

Primljen / Received: 15.11.2025.

Ispravljen / Corrected: 5.12.2025.

Prihvaćen / Accepted: 8.12.2025.

Dostupno online / Available online: 15.12.2025.

Prevrtanje nepridržanih zidova – prevladavajući mehanizam oštećenja starih zidanih zgrada

Autori:



¹Katarina Jajčević, univ. mag. ing. aedif.
katarina.jajcevic@grad.unizg.hr



²Izv.prof.dr.sc. Marija Demšić
marija.demsic@grad.unizg.hr



²Izv.prof.dr.sc. Marta Šavor Novak
marta.savor.novak@grad.unizg.hr



²Prof.dr.sc. Josip Atalić
josip.atalic@grad.unizg.hr



²Izv.prof.dr.sc. Mario Uroš
mario.uros@grad.unizg.hr
Autor za korespondenciju

¹ Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Hrvatski centar za potresno inženjerstvo

² Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za tehničku mehaniku

Prethodno priopćenje

[Katarina Jajčević, Marija Demšić, Marta Šavor Novak, Josip Atalić, Mario Uroš](#)

Prevrtanje nepridržanih zidova – prevladavajući mehanizam oštećenja starih zidanih zgrada

Tradicijske zidane zgrade, kao temeljno tkivo povijesnih jezgri hrvatskih gradova, predstavljaju kritičan čimbenik potresne oštjetljivosti. Osnovne mehanizme oštećenja takvog zida možemo podijeliti na mehanizme otkazivanja u ravnini i izvan ravnine. Mehanizmi izvan ravnine, koji su znatno doprinijeli šteti tijekom potresa 29. prosinca 2020. u Petrinji, do nove generacije norme HRN EN 1998 rijetko su bili fokus analiza mehaničke otpornosti i stabilnosti tradicijskih zidanih zgrada. Bitan cilj ovog rada jest pokazati da aktiviranje takvih mehanizama predstavlja izravnu prijetnju ljudskim životima te istaknuti važnost razvijanja stručnih vještina za prepoznavanje ranih pokazatelja njihovog formiranja i identificiranja konstrukcija kod kojih je njihova aktivacija moguća. Posebno je ovo važno za terenske preglede nakon potresa kako bi se pravovremeno uočila ugroženost nosivog sustava građevine, ali i kako bi se adekvatno provela pojačanja ovog tipa građevina u potresnim područjima. U radu je napravljena kategorizacija mehanizama otkazivanja izvan ravnine koji su se dogodili na području povijesne jezgre Petrinje. Kategorizacija se temelji na geometrijskim karakteristikama dokumentiranih mehanizama, njihovom položaju unutar zgrade i drugim relevantnim značajkama. Također je prikazana formulacija modela ponašanja zidova opterećenih izvan svoje ravnine, na temelju čega je prikazan i proračunski primjer u skladu sa smjernicama postojećih i nove generacije normi HRN EN 1998.

Ključne riječi:

zidane zgrade, povijesna jezgra, mehanizmi otkazivanja izvan ravnine, prevrtanje, potresna oštjetljivost

Research Paper

[Katarina Jajčević, Marija Demšić, Marta Šavor Novak, Josip Atalić, Mario Uroš](#)

Overturning of unreinforced masonry walls – predominant failure mechanism in historic masonry buildings

Masonry buildings, as the fundamental fabric of historic urban centers in Croatian cities, also represent the main source of damage during earthquakes. Analysis of the local failure mechanisms that caused this damage identifies in-plane and out-of-plane failure mechanisms. Out-of-plane mechanisms, besides significantly contributing to the damage caused by the December 29, 2020 earthquake in Petrinja, were rarely the focus of seismic performance of masonry buildings prior to the new generation of the HRN EN 1998 standard. The primary aim of this study is to demonstrate that the activation of such mechanisms poses a direct threat to human life and to emphasize the importance of developing skills for recognizing early signs of their formation and identifying structures prone to their activation. This is particularly relevant for field inspections following earthquakes, allowing timely assessment of the structural vulnerability of buildings and reducing risks to occupants and professionals. This study presents a categorization of out-of-plane failure mechanisms based on a methodology developed within this work for the historic core of Petrinja. The categorization is based on the geometric characteristics of documented mechanisms, their position within the building, and other relevant features, with the distribution of categories illustrated through pie charts and tables. Furthermore, a formulation of the out-of-plane wall behavior model is presented, first as a mathematical framework and then as a worked example in accordance with the guidelines of both the current and the new generation of the HRN EN 1998 standards.

Key words:

masonry buildings, historic urban centers, out-of-plane failure mechanisms, overturning, seismic vulnerability

1. Uvod

Zidane zgrade čine velik udio postojećeg fonda stambenih i javnih građevina u Hrvatskoj, a osobito se može naglasiti kako se radi o konstrukcijskom sustavu s dugom tradicijom te su stoga često većinski dio povijesnih jezgri gradova te ruralnih sredina. Problematično je što ova tipologija zgrada u velikom broju slučajeva zbog tradicionalnog načina gradnje često ne udovoljava suvremenim seizmičkim zahtjevima jer su zgrade obično izvedene bez odgovarajuće horizontalne i vertikalne povezanosti. Štoviše, razorne posljedice potresa magnitude M_w 6,4 koji je 29. prosinca 2020. pogodio područje Petrinje i Siska pokazale su kako je velikoj šteti tamošnjih zidanih zgrada bitno doprinio mehanizam otkazivanja zidova izvan ravnine (OIR) [1]. Ovaj oblik otkazivanja predstavlja jedan od najčešćih i najopasnijih oblika mehaničkog gubitka stabilnosti kod zidanih zgrada tijekom potresa. Unatoč brojnim istraživanjima, koja se temelje na eksperimentalnim studijama [2–5], analitičkim [6, 7] i numeričkim modelima [8–14], predviđanje aktivacije ovih mehanizama oštećenja i dalje je predmet istraživanja i rasprava zbog nelinearnih interakcija između zidova, horizontalnih konstrukcijskih elemenata (krovnja i međukatna konstrukcija) te utjecaja susjednih zgrada. S obzirom na to da su eksperimentalni modeli uglavnom vrlo ograničeni glede same geometrije mehanizma, a detaljni numerički modeli temeljeni na diskretnim elementima izrazito su računalno i vremenski zahtjevni, prepoznavanje mehanizama otkazivanja [15] na temelju opažanja iz prijašnjih potresa predstavlja jedno od temeljnih uporišta u razumijevanju seizmičkog odziva zidanih zgrada.

Kao osnova za istraživanje ovog tipa oštećenja zidanih zgrada korištena je fotografska dokumentacija iz baze Hrvatskog centra za potresno inženjerstvo za grad Petrinju [16, 17]. Baza oštećenja predstavlja vrijedan izvor podataka svih istraživanja ovog događaja i promatranog područja. U okviru ovog rada analizirani su mehanizmi OIR-a koji su uočeni na fotografijama i dokumentirani u obrascima pregleda, pri čemu je posebno razmatran njihov položaj unutar građevine, geometrijske karakteristike te prostorna orijentacija. Građevine promatranog područja dodatno su razvrstane prema potencijalu razvoja mehanizma otkazivanja izvan ravnine, što predstavlja ključan doprinos ovog istraživanja, jer naglašava identifikaciju rizika njihove aktivacije. Kao dodatni rezultat prikazane su neke sekundarne karakteristike fonda zgrada, uključujući broj zgrada oštećenih aktivacijom mehanizama otkazivanja izvan ravnine u susjednim zgradama, broj zgrada uklonjenih nakon potresa

te broj uklonjenih zgrada kod kojih je uočena realizacija ovog mehanizma oštećenja.

Uz kategorizaciju zgrada provedena je i detaljnija analiza lokalnih mehanizama OIR-a. Ta se analiza izvodi primjenom kinematičkog teorema za određivanje koeficijenta aktivacije i kapaciteta pomaka kinematičkog lanca u slučaju nelinearnog proračuna. Seizmičko opterećenje definira se ubrzanjem na etaži na kojoj dolazi do formiranja mehanizma, uzimajući u obzir utjecaj amplifikacije povezan s osnovnim periodom titranja zgrade. Kako bi se postupak dodatno pojasnio, u radu je obrađen i primjer analize lokalnog mehanizma OIR-a.

