.3. Rezultati proračuna modifikatora oštetljivosti zbog utjecaja karakteristika tla ($V_{s,n}$) za pojedinačne zgrade

Na temelju proračunatih vrijednosti prirasta intenziteta, jednadžbom (5.6) proračunati su modifikatori oštetljivosti zbog utjecaja karakteristika tla za zidane i armiranobetonske zgrade. Vrijednosti modifikatora zgrada proračunati su s obzirom na broj katova zgrada za obje usvojene kombinacije slojeva temeljnog tla ($s = 0$ $s_L = 2$ i $s = 0$ $s_L = 1$).

U tablici 5.17 prikazane su proračunate vrijednosti $V_{s,n}$ na temelju UHS spektara. U tablici 5.17 prikazane su rezultirajuće vrijednosti $V_{s,n}$ za zidane i armiranobetonske zgrade proračunate u ovom radu te vrijednosti $V_{s,n}$ proračunate (Giovinazzi 2004) na temelju elastičnog spektra odziva tipa 2 (HRN EN 1998-1:2011) te vrijednosti $V_{s,n}$ proračunate na temelju atenuacijske jednadžbe Ambraseys i dr. (1996.) generirane na temelju različitih magnituda i udaljenosti od epicentra zabilježenih na području Europe, za tip spektra 1.

Tablica 5.17 Vrijednosti modifikatora oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika tla za proračun oštećljivosti zidanih i armiranobetonskih zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka

Modifikatori oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika tla ($V_{s,n}$) za zidane i armiranobetonske zgrade									
Broj katova	Zidane zgrade	T_1	$V_{s,n}$ $s = 0 \quad s_L = 2$	$V_{s,n}$ $s = 0 \quad s_L = 1$	Broj katova	AB zgrade	T_1	$V_{s,n}$ $s = 0 \quad s_L = 2$	$V_{s,n}$ $s = 0 \quad s_L = 1$
1	Niske	0,048	-0,037	0,070	1	Niske	0,066	-0,023	0,047
2		0,096	-0,001	0,056	2		0,119	0,012	0,080
					3		0,168	0,048	0,135
3	Srednje visoke	0,144	0,016	0,104	4	Srednje visoke	0,215	0,069	0,157
4		0,192	0,038	0,150	5		0,260	0,105	0,191
5		0,240	0,057	0,181	6		0,303	0,124	0,200
					7		0,346	0,139	0,202
6	Visoke	0,288	0,069	0,197	8	Visoke	0,387	0,149	0,198
7		0,336	0,084	0,202	9		0,428	0,153	0,190
8		0,384	0,090	0,198	10		0,468	0,152	0,180
9		0,432	0,092	0,185	11		0,508	0,146	0,171
					12		0,547	0,132	0,161
					13		0,585	0,114	0,152
					14		0,623	0,114	0,152
					15		0,661	0,090	0,143
					16		0,698	0,063	0,133

Na temelju usporedbe vrijednosti $V_{s,n}$ (Tablica 5.18) proračunatih u ovom radu i vrijednosti $V_{s,n}$ proračunatih na temelju HRN EN 19981:2011 spektara, može se zaključiti da su promjenjivije, ovisno o osnovnom periodu osciliranja zgrada, od vrijednosti $V_{s,n}$ proračunatih na temelju HRN EN 19981:2011 spektara. Vrijednosti $V_{s,n}$ za zidane zgrade osobito na tlu C znatno su manje od vrijednosti $V_{s,n}$ proračunatih na temelju HRN EN 19981:2011 spektara.

Za periode osciliranja niskih zidanih zgrada (i neke periode osciliranja niskih armiranobetonskih zgrada) vrijednosti $V_{s,n}$ imaju negativne vrijednosti što ukazuje na mogućnost deamplifikacije potresnih valova na dubokom lokalnom temeljnom tlu iznad dubokih geološkim sedimentima koje je ovdje prikazano kao tlo tipa C (ili $s = 0 \quad s_L = 2$), a na što je ukazano u poglavljima 3.6.1., 3.6.2., 3.6.3. i 3.6.4..

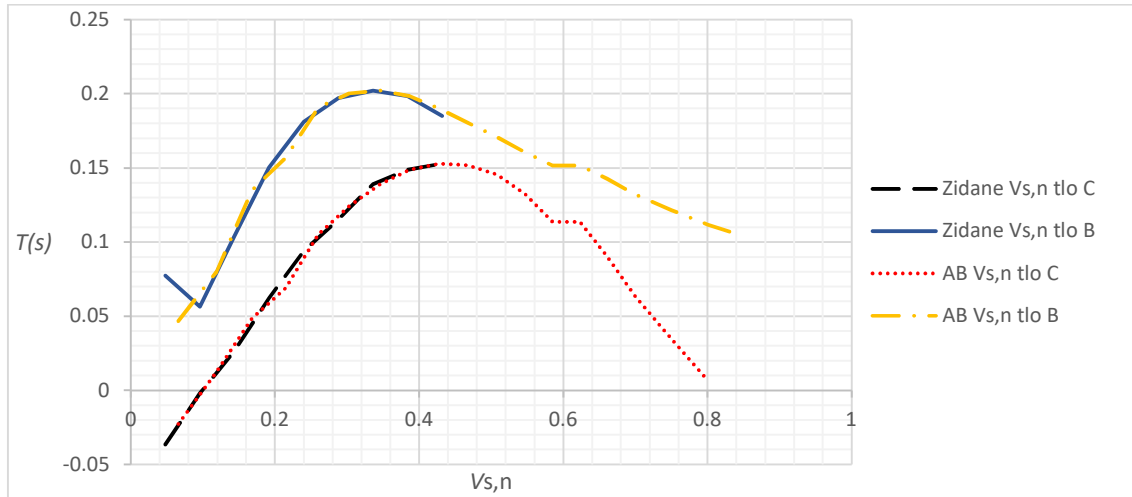
Vrijednosti $V_{s,n}$ proračunate na temelju atenuacijske jednadžbe Ambraseys i dr. (1996.) za armiranobetonske zgrade pokazuju očekivanu promjenjivost ovisno o osnovnom periodu osciliranja zgrade, međutim nije jasno zašto ista nije vidljiva i kod vrijednosti $V_{s,n}$ za zidane zgrade.

Tablica 5.18 Usporedba vrijednosti $V_{s,n}$ za zidane i armiranobetonske zgrade

Zgrade	$V_{s,n}$ $s = 0$ $s_L = 1$ B	$V_{s,n}$ $s = 0$ $s_L = 2$ C	$V_{s,n}$ HRN EN 1998-1:2011 B	$V_{s,n}$ HRN EN 1998-1:2011 C	$V_{s,n}$ Ambraseys i dr. (1996.) B	$V_{s,n}$ Ambraseys i dr. (1996.) C
ZIDANE						
2 kata	0,056	-0,001	0,08	0,10	0,08	0,10
4 kata	0,150	0,038	0,08	0,10	0,08	0,10
6 katova	0,197	0,069	0,08	0,10	0,08	0,10
AB						
3 kata	0,135	0,048	0,08	0,10	0,09	0,11
7 katova	0,202	0,139	0,08	0,10	0,08	0,14
12 katova	0,161	0,132	0,08	0,10	0,07	0,13

Proračunate vrijednosti $V_{s,n}$ moguće je uspoređivati sa sličnima u postojećoj literaturi međutim očekivati podudarnost je nerealno jer se vrijednosti proračunate u ovom radu temelje na novo predloženim atenuacijskim jednadžbama koje preko koeficijenata za skaliranje istodobno uzimaju u obzir geološke karakteristike dubokih i plitkih slojeva temeljnog tla i UHS spektre sve ciljano generirane za područje za koje se istraživanje provodi, a za koje do sada nisu provedena slična istraživanja.

Grafički je na slici 5.7 prikazana razlika prirasta vrijednosti $V_{s,n}$ za temeljno tlo B i C zidanih i armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka.



Slika 5.7 Raspodjela vrijednosti $V_{s,n}$ za zidane i armiranobetonse zgrade

5.5. Oštetljivost zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka

Kako bi se svakoj zgradi iz modela izloženosti grada Osijeka mogao odrediti pripadni razred oštetljivosti, generirani parametri oštetljivosti upotrijebljeni su za proračun ukupnog indeksa oštetljivost (V).

5.5.1. Ukupni indeks oštetljivost (V) pojedinačnih zgrada

Nakon što je svakoj zgradi u modelu izloženosti dodijeljena najvjerojatnija vrijednost tipologijskog indeksa oštetljivosti te proračunate vrijednosti modifikatora potresnog ponašanja i modifikatora oštetljivosti zbog utjecaja karakteristika temeljnog tla proračunat joj je i ukupni indeks oštetljivosti za svaku zgradu.

U tablici 5.19 prikazani su rasponi vrijednosti i prosječne vrijednosti ukupnog indeksa oštetljivosti niskih zidanih i srednje visokih armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka proračunati za slučaj da su temeljene na temeljnom tlu tipa C. Razredba zgrada u tablici napravljena je prema tipologijama predloženim u ovom radu.

Najveći rasponi vrijednosti ukupnog indeksa oštetljivosti su kod zidanih zgrada s krutom stropnom konstrukcijom, a kod armiranobetonskih zgrada za zgrade građene kao okvirne konstrukcije. Najveće

prosječne vrijednosti V su za zgrade s 2 kata zidane opekom starog formata i običnom opekom, te kod armiranobetonskih zgrada za zgrade s 4 kata građene kao okvirne konstrukcije.

Tablica 5.19 Rasponi vrijednosti i prosječne vrijednosti ukupnog indeksa oštećljivosti niskih zidanih i srednje visokih armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka

Ukupni indeks oštećljivosti (V) zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka							
Niske zidane zgrade	Katnost zgrada	Raspon vrijednosti	Prosječna vrijednost	Srednje visoke AB zgrade	Katnost zgrade	Raspon vrijednosti	Prosječna vrijednost
NAZ_OSF_F_N	1	0,724 – 0,864	0,765	AB_Z_S	4	0,293 – 0,473	0,383
	2	0,758 – 0,898	0,797		5	0,485 – 0,529	0,525
NAZ_O_F_N	1	0,664 – 0,884	0,779	AB_O_S	4	0,573 – 0,946	0,752
	2	0,738 – 0,918	0,814		5	0,269 – 0,609	0,562
NAZ_O_K_N	1	0,560 – 0,740	0,649	AB_DS_S	6	0,348 – 1,048	0,544
	2	0,554 – 0,774	0,710		6	0,543	0,543
OZ_K_N	1	0,355 – 0,575	0,449				
	2	0,389 – 0,609	0,478				

5.5.2. Razredi oštećljivosti zgrada

Razredi oštećljivosti korisni su za razlikovanje i razredbu zgrada s obzirom na njihov odziv na djelovanje potresa. Potresna otpornost zgrada razredima oštećljivosti kategorizirana je na širi način jer uzima u obzir ne samo vrstu konstrukcije već i druge karakteristike bitne za odziv zgrada na potresnu pobudu. Prema preporuci EMS – 98, proračunate vrijednosti oštećljivosti mogu se transformirati u razrede oštećljivosti.

U tablici 5.20 prikazane su najvjerojatnije vrijednosti indeksa oštećljivosti za svaki EMS – 98 razred oštećljivosti, rasponi mogućih granica (V^- , V^+) te gornja i donja granica njegovih mogućih vrijednosti (V_{min} , V_{max}).

Tablica 5.20 Vrijednosti indeksa oštećljivosti za razrede oštećljivosti (Lagomarsino i Giovinazzi 2006, Giovinazzi 2005)

	V_{min}	V^-	V	V^+	V_{max}		V_{min}	V^-	V	V^+	V_{max}
A	0,78	0,86	0,90	0,94	1,02	D	0,30	0,38	0,42	0,46	0,54
B	0,62	0,70	0,74	0,78	0,86	E	0,14	0,22	0,26	0,30	0,38
C	0,46	0,54	0,58	0,62	0,70	F	-1,02	0,06	0,10	0,14	0,22

Razred oštećljivosti i indeks oštećljivosti u međusobnoj su ovisnosti jer se zbog porasta vrijednosti indeksa oštećljivosti, mijenja i razred oštećljivosti (npr. razred oštećljivosti B mijenja se u razred oštećljivosti A). U tablici 5.21 (Martinez-Cuevas i dr. 2016) prikazan je odnos ovisnosti EMS – 98 razreda oštećljivosti i indeksa oštećljivosti.

Prema odnosu razreda oštećljivosti i indeksa oštećljivosti prikazanom u tablici 5.21, svakoj zgradi u bazi dodijeljen je odgovarajući razred oštećljivosti.

Tablica 5.21 Odnos razreda oštećljivosti i indeksa oštećljivosti (Martinez-Cuevas i dr. 2016)

Vrijednosti indeksa oštećljivosti V	EMS – 98 razredi oštećljivosti
>0,82	A
0,66 – 0,82	B
0,5 – 0,66	C
0,34 – 0,5	D
0,18 – 0,34	E
<0,18	F

U tablici 5.22 prikazana je broj niskih zidanih i srednje visokih armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka prema razredima oštećljivosti. Zgrade su razvrstane prema tipologiji i broju katova, a prikazani razredi oštećljivosti u tablici proračunati su za temeljno tlo tipa C. Na temelju prikazanih podataka zanimljivo je primijetiti da je u gotovo svakoj tipologiji niskih zidanih zgrada (osim u tipologiji NAZ_O_K_N, zgrade s 2 kata) veća brojnost zgrada manjeg razreda oštećljivosti. Npr. u tipologiji NAZ_O_F_N, 346 zgrada s jednim katom, B je razreda oštećljivosti, a 83 zgrade su A razreda oštećljivosti. U istoj tipologiji 120 je zgrada B razreda oštećljivosti, a 27 A razreda oštećljivosti, itd.

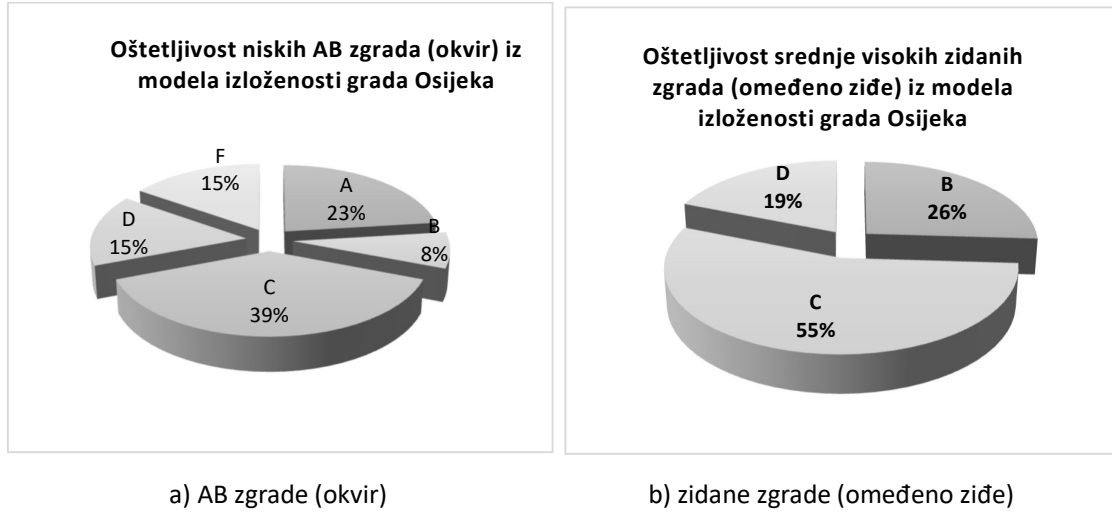
Tablica 5.22 Broj niskih zidanih i srednje visokih armiranobetonskih zgrada iz modela izloženosti prema razredima oštećljivosti, oštećljivost prikazanih zgrada proračunatih za temeljno tlo tipa C

Broj zgrada prema razredima oštećljivosti u modelu izloženosti grada Osijeka											
Niske zidane zgrade	Broj zgrada	Katnost zgrade	Broj zgrada	Razred oštećljivosti na tlu C	Srednje visoke AB zgrade	Broj zgrada	Katnost zgrade	Broj zgrada	Razred oštećljivosti na tlu C		
NAZ_OSF_F_N	81	1	7	A	AB_Z_S	7	4	1	D		
		1	93	B			4	1	E		
		2	27	A			5	5	C		
		2	98	B							
NAZ_O_F_N	575	1	83	A	AB_O_S	41	4	2	D		
		1	346	B			6	E			
		2	27	A			5	11	C		
		2	120	B						5	D
NAZ_O_K_N	327	1	40	B			6	4	B		
		1	67	C				9	C		
		2	190	B				7	1	B	
		2	30	C							
OZ_K_N	271	1	21	C	AB_DS_S	2	6	2	C		
		1	79	D							
		2	55	C							
		2	116	D							

Među, u tablici prikazanim, armiranobetonskim zgradama najviše je zgrada razreda oštećljivosti C.

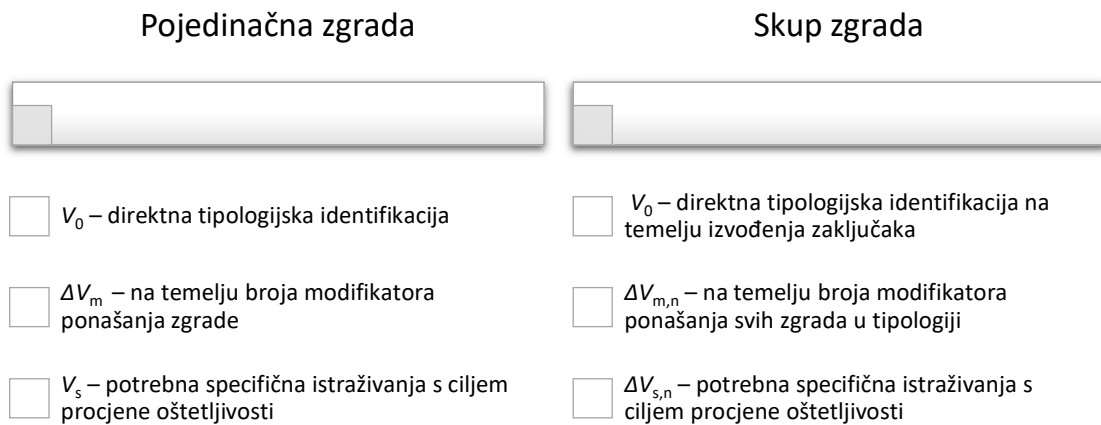
Na slici 5.8 prikazan je postotak razreda oštećljivosti do sada popisanih niskih armiranobetonskih zgrada (okvir) i srednje visokih zidanih zgrada (omeđeno žiđe) u modelu izloženosti grada Osijeka. Prema prikazanim postotnim iznosima, vidi se da je među armiranobetonskim (konstrukcijski sustav okvir) niskim zgradama kao i u tablici 5.22 za niske armiranobetonske zgrade najviše zgrada C razreda oštećljivosti.

Kao i kod niskih zidanih zgrada s krutim stropom u tablici 5.22, C razred oštećljivosti, prema slici 5.8 karakterističan je i za srednje visoke zidane zgrade (omeđeno žiđe).



Slika 5.8 Postotak razreda oštećljivosti niskih armiranobetonskih i srednje visokih zidanih zgrada do sada popisanih u modelu izloženosti grada Osijeka

5.6. Modeliranje oštećljivosti tipologija zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka



Slika 5.9 Proces modeliranja oštećljivosti pojedinačnih zgrada i skupa zgrada

Vrijedna značajka, u ovom radu predložene unaprijeđene metodologije procjene oštećljivosti zgrada, je da se može implementirati za procjene različite razine, od pojedinačne zgrade do različito definiranih skupova zgrada manje ili veće brojnosti. Na slici 5.9 prikazana je usporedba procesa modeliranja oštećljivosti pojedinačnih zgrada i skupa zgrada prema Giovinazzi (2005.).

Nakon što je identificirana oštetljivost pojedinačnih zgrada, za koje je prethodno provedena tipološka identifikacija, u radu je modelirana oštetljivost usvojenih tipologija zgrada prema prilagođenom izrazu, a koji su izvorno predložili Giovinazzi i Lagomarsino (2003.):

$$V = V_0 + \sum_k r_k \Delta V_{m,k} + \sum_n \sum_s q_n \Delta V_{s,n} \quad (5.12)$$

gdje je:

V – indeks oštetljivosti tipologije zgrada

V_0 – najvjerojatnija vrijednost tipologijskog indeksa oštetljivosti

$\Delta V_{m,k}$ – modifikator potresnog ponašanja pojedine karakteristike (k) zgrade

r_k – omjer zgrada karakteriziranih modificirajućim faktorima (k)

$\Delta V_{s,n}$ – modifikator oštetljivosti zbog utjecaja karakteristika određenog tipa temeljnog tla (s)

q_n – omjer zgrada karakteriziranih brojem katova zgrade (n).

Već sama tipološka identifikacija i razredba zgrada u tipologije vodi do definiranja vrijednosti tipološkog indeksa oštetljivosti V_0 prema tablici 5.3.

5.6.1. Modifikatori potresnog ponašanja tipologija zgrada (ΔV_m)

Slijedom prijedloga iz relevantne literature i jednadžbe (5.5), za tipologije zgrada generirane na temelju modela izloženosti grada Osijeka (Tablica 4.10), proračunate su vrijednosti ΔV_m (Tablica 5.23).

Tijekom modeliranja vrijednosti modifikatora potresnog ponašanja tipologije zgrada (ΔV_m) uočena je mogućnost podcjenjivanja/precjenjivanja uloge ΔV_m u potresnom ponašanju zgrada. Naime, vrijednost za ΔV_m npr. za tipologiju NAZ_O_K_S proračunava se iz vrijednosti $\Delta V_{m,k}$ za zgrade s 3, 4 i 5 katova, ako je broj zgrada s 3 kata prevladavajući u tipologiji, a njegov prosječni ΔV_m značajno manji od prosječnih vrijednosti $\Delta V_{m,k}$ za zgrade s 4 i 5 katova, tipologijskim modifikatorom potresnog ponašanja (ΔV_m), uloga modifikatora ponašanja u potresnom odzivu zgrada s 4 i 5 katova bit će podcijenjena.

Tablica 5.23 Vrijednosti modifikatora potresnog ponašanja ΔV_m za tipologije zgrada grada Osijeka

Tipologija		Konstruktivni sustav	Zgrade prema visini	Predložena tipologija	ΔV_m		
ZIDE	Nearmirano zide	Fleksibilan	Niske 1 – 2 kata	NAZ_OSF_F_N	0,060		
			Srednje visoke 3 – 5 katova	NAZ_OSF_F_S	0,101		
			Opeka starog formata	Fleksibilan	Niske 1 – 2 kata	NAZ_O_F_N	0,056
					Srednje visoke 3 – 5 katova	NAZ_O_F_S	0,092
					Opeka	Krut	Niske 1 – 2 kata
	Srednje visoke 3 – 5 katova	NAZ_O_K_S	0,092				
	Omeđeno zide	Krut	HORIZONTALAN	Niske 1 – 2 kata	NAZ_O_K_V	0,097	
				Srednje visoke 3 – 5 katova	OZ_K_N	0,031	
				Visoke ≥ 6 katova	OZ_K_S	0,074	
				Omeđeno zide	Krut	Niske 1 – 2 kata	OZ_K_V
Srednje visoke 3 – 5 katova							
Visoke ≥ 6 katova							
ARMIRANI BETON	Zidovi	VERTIKALAN	Niske 1 – 3 kata	AB_Z_N	-0,325		
			Srednje visoke 4 – 7 katova	AB_Z_S	0,006		
			Visoke ≥ 8 katova	AB_Z_V	0,173		
	Okvir	VERTIKALAN	Niske 1 – 3 kata	AB_O_N	0,017		
			Srednje visoke 4 – 7 katova	AB_O_S	0,010		
			Visoke ≥ 8 katova	AB_O_V	0,080		
	Dvojni sustav	VERTIKALAN	Srednje visoke 4 – 7 katova	AB_DS_S	0,024		
Visoke ≥ 8 katova			AB_DS_V	0,080			

Suprotno, ako je u tipologiji prevladavajući broj zgrada s npr. 4 i 5 katova i čije su prosječne vrijednosti $\Delta V_{m,k}$ značajno veće od prosječnih vrijednosti $\Delta V_{m,k}$ zgrada s 3 kata, doći će do precjenjivanja uloge tipologijskog modifikatora ponašanja u potresnom odzivu zgrada s 3 kata. Predlaže se u budućnosti istražiti ovaj odnos.

U vezi sa zapažanjima u prethodnom odlomku, u tablici 5.24 prikazane su vrijednosti $\Delta V_{m,k}$ za pojedine katove unutar tipologije NAZ_O_K_S na temelju kojih su proračunate prosječne vrijednosti tipologijskog ΔV_m .

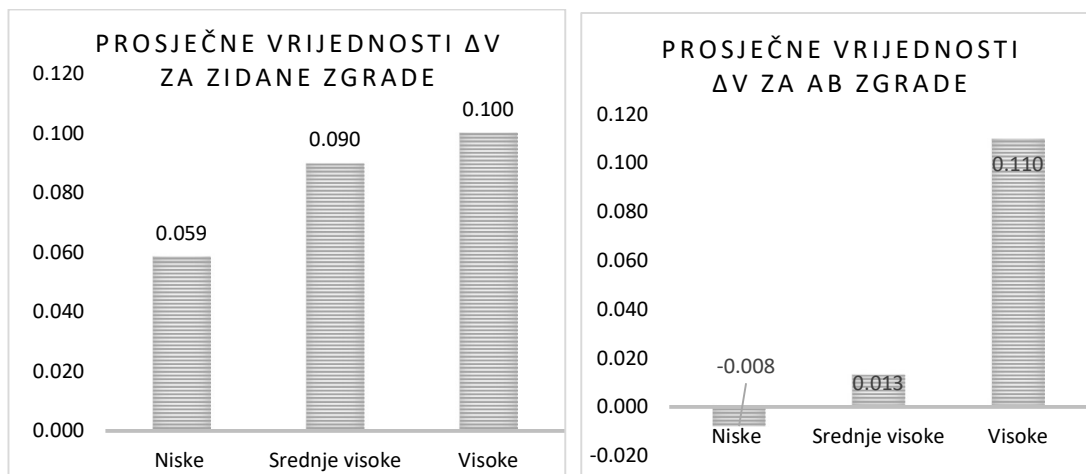
Zastupljenost zgrada s obzirom na broj katova u pojedinoj tipologiji za do sada popisane zgrade u modelu izloženosti grada Osijeka prikazana je u tablici 4.11, npr. kod tipologije NAZ_O_F_S može se vidjeti velik nesrazmjer zastupljenosti zgrada s 3 kata u tipologiji (70 %) u odnosu na zgrade s 4 i 5 katova koje su ukupno zastupljene u tipologiji 26 %.

Tablica 5.24 Usporedba vrijednosti ΔV_m za pojedinačne zgrade s 3, 4 i 5 katova, nearmirano ziđe, kruti strop (NAZ_O_K_S) s predloženom vrijednosti tipologijskog modifikatora potresnog ponašanja (ΔV_m).

Vrijednost modifikatora potresnog ponašanja ΔV_m

Tipologija NAZ_O_K_S	ΔV_m	Tipologijski ΔV_m
za zgrade s 3 kata	$\Delta V_{m3} = 0,066$	
za zgrade s 4 kata	$\Delta V_{m4} = 0,101$	0,092
za zgrade s 5 katova	$\Delta V_{m5} = 0,103$	

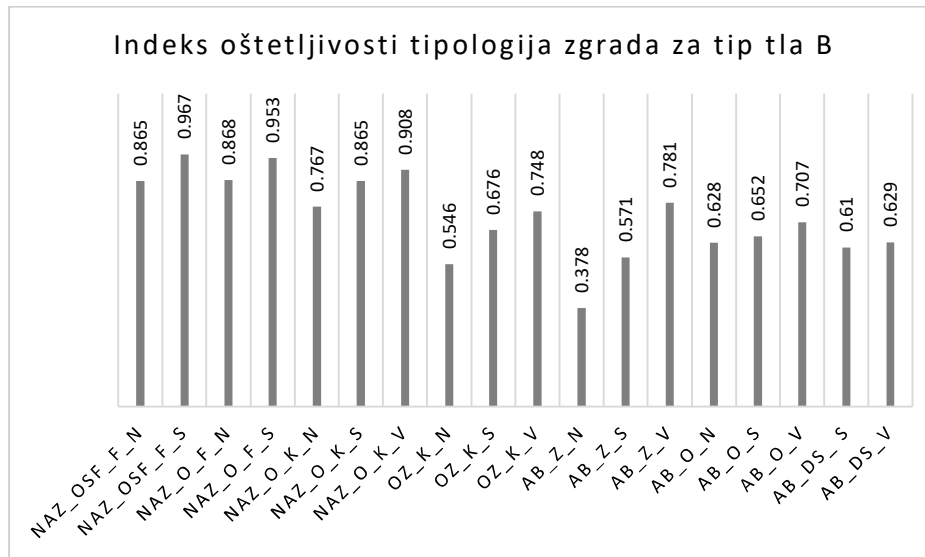
Na slici 5.10 prikazan je porast vrijednosti ΔV_m s obzirom na visinu zgrade. Za potrebe usporedbe proračunate su prosječne vrijednosti niskih, srednje visokih i visokih tipologija zidanih i armiranobetonskih zgrada.



Slika 5.10 Razlike u vrijednostima ΔV_m s obzirom na visinu zgrada

5.6.2. Indeksi oštećljivosti tipologija zgrada (V) za tip tla B i C

Proračunate vrijednosti indeksa oštećljivosti za tipologije zgrada generirane na temelju modela izloženosti grada Osijeka prikazane su u tablici 5.25. Vrijednosti indeksa oštećljivosti proračunate su s obzirom na usvojene tipove temeljnog tla (B i C). Na slici 5.11 grafički su prikazane proračunate vrijednosti indeksa oštećljivosti za temeljno tlo tipa B.



Slika 5.11 Vrijednosti indeksa oštećljivosti za temeljno tlo tipa B

Na temelju, u tablici 5.25 prikazanih, vrijednosti indeksa oštećljivosti tipologija može se zaključiti da su proračunate vrijednosti i za tipologije zidanih i armiranobetonskih zgrada manje ako su proračunate uzimajući u obzir karakteristike temeljnog tla tipa C. Nadalje, povećavaju se povećanjem visine (broja katova) zgrade i znatno su manje za tipologije armiranobetonskih zgrada.

Tablica 5.25 Vrijednosti indeksa oštećljivosti predloženih tipologija zgrada na tlu tipa B i C

Tipologija		Konstruktivni sustav	Zgrade prema visini	Predložena tipologija	V na tlu tipa B	V na tlu tipa C	
Nearmirano zide	Opeka starog formata	HORIZONTALAN	Fleksibilan	Niske 1 – 2 kata	NAZ_OSF_F_N	0,865	0,784
				Srednje visoke 3 – 5 katova	NAZ_OSF_F_S	0,967	0,885
	Opeka		Niske 1 – 2 kata	NAZ_O_F_N	0,868	0,768	
			Srednje visoke 3 – 5 katova	NAZ_O_F_S	0,953	0,873	
			Niske 1 – 2 kata	NAZ_O_K_N	0,767	0,690	
			Srednje visoke 3 – 5 katova	NAZ_O_K_S	0,865	0,771	
Visoke ≥ 6 katova	NAZ_O_K_V	0,908	0,737				
Omeđeno zide	Omeđeno zide	Krut	Niske 1 – 2 kata	OZ_K_N	0,546	0,468	
			Srednje visoke 3 – 5 katova	OZ_K_S	0,676	0,592	
			Visoke ≥ 6 katova	OZ_K_V	0,748	0,680	
ARMIRANI BETON	Zidovi	VERTIKALAN	Okvir	Niske 1 – 3 kata	AB_Z_N	0,378	0,306
				Srednje visoke 4 – 7 katova	AB_Z_S	0,571	0,485
				Visoke ≥ 8 katova	AB_Z_V	0,781	0,740
	Okvir		Niske 1 – 3 kata	AB_O_N	0,628	0,552	
			Srednje visoke 4 – 7 katova	AB_O_S	0,652	0,574	
			Visoke ≥ 8 katova	AB_O_V	0,707	0,654	
	Dvojni sustav		Srednje visoke 4 – 7 katova	AB_DS_S	0,610	0,534	
			Visoke ≥ 8 katova	AB_DS_V	0,629	0,602	

U tablici 5.26 prikazana su vrijednosti ukupnog indeksa oštećljivosti proračunate makroseizmičom metodom iz nekoliko sličnih istraživanja (Ademović i dr. (2020.), Lantada i dr. (2010.) te Lagomarasino i Giovinazzi (2006.)) te vrijednosti indeksa oštećljivosti tipologija zgrada proračunate u ovom radu za tlo tipa B i C.

U istraživanjima Lagomarasino i Giovinazzi (2006.), Lantada i dr. (2010.) te Ademović i dr. (2020.) vrijednosti ukupnog indeksa oštećljivosti proračunate su na temelju spektara HRN EN 1998-1:2011, a amplifikacija slojeva temeljnog tla promatrana je samo za plitke slojeve lokalnog tla. Kako su u ovom radu upotrijebljeni UHS spektri generirani za promatrano područje, a utjecaj temeljnog tla proračunat na temelju amplifikacije plitkih i dubokih slojeva temeljnog tla, razlike u prikazanim rezultatima su očekivane. Međutim na temelju njih se može zaključiti da UHS spektri i istodobno

uzimanje u obzir karakteristika plitkih i dubokih slojeva temeljnog tla ima utjecaj na dobijanje pouzdanijih vrijednosti indeksa oštetljivosti.

Tablica 5.26 Vrijednosti indeks oštetljivosti za predložene tipologije zgrada i vrijednosti iz nekoliko sličnih istraživanja proračunate makroseizmičkom metodom

Tipologije zidanih zgrada	V na tlu tipa B	Lagomarasino i Giovinazzi (2006.)	Lantada i dr. (2010.)	Ademović i dr. (2020.)	V na tlu tipa C	Tipologije AB zgrada	V na tlu tipa B	Lagomarasino i Giovinazzi (2006.)	V na tlu tipa C
NAZ_OSF_F_N	0,865	0,64			0,784	AB_Z_N	0,378	0,52	0,306
NAZ_OSF_F_S	0,967	0,72	0,75	0,767	0,885	AB_Z_S	0,571	0,54	0,485
						AB_Z_V	0,781	0,58	0,740
NAZ_O_F_N	0,868	0,64	0,63	0,657					
NAZ_O_F_S	0,953	0,72			0,768	AB_O_N	0,628	0,62	0,552
					0,873	AB_O_S	0,652	0,64	0,574
NAZ_O_K_N	0,767	0,57				AB_O_V	0,707	0,68	0,654
NAZ_O_K_S	0,865	0,66		0,494	0,690				
NAZ_O_K_V	0,908	0,73			0,771	AB_DS_S	0,610	0,59	0,534
					0,737	AB_DS_V	0,629	0,63	0,602
OZ_K_N	0,546	0,37							
OZ_K_S	0,676	0,45			0,468				
OZ_K_V	0,748	0,53			0,592				
					0,680				

5.6.3. Razredi oštetljivosti za tipologije zgrada

Prema postupku za generiranje razreda oštetljivosti pojedinačnih zgrada opisanom u poglavlju 5.5.2. proračunate vrijednosti indeksa oštetljivosti tipologija zgrada, za oba u analizi usvojena tipa temeljnog tla (B i C), transformirane su u razrede oštetljivosti. Na temelju postotnog udjela zgrada u tipologiji određen je najvjerojatniji razred oštetljivosti tipologije. U tablici 5.27 prikazani su postotni udjeli zgrada u tipologiji na temelju kojih je određen najvjerojatniji razred oštetljivosti te je grafički ilustrirano usvajanje najvjerojatnijeg razreda predloženih tipologija zgrada (vrijednosti indeksa oštetljivosti za temeljno tlo tipa C).

Tablica 5.27 Najvjerojatniji razredi oštećljivosti predloženih tipologija zgrada na temelju modela izloženosti grada Osijeka (za tlo tipa C)

Tipologija	Postotak zgrada u tipologiji prema razredima oštećljivosti						Najvjerojatniji razredi oštećljivosti					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
NAZ_OSF_F_N	16	84	0	0	0	0	—○					
NAZ_OSF_F_S	100	0	0	0	0	0	○					
NAZ_O_F_N	19	81	0	0	0	0	—○					
NAZ_O_F_S	100	0	0	0	0	0	○					
NAZ_O_K_N	0	70	30	0	0	0	○—					
NAZ_O_K_S	14	70	16	0	0	0	--- --○					
NAZ_O_K_V	0	100	0	0	0	0	○					
OZ_K_N	0	0	28	72	0	0	—○					
OZ_K_S	0	26	87	30	0	0	--- --○—					
OZ_K_V	0	62	38	0	0	0	○—					
AB_Z_N	0	0	0	74	13	13	○— --- ---					
AB_Z_S	0	0	72	14	14	0	○— --- ---					
AB_Z_V	0	0	38	62	0	0	○—					
AB_O_N	0	0	84	31	23	0	○— --- ---					
AB_O_S	0	22	54	24	0	0	--- --○—					
AB_O_V	0	0	100	0	0	0	○					
AB_DS_S	0	0	100	0	0	0	○					
AB_DS_V	0	0	100	0	0	0	○					

○ najvjerojatniji razred oštećljivosti
— vjerojatni raspon oštećljivosti
--- manje vjerojatan raspon oštećljivosti

Generirani najvjerojatniji razred oštećljivosti tipologija zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka (za oba tipa temeljnog tla) prikazani su u tablici 5.28.

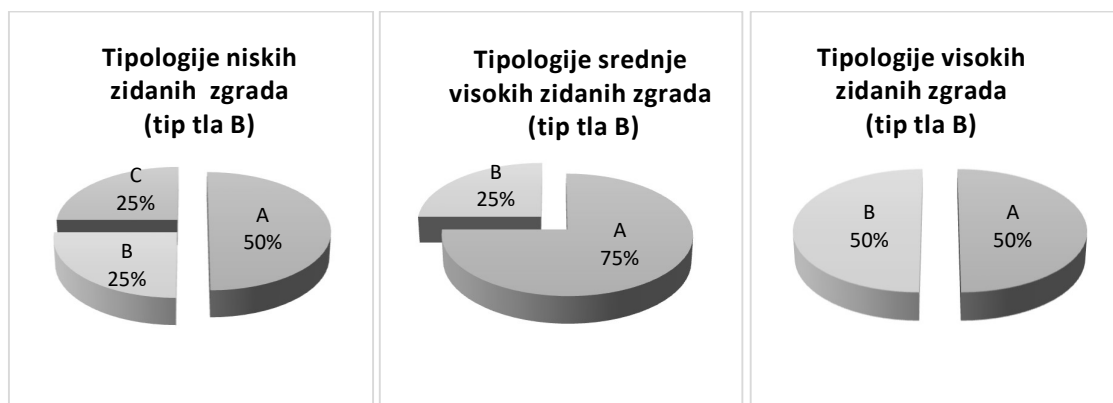
Tablica 5.28 Razredi oštećljivosti tipologija zgrada za tipove tla B i C

Tipologija		Konstruktivni sustav	Zgrade prema visini	Predložena tipologija	Razred oštećljivosti na tlu tipa B	Razred oštećljivosti na tlu tipa C
Nearmirano zide	Opeka starog formata	Fleksibilan	Niske 1 – 2 kata	NAZ_OSF_F_	A	B
			Srednje visoke 3 – 5 katova	N	A	A
				NAZ_OSF_F_	A	B
	Opeka	Fleksibilan	Niske 1 – 2 kata		A	A
			Srednje visoke 3 – 5 katova	NAZ_O_F_N	B	B
				NAZ_O_F_S	A	B
Omeđeno zide	Omeđeno zide	Krut	Niske 1 – 2 kata	NAZ_O_K_N	A	B
			Srednje visoke 3 – 5 katova	NAZ_O_K_S	C	D
			Visoke ≥ 6 katova	NAZ_O_K_V	B	C
				OZ_K_N	B	B
				OZ_K_S		
				OZ_K_V		
ARMIRANI BETON	VERTIKALNI	Zidovi	Niske 1 – 3 kata	AB_Z_N	D	D
			Srednje visoke 4 – 7 katova	AB_Z_S	C	C
			Visoke ≥ 8 katova	AB_Z_V	B	C
		Okvir	Niske 1 – 3 kata	AB_O_N	C	C
			Srednje visoke 4 – 7 katova	AB_O_S	C	C
			Visoke ≥ 8 katova	AB_O_V	B	C
		Dvojni sustav	Srednje visoke 4 – 7 katova	AB_DS_S	C	C
			Visoke ≥ 8 katova	AB_DS_V	C	C

Provedena je analiza dodijeljenih razreda oštećljivosti tijekom koje je prvenstveno uočen utjecaj karakteristika temeljnog tla na razrede oštećljivosti tipologija zgrada (razredi oštećljivosti razlikuju se s obzirom na tip temeljnog tla), a zatim da su razredi oštećljivosti veći na tlu tipa B.

Na temeljnom tlu tipa B, razred oštećljivosti A je najčešći kod tipologija zidanih zgrada, a razred C kod tipologija armiranobetonskih zgrada. Za jedan je razred, uglavnom kod svih tipologija zidanih zgrada, manja oštećljivost na tlu C u odnosu na tlo B. Gotovo sve tipologije armiranobetonskih zgrada na tlu tipa C imaju razred oštećljivosti C. Ako promatramo tipologija, koje se razlikuju samo po visini zgrada, vidljiv je porast oštećljivosti za jedan razred oštećljivosti s visinom, osobito kod tipologija zidanih zgrada generiranih za tip tla C i tipologija armiranobetonskih zgrada generiranih za tip tla B.

Na slici 5.12 prikazan je postotak razreda oštećljivosti (temeljno tlo tipa B) predloženih tipologija zidanih zgrada razvrstanih prema visini niske: (NAZ_OSF_F_N, NAZ_O_F_N, NAZ_O_K_N i OZ_K_N), srednje visoke: (NAZ_OSF_F_S, NAZ_O_F_S, NAZ_O_K_S i OZ_K_S) i visoke: (NAZ_O_K_V, OZ_K_V). Prema prikazanom na slici 5.12 može se zaključiti da razred oštećljivosti A dominira u sve tri skupine tipologija zidanih zgrada.



Slika 5.12 Postotak razreda oštećljivosti tipologija niskih, srednje visokih i visokih zgrada razvrstanih prema visini (temeljno tlo tipa B)

5.6.4. Usporedba predloženih razreda oštećljivosti

Razredi oštećljivosti koje predlaže EMS – 98 temelje se na kompromisu između jednostavnog razlikovanja otpornosti zgrada na potresnu uzbudu i grube razredbe načina na koji zgrade mogu reagirati na uzbudu. U ovom radu uspoređeni su s razredima oštećljivosti koji su nastali na temelju detaljne procjene potresne oštećljivosti predloženom unaprijeđenom metodologijom (Tablica 5.28).

Oštećljivost svih tipologija niskih zidanih zgrada na temeljnom tlu tipa B veća je za jedan razred oštećljivosti od predloženog u EMS – 98. Na temeljnom tlu tipa B za jedan razred veća je i oštećljivost od predloženog u EMS – 98, većine tipologija armiranobetonskih niskih zgrada osim armiranobetonskih zgrada konstrukcijskog sustava okvir kod kojeg je oštećljivost veća za dva razreda. Razredi oštećljivosti izvedeni za zgrade temeljene na tlu tipa C dostatno se dobro podudaraju s razredima oštećljivosti predloženim u EMS – 98, izuzetak su zgrade konstrukcijskog sustava neomeđeno zidne – kruti strop kod kojih je oštećljivost niskih zgrada (NAZ_O_K_N) za jedan razred viša, a visokih (NAZ_O_K_V) za jedan razred niža, od najvjerojatnijeg razreda oštećljivosti predloženog u EMS – 98.

Tablica 5.29 Usporedba predloženih razreda oštećljivosti

Tipologija	Razred oštećljivosti na tlu tipa B	Razred oštećljivosti na tlu tipa C	Razred oštećljivosti Pavić i dr. 2019	Razred oštećljivosti EMS – 98
NAZ_OSF_F_N	A	B	B	B
NAZ_OSF_F_S	A	A	A	A
NAZ_O_F_N	A	B	B	B
NAZ_O_F_S	A	A	A	A
NAZ_O_K_N	B	B	C	C
NAZ_O_K_S	A	B	B	B
NAZ_O_K_V	A	B	-	A
OZ_K_N	C	D	D	D
OZ_K_S	B	C	C	C
OZ_K_V	B	B	B-A	B-A
AB_Z_N	D	D	E	E
AB_Z_S	C	C	D	D
AB_Z_V	B	C	C	C
AB_O_N	C	C	E	E
AB_O_S	C	C	D	D
AB_O_V	B	C	C	C
AB_DS_S	C	C	D	D
AB_DS_V	C	C	C	C

U tablici 5.29 prikazani su i razredi oštećljivosti, prvobitno predloženi (Pavić i dr. 2019) za tipologije generirane iz modela izloženosti grada Osijeka. Kao temelj za predlaganje ovih razreda oštećljivosti usvojene su EMS – 98 smjernice za generiranja razreda oštećljivosti te seizmičnosti promatranog područja (prema postojećim kartama potresne opasnosti) i preliminarnu procjenu oštećljivosti zgrada koje nisu uzimale u obzir karakteristika lokalnih i dubokih slojeva temeljnog tla. Kao i kod usporedbe s EMS – 98 razredima oštećljivosti, preliminarno predloženi razredi dostatno se dobro podudaraju s predloženim razredima oštećljivosti na tlu tipa C, a razlike vezane uz razrede oštećljivosti predložene za tlo tipa B su istovjetne razlikama opisanim kod usporedbe s EMS – 98 razredima oštećljivosti.

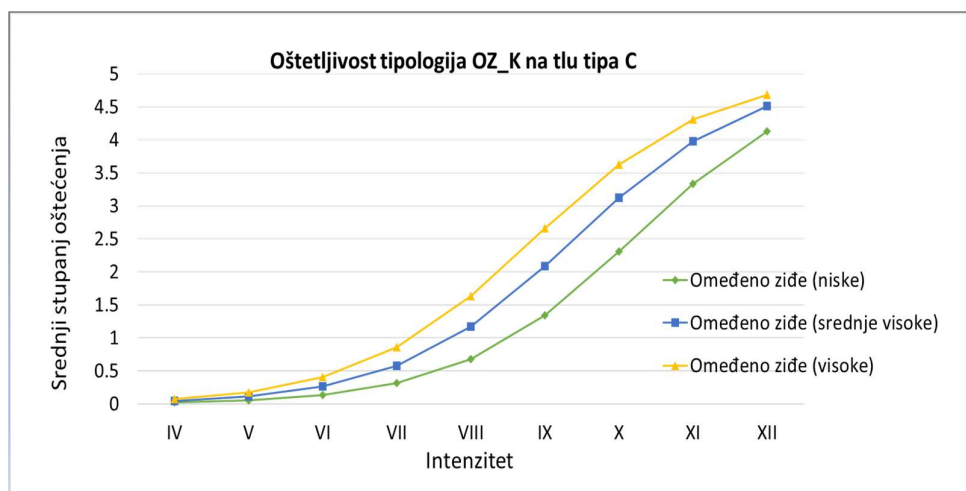
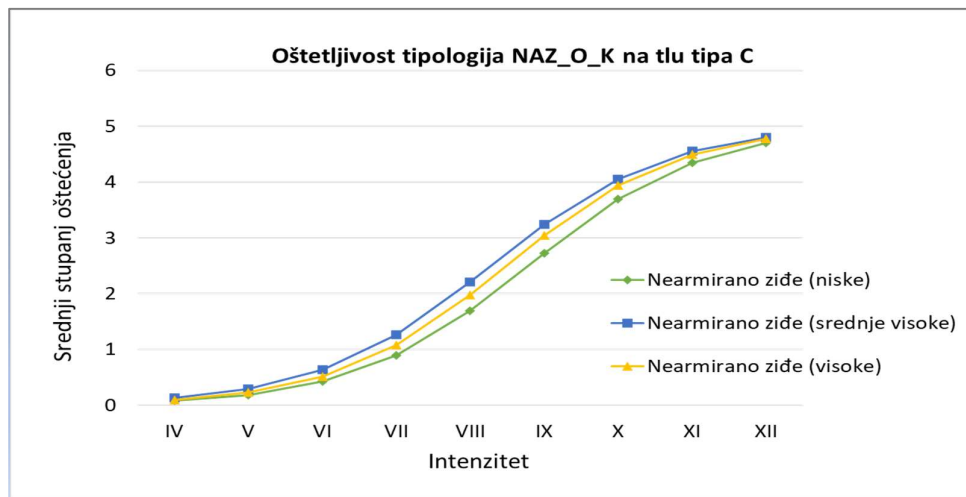
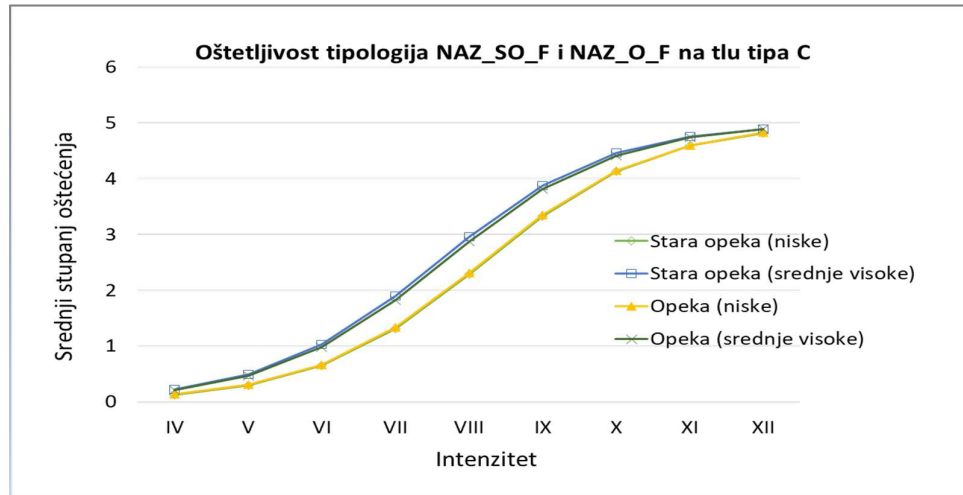
5.6.5. Srednji stupanj oštećljivosti za predložene tipologije zgrada

Kontinuiranim parametrom za obračun štete μ_D , provedena je distribucija oštećljivosti predloženih tipologija zgrada, s obzirom na različite intenzitete. Na temelju vrijednosti ukupnog indeksa oštećljivosti funkcijom oštećljivosti koja može poprimiti vrijednosti između 0 i 5, povezan je srednji stupanj oštećljivosti i makroseizmički intenzitet. Krivulje oštećljivosti predloženih tipologija zidanih i armiranobetonskih zgrada generirane su izrazom (5.1) uzimajući u obzir doprinose oštećenja svih zgrada koje su uzete u obzir za generiranje predložene tipologije. U Tablica 5.30 prikazane su proračunate vrijednosti srednjeg stupnja oštećljivosti za predložene tipologije zgrada i intenzitete prikazane u tablici.

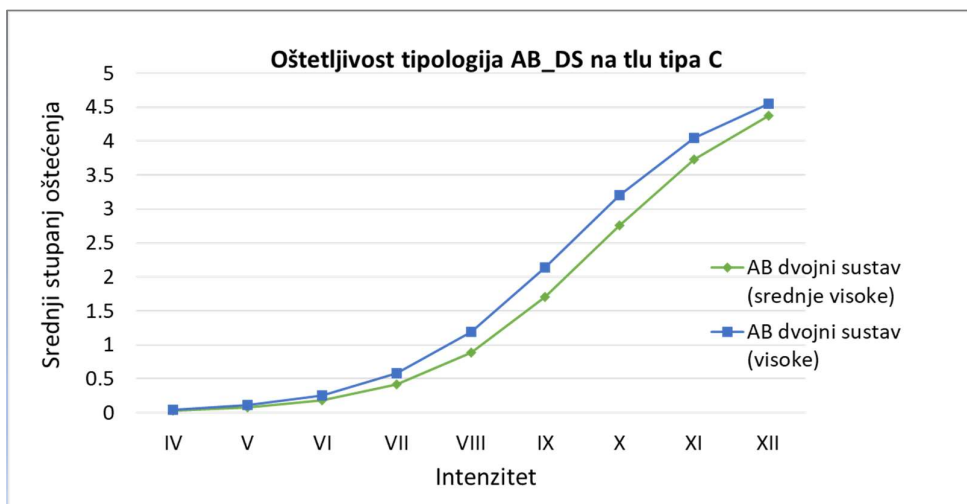
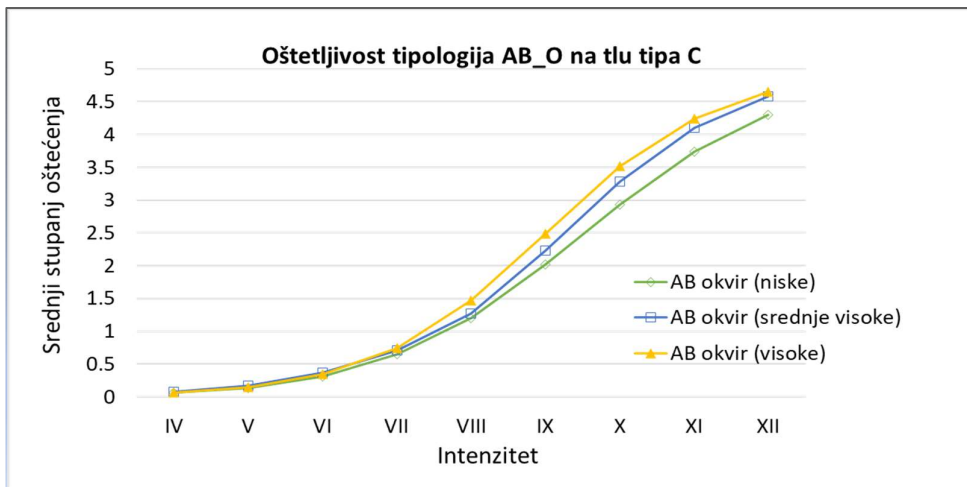
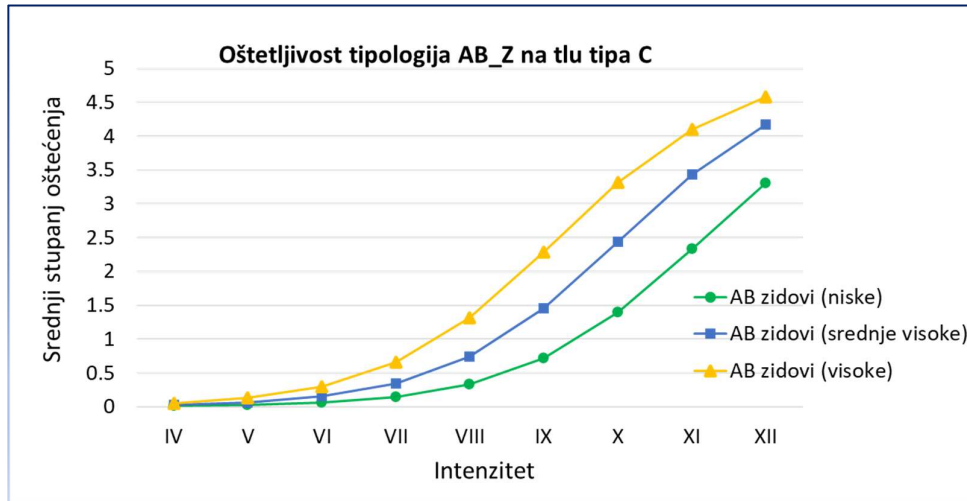
Tablica 5.30 Srednji stupanj oštećljivosti za predložene tipologije zidanih zgrada

Tipologija	INTENZITET									
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
NAZ_OSF_F_N	0,129	0,298	0,654	1,315	2,288	3,330	4,127	4,592	4,820	
NAZ_OSF_F_S	0,219	0,491	1,028	1,900	2,961	3,874	4,455	4,756	4,895	
NAZ_O_F_N	0,133	0,305	0,668	1,337	2,312	3,350	4,138	4,597	4,822	
NAZ_O_F_S	0,207	0,466	0,979	1,825	2,877	3,810	4,418	4,738	4,886	
NAZ_O_K_N	0,080	0,186	0,420	0,892	1,693	2,728	3,689	4,345	4,701	
NAZ_O_K_S	0,125	0,287	0,630	1,264	2,205	3,237	4,055	4,550	4,800	
NAZ_O_K_V	0,098	0,229	0,513	1,071	1,969	3,039	3,935	4,491	4,773	
OZ_K_N	0,024	0,058	0,135	0,310	0,676	1,344	2,311	3,338	4,126	
OZ_K_S	0,048	0,113	0,261	0,577	1,174	2,086	3,123	3,976	4,506	
OZ_K_V	0,077	0,179	0,404	0,860	1,638	2,658	3,627	4,305	4,680	

Na slikama 5.13 i 5.14 prikazane su krivulje oštećljivosti za tipologije zgrada čija je oštećljivost proračunata s obzirom na karakteristike temeljnog tla tipa C. Očekivano, najmanje su oštećljive tipologije niskih (zidanih i armiranobetonskih) zgrada. Oštećljivost tipologija srednje visokih zgrada do intenziteta IX dvostruko je veća od oštećljivost tipologija niskih zgrada. Razlike u oštećljivosti između srednje visokih i visokih zgrada nisu toliko izražene, međutim povećanjem intenziteta postaju sve veće do intenziteta X.



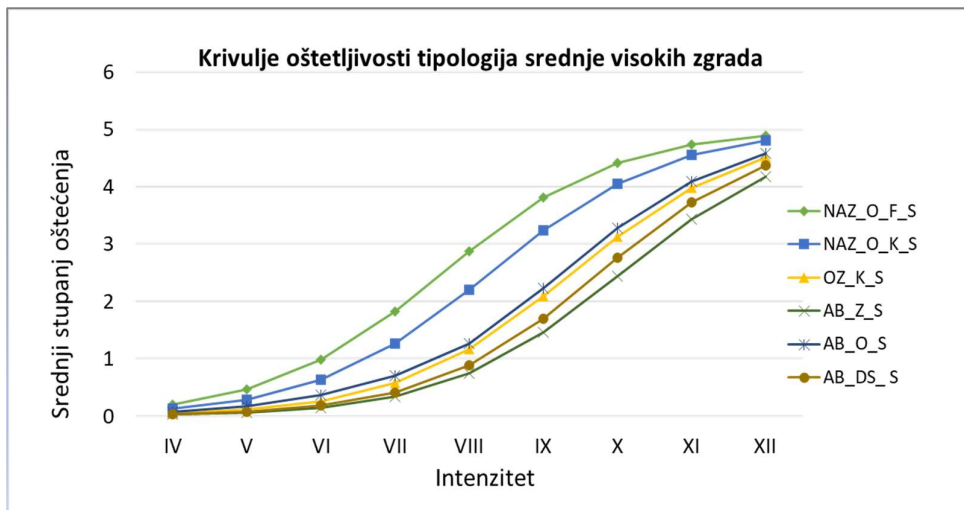
Slika 5.13 Srednji stupanj oštećenja tipologija zidanih zgrada



Slika 5.14 Srednji stupanj oštećenja tipologija armiranobetonskih zgrada

Provedene su različite usporedbe generiranih krivulja oštećljivosti kako bi se utvrdili karakteristični uzorci ponašanja zgrada odnosno pripadnih tipologija te procijenile generirane krivulje s obzirom na stvarnu zabilježenu oštećljivost zgrada nakon potresa.

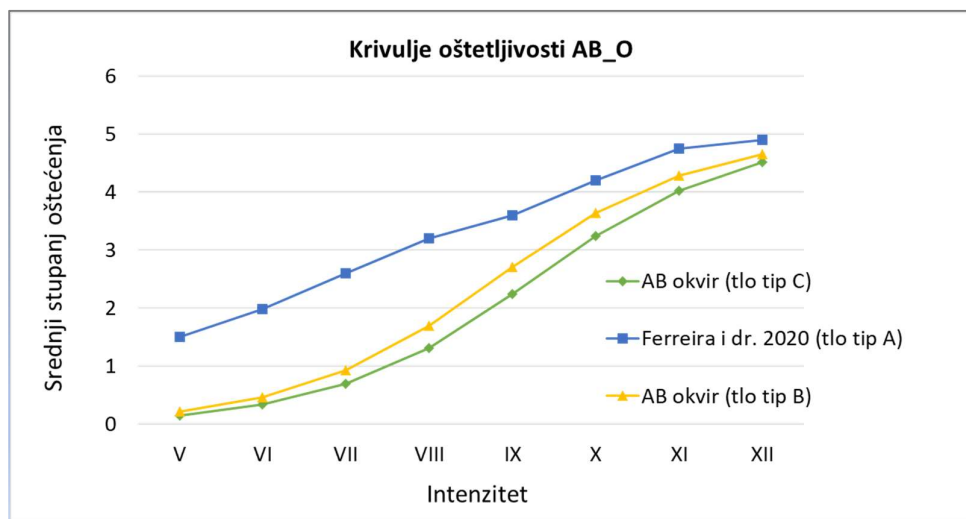
Na slici 5.15 prikazana je usporedba krivulja oštećljivosti tipologija srednje visokih zidanih i armiranobetonskih zgrada (temeljno tlo tipa C) na temelju koje se može zaključiti da su najoštećljivije tipologije zidanih zgrada osobito zgrade s fleksibilnom stropnom konstrukcijom. Nadalje je zaključeno da kod tipologija NAZ_OSF_F_S i NAZ_O_K_ dolazi do znatno većeg prirasta oštećljivosti u odnosu na druge tipologije, od intenziteta VI do intenziteta X. Najveću potresnu otpornost ima tipologija AB_Z_S te AB_DS_ S, a interesantno je primijetiti kako prema provedenim proračunima veću potresnu otpornost ima omeđeno ziđe od armiranobetonskih okvirnih konstrukcija.



Slika 5.15 Usporedba krivulja oštećljivosti tipologija srednje visokih zgrada

Kako bi se krivulje oštećljivosti predloženih tipologija mogle usporediti sa sličnim u literaturi, generirane su na temelju doprinosa svih zgrada (niskih, srednje visokih i visokih) prosječne krivulje oštećljivosti tipologija. Na slici 5.16 prikazane su prosječne krivulje oštećljivosti predložene tipologije AB_O za tlo tipa B i C te krivulje oštećljivosti za AB_O (Ferreira i dr. 2020) za tlo tipa A (stijena). Krivulje oštećljivosti predstavljene u radu Ferreira i dr. (2020.) generirane su na temelju uočenih oštećenja od potresa na armiranobetonskim zgradama (konstrukcijskog sustava okvir) portugalskog grada Faro, a srednji stupanj oštećenja proračunan je jednadžbom (5.3).

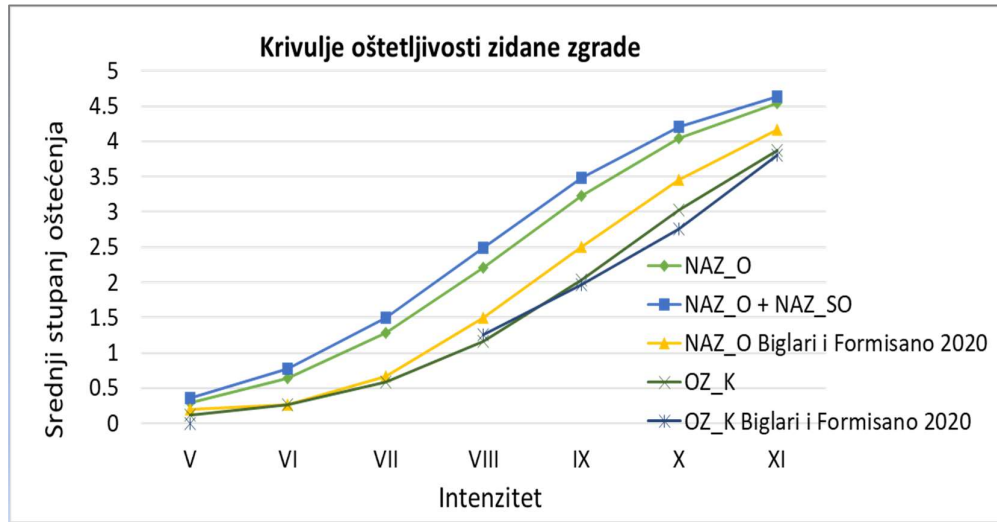
Proučavanje prikazanih krivulja oštetljivosti na slici 5.16 još jednom upućuje na zaključak da različiti uvjeti temeljnog tla različito utječu na oštetljivosti zgrada. Prema generiranim krivuljama, najveća je oštetljivost zgrada na temeljnom tlu tipa A, a najmanja na tlu tipa C. Prema podacima o stvarnim oštećenjima tipologije AB_O na tlu tipa A, srednji stupanj oštećenja već za intenzitet potresa V. iznosi oko 1,5 i približno linearno raste do intenziteta VIII. Velike razlike između vrijednosti srednjeg stupnja oštećenja na tlu tipa A te B i C smanjuju se tek nakon intenziteta X. Srednji stupanj oštećenja proračunan na temelju podataka iz modela izloženosti grada Osijeka veći je za zgrade temeljene na tlu tipa B, osobito kod većih intenziteta potresa.



Slika 5.16 Krivulje oštetljivosti na različitom temeljnom tlu

Prosječne krivulje oštetljivosti tipologija zidanih zgrada na slici 5.17 uspoređene su krivuljama oštetljivosti koje su izradili Biglari i Formisano (2020.) na temelju podataka o oštećenjima zgrada nakon potresa ($M_w = 7,3$) u gradovima Sarpol-e-zahab i Bam (Iran) 2017. Srednji stupanj oštetljivosti za generirane krivulje proračunan je upotrebom izraza 5.1. Temeljno tlo potresom pogođenog područja čine slojevi, na nekim područjima vapnenca na stijeni, a na ostalim konsolidirane aluvijalne naslage debljine od nekoliko metara do nekoliko desetina metara (Zafarani i dr. 2020).

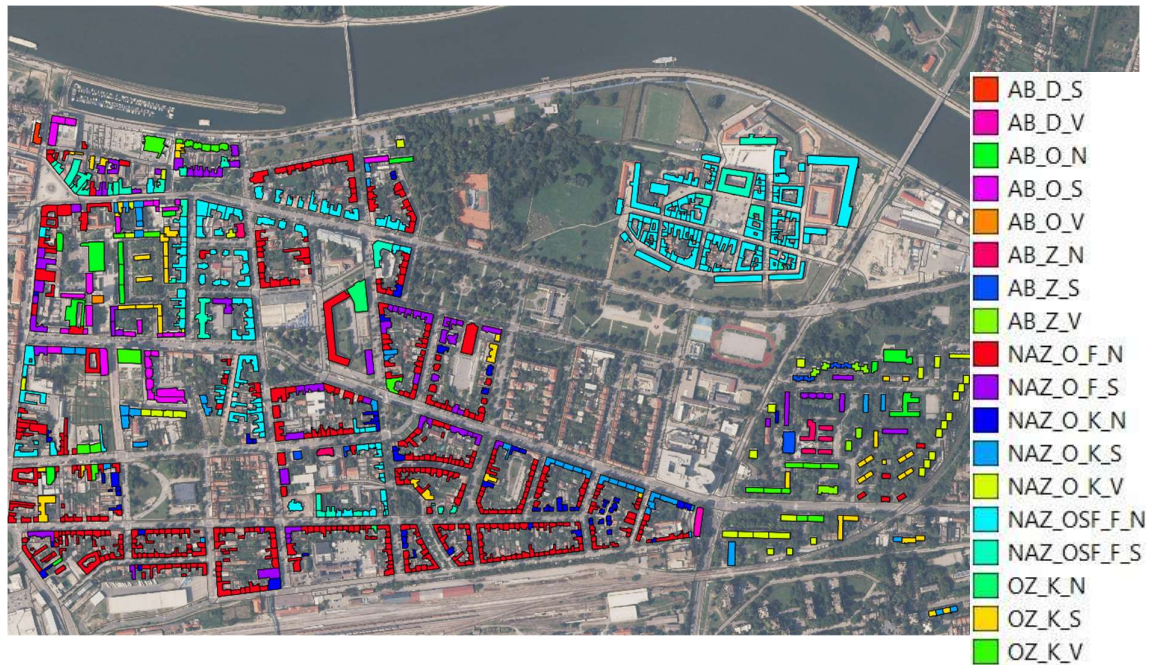
Može se zaključiti o značajnom podudaranju krivulja generiranih za tipologije OZ_K, a razlike u krivuljama oštetljivosti za tipologiju NAZ_O u kojoj su obično starije zgrade, mogu se povezati s razlikama vezanim uz materijale gradnje, primjenu građevinskih normi i sl.



Slika 5.17 Krivulje oštećljivosti tipologija zidanih zgrada

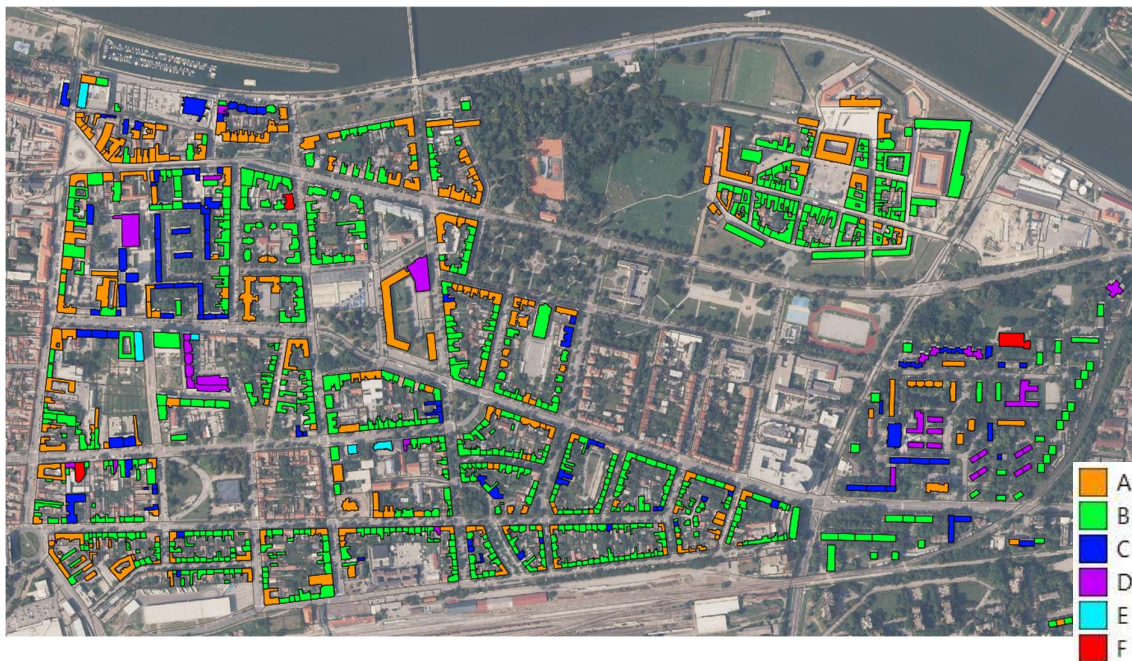
5.7. Vizualizacija rezultata proračuna oštećljivosti za zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka u QGIS-u

Rezultati proračuna oštećljivosti zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka implementirani su u QGIS. Mogućnosti vizualne prezentacije generiranih rezultata prikazani su na sljedećim slikama.

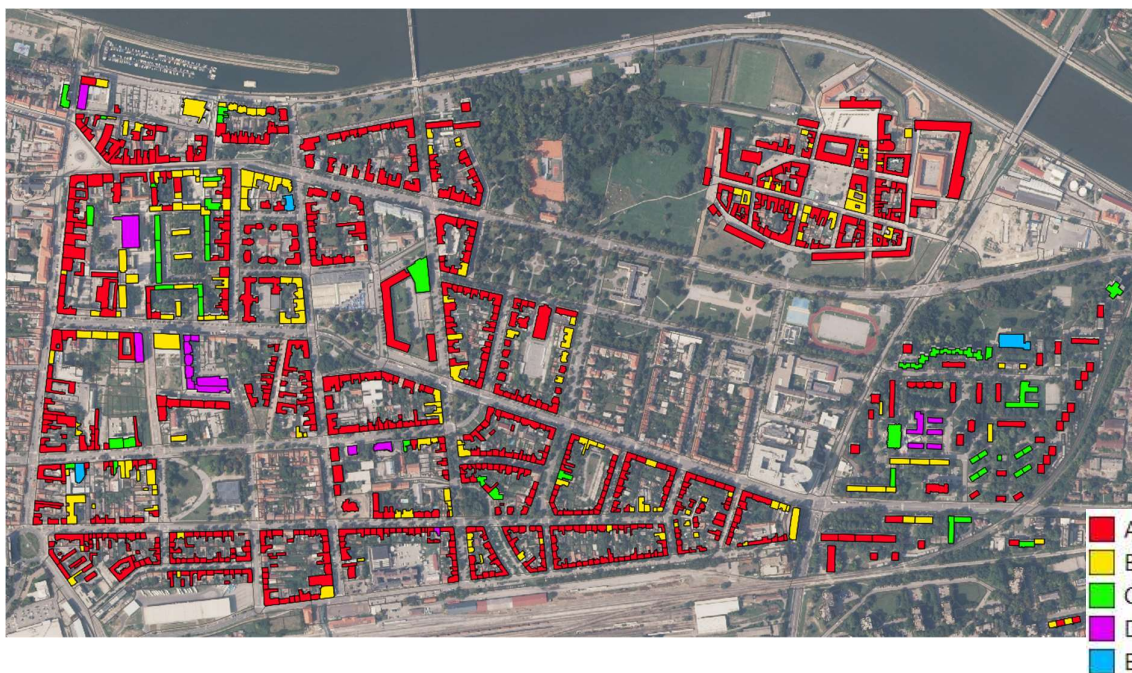


Slika 5.18 Raspodjela dodijeljenih tipologija u modelu izloženosti grada Osijeka

Na slikama 5.19 i 5.20 prikazana je raspodjela proračunatih razreda oštećljivosti.



Slika 5.19 Raspodjela proračunatih razreda oštećljivosti za temeljno tlo tipa C u modelu izloženosti grada Osijeka



Slika 5.20 Raspodjela proračunatih razreda oštećljivosti za temeljno tlo tipa B u modelu izloženosti grada Osijeka

5.8. Zaključak poglavlja

Zgrade podložne potresnoj oštećljivosti podvrgnute su odnosu između dviju varijabli: uzroka i posljedice, pri čemu je uzrok potresno djelovanje, a posljedica izazvana šteta.

Veličine šteta (oštećljivosti zgrada) nisu uvjetovane samo karakteristikama zgrada i potresa (jačina, frekventni sastav i sl.) nego i karakteristikama plitkih i dubokih geoloških slojeva temeljnog tla te unakrsnoj međuovisnosti svih elemenata oštećljivosti. Zato su procjene oštećljivosti zgrada složen izazov, osobito u prenapučenim urbanim sredinama, gdje se pouzdanim predviđanjem mogu izbjeći ili maksimalno ublažiti nepotrebne štete i sve posljedice koje one sa sobom donose.