2. Pregled mehanizama OIR-a u Petrinji

2.1. Metodologija utvrđivanja mehanizama OIR-a

U okviru ovog istraživanja napravljena je analiza mehanizama OIR-a u užem centru grada Petrinje uzrokovanih serijom potresa u prosincu 2020. godine. Također, s obzirom na vrlo zastupljenu tipologiju zidanih zgrada na području, napravljena je i procjena potencijalne realizacije takvih mehanizama u slučaju drugih potresa za zatečeno stanje građevine, temeljena na nalazima brzih pregleda nakon potresa. Istraživanje je napravljeno s ciljem pregleda i kategorizacije mehanizama OIR-a u promatranim građevinama, uzimajući u obzir njihovu geometriju, smjer aktivacije, pojavu oštećenja na građevini uzrokovanu OIR mehanizmima susjednih građevina u nizu te potrebu za naknadnim uklanjanjem građevine zbog ovakve vrste oštećenja. Promatrano područje obuhvaća povijesne ulice grada Petrinje uključujući ulicu Matije Gupca prema jugozapadu do kućnog broja 105 a, ulicu Ljudevita Gaja do kućnog broja 57 te ulicu Artura Turkulina do kućnog broja 49 u smjeru sjeveroistoka. Nadalje, razmatrane su u cijelosti ulice Ivana



Slika 1. Plan Petrinje s okolicom koji je izradila grupa učenika vojne matematičke škole iz Petrinje 1821. godine [18]

Filipovića, Ivana Gundulića, Vladimira Nazora, Šetalište Josipa Jurja Strossmayera, Trg Stjepana Radića kao i Trg dr. Franje Tuđmana te ulica Stjepana Radića do kućnog broja 42, koja se proteţe na jugozapad. Ukupan fond zgrada unutar promatranog podruĉja obuhvaća 322 zgrade. Podruĉje je odabrano s obzirom na to da se proteţe istim ulicama uz koje je, prema najranijoj kartografskoj dokumentaciji kakvu prikazuje slika 1., poĉela izgradnja gradskog tkiva na podruĉju današnje Petrinje. Na slici 2. prikazana je skica karte na kojoj se nalaze zgrade za koje je rađena analiza.



Slika 2. Skica karte s oznaĉenim zgradama odabranim za analizu

Istraţivanje je provedeno na temelju prethodno spomenute fotografske dokumentacije oštećenih graĊevina iz baze Hrvatskog centra za potresno inţenjerstvo [17], prikupljene tijekom brzih pregleda nakon potresa u Petrinji, s ciljem prepoznavanja mehanizama OIR-a, identificiranja najuĉestalijih tipova mehanizama te pukotina koje upućuju na poĉetak njihovog formiranja odnosno aktivaciju.

Naime, tipologija zgrada koja je prvenstveno podloţna lokalnim mehanizmima OIR-a zgrade su izgraĊene od neomeĊenog ziĊa, ali riziku od ovakvog otkazivanja izloţeni su i nekonstrukcijski elementi – primjerice dimnjaci i parapetni zidovi, ispunsko ziĊe koje nije adekvatno sidreno u nosive stupove i grede te fasadne obloge od opeke, parapeti, krovni vijenci i atike [19]. S obzirom na to da se upravo inţenjerska procjena mogućih lokalnih mehanizama temelji na iskustvima prijašnjih potresa [9, 15], bitan cilj ovog istraţivanja jest potaknuti razvoj vještina prepoznavanja ranih znakova formiranja mehanizama OIR-a, kao i prepoznavanja konstrukcija kod kojih je moguća njihova aktivacija, osobito za inţenjere koji provode terenske preglede kako bi se pravodobno uoĉila ugroţenost nosivog sustava graĊevine.

Izazovi koji se javljaju prilikom brzih pregleda su, osim ĉimbenika brzine navedenog u nazivu koji zapravo ograniĉava broj prikupljenih podataka, i skriveni dijelovi nosive konstrukcije ispod obloga i fasada te nedostatak dokumentacije o svojstvima graĊevine. Kod nekolicine graĊevina ovaj je izazov prevladan korištenjem snimki dostupnih na Google Street Viewu iz

prethodnih godina [20], na kojima se vidi nosiva konstrukcija prije postavljanja fasade ili fotografijama iz baze snimljenima u potkrovlju zgrade, gdje su vidljivi neobloţeni zidovi konstrukcije. Jedna od zanimljivosti graĊevina na podruĉju Petrinje glede definiranja tipologije graĊevina prema nosivom sustavu jest ta što u znatnom broju sluĉajeva vrsta nosive konstrukcije nije jednaka po etaţama. Ćest je primjer da su prizemlje ili niţi katovi izvedeni kao neomeĊeno ziĊe, a u potkrovlju se pojavljuje omeĊeno ziĊe. Dio ovako neujednaĉenog konstrukcijskog sustava rezultat je poslijeratne obnove (sanacije samo oštećenih dijelova konstrukcije), ali i drugih naknadnih intervencija koje su se provodile selektivno, pri ĉemu se tek sporadiĉno vodila sustavna briga o konstrukciji na koju se obnova nadovezivala. Neujednaĉenost nosive konstrukcije predstavlja izazov pri odreĊivanju mogućnosti pojave promatranog tipa mehanizma s obzirom na to da na niţim etaţama, koje su ranjivije prema vrsti nosive konstrukcije za ovu vrstu mehanizama, pobuda ĉesto ima vrlo raznolik frekvencijski sastav, a zidovi su opterećeni teretom viših etaţa, koji u pravilu djeluje stabilizirajuće pri aktivaciji mehanizama OIR-a. Suprotno tome, u potkrovlju se iskustveno takav tip mehanizma najĉešće aktivira jer amplitude ubrzanja rastu s visinom konstrukcije, a odziv na višim etaţama obično je pod utjecajem prevladavajućeg prvog translacijskog oblika titranja zgrade. Ipak, njegova se aktivacija, s obzirom na to da se radi o omeĊenom ziĊu, ne oĉekuje. Iako rješavanje ovih nedoumica nije uvijek jednostavno, sve su zgrade u konaĉnici sistematizirane prema kriterijima koji su navedeni u nastavku, ĉime je omogućena potpuna i konzistentna kategorizacija promatranih zgrada. Zgrade za koje je odreĊeno da ne postoji znatan rizik od OIR-a zgrade su izvedene kao armiranobetonske konstrukcije i konstrukcije od omeĊenog ziĊa. Osim što je provedena raspodjela realiziranih oštećenja u kategorije prema aktivaciji mehanizama OIR-a, preostalo je razvrstati mehanizme koji su se aktivirali, kao i one koji su se formirali bez potpune aktivacije, s obzirom na njihov oblik i poloţaj na konstrukciji. Prema tome, mehanizmi su razvrstani u sljedeće skupine: *mehanizam zabatnog ziĊa* (slika 3.), *mehanizam ziĊa proĉelja* (slika 4.) te *mehanizam nepravilne geometrije ili netipičnog poloţaja* (slika 5.). Dodatnu kategoriju ĉine zgrade kod kojih je došlo do OIR-a, ali je stupanj urušavanja takav da karakteristike mehanizama nije moguće pouzdano utvrditi – ovdje se radi o zgradama koje imaju stupanj oštećenja IV [21], a koji je ukljuĉivao i formiranje mehanizmima OIR-a, slika 6. Za zgrade kod kojih je došlo do više vrsta OIR-a kao relevantan odabran je mehanizam najvećih razmjera i oštećenja.