Proučavanjem potresne oštećljivosti zgrada, ali i pojavom sve učestalijih rasprava o potrebi modifikacije proračuna oštećljivosti i kvantifikacije karakteristika zgrada, uočena je potreba za preispitivanjem i unaprjeđenjem do sada upotrebljivanih metodologija i postupaka procjene oštećljivosti zgrada.

Generiranje prikladne metodologije i odabir postupaka procjene ključni su koraci u procjeni oštećljivosti, a određuje ih veličina promatranog fonda zgrada, raspoloživi kapaciteti iskustava i znanja, ulazni podatci za procjenu te računalne i druge tehnike. Odgovarajuća metodologija treba zadovoljiti zahtjeve procjene oštećljivosti velikog broja zgrada, ali i provedbu naprednijih analiza, kada se alternativno pozornost usmjerava na ograničen broj zgrada (reprezentativan fond zgrada), a generirani rezultati s velikom pouzdanošću moraju biti primjenjivi na, po veličini i sastavu fonda zgrada, različita urbana područja.

Na temelju ovih načela, u ovom poglavlju, predložena je unaprijeđena metodologija procjene potresne oštećljivosti zgrada. Za njezino generiranje integrirana su sva stečena znanja i rezultati provedenih istraživanja u ovom radu iz područja potresne opasnosti i izloženosti. Krajnji cilj unaprjeđenja nije samo predložiti nove postupke i proračune nego i preciznije rezultate oštećljivosti na područjima male do umjerene seizmičnosti te osigurati da predložena metodologija bude široko primjenjiva.

Unaprijeđenja su provedena ozbiljnijim i preciznijim uzimanjem u obzir karakteristika temeljnog tla i njegova utjecaja na veličinu potresne oštećljivosti zgrada te na modeliranje dvorazinske metodologije procjene oštećljivosti: brze i detaljne.

U procjeni potresne oštećljivosti predloženi su modifikatori oštećljivosti koji istodobno uzimaju u obzir utjecaj karakteristika plitkih i dubokih geoloških slojeva temeljnog tla. Proračun modifikatora temelji se na mikrozoniranju, spektrima jednolike opasnosti i amplifikaciji ne samo lokalnih plitkih (što je dosadašnja praksa) nego i dubokih slojeva temeljnog tla.

Nove vrijednosti modifikatora oštećljivosti proračunate su na temelju podataka o karakteristikama zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka, a utjecaj tla na oštećljivost modeliran je s obzirom na kombinacije tla ($s = 0$) ($s_L = 1$) i ($s = 0$) ($s_L = 2$) koje bi se približno mogle okarakterizirati kao tipovi tla B i C prema HRN EN 1998:2011 te koje se smatraju vjerojatnim i najvjerojatnije mogućim na usvojenom promatranom području.

Predloženo unaprjeđenje proračuna oštećljivosti može se implementirati u bilo koju postojeću metodu procjene potresne oštećljivosti zgrada, a u ovom radu predložena unaprjeđenja implementirana su u makroseizmičku metodu. Izraz kojim se u ovoj metodi proračunava ukupni indeks oštećljivosti zgrada reduciran je izostavljanjem iz proračuna regionalnog faktora oštećljivosti (vidi poglavlje 5.2.2.).

Modeliranje oštećljivosti predloženom metodologijom provodi se na razini pojedinačne zgrade i tipologije zgrada.

S obzirom na usvojene relevantne karakteristike zgrada proračunati su modifikatori potresnog ponašanja pojedinačnih zgrada (Tablica 5.8).

Kako bi se mogao odrediti odnos između prirasta intenziteta i množitelja faktora ubrzanja, s obzirom na broj katova i konstrukcijski sustav (zidane i armiranobetonske zgrade) proračunati su osnovni periodi oscilacija zgrada (Tablice 5.10 i 5.11).

Umjesto HRN EN 1998-1:2011/NA spektara za proračun množitelja faktora ubrzanja f_{PGA} upotrijebljeni su koeficijenti za skaliranje spektralnih amplituda i UHS spektri. Proračunati su koeficijenti za brzu procjenu oštećljivosti i za detaljnu procjenu oštećljivosti (Tablice 5.12 i 5.14). Proračunate vrijednosti uspoređene su s relevantnim koeficijentima proračunatim na temelju geoloških karata i ustanovljeno je dostatno podudaranje.

Za proračunate vrijednosti prirasta intenziteta (Tablica 5.15) pouzdanost rezultata potvrđena je validacijom s obzirom na vrijednosti koje su predložili Medvedev (1962.) te Everdnden i Thomson (1985.).

S obzirom na broj katova za obje usvojene kombinacije slojeva temeljnog tla ($s = 0$ $s_L = 2$ i $s = 0$ $s_L = 1$) proračunati su modifikatori oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika tla, za zidane i armiranobetonske zgrade (Tablica 5.17). Utvrđena je veća promjenjivost proračunatih vrijednosti $V_{s,n}$ u odnosu na vrijednosti proračunate na temelju HRN EN 1998-1:2011/NA.

Zbrajanjem doprinosa svih modifikatora oštećljivosti, za svaku zgradu iz modela izloženosti proračunat je ukupni indeksi oštećljivosti (Tablica 5.19). Prema preporuci EMS – 98 ukupni indeksi oštećljivosti pretvoreni su u odgovarajuće razrede oštećljivosti i dodijeljeni svakoj zgradi (Tablica 5.22).

Na temelju generiranih rezultata oštećljivosti pojedinačnih zgrada, procijenjena je i predložena oštećljivost dominantnih tipologija zidanih i armiranobetonskih zgrada, generiranih metodologijom opisanom u poglavlju 4, i prikazana u tablici 4.10. Razred oštećljivosti za predloženu tipologiju drvenih konstrukcija iz tablice 4.10 nije predložen jer među do sada popisanim zgradama u modelu izloženosti nije bilo zgrada kojima bi se mogla modelirati oštećljivost ove tipologije.

Provedena je usporedba generiranih razreda oštećljivosti za predložene tipologije u ovom doktorskom radu i razreda oštećljivosti koje predlaže EMS-98 na temelju koje je zaključeno da predložena unaprjeđenja preciznije modeliraju oštećljivost, osobito armiranobetonskih zgrada.

Za sve predložene tipologije, proračunat je izrazom (5.1) srednji stupanj oštećenja te su izrađene pripadne krivulje oštećljivosti. Generirane krivulje oštećljivosti uspoređene su s krivuljama oštećljivosti predloženim za iste tipologije u sličnim istraživanjima. Na temelju usporedbe zaključeno je o značajnom podudaranju krivulja oštećljivosti tipologije OZ_K generiranih u ovom radu i onih u promatranim istraživanjima.

Kako bi se rezultati modeliranja oštećljivosti i njihova distribucija u modelu izloženosti mogli što vjernije vizualno prikazati, implementirani su u QGIS.

Potencijal oštećljivosti zgrada je određena razina fizičkog gubitka s precizno definiranim posljedicama s obzirom na preostalu sposobnost deformabilnosti i nosivosti. Prikladna metodologija procjene potresne oštećljivosti treba kvantificirati moguću veličinu gubitka, ali tek nakon što se kvantificira potresna uzbuda i njezin utjecaja na temeljno tlo i ostale izložene elemente rizika promatranog područja.

6. PROCJENA POTRESNOG RIZIKA (GUBITAKA) ZA ZGRADE IZ MODELA IZLOŽENOSTI GRADA OSIJEKA

Istražena je procjena gubitaka na razini zgrada jer se modeliranje procjena svih drugih potresnih gubitaka temelji na oštetljivosti zgrada. Procijenjena je vjerojatnost nastanka potresnih gubitaka na zgradama iz modela izloženosti grada Osijeka kombiniranjem vjerojatnosti postojanja određenih razina oštećenja s težinskim koeficijentima. Kako za promatrano područje ne postoje podatci o štetama na zgradama od potresa usvojeni su faktori oštećenja (engl. *Damage Factor, DF*) predloženi u literaturi. Izravni financijski gubitci procijenjeni su za šest stupnjeva intenziteta potresa (IV., V., VI., VII., VIII. i IX. stupanj intenziteta).

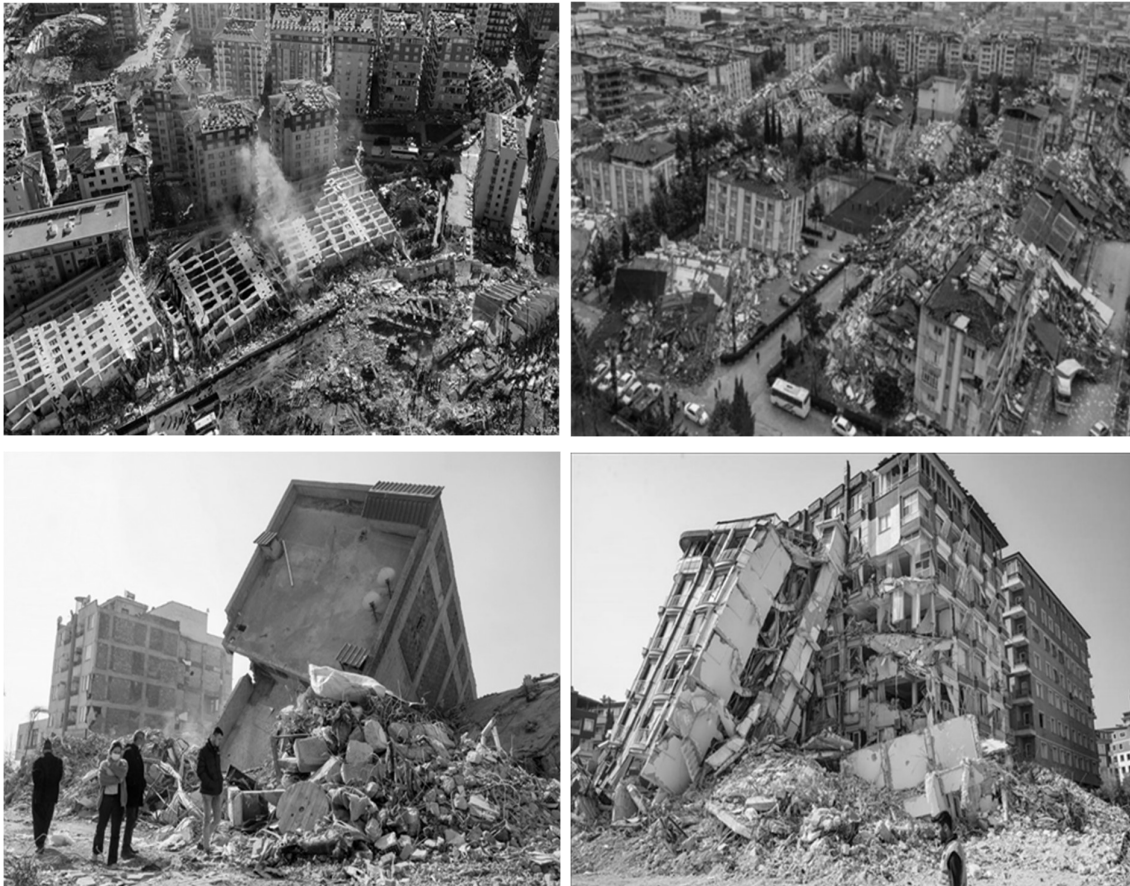
6.1. Potresni gubitci

Predviđanje potencijalnih potresnih gubitaka temelj je za razvoj strategija smanjenja rizika te planiranje financijskih sredstava za ublažavanje njihovih posljedica. U samo nekoliko godina početkom 21. stoljeća uloženo je oko 13,5 milijardi dolara (Kellett i Caravani 2013) za provedbu različitih mjera za smanjenje i sanaciju gubitaka u područjima pogođenim prirodnim katastrofama. Prema MunichRe (2012.), ekonomski gubitci od potresa tada su činili 20 % ukupnih godišnjih gubitaka od štetnih događaja, međutim u pojedinim godinama iznosili su i 60 %.

Zgrade su predominantni elementi oštetljivosti izgrađenog okoliša, a njihovi gubitci zbog oštećenja od potresa najviše doprinose ukupnom ekonomskom potresnom gubitku. Preliminarne procjene Turskog poduzetničko-poslovnog udruženje (Turkonfed) nakon potresa koji je 2023. pogodio Tursku i Siriju predviđaju štetu na stambenim zgradama u vrijednosti od oko 70,8 milijardi dolara. Na slici 6.1 prikazane su zgrade u Turskoj nakon razornog potresa 6. veljače 2023.

Konstruktivna i nekonstruktivna oštećenja zgrada nastala zbog potresne uzbude glavni su uzrok drugih potresnih gubitaka (stradanja ljudi, infrastrukturnih, prometnih, ekonomskih i dr. gubitaka), npr. urušavanje zgrada u potresima u Turskoj i Siriji usmrtilo je približno 45 000 ljudi. Istraživanja globalnih potresnih gubitaka procjenjuju da potresi u prosjeku ubiju više od 5 000 ljudi svakih 900 dana. Zbog nedavnog potresa za Tursku su procijenjeni gubitci nacionalnog dohotka od 10,4 milijardi dolara te 2,91 milijardi dolara gubitaka zbog izgubljenih radnih dana (middleeasteye.net. pristupljeno 1. 4. 2023.).

Gubitci od potresa primarno su u funkciji oštećljivosti zgrada jer se temelje na fizičkim stanjima oštećenja zgrada koja najviše doprinose promatranoj vrsti gubitka (Kircher 1997). Procjene potresnih gubitaka zgrada upotrebljavaju se kao ulazni podatci za modeliranje procjena drugih gubitaka.



Slika 6.1. Potresni gubitci – potres 6. veljače 2023. (M 7,8) – Turska i Sirija
(<https://www.dw.com/hr/>, foto: DHA/AFP; <https://prigorski.hr/>, foto: Twitter;
<https://www.portalnovosti.com/>, foto: Boris Roessler; <https://bosnainfo.ba/>, foto:
ANADOLIA. pristupljeno 1. 4. 2023.)

Nakon potresa u Zagrebu i Petrinji 2020. procjene gubitaka od potresa na zgradama (i ostalim elementima izloženim potresnom riziku), ponovo su zaokupile pozornost institucija društva i istraživača potresnog rizika u Hrvatskoj. Provode se inicijalne procjene gubitaka i uporabljivosti zgrada na potresom pogođenim područjima u skladu s postojećim znanjima i iskustvima relevantne akademske zajednice, ali se oslanja i na iskustva istraživača iz susjednih zemalja te ih se prilagođava lokalnim okolnostima.

Šteta i uporabljivost procijenjene u skladu s EMS-98 ljestvicom temelj su za utvrđivanje troškova popravka i obnove. Kako na razini države do danas nije definiran način valorizacije troška od štete na zgradama zbog potresa, procjene troška provode se na temelju iskustava o troškovima obnove sličnih tipologija zgrada nakon ranijih potresa i izražavaju se u odnosu na trošak izgradnje zamjenske građevine. Kod određivanja troška za pojedinu tipologiju uzimaju se u obzir cijene usklađene s trenutnom situacijom na tržištu te cijene obnove upotrijebljene za proračun troškova obnove nakon potresa u Italiji (D'Ayala i dr. 1997). Primjenjuje se načelo da se zgrade vraćaju u stanje otpornosti i uporabljivosti prije potresa uz minimalne dodatne intervencije koje su potrebne da bi se pojačali ključni elementi koji su doveli do oštećenja i /ili djelomičnog urušavanja zgrade.

Na temelju nastalih izazova, uočenih potreba i stečenih iskustava razvija se metodologija procjene štete te financijske kvantifikacije nastalih gubitaka na zgradama zbog potresa, prilagođena potrebama Republike Hrvatske.

Prema izvješću (Vlada Republike Hrvatske 2021) iz veljače 2021., nakon potresa zabilježena su oštećenja na zgradama čija je ploština veća od 11,2 milijuna m², pri čemu se većina oštećene ploštine, 73 % odnosi na stambene zgrade (ukupno 8,2 milijuna m²). Od ukupno 48 941 zgrade za koje je prijavljena šteta, prema podacima HCPI (Hrvatskog centra za potresno inženjerstvo), u prvih 70 dana nakon potresa pregledano je 37 276 ili 75,6 % zgrada prijavljenih za pregled uporabljivosti.

Opasnost od potresa utječe na izgrađeni okoliš, živu i neživu prirodu na različite načine, od ekonomskih do društvenih. S obzirom na veličinu gubitaka koje uzrokuje, potresna opasnost se treba uzeti u obzir kao neizostavna komponenta kod projektiranja građevinskih konstrukcija i planiranja procesa smanjenja rizika.

Iako je pristupanjem Europskoj uniji Republika Hrvatska preuzela obveze iz područja upravljanja rizicima od katastrofa, a šteta i gubitci već nakon potresa u Zagrebu 2020. potakle Vladu Republike Hrvatske na izradu Zakona o obnovi zgrada oštećenih potresom i ubrzavanje aktivnosti vezanih uz njih, brojni su problemi ozbiljna prepreka pouzdanijim procjenama gubitaka od potresa i na njima je potrebno kontinuirano i sustavno raditi kako bi se postavio temelj kvalitetnoj strategiji smanjenja rizika.

6.1.1. Vjerojatnost gubitaka

Vjerojatnost pojave određene posljedice potresa p_c može se proračunati kombiniranjem vjerojatnosti pojave određenog stupnja oštećenja p_k i težinskog koeficijent $w_{C,k}$ prema jednadžbi (Giovinazzi 2005):

$$p_c = \sum_k w_{C,k} \cdot p_k \quad (6.1)$$

gdje je:

p_c – vjerojatnost posljedice zbog potresa

p_k – vjerojatnost pojave određenog stupnja oštećenja

$w_{C,k}$ – težinski koeficijent.

Težinskim koeficijentima modeliraju se različite korelacije između stupnjeva oštećenja D_{Gk} ($k = 1 - 5$) i faktora oštećenja DF (engl. *Damage Factor*) koji su generirani iskustveno ili obradom podataka o financiranju potreba za popravak i obnovu oštećenih zgrada nakon potresa.

Makroseizmički pristup, usvojen u ovom radu za modeliranje oštetljivosti zgrada razlikuje pet stupnjeva oštećenja (D_{Gk} , $k = 1 - 5$), prikazanih u tablici 6.1 (Giovinazzi 2005). Stupnjevi oštećenja prikazani u tablici 6.1 odgovaraju ljestvici oštećenja EMS-98 (Grunthal 1998).

Tablica 6.1 Stupnjevi oštećenja D_{Gk} (Giovinazzi 2005):

Stupnjevi D_G					
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
D_G	Neznatno (D_{G1})	Umjereno (D_{G2})	Znatno do teško (D_{G3})	Teško (D_{G4})	Rušenje (D_{G5})

Vjerojatnost nenastanljivosti zgrada zbog potresa (p_{Ud}) odnosno vjerojatnost da će oštećena zgrada pretrpjeti određeni faktor oštećenja p_{DF} procjenjuje se prema jednadžbi (6.2) pozivajući se na ponderirane vrijednosti težinskih faktora $w_{DF,k}$:

$$p_{Ud} = w_{Ud,3}p_3 + w_{Ud,4}p_4 + w_{Ud,5}p_5 \quad (6.2)$$

gdje je:

p_{Ud} – vjerojatnost nenastanljivosti zgrada zbog potresa

$p_{k(3,4,5)}$ – vjerojatnost pojave određenog stupnja oštećenja

$w_{Ud,k(3,4,5)}$ – težinski koeficijenti.

U tablici 6.2 prikazani su težinski koeficijenti prema HAZUS (1999.), SSN (1995.) i ATC13 (1987.) namijenjeni za procjene ekonomskih gubitaka zbog fizičkog oštećenja zgrada te težinski koeficijenti prema HAZUS (1999.) i Bramerini (1995.) predloženi za procjene postotka nenastanljivih zgrada. Nenastanjive zgrade definirane su kao zgrade kod kojih je veći dio zgrade pretrpio potpuna oštećenja, a ostali dijelovi manja oštećenja. Prema ovom pristupu, svakoj vjerojatnosti pojave određenog stupnja oštećenja (počevši od stupnja oštećenja D_3 u ovom slučaju (nenastanjive zgrade)) pripisuju se različiti težinski koeficijenti $w_{Ud,k}$.

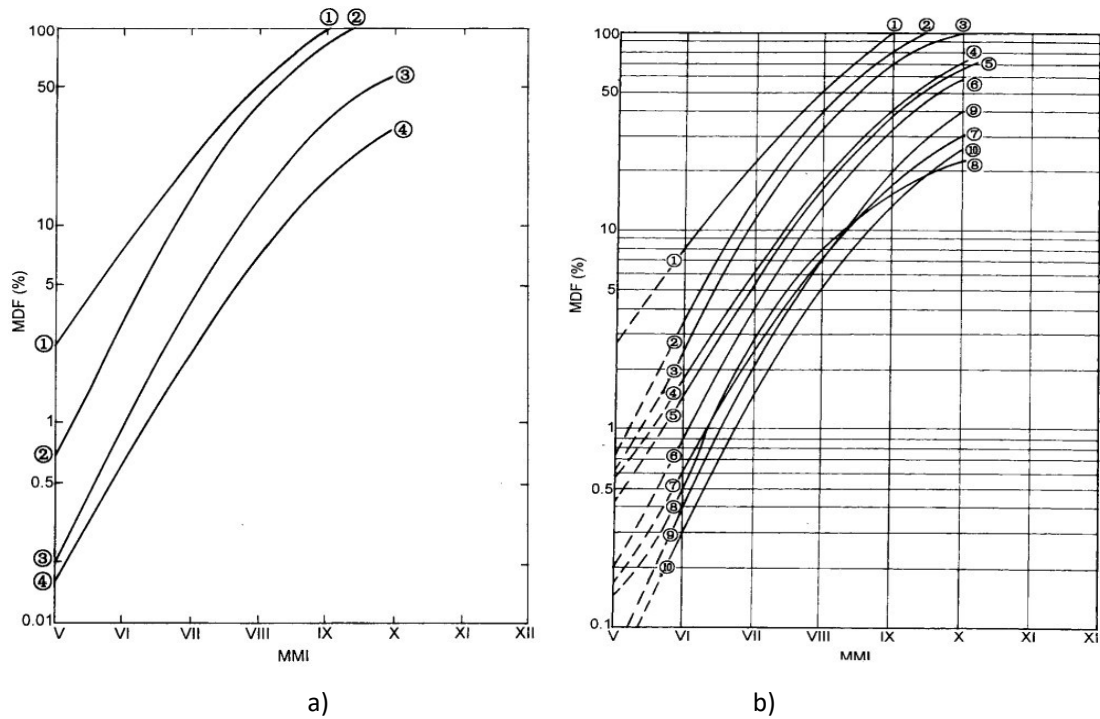
Tablica 6.2 Težinski koeficijenti - HAZUS (1999.), SSN (1995.) i ATC13 (1987.) i Bramerini (1995.)

Stupanj oštećenja	$W_{DF,k}$	HAZUS (1999.)	SSN (1995.)	ATC13 (1987.)	$W_{Ud,k}$	HAZUS (1999.) SFD	HAZUS (1999.) MFD	Bramerini (1995.)
D_1	$W_{DF,1}$	0,02	0,01	0,05				
D_2	$W_{DF,2}$	0,10	0,10	0,20				
D_3	$W_{DF,2}$	0,50	0,35	0,55	$W_{Ud,3}$	0	0,90	0,40
D_4	$W_{DF,2}$	1	0,75	0,9	$W_{Ud,4}$	1	1	1
D_5	$W_{DF,2}$	1	1	1	$W_{Ud,5}$	1	1	1
Samostojeće obiteljske kuće (engl. <i>Single-Family Detached Homes</i> , SFD) Višestambene zgrade (engl. <i>Multi-Family Dwellings</i> , MFD)								SFD i MFD

Vjerojatnost ukupnih gubitaka odnosno mogućnost da određeno stanje gubitka bude unutar dopuštenih raspona vrijednosti ili premašeno može se prikazati krivuljama oštetljivosti za gubitke i posljedice. Krivulje se generaju na temelju odnosa između potresnog intenziteta i srednjeg koeficijenta oštećenja MDF (engl. Mean Damage Factor).

Na slici 6.2a prikazane su krivulje oštetljivosti prema Akkasu i Erdiku (1984.) za 4 tipa zgrada koja su uobičajena na području Srednje Turske: 1. ziđe (nepečena opeka); 2. ziđe od opeke; 3. pravilno projekirane armiranobetonske zgrade konstrukcijskog sustava okvir; 4. pravilno projektirane armiranobetonske zgrade s nosivim zidovima. Sauter i Shah (1978.) izradili su krivulje oštetljivosti za tipične zgrade Kostarike (Slika 6.2b): 1. zgrade od čerpića; 2. nearmirano ziđe – loše kvaliteta; 3.

armiranobetonski okviri bez potresnog projektiranja; 4. čelični okviri – bez potresnog projektiranja; 5. armirano žiđe – srednje kvalitetno, bez potresnog projektiranja; 6. armiranobetonski okviri – s potresnim projektiranjem; 7. nosivi zidovi s potresnim projektiranjem; 8. drvene zgrade; 9. čelični okviri s potresnim projektiranjem; 10. armirano žiđe – visoka kvaliteta potresnog projektiranja.



Slika 6.2 Krivulje oštećljivosti prema: a) Akkasu i Erdiku (1984.), b) Sauteru i Shahu (1978.)

Krivulje oštećljivosti za gubitke i posljedice proračunavaju se prema izrazu (6.3) (Giovinazzi 2005):

$$P_C = \sum_k (w_{C,k} - w_{C,k-1}) P[D_k] \quad (6.3)$$

gdje je:

P_c – vjerojatnost da određeno stanje gubitka bude unutar dopuštenih raspona vrijednosti ili premašeno

$P[D_k]$ – vjerojatnost pojave određenog stupnja oštećenja

$w_{C,k}$ – težinski koeficijenti.

Odnos između intenziteta i srednjeg koeficijenta oštećenja, osim krivuljama vjerojatnosti oštećenja (Slika 6.2), može se prikazati matricama vjerojatnosti oštećenja (DPM). Matrice vjerojatnosti oštećenja u diskretnom obliku izražavaju uvjetnu vjerojatnost dobivanja razine oštećenja j , zbog potresa

intenziteta I , tj. $P [D = j|I]$. Oštećenja zgrada opisuju se razinama oštećenja. Za isti intenzitet potresa isti tip zgrade ima istu vjerojatnost oštećenja. U tablici 6.3 prikazana je prva, sad već zastarjela, matrica vjerojatnosti oštećenja prema Withmanu i dr. (1973.) u kojoj su razine konstrukcijske i nekonstrukcijske štete proračunate u funkciji intenziteta.

Tablica 6.3 Matrice vjerojatnosti oštećenja prema Withman i dr. (1973.)

Razina oštećenja	Konstrukcijsko oštećenje	Nekonstrukcijsko oštećenje	Raspon oštećenja	Stupanj intenziteta				
				V	VI	VII	VIII	IX
0	Nema	Nema	0–0,05	10,4	-	-	-	-
1	Nema	Manja	0,05–0,30	16,4	0,5	-	-	-
2	Nema	Lokalizirano	0,30–1,25	40,0	22,5	-	-	-
3	Neprijetno	Rasprostranjeno	1,25–3,5	20,0	30,0	2,7	-	-
4	Manje	Znatno	3,50–4,50	13,2	47,1	92,3	58,8	14,7
5	Znatno	Opsežno	7,50–20	-	0,2	5,0	41,2	83,0
6	Značajno	Skoro potpuno	20–65	-	-	-	-	2,3
7	Zgrada je pred slomom		100	-	-	-	-	-
8	Slom		100	-	-	-	-	-

6.2. Procjene potresnih gubitaka za zgrade

Potresni gubici za zgrade obično se opisuju omjerom gubitaka koji varira ovisno o snazi potresa i vrsti konstrukcije zgrade. Na veličinu rezultata procjene gubitaka zgrada utječu i drugi faktori: izgrađenost, seizmičnost te potencijal područja za pojavu prirodnih i drugih opasnosti povezanih s potresom, karakteristike temeljnog tla, zastupljenost konstrukcijskih sustava u ukupnom fondu zgrada, starost i održavanje građevinskog fonda te dr.

Gubici zbog oštetljivosti zgrada mogu biti izravni i neizravni. Izravni se odnose na troškove za popravak konstrukcijskih i nekonstrukcijskih oštećenja zgrada i opreme koja su posljedice potresa, a neizravni troškovi su npr. izgubljena dobit zbog prekida u proizvodnji robe i pružanju usluga, viši troškovi poslovanja i proizvodnje, trošak humanitarnih aktivnosti, gubitka radnih dana i slično.

Prema izvješću Vlade Republike Hrvatske (2021.), posljedice potresa u Petrinji 2020. procijenjene su na više od 12,52 milijarde eura, od čega se 4,12 milijardi eura odnosi na vrijednost potpuno ili djelomično uništenih materijalnih dobara (zgrada, infrastrukture, prometnica i sl.), 8,4 milijarde eura

na izravne troškove, a 714 milijuna eura na neizravne gubitke koji se za pogođeno područje proračunavaju za razdoblje od nastanka katastrofe do kraja razdoblja obnove i oporavka.

Potresni gubitci za zgrade mogu se proračunati različitim pristupima. Prema makroekonomskom pristupu gubitci se proračunavaju kao:

$$\text{Gubitci} = \text{potresna opasnost} \times \text{oštjetljivost} \times \text{izloženost} \quad (6.4)$$

Yong i dr. (2011.) makroekonomske gubitke modeliraju makroskopskim indikatorom, kojim se direktno predstavlja ukupnu izloženost promatranog područja. Za proračun predlažu izraz (Yong i dr. 2011.):

$$L = \sum_I P(I) \cdot F(I, S) \cdot S \quad (6.5)$$

gdje je:

L – gubitak

S – ukupna izloženost područja

$F(I, S)$ – makroseizmička oštjetljivost

$P(I)$ – zbroj vjerojatnosti opasnosti i ukupni gubitak različitih stupnjeva intenziteta.

Ukupnu izloženost u procjeni gubitaka od potresa izražavaju BDP-om (Bruto domaćim proizvodom) kao makroekonomskim pokazateljem koji mjeri ukupnu proizvodnju svih dobara i usluga za konačnu upotrebu promatranog područja tijekom određenog vremenskog razdoblja. Pretpostavlja se, naime, da je odnos između ukupnog društvenog bogatstva (BDP-a) i izloženosti proporcionalan:

$$L = \sum_I P(I) \cdot F(I, BDP) \cdot BDP \quad (6.6)$$

gdje je:

$F(I, BDP)$ – mjera oštjetljivosti područja za danu BDP vrijednost i intenzitet potresa.

Prema projekcijama makroekonomskih pokazatelja koje je Vlada Republike Hrvatske prezentirala u izvješću „Potres u Hrvatskoj iz prosinca 2020.“ početkom 2021., zbog gubitaka povezanih s potresom predviđeno je smanjenje rasta realnog BDP-a u Hrvatskoj za 0,3 postotna boda u usporedbi s referentnim podacima prije potresa. Izvješće Europske komisije iz 2022. (SWD(2022) 613) prezentira pak podatke o smanjenju bruto domaćeg proizvoda u 2020. u Hrvatskoj od 8,1 %.

6.2.1. Financijska procjena gubitaka

Gubitci na zgradama nastali zbog djelovanja potresa kombinacija su rezultirajućih gubitaka od popravaka i zamjene konstrukcijskih i nekonstrukcijskih elemenata kada zgrada nije srušena i od gubitaka vezanih za rušenje i obnovu kada je zgrada srušena. Ukupni procijenjeni gubitak za određenu razinu intenziteta generira se zbrajanjem procijenjenih oštećenja u raznim kategorijama zgrada za određeno područje.

Procjena gubitaka na zgradama proračunava se iz omjera troškova popravka te troškova obnove koji odgovaraju ukupnoj vrijednosti zgrade, definirani kao koeficijent oštećenja DF prema izrazu (Yong i dr. 2001, ATC 1985):

$$DF = \frac{\text{troškovi popravka}}{\text{vrijednost zgrade}} \quad (6.7)$$

Zbog matematičke jednostavnosti gubitci skupina konstrukcijski sličnih zgrada izloženih istom intenzitetu mogu se odrediti srednjim koeficijentom oštećenja MDF (engl. *Mean Damage Factor*) (Yong i dr. 2001, ATC 1985) .

$$MDF = DF \quad (6.8)$$

Za proračun srednjeg koeficijenta oštećenja predložen je izraz (Young 2001, ATC 1985):

$$MDF = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\text{troškovi popravka}}{\text{vrijednost zgrade}} \quad (6.9)$$

gdje je:

n – broj zgrada u uzorku.

U tablici 6.4 prikazani su srednji koeficijenti oštećenja MDF i raspon koeficijenata oštećenja DF za 5 stupnjeva oštećenja prema Yin Zhiqian (1995.), Hwangu i dr. (1994.) i Gurpinar i dr. (1978.). Kao što se vidi iz tablice, istraživači različito tumače usvajanje srednjeg koeficijenta oštećenja, prema nekima je to srednja vrijednost predloženih koeficijenata oštećenja DF (%), a prema drugima srednji koeficijent oštećenja usvaja se prema drugim kriterijima (iskustvenim i dr. spoznajama).

Ovisno o potrebama istraživanja različito se prema različitim autorima usvaja i broj stupnjeva oštećenja: Grunthal (1998.) predlaže stupnjeve od 0 do 5, Giovinazzi (2005.) od 1 do 5 (Tablica 6.1),

Yin (1995.) za kontinentalnu Kinu upotrebljava 5, a Cotrufo (2018.) za procjena štete na zgradama nakon potresa iz slika vrlo visoke rezolucije (VHR) upotrebljava 4 stupnja oštećenja.

Tablica 6.4 Srednji koeficijenti oštećenja MDR i raspon koeficijenata oštećenja DF za 5 stupnjeva oštećenja prema Yin Zhiqian (1995.), Hwangu i dr. (1994.) i Gurpinar i dr. (1978.).

Stupanj oštećenja	Koeficijent oštećenja DF (%)			Srednji koeficijent oštećenja MDF (%)		
	Yin i Zhiqian (1995.)	Hwang i dr. (1994.)	Gurpinar i dr. (1978.)	Yin i Zhiqian (1995.)	Hwang i dr. (1994.)	Gurpinar i dr. (1978.)
Bez oštećenja	0	0,05 – 1,25	0 – 1	0	0,3	0
Lagano konstruk. oštećenje	1 – 10	1,25 – 7,5	1 – 10	5	3,5	5
Umjerenom konstruk. oštećenje	10 – 40	7,5 – 20	10 – 50	25	10	30
Ozbiljno konstruk. oštećenje	40 – 80	20 – 90	50 – 90	60	65	70
Slom (rušenje)	80 – 100	90 – 100	90 – 100	90	95	100

Potresni gubitci skupine konstrukcijski sličnih zgrada mogu se odrediti srednjim koeficijentom oštećenja MDF_I koji je promjenjiv s obzirom na intenzitet, izrazom (Young 2001, ATC 1985):

$$MDF_I = \frac{1}{n} \cdot \sum_{DG=1}^5 P_{DGI} \cdot MDF_{DG} \quad (6.10)$$

gdje je:

MDF_I – srednji koeficijenti oštećenja za određeni intenzitet

DG – stupanj oštećenja

P_{DGI} – vjerojatnost određenog stupnja oštećenja za promatrani intenzitet

MDF_{DG} – srednji koeficijent oštećenja za određeni stupanj intenziteta.

Srednji koeficijenti oštećenja MDF_I za stupnjeve intenziteta: VI., VII., VIII. i IX. predloženi prema nekoliko istraživanja prikazani su u tablici 6.5.

Tablica 6.5 Srednji koeficijenti oštećenja MDF_I za stupnjeve intenziteta: VI., VII., VIII. i IX.

Kvaliteta zgrade	Srednji koeficijent oštećenja (%) (%, za stupnjeve intenziteta)				Tip zida i referenca
	VI	VII	VIII	IX	
Loša kvaliteta	4	12	40	82	Ziđe od opeke loše kvalitete (Akkas i Erdik 1984)
	3	15	40	83	Nearmirano ziđe (Sauter i Shah 1978)
	8	14	41	72	Ziđe od opeke s tankim zidovima (Yin 1995)
Srednja kvaliteta	2	8	20	35	Ziđe od opeke (Akkas i Erdik 1984)
	2	7	18	32	Armirano ziđe bez potresnog projektiranja, srednje kvalitete (Sauter i Shah 1978)
	4	7	17	30	Industrijske zgrade i ziđe od opeke s tankim zidovima (Yin 1995)
Visoka kvaliteta	0,6	2	7	14	Pravilno projektiranje armiranobetonski zidovi (Akkas i Erdik 1984)
	0,4	2	6	14	Armirano ziđe visoke kvalitete, potresno projektirano (Sauter i Shah 1978)
	0,4	2	6	14	Armiranobetonske zgrade (Yin 1995)

6.2.2. Koeficijenti oštećenja

Upotrebljavajući podatke prikupljene promatranjem i evidentiranjem oštećenja na zgradama nakon potresa ili podatke o troškovima popravka/zamjene konstrukcijskih i nekonstrukcijskih oštećenja na zgradama nakon potresa, proračunavaju se koeficijenti oštećenja.

HAZUS-MH (FEMA 2003) zadane vrijednosti izravnih ekonomskih konstrukcijskih i nekonstrukcijskih gubitaka zgrada temelji na sljedećim pretpostavkama odgovarajućeg omjera gubitaka za svako stanje oštećenja:

- manja šteta – gubitak od 2 % cijene zamjenske zgrade
- umjerena šteta – gubitak od 10 % cijene zamjenske zgrade
- velika šteta – gubitak od 50 % cijene zamjenske zgrade
- potpuna šteta – gubitak od 100% cijene zamjenske zgrade.