Slika 3. Mehanizam zabatnog ziĊa [17]



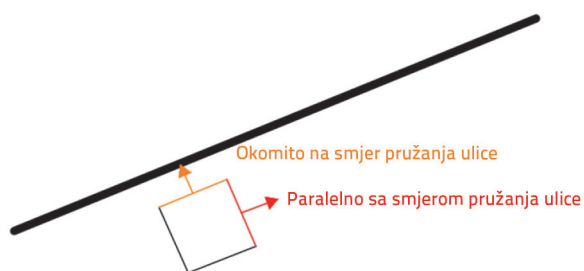
Slika 4. Mehanizam zida pročelja [17]



Slika 5. Mehanizam složene geometrije ili netipičnog položaja [17]



Slika 6. Stupanj oštećenja IV (DS IV) s mehanizmima OIR-a [17]



Slika 7. Smjerovi otkazivanja mehanizama OIR-a

Sljedeća klasifikacija mehanizama temelji se na smjeru njihove aktivacije, bilo ostvarene ili potencijalne. Lokalni smjer definira se orijentacijom mehanizma u odnosu na ulicu, a globalni smjer određuje opći položaj mehanizma u prostoru. Za pojašnjenje, najčešće je orijentacija mehanizma zabatnog zida paralelna sa

smjerom pružanja ulice, a orijentacija mehanizma zida pročelja u pravilu je okomita na smjer pružanja ulice (slika 7.). Dodatno je utvrđeno je li na zgradi došlo do oštećenja koje je uzrokovano mehanizmom otkazivanja susjednih građevina te su obrađeni i podatci o uklanjanju konstrukcije nakon potresa, neovisno o tome je li rekonstrukcija naknadno provedena ili planirana.

Sintezom svih provedenih klasifikacija potrebno je odabrati relevantne rezultate te definirati način njihova prikaza. Važno je rezultate sagledati kritički, zbog čega su provedene dodatne analize kako bi se osiguralo da struktura promatranog uzorka građevina ne utječe na interpretaciju dobivenih rezultata. Primjerice, dobivenu prevladavajuću globalnu orijentaciju mehanizma ne treba promatrati samostalno, već se mora razmotriti i u kontekstu stvarnog prostornog rasporeda orijentacije dominantnog mehanizma otkazivanja, npr. otkazivanje tavanskog dijela zabatnog zida, tzv. lastavice.

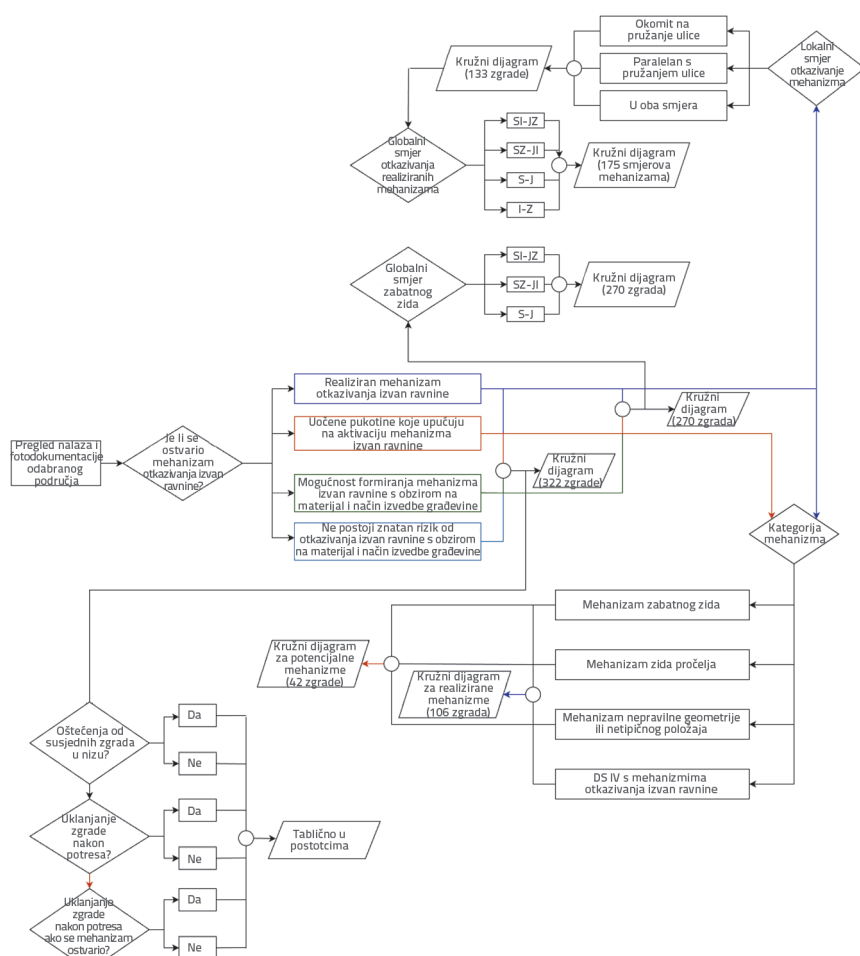
Radi jasnijeg razumijevanja metodologija utvrđivanja karakteristika mehanizama OIR-a prikazana je dijagramom toka na slici 8.

2.2. Kategorizacija oštećenja povezanih s mehanizmom otkazivanja izvan ravnine

Sukladno opisanoj metodologiji istraživanja, zgrade su svrstane u sljedeće kategorije s obzirom na mehanizam OIR-a:

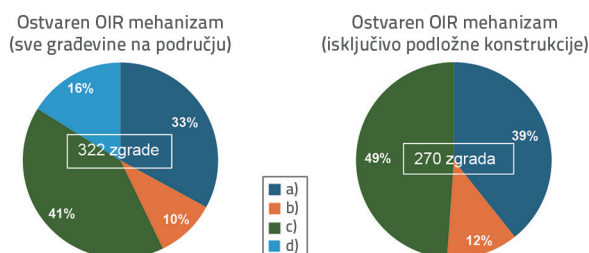
- Realiziran mehanizam OIR-a.
- Uočene pukotine koje upućuju na aktivaciju mehanizma OIR-a.
- Mogućnost formiranja mehanizma OIR-a obzirom na materijal i način izvedbe građevine.
- Ne postoji znatan rizik od OIR-a s obzirom na materijal i način izvedbe građevine.

Za razmatrano pogođeno područje, na slici 9.a prikazana je raspodjela navedenih kategorija u postotcima, dok slika 9.b prikazuje raspodjelu nakon izuzimanja kategorije d), odnosno



Slika 8. Dijagram toka metodologije [17]

nakon što se iz analize izuzmu zgrade kod kojih nije moguća realizacija mehanizma OIR-a. Stoga su na slici 9.a) obuhvaćene 322 zgrade, dok se nakon izuzimanja kategorije d) na slici 9.b) promatra preostalih 270 zgrada.



Slika 9. Raspodjela promatranih zgrada po kategorijama za: a) sve zgrade; b) samo zgrade kod kojih je moguća pojava OIR-a

Zgrade kod kojih je aktiviran mehanizam OIR-a u nastavku su dodatno sistematizirane prema kriterijima oblika i položaja, u okviru čega su svrstane u sljedeće kategorije, već opisane u poglavlju 2.1:

- Mehanizam zabatnog zida.
- Mehanizam zida pročelja.

iii) Mehanizam složene geometrije ili netipičnog položaja.

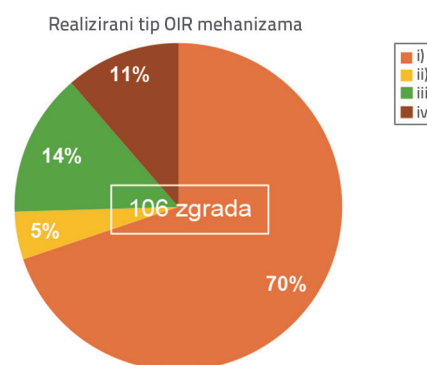
iv) DS IV s mehanizmima OIR-a.

Slikovni prikaz raspodjele zgrada prema ovim kategorijama, koji omogućuje bolji uvid u njihovu učestalost, dan je na slici 10. Broj od 106 zgrada predstavlja 33 % od ukupno 322 zgrade sa slike 9.a.

Kod zgrada kod kojih su se pojavile pukotine koje ukazuju na aktivaciju mehanizma OIR-a, na slici 11. vidljivo je da je i ovdje najzastupljeniji mehanizam zabatnog zida, što je i očekivano s obzirom na to da su lastavice zabatnih zidova u pravilu nepridržani elementi. Ovdje je broj od 42 zgrade dobiven kao 10 % od 322 zgrade sa slike 9.a, uz dodatak 10 zgrada kod kojih su, osim realizacije mehanizama OIR-a, uočene i pukotine koje upućuju na aktivaciju tih mehanizama.