Tablica 6.6 Koeficijenti oštećenja (prema D'Ayala 2013)

KOEFICIJENTI OŠTEĆENJA

Ljestvica oštećenja	EMS-98					
Stupanj oštećenja	D0	D1	D2	D3	D4	D5
OPĆI						
Fah i dr. (2001.) _ Mean DFs	0 %	< 5 %	20 %	55 %	90 %	100 %
Milutinović i Trendafiloski (2003.)	0 %	1 %	10 %	35 %	75 %	100 %
Kostov i dr. (2004.)	0 %	1 %	10 %	40 %	80 %	100 %
Di Pasquale i dr. (2005.)	0 %	1 %	10 %	35 %	75 %	100 %
ARMIRANOBETONSKI OKVIR S ISPUNSKIM ŽIDEM						
Milutinovic i Trendafiloski (2003.)	0 %	<15%	15 – 5%	25 – 35%	35 – 45%	45 %
Goretti i Di Pasquale (2004.) RC_ Mean DF vrijednosti	1,5 %	3,4%	14,4%	20,6%	100%	100%
Goretti i Di Pasquale (2004.) RC_ Stand. dev. DF vrijednosti	2,6%	3,6%	7,2%	8,9%	0%	0%
Dolce i dr. (2006.) _ razr. oštetljiv. A	0%	0 – 10%	10 – 30%	30 – 60%	60 – 100%	100%
Dolce i dr. (2006.) _ razr. oštetljiv. B	0%	0 – 1%	1 – 30%	30 – 60%	60 – 100%	100%
Kappos i dr. (2006., 2008.) _ RC _ DFs	0%	0 – 1%	1 – 10%	10 – 30%	30 – 60%	60 – 100%
Kappos i dr. (2006, 2008) _ RC _ Mean	0%	0 – 5%	5%	20%	45%	80%
Hill (2011.) _ Median DF	0%	100%	100%	100%	100%	100%
Hill (2011.) _ 25 percentil DF	0%	100%	100%	100%	100%	100%
Hill (2011.) _ 75 percentil DF	0%	100%	100%	100%	100%	100%
NEARMIRANO ŽIĐE						
EMS98 _ razr. oštetljiv. A _ Mean	2,9%	10,8%	22,2%	30,6%	87,6%	100%
EMS98 _ razr. oštetljiv. A _ Std. dev.	5,2%	5,0%	5,7%	6,7%	23,4%	0%
EMS98 _ razr. oštetljiv. B _ Mean	0,9%	7,9%	20,3%	29,3%	97,5%	100%
EMS98 _ razr. oštetljiv. B _ Std. dev.	2,6%	4%	4,8%	7,7%	11,2%	0%
EMS98 _ razr. oštetljivosti C _ Mean	0,7%	5,8%	18,7%	26,7%	96,1%	100%
EMS98 _ razr. oštetljiv. C _ Std. dev.	2%	4,2%	4,4%	5,2%	15,5%	0%
D’Ayala i dr. (1997.)	0%	5%	20%	50%	80%	100%
Milutinovic i Trendafiloski (2003.)	0%	<20%	20 – 30%	30 – 40%	40 – 50%	>50%

Kappos i dr. (2006., 2008.) predlažu koeficijente oštećenja za armiranobetonske zgrade procijenjene na temelju podataka o troškovima popravka/zamjene konstrukcijskih (pretpostavlja se i nekonstrukcijskih oštećenja), 3 960 zgrada nakon potresa u Solunu (Grčka) 1978.

Za različite tipove zgrada razvrstane prema materijalu gradnje i razredu oštećljivosti (EMS-98) Goretti i Di Pasquale (2004.) predlažu koeficijente oštećenja procijenjene na temelju podataka o troškovima popravka/zamjene 23 000 zgrada oštećenih potresom 2002. na području talijanske regije Molise.

Koeficijenti oštećenja koje predlažu Milutinović i Trendafiloski (2003.) temelje se na stručnoj prosudbi i iskustvu stečenim promatranjem oštećenja na zgradama nakon potresa u Skopju 1963. (Sjeverna Makedonija). Predložene vrijednosti bitno se razlikuju od ostalih prijedloga, osobito za peti stupanj oštećenja, a neupitno je da se razlikuju i načini na koji su generirani, pa je upravo to možda uzrok razlika.

Za loše zidane zgrade od opeke i lomljenog kamena koeficijente oštećenja predlažu D'Ayala i dr. (1997.) generirane na temelju podataka o troškovima popravka – zamjene uglavnom zgrada s 2 – 6 katova u četvrti Alfama u Lisabonu.

6.2.3. Procjena gubitaka za zgrade prema Aničiću (1992.)

Financijski gubitci za zgrade nastali zbog potresa se prema prijedlozima u postojećoj literaturi (Poglavlje 6.2.1.) izražavaju relativnim gubiticima zbog oštećenja u odnosu na „vrijednost građevina“ (omjer troškova potrebnih za popravaka i troškova zamjene zgrade).

Prema Aničiću (1992.), ovi prijedlozi ne razlikuju jasno pojam gubitak (engl. *loss*), odnosno štete na zgradi nastale zbog potresa povezane s vrijednošću građevine prije potresa, od pojma troška obnove (engl. *replacement cost*) nakon potresa.

Pojam štete definira pravna znanost kao umanjenju vrijednosti nečije imovine koju je ta imovina imala prije nastupanja štetnog događaja pa ona u građevinarstvu ne može imati drugo značenje. Zato „vrijednost građevine“ kojom se određuje financijski gubitak, tj. šteta ne može biti cijena zamjenske građevine tj. cijena izgradnje nove zgrade (Aničić, usmena komunikacija, travanj 2023).

Zgrada oštećena u potresu ima neku starost, što znači da je od njezine izgradnje do trenutka oštećenja u potresu bila u određenoj mjeri istrošena (amortizirana) te da ima manju vrijednost od početne. Oštećena zgrada nije bila izgrađena sukladno tehničkim propisima koji su na snazi u trenutku potresa, pa je zato imala manju potresnu otpornost. Trošak gradnje zamjenske zgrade čija je otpornost usklađena sa zahtjevanim normama bio bi veći od gradnje izvorne građevine. Za izgradnju nove

građevine iste namjene upotrijebit će se suvremeni materijali, proračunska otpornost zgrade će građevinskim zahvatima biti povećana, a taj trošak nije šteta prouzročena potresom nego trošak/cijena obnove (Aničić, usmena komunikacija, travanj 2023).

Zato Aničić (1992.) predlaže izražavanje postotka oštećenja zgrada u odnosu na početno stanje – stanje zgrade prije potresa.

Modeliranje gubitaka zgrada prema Aničiću (1992.) provodi se uz pretpostavke koje se odnose na jačinu, intenzitet i trajanje potresa, karakteristike temeljnog tla, potresnu otpornost zgrada ovisnu o konstrukcijskom sustavu i sl. Prijedlog postotka oštećenja generiran je na temelju zgrada razvrstanih u pet konstrukcijskih razreda: zidane zgrade (I), zidane zgrade s armiranobetonskim serklažima (II), armiranobetonske zgrade konstrukcijskog sustava okvir (III), zgrade sa sustavom armiranobetonskih nosivih zidova (IV) i armiranobetonske zgrade konstrukcijskog sustava okvir s armiranobetonskim nosivim zidovima (V). Oštetljivost usvojenih konstrukcijskih sustava modelira primjenjujući matrice vjerojatnosti oštećenja prema Withmanu (1975.) za promatrane intenzitete potresa.

Šteta na stambenom fondu izražava se postotkom oštećenja zgrada u odnosu na početno stanje (preko broja zgrada izraženog postotkom koji obuhvaća ukupan broj zgrada) izrazom:

$$(PU) = \sum_{i=1}^n B_1 \cdot \left(\sum_{j=1}^m C_{ij} \cdot G_{ij} \right) \quad (6.11)$$

gdje je:

PU – postotak oštećenja zgrada

B_1 – postotak zastupljenosti zgrada određenog konstrukcijskog sustava u ukupnom broju zgrada određene gradske zone

C_{ij} – postotak oštećenja zgrada određenog konstrukcijskog sustava prema stupnjevima oštećenja za određeni intenzitet potresa u odnosu prema ukupnom broju zgrada tog sustava

G_{ij} – postotak građevinske štete koji odgovara pojedinom stupnju oštećenja u odnosu na vrijednosti zgrada za j -to oštećenje i -tog konstrukcijskog sustava

i – konstrukcijski sustav ((I), (II), (III), (IV), (V))

j – stupanj oštećenja (1.,2.,3.,4.,5.,6.)

$n = 5$

$m = 6$

U tablici 6.7. prikazana je generirana matrica oštećljivosti za potres VIII. stupnja za 5 usvojenih konstrukcijskih sustava i postotak uništenosti zgrada (građevinska šteta). Oštećenja su razvrstana u 6 kategorija (1. – 6.) tako da svakom stupnju oštećenja i konstrukcijskom sustavu odgovara jedan element matrice tj. postotak oštećenja ukupnog broja zgrada.

Tablica 6.7 Matrica oštećljivosti za potres VIII. stupnja i postotak građevinske štete (prema Aničiću 1992)

Kategorije oštećenja	Stupanj oštećenja	Postotak oštećenja konstrukcijskog sustava u odnosu prema ukupnom broju zgrada (*)					Građevinska šteta % (**) G
		C					
		(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)	
1.	nikakvo-nema	8	50	15	5	15	0
2.	neznatno	10	25	25	70	20	6
3.	umjereno	30	15	33	25	50	20
4.	jako	45	10	15	-	15	40
5.	totalno	4	-	5	-	-	62
6.	rušenje	3	-	2	-	-	100

* zidane zgrade

** za pojedine konstrukcijske sustave građevinska šteta može imati različite vrijednosti za isti stupanj oštećenja

6.3. Proračun gubitaka za zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka

Cilj procjene potresnih gubitaka je procijeniti i riješiti rizike izloženih elemenata rizika, osobito zgrada kao najčešćih uzročnika gubitaka drugih elemenata rizika. Kako bi se zaključilo u ovom radu provedeno istraživanje i modeliranje potresnog rizika za zgrade, proračunati su mogući gubitci za tipologije zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka.

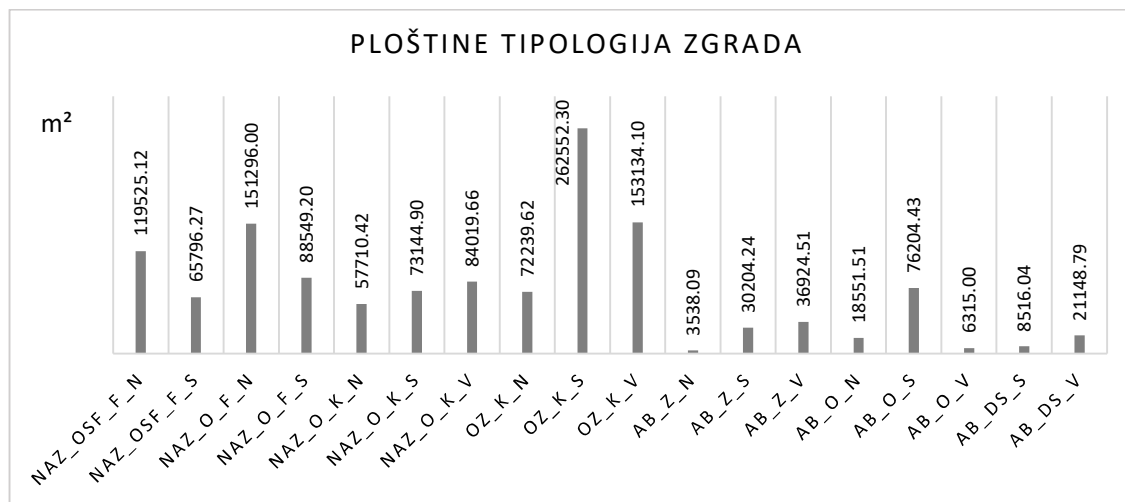
Odabran je financijski pristup u kome se gubitci uobičajeno izražavaju relativnim gubitcima zbog oštećenja u odnosu na vrijednost zgrada (Poglavlje 6.2.1). Proračun je proveden prema prijedlogu Aničića (1992.) da se šteta na zgradama izražava postotkom oštećenja zgrada u odnosu na početno stanje i prema izrazu (6.7).

Upotrijebljene su matrice vjerojatnosti oštećenja prema Bragi (1982.), a vjerojatnost gubitaka proračunata je za šest stupnjeva intenziteta potresa (IV., V., VI., VII., VIII. i IX.).

6.3.1. Matrice vjerojatnosti oštećenja

Matrice vjerojatnosti oštećenja svake tipologije izrađene su tako da svakom stupnju oštećenja i svakom konstrukcijskom sustavu odgovara jedan element matrice odnosno postotak oštećenja od ukupnog broja zgrada (Tablica 6.7.).

Kako bi se mogle proračunati vjerojatnosti gubitaka proračunate su ploštine za svaku predloženu tipologiju zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka. Ploštine zgrada određene tipologije proračunate su zbrajanjem ploštine svih popisanih zgrada u modelu izloženosti koje pripadaju određenoj tipologiji zgrada. Rezultati proračuna prikazani su na slici 6.3.



Slika 6.3 Ploštine tipologija zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka

Raspodjela štete za svaki razred oštećenja i stupanj intenziteta provedena je binomnom raspodjelom prema izrazu:

$$PMF: p_k = \frac{5!}{k!(5-k)!} \cdot \left[\frac{\mu_D}{5}\right]^k \cdot \left[1 - \frac{\mu_D}{5}\right]^{5-k} \quad (6.12)$$

gdje je:

PMF – funkcija vjerojatnosti (engl. *Probability Mass Function*, PMF)

p_k – vjerojatnost pojave određenog stupnja oštećenja D_k ($k=0, 1, 2, 3, 4, 5$)

μ_D – srednji stupanj oštećenja.

k – određeni stupanj oštećenja

Binomna raspodjela usvojena je zbog jednostavnosti, naime funkcija ove raspodjele zahtijeva samo jedan slobodan parametar, u ovom slučaju usvojen je srednji stupnja oštećenja μ_D koji je za zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka proračunan u poglavlju 5.6.4. Za tipologije zidanih zgrada proračunate vrijednosti srednjeg stupnja oštećenja prikazane su u tablici 5.3. U proračunu su uzeti u obzir doprinosi oštećenja svih zgrada na temelju kojih su generirane predložene tipologije. Osim toga ova raspodjela pokazala se u praksi prikladna za raspodjelu gubitaka na zgradama, npr. nakon upotrebe za statističku analizu podataka prikupljenih nakon potresa u Iripniji 1980. (Italija).

Matrice vjerojatnosti oštećenja za tipologije zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka izrađene su u Microsoftovom programu za proračunske tablice Excel. Na slici 6.4 prikazana je matrica vjerojatnosti za tipologiju OZ_K_S.

Stupanj intenziteta		VI				
Tipologija	Srednji stupanj oštećenja μ_D	St. oštećenja k	$5!/(k!(5-k)!)$	$[\mu_D/5]^k$	$[1-\mu_D/5]^{5-k}$	p_k
OZ_K_S	0,2612667	0	1	1	0,764647	0,76464
		1	5	0,052253	0,806805	0,21079
		2	10	0,002730	0,851288	0,02324
		3	10	0,000142	0,898223	0,00128
		4	5	7,455166	0,947746	3,53288
		5	1	3,895577	1	3,89557

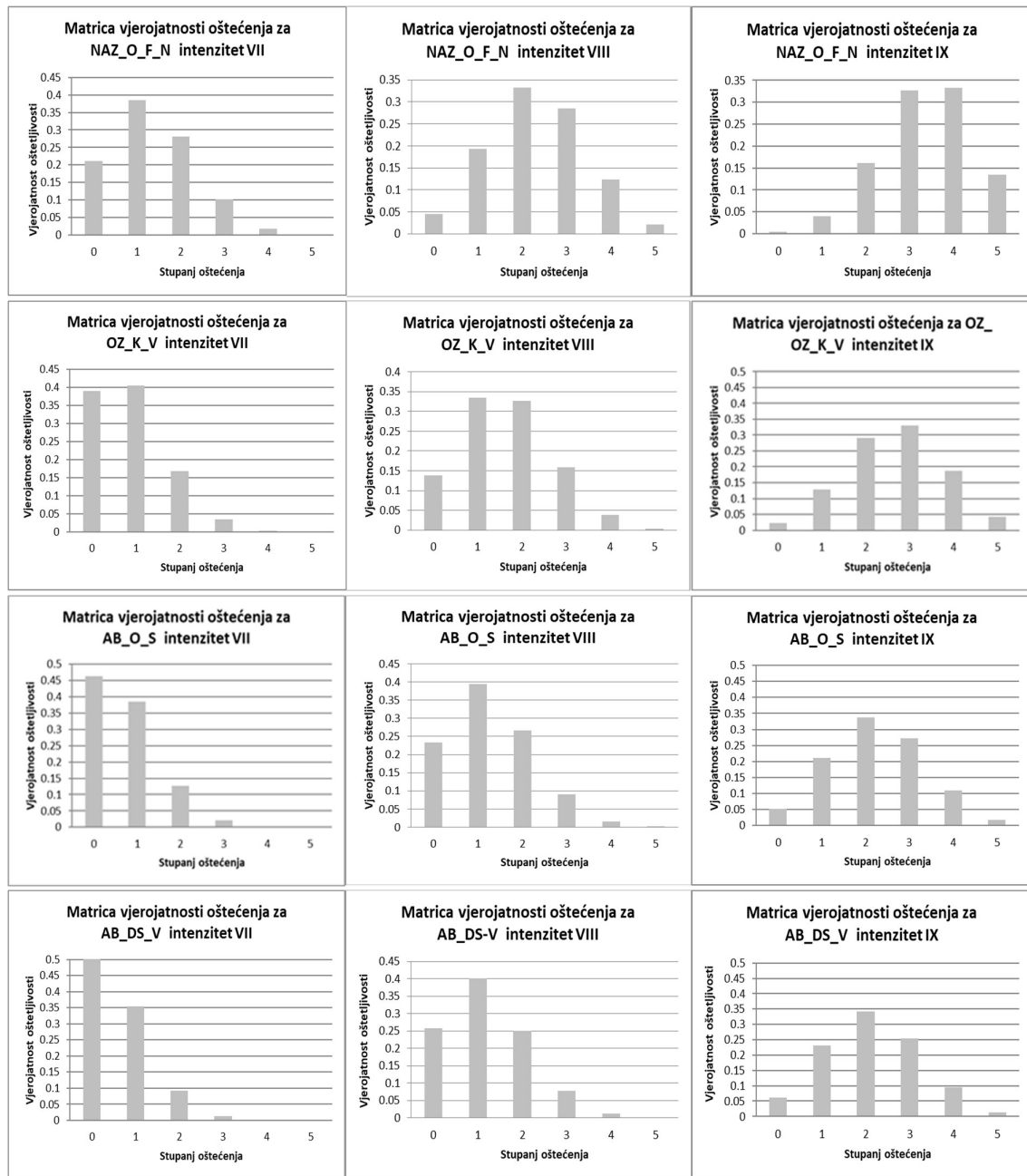
MATRICA VJEROJATNOSTI OŠTEĆENJA OZ_K_S

Stupanj intenziteta	Stupanj oštećenja						Σ
	0	1	2	3	4	5	
IV	0,952707	0,046380	0,000903	0,000008	0,000000	0,000000	1
V	0,891686	0,103404	0,004796	0,000111	0,000001	0,000000	1
VI	0,764647	0,210791	0,023243	0,001281	0,000035	0,000000	1
VII	0,541505	0,353394	0,092252	0,012041	0,000785	0,000020	1
VIII	0,262339	0,402500	0,247018	0,075798	0,011629	0,000713	1
IX	0,067267	0,240714	0,344552	0,246592	0,088241	0,012630	1

Slika 6.4 Slika matrica vjerojatnosti oštećenja iz Microsoft Excela za tipologiju OZ_K_S

Rezultati generirani u matricama prikazani su grafički stupčastim dijagramima. Na slici 6.5 stupčastim dijagramima prikazane su matrice za intenzitete: VII., VIII. i IX. za dvije tipologije zidanih i dvije

tipologije armiranobetonskih zgrada. Na dijagramima se može se vidjeti kako stupanj oštećenja raste s intenzitetom i opada od zidanih konstrukcija prema armiranobetonskim konstrukcijama.



Slika 6.5 Matrice vjerojatnosti oštećenja tipologija zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka

Na temelju rezultata prikazanih na slici 6.5 može se zaključiti da je za zgrade tipologija NAZ_O_F_N (nearnirano ziđe, fleksibilna stropna konstrukcija, niske zgrade) za intenzitet potresa VII. najveća vjerojatnost (38,5 %) neznatnog oštećenja zgrada (Tablica 6.1 : neznatno (D_{G1}), umjereno (D_{G2}), znatno

do teško (D_{G3}), teško (D_{G4}), rušenje (D_{G5}). Povećanjem intenziteta povećava se stupanj oštećenja koji je najvjerojatniji, naime, za intenzitet VIII. gdje je najveća vjerojatnost da će zgrade biti umjereno oštećene (33 %), a za intenzitet IX. približno je jednaka vjerojatnost da zgrade budu znatno do teško (32,7 %) i teško (33,2 %) oštećene.

Zgrade tipologije OZ_K_V (omeđeno ziđe, kruti strop, visoke zgrade) za VII. intenzitet imat će približno jednaku vjerojatnost da budu neoštećene (38,9 %) odnosno neznatno oštećene (40,4 %). Najveća je vjerojatnost za zgrade ove tipologije, u slučaju intenziteta IX., da budu znatno do teško (33 %) oštećene, a za 4 % zgrada proračunata je vjerojatnost rušenja.

Iz matrica vjerojatnosti oštećenja za tipologiju AB_O_S (armiranobetonske zgrade, konstrukcijski sustav okvir, srednje visoke zgrade) može se zaključiti da će za intenzitet VII. najveća vjerojatnost biti da zgrade ostanu neoštećene (46,4%). Povećanjem intenziteta smanjuje se vjerojatnost neoštećivosti zgrada pa se kod intenziteta IX. predviđa vjerojatnost neoštećivosti svega 1,8 %. Za najveći promatrani intenzitet (IX.) najveća je vjerojatnost da će zgrade ove tipologije biti umjereno oštećene (33,8 %).

Kod armiranobetonskih zgrada, tipologije AB_DS_V (dvojni sustav, visoke zgrade) za intenzitet VII. najveća je vjerojatnost da će zgrade ostati neoštećene (54 %), a vjerojatnosti oštećivosti zgrada 3., 4., i 5., stupnja oštećenja su oko 1 %. Za intenzitet potresa IX. najveća je vjerojatnost (34,3 %) umjerene oštećivosti zgrada tipologije AB_DS_V.

6.3.2. Modeliranje gubitaka koeficijentima oštećenja

Nakon što su u matricama proračunate vjerojatnosti oštećenja za usvojene stupnjeve oštećenja i intenzitete, modelirani su gubici – proračun oštećenih ploština zgrada, faktorima oštećenja iz tablice 6.6 (odabrani faktori za pojedine tipologije označeni su u tablici 6.6 sivom bojom).

Kako su razredi oštećivosti u ovom radu za tipologije zgrada određeni i dodijeljeni, za zidane zgrade konstrukcijskog sustava neomeđeno ziđe usvojeni su srednji omjeri oštećenja *MDR* koje za različite razrede oštećivosti predlaže EMS-98. Za tipologije je usvojen razred oštećivosti predložen u ovom radu, a srednji stupanjevi oštećenja usvojeni su prema predloženom EMS-98 srednjem stupnju oštećenja za određeni razred oštećivosti. Proračun gubitaka i rezultati za tipologiju NAZ_O_F_N prikazani su u tablici 6.8.

Na temelju omjera bruto ploštine zgrada promatrane tipologije (u slučaju prikazanom u tablici 6.8 zgrada tipologije NAZ_O_F_N) i bruto ploštine svih zgrada u modelu izloženosti proračunata je zastupljenost tipologije u modelu izloženosti. Za zgrade tipologije NAZ_O_F_N (neomeđeno ziđe, fleksibilan strop, niske zgrade) koje imaju bruto ploštinu 151296,0 m² proračunata je zastupljenost u ukupnom broju zgrada do sada popisanih u modelu izloženosti grada Osijeka, od 11,38 %.

Tablica 6.8 Proračun gubitaka za tipologiju NAZ_O_F_N

Stupanj intenziteta	μ_D		Bruto ploština	Zastupljenost u modelu izloženosti
IV	0,132813783	NAZ_O_F_N	151296,0 m ²	NAZ_O_F_N 11,38 %
V	0,304951335	Model izloženosti	1329370,2 m ²	
VI	0,668063943			
VII	1,336541226			
VIII	2,312425617			
IX	3,349581043			

	Stupanj oštećenja					
	DS_0	DS_1	DS_2	DS_3	DS_4	DS_5
MDF	0,9 %	7,90 %	20,30 %	29,30 %	97,50 %	100,00 %

Stupanj inteziteta	Oštećene ploštine m ²						Ukupno	
							m ²	%
IV	1190,17	1425,38	199,89	7,87	0,36	0,00	2823,67	0,21
V	994,08	2833,78	945,92	88,68	9,58	0,13	4872,16	0,37
VI	664,71	4499,05	3565,79	793,71	203,66	6,44	9733,36	0,73
VII	287,53	4603,86	8632,01	4545,43	2759,13	206,49	21034,45	1,58
VIII	61,10	2307,19	10202,12	12669,79	18137,76	3201,23	46579,19	3,50
IX	5,34	475,27	4957,21	14521,28	49035,23	20414,08	89408,41	6,73

Na temelju rezultata proračuna gubitaka za tipologiju NAZ_O_F_N, prikazanih u tablici 6.8 može se vidjeti npr. da je za intenzitet VII. proračunata vjerojatnost da bi neoštećeno moglo ostati 287,53 m² ploštine zgrada, odnosno da bi stupnjem oštećenja: DS_1 moglo biti oštećeno 4603,86 m², DS_2 moglo biti oštećeno 8632,01 m², DS_3 moglo biti oštećeno 4545,43 m² (itd.) ploštine zgrada tipologije NAZ_O_F_N. Povećanjem stupnja intenziteta potresa povećava se oštećena ploština promatranih zidanih zgrada, osobito nakon intenziteta potresa V. kada su povećanja oštećene ploštine za svaki slijedeći (veći) intenzitet dvostruka.

Za proračun gubitaka tipologija armiranobetonskih zgrada konstrukcijskog sustava okvir (AB_O_N, AB_O_S i AB_O_V) usvojeni su su srednji omjeri oštećenja *MDR (DF)* prema Goretti i Di Pasquale (2004.), a rezultati proračuna za tipologiju AB_O_S prikazani su u tablici 6.9.

Tablica 6.9 Proračun gubitaka za tipologiju AB_O_S

Stupanj intenziteta	μ_D		Bruto ploština	Zastupljenost u modelu izloženosti
IV	0,078403548	AB_O_S	76204,43m ²	AB_O_S
V	0,175261802	Model izloženosti	1329370,2 m ²	
VI	0,368414088			5,73 %
VII	0,711547184			
VIII	1,263936053			
IX	2,22760007			

	Stupanj oštećenja					
	DS_0	DS_1	DS_2	DS_3	DS_4	DS_5
MDF	1,5	3,4	14,40	20,60	100,00	100,00
	%	%	%	%	%	%

Stupanj inteziteta	Oštećene ploštine m ²						Ukupno	
							m ²	%
IV	1056,21	190,69	25,73	0,59	0,02	0,00	1273,25	0,10
V	956,29	393,70	121,14	6,30	0,56	0,00	1477,98	0,11
VI	779,60	702,80	473,54	53,88	10,40	0,17	2020,39	0,15
VII	530,55	997,67	1402,17	332,82	134,03	4,45	3401,69	0,26
VIII	266,25	1020,85	2925,40	1415,80	1162,56	78,66	6869,52	0,52
IX	59,91	545,56	3713,08	4267,96	8323,48	1337,57	18247,57	1,37

Za tipologiju AB_O_S proračunati su ukupni gubitci ploštine za intenzitet IV.: 1273,25 m², za intenzitet V.: 1477,98 m², za intenzitet VI.: 2020,39 m², za intenzitet VII.: 3401,69 m², za intenzitet VIII.: 6869,52 m², i za intenzitet IX.: 18247,57 m². Na temelju prikazanih rezultata vidi se da i kod promatranih armiranobetonskih zgrada povećanjem intenziteta potresa raste oštetljivost, međutim ona se kod armiranobetonskih zgrada dvostruko povećava nakon intenziteta potresa VII.

Gubitci tipologija zidanih zgrada konstrukcijskog sustava omeđeno ziđe (OZ_K_N, OZ_K_S, OZ_K_V) te tipologija armiranobetonskih zgrada: AB_Z_N, AB_Z_S, AB_Z_V, AB_DS_S, AB_DS_V, modelirani su

vrijednostima koeficijenta oštećenja DF predloženim u radu Milutinović i Trendafiloski (2003.) Gubitci proračunati za tipologiju OZ_K_S prikazani su u tablici 6.10.

Tablica 6.10 Proračun gubitaka za tipologiju OZ_K_S

Stupanj intenziteta	μ_D		Bruto ploština	Zastupljenost u modelu izloženosti
IV	0,048213441	OZ_K_S	262552,3 m ²	OZ_K_S
V	0,113336412	Model izloženosti	1329370,2 m ²	
VI	0,261266784			19,75 %
VII	0,577268407			
VIII	1,17402062			
IX	2,085717809			

Stupanj oštećenja						
	DS_0	DS_1	DS_2	DS_3	DS_4	DS_5
MDF	0	1	10	35	75	100,00
	%	%	%	%	%	%

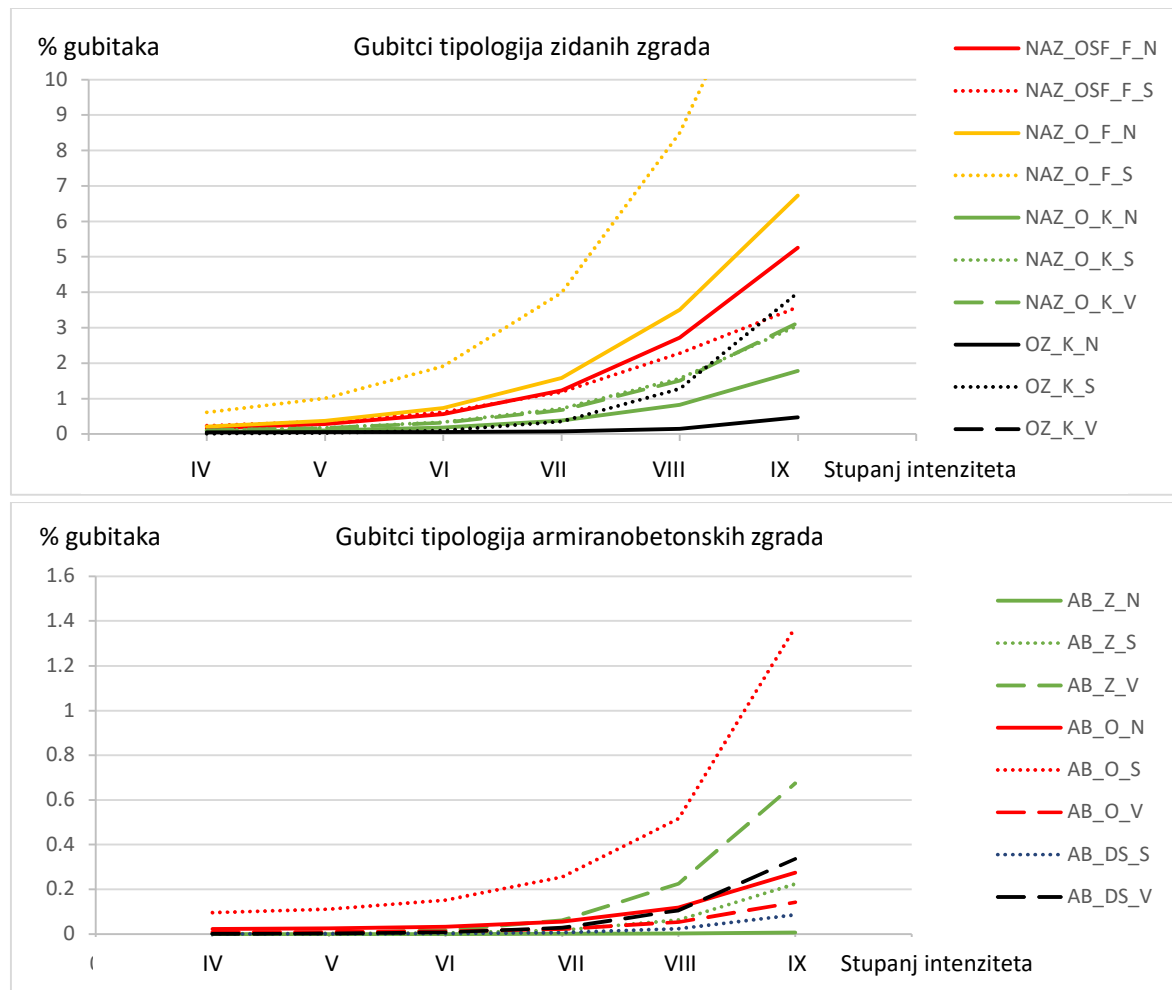
Stupanj inteziteta	Oštećeno ploštine m ²						Ukupno	
							m ²	%
IV	0,00	121,77	23,71	0,81	0,01	0,00	146,30	0,01
V	0,00	271,49	125,93	10,22	0,25	0,00	407,90	0,03
VI	0,00	553,44	610,27	117,76	6,96	0,10	1288,53	0,10
VII	0,00	927,85	2422,11	1106,49	154,74	5,39	4616,57	0,35
VIII	0,00	1056,77	6485,52	6965,40	2290,04	187,39	16985,13	1,28
IX	0,00	632,00	9046,32	22660,20	17376,04	3316,22	53030,78	3,99

Gubitci ploštine zgrada tipologije OZ_K_S iznose za intenzitet IV.: 0,01 %, za intenzitet V.: 0,03 %, za intenzitet VI.: 0,1 %, za intenzitet VII.: 0,35 % za intenzitet VIII.: 1,28 % i za intenzitet IX.: 3,99 % ploštine zgrada u modelu izloženosti. Znakovito je za primijetiti da se oštetljivost tipologije OZ_K_S za svaki slijedeći (veći) intenzitet povećava približno trostruko.

6.3.3. Gubitci modela izloženosti grada Osijeka

Proračunati gubitci za tipologije zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka mogu se ovisno o potrebama istraživanja ili krajnjoj svrsi upotrebe tumačiti različitim pokazateljima (% , m² itd.) te na različite načine uspoređivati i prikazivati.

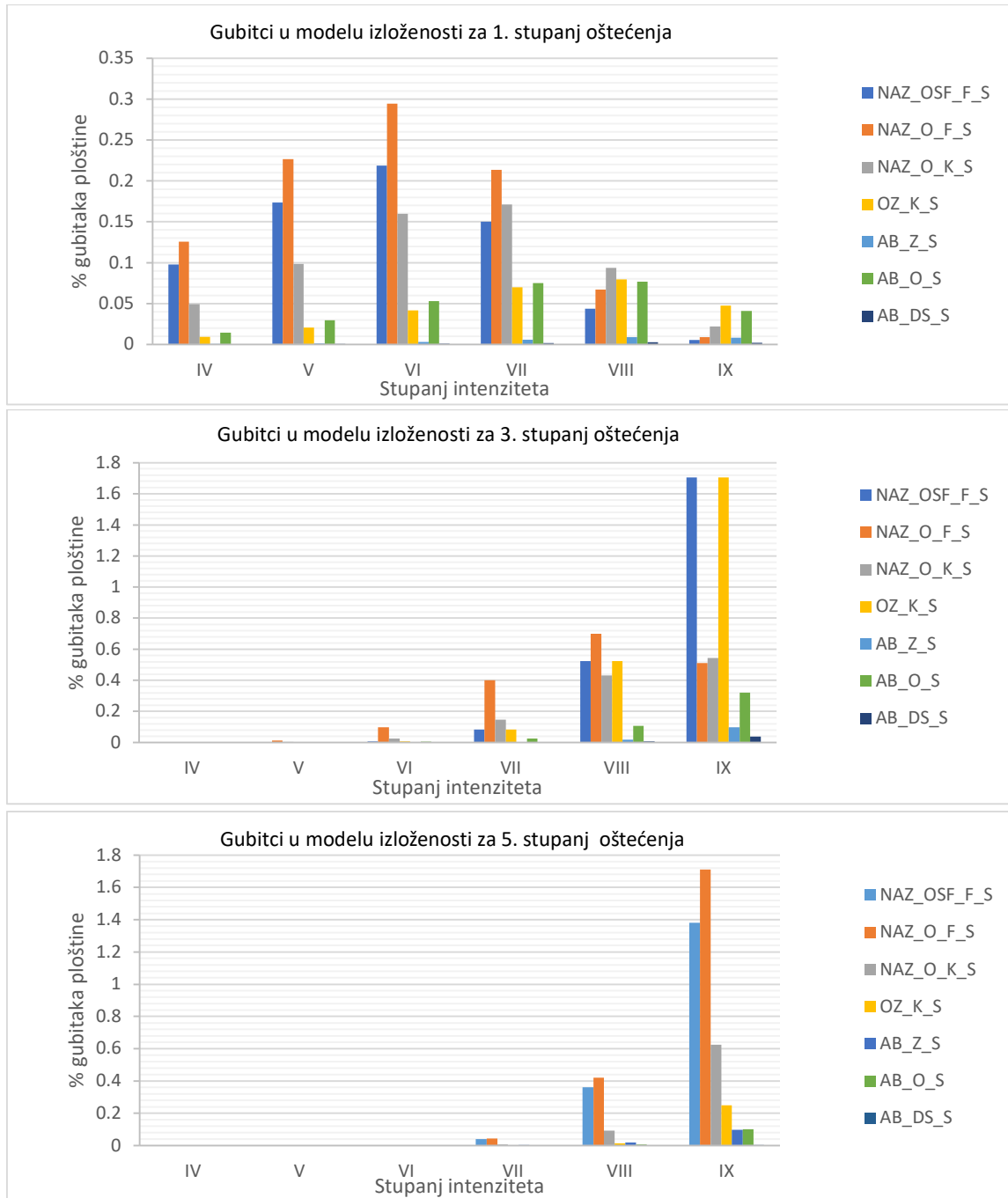
Na slici 6.6 prikazani su postotnim udjelima izraženi ukupni gubitci tipologija zidanih i armiranobetonskih zgrada modela izloženosti grada Osijeka.