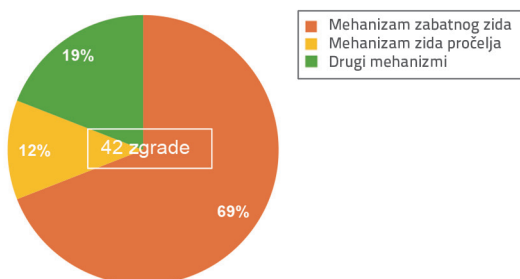
Bitno je primijetiti i da se 12 % evidentiranih oštećenja odnosi na potencijalni mehanizam fasadnog zida, što upućuje na znatnu razinu potresne oštećljivosti ovih elemenata na koje se uglavnom oslanjaju drvene stropne konstrukcije. Dodatno je zanimljivo analizirati i lokalni smjer otkazivanja ostvarenih mehanizama OIR-a, odnosno njihovu orijentaciju u odnosu na smjer pružanja ulice, što je prikazano na slici 12.

Najveći udio odnosi se na mehanizme čiji je smjer aktivacije paralelan s ulicom, što u bitnoj mjeri odgovara položaju zabatnih zidova. Kod velikog dijela oštećenih zgrada, njih 29 %, aktivirali su se lokalni mehanizmi u oba smjera. Najmanji se udio za ovaj razmatrani slučaj odnosi na mehanizme čiji je smjer okomit na ulicu, a u najvećem se broju slučajeva može povezati s aktivacijom mehanizma pročelja.



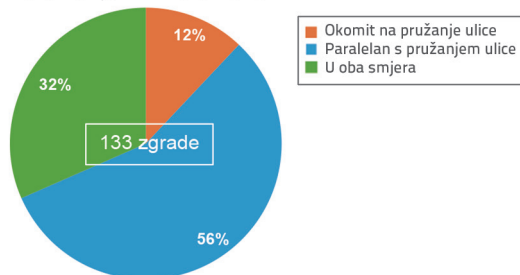
Slika 10. Raspodjela mehanizama OIR prema kategorijama

Aktivirani tip OIR mehanizama



Slika 11. Raspodjela potencijalnih mehanizama OIR-a prema kategorijama

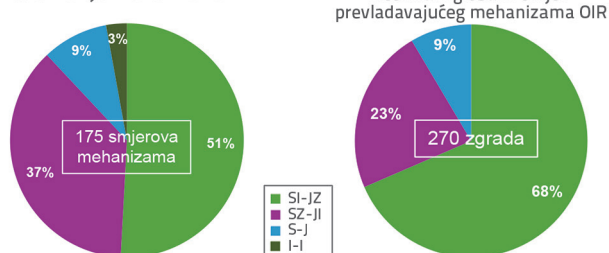
Lokalni smjer OIR mehanizama



Slika 12. Raspodjela ostvarenih mehanizama OIR-a prema orijentaciji s obzirom na smjer pružanja ulice

Zanimljiv je podatak i raspodjela orijentacija ostvarenih mehanizama OIR-a u globalnom prostornom kontekstu prikazana na slici 13.a, a na slici 13.b prikazana je očekivana globalna orijentacija prevladavajućeg mehanizma.

Globalni smjer mehanizama OIR



Slika 13. Globalna orijentacija mehanizma OIR: a) ostvarenog; b) prevladavajućeg mehanizma

Na slici 13.a broj od 175 smjerova mehanizama dobiva se iz 133 zgrade kod kojih je realiziran mehanizam otkazivanja, uz dodatna 42 smjera koji odgovaraju zgradama kod kojih je mehanizam realiziran u oba smjera. Očekivana globalna orijentacija podrazumijeva položaj zabatnog zida svih zgrada kod kojih se mehanizam ili realizirao, ili su uočene pukotine koje upućuju na aktivaciju mehanizma OIR-a. Stoga broj zgrada (270 zgrada) prikazan na slici 13.b odgovara

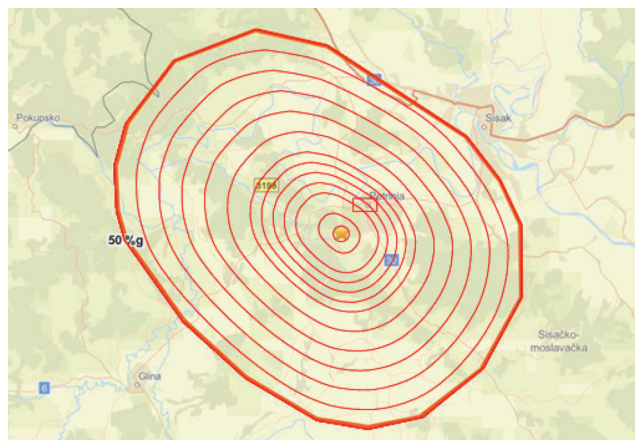
broju zgrada promatranih na slici 9.b. Slike su prikazane usporedno jer ih nije svrhovito razmatrati odvojeno. Prevladavanje globalne orijentacije SI – JZ odražava samo orijentaciju najučestalijeg oblika mehanizma, odnosno mehanizma na zabatnom zidu, što je posljedica orijentacije promatranih građevina, a što je i sukladno smjeru pružanja ulica uz promatrane građevine.

Radi jednostavnosti rezultati dodatnih analiza provedenih na cjelokupnom fondu od 322 promatrane i analizirane zgrade prikazani su u tablici 1. Oni pružaju uvid u postotak zgrada oštećenih aktivacijom mehanizama OIR-a na susjednim zgradama u nizu, udio uklonjenih zgrada nakon potresa te u promjenu tog udjela pri razmatranju samo zgrada s ostvarenim mehanizmom OIR-a.

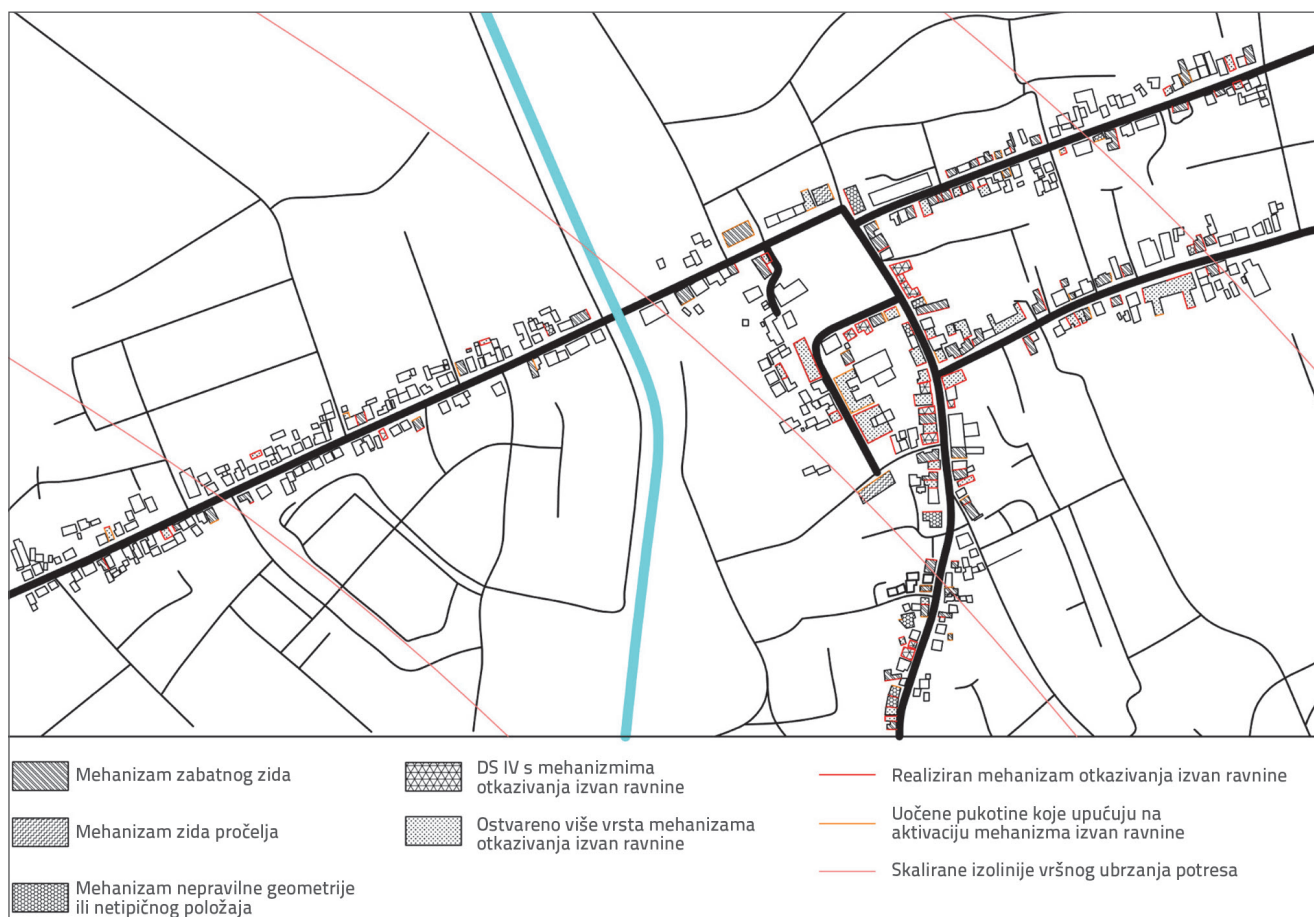
Analiza razmatranih građevina	Da [%]	Ne [%]
Oštećenja građevina kao rezultat mehanizma OIR susjedne zgrade	14	86
Građevina uklonjena nakon potresa	27	73
Građevina uklonjena nakon potresa zbog OIR oštećenja	48	52