Slika 6.6 Ukupni gubitci tipologija zidanih i armiranobetonskih zgrada modela izloženosti

Od zidanih zgrada najveći doprinos oštećljivosti modela izloženosti je od tipologije NAZ_O_F_S, a od armiranobetonskih zgrada od tipologije AB_O_S (slika 6.6), zgrade ovih tipologija najzastupljenije su od zidanih odnosno armiranobetonskih zgrada u modelu izloženosti grada Osijeka.

Na slici 6.7 prikazan je usporedba postotaka oštećenja prema intenzitetu za tipologije srednje visokih zgrada iz modela izloženosti za 1., 3. i 5. stupanj oštećenja.

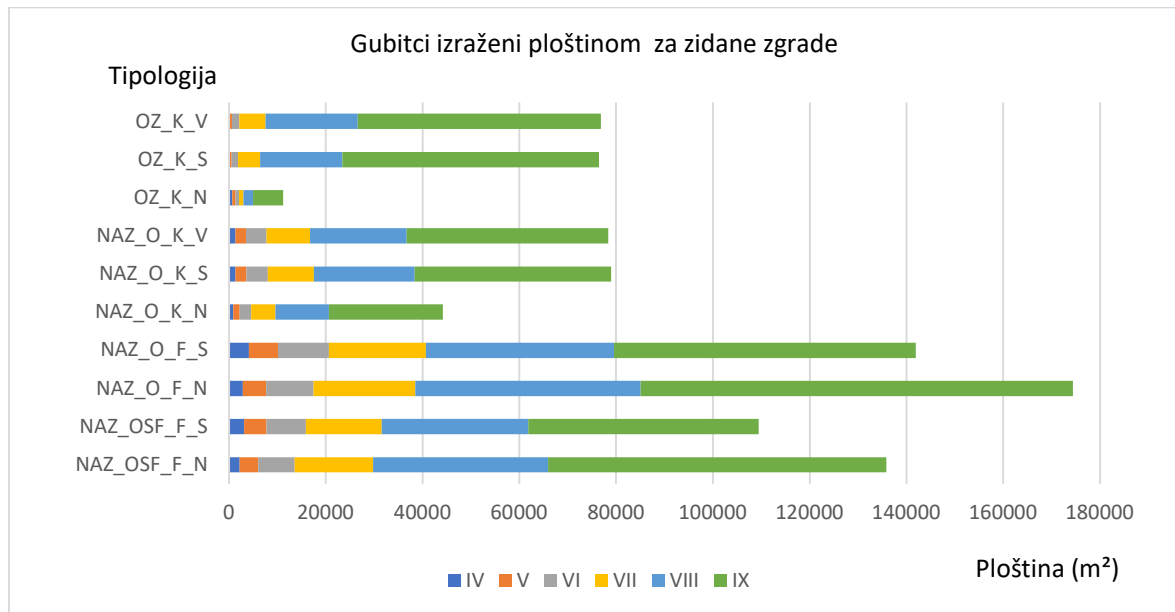


Slika 6.7 Postotak oštećene ploštine tipologija srednje visokih zgrada u modelu izloženosti za 1., 3. i 5. stupanj oštećenja

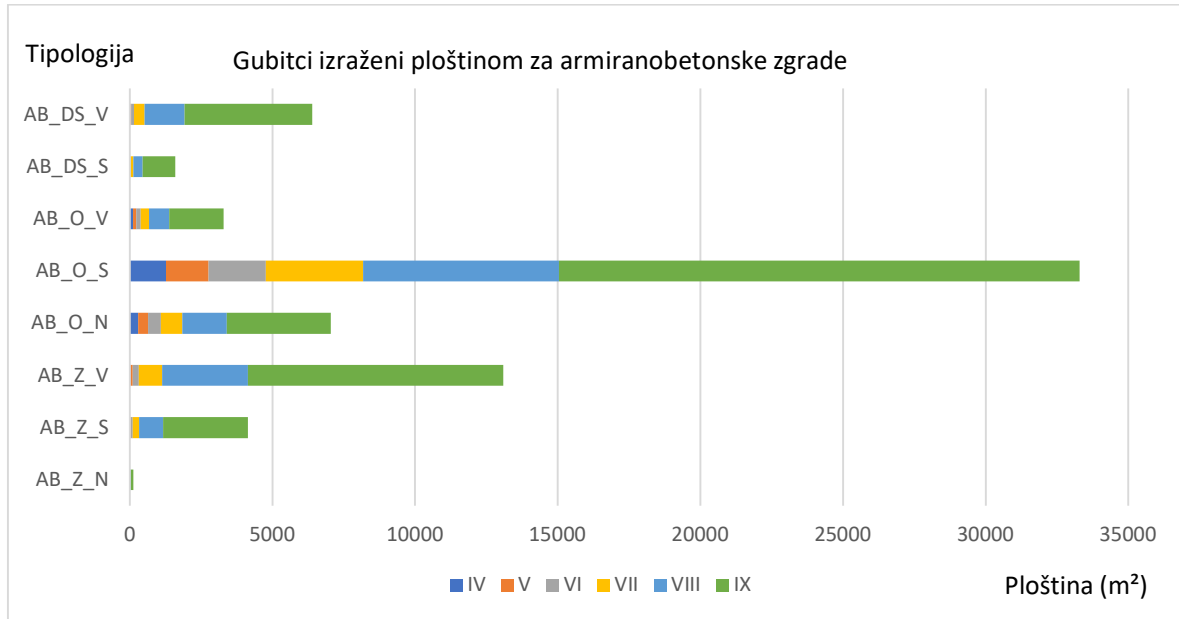
Na temelju vizualne usporedbe stupčastih dijagrama na slici 6.7 može se zaključiti da gubitci 1. stupnja oštećenja postoje za sve tipologije zgrada, da su veći za tipologije zidanih zgrada u odnosu na armiranobetonske te da je najveće zastupljenosti u ukupnim gubitcima modela izloženosti, gubitaka 1. stupnja oštećenja za zgrade tipologije NAZ_O_F_S.

Najveća zastupljenosti gubitaka 3. stupnja oštećenja u ukupnim gubitcima modela izloženosti je za intenziteta IX osobito za zgrade tipologija NAZ_OSF_F_S i NAZ_O_F_S, što je očekivano ne samo zbog intenziteta nego i zbog oštetljivosti ove dvije tipologije te njihove brojnosti u modelu izloženosti.

Na slikama 6.8 i 6.9 prikazane su proračunati gubitci za zidane i armiranobetonske zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka, razvrstane u pripadne tipologije, za stupnjeve intenziteta: IV., V., VI., VII., VIII. i IX. izražani ploštinom (m²).

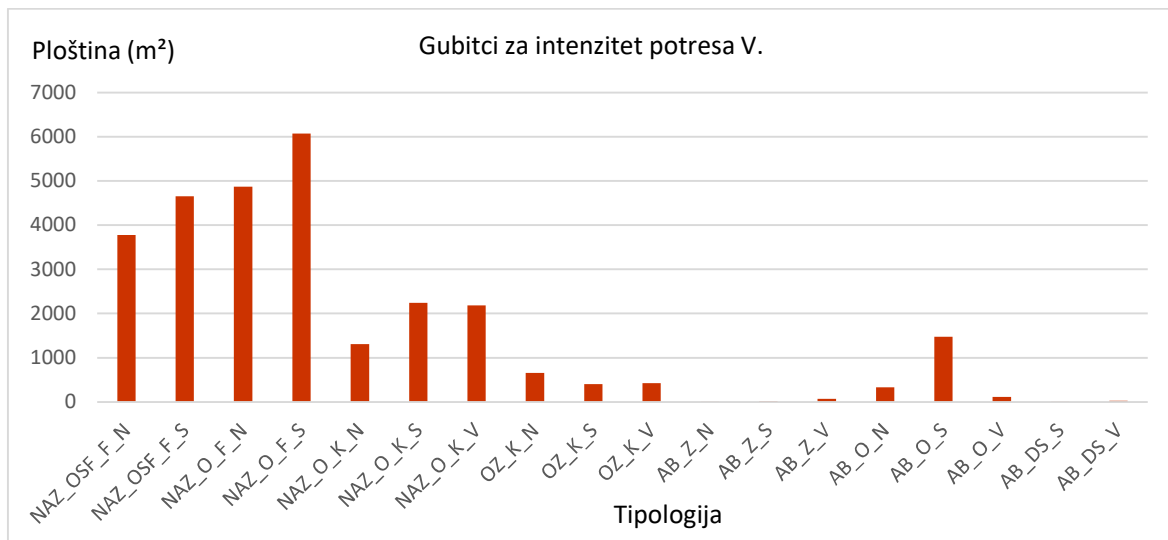


Slika 6.8 Gubitci za zidane zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka, za stupnjeve intenziteta: IV., V., VI., VII., VIII. i IX. izraženi ploštinom



Slika 6.9 Gubitci za armiranobetonske zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka, za stupnjeve intenziteta: IV., V., VI., VII., VIII. i IX. izražani ploštinom

Procijenjeni potresni gubitci za tipologije zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka za potres intenziteta V. iskazani ploštinom, prikazani su na slici 6.10.



Slika 6.10 Gubitci za tipologije zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka, za stupanj intenziteta V

7. ZAKLJUČCI, ZNANSTVENI DOPRINOSI I SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

Predmet doktorskog rada bio je istražiti i predložiti mogućnosti unaprjeđenja metodologije procjene potresnog rizika za zgrade. Na temelju saznanja da je potresni rizik međuovisnost potresne opasnosti, temeljnog tla i elemenata izloženih riziku, zaključeno je da se mogućnosti unaprjeđenja metodologije procjene potresnog rizika za zgrade moraju istražiti u sve tri komponente potresnog rizika (potresnoj opasnosti, izloženosti i oštetljivosti) te da bi, unaprijeđeni rezultati procjena iz jednog područja trebali biti implementirani u unaprjeđenje procjena druga dva područja.

7.1. Zaključak

Proučavanja karakteristika i učinaka potresne opasnosti na izložene elemente rizika uputila su na zaključak da precizna predviđanja potresne opasnosti i oštetljivosti zgrada predstavljaju polaznu točku za ublažavanje neizbježnih potresnih rizika. Zato je primarni cilj doktorskog rada bio definirati metodologiju kojom će biti moguće identificirati što više procesa, elemenata i scenarija potresnog rizika te na temelju njih pouzdano kvantitativno procijeniti moguću potresnu opasnost i štetu koju može uzrokovati.

U području potresne opasnosti uočen je nedostatak prikladnih atenuacijskih jednadžbi predviđanja potresnog gibanja temeljnog tla na područjima s malom do umjerenom seizmičnošću (za povratno razdoblje od 475 godina od 0.04g do 0.2 g), te zanemarivanje utjecaja dubokih geoloških slojeva na vrijednosti probabilističkih procjena potresne opasnosti. Zato je u radu istražen utjecaj karakteristika dubokih geoloških slojeva temeljnog tla na vrijednosti PGA i PSA odabranog promatrano područje (sjeveroistočni dio Republike Hrvatske - šire područje grada Osijeka) te je provedeno mikrozoniranje područja na temelju predloženih novih empirijskih atenuacijskih jednadžbi.

Široko je istražena i definirana potresna opasnost područja s umjerenom i malom seizmičnošću jer novija istraživanja pokazuju da bi potresni valovi duljih perioda osciliranja koji nastaju zbog snažnih dalekih potresa mogli izazvati značajne posljedice i gubitke na područjima čije se temeljno tlo sastoji od dubokih naslaga geoloških sedimenata. Odabrano promatrano područje, u kojemu grad Osijek

zauzima centralni položaj, karakterizira navedena seizmičnost i sastav lokalnih i dubokih slojeva temeljnog tla.

Provedena su preliminarna istraživanja procjene vrijednosti PGA izvedene iz odgovarajućih potresnih intenziteta empirijskom jednadžbom Trifunca i dr. (1991.) za 5 gradova u Republici Hrvatskoj (Zagreb, Rijeka, Split, Osijek i Zadar). Generirani rezultati uspoređeni su s vrijednostima procjena PGA za horizontalni i vertikalni smjer iz najnovijih karata potresne opasnosti Republike Hrvatske. Zaključeno je da se procjene PGA empirijskom jednadžbom Trifunca i dr. (1991.) uglavnom podudaraju s najnovijim hrvatskim kartama potresne opasnosti, međutim da ih treba uzeti s oprezom jer stupnjevi intenziteta odgovaraju prosječnom lokalnom temeljnom tlu i geološkim uvjetima, dok su nove karte potresne opasnosti proračunate za stjenovito temeljno tlo i ne uzimaju u obzir učinke dubokih geoloških slojeva na odziv temeljnog tla. Potvrda valjanosti ovog zaključka su i rezultati procjena vertikalnih vrijednosti PGA za Tip 2, koji su dvostruko niži od procjena na temelju makroseizmičkih intenziteta.

Nadalje, provedene su preliminarne procjene horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA promatranog područja postojećom atenuacijskom jednadžbom (Sabetta i Pugliese 1996) te napravljene usporedbe s postojećim procjenama prema EN 1998-1:2004 i HRN EN 1998-1:2011. Usporedba je rezultirala zaključkom da prema procjenama horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA danih u EN 1998-1:2004 i HRN EN 1998-1:2011, može doći do podcjenjivanja ili precjenjivanja stvarnog potresnog djelovanja na promatranom području.

Kako bi se moglo modelirati predviđanje potresne opasnosti promatranog područja proveden je niz višestrukih linearnih regresijskih proračuna, utemeljenih na 436 komponenti ubrzanja temeljnog tla. Proračuni su rezultirali koeficijentima za skaliranje horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA i PSA kojima se modeliraju razlike u vrijednostima procjena, s obzirom na variranje različitih uvjeta lokalnog temeljnog tla i dubokih geoloških slojeva.

Na temelju usvojenih koeficijenata za skaliranje horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA i PSA predložene su nove empirijske atenuacijske jednadžbe za područja s umjerenom i malom seizmičnošću čije se temeljno tlo sastoji od dubokih naslaga geoloških sedimenata, kojima su proračunate horizontalne i vertikalne vrijednosti PGA i PSA promatranog područja.

Iz rezultata provedenih proračuna horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA zaključeno je da, na svim lokacijama koje uključuju duboke slojeve lokalnog tla ($s_L = 2$) i duboke geološke sedimente ($s = 0$), nastaje deamplifikacija potresnih valova jer raspršivanje potresne energije na dubokim tlima nadilazi amplifikaciju potresnih valova. Najveće vrijednosti deamplifikacije proračunate su za kombinaciju tla: duboka lokalna tla iznad dubokih geoloških sedimenata, a značajno je veći doprinos veličini deamplifikacije od dubokih lokalnih tla u odnosu na duboke geološke sedimente. Nadalje, je zaključeno da će se vrijednosti horizontalnih i vertikalnih PGA na različitim slojevima lokalnog tla iznad geološke stijene povećati jer se visokofrekventni valovi lakše prenose kroz kompaktnije i tvrđe medije.

Proračuni vrijednosti horizontalnih amplituda PSA predloženim atenuacijskim jednadžbama ukazali su na zaključak da će deamplifikacija potresnih valova nastati samo za spektralne amplitude čiji su periodi oscilacija manji od 0,3 s na svim područjima čije se temeljno tlo sastoji od dubokih slojeva lokalnog tla ($s_L = 2$) i dubokih geoloških sedimenata. Proračunate su do 37 % manje procjene vrijednosti horizontalnih spektralnih amplituda s kratkim periodima oscilacija na dubokim slojevima lokalnog tla iznad dubokih geoloških sedimenata od istih proračunatih za duboke slojeve lokalnog tla iznad geološke stijene. Zaključeno je da amplifikacija horizontalnih spektralnih amplituda nastaje za periode oscilacija veći od 0,3 s i značajno se pojačava do ~ 1 s.

Svi proračunati rezultati u ovom radu uspoređeni su s rezultatima drugih istraživačkih studija o nelinearnom ponašanju temeljnog tla zbog jakog potresnog gibanja te je na temelju podudaranja rezultata zaključeno o valjanosti i pouzdanosti predloženih empirijskih atenuacijskih jednadžbi i generiranih koeficijenata skaliranja.

Za modeliranje potresne opasnosti promatranog područja određeni su potresi koji najviše doprinose potresnoj opasnosti, razdvajanjem potresne opasnosti. Razdvojeni su doprinosi epicentralnih udaljenosti i magnituda u kumulativnoj vrijednosti prekoračenja ($PGA/PSA > pga$; $PGA/PSA = pga$) horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA i PSA za povratna razdoblja $T_r = 2475, 975, 475$ i 95 godina.

Usvojeni su doprinosi vrijednostima prekoračenja komponenata PGA, za horizontalni smjer od potresa s M_s između 4,5 i 5, čiji se epicentri nalaze na udaljenostima između 10 i 20 km, a za vertikalni smjer od potresa čije su epicentralne udaljenosti između 10 do 30 km s M_s između 4 i 5,5. Na temelju razdvajanja doprinosa horizontalnih i vertikalnih spektralnih amplituda zaključeno je da povratna razdoblja onih potresa koja najviše doprinose potresnoj opasnosti promatranog područja, variraju ovisno o periodu oscilacija i znatno su kraća od povratnog razdoblja T_r definiranog kao recipročna

vrijednost srednje godišnje stope pojave potresnih događaja $N(PSA)$ koji će uzrokovati amplitude PSA koje će premašiti očekivanu vrijednost.

PSHA pristupom provedeno je potresno mikrozoniranje promatranog područja za povratna razdoblja $T_r = 95, 475, 975$ i 2475 godina pri čemu su uzete u obzir različite kombinacije slojeva temeljnog tla za koje se smatra da su moguće na području studije. Iz skaliranih horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA/PSA izrađene su karte potresne opasnosti.

Rezultati provedenih PSHA u ovom istraživanju vrednovani su tako što su uspoređene dobivene krivulje potresne opasnosti za promatrano područje s vrijednostima PGA danim na službenim hrvatskim kartama potresne opasnosti (HRN EN 1998-1: 2011/NA:2011) te s vrijednostima proračunatim u ovom radu (Tablice 3.4 i 3.6).

Nakon provedene usporedbe zaključeno je da se procjene i horizontalnih i vertikalnih vrijednosti PGA u ovom istraživanju dobro slažu s usporednim procjenama za različite kombinacije slojeva temeljnog tla osim za kombinaciju dubokog temeljnog tla ($s_L = 2$) iznad dubokih geoloških sedimenata ($s = 0$) i dubokih mješovitih geoloških slojeva ($s = 1$) koje su značajno manje od svih usporednih procjena što je očekivano jer niti jedna od usporednih procjena ne uzima u obzir učinke dubokih geoloških slojeva kao ni klasifikaciju temeljnog tla koja prepoznaje duboke slojeve temeljnog tla.

U dijelu doktorskog rada koji se odnosi na potresnu izloženost na temelju uočenih nedostataka u području (nedostatak modela izloženosti, modeli izloženosti na temelju podataka koji nisu primarno prikupljeni za modeliranje potresne izloženosti, globalne metodologije modeliranja izloženosti, preopširne, neprilagođene tipologije i sl.) razvijena je i predložena široko primjenjiva i prilagodljiva metodologija modeliranja izloženosti koja je vrednovana upotrebom u razvoju modela izloženosti grada Osijeka.

Za modeliranje izloženosti utvrđena je svrha i cilj: da prikupljeni podatci o zgradama budu korisni odnosno da su točni, pouzdani, široko primjenjivi i lako dostupni, a model izloženosti jednostavni za upotrebu i nadogradnju.

Primarna ideja koja je usvojena kao jedno od temeljnih unaprjeđenja metodologije modeliranja izloženosti je prikupljanje podataka o zgradama na licu mjesta. Zaključeno je naime kako bi se ovim načinom prikupljanja osigurala pouzdanost i kvaliteta generiranih podataka o zgradama.

Na temelju proučavanja postojećih modela izloženosti i iskustava u prikupljanju podataka o zgradama na licu mjesta, nadalje je zaključeno da se kroz faze prikupljanja podataka može primijetiti i bilježiti veliki broj karakteristika zgrada, međutim to ne znači da su sve relevantne i potrebne za procjene oštetljivosti i potresnog rizika. Zato je za drugu temeljnu ideju unaprjeđenja modeliranja izloženosti usvojeno pravilo prema kojem se odabiru i prikupljaju samo oni podatci o zgradama koji će sustavno okarakterizirati zgradu s obzirom na potresnu otpornost i oni koji su relevantni u procjeni potresnog rizika.

Kod izrade modela izloženosti grada Osijeka usvojeno je za prikupljanje 15 karakteristika i podataka o zgradama koji su prvobitno na licu mjesta prikupljeni u obrasce izrađene za ovu svrhu, a kasnije je izrađena mobilna aplikacija kojom se riješilo niz tehničkih i drugih izazova koji su nastajali tijekom terenskog rada te kasnijeg objedinjavanja i obrade prikupljenih podataka.

Predloženom metodologijom do danas su popisani i obrađeni podatci o konstrukcijskim i drugim relevantnim karakteristikama 1860 zgrada grada Osijeka.

Daljnje unaprjeđenje koje je implementirano u metodologiju valorizacija je važnosti prikupljenih karakteristika zgrada i mogućnost odabira samo podataka potrebnih s obzirom na željenu razinu procjene oštetljivosti i potresnog rizika. To je omogućeno algoritmom u kome su definirana razredbena pravila i razine važnosti karakteristika zgrada te kojim je moguće utvrditi korelacije između prikupljenih podataka o zgradama. Algoritam je temeljni alat za predlaganje konstrukcijskih tipologija.

Podatci o zgradama iz razvijenog modela izloženosti grada Osijeka i predloženi algoritam upotrijebljeni su za generiranje dominantnih tipologija zgrada koje se predlažu u ovom radu. Zbog načina generiranja podataka na temelju kojih su predložene tipologije i pozitivnih rezultata ocjene predloženog algoritma zaključeno je da predložene tipologije mogu biti primjenjive za sva područja sa sličnim tradicijama gradnje i primjene tehničkih propisa.

Sposobnost vizualizacije neizostavni su kriteriji koje suvremene metodologije trebaju posjedovati. Zato je za jednostavniju i bržu upotrebu te prezentaciju podataka iz modela izloženosti u unaprjeđenu metodologiju implementirana upotreba QGIS-a. Svi podatci o karakteristikama zgrada iz modela izloženosti grada Osijeka unose se u QGIS, a pridružuju im se nakon provedbe tipizacije i proračuna oštetljivosti i podatci o pripadnoj tipologiji i razredu oštetljivosti.

Elementarne jedinice urbanog okoliša – zgrade i njihov odnos s drugim elementima potresnog rizika temelj su proučavanja izloženosti izgrađenog okoliša rizicima. Modeli izloženosti zgrada nužni su za razvoj scenarija potresnog rizika, za definiranje kriterija i donošenja odluka o obnovi postojećih zgrada (popravci, rekonstrukcije, pojačanja), za donošenje odluka o nadogradnji postojećeg gradskog fonda ili razmatranje društvenih prioriteta kada je u pitanju potresna opasnost. Svrha ovog doktorskog rada bit će u potpunosti ostvarena ako predložena unaprijeđena metodologija i podatci iz izrađenog modela izloženosti grada Osijeka budu upotrijebljeni u te svrhe.

Sve učestalije rasprave o potrebi modifikacije proračuna oštećljivosti i kvantifikacije karakteristika zgrada bile su poticaj za istraživanje načina na koji bi se u području potresne oštećljivosti mogla ponuditi unaprjeđenja. Proučavanjem dosadašnjih spoznaja i iskustava zaključeno je da odgovarajuća unaprjeđenja trebaju biti primjenjiva u procjenama oštećljivosti velikog broja zgrada, ali i u složenijim analizama, kada se pozornost usmjerava na ograničen broj zgrada. Nadalje je zaključeno da unaprjeđenja trebaju uzeti u obzir nove spoznaje iz područja potresne opasnosti i izloženosti te da se moraju moći implementirati u bilo koju metodu proračuna oštećljivosti.

U proračunu oštećljivosti unaprjeđenja su provedena preciznijim uzimanjem u obzir karakteristika temeljnog tla i njegovog utjecaja na veličinu potresne oštećljivosti zgrada te izostavljanjem u proračunu regionalnog faktora oštećljivosti. Unaprjeđenje metodologije modeliranja oštećljivosti predloženo je kroz mogućnost modeliranja oštećljivosti na razini pojedinačne zgrade i/ili tipologije zgrada te kroz mogućnost dvorazinskog modeliranja oštećljivosti - brze i detaljnije procjene oštećljivosti.

Za proračun potresne oštećljivosti u radu su proračunati i predloženi modifikatori oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika temeljnog tla (za kombinacije temeljnog tla ($s = 0$) ($s_L = 1$) i ($s = 0$) ($s_L = 2$) za čije se generiranje uzimaju u obzir: amplifikacija ne samo plitkih (što je dosadašnja praksa) nego i dubokih slojeva temeljnog tla, spektri jednolike opasnosti (umjesto spektara iz HRN EN 1998-1:2011) te mikrozoniranje promatranog područja. Usvojene kombinacije temeljnog tla okarakterizirane su približno kao tipovi tla B i C prema HRN EN 1998:2011, a smatraju se vjerojatnim i najvjerojatnije mogućim na promatranom području. Na temelju usporedbe proračunatih vrijednosti sa sličnima u postojećoj literaturi zaključeno je da modifikator oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika temeljnog tla proračunat kako je predložen u ovom radu bolje karakteriziraju utjecaj tla na oštećljivost zgrada i preciznije određuje moguću oštećljivost zgrada.

Predložena unaprjeđenja za proračun implementirana su u Makroseizmičku metodu kojom je procijenjena oštetljivosti zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka na razini pojedinačne zgrade i tipologija zgrada. Na temelju rezultata provedenih proračuna svakoj zgradi iz modela izloženosti i predloženoj tipologiji dodijeljen je odgovarajući razred oštetljivosti.

Usporedba generiranih razreda oštetljivosti za predložene tipologije u ovom doktorskom radu i razreda oštetljivosti koje predlaže EMS-98 pokazala je da predložena unaprjeđenja preciznije modeliraju oštetljivost, osobito armiranobetonskih zgrada.

Provedena je i distribucija oštetljivosti predloženih tipologija zgrada, s obzirom na različite intenzitete, kontinuiranim parametrom za obračun štete μ_D te su izrađene krivulje oštetljivosti.

Nakon modeliranja oštetljivosti za svaku zgradu iz modela izloženosti u QGIS su implementirani podatci o dodijeljenoj pripadnoj tipologiji i na temelju provedenih proračuna određenom razredu oštetljivosti.

Primarni cilj istraživanja u doktorskom radu bio je predložiti unaprijeđenja u proračunu potresnog rizika zgrada. Unaprjeđenja su predložena u sve tri komponente potresnog rizika. Kako bi se predložena unaprjeđenja valorizirala u primjeni, paralelno s predlaganjem unaprijeđenja modelirana je potresna opasnost, izloženost i oštetljivost promatranog područja. Na temelju generiranih rezultata sve tri komponente potresnog rizika proračunate su vjerojatnosti potresnog rizika - gubitaka za zgrade iz modela izloženosti grada Osijeka za koje se očekuje da su pouzdani, ali da nikada neće biti valorizirani s obzirom na stvarne gubitke.

7.2. Izvorni znanstveni doprinosi

Izvorno znanstveno istraživanje, provedeno provjerenim znanstvenim metodama za potrebe ovog dokorskog rada, rezultiralo je sljedećim izvornim znanstvenim doprinosima:

- prijedlogom novih empirijskih regionalnih atenuacijskih jednadžbi gibanja temeljnog tla
- prijedlogom procjene vrijednosti horizontalnih i vertikalnih vršnih ubrzanja za područja čije je temeljno tlo sastavljeno od dubokih slojeva lokalnog tla i dubokih geoloških sedimenata
- prijedlogom novih karata seizmičkog mikrozoniranja promatranog područja

- izradom modela izloženosti reprezentativnog grada s promatranog područja
- generiranjem dominantnih konstrukcijskih tipologija zgrada primjenjivih na svim područjima sa sličnom građevinskom praksom i primjenom građevinskih propisa
- prijedlogom razreda oštećljivosti za dominantne tipologije zgrada
- prijedlogom modifikatora oštećljivosti zbog utjecaja karakteristika temeljnog tla za kombinacije temeljnog tla ($s = 0$) ($s_L = 1$) i ($s = 0$) ($s_L = 2$)
- prijedlogom dvorazinske metodologije procjene oštećljivosti
- prijedlogom karata izloženosti i oštećljivosti u GIS sustavu.

7.3. Smjernice za daljnja istraživanja

Modeliranje potresnog rizika predloženom unaprjeđenom metodologijom u ovom doktorskom radu doprinijelo je boljem sagledavanju stvarne razine potresne opasnosti, izloženosti i oštećljivosti zgrada. Rezultati provedenih istraživanja omogućavaju detaljan uvid predložene mogućnosti unaprjeđenja procjene potresnog rizika zgrada, međutim tijekom istraživanja spoznate su dodatne smjernice za nastavak istraživanja i daljnja unaprjeđenja predložene metodologije procjene potresnog rizika za zgrade.

Smjernice za daljnje istraživanje u području potresne opasnosti:

- 1) Provedba determinističke procjene potresne opasnosti kojom bi se za promatrano područje potresna opasnost proračunala na temelju najjačeg mogućeg potresa (potresa s najvećom magnitudom) za odabrano povratno razdoblje. Za provedbu ovakve procjene potrebno je detaljno proučiti karakteristike svih potresno aktivnih rasjeda na širem promatranom području. Deterministički proračunatom potresnom opasnosti modelirala bi se oštećljivost zgrada promatranog područja te bi se provela usporedba s oštećljivošću proračunatom na temelju proračuna potresne opasnosti PSHA pristupom.
- 2) Detaljnije geološko mapiranje promatranog područja kako bi se generirali što preciznije vrijednosti koeficijenta kojima se uzima u obzir utjecaj karakteristika temeljnog tla na procjene potresne opasnosti i oštećljivost zgrada. Detaljnije mapiranje potrebno je provesti podjelom cijelog promatranog

područje na dijelove (jedinice - kvadrate) što manje ploštine te odrediti, za svaku jedinicu, karakteristike lokalnog temeljnog tla do dubine 100 m i karakteristika dubokih geoloških slojeva.

3) Unaprjeđenje predloženih atenuacijskih jednadžbi usvajanjem novih vrijednosti koeficijenata za skaliranje vrijednosti vršnih ubrzanja. Generiranje koeficijenata kroz regresijske proračune temeljilo bi se na najnovijim podacima o seizmičnosti, osobito na akcelrogramima zabilježenim tijekom potresa u Petrinji i Zagrebu 2020. Atenuacijskim jednadžbama koje bi sadržavale nove koeficijente mogle bi se revidirati postojeće procjene potresne opasnosti.

Smjernice za daljnje istraživanje u području izloženosti:

1) Razvoj tipologija ruralnih područja. Iako razlikovanje zgrada ruralnih i urbanih područja nije definirano i ovisi o tome za koju svrhu u kojem vremenu i prostoru se definira, na temelju dosadašnjih istraživanja i stečenih iskustava zaključeno je da razlike postoje. Razlike obično nastaju zbog preferiranih ili lokalno dostupnih građevinskih materijala, klimatskih uvjeta, tradicija gradnje, primjene tehničkih propisa te visine prihoda investitora i društvenih navika. Ove razlike treba istraživati kao smjernice za određivanje specifičnosti karakteristika ruralnih zgrada na temelju kojih se predlažu predominantne tipologije.

2) Tipološka razredba zgrada ključna je za razumijevanje konstrukcijskih, arhitektonskih i drugih karakteristika kako bi se procijenila oštetljivost zgrada i potresni rizik nekog područja. Uvođenjem novih građevinskih tehnologija, projektnih i/ili građevinskih propisa, materijala i dr. stvaraju se nove varijacije u karakteristikama zgrada koje nisu obuhvaćene postojećim tipologijama. Zato je jedna od smjernica za daljnje istraživanje u području izloženosti uvođenje novih tipologija. Osim praćenjem i istraživanjem novina u karakteristikama zgrada u budućim istraživanjima potrebno je obuhvatiti regionalne karakteristike zgrada na temelju kojih bi se mogle predložiti i specifične regionalne tipologije.

Smjernice za daljnje istraživanje u području oštetljivosti:

1) Analiza modifikatora ponašanja zgrade – „stanje očuvanosti“. Dosadašnji prijedlozi razlikuju dvije razine ovog modifikatora: dobro i loše održavanje zgrade koje je kvantificiraju vrijednostima - 0,04 (za dobro održavanje zgrade) i + 0,04 (za loše održavanje zgrade).

Tijekom dosadašnjih istraživanja, ali i evidentiranja oštećenja na zgradama nakon nedavnih potresa u Zagrebu i Petrinji uočen je problem „održavanja zgrada“. U potresom pogođenim područjima na velikom broju zgrada uočena su oštećenja čak i na nosivoj konstrukciji koja su rezultat dotrajalosti i nezaštite konstrukcijskih elemenata te neodržavanja (npr. dotrajalost krovne konstrukcije i nekonstrukcijskih elemenata, korozija metalnih elemenata i armature armiranobetonskih konstrukcija, odvajanje zaštitnih slojeva, pukotine u zidanim konstrukcijama i dr.). Ovakva oštećenja nerijetko se mogu vidjeti i na područjima na kojima nije bilo značajnijih potresa, u gradovima na starijim višestambenim zgradama, a u ruralnim područjima na kućama, koje ljudi u čijem su vlasništvu često ne žele ili nisu u mogućnosti pravilno i/ili nikako održavati. Problem „održavanja“ uočen je i na zgradama povijesne baštine čije održavanje dodatno otežavaju zahtjevi konzervatora. U proceduri donošenja je Zakona o upravljanju i održavanju zgrada, međutim u radnoj verziji dostupnoj na internetu (<https://blog.zapadstan.hr/wp-content/uploads/2021/04/Zakon-o-upravljanju-i-odrzavanju-zgrada-Radna-verzija-4.pdf>. Pristupljeno 10. 4. 2023.) nisu vidljive odrednice koje propisuju obaveze održavanja konstrukcijskih i drugih dijelova zgrada kojima bi se osigurala otpornost i uporabljivost propisana građevinskim normama.

Zato je daljnje istraživanje u području oštetljivosti potrebno usmjeriti na istraživanje varijabilnosti i veličina kojima „održavanje zgrada“ utječe na oštetljivost zgrada u potresu, utvrditi razine pojedinih utjecaja i za njih na temelju empirijskih spoznaja predložiti koeficijente kojima bi ova karakteristika modelirala, ukupnu vrijednost modifikatora ponašanja zgrade ΔV_m , odnosno oštetljivost zgrade.

BIBLIOGRAFIJA

- Ademović, N.; Hadzima-Nyarko, M.; Zagora, N. 2020. *Seismic vulnerability assessment of masonry buildings in Banja Luka and Sarajevo (Bosnia and Herzegovina) using the macroseismic model*. Bulletin of earthquake engineering 18/8. 3897-3933. doi:10.1007/s10518-020-00846-8
- Agarwal, J. 2013. *Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems*. Structural vulnerability analysis of civil infrastructure facing seismic hazards. 209 – 228. doi:10.1533/9780857098986.2.209
- Aguirre, P.; Vsquez, J.; De la Llera, J. C.; Gonzalez, J.; Gonzalez, G. 2018. *Earthquake damage assessment for deterministic scenarios in Iquique, Chile*. Natural Hazards 92. 1433 – 1461.
- Ajmar, A.; Annunziato, A.; Boccardo, P.; Tonolo, F. G. ; Wania, A. 2019. *Tsunami modeling and satellite-based emergency mapping: Workflow integration opportunities*. Geosciences (Switzerland) 9(7). doi:10.3390/geosciences9070314
- Akamatsu, T.; Yamamoto, K. 2019. *Suitability analysis for the emergency shelters allocation after an earthquake in Japan*. Geosciences (Switzerland) 9(8). doi:10.3390/geosciences9080336
- Akkar S.; Douglas J.; Di Alessandro C.; Campbell K.; Somerville P.; Cotton F.; Silva W.; Baker J. 2012. *Defining a consistent strategy to model groundmotion parameters for the GEM-PEER Global GMPEs Project*. 15th World Conference on Earthquake Engineering 2012 (15WCEE) Lisbon 1/38.
- Akkar, S.; J.J. Bommer 2010. *Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean and the Middle East*. Seismological Research Letters 81/2. 195 – 20621.
- Akkar, S.; Ozen, O. 2005. *Effect of peak ground velocity on deformation demands for SDOF systems*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 34. 1551 – 1571.
- Akkas, N.; Erdik, M. 1984. *Consideration on assessment of earthquake resistance of existing buildings*. International Journal for Housing Science and Its Applications 8. 49–66.
- Aljinović, B.; Prelogović, E.; Skoko, D. 1987. *New data on deep geological structure and seismotectonic active zones in region of Yugoslavia*. Geološki vjesnik 40. 255 – 263.
- Aljinović, B.; Blašković, I.; Cvijanović, D.; Prelogović, E.; Skoko, D.; Brdarević, N., 1984. *Correlation of geophysical, geological and seismological data in the coastal part of Yugoslavia*. Bolletino di Oceanologia Teorica ed Applicata 2. 77 – 90.
- Algermissen, S. T. (1989). *Techniques and parameters for earthquake risk assessment*. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering 22, 202 – 218.
- Amaro-Mellado, J.L.; Melgar-García, L.; Rubio-Escudero, C.; Gutiérrez-Avilés, D. 2021. *Generating a seismogenic source zone model for the Pyrenees: A GIS-assisted triclustering approach*. Computers and Geosciences 150. 104 –736.
- Amaro-Mellado, J.L.; Tien Bui, D. 2020. *GIS-Based Mapping of Seismic Parameters for the Pyrenees*. ISPRS International Journal of Geo-Information 9. 452.