Tablica 1. Utjecaj na okolne građevine i uklanjanje oštećenih zgrada

Na slici 14. prikazana je karta s epicentrom i konturama vršnog ubrzanja tla, preuzetima s mrežne stranice američke geološke službe USGS [22]. Konture vršnog ubrzanja skalirane su (proporcionalno pojačane) kako bi bile vidljive na slici 15., koja ponovno prikazuje kartu odabranog područja analize. Ovdje su na svakoj zgradi pojedinačno označene osi u kojima se ostvario mehanizam OIR-a ili su se pojavile pukotine koje ukazuju na aktivaciju tog mehanizma. Također, zgrade su šrafirane sukladno kategoriji mehanizma OIR-a.



Slika 14. Prikaz epicentra i kontura vršnog ubrzanja tla u odnosu na



Slika 15. Karta odabranog područja s obrađenim podacima

položaj Petrinje [22]

3. Formulacija modela ponašanja zidova izvan ravnine

3.1. Matematički model lokalnih mehanizama OIR-a

Procjena seizmičke otpornosti na prevrtanje zidanih zidova polazi od uvjeta ravnoteţe svih djelovanja koji uzrokuju stabilizirajući odnosno destabilizirajući moment prevrtanja. Ovaj osnovni princip ravnoteţe definira stanje aktivacije mehanizma uz pretpostavku formiranja linijskih zglobova oko kojih dolazi do rotacije krutih tijela (slika 16.). Za ovaj se ravnoteţni uvjet najčešće koristi kinematička analiza temeljena na principu virtualnog rada. Tim se postupkom određuje potrebna horizontalna sila, odnosno pripadno ubrzanje koje je potrebno za aktiviranje mehanizma u gibanje tako da uzima u obzir inercijalne efekte težina i geometriju elemenata u kinematičkom lancu.

Procedura počinje s definicijom, odnosno identifikacijom tipa lokalnog mehanizma koji bi se mogao formirati, to jest njegovih geometrijskih parametara i ograničenja (zglobova i oslonaca). Ovo je ključan korak jer izravno utječe na formiranje polja mogućih pomaka. Nadalje, potrebno je primijeniti sva opterećenja, odnosno horizontalne i vertikalne sile koje djeluju na pojedine segmente zida kako bi se mogao postaviti izraz

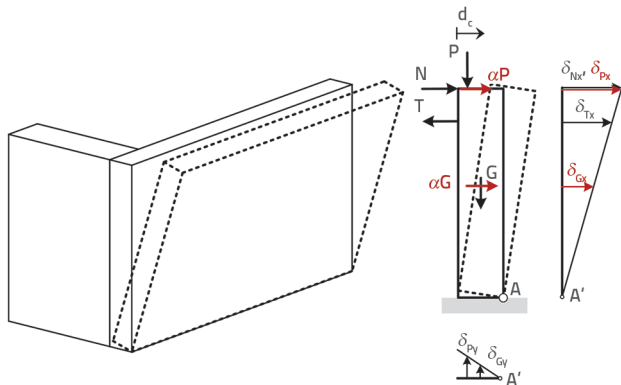
virtualnog rada:

$$\alpha_0 = \left(\sum P_i \delta_{x,i} + \sum P_j \delta_{x,j} \right) - \sum P_l \delta_{y,l} - \sum F_h \delta_h = L_f \quad (1)$$

u kojem P_i predstavlja sve težine koje djeluju izravno na segmente zida i koje generiraju inercijske sile, a P_j su opće sile težine koje ne djeluju izravno na blokove, ali čiji se inercijalni efekti prenose na mehanizam jer se one ne mogu učinkovito prenijeti na druge nosive elemente. Dodatno osim sila težine treba uzeti u obzir druge sile koje djeluju na blokove F_h , koje mogu imati destabilizirajući (npr. potisak svodova) ili stabilizirajući (npr. sile trenja na spoju s bočnim zidovima) utjecaj na sam mehanizam. Vrijednost L_f uključuje ukupni rad unutarnjih sila mehanizma (npr. klizanja uz trenje između blokova mehanizma (segmenta zida); deformacije povezanih fleksibilnih stropova i slično).

Rješavanjem izraza određuje se koeficijent α_0 kojim se definira vršna vrijednost horizontalnih djelovanja koja dovode do pokretanja (aktivacije) mehanizma u gibanje – ovo stanje mehanizma možemo povezati sa stanjem ograničenog oštećenja. U slučaju provođenja nelinearnog kinematičkog postupka potrebno je odrediti koeficijent α ne samo za početnu konfiguraciju kinematičkog lanca, nego i za naknadne konfiguracije koje opisuju položaje mehanizma pri gibanju, a koje se opisuju s pomoću horizontalnog pomaka d_c odabrane kontrolne točke. Općenito, vrijednost α postupno opada sve do

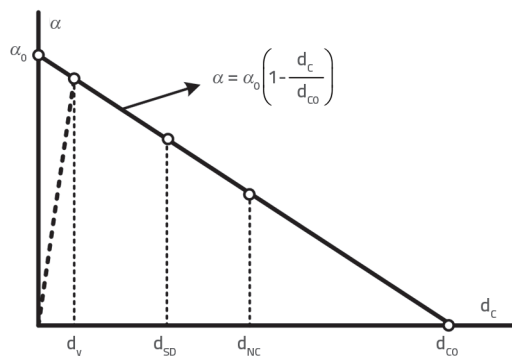
iščezavanja pri pomaku d_0 . Krivulja α -d dobivena nelinearnom kinematičkom analizom opisuje kapacitet sila-pomak za promatrani lokalni mehanizam (ili: krivulja α -d opisuje kapacitet lokalnog mehanizma u smislu odnosa između horizontalnog



djelovanja i odgovarajućeg pomaka.)

Slika 16. Inicijalni i pomaknuti položaj mehanizma prevrtanja uz prikaz plana virtualnih pomaka

U slučaju kad stalna i promjenjiva opterećenja ostaju konstantna pri razvoju (gibanju) mehanizma, krivulja $\alpha(d)$ može se opisati kao linearna sve do pomaka $d = d_{co}$, kako je to prikazano na slici 17. Vrijednost krajnjeg pomaka d_{co} odgovara položaju mehanizma za koji je $\alpha = 0$, odnosno položaju labilne ravnoteže u kojem mehanizam potpuno gubi stabilnost. U slučaju da se opterećenja mijenjaju tijekom razvoja mehanizma, potrebno je sukcesivno, na temelju uvjeta ravnoteže svakog koraka, odrediti

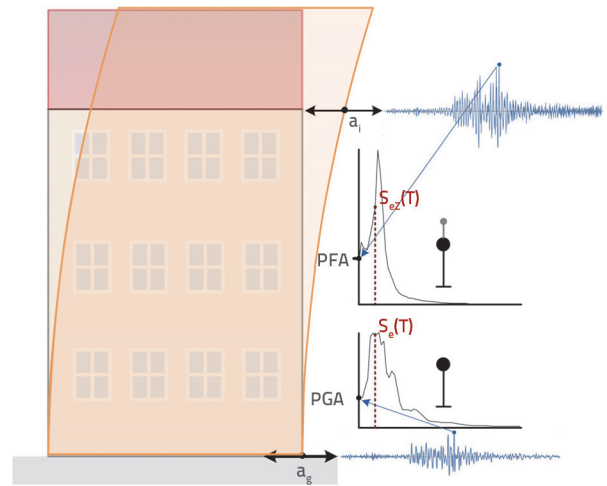


ovu krivulju kapaciteta.

Slika 17. Krivulja kapaciteta jednostavnog mehanizma prevrtanja bloka

Vrijednosti ubrzanja odnosno pomaka koje se određuju za ovako pojednostavljen kinematički sustav trebaju zadovoljiti uvjete sigurnosti. Precizno određivanje utjecaja vezanih uz amplifikaciju ubrzanja zbog odziva globalne konstrukcije zahtijeva analizu primarnog (osnovna konstrukcija) i sekundarnog (lokalni mehanizam) sustava uz uvažavanje njihove interakcije, koristeći složene modele ponašanja. S druge strane, pristup temeljen na spektru odziva kata (engl.

Floor Response Spectrum) zanemaruje dinamičku interakciju između primarnog i sekundarnog sustava te se zasniva na određivanju spektra kata kojim se uzima u obzir učinak



filtriranja ubrzanja na višim etažama konstrukcije.

Slika 18. Amplifikacija ubrzanja uzrokovana učinkom filtriranja i spektar odziva kata

Ako pretpostavimo da je ubrzanje tla opisano vremenskom funkcijom $a_g(t)$, na temelju koje se može formirati spektar odziva $S_g(T)$, tada za zadano prigušenje dobivamo uobičajeni spektar odziva. Za period $T = 0$ vrijednost spektra odgovara vršnom ubrzanju tla (engl. *Peak Ground Acceleration* - PGA). Pod djelovanjem dinamičkog opterećenja konstrukcija ostvaruje vlastiti dinamički odziv. U pojednostavljenoj formulaciji ukupno ubrzanje na određenoj visini konstrukcije može se opisati vremenskom funkcijom $a_i(t)$, koja predstavlja ubrzanje kata i . Ako se za tu funkciju provede vremenska integracija, moguće je oblikovati spektar odziva za određeno prigušenje sustava, čime se dobiva tzv. spektar odziva kata. Taj spektar uključuje učinke filtriranja osnovnog zapisa ubrzanja koji nastaju zbog dinamičkog odziva konstrukcije. Vršno ubrzanje kata (engl. *Peak Floor Acceleration* - PFA) odgovara vrijednosti spektra za $T = 0$, odnosno za idealno krut sustav, dok pseudoubrzanje za elastični sustav perioda T odgovara vrijednosti $S_{ez}(T)$ ako je ono primarno pod utjecajem gibanja tla, odnosno $S_{ez}(T)$ ako se nalazi na visini i dominantno je pod utjecajem odziva konstrukcije. Na oblik i veličinu spektra odziva kata utječu osnovne dinamičke značajke konstrukcije (masa, krutost, prigušenje), ali i moguće nelinearnosti u tijekom odziva. Važno je istaknuti da se pri ulasku konstrukcije u nelinearno područje efekti amplifikacije ubrzanja u pravilu smanjuju dok istodobno dolazi do promjena u području vršnih vrijednosti [8, 9, 13, 23]. To je posljedica toga što nelinearni odziv mijenja temeljne dinamičke parametre sustava.

Budući da određivanje spektra odziva kata zahtijeva provođenje dinamičke analize konstrukcije, u literaturi su predložene različite formulacije koje omogućuju izravno formiranje spektra odziva

kata. Pregled tih pristupa dan je u radu [8]. Važno je naglasiti, što potvrđuju brojna istraţivanja, kako inicijalni period sekundarnog sustava moţe imati bitan utjecaj na procjenu zahtjeva ubrzanja. U ovom ćemo se radu ograničiti isključivo na učinke amplifikacije ubrzanja kakvi su preporučeni u normi Eurokod 8 (HRN EN 1998 [24, 25]). Trenutno vaţeća norma učinke amplifikacije ubrzanja razmatra isključivo za nekonstrukcijske elemente:

$$S_{a,z} = a_g S \left[\frac{3 \left(1 + \frac{Z}{H} \right)}{1 + \left(1 - \frac{T}{T_1} \right)} - 0,5 \right] \quad (2)$$

pri čemu je Z visina na kojoj se element nalazi, a periodi T_1 i T odnose se na periode osnovne konstrukcije i nekonstrukcijskog elementa. Za ocjenu konačnog učinka djelovanja uzima se u obzir faktor vaţnosti te faktor ponašanja elementa. S druge strane, prema prijedlogu nove generacije norme za postojeće će konstrukcije biti potrebno provesti provjeru lokalnih mehanizama OIR-a kod zidanih zgrada u slučajevima kada korišteni modeli ne obuhvaćaju takav tip oštećenja. U pojednostavljenom analitičkom pristupu, pod pretpostavkom krutih elemenata, seizmički zahtjev koji se postavlja za element moţe se odrediti prema sljedećem izrazu:

$$\max \left(S_e, S_{eZ} = \Gamma \frac{Z}{H} S_e(T_1) \right) \quad (3)$$

I ovi izrazi u svojoj izvornoj formulaciji koriste u odabrane faktore sigurnosti i faktore ponašanja.

Radi procjene seizmičkog zahtjeva lokalnog mehanizma potrebno je njegov odziv svesti na ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode, opisan preko pripadne vrijednosti ubrzanja (ili sile) i pomaka. Pri tome se koristi koeficijent pretvorbe Γ za povezivanje ponašanja lokalnog mehanizma s idealiziranim ekvivalentnim sustavom:

$$\Gamma = \frac{\sum P_i \delta_{x,i}}{\sum P_i \delta_{x,i}^2} \quad (4)$$

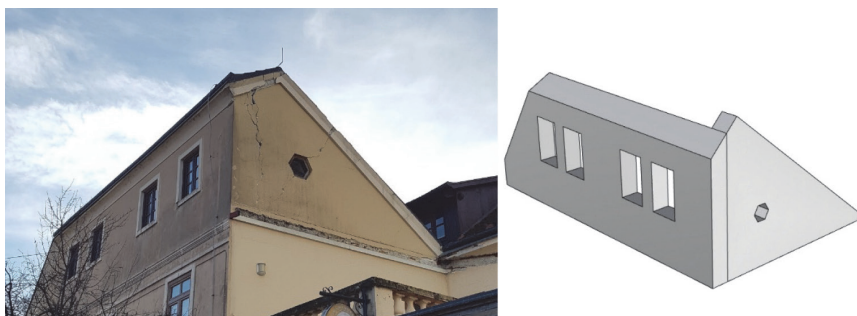
Prikazani teorijski okvir i pripadajući izrazi predstavljaju temelj za kvantifikaciju seizmičkih zahtjeva na elemente konstrukcije s obzirom na učinke amplifikacije ubrzanja, sukladno vaţećim odredbama i smjernicama nove generacije norme EN 1998-3 [26, 27]. S obzirom na to da su novopredloženi normativni pristupi još uvijek u postupku evaluacije i prilagodbi na nacionalnim razinama, u nastavku će se prikazati primjer proračuna u okviru

pojednostavljenog analitičkog modela.