Amaro-Mellado, J.L.; Morales-Esteban, A.; Asencio-Cortés, G.; Martínez-Álvarez, F. 2017 *Comparing seismic parameters for different source zone models in the Iberian Peninsula*. Tectonophysics 717. 449 – 472.

Ambraseys N.N.; Douglas J.; Sarma S.K.; Smit P.M. 2005. *Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration*. Bulletin of Earthquake Engineering 3(1). 1 – 53. doi:10.1007/s10518-005-0183-0

Ambraseys, N.; Douglas, J.; Margaris, B.; Sigbjörnsson, R.; Berge-Thierry, C.; Suhadolc, P.; Costa, G.; Smit, P. 2004. *Dissemination of European strong-motion data*. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver.

Ambraseys, N.; Douglas, J.; Margaris, B.; Sigbjörnsson, R.; Smit, P.; Suhadolc, P. 2002. *Internet site for European strong motion data*. Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering 9 – 13.

Ambraseys, N.N.; Simpson K.A.; Bommer J.J. 1996. *Prediction of horizontal response spectra in Europe*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 25. 371 – 400.

Ambraseys, N. N.; Bommer, J. J. 1995. *Attenuation relations for the use in Europe: an overview*. Proceedings, SECED Conference on European Seismic Design Practice. Chester, Balkema, 67 – 74.

Ambraseys, N.N. 1975. *Trends in engineering seismology in Europe*. Proceedings of the 5th European Conference on Earthquake Engineering 3. 39 – 52.

Anderson, J.G.; Trifunac, M.D. 1978. *Uniform risk functionals for characterization of strong earthquake ground motion*. Bulletin of the Seismological Society of America 68(1). 205 – 218.

Anderson, J.G.; Trifunac, M.D. 1977. *Uniform risk functionals for characterization of strong earthquake ground motion*. Department of Civil Engineering, Report No. 77 – 02, Univ. of Southern Calif., Los Angeles.

Andreotti, G.; Lai, C.G. 2019. *Use of fragility curves to assess the seismic vulnerability in the risk analysis of mountain tunnels*. Tunnelling and Underground Space Technology 91/103008.

Angeletti P.; Bellina, A.; Guagenti, E.; Moretti, A.; Petrini, V. 1988. *Comparison between vulnerability assessment and damage index, some results*. Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo – Kyoto.

Ang, A.H.; Tang W.H. 2006. *Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering*. John Wiley & Sons.

Aničić, D.; Mihaliov, V.; Velkov, M. 1998. *Restoration, seismic reconstruction and structural repair of cultural monuments in the old city centre of Dubrovnik (in Croatian)*. Restauratorski odjel Dubrovnik, Hrvatski restauratorski zavod.

Aničić, D. 1992. *Prognoza štete na stambenom fondu i broja žrtava mogućeg budućeg potresa u Zagrebu*. Pregledni članak. Civilna zaštita 1 / 2. 135-143.

Antičević, A.; Hadzima-Nyarko, M.; Rabi, A. 2015. *Seismic vulnerability of kindergarten buildings in the city of Osijek*. 4th International Scientific Symposium Economy of Eastern Croatia – Vision and Growth. Ur. Mašek Tonković, Anka. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Ekonomski fakultet u Osijeku.

- Aptikaev, F.F. 2009. *Review of empirical scaling of strong ground motion for seismic hazard analysis*. In: Trifunac MD, editor. *Selected topics in earthquake engineering from earthquake source to seismic design and hazard mitigation*. Banja Luka: Republika Srpska. 27 – 54.
- ATC (Applied Technology Council – 55). 2002. *Summary of evaluation of current nonlinear static procedures-SDOF studios*. Applied Technology Council, Redwood City, California.
- ATC (Applied Technology Council – 40). 1996. *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Applied Technology Council, Redwood City, California.
- ATC (Applied Technology Council – 21). 1988. *Rapid Visual Screening of building for Potential Seismic Hazards: a Handbook*. Applied Technology Council, FEMA – 145, Redwood City, California.
- ATC (Applied Technology Council – 13). 1985. *Earthquake damage evaluation data for California*. Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Bada, G. 1999. *Cenozoic stress field evolution in the Pannonian basin surrounding orogens. Inferences from kinematic indicators and finite element modelling*. PhD Thesis, Vrije Universiteit Amsterdam.
- Bal, I.E. ; Crowley, H. ; Pinho, R. 2010. *Displacement-Based Earthquake Loss Assessment: Method Development and Application to Turkish Building Stock*. Research Report Rose 2010/02, IUSS Press, Pavia.
- Balázs, A.; Matenco, L.; Magyar, I.; Horváth, F.; Cloetingh, S.; 2016. *The link between tectonics and sedimentation in back-arc basins: New genetic constraints from the analysis of the Pannonian Basin*. *Tectonics American Geophysical Union* 35 (6). 1526 – 1559. doi: 10.1002/2015TC004109.
- Banak, A.; Mandić, O.; Sprovieri, M.; Lirer, F.; Pavelić D.; 2016. *Stable isotope data from loess malacofauna: Evidence for climate changes in the Pannonian Basin during the Late Pleistocene*. *Quaternary International* 415. 15-24. doi: 10.1016/j.quaint.2015.10.102
- Baraschino, R.; Baltzopoulos, G.; Iervolino, I. 2020. *R2R-EU: Software for fragility fitting and evaluation of estimation uncertainty in seismic risk analysis*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 132. 106093. doi:10.1016/j.soildyn.2020.106093
- Barbat, A.H.; Carreño, M.L.; Pujades, L. G.; Lantada, N.; Cardona, O.D.; Marulanda, M.C. 2010. *Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to a pilot area*. *Structure and Infrastructure Engineering* 6(1 – 2). 17 – 38. doi:10.1080/15732470802663763
- Barbat, A.H.; Pujades L.G.; Lantada N. 2008a. *Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: Application to Barcelona*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28/10 – 11. 851 – 865.
- Barbat, A.H.; Yépez Moya, F.; Canas J.A. 1996. *Damage Scenarios Simulation for Seismic Risk Assessment in Urban Zones*. *Earthquake Spectra* 12/3. 371 – 394.
- Barthel, R.; Agency, U. S. F. E. M.; Reclamation, U. S. B. O. 1998. *FEMA 178, Seismic Evaluation of Existing Building: Supplemental Class Notes*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- Bazzurro, P.; Luco, N. 2007. *Effects of Different Sources of Uncertainty and correlation on Earthquake-Generated Losses*. *Australian Journal of Civil Engineering* 4(1). 1 – 14. doi:10.1080/14488353.2007.11463924
- Bazzurro P.; Cornell C.A. 1999. *Disaggregation of seismic hazard*. *Bulletin of the Seismological Society of America* 89. 501–520.

- Behnam, B.; Shojaei, F. 2018. *A Risk Index for Mitigating Earthquake Damage in Urban Structures*. Poglavlje u knjizi: *Integrating Disaster Science and Management: Global Case Studies in Mitigation and Recovery*. Ur. Samui, P., Kim, D., Ghosh, C. Elsevier. Amsterdam.
- Bell, R.G.; King, A.B. 2006. *Regional Risk Scape: A multi-hazard loss modelling tool*. Proceedings of the International Disaster Reduction Conference, Davos.
- Bender, B.; Perkins, D.M. 1987. Seisrisk III: a computer program for seismic, Report USGS, Bulletin 1772. doi:10.3133/b1772
- Bender, B. 1984. *Seismic hazard estimation using a finite fault rupture model*. Bulletin of the Seismological Society of America 74. 1899-1923.
- Bendito, A.; Rozelle, J.; Bausch, D. 2014. *Assessing Potential Earthquake Loss in Mérida State, Venezuela Using HAZUS*. International Journal of Disaster Risk Science 5(3). 176 – 191.
- Benedetti, D.; Benzoni, G.M.; Parisi, M. A. 1988. *Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 16. 183 – 201.
- Benedetti, D.; Petrini, V. 1984. *Sulla Vulnerabilità Di Edifici in Muratura: Proposta Di Un Metodo Di Valutazione*. L'industria delle Costruzioni 149/1. 66 – 74.
- Bernardini, A.; Lagomarsino, S.; Mannella, A.; Martinelli, A.; Milano, L. ; Parodi, S. 2010. *Forecasting seismic damage scenarios of residential buildings from rough inventories: A case-study in the Abruzzo Region (Italy)*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability 224, 279 – 296. doi:10.1243/1748006XJRR305
- Bernardini, A.; Gori, R.; Modena, C. 2007. *Application of Coupled Analytical Models and Experimental Knowledge to Seismic Vulnerability Analyses of Masonry Buildings*. Poglavlje u knjizi: *Engineering Damage Evaluation and Vulnerability Analysis of Building Structures*. Ur. Koridze, A. Omega Scientific. Oxon. U.K.
- Bernardin, A.; Gori, R.; Modena, C. 1990. *Application of Coupled Analytical Models and Experimental Knowledge to Seismic Vulnerability Analyses of Masonry Buildings*. Poglavlje u knjizi: *Engineering Damage Evaluation and Vulnerability Analysis of Building Structures*. Ur. Koridze, A. Omega Scientific. Oxon. U.K.
- Biglari, M.; Formisano, A. 2020. *Damage Probability Matrices and Empirical Fragility Curves From Damage Data on Masonry Buildings After Sarpol-e-zahab and Bam Earthquakes of Iran*. Frontiers in Built Environment 6. doi:10.3389/fbuil.2020.00002
- Bilham, R. 2004. *Urban earthquake fatalities-a safer World or worse to come?*. Seismological Research Letters, v. 75. 706 – 712.
- Bielik, M.; Makarenko, I.; Csicsay, K.; Legostaeva, O.; Starostenko, V.; Savchenko, A.; Šimonová, B.; Dérerová, J.; Fojtíková, L.; Pašteka, R.; Vozár, J.; 2018. *The refined Moho depth map in the Carpathian-Pannonian region*. Contributions to Geophysics and Geodesy 48(2). 179-190. doi: 10.2478/congeo-2018-0007.
- Bijelić, N.; Lin, T.; Deierlein, G. 2019. *Quantification of the influence of deep basin effects on structural collapse using SCEC Cyber Shake earthquake ground motion simulations*. Earthquakes Spectra 35. 1845 – 1864.
- Bindi, D.; L. Luzi; Pacor F. 2009. *Interevent and Interstation Variability Computed for the Italian Accelerometric Archive (ITACA)*. Bulletin of the Seismological Society of America 99/4. 2471–2488. doi: 10.1785/0120080209

Biot, M.A. 1934. *Theory of Vibration of Buildings During Earthquakes*. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 14(4). 213 – 223.

Biot, M.A. 1933. *Theory of Elastic Systems Vibration Under Transient Impulse With an Application to Earthquake-Proof Buildings*. Proceedings of the National Academy of Sciences.

Biot, M.A. 1932. *Vibrations of Buildings During Earthquake*. Poglavlje II u doktorskom radu (259): Transient Oscillations in Elastic Systems, Aeronautics Department, California Institute of Technology, Pasadena, California.

Birkmann, J. 2006. *Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: conceptual frameworks and definitions*. Poglavlje u knjizi: Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies. Ur. Birkmann, J. United Nations University Press. Tokyo. 9-54.

Bommer, J.J.; Akkar, S.; Kale, O. 2011. *A Model for Vertical-to-Horizontal Response Spectral Ratios for Europe and the Middle East*. Bulletin of the Seismological Society of America 101(4). 1783 – 1806. doi:10.1785/0120100285

Bommer, J.J.; Alarcon, J.E. 2006. *The prediction and use of peak ground velocity*. Journal of Earthquake Engineering 10(1). 1 – 31. doi:10.1080/13632460609350586

Bommer J.J.; Douglas J.; Strasser F.O. 2003. *Style-of-Faulting in Ground-Motion Prediction Equations*. Bulletin of Earthquake Engineering 1. 171–203.

Bommer, J.J. 2002. *Deterministic vs. Probabilistic seismic hazard assessment: an exaggerated and obstructive dichotomy*. Journal of earthquake engineering 6(sup001). 43 – 73. doi:10.1080/13632460209350432

Bommer, J. J.; Elnashai, A. S. 1991. *Displacement spectra for seismic design*. Journal of Earthquake Engineering, 3(1). 1 – 32.

Boore, D.M.; Atkinson, M.G., 2008. *Equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s*. Earthquake Spectra 24 (1). 99 – 138.

Boore, D.M.; Atkinson, G.M. 2007. *Boore – Atkinson NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters*. PEER Report 2007/01, Pacific Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.

Boore, D.M.; Bommer, J.J. 2005. *Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25 (2). 93 – 115.

Boore, D.M.; Joyner, W.B.; Fumal, T.E., 1997. *Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: a summary of recent work*. Seismological Research Letters KNZ, 128 – 153.

Booth, E. 2007. *The Estimation of Peak Ground-motion Parameters from Spectral Ordinates*. Journal of Earthquake Engineering 11(1). 13 – 32. doi:10.1080/13632460601123156

Bramerini F.; Di Pasquale G.; Orsini A.; Pugliese A.; Romeo R.; Sabetta F. 1995. *Rischio sismico del territorio italiano. Proposta per una metodologia e risultati preliminari*. Rapporto tecnico del Servizio Sismico Nazionale SN/RT/95/01. Roma.

Borzi, B.; Crowley, H.; Pinho, R. 2008. *Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment (SP-BELA) Method for Masonry Buildings*. International Journal of Architectural Heritage 2(4). 353 – 376.

Borzi, B.; Calvi, G.M.; Elnashai, A.S.; Faccioli, E.; Bommer, J.J. 2001 *Inelastic spectra for displacement-based seismic design*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 21(1). 47 – 61.

Braga, F.; Dolce, M.; Liberatore, D. 1982. *A Statistical Study on Damaged Buildings and an Ensuing Review of the MSK–76 Scale*. Proceedings of the Seventh European Conference on Earthquake Engineering. Athens.

Brzev S.; Scawthorn C.; Charleson A.W.; Allen L.; Greene M.; Jaiswal K.; Silva V. 2013. GEM Building Taxonomy Version 2.0. GEM technical report 2013-02 V1.0, GEM Foundation, Pavia.

Brzev, S.; Scawthorn, C.; Charleson A.W.; Jaiswal K. 2012. *Interim Overview of GEM Building Taxonomy V2.0*. Report produced in the context of the GEM Building Taxonomy Global Component, GEM.

Bulajić, B.Đ; Pavić, G.; Hadzima-Nyarko, M. 2022b. *PGA estimates for deep soil atop deep geological sediments—An example of the city of Osijek, Croatia*. Geomechanics and Engineering 30/3. 233 – 246. doi:10.12989/gae.2022.30.3.233

Bulajić, B.Đ; Pavić, G.; Hadzima-Nyarko, M. 2022a. *PGA vertical estimates for deep soils and deep geological sediments – A case study of Osijek (Croatia)*. Computers and Geosciences 158. 104985. doi:10.1016/j.cageo.2021.104985

Bulajić, B.Đ.; Hadzima-Nyarko M.; Pavić G. 2021b. *Vertical to horizontal UHS ratios for low to medium seismicity regions with deep soil atop deep geological sediments—an example of the city of Osijek, Croatia*, Applied Sciences 11/ 15. 6782. doi:10.3390/app11156782

Bulajić, B.Đ.; Hadzima-Nyarko M.; Pavić G. 2021a. *Horizontal UHS Amplitudes for Regions with Deep Soil Atop Deep Geological Sediments—An Example of Osijek, Croatia*. Applied Sciences 11 /14. 6296. doi:10.3390/app11146296

Bulajić, B.Đ. 2019. *Analiza seizmičkog hazarda*. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka.

Bulajić, B.Đ.; Bajić, S.; Stojnić, N. 2018. *The effects of geological surroundings on earthquake-induced snow avalanche prone areas in the Kopaonik region*. Cold Regions Science and Technology 149. 29 – 45. doi:10.1016/j.coldregions.2018.02.005.

Bulajić, B.Đ; Manić, M. I. 2016. *Critical review of the 1975 seismic microzonation of the city of Kraljevo together with the spa town of Mataruška Banja*. Izgradnja 70/ 7– 8. 287 – 296.

Bulajić, B.Đ.; Lađinović, Đ. 2014. *Definisanje seizmičkog dejstva u Nacionalnom Aneksu za Evrokod 8*. Konferencija: Savremena građevinska praksa 2014. Departman za građevinarstvo i geodeziju Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu i Društvo građevinskih inženjera Novog Sada 125 – 147.

Bulajić, B.Đ. 2013. *A contribution to more reliable definition of design response spectra in the north-western Balkans*. Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Republika Srbija.

Bulajić, B.Đ.; Manić, M.I.; Ladinović, D. 2013. *Effects of shallow and deep geology on seismic hazard estimates: A case study of pseudo-acceleration response spectra for the northwestern Balkans*. Natural Hazards 69/1. 573–588.

- Bulajić, B.Đ.; Manić, M.I.; Lađinović, Đ. 2012. *Towards preparation of design spectra for serbian national annex to eurocode 8 – part ii: usage of the uhs approach instead of normalized spectral shapes scaled by a single PSHA parameter*. Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering 10/3. 259 – 274
doi: 10.2298/FUACE1203259B
- Bulajić, B.Đ.; Manić, M.I. 2006. *Selection of the appropriate methodology for the probabilistic seismic hazard analysis on the territory of the Republic of Serbia*. Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering 4/2. 101 – 113.
- Cabanas, L.; Benito, B.; Herraiz, M. 1997. *An approach to the measurement of the potential structural damage of earthquake ground motions*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 26. 79 – 92.
- Calvi, G.M.; Andreotti G. 2019. *Effects of Local Soil, Magnitude and Distance on Empirical Response Spectra for Design*. Journal of Earthquake Engineering 1 – 28. dio: 10.1080/13632469.2019.1703847
- Calvi, G. M. 2018. *A re-visitation of design earthquake spectra*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 47. 27 – 43. doi: 10.1002/eqe.3101.
- Calvi, G.M.; Rodrigues D.; Silva, V. 2018. *Introducing new design spectra derived from Italian recorded ground motions 1972 to 2017*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 47. 26 – 60. doi: 10.1002/eqe.3102
- Calvi, G.M; Pinho R.; Magenes G. 2009. *Traditional and Innovative Methods for Seismic Vulnerability Assessment at Large Geographical Scales. In: The 1755 Lisbon Earthquake: Revisited*. Geotechnical, Geological, and Earthquake Engineering 7. doi.10.1007/978-1-4020-8609-0_12
- Calvi, G.M.; Pinho, R.; Magenes, G.; Bommer, J.J.; Restrepo-Vélez L.F.; Crowley, H. 2006. *Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years*. ISET Journal of Earthquake Technology 472/43. 75 – 104. doi:10.1007/s11069-011-0082-4
- Calvi, G.M. 1999. *A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings*. Journal of Earthquake Engineering 3/3. 411 – 438.
- Campbell, K.W.; Bozorgnia, Y. 2007. *Campbell–Bozorgnia NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters*. PEER Report 2007/02, Pacific Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Campbell, K.W. 2002a. *A contemporary guide to strong-motion attenuation relations*. Poglavlje u knjizi: International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Ur. Lee, W.H.K.; Kanamori, H.; Jennings, P.C.; Kisslinger, C. Academic Press. London.
- Campbell, K.W. 2002b. *Engineering models of strong ground motion*. Poglavlje u knjizi: Handbook of Earthquake Engineering. Ur. Chen, W.F.; Scawthorn, C. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Campbell, K.W., 2002c. *Strong-motion attenuation relations*. Poglavlje u knjizi: International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Ur. Lee, W.H.K.; Kanamori, H.; Jennings, P.C.; Kisslinger, C. Academic Press. London.
- Cao, V.V.; Ronagh, H.R. 2014 *Correlation between parameters of pulse-type motions and damage of low-rise RC frames*. Earthquakes and Structures 7. 365 – 384.

Cardone, O.D.; Flora, A. 2017. *Multiple inelastic mechanisms analysis (MIMA): A simplified method for the estimation of the seismic response of RC frame buildings*. Engineering Structures 145. 368 – 380.

Cardona, O.D.; van Aalst, M.K.; Birkmann, J.; Fordham, M.; Mc Gregor, G.; Perez, R.; Pulwarty, R.S.; Schipper, E.L.F.; Sinh, B.T. 2012: *Determinants of risk: exposure and vulnerability*. Poglavlje u knjizi: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Ur. Field, C.B.; Barros, V.; Stocker T.F.; Qin, D.; Dokken, D.J.; Ebi, K.L.; Mastrandrea, M.D.; Mach, K.J.; Plattner, G.K.; Allen, S.K.; Tignor, M.; Midgley P.M. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press. Cambridge and New York. 65 – 108.

Cardona, O.D.; Ordaz, M.G.; Reinoso, E.; Yamin, L.E., Barbat, A.H. 2012. *CAPRA - Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment: International Initiative for Risk Management Effectiveness*. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon.

Cardona, O.D. 1990: *Terminología de Uso Común en Manejo de Riesgos*. AGID Reporte No. 13, Escuela de Administración, Finanzas, Tecnología Medellín, Colombia.

Charles, S. 2005. *History of Risk Model Development*. Open-source catastrophe risk modeling: How can we do it better? Workshop, California, United States.

Chever, L. 2012. *Use of seismic assessment methods for planning vulnerability reduction of existing building stock*. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering - WCEE, 10.

Chioccarelli, E.; Cito, P.; Iervolino, I.; Giorgio, M. 2019. *REASSESS V2.0: Software for single- and multi-site probabilistic seismic hazard analysis*. Bulletin of Earthquake Engineering 17. 1769 – 1793.

Chopra, A.K. 2007. Elastic response spectrum: A historical note. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 36(1). 3–12. doi:10.1002/eqe.609

Chopra, A.K. 2001. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Second Edition, Prentice Hall, Inc., New Jersey.

Coburn, A.W.; Spence, R.J.S. 2002. *Earthquake Protection* (Coburn/Earthquake Protection, Second Edition) Earthquake Risk and Modelling. 311 – 352. doi:10.1002/0470855185.ch9

Coburn, A.W.; Spence, R. J. S.; Pomonis, A. 1994. *Vulnerability and Risk Assessment*, UNDP Disaster Management Training Programme 2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd. Chichester.

Comerio, M.C. 1992. *Impacts of the Los Angeles Retrofit Ordinance on Residential Buildings*. *Earthquake Spectra*, 8(1). 79 – 94. doi:10.1193/1.1585671

Cooke, R. M. 1991. *Experts in Uncertainty: Opinion and Subjective Probability in Science*. Oxford: Oxford University Press.

Cornell, C.A. 1968. *Engineering seismic risk analysis*. Bulletin of the Seismological Society of America 58(5). 1583. 1606. doi:10.1785/bssa0580051583

Cosenza, E., Manfredi, G., Polese, M. and Verderame, G.M. (2005). A multi-level approach to the capacity assessment of existing RC buildings, *Journal of Earthquake Engineering* 9(1): 1 – 22.

- Costa, G.; Panza, G.F.; Suhadolc, P.; Vaccari, F. 1992. *Zoning of the Italian region with synthetic seismograms computed with known structural and source information*. Proceeding of 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid. 435–438.
- Costa, G.; Panza, G.F.; Suhadolc, P.; Vaccari, F. 1993. *Zoning of the Italian territory in terms of expected peak ground acceleration derived from complete synthetic seismograms*. Journal of Applied Geophysics 30. 149 – 160.
- Cotrufo, S.; Sandu, C.; Giulio Tonolo, F.; Boccardo, P. 2018. Building damage assessment scale tailored to remote sensing vertical imagery. European Journal of Remote Sensing 51(1). 991 – 1005 doi:10.1080/22797254.2018.1527662
- Covello, V.; Mumpower, J. 1985. *Risk analysis and risk management: An historical perspective*. Risk Analysis 5(2). 103 – 120.
- Crowley, H.; Despotaki, V.; Rodrigues, D.; Silva, V.; Toma-Danila, D.; Riga, E.; Gamba, P. 2020. *Exposure model for European seismic risk assessment*. Earthquake Spectra 36/1. doi:10.1177/8755293020919429
- Crowley, H.; Silva, V.; Despotaki, V.; Martins, L.; Atalić, J. 2019. *European Seismic Risk Model 2020: Focus on Croatia. Future Trends in Civil Engineering*. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Croatia 53 – 70.
- Crowley, H.; Ozcebe, S.; Baker, H.; Foulser-Piggott, R.; Spence, R. 2014. *D7.2 State of the Knowledge of Building Inventory Data in Europe*. NERA - Seventh Framework Programme EC project number: 262330.
- Crowley, H.; Stafford, P.J.; Bommer, J.J. 2008. *Can Earthquake Loss Models be Validated Using Field Observations?* Journal of Earthquake Engineering 12(7). 1078 – 1104. doi:10.1080/13632460802212923
- Crowley, H.; Bommer, J. J.; Pinho, R.; Bird, J. 2005. The impact of epistemic uncertainty on an earthquake loss model. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 34(14), pp. 1653 – 1685.
- Crowley, H.; Pinho, R.; Bommer, J. 2004. *A probabilistic displacement based vulnerability assessment procedure for earthquake loss estimation*. Bulletin of Earthquake Engineering 2/2. 173 – 219.
- Daranagama, S.; Witayangkurn, A. 2021. *Automatic Building Detection with Polygonizing and Attribute Extraction from High-Resolution Images*. ISPRS International Journal of Geo-Information 10. 606. doi:10.3390/ijgi10090606
- D'Ayala, D.; Meslem, A.; Vamvatsikos, D.; Porter, K.; Rossetto, T.; Silva, V. 2015. *Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment of Low/Mid-Rise Buildings, Methodology, Vulnerability Global Component project*. doi:10.13117/GEM.VULNMOD.TR2014.12
- D'Ayala, D. 2013. *Assessing the seismic vulnerability of masonry buildings*. Poglavlje u knjizi: Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems. Ur. Tesfamariam, S.; Goda, K. Sawston: Woodhead Publishing. 334 – 365. doi:10.1533/9780857098986.3.334
- D'Ayala, D.; Speranza, E. 2003. *Definition of Collapse Mechanisms and Seismic Vulnerability of Historic Masonry Buildings*. Earthquake Spectra, 19(3). 479 – 509.
- D'Ayala, D.; Speranza, E. 2002. *An Integrated Procedure for the Assessment of Seismic Vulnerability of Historic Buildings*. Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London. 561.

- Derras, B.; Bard, P.Y.; Régnier, J.; Cadet, H. 2020. Non-linear modulation of site response: *Sensitivity to various surface ground-motion intensity measures and site-condition proxies using a neural network approach*. Engineering Geology 269, 105500. doi:10.1016/j.enggeo.2020.105500
- De Stefano, M.; Pintucchi, B. A. 2008. *Review of research on seismic behaviour of irregular building structures since 2002*. Bulletin of Earthquake Engineering 6. 285 – 308.
- De Silva, C.W., 2005. *Vibration and Shock Handbook*. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida, USA (Pristupljeno 11. studenog 2021.).
- Dell'Acqua, F.; Gamba, P.; Jaiswal, K. 2013. *Spatial aspects of building and population exposure data and their implications for global earthquake exposure modeling*. Natural Hazards, 68(3), 1291 – 1309. doi:10.1007/s11069-012-0241-2
- Dickinson, C.; Aitsi-Selmi, A.; Basabe, P.; Wannous, C.; Murray, V. 2016. *Global Community of Disaster Risk Reduction Scientists and Decision Makers Endorse a Science and Technology Partnership to Support the Implementation of the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 – 2030*. International Journal of Disaster Risk Science 7(1). 108–109. doi:10.1007/s13753-016-0080-y
- Dilley, M., 2006. *Disaster risk hotspots: A project summary*. Poglavlje u knjizi: Measuring Vulnerability to Natural Hazards – Towards Disaster Resilient Societies. Ur. Birkmann, J. United Nations University Press. Tokyo. 182 – 188.
- Dilley, M.; Chen, R.S.; Deichmann, U.; Lerner-Lam, A.L.; Arnold, M.; Agwe, J.; Buys, P.; Kjekstad, O.; Lyon, B., Yetman, G. 2005. *Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis*. Washington, D.C. International Bank for Reconstruction and Development/the World Bank and Columbia University, Washington, DC.
- Dolce, M.; Prota, A.; Borzi, B. 2021. *Seismic risk assessment of residential buildings in Italy*. Bulletin of Earthquake Engineering 19. 2999 – 3032. doi:10.1007/s10518-020-01009-5
- Dolce, M.; Masi, A.; Marino, M. 2002. *EAE-ESC Task Group 3 – Seismic risk and earthquake damage scenarios – report of the activities*. Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London.
- Dolce, M.; Kappos, A.; Zuccaro, G.; Coburn, A.W. 1995. *State of the Art Report of W.G. 3 - Seismic Risk and Vulnerability*. Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna 4. 3049 – 3077.
- Douglas, J. 2011. *Ground-Motion prediction equations 1964-2010*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM); PEER Report 2011/102 Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California, Berkeley.
- Douglas, J.; Aochi, H. 2008. *A Survey of Techniques for Predicting Earthquake Ground Motions for Engineering Purposes*. Surveys in Geophysics 29(3).187 – 220. doi:10.1007/s10712-008-9046-y
- Douglas, J. 2007. *Physical vulnerability modelling in natural hazard risk assessment*. Natural Hazards and Earth System Sciences 7/2. 283 – 288. doi:10.5194/nhess-7-283-2007
- Douglas, J. 2003. *Earthquake ground motion estimation using strong motion records: A review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates*. Earth-Science Reviews 61. 43 – 104. doi:10.1016/S0012-8252(02)00112-5

- Douglas, J. 2002. *Errata of and additions to ESEE Report No. 01-1: 'A comprehensive worldwide summary of strong-motion attenuation relationships for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000)*. SM Report, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College, London.
- Douglas, J. 2001. *A comprehensive worldwide summary of strong-motion attenuation relationships for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 – 2000)*. ESEE Report 01-1, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College, London.
- Državni zavod za statistiku, Zagreb. *Statistički ljetopis Republike Hrvatske (1953 – 1970)*. <http://www.dzs.hr/> (Pristupljeno 30. travnja 2021.).
- Državni zavod za statistiku, Zagreb. *Statistički podatci*. <http://www.dzs.hr/> (Pristupljeno 25. lipnja 2022.).
- Dowrick, D.J. 2000. *Earthquake Risk Reduction*, John Wiley and Sons Ltd.
- Dubois, D.; Parade, H. 1980. *Fuzzy sets and systems*. Academic Press. New York.
- Duke, C.M. 1958. *Bibliography of effects of soil conditions on earthquake damage*. Berkeley, CA. Earthquake Engineering Research Institute.
- Dunbar, P.K.; Bilham, R. G.; Laituri, M. J. 2003. *Earthquake Loss Estimation for India Based on Macroeconomic Indicators*. Poglavlje u knjizi: Risk Science and Sustainability. Ur. Beer, T.; Ismail-Zadeh, A. Dordrecht. Springer. 163–180.
- Dunford M.; Power L. 2014. *National Exposure Information System (NEXIS) Building Exposure—Statistical Area Level 1 (SA1)*. Canberra, ACT. Geoscience Australia.
- Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske. 2018. Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine. <https://www.menea.hr/wp-content/uploads/2018/08/Dugorocna.strategija.2017-nacrt.pdf> (Pristupljeno 2. ožujak 2022.).
- Earle, P.S.; Wald, D.J.; Jaiswal, K.S.; Allen, T.I.; Marano, K.D.; Hotovec, A.J.; Hearne, M.G.; Fee, J.M. 2009. *Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response (PAGER): A system for rapidly determining the impact of global earthquakes worldwide*. U.S. Geological Survey. Open-File Report 1131.
- Edwards, M. R.; Robinson, D.; McAneney, K. J.; Schneider, J. 2004. *Vulnerability of residential structures in Australia*. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver.
- EERI. 2007. *World Housing Encyclopedia* (<http://www.world-housing.net/>). (Pristupljeno 21. srpnja 2022.).
- Ehrlich, D.; Kemper, T.; Blaes, X.; Soille, P. 2013. *Extracting building stock information from optical satellite imagery for mapping earthquake exposure and its vulnerability*. Natural Hazards 68(1). 79–95. doi:10.1007/s11069-012-0482-0
- Eleftheriadou, A.K.; Karabinis, A.I. 2013. *Evaluation of damage probability matrices from observational seismic damage data*. Earthquakes and Structures 4/3. 299–324. doi:10.12989/eas.2013.4.3.299.
- Elenas, A. 2000. *Correlation between seismic acceleration parameters and overall structural damage indices of buildings*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 20. 93 – 100.

- Elenas, A. 1997. *Interdependency between seismic acceleration parameters and the behavior of structures*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 16. 317 –3 22.
- Krinitzky E.L. 1995. *Deterministic versus probabilistic seismic hazard analysis for critical structures*. Geotechnical Laboratory. Engineering Geology 40. 1-7.
- El-Maissi, A.M.; Argyroudis, S.A.; Nazri, F.M. 2021. *Seismic Vulnerability Assessment Methodologies for Roadway Assets and Networks: A State-of-the-Art Review*. Sustainability 13. 61. doi:10.3390/su13010061
- Elnashai, A.S.; Di Sarno, L. 2008. *Fundamentals of Earthquake Engineering*. John Wiley and Sons Ltd, West Sussex. Engineering and Engineering Seismology 43(2). 181 – 204.
- EPISCOPE Intelligent Energy Europe Project "EPISCOPE" <https://episcopes.eu/iee-project/episcopes/> (Pristupljeno 14. studenog 2021.).
- Erdik, M. 2017. *Earthquake risk assessment*. Bulletin of Earthquake Engineering 15. 5055–5092. doi:10.1007/s10518-017-0235-2
- Ermert, L.; Poggi, V.; Burjaneck, J.; Fah, D. 2014. *Fundamental and higher two-dimensional resonance modes of an Alpine valley*. Geophysical Journal International 198. 795 – 811.
- Esteva L. 1969. *Seismic risk and seismic design decisions*. Proceedings of the MIT Symposium on Seismic Design of Nuclear Power Plants, Cambridge.
- Esteva, L. 1968. *Bases para la formulacion de decisiones de diseño sísmico*. Doktorski rad. Universidad Autonoma Nacional de México, Ciudad de México.
- Esteva, L. 1967. *Cráterios para la construcción de espectros para diseño sísmico*. Proceedings of the XII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural y III Simposio Panamericano de Estructuras, Caracas.
- EUROSTAT Database – Eurostat – European Commission <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (Pristupljeno 14. studenog 2021.).
- Everdnden, J.; Thomson, J.M. 1985. *Predicting Seismic Intensities*. U.S. Geological Survey professional paper. 1360.
- Faccioli, E.; Vanini, M. 2003. *Complex seismic site effects in sediment-filled valleys and implications on design spectra*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 5. 223 – 238.
- Fajfar, P.; Fischinger, M.; Isaković, T., 2000. *Metoda procjene seizmičkog ponašanja zgrada i mostova*. Građevinar, 52 (11). 663 – 671.
- Fajfar, P. 2000. *A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Desing*. Earthquake Spectra 16. 573-592. doi:10.1193/1.1586128
- Fajfar, P.; Fischinger, M. 1988. *N2-a method for non-linear seismic analysis of regular buildings*. Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo-Kyoto. 111-116.
- Farsangi, E.N.; Tasnimi, A.T. and Mansouri, B. 2015. *Fragility assessment of RC-MRFs under concurrent vertical-horizontal seismic action effects*. Computers and Concrete 16/1. 99 – 123.

Federal Emergency Management Agency. 2014. *National earthquake hazards reduction program. NEHRP provisions, FEMA*. Washington.

Federal Emergency Management Agency. 2012. *Hazus-MH 2.1 Technical Manual:Earthquake Model*. Mitigation Division, FEMA. Washington.

Federal Emergency Management Agency. 2005. *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, FEMA 440*, Prepared by Applied Technology Council (ATC55 Project). Washington.

Federal Emergency Management Agency. 2003. *HAZUS-MH MR4 Technical Manual*. Washington.

Federal Emergency Management Agency. 2000. *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. FEMA 356, Prepared by American Society of Civil Engineers. Virginia. Washington.

Federal Emergency Management Agency. 1997. *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. FEMA 273. Washington.

Ferreira, T.M.; Rodrigues, H.; Vicente, R. 2020. *Seismic Vulnerability Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings in Urban Centers*. Sustainability 12(5). 1996. doi:10.3390/su12051996.