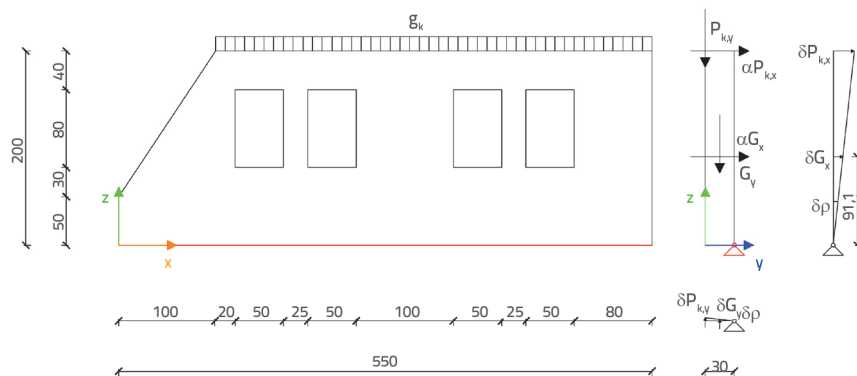
3.2. Studije slučaja OIR mehanizama

U ovom je poglavlju napravljen proračun zida najviše etaţe pročelja i lastavica zabatnog zida zgrade koja je prikazana na slici 19. Uzima se da se OIR kod oba zida realizira prevrtanjem, odnosno svaki se zid promatra kao kruti blok koji otkazuje oko osi linijskog zgloba. Poloţaj linijskog zgloba nalazi se na visini od 7 m, a ukupna je visina zgrade oko 9,5 m. Dimenzije i kinematički model prvog promatranog zida prikazani su na slici 20., zajedno s planom mogućih pomaka koji se primjenjuje za izračun virtualnog rada u okviru linearne kinematičke analize. Određene su z i y komponente teţišta te vrijednosti vlastite teţine i dodatnog stalnog opterećenja. Određene su vrijednosti horizontalnih i vertikalnih pomaka sila odnosu na kut zaokreta $\delta\varphi$ te je s pomoću jednadţbe virtualnog rada određen koeficijent aktivacije mehanizma α .

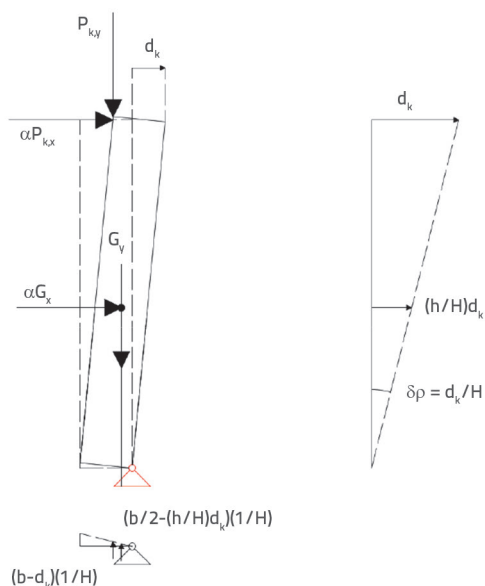
Dodatni parametri koji su u konačnici potrebni za provjeru graničnih stanja oštećenja su proračunska modalna masa m^* , koeficijent modalne participacije Γ_1 te koeficijent pretvorbe Γ . Kinematički model koji je korišten pri nelinearnoj kinematičkoj analizi, odnosno pri analizi kapaciteta pomaka prikazan je na slici 21. zajedno s naznačenom konfiguracijom pomaka. Rezultat nelinearne kinematičke analize ekvivalentni je spektralni pomak d^* , koji se kasnije koristi za provjere na pojedina granična stanja oštećenja.



Slika 19. Geometrija lokalnog mehanizma za OIR



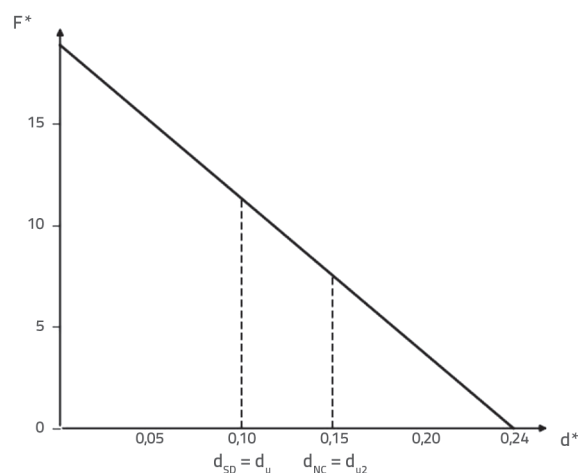
Slika 20. Dimenzije i kinematički model promatranog zida



Slika 21. Konfiguracija pomaka u nelinearnoj kinematičkoj analizi

Kao što je već spomenuto, važeća norma HRN EN 1998 [24, 25] daje tek upute za provjeru nekonstrukcijskih elemenata, pa se za razrađeniji pristup uglavnom oslanjalo na talijanske smjernice [28, 29] budući da je njihova tipologija zgrada najsličnija našoj. Nova generacija Eurokoda 1998-3 [26, 27], međutim, donosi sustavniji proračun uz primjenu linearne i nelinearne analize te provjeru graničnih stanja oštećenja na trima razinama: ograničeno oštećenje DL (engl. *Damage limitation* - DL), znatno oštećenje SD (engl. *Significant Damage* - SD) i stanje blizu rušenja NC (engl. *Near Collapse* - NC). U tablici 2. prikazani su rezultati proračuna za prvi promatrani zid, iz kojih je vidljivo

kako analiza ne zadovoljava, odnosno aktivira se mehanizam OIR-a prema postojećoj normi HRN EN 1998 [24, 25] ako se zid promatra kao nekonstrukcijski element, ali pri provjerama provedenim prema prijedlogu nove generacije te norme [26, 27] analiza ne zadovoljava za stanje ograničenog oštećenja (DL) te za stanje znatnog oštećenja (SD), a za stanje blizu rušenja (NC) zadovoljava. Povratni period u proračunu trebao bi se odabrati s obzirom na pripadajuće granično stanje. Međutim, zbog trenutnog nedostatka podataka, za sva granična stanja korišten je povratni period $T_p = 475$ godina, koji se u načelu koristi za stanje SD (znatnog oštećenja). Dodatno, na slici 22. grafički je prikazan razvoj krivulje kapaciteta $F^* - d^*$ za promatrani slučaj te su vizualno prikazani kriteriji za provjeru graničnih stanja prema odgovarajućem pomaku.



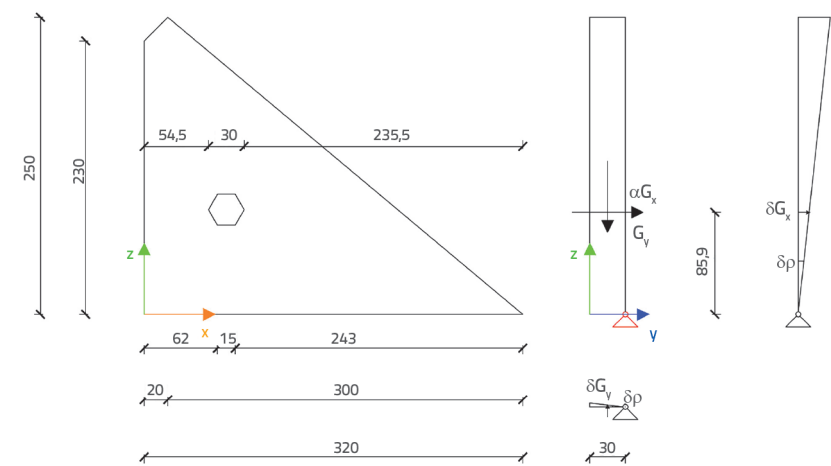
Slika 22. Krivulja kapaciteta prvog promatranog zida