Ferliche, M. 2012. *Elaboration of Seismic Damage Scenarios in the City of Granada*. Doktorski rad, Technical University Granada, Granada.

Ferliche, M.; Vidal, F.; Jimenez, C.; Navarro, M. 2008. *A straightforward method applicable to Earthquake Damage Scenarios and Early Loss Assessment in urban areas of Southern Spain*. Proceedings of the 31st General Assembly of the European Seismological Commission ESC, Crete.

Foerster E.; Krien Y.; Dandoulaki M.; Priest S.; Tapsell S.; Delmonaco G. 2009. *Methodologies to assess vulnerability of structural systems*. Technical Report, Project ENSURE, WP 1: State-of-the art on vulnerability types, Del. 1.1.1.

Franchin P.; Cavalieri, F.; Pinto, P. E.; Lupoi A.; Vanz, I.; Gehl, P.; Kazai, B.; Weatherhill, G.; Esposito, S.; Kakderi, K. 2011. *General methodology for systemic vulnerability assessment*. Project SYNER-G , Reference Report 1.

Frankie, T. 2013. *Impact of complex system behaviour on seismic assessment of RC bridges*. Doktorski rad. University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois.

Freeman, S.A. 2007. *Response spectra as a useful design and analysis tool for practicing structural engineers*. ISET Journal of Earthquake Technology 44/1. 25 – 37.

Freeman, S.A. (1978). *Prediction of response of concrete buildings to severe earthquake motion*. Publication SP-55: 589–605, American Concrete Institute, Detroit.

Freeman, S. A.; Nicoletti, J.P.; Tyrrell, J.V. 1975. *Evaluations of existing buildings for seismic risk – A case study of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington*. Proceedings of the US National Conference on Earthquake Engineering, Ann Arbor. Earthquake Engineering Research Institute. El Cerrito. Berkeley, 113 – 122.

Freeman, J.R. 1932. *Earthquake Damage and Earthquake Insurance: Studies of a rational basis for earthquake insurance, also studies of engineering data for earthquake resisting construction*. McGraw-Hill Book Co., New York.

Galista, M.; Hadzima-Nyarko, M. 2015. *Assessing seismic risk in Retfala Nova*. Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS. 6. 50 – 61.

Gamba, P. 2014. *Global Exposure Database: Scientific Features*. GEM Technical Report 2014-10 V1.0.0, 46 pp. GEM Foundation, Pavia. doi: 10.13117/GEM.EXP-MOD.TR2014.10.

Gamba P.; Cavalca D.; Jaiswal K.; Huyck C.;Crowley, H. 2012. The GED4GEM project: Development of a global exposure database for the global earthquake model initiative. Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering, Lisbon.

Gamba P.; Herold, M. 2009. *Global mapping of human settlement—experiences, datasets, and prospects*. CRC Press, Boca Raton

Gandomi, A.H.; Alavi, A.H.; Arjmandi, P.; Aghaeifar, A.; Seyednour, R., 2010. *Modeling of compressive strength of hpc mixes using a combined algorithm of genetic programming and orthogonal least squares*. Journal of Mechanics of Materials and Structures 5 (5). 735 – 753.

Geller, R.J.; Jackson, D.D.; Kagan, Y. .; Mulargia, F. 1997. *Earthquakes Cannot Be Predicted*. Science 275(5306). 1616 – 1616. doi:10.1126/science.275.5306.1616

Giardini, D.; Woessner, J.; Danciu, L.; Crowley, H.; Cotton, F.; Grünthal, G.; Pinho, R.; Valensise, L. 2013. *European Seismic Hazard Map for Peak Ground Acceleration, 10% Exceedance Probabilities in 50 years*. Swiss Seismological Service: Zurich. doi:10.2777/30345.

Giovinazzi S. 2005. *The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis*.Doktorski rad. Technical University Carolo-Wilhelmina at Braunschweig, University of Florence. doi:10.24355/dbbs.084-200511080100-312

Giovinazzi, S.; Lagomarsino, S. 2004. *A Macroseismic Method for the Vulnerability Assessment of Buildings*. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver.

Giovinazzi S.; Lagomarsino, S. 2001. *A methodology for the seismic vulnerability analysis of buildings*. Proceedings of the 10th Italian conference on earthquake engineering. Potenza.

GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti). 1994. *Scheda di esposizione e vulnerabilità e di rilevamento danni di primo livello e secondo livello (muratura e cemento armato)*. Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma.

GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti). 1993. *Rischio Sismico Di Edifici Pubblici, Parte I: Aspetti Metodologici*. Proceedings of the CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma.

GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti) 1986. *Istruzioni per la Compilazione de lla Sceda di Relivamento Esposizione e Vulnerabilità Sismica Degli Edifici*. Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Regione Emilia Romagna y Regione Toscana, Italy.

Goretti, A.; Di Pasquale, G. 2002. *An overview of post-earthquake damage assessment in Italy*. EERI Invitational Workshop: An action plan to develop earthquake damage and loss data protocols, Pasadena.

Graber, T.; Management, U.S.B.o.L; Reclamation, U.S.B.o. 1999. *FEMA 310, Seismic Evaluation of Buildings, Boise District Office Building, Boise, Ada County, Idaho*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.

- Graizer, V.; Kalkan, E. (2011). *Modular Filter-based Approach to Ground Motion Attenuation Modeling*. Seismological Research Letters. 82(1). 21 – 31. doi:10.1785/gssrl.82.1.21
- Graizer, V.; Kalkan, E. 2009. *Prediction of Spectral Acceleration Response Ordinates Based on PGA Attenuation*. Earthquake Spectra 25(1). 39 – 69. doi:10.1193/1.3043904
- Grünthal, G. 1998. *European Macroseismic Scale 1998 (EMS–98)*, European Centre for Geodynamics and Seismology 15. Luxembourg.
- Grünthal, G.; Stormeyer, D. 1992. *The recent crustal stress field in Central Europe: Trajectories and finite element modeling*. Journal of Geophysical Research 97/B8. 11805 – 11820.
- Guagenti E.; Petrini V. 1989. *Il caso delle vecchie costruzioni: verso una nuova legge danni-intensità*. Proc. of 4th Italian Conference on Earthquake Engineering, Milano.
- Gulati, B. 2006. *Earthquake Risk Assessment of Buildings: Applicability of HAZUS in Dehradun, India*. https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2006/msc/iirs/brijesh (Pristupljeno 26. lipnja 2022.).
- Gunel, M.H.; Ilgin, H.E. 2007. *A Proposal for the Classification of Structural Systems of Tall Buildings*. Building and Environment, Elsevier 42. 2667-2675.
- Gupta, I.D.; Trifunac, M.D. 1998. *Order statistics of peaks in earthquake response*. Journal of Engineering Mechanics 114(10). 1605–27. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)114:10(1605)
- Gupta, V.K.; Trifunac, M.D. 1992. *Higher order peaks in response of multistoried buildings*. Earthquake Engineering. Tenth World Conference. Balkema, Rotterdam.
- Gurpinar, A.; Abali, M.; Yucemen, M.S.; Yesilcay, Y. 1978. *Feasibility of Obligatory Earthquake Insurance in Turkey*. METU/ EERI Report No.78–05. Ankara.
- Gutenberg B. 1957. *Effects of ground on earthquake motion*. Bulletin of the Seismological Society of America 47. 221 – 250 .
- Gutenberg, B.; Richter, C.F. 1944. *Frequency of Earthquakes in California*. Bulletin of the Seismological Society of America 34. 185 – 188.
- Hadzima-Nyarko, M.; Pavić, G.; Bulajić, B.Đ.; Kukaras, D. 2020. *Characteristics of Buildings and Seismic Vulnerability Assessment for the Specific Area of the City of Osijek*. Proceedings of the IOP conference series. Materials science and engineering 789. 0120237/11. doi:10.1088/1757-899X/789/1/012023
- Hadzima-Nyarko, M.; Nikić, D.; Pavić, G. 2019. *Seismic Vulnerability Assessment of Reinforced Concrete Frame Structure by Finite Element Analysis*. Acta Physica Polonica A 135, 845 – 848.
- Hadzima-Nyarko, M.; Kalman Šipoš, T.; Pavić, G.; Trbojević, M.; Markasović, D. 2018b. *Potresna oštetljivost i karakteristike zgrada gradskog bloka u Osijeku*. Zbornik radova VII. Konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa. Ur. Holcinger, N. Državna uprava za zaštitu i spašavanje, Zagreb. 92 – 100.
- Hadzima-Nyarko, M.; Nikić, D.; Morić, D. 2018a. *Potresno inženjerstvo – procjena oštetljivosti zgrada*. Građevinski fakultet Osijek. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Osijek.

- Hadzima-Nyarko, M.; Lešić, M.; Morić, D. 2017. *Seismic Vulnerability Assessment for Residential Buildings in Osijek, Croatia*. Proceedings of the 16th World Conference of Earthquake Engineering, Santiago.
- Hadzima-Nyarko, M.; Pavić, G.; Lešić, M. 2016. *Seismic vulnerability of old confined masonry buildings in Osijek, Croatia*. Earthquakes and Structures 11. 629 – 648.
- HAZUS 99. 1999. *Earthquake loss estimation methodology — technical and user manuals*. Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington.
- Herak, Marijan. 2012. *Hrvatska karta potresne opasnosti*. Zbornik radova IV. konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa. Državna uprava za zaštitu i spašavanje DUZS. Zagreb.
- Herak, M.; Herak, D.; Markušić, S., 1996. *Revision the earthquake catalogue and seismicity of Croatia 1908-1992*. Terra Nova. 8/1. 86 – 94.
- Herak, D.; Herak, M. 1990. *Focal depth distribution in the Dinara Mt. region, Yugoslavia*. Gerlands Beitrage zur Geophysik 99. 505-511.
- Herrera, G.R.; Soberon, G.C. 2008. *Influence of Plan Irregularity of Buildings*. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing.
- Housner, G.W.; Scott, S. 1997. *Connections, The EERI oral history series*. Earthquake Engineering Research Institute.
- HRN EN 1998-1:2011/NA:2011. 2011. *Eurocod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade*. Hrvatski Zavod za Norme. Zagreb.
- Huang, D.; Wang, J.P.; Brant, L.; Chang, S.C. 2012. *Deterministic Seismic Hazard Analysis Considering Non-controlling Seismic Sources and Time Factors*. Poglavlje u knjizi: Scalable Uncertainty Management. Lecture Notes in Computer Science. Ur. Hüllermeier, E.; Link, S.; Fober, T.; Seeger, B. 7520. Springer, Berlin - Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-33362-0_42
- Hudson, D.E. 1956. *Response spectrum techniques in engineering seismology*. Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering. Earthquake Research Institute and the University of California. Berkeley.
- Işık, E. 2016. *Consistency of the rapid assessment method for reinforced concrete buildings*. Earthquakes and Structures 11. 873 – 885.
- Idham, N.C. 2018. *Earthquake Failures on Buildings and the Role of Architect on Building Safety*. DIMENSI – Journal of Architecture and Built Environment 45/2. 153 – 164. doi:10.9744/dimensi.45.2.153-164.
- Iervolino, I. 2017. *Assessing uncertainty in estimation of seismic response for PBEE*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 46(10). 1711 – 1723. doi:10.1002/eqe.2883
- Ignjatović, D.; Bojana, Z.; Ćuković Ignjatović, N.; Đukanović, L.; Radivojević, A.; Rajčić, A. 2021. *Methodology for Residential Building Stock Refurbishment Planning—Development of Local Building Typologies*. Sustainability 13(8). 4262. doi:10.3390/su13084262
- Ismail-Zadeh, A. 2020. *Science for Earthquake Risk Reduction*. Journal of the Geological Society of India 96. 213 – 216. doi:10.1007/s12594-020-1540-y

Ivandić, N.; Hadzima-Nyarko, M.; Štefić, T. 2015. *Seismic vulnerability of primary schools in the city Osijek*. Proceedings of the 4th Conference—International Scientific Symposium, Economy of Eastern Croatia-Vision and Development. Osijek.

Jaiswal, K.S.; Wald, D.J.; Perkins, D.; Aspinall, W.P.; Kiremidjian, A.S. 2013. *Estimating structural collapse fragility of generic building typologies using expert judgement*. Proceedings of the 11th International Conference on Structural Safety and Reliability. New York.

Jaiswal, K.; Wald, D.J. 2008. *Creating a Global Building Inventory for Earthquake Loss Assessment and Risk Management*. USGS Open File Report 1160. <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1160/>. (Pristupljeno 3. rujna 2022.).

Jaiswal, K.; Wald, D.; Porter, K. 2010. *A global building inventory for earthquake loss estimation and risk management*. Earthquake Spectra 26. 731–748. doi: 10.1193/1.3450316

Jaiswal, K.; Wald, D.; Hearne, M. 2009. *Estimating Casualties for Large Earthquakes Worldwide Using an Empirical Approach*. Open-File Report 2009–1136. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

Jalali, A.; Milani, S.A. 2005. *Fundamental periods of buildings measured from ambient vibration measurements*. Proceedings of the 2005 world sustainable building conference. Tokyo.

Ji, K.; Ren, Y.; Wen, R. 2017. *Site classification for National Strong Motion Observation Network System (NSMONS) stations in China using an empirical H/V spectral ratio method*. Journal of Asian Earth Sciences 147. 79–94. doi:10.1016/j.jseaes.2017.07.032.

Jordanovski, Lj.R.; Lee, V.W.; Manić, M.I.; Olumčeva, T.; Sinadnovski, C.; Todorovska, M.I.; Trifunac, M.D. 1987. *Strong Earthquake Ground Motion Data in EQINFOS: Yugoslavia, Part I*. Report No. 87-05. Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles, California.

Jovanović Popović, M.; Ignjatović, D.; Radivojević, A.; Rajčić, A.; Đukanović, L.; Cuković Ignjatović, N.; Nedić, M. 2013. *Nacionalna Tipologija Stambenih Zgrada Srbije*. Arhitektonski fakultet Univerziteta u Beogradu. <http://eeplatforma.arh.bg.ac.rs/en/publications/national-typology-of-residentialbuildings-in-serbia> (Pristupljeno 21. studenog 2021.).

Kadas, K.; Yakut, A.; Kazaz, I. 2011. *Spectral Ground Motion Intensity Based on Capacity and Period Elongation*. Journal of Structural Engineering 137. 401–409.

Kadrić, D.; Živković, B.; Delalić, N.; Delalić, B.; Bešović, I. 2018. *Nacionalna tipologija stambenih zgrada u Republici Srbiji i Bosni i Hercegovini u funkciji određivanja potrebne i isporučene energije za grijanje stambenog sektora*. KGH – Klimatizacija grijanje hlađenje 47(1). 67.

Kahle D., 2006. *Građevinski propisi za grad Zagreb u razdoblju od 1919. do 1931. godine i Građevinski zakon iz 1931. godine*. Gradski zavod za zaštitu spomenika kulture i prirode. K 711.62. 497.5. Zagreb.

Kahle D., 2020. *Rasprava: Djelovanje potresa na zgrade akademika Andrije Mohorovičića iz 1911. godine i protupotresna analiza građevnih propisa grada Zagreba u razdoblju od 1857. do 1964. godine*. Institut povijesti i umjetnosti 44/2. 29–42.

Kappos, A.J.; Panagopoulos, G. 2010. *Fragility curves for reinforced concrete buildings in Greece*. Structure and infrastructure Engineering 6(1–2). 39–53. doi:10.1080/15732470802663771

- Kappos, A.J.; Panagopoulos, G.; Penelis, G.G. 2008. *Development of a seismic damage and loss scenario for contemporary and historical buildings in Thessaloniki, Greece*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28(10–11). 836 – 850. doi:10.1016/j.soildyn.2007.10.017
- Kappos, A.J.; Panagopoulos, G.; Panagiotopoulos, C.; Penelis, G. 2006. *A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings*. Bulletin of Earthquake Engineering 4(4). 391 – 413.
- Kappos, A.J.; Pitilakis, K.D.; Morfidis, K.; Hatzinikolaou, N. 2002. *Vulnerability and risk study of Volos (Greece) metropolitan area*. Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London.
- Kappos, A.J.; Stylianidis, K.C.; Pitilakis, K. 1998. *Development of seismic risk scenarios based on a hybrid method of vulnerability assessment*. Natural Hazards 17(2). 177 – 192.
- Kappos, A.J. 1997. *Discussion of paper: Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones*. Earthquake Spectra 13. 549 – 551.
- Kassem, M.M.; Mohamed Nazri, F.; Noroozinejad Farsangi, E. 2020. *The seismic vulnerability assessment methodologies: A state-of-the-art review*. Ain Shams Engineering Journal 11(4). 849 – 864. doi:10.1016/j.asej.2020.04.001
- Kavgic, M.; Mavrogianni, A.; Mumovic, D.; Summerfield, A.; Stevanovic, Z.; Djurovic-Petrovic, M. 2010. *A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector*. Building and Environment 45. 1683 – 1697. doi:10.1016/j.buildenv.2010.01.021
- Kellett, J.; Caravani, A. 2013. *Financing Disaster Risk Reduction: A 20-year story of international aid*. Technical Report. Global Facility for Disaster Reduction and Recovery.
- King A.; Bell R.G. 2006. *Risk scape New Zealand - A Multihazard Loss Modelling Tool*. Proceedings of the 6th NZSEE Conference. Christchurch.
- Kircher, C.A.; Whitman, R.V.; Olmes, W. 2006. HAZUS Earthquake Loss Estimation Methods. Natural Hazards Review 7. 45 – 59. doi:10.1061/(ASCE)1527-6988(2006)7:2(45)
- Kircher, C.A.; Reitherman, R.K.; Whitman, R. ; Arnold, C. 1997. *Estimation of earthquake losses to buildings*. Earthquake spectra 13(4). 703 – 720.
- Kirchsteiger, C. 1999. *On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 12(5). 399 – 419. doi:10.1016/s0950-4230(99)00012-1
- Kohrang, M.; Bazzurro, P.; Vamvatsikos, D. (2021). *Seismic risk and loss estimation for the building stock in Isfahan. Part I: exposure and vulnerability*. Bulletin of Earthquake Engineering 19(4). 1709 – 1737. doi:10.1007/s10518-020-01036-2
- Kostadinov, M.V.; Towhata, I. 2002. Assessment of liquefaction-inducing peak ground velocity and frequency of horizontal ground shaking at onset of phenomenon. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22(4). 309 – 322.
- Kostinakis, K.; Fontara, I.K.; Athanatopoulou, A.M. 2018. *Scalar Structure-Specific Ground Motion Intensity Measures for Assessing the Seismic Performance of Structures: A Review*. Journal of Earthquake Engineering 22. 630 – 665.

- Kramer, S.L.; Mitchell, R.A. 2006. *Ground Motion Intensity Measures for Liquefaction Hazard Evaluation*. Earthquake Spectra 22. 413 – 438.
- Krinitzky E.L. 1995. *Deterministic versus probabilistic seismic hazard analysis for critical structures*. Engineering Geology 40. 1-7.
- Kumar, M.; Bhardwaj, A. 2021. Building Extraction from Very High Resolution Stereo Satellite Images Using OBIA and Topographic Information. Environmental Science Proceedings. doi:10.3390/IECG2020-08908
- Kušević, R. 1925. *Novi nemački propisi za armirani beton*, Tehnički list 7 (24). 361 – 367.
- Kwon, O.-S.; Elnashai, A. 2006. *The effect of material and ground motion uncertainty on the seismic vulnerability curves of RC structure*. Engineering Structures 28(2). 289 – 303.
- Lagomarsino, S.; Giovinazzi, S. 2006. Macro seismic and mechanical models for the vulnerability and 548 damage assessment of current buildings. Bulletin of Earthquake Engineering 4. 415 – 443. doi:10.1007/s10518-006-9024-z
- Lang, D.H.; Singh, Y.; Prasad, J.S.R. 2012. *Comparing empirical and analytical estimates of earthquake loss assessment studies for the city of Dehradun, India*. Earthquake Spectra. 28(2). 595 – 619. doi:10.1193/1.4000004
- Lang, D.H. 2012. *Earthquake Damage and Loss Assessment - Predicting the Unpredictable*. Doktorski rad. University of Bergen. doi: 10.13140/RG.2.2.30518.80966
- Lantada N.; Irizarry J.; Barbat A.H.; Goula X.; Roca A.; Susagna T.; Pujades L. 2010. *Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the RISK-UE Vulnerability Index Method*. Bulletin of Earthquake Engineering 8(2). 201 – 229. doi:10.1007/s10518-009-9148-z
- Lavan, O.; de Stefano, M. 2013. *Seismic Behaviour and Design of Irregular and Complex Civil Structures*. Springer. Heidelberg.
- Lawson, R.S.; Krawlinker, H. 1995. *Cumulative damage potential of seismic ground motion*. Proceedings of the 10th European Conference of Earthquake Engineering 2. 1079 – 1086.
- Lin, S.L.; Li, J.; Elnashai, A.S.; Spencer, B.F. 2012. *NEES integrated seismic risk assessment framework (NISRAF)*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 42. 219 – 228.
- Lee, V.W.; Trifunac, M.D.; Bulajić, B.Đ.; Manić, M.; Herak, D.; Herak, M. 2017d. *Seismic microzoning of Kraljevo in Serbia*. Izgradnja 71(5–6). 159–178.
- Lee, V.W.; Trifunac, M.D.; Bulajić, B.Đ.; Manić, M.; Herak, D.; Herak, M.; Dimov, G.; Gičev, V. 2017c. *Seismic microzoning in Skopje, Macedonia*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 98. 166–182.
- Lee, V.W.; Trifunac, M.D.; Bulajić, B.Đ.; Manić, M.; Herak, D.; Herak, M.; Dimov, G.; Gičev, V. 2017b. *Seismic microzoning of Štip in Macedonia*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 98. 54–66.
- Lee, V.W.; Trifunac, M.D.; Bulajić, B.Đ.; Manić, M.; Herak, D.; Herak, M. 2017a. *Seismic microzoning of Belgrade*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 97. 395–412.
- Lee, V.W.; Trifunac, M.D.; Bulajić, B.Đ.; Manić, M.I. 2016b. *Preliminary empirical scaling of pseudo relative velocity spectra in Serbia from the Vrancea earthquakes*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 86. 41–54.

- Lee, V.W.; Trifunac, M.D.; Bulajić, B.Đ.; Manić, M.I. 2016a. *A preliminary empirical model for frequency-dependent attenuation of Fourier amplitude spectra in Serbia from the Vrancea earthquakes*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 83. 167–179.
- Lee, V.W.; Manić, M.I.; Bulajić, B.Đ.; Herak, D.; Herak, M.; Trifunac, M.D. 2015. *Microzonation of Banja Luka for performance-based earthquake-resistant design*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 78. 71–88.
- Lee, V.W.; Pomonis, A.; So, E.; Spence, R. 2011. *Existing Building Stock Classification in the Cambridge Earthquake Impact Database (CEQID)*. Report submitted in the context of the “Global Earthquake Consequences Database” Global Component, GEM Foundation, Pavia, Italy. <http://www.nexus.globalquakemodel.org/gem-building-taxonomy/files/taxonomy/references/buildingstock-taxonomy-whitepaper-final.pdf> (Pristupljeno 20. travnja, 2022.)
- Lee, V.W.; Trifunac, M.D. 2010. *Should average shear-wave velocity in the top 30m of soil be used to describe seismic amplification?* Soil Dynamics and Earthquake Engineering 30(11). 1250–1258. doi:10.1016/j.soildyn.2010.05.007
- Lee, V.W. 2002. *Empirical scaling of strong earthquake ground motion - part I: Attenuation and scaling of response spectra*. Washington Publication 87(81/ 2). 195-206. Washington.
- Lee, V.W. 1995. *Pseudo relative velocity spectra in former Yugoslavia*, European Earthquake Engineering 1. 12-22.
- Lee V.W.; Trifunac MD; Todorovska M.I.; Novikova, E.I. 1995. *Empirical equations describing attenuation of the peaks of strong ground motion, in terms of magnitude, distance, path effects and site conditions Los Angeles, California*. Report No CE 95-02. Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles.
- Lee, V.W.; Manić, M.I. 1994. *Empirical scaling of response spectra in former Yugoslavia*. Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering. Vienna. 4. 2567-2572.
- Lee, V.W.; Trifunac, M.D. 1993. *Empirical scaling of Fourier amplitude spectra in former Yugoslavia*. European Earthquake Engineering 7/2. 47-61.
- Lee, V.W. 1992. *On strong motion uniform risk functionals computed from general probability distributions of earthquake recurrences*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 11/ 6. 357-367.
- Lee, V.W.; Trifunac, M.D. 1992. *Frequency dependent attenuation of strong earthquake ground motion in Yugoslavia*. European Earthquake Engineering 6/1. 3-13.
- Lee, V.W. 1987. *Influence of local soil and geologic site conditions on pseudo relative velocity response spectrum amplitudes of recorded strong motion accelerations*. Report No. CE 87-05. Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles.
- Lee, V.W.; Trifunac, M.D. 1979. *On deformations near circular close to the canyon at points where the motion is underground tunnel subjected to incident plane SH-waves, small*. Journal of Engineering Mechanics ASCE.
- Lee, V.W. 1978. *Displacements near a three-dimensional hemispherical canyon subjected to incident plane waves*. Report No. CE 78-16. Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles.
- Magaš, D. 1996. *Croatian islands - main geographical and geopolitical characteristics*. Geoadria. 1. 5–16.

Magaš, N.; Mamužić, P.; Matičec, D.; Prtoljan, B.; Galović, I.; Sarkotić Šlat, M.; Glovacki Jernej, Ž.; Jagačić, T. 1987. *Osnovna geološka karta SFRJ – Osijek*. L3vols. 4–86. Hrvatski geološki institut, Zagreb; Geološki zavod Srbije, Beograd. L34–86.

Mahin, S.A.; Lin, L. 1983. *Construction of inelastic response spectra for Single-degree-of-freedom systems - Computer program and applications*. A report on research sponsored by the National Science Foundation. Report No. UCB/EERC-83/17; Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California Berkeley.

Manić, M.; Bulajić, B.Đ. 2006. *Ocena seizmičkog hazarda za širu teritoriju grada Beograda na deterministički i probabilistički način*. Izgradnja, Časopis Saveza građevinskih inženjera i tehničara Srbije, Saveza arhitekata Srbije, Društva za mehaniku tla i fundiranje Srbije, Udruženja urbanista Srbije, Beograd 60(11-12). 289 – 305.

Manić, M.I. 2003. *A contribution to the definition of empirical models for scaling Fourier amplitude spectra of strong ground acceleration with application to the territory of Balkan region*. Doktorski rad. IZIS – Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Skopje.

Manić, M.I. 2002b. *Empirical equations for scaling horizontal i.e. vertical PSV spectra developed on the basis of solely the ex-Yugoslav EQINFOS strong motion data (174 horizontal i.e. 77 vertical accelerograms)*. Personal archive of prof. Manić.

Manić, M.I. 2002a. *Empirical scaling of response spectra for the territory of north-western Balkan*. Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London.

Manić, M.I. 1998b. *Attenuation models for peak horizontal acceleration, velocity and displacement inferred from strong motion records obtained in northwestern Balkan*. Proceedings of the 26th Assembly of the European Seismological Commission, Tel Aviv. 191 – 195.

Manić, M.I. 1998a. *A new site dependent attenuation model for prediction of peak ground horizontal acceleration in Northwestern Balkan*. Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris.

Markušić, S.; Gülerce, Z.; Kuka, N.; Duni, L.; Ivančić, I.; Radovanović, S.; Glavatović, B.; Milutinović Z.; Akkar, S.; Kovačević, S.; Mihaljević, J.; Šalić, R. 2016. *An Updated and Unified Earthquake Catalogue for the Western Balkan Region*. Bulletin of Earthquake Engineering 14 (2). 321 – 343.

Markušić, S., 2008. *Seismicity of Croatia*. Poglavlje u knjizi: Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries. Springer, Dordrecht. Ur. Husebye E.S. NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences 81. doi: 10.1007/978-1-4020-6815-7_5.

Markušić, S.; Herak, M., 1999. *Seismic Zoning of Croatia*. Natural Hazards 18. 269 – 285.

Martinčić J.; Hackenberger D. 2006. *Osječka arhitektura : 1918. – 1945*. Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti, Zavod za znanstveni i umjetnički rad, Zagreb, Osijek.

Martínez-Cuevas, S.; Gaspar-Escribano, J. 2016. *Reassessment of intensity estimates from vulnerability and damage distributions: the 2011 Lorca earthquake*. Bulletin of Earthquake Engineering 14. 2679 – 2703.

- Marulanda, M.C.; Carreño, M.L.; Cardona, O.D.; Ordaz, M.G.; Barbat, A.H. 2013. *Probabilistic earthquake risk assessment using CAPRA: application to the city of Barcelona, Spain*. *Natural Hazards* 69(1). 59 – 84. doi:10.1007/s11069-013-0685-z
- Mc Guire, R.K. 2008. *Probabilistic seismic hazard analysis: Early history*. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 37, 329 – 338.
- Mc Guire, R.K. 2001. *Deterministic vs. probabilistic earthquake hazards and Risk Engineering*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 21/5. 377 – 384.
- Mc Guire, R.K. 1995. *Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop*. *Bulletin of the Seismological Society of America* 85(5). 1275–1284. doi:10.1016/0148-9062(96)83355-9
- Mc Guire, R.K. 1993. *Computations of seismic hazard*. In *Annals of Geophysics* 36(3 – 4). 181–200. doi:10.4401/ag-4263
- Mc Guire, R.K. 1976. *Fortran computer program for seismic risk analysis*. Technical Report 76-77, US Geological Survey Open File Report.
- Medvedev, S.W.; Sponheuer, W.; Karnik, V. 1965. *Seismic intensity scale version MSK 1964*. United Nation Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris.
- Medvedev J. 1962. *Engineering Seismology*. Academia Nauk Press. Moscow.
- Meslem, A.; Lang, D.H. 2017. *Physical Vulnerability in Earthquake Risk Assessment*. *Natural Hazard Science*. doi:10.1093/acrefore/9780199389407.013.71
- Midorikawa S. 1987. *Prediction of Isoleismal map in the Kanto Plain due to hypothetical Earthquake*. *Journal of Structural Engineering* 33b.
- Milutinović, Z.V. 2019. *Overview on systemic management of seismic risk in SFR Yugoslavia – experience and contribution of IZIS*. SERA Balkans Seismic Risk workshop, Belgrade.
- Milutinovic, Z.V.; Trendafiloski, G.S. 2003. *An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Applications to Different European Towns. WP4: Vulnerability of Current Buildings RISK-UE*. Contract: EVK4-CT-2000-00014WP4. http://www.civil.ist.utl.pt/~mlopes/conteudos/DamageStates/Risk%20UE%20WP04_Vulnerability. (Pristupljeno 3. siječnja 2023.).
- Miranda, E.; Brzev, S.; Bijelic, N.; Arbanas, Ž.; Bartolac, M.; Jagodnik, V.; Lazarević, D.; Mihalić Arbanas, S.; Zlatović, S.; Acosta, A.; Archbold, J.; Bantis, J.; Blagojevic, N.; Borozan, J.; Božulić, I.; Cruz, C.; Dávalos, H.; Fischer, E.; Gunay, S., ... Robertson, I. 2021. *Petrinja, Croatia December 29, 2020, Mw 6.4: Earthquake*. Joint Reconnaissance Report (JRR).
- Miranda, E. 1999. Approximate seismic lateral deformation demands in multistory buildings. *Journal of Structural Engineering*, 125(4), pp. 417 – 425.
- Molina, S.; Lang, D.H.; Lindholm, C.D. 2010. *SELENA – An open-source tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure*. *Computers and Geosciences* 36. 257 – 269. doi: 10.1016/j.cageo.2009.07.006
- MunichRe . 2012. *Topics Geo: Natural catastrophes 2011 Analyses, assessments, positions*. Munich.

- Muntasir Billah, A.H.M.; Shahria Alam, M. 2015. *Seismic fragility assessment of highway bridges: a state-of-the-art review*. Structure and Infrastructure Engineering 11(6). 804–832. doi:10.1080/15732479.2014.912243
- Musson, R.M.W. 2000. *The use of Monte Carlo simulations for seismic hazard assessment in the U.K.* Annali di Geofisica.
- Nadimpalli, K.; Cornish, L.; Kazemi, S. 2002. *National Exposure Information System (NEXIS)*. Geoscience Australia. http://www.ga.gov.au/image_cache/GA10003.pdf (Pristupljeno 25. travnja 2022.).
- Nastev, M. 2014. *Adapting Hazus for seismic risk assessment in Canada*. Canadian Geotechnical Journal 51(2). 217–222. doi:10.1139/cgj-2013-0080
- Nau, J.M.; Hall, W.J. 1984. *Scaling Methods for Earthquake Response Spectra*. Journal of Structural Engineering 110. 1533 – 1548.
- NERA (Network of European Research Infrastructures for Earthquake Risk Assessment and Mitigation). *Report D7.2 State of the Knowledge of Building Inventory Data in Europe*. https://www.orfeus-eu.org/other/projects/nera/NERA_D7.2.pdf2014. (Pristupljeno 5. studenog 2020.).
- NESS (A Research Agenda for the Network for Earthquake Engineering Simulation). 2004. *Achieving the Grand Challenge: A Research Plan for NEES*. Poglavlje u knjizi: Preventing Earthquake Disasters: The Grand Challenge in Earthquake Engineering. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington. The National Academies Press.
- NN (Narodne novine) 47/16. Pravilnik o smjernicama za izradu procjena rizika od katastrofa i velikih nesreća za područje Republike Hrvatske i jedinica lokalne i područne (regionalne) samouprave. http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_12_153_3221.html (Pristupljeno 22. travnja, 2021.)
- NN (Narodne novine) 153/13 i 20/17) (3221). *Zakon o gradnji*. http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_12_153_3221.html (Pristupljeno 2. ožujka, 2022.)
- NN (Narodne novine) 153/13) (3220). *Zakon o prostornom uređenju*. http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_12_153_3220.html (Prostupljeno 2. ožujka, 2022.)
- Neteler, M.; Mitasova, H. 2008. *Open source GIS – A GRASS GIS Approach*. Springer, New York.
- Newmark, N.M.; Hall, W.J., 1982. *Earthquake spectra and design*. Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California.
- Newmark, N.M.; Hall, W.J. 1969. *Seismic design criteria for nuclear reactor facilities*. Proceedings of the 4th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago. 37 – 50.
- Nikolić, Ž.; Benvenuti, E.; Runjić, L. 2022. *Seismic Risk Assessment of Urban Areas by a Hybrid Empirical-Analytical Procedure Based on Peak Ground Acceleration*. Applied Sciences 12. 3585.
- Nikolić, Ž.; Runjić, L.; Ostojčić Škomrlj, N.; Benvenuti, E. 2021. *Seismic Vulnerability Assessment of Historical Masonry Buildings in Croatian Coastal Area*. Applied Sciences 11. 5997.
- Nola, I. A.; Doko Jelinić, J.; Žuškin, E.; Kratochvil, M. 2013. *Potresi - Povijesni pregled, okolišni i zdravstveni učinci i mjere zdravstvene skrbi*. Arhiv Za Higijenu Rada i Toksikologiju 64(2). 327 – 337. doi:10.2478/10004-1254-64-2013-2304

- Novikova, E.I.; Trifunac, M.D. 1995. *Frequency dependent duration of strong earth-quake ground motion: updated empirical equations*. Department of Civil Engineering. Report No. CE 95-01. Los Angeles, California: Univ. Southern California.
- Nujić, P. 2014. *Izgradnja osječke vojne utvrde – Tvrđe*. Hrcak.srce.hr/file/271857.
- Oliveira, C.S.; Roca, A.; Goula, X. 2006. *Assessing and Managing Earthquake Risk: Geo-scientific and Engineering Knowledge for Earthquake Risk Mitigation: developments, tools, techniques*. Springer. Netherlands. doi: 10.1007/978-1-4020-3608-8_1.
- Omarzadeh, D.; Karimzadeh, S.; Matsuoka, M.; Feizizadeh, B. 2021. *Earthquake Aftermath from Very High-Resolution WorldView-2 Image and Semi-Automated Object-Based Image Analysis (Case Study: Kermanshah, Sarpol-e Zahab, Iran)*. Remote Sensing 13, 4272. doi:10.3390/rs13214272
- OpenQuake (The OpenQuake platform). GEM. *GED baza podataka (2015)*. <https://platform.openquake.org/> (Pristupljeno 27. svibanj 2022.).
- Orense, R.P. 2005. *Assessment of liquefaction potential based on peak ground motion parameters*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25(3). 225 – 240. doi:10.1016/j.soildyn.2004.10.013
- Pagani, M.; Garcia-Pelaez, J.; Gee, R.; Johnson, K.; Poggi, V.; Styron, R.; Weatherill, G.; Simionato, M.; Viganò, D.; Danciu, L. 2018. *Global Earthquake Model (GEM) Seismic Hazard Map (Version 2018.1)*. GEM Foundation: Pavia. doi:10.13117/GEM-GLOBAL-SEISMIC-HAZARD-MAP-2018.1
- Page, R.A.; Joyner, W.B.; Blume, J.A. 1975. *Earthquake Shaking and Damage to Buildings: Recent evidence for severe ground shaking raises questions about the earthquake resistance of structures*. Science 189(4203). 601–608. doi:10.1126/science.189.4203.601
- Pailoplee, S.; Sugiyama, Y.; Charusiri, P. 2009. *Deterministic and probabilistic seismic hazard analyses in Thailand and adjacent areas using active fault data*. Earth Planets Space 61. 1313–1325. doi:10.1186/BF03352984
- Panoutsopoulou, M.; Ioannides, K. 1998. *An overview of postearthquake building inspection practices in Greece and the introduction of a rapid building usability evaluation procedure after the 1996. Konitsa earthquake*. Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering. Rotterdam.
- Pavić, G.; Hadzima-Nyarko, M.; Bulajić, B.Đ. 2020b. *A Contribution to a UHS-Based Seismic Risk Assessment in Croatia—A Case Study for the City of Osijek*. Sustainability 12/ 5. 1796. doi:10.3390/su12051796
- Pavić, G.; Hadzima-Nyarko, M.; Bulajić, B. Đ.; Jurković, Ž. 2020a. *Development of Seismic Vulnerability and Exposure Models—A Case Study of Croatia*. Sustainability 12/3. 973. doi:10.3390/su12030973
- Pavić, G.; Hadzima-Nyarko, M.; Bulajić, B.Đ. 2019b. *The Vulnerability of Buildings From the Osijek Database*. Frontiers in Built Environment 5. doi.org/10.3389/fbuil.2019.00066
- Pavić, G.; Hadzima-Nyarko, M.; Plaščak, I.; Pavić, S. 2019a. *Seismic Vulnerability Assessment of Historical Unreinforced Masonry Buildings in Osijek using Capacity Spectrum Method*. Acta Physica Polonica A 135. 1138–1141.
- Pearson, L.; Pelling, M. 2015. *The UN Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030: Negotiation Process and Prospects for Science and Practice*. Journal of Extreme Events 02(01). 1571001. doi:10.1142/s2345737615710013

- Peduzzi, P.; Dao, H.; Herold, C.; Mouton, F. 2009. *Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the Disaster Risk Index*. Natural Hazards and the Earth System Science 9. 1149 – 1159.
- Peng, Y.; Wang, Z.; Woolery, E.W.; Lyu, Y.; Carpenter, N.S.; Fang, Y.; Huang, S. 2020. *Ground-motion site effect in the Beijing metropolitan area*. Engineering Geology 266. 105395. doi:10.1016/j.enggeo.2019.105395
- Penelis, G.; Venkov, Z.; Zambas, C.; Csak, B.; Popp, T.; Kuban, D.; Aničić, D. 1984. *Repair and Strengthening of Historical Monuments and Buildings in Urban Nuclei*. UNDP/UNIDO Project RER/79/015. 6. 1 – 297.
- Penelis, G.G.; Sarigiannis, D.; Stavrakakis, E.; Stylianidis, K.C. 1989. *A statistical evaluation of damage to buildings in the Thessaloniki, Greece, earthquake of June, 20, 1978*. Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo- Kyoto. VII. 187 – 192.
- Pinho, R.; Crowley, H.; Bommer, J.J. 2008. *Open-source software and treatment of epistemic uncertainties in earthquake loss modelling*. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China.
- Pikija, M.; Šikić, K. 1991. *Osnovna geološka karta 1:100.000*. Fond stručna dokumentacija. IGI, Zagreb. List Mohač.
- Pikija, M.; Šikić, K.; Trifunović, S. 1991. *Osnovna geološka karta 1:100 000, List Mohač*. Hrvatski geološki institut Zagreb L 34 – 74.
- Pitilakis, K.; Franchin, P.; Khazai, B.; Wenzel, H. 2016. *SYNERG: Systemic Seismic Vulnerability and Risk Assessment of Complex Urban, Utility, Lifeline Systems and Critical Facilities: Methodology and Applications*. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering 31. Springer.
- Pitilakis, K.; Crowley, H.; Kaynia, A.M. 2014. *SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk: Buildings, Lifelines, Transportation Networks and Critical Facilities*. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering 27. Springer. doi: 10.1007/978-94-007-7872-6
- Pitilakis, K.; Argyroudis, S.; Kakderi K.; Argyroudi, A. 2013. *Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain*. Report SYNER-G Synthetic Document <https://www.unisdr.org › platform › assets › pdf> (Pristupljeno 19. prosinca 2021.).
- Pittore, M.; Haas, M.; Silva, V. 2020b. *Multi-resolution probabilistic modelling of residential exposure and vulnerability for seismic risk applications*. Earthquake Spectra 36. 1-24. doi:10.1177/8755293020951582
- Pittore, M.; Haas, M.; Silva, V. 2020a. *Variable resolution probabilistic modeling of residential exposure and vulnerability for risk applications*. Earthquake Spectra. 36. 321 – 344. doi:10.1177/8755293020951582
- Pittore, M.; Haas, M.; Megalooikonomou, K.G. 2018. *Risk-Oriented, Bottom-Up Modeling of Building Portfolios With Faceted Taxonomies*. Frontiers in Built Environment 4. doi:10.3389/fbuil.2018.00041
- Ploeger, S.K.; Sawada M.; Elsabbagh A.; Saatcioglu M.; Nastev M.; Rosetti, E. 2016. *Urban RAT: new tool for virtual and site-specific mobile rapid data collection for seismic risk assessment*. Journal of Computing in Civil Engineering 30(2). 04015006.
- Porter, K. 2015. *A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk*. Encyclopedia of Earthquake Engineering 1–29. doi:10.1007/978-3-642-36197-5_256-1

Porter, K.A. 2003. *Seismic Vulnerability*. Poglavlje u knjizi: *Earthquake Engineering Handbook*. Ur. Chen, W.F.; Scawthorn, C. Boca Raton FL: CRC Press LLC.

Preciado, A.; Ramirez-Gaytan, A.; Carlos Santos, J.; Rodriguez, O. 2020. *Seismic vulnerability assessment and reduction at a territorial scale on masonry and adobe housing by rapid vulnerability indicators: The case of Tlajomulco, Mexico*. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 44. 101425.

Prelogović, E.; Cvijanović, D. 1981. *Potres u Medvednici 1880. godine*. *Geološki vjesnik* 34. 137 – 146.

Rashed, T.; Weeks, J. 2003. *Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas*. *International Journal of Geographical Information Science* 17(6). 547 – 576. doi:10.1080/1365881031000114071

Reid, H.F. 1910. *The California earthquake of April 18, 1906*. *Mechanics of the earthquake 2*. Report of the State Earthquake Investigation Commission, Carnegie Institute.

Republika Hrvatska, Državna geodetska uprava. *Digitalni ortofoto 2019/20 – WMTS*. <https://registri.nipp.hr/izvori/view.php?id=987> (Pristupljeno 16. srpnja 2022.).

Richter, C.F. 1958. *Elementary Seismology*. Ur. Freeman, W.F. Company, San Francisco, and Bailey Bross and Swinfen Ltd. London. Publication Date 2015.

Riddell, R. 2007. *On Ground Motion Intensity Indices*. *Earthquake Spectra* 23. 147 – 173.

RISK-UE (European Project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns). 2003. *HAZUS-MH Technical Manual. WP4: Vulnerability of current buildings*. Federal Emergency Management Agency. Washington.

Ródenas, J.; García-Ayllón, S.; Tomás, A. 2018. *Estimation of the Buildings Seismic Vulnerability: A Methodological Proposal for Planning Ante-Earthquake Scenarios in Urban Areas*. *Applied Sciences* 8(7). 1208. doi:10.3390/app8071208

Rojahn, C.; Sharpe, R.L.; Scholl, R.E.; Kiremidjian, A.S.; Nutt, R.V. 1985. *Earthquake damage evaluation data for California*. Applied Technology Council, Redwood City, California.

Rossetto T.; D'Ayala D.; Ioannou I.; Meslem A. 2013. *Evaluation of Existing Fragility Curves*. Poglavlje u knjizi: *SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk*. Ur. Ptilakis, K.; Crowley, H.; Kaynia, A. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering* 27. Springer, Dordrecht. doi:10.1007/978-94-007-7872-6_3

Rossetto, T.; Ioannou, I.; Grant, D.N. 2015. *Existing Empirical Fragility and Vulnerability Functions: Compendium and Guide for Selection*. GEM Technical Report 2015-1. Pavia.

Rossetto, T.; Ioannou, I.; Grant, D.N.; Maqsood, T. 2014. *Guidelines for Empirical Vulnerability Assessment*. GEM Technical Report 2014-11. Pavia.

Rossetto T.; Ioannou I.; Grant D.N. 2013. *Existing empirical fragility and vulnerability relationships: Compendium and guide for selection*. GEM Technical Report 2013. Pavia.

Rossetto, T.; Elnashai, A. 2005. *A New Analytical Procedure for the Derivation of Displacement-Based Vulnerability Curves for Populations of RC Structures*. *Engineering Structures* 7/3. 397 – 409.

- Sabetta, F.; Pugliese, A. 1987. *Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italian strong-motion records*. Bulletin of the Seismological Society of America 77. 1491-1513.
- Sabetta, F.; Goretti, A.; Lucantoni, A. 1998. *Empirical Fragility Curves from Damage Surveys and Estimated Strong Ground Motion*. Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering. Paris.
- Sabetta, F.; Pugliese A. 1996. *Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions*. Bulletin of the Seismological Society of America 86/2. 337 – 1513.
- Sabetta, F.; Pugliese, A. 1987. *Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italian strong motion records*. Bulletin of the Seismological Society of America 77/5. 1491-1513.
- Saito, K.; Spence R.; Going, C.; Markus, M. 2004. *Using high-resolution satellite images for post-earthquake SERA* (Seismology and Earthquake Engineering Research Infrastructure Alliance for Europe).
- Sandi, H. 1998. *A format for vulnerability analysis of damaged structures* Proceedings of the 11th European Conf. on Earthquake Engineering, Paris.
- Sandi, H.; Floricel, I. 1995. *Analysis of seismic risk affecting the existing building stock*. Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering. 3. 1105 – 1110.
- Sauter, F.; Shah, H. C. 1978. *Studies on earthquake insurance*. Proceedings of the Central American Conference on Earthquake Engineering. V2. San Salvador.
- Schmidt, J.; Matcham, J.; Reese, S.; King, A.; Bell, R.; Smart, G.; Cousins, J.; Warwick, S.; Heron, D. 2011. *Quantitative multi-risk analysis for natural hazards: a framework for multi-risk modelling*. Natural Hazards 3. 158. doi:10.1007/s11069-011-9721-z
- Seed, H.B.; Murarka, R.; Lysmer, J.; Idriss, I.M. 1976b. *Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source, and local site conditions for moderately strong earthquakes*. Bulletin of the Seismological Society of America 66/4. 1323 – 1342.
- Seed, H.B.; Ugas, C.; Lysmer, J. 1976a. *Site-dependent spectra for earthquake-resistant design*. Bulletin of the Seismological Society of America 66/1. 221 – 243.
- Seed, H.B.; Ugas, C.; Lysmer, J., 1974. *Site-dependent spectra for earthquake-resistant design*. Report No. EERC 74-12. Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.
- SERA (Seismology and Earthquake Engineering Research Infrastructure Alliance for Europe). *SERA integrates data, products, infrastructures and know-how in seismology and earthquake engineering*. <http://www.sera-eu.org/en/home/> (Pristupljeno 15. listopada 2021.).
- Shakhramanian, M.A.; Larionov, V.I.; Nigmatov, G.M.; Sutschev, S.P. 2000. *Assessment of the seismic risk and forecasting consequences of earthquakes while solving problems on population rescue (Theory and Practice)*: Russian Civil Defense and Disaster Management Research Institute 180.
- Shome, N.; Cornell A. 1999. *Probabilistic Seismic Demand Analysis of Nonlinear Structures*. Report No.RMS-35, Department of Civil Engineering, Stanford University.

Silva, V.; Amo-Oduro, D.; Calderon, A.; Costa, C.; Dabbeek, J.; Despotaki, V.; Martins, L.; Pagani, M.; Rao, A.; Simionato, M. 2020. *Development of a global seismic risk model*. Earthquake Spectra 875529301989995. doi:10.1177/8755293019899953

Silva, V. 2019. *Uncertainty and correlation in seismic vulnerability functions of building classes*. Earthquake Spectra 013018EQS031M. doi:10.1193/013018eqs031m

Silva, V.; AmoOduro, D.; Calderon, A.; Dabbeek, J.; Despotaki, V.; Martins, L.; Rao, A.; Simionato, M.; Vigano, D.; Yepes, C. 2018. *Global Earthquake Model (GEM) Risk Map*. Global Earthquake Model Foundation: Pavia.

Silva, V.; Crowley, H.; Varum, H.; Pinho, R. 2014. *Evaluation of analytical methodologies used to derive vulnerability functions*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 43/2. 181 – 204.

Silva, V. 2013. *Development of open models and tools for seismic risk assessment: application to Portugal*. Doktorski rad. University of Aveiro, Portugal.

Simeonov, S.; Sotirov, P.; Tsoukantas, S.G.; Goschy, B.; Constantinescu, D.; Ozden, K.; Aničić, D. 1985. *Design and Construction of Prefabricated Reinforced Concrete Building Systems*. UNDP/ UNIDO Project RER/79/015 2. 1-335.

Singhal, A.; Kiremidjian, A.S. 1996. *A method for probabilistic evaluation of seismic structural damage*. Journal of Structural Engineering 122/12. 1459 – 1467.

Službeni glasnik Grada Osijeka. 18/2018. Republika Hrvatska - Osječko-baranjska županija - Grad Osijek-Gradonačelnik, Izvješće o stanju u prostoru Grada Osijeka (2013.-2017.)

Službeni list SFRJ 31/81, 49/82, 29/83, 20/88, 52/90. 1990. Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima

Službeni list SFRJ 29/83, 21/88, 52/90. 1990. Karte potresnog zoniranja.

Službeni list SFRJ 31/81, 49/82. 1982. Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju visokih zgrada u potresnim područjima

Službeni list SFRJ 39/64. 1964. Privremeni tehnički propis za građenje u potresnim područjima.

Spence, R.; Foulser-Piggott, R. ; Pomonis, A. ; Crowley, H. ; Masi, A. ; Chiauuzzi, L. ; Zuccaro, G. ; Cacace, F. ; Zulfikar, C. ; Markus, M.; Schaefer, D. ; Sousa, M.L. ; Kappos, A. 2012. *The European Building Stock Inventory: Creating and Validating a Uniform Database for Earthquake Risk Modelling*. Proceedings of the 15th World Conference of Earthquake Engineering, Lisbon, 2012.

Spence, R.J.S.; Bommer, J.; Del Re, D.; Bird, J.; Aydinoglu, N.; Tabuchi S. 2003. *Comparison Loss Estimation with Observed Damage: A study of the 1999 Kocaeli Earthquake in Turkey*. Bulletin of Earthquake Engineering 1. 83 – 113.

Spence, R.J.S.; Coburn, A.W.; Pomonis, A. 1992. *Correlation of ground motion with building damage: the definition of a new damage-based seismic intensity scale*. Proceedings of the 10th World Conference of Earthquake Engineering. Rotterdam.

Spence, R.J.S.; Coburn, A.W.; Sakai, S.; Pomonis, A. 1991. *A parameterless scale of seismic intensity for use in seismic risk analysis and vulnerability assessment*. Poglavlje u knjizi: *Earthquake Blast and Impact: Measurement and effects of vibration*. Ur. The Society for Earthquake and Civil Engineering Dynamics. Elsevier Applied Science. Amsterdam 19 – 28.

Sponheuer, W.; Karnik, V. 1964. *Neue seismische Skala*. Proceedings of the 7th Symposium of the ESC. Ur. W. Sponheuer. Veröffentlichungen des Instituts für Bodendynamik und Erdbebenforschung Jena 77. 69–76.

Stamati, O.; Klimis, N.; Lazaridis, T. 2016. *Evidence of complex site effects and soil nonlinearity numerically estimated by 2D vs1D seismic response analyses in the city of Xanthi*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 87. 101 – 115.

Steinbrugge, K.V. 1982. *Earthquakes, Volcanoes, and Tsunamis: An anatomy of hazards*. Skandia America Group.

Stone, H. 2017. *Exposure and vulnerability for seismic risk evaluations*. Doktorski rad. Department of Civil, Environmental, and Geomatic Engineering, University College London.

Stucchi, M.; Rovida, A.; Gomez Capera, A.A.; Alexandre, P.; Camelbeeck, T.; Demircioglu, M.B.; Gasperini, P.; Kouskouna, V.; Musson, R.M.W.; Radulian, M.; Sesetyan, K.; Vilanova, S.; Baumont, D.; Bungum, H.; Fäh, D.; Lenhardt, W.; Makropoulos, K.; Martinez Solares, J.M.; Scotti, O.; Živčić, M.; Albini, P.; Batllo, J.; Papaioannou, C.; Tatevossian, R.; Locati, M.; Meletti, C.; Viganò, D.; Giardini, D. 2013. *The SHARE European Earthquake Catalogue (SHEEC) 1000–1899*. *Journal of Seismology* 17 (2). 523 – 544.

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*, 39. doi: 10.1029/2019TC005872

Suyehiro, K. 1926. *A seismic vibration analyzer and the records obtained therewith*. *Bulletin of Earthquake Research Institute, Tokyo University* 1. 59 – 64.

Šavor Novak, M.; Atalić, J.; Uroš, M.; Prevolnik, S.; Nastev, M. 2019. *Seismic risk reduction in Croatia: mitigating the challenges and grasping the opportunities*. Poglavlje u knjizi: *Future Trends in Civil Engineering*. Ur. Mandić Ivanković, A.; Lakušić, S. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering. 71-109. doi:10.5592/CO/FTCE.2019.04

Šavor Novak, M.; Atalić, J.; Damjanović, D.; Uroš, M.; Krolo, J.; Sigmund, Z.; Koščak, J.; Korlaet, L.; Bartolac, M.; Duvnjak, I.; Hak, S. 2018. *Studija za saniranje posljedica potresa u Gradu Zagrebu*. Zbornik VII. Konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa . Ur. Državna uprava za zaštitu i spašavanje Zagreb.

TABULA (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment). Project Co-Funded by the Intelligent Energy Europe Programme of the EU (2009 – 2012, Predecessor of EPISCOPE). <http://episcopes.eu/building-typology/> (Pristupljeno 23. prosinca 2021.).

Takizawa, H.; Jennings, P.C. 1980. *Collapse of a model for ductile reinforced concrete frames under extreme earthquake motions*. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 8. 117 – 144.

Taubenböck H.; Esch T.; Roth, A. 2006. *An urban classification approach based on an object-oriented analysis of high resolution satellite imagery for a spatial structuring within urban areas*. Proceedings of the 1st EARSeL workshop of the SIG urban remote sensing, Berlin.

TC4-ISSMFE (1993; revised 1999) *Manual for Zonation on seismic Geotechnical Hazards*. Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.

Tocchi, G.; Polese, M.; Di Ludovico, M. 2021. *Regional based exposure models to account for local building typologies*. Bulletin of Earthquake Engineering. doi:10.1007/s10518-021-01242-6

Todorovska, M.I.; Trifunac, M.D. 2008. *Earthquake damage detection in the Imperial County Services Building III: Analysis of wave travel times via impulse response functions*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 28(5). 387–404. doi:10.1016/j.soildyn.2007.07.001

Todorovska, M.I.; Trifunac, M.D. 2008. *Origin of the response spectrum method*. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing.

Todorovska, M.I.; Gupta, V.; Lee, V.; Trifunac, M. 1995. *Selected topics in probabilistic seismic hazard analysis*. Report No. 95 – 08. Department of Civil Engineering, University of Southern California. Los Angeles.

Tomás, A.; Ródenas, J.L.; García-Ayllón, S. 2017. *Proposal for new values of behaviour modifiers for seismic vulnerability evaluation of reinforced concrete buildings applied to Lorca (Spain) using damage data from the 2011 earthquake*. Bulletin of Earthquake Engineering. doi:10.1007/s10518-017-0100-3

Torres, Y.; Arranz, J.J.; Martínez-Cuevas, S.; Gaspar-Escribano, J.M.; Benito, B.; Staller, A.; Gómez, I. 2019. *The New Methods for Rapid Exposure and Seismic Vulnerability Assessment. How Do They Adapt to Different Scenarios?*. Proceedings 19(1), 14. doi:10.3390/proceedings2019019014

Trifunac, M.D. 2016. *Site conditions and earthquake ground motion – A review*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 90. 88–100. doi: 10.1016/j.soildyn.2016.08.003

Trifunac, M.D. 2013. *Scaling response spectra by peak ground acceleration violates the performance-based design objectives*. UDK: 699.841 . 624.042.7 . 550.34.

Trifunac, M.D. 2012. *Earthquake response spectra for performance based design - A critical review*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 37. 73-83.

Trifunac M.D. 2011. *Maurice Anthony Biot: A pioneer of earthquake engineering*. Ingegneria sismica 1. 7-25.

Trifunac, M.D. 2009c. *Response spectrum: past, present and future*. Poglavlje u knjizi: Selected topics in earthquake engineering—from earthquake source to seismic design and hazard mitigation. ZIBL. Banja Luka. 103–146.

Trifunac, M.D. 2009b. *75th anniversary of strong motion observation—A historical review*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 29 . 591– 606.

Trifunac, M.D. 2009a. *The Nature of Site Response During Earthquakes*. Poglavlje u knjizi: Coupled Site and Soil-Structure Interaction Effects with Application to Seismic Risk Mitigation. 3-31. Springer. doi: 10.1007/978-90-481-2697-2_1

Trifunac, M. D. 2008. *Early history of the response spectrum method*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 28(9). 676–685. doi:10.1016/j.soildyn.2007.10.014

Trifunac, M. D. 2006. *Brief history of computation of earthquake response spectra*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 26(6-7). 501–508. doi:10.1016/j.soildyn.2006.01.005

- Trifunac, M.D. 2003. *70-th anniversary of Biot spectrum*. 23-rd annual ISET lecture. Indian Society of Earthquake Technology 40(1). 19–50.
- Trifunac, M. D. 1995. *Empirical criteria for liquefaction in sands via standard penetration tests and seismic wave energy*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 14(6). 419-426.
- Trifunac, M.D.; Todorovska, M.I. 2000. *Long period microtremors, microseisms and earthquake damage: Northridge, CA, earthquake of 17 January 1994*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19 (4). 253-267.
- Trifunac, M.D.; Lee, V.W.; Živčić, M.; Manić M.I. 1991. *On the correlation of Mercalli-Cancani-Sieberg intensity scale in Yugoslavia with the peaks of recorded strong earthquake ground motion*. European Earthquake Engineering 5/1. 27-33.
- Trifunac, M.D. 1999. *How to model amplification of strong earthquake motions by local soil and geologic site conditions*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 19/6. 833-846.
- Trifunac, M.D. 1987. *Influence of local soil and geologic site conditions on Fourier spectrum amplitudes of recorded strong motion accelerations*. Report No. CE 87-04. Department of Civil Engineering, University of Southern California. Los Angeles.
- Trifunac, M.D. 1980. *Effects of site geology on amplitudes of strong motion*. Proceedings of the 7th world conference of Earthquake Engineering Istanbul.
- Trifunac, M.D.; Lee, V.W. 1979. *Dependence of the pseudo relative velocity spectra of strong motion acceleration on the depth of sedimentary deposits*. Report No. 79-02. Department of Civil Engineering, University of Southern California. Los Angeles.
- Trifunac, M.D. 1979. *Preliminary empirical model for scaling Fourier amplitude spectra of strong motion acceleration in terms of modified Mercalli intensity and geologic site conditions*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 7. 63-74.
- Trifunac, M.D.; Anderson, J.G. 1978b. *Preliminary models for scaling relative velocity spectra*. Report No. 78-05. Department of Civil Engineering, University of Southern California. Los Angeles.
- Trifunac, M.D.; and J. G. Anderson, 'Preliminary empirical models for scaling pseudo relative velocity spectra', Report No. 78-04, Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles, CA, 1978 a.
- Trifunac, M.D., 'Response spectra of earthquake ground motion', J. eng. mech. div. ASCE 104, 1081-1097 (1978).
- Trifunac, M.D.; Lee, V.W. 1978. *Dependence of the Fourier amplitude spectra of strong motion acceleration on the depth of sedimentary deposits*. Report No. 78-14. Department of Civil Engineering, University of Southern California. Los Angeles.
- Trifunac, M.D.; Anderson, J.G. 1977. *Preliminary empirical models for scaling absolute acceleration spectra*. Report No. 77-03. Department of Civil Engineering, University of Southern California. Los Angeles.
- Trifunac, M.D.; Brady, A.G. 1976b. *On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion*. Bulletin of the Seismological Society of America 66.139-162.

- Trifunac, M.D.; Brady, A.G. 1976a. *Correlations of peak acceleration, velocity and displacement with earthquake magnitude, distance and site conditions*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 4(5). 455–471. doi:10.1002/eqe.4290040504
- Trifunac, M.D. 1976. *Preliminary analysis of the peak of strong earthquake ground motion—dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions*. Bulletin of the Seismological Society of America 66. 189–219.
- Trifunac, M.D.; Brady, A.G. 1975b. *On the correlations of peak acceleration of strong motion with earthquake magnitude, epicentral distance and site conditions*. Proceedings of the U.S. National Conference on Earthquake Engineering 43–52. Ann Arbor, MI: University of Michigan.
- Trifunac, M.D.; Brady, A.G. 1975a. *On the Correlation of Seismic Intensity Scales with the Peaks of Recorded Strong Ground Motion*. Bulletin of the Seismological Society of America. 65/ 1. 139–162.
- Tyagunov, S.; Stempniewski, L.; Grunthal, G.; Wahlstrom, R.; Zschau, J. 2004. *Vulnerability and risk assessment for earthquake-prone cities*. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver.
- U.S. Army. 1986. *Seismic Design Guidelines for Essential Buildings*. Departments of the Army (TM 5-809-10-1), Navy (NAVFAC P355.1), and the Air Force (AFM 88-3, Chapter 13, Section A), Washington.
- UN. 2005. *List of countries that conducted population and housing census (1985 – 2004)*. United Nations, New York.
- UN. 1993. *Housing in the World- Graphical presentation of statistical data*. United Nations, New York.
- UNESCO. 1974. *Catalogue of Earthquakes. Part I, 1901 – 1970. Part II, prior to 1901*. UNDP/UNESCO Survey of the Seismicity of the Balkan Region. Ur. Schebalin, N.V.; Karnik, V.; Hadžievski, D.; UNESCO, Skopje.
- UNDRO. 1979. *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*. Report of Expert Group Meeting. Office of United Nations Disaster Relief Co-Ordinator (UNDRO). Geneve.
- UNDRR. 2015. *Proposed Updated Terminology on Disaster Risk Reduction*. A Technical Review; The United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). Geneve.
- UNDRR. 2015. *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 – 2030*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). Switzerland. http://www.unisdr.org/files/43291_sendaira_meworkfordrren.pdf. (Pristupljeno 20. listopada 2021.).
- UN-HABITAT. 2007. *Housing in the world - Demographic and Health Survey*. The State of the World's Cities Report 2006/2007.
- UNISDR. 2004. *Living With Risk*. United Nations International Strategy for Disaster Reduction. Geneve.
- UNISDR. 2009. *UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*. United Nations Office on Disaster Risk Reduction: Geneve.
- USGS. 2021. Earthquake catalogue for all earthquakes with $M_w \geq 3$ in the period between 1900 and April 2021 for the geographic region between 41.0° N and 47.0° N, and 12.5° E and 23.0° E, as reported by the United States Geological Survey. last accessed on. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>. (Pristupljeno 23. svibnja 2021.).

- Uva, G.; Sanjust, C.A.; Casolo, S.; Mezzina, M. 2017. *The ANTAEUS Project for the Regional Vulnerability Assessment of the Current Building Stock in Historical Centres*. International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration 11. 20 – 43.
- Vamvatsikos, D.; Cornell, A.C. 2002. *Incremental dynamic analysis*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 31(3). 491 – 514.
- Velić, I.; Vlahović, I. 2009. *Tumač geološke karte Republike Hrvatske 1:300.000*. Hrvatski geološki institut, Zagreb.
- Verros, S.A.; Wald, D.J.; Worden, C.B.; Hearne, M.; Ganesh, M. 2017. *Computing spatial correlation of ground motion intensities for ShakeMap*. Computers and Geosciences 99. 145 – 154.
- Verrucci, E.; Bevington, J.; Vicini, A. 2014. *Application of the GEM Inventory Data Capture Tools for Dynamic Vulnerability Assessment and Recovery Modelling*. In EGU General Assembly Conference Abstracts 16 of EGU General Assembly Conference Abstracts, 15707.
- Vicente, R.; Parodi, S.; Lagomarsino, S.; Varum, H.; Mendes Silva, J.A.R. 2011. *Seismic vulnerability and risk assessment: case study of the historic city centre of Coimbra, Portugal*. Bulletin of Earthquake Engineering 9(4). 1067 – 1096. doi:10.1007/s10518-010-9233-3
- Vlada Republike Hrvatske. 2012. *Potres u Hrvatskoj iz prosinca 2020. Brza procjena šteta i potreba*. Izvješće.
- Vrček, S. 2012. *Tipologija izgradnje i podjela zgrada prema razdoblju gradnje i energetskim potrebama*. Tehnički glasnik 6(1). 60 – 64. <https://hrcak.srce.hr/83968> (Pristupljeno 24. ožujak 2022.).
- Wald, D.J. 2010. *PAGER-Rapid Assessment of an Earthquakes Impact*. Poglavlje u knjizi: Encyclopedia of solid Earth Geophysics, Ur. Harsh, G. Springer 5. 243-245. doi: 10.1007/978-90-481-8702-7 183
- Wells, D.L.; Coppersmith, K.J. 1994. *New Empirical Relationships among Magnitude, Rapture Length, rapture Width, Rapture Area and Surface Displacement*. Bulletin of the Seismological Society of America 84/4. 974 – 1002.
- Whitman, R.V.; Anagnos, T.; Kircher, C. A.; Lagorio, H. J.; Lawson, R. S.; Schneider, P. 1997. *Development of a national earthquake loss estimation methodology*. Earthquake Spectra 13/ 4. 643 – 661. doi:10.1193/1.1585973
- Whitman, R.V.; Reed, J.; Hong, S.T. 1973. *Earthquake Damage Probability Matrices*. Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering 2. International Association for Earthquake Engineering, Rome.
- Wieland M.; Pittore M.; Parolai S.; Zschau J.; Moldobekov B.; Begaliev U.; 2012. *Estimating building inventory for rapid seismic vulnerability assessment: towards an integrated approach based on multi-source*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 36. 70-83.
- Wolf, J.P. 1985. *Dynamic soil-structure interaction*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Wood, H.O.; Neumann, F. 1931. *Modified Mercalli Intensity Scale of 1931*. Bulletin of the Seismological Society of America 21. 277–283.
- Wössner, J.; Laurentiu, D.; Giardini, D.; Crowley, H.; Cotton, F.; Grünthal, G.; Valensise, G.; Arvidsson, R.; Basili, R.; Demircioglu, M.B. 2015. *The 2013 European Seismic Hazard Model: Key components and results*. Bulletin of Earthquake Engineering 13. 3553 – 3596.

- Wu, Y.-M.; Hsiao, N.-C.; Teng, T.L. 2004. *Relationships between Strong Ground Motion Peak Values and Seismic Loss during the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake*. *Natural Hazards* 32. 357 – 373.
- Wyss M.; Tolis S.; Rosset P.; Pacchiani, F. 2012. *Approximate model for worldwide building stock in three size categories of settlements*. Final Report, WAPMERR, Geneva.
- Xia C.; Nie, G.; Fan, X.; Zhou, J.; Li, H.; Pang, X.; 2020. *Research on the rapid assessment of earthquake casualties based on the anti-lethal levels of buildings*. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 11/1.377 – 398. doi:10.1080/19475705.2019.1710581
- Yakut A.; Erberik, A.; İlki, A.; Akkar, S.; Sucuoglu, H. 2012. *Rapid Seismic Assessment Procedures for Turkish Building Stock*. SERIES Workshop. Middle East Technical University 2 İstanbul and Technical University İstanbul.
- Yakut, A. 2004. *Preliminary seismic performance assessment procedure for existing RC buildings*. *Engineering Structures* 26(10). 1447 – 1461. doi:10.1016/j.engstruct.2004.05.011
- Yepes-Estrada, C.; Silva, V.; Valcárcel, J.; Acevedo, A.B.; Tarque, N.; Hube, M.A.; ... María, H.S. 2017. *Modeling the Residential Building Inventory in South America for Seismic Risk Assessment*. *Earthquake Spectra* 33(1) 299 – 322. doi:10.1193/101915eqs155dp
- Yin, Z. 1995. *Content of Analysing Earthquake Losses in City and the Process of Countermeasures Decision-Making for Disaster Mitigation*. *Chinese Science Abstracts Series B* 3/14. 59.
- Yön, B.; Sayin, E.; Onat, O. 2017. *Earthquakes and Structural Damages*. Poglavlje u knjizi: *Earthquakes - Tectonics, Hazard and Risk Mitigation*. doi:10.5772/65425
- Yong, C.; Qi-Fu, C.; Ling, C. 2001. *Vulnerability Analysis in Earthquake Loss Estimate*. *Natural Hazards* 23. 349-364.
- Zafarani, H.; Jafarian, Y.; Eskandarinejad, A.; Lashgari, A.; Soghrat, M.R.; Sharafi, H.; Afraz-e Haji-Saraei, M. 2020. *Seismic hazard analysis and local site effect of the 2017 Mw 7.3 Sarpol-e Zahab, Iran, earthquake*. *Natural Hazards*. doi:10.1007/s11069-020-04054-0
- Zhai, Y.; Chen, S.; Ouyang, Q. 2019. *GIS-based seismic hazard prediction system for urban earthquake disaster prevention planning*. *Sustainability* 11(9). 1 – 12. doi:10.3390/su11092620
- Zhang, S.; Li, C.; Zhang, L.; Peng, M.; Zhan, L.; Xu, Q. 2019. *Quantification of human vulnerability to earthquake-induced landslides using Bayesian network*. *Engineering Geology*. 105436. doi:10.1016/j.enggeo.2019.105436
- Zhiqua, D.; Zhizhao, W.; Bo, L. 2021. *General Comparison of Seismic Design between the Chinese Code and the European code, WCHBE*. 2021. E3S Web of Conferences 276, 01031 doi:10.1051/e3sconf/202127601031
- Zhou, Xi-Y. 1965 *Effect of soil classification on structural damage during strong-motion earthquakes*. *Earthquake Engineering Research Report II*. Institute of Engineering Mechanics, Academia Sinica. Harbin. 27 – 43.
- Zhu, C.; Chávez-García, F.J.; Thambiratnam, D.; Gallage, C. 2018. *Quantifying the edge-induced seismic aggravation in shallow basins relative to the 1D SH modelling*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 115. 402–412. doi:10.1016/j.soildyn.2018.08.025.

Zhu, C.; Thambiratnam, D. 2016. *Interaction of geometry and mechanical property of trapezoidal sedimentary basins with incident SH waves*. Bulletin of Earthquake Engineering 14. 2977 – 3002.

Zhu, C.; Thambiratnam, D.; Zhang, J. 2016. *Response of sedimentary basin to obliquely incident SH waves*. Bulletin of Earthquake Engineering 14. 647 – 671.

CURRICULUM VITAE

Gordana Pavić, mag. ing. aedif. rođena je 23. srpnja 1965. u Osijeku. Srednju školu, CUO Braća Ribar, Osijek završila je 1984. te iste godine upisala građevinski studij šestog stupnja na Fakultetu građevinskih znanosti, Osijek. Nakon završenog studija posvećuje se poduzetničkoj karijeri koja traje do danas.

Na Građevinskom fakultetu Osijek 2012. upisala je diplomski studij, smjer Nosive konstrukcije te diplomirala 2014. s temom: Kontrola kvalitete kod izvođenja čelične konstrukcije, pod mentorstvom prof. dr. sc. Zlate Dolaček-Alduk.

Poslijediplomski, doktorski studij Građevinarstva upisala je 2016. na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek odabravši za promatrano područje potresni rizik. Znanstveno – istraživački rad u potresnom riziku započinje pod mentorstvom prof.dr.sc. Marijane Hadzima-Nyarko u području potresne oštećljivosti i izloženosti. Proširivanjem znanstvenih interesi na područje potresne opasnosti mentor joj postaje i izv.prof.dr.sc. Borko Bulajić. Značajan dio znanstveno-istraživačkih aktivnosti vezanih za doktorski rad odrađuje na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu (Srbija) te na Politecnico de Leiria, Leiria (Portugal) gdje ju kroz istraživanja usmjerava izv.prof.dr.sc. Hugo Rodrigues i njegov znanstveno - istraživački tim.

Tijekom poslijediplomskog studija sudjelovala je na EuroWeb+, ERASMUS+ te CEEPUS mobilnostima ukupnog trajanja više od dvije godine stekavši neprocjenjiva znanstvena, stručna, praktična znanja i iskustva te brojne znanstvene suradnike i prijatelje.

Nakon potresa u Zagrebu i Petrinji 2020, priključuje se Hrvatskom centru za potresno inženjerstvo te nekoliko mjeseci procjenjuje oštećenja zgrada nakon potresa.

ICT usavršavanje – Auto CAD, pohađa 2014. – 2015. te stječe zanimanje CAD specijalistica. Esrijev GIS trening završava 2016., a 2018. na Fakultetu za odgojno obrazovne znanosti završava Pedagoško-psihološku i didaktičko-metodičku izobrazbu te stječe pedagoške kompetencije.

Od 2016. do danas sudjeluje na: dva znanstveno-istraživačka projekta usko vezana za njezine istraživačke interese te na brojnim međunarodnim i domaćim znanstvenim konferencijama, skupovima, predavanjima i radionicama.

U koautorstvu je objavila: 10 znanstvenih radova u bazi Web of Science (9 radova u Current Contents Connect i 1 rad u Science Citation Index Expanded), 2 rada u SCOPUS bazi, 10 radova u zbornicima s međunarodnih znanstvenih skupovima te 3 rada u zbornicima s domaćih znanstvenih skupova.

Njezini znanstveno-istraživački interesi pripadaju polju građevinarstvo, modulu nosive konstrukcije.