Tablica 2. Rezultati proračuna za prvi primjer

Proračun				Provjera na stanja oštećenja			
Linearna kinematička analiza				HRN EN 1998-3:2011 - Nekonstrukcijski elementi			
Težište	Z_T	0,911	[m]	Potresni koeficijent kata	$S_{a,z}$	0,261	
	Y_T	0,15	[m]	Horizontalna potresna sila	F_a	17,98	[kN]
Vlastita težina	G	45,88	[kN]	$M_{stabilizirajući} > M_{prevrtanja}$			
Sila potiska krovišta	g_{strop}	7	[kN/m]	16,332 < 16,36 → aktivacija mehanizma OIR			
	P_k	31,5	[kN]	HRN EN 1998-3:2025			
Vrijednosti pomaka	$\delta_{G,x}$	0,911	[δφ]	DL (DAMAGE LIMITATION)			
	$\delta_{G,y}$	0,15	[δφ]	Otpornost stanja DL kao sila ekvivalentnog sustava	F_{DL}^*	18,89	[kN]
	$\delta_{P,k,x}$	2	[δφ]	$M_{stabilizirajući} > M_{prevrtanja}$			
	$\delta_{P,y}$	0,3	[δφ]	16,332 < 17,21 → ne zadovoljava			
Koeficijent aktivacije	α	0,156		SD (SIGNIFICANT DAMAGE)			
Proračunska modalna masa	m^*	6,28	[t]	Pomak ekvivalentnog sustava za stanje SD	$d_{SD}=d_u$	0,098	[m]
Koeficijent modalne participacije	Γ_1	1,286		Linearni ekvivalentni period stanja SD	T_{SD}	1,171	[s]
Faktor transformacije	Γ	0,639		$\gamma_{sd} S_{eZ}(T_{SD}) \left(\frac{T_{SD}}{2\pi} \right)^2 \leq \frac{d_{SD}}{\gamma_{Rd}}$ 0,09 ≤ 0,06 → ne zadovoljava			
Nelinearna kinematička analiza				NC (NEAR COLLAPSE)			
Kontrolni pomak	d_k	1		Pomak ekvivalentnog sustava za stanje NC	$d_{NC}=d_{u2}$	0,147	[m]
Vrijednosti virtualnih pomaka	$\delta_{G,y}$	0,075-0,228 d_k		Linearni ekvivalentni period stanja NC	T_{NC}	1,757	[s]
	$\delta_{P,k,y}$	0,15-0,5 d_k		$\gamma_{sd} S_{eZ}(T_{NC}) \left(\frac{T_{NC}}{2\pi} \right)^2 \leq \frac{d_{NC}}{\gamma_{Rd}}$ 0,05 ≤ 0,09 → zadovoljava			
	$\delta_{G,x}$	0,228 d_k					
	$\delta_{P,k,x}$	0,5 d_k					
	$d_{k,0}$	0,312		Parcijalni faktor nesigurnosti učinaka djelovanja	γ_{sd}	1,15	
Ekvivalentni spektralni pomak	d^*	0,245	[m]	Parcijalni faktor nesigurnosti otpornosti	γ_{Rd}	1,7	

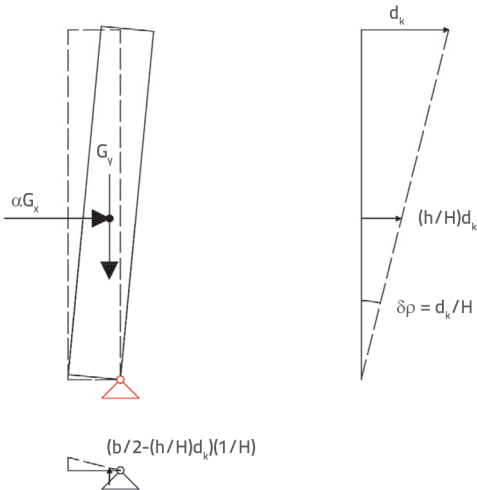
Tablica 3. Rezultati proračuna za drugi primjer

Proračun				Provjera na stanja oštećenja			
Linearna kinematička analiza				HRN EN 1998-3:2011 - Nekonstruktivski elementi			
Težište	Z_T	0,859	[m]	Potresni koeficijent kata	$S_{a,z}$	0,261	
	y_T	0,15	[m]	Horizontalna potresna sila	F_a	16,79	[kN]
Vlastita težina	G	42,88	[kN]	$M_{stabilizirajući} > M_{prevrtanja}$			
Vrijednosti pomaka	$\delta_{G,x}$	0,859	[$\delta\varphi$]	6,43<14,42 → ne zadovoljava			
	$\delta_{G,y}$	0,15	[$\delta\varphi$]	HRN EN 1998-3:2025			
Koeficijent aktivacije	α	0,174		DL (DAMAGE LIMITATION)			
Proračunska modalna masa	m^*	4,68	[t]	Otpornost stanja DL kao sila ekvivalentnog sustava	F_{DL}^*	6,41	[kN]
Koeficijent modalne participacije	Γ_1	1,286		$M_{stabilizirajući} > M_{prevrtanja}$			
Faktor transformacije	Γ	1,164		6,432>5,501 → zadovoljava			
Ne-linearna kinematička analiza				SD (SIGNIFICANT DAMAGE)			
Kontrolni pomak	d_k	1		Pomak ekvivalentnog sustava za stanje SD	$d_{SD}=d_u$	0,06	[m]
Vrijednosti virtualnih pomaka	$\delta_{G,y}$	0,06-0,138 d_k		Linearni ekvivalentni period stanja SD	T_{SD}	0,859	[s]
	$\delta_{G,x}$	0,228 d_k		$\gamma_{Sa} S_{eZ}(T_{SD}) \left(\frac{T_{SD}}{2\pi} \right)^2 \leq \frac{d_{SD}}{\gamma_{Rd}}$ 0,084 ≤ 0,141 → zadovoljava			
	$d_{k,0}$	0,435					
Ekvivalentni spektralni pomak	d^*	0,06	[m]				



Slika 23. Dimenzije i kinematički model promatranog zida

Isti postupak proveden je i za proračun bočnog zida, kod kojeg je uzeta u obzir samo težina. Budući da su analize zadovoljene za granično stanje ograničenog oštećenja (DL) i znatnog oštećenja

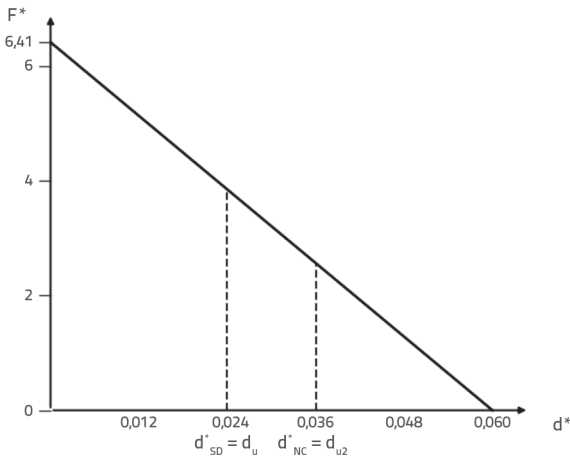


Slika 24. Konfiguracija pomaka u nelinearnoj kinematičkoj analizi

(SD), analiza za stanje blizu rušenja (NC) nije provedena. Kao i u prethodnom primjeru, na slikama 23. i 24. prikazani su redom dimenzije i kinematički model promatranog zida te kinematički model korišten pri nelinearnoj analizi. U tablici 3. prikazani su rezultati proračuna, a na slici 25. slijedi pripadajući razvoj krivulje kapaciteta $F^* - d^*$.

Iz rezultata je vidljivo da je prvi zid u slučaju OIR-a ugroženiji jer ne zadovoljava ni kada se provjerava prema postojećim propisima kao nekonstruktivski element [24, 25] niti prema budućim propisima [26, 27] sve do stanja blizu rušenja (NC). To međutim ne znači da se drugi promatrani zid može zanemariti. On ne

zadovoljava prema postojećem propisu ako se promatra kao nekonstruktivski element, a vidljive pukotine upućuju na moguća oštećenja u ravnini zida.



Slika 25. Krivulja kapaciteta drugog promatranog zida

4. Zaključak

Metodologija koja je predmet ovog rada provedena je na fondu od 322 zgrade, odabrane prema povijesnim kartama s namjerom da se obuhvate najstarije građevine i najveći udio konstrukcija izvedenih kao neomeđeno zide. Rezultati prve provedene analize metodologije, odnosno raspodjela zgrada prema mogućnosti aktivacije mehanizma OIR-a, pokazuju da je 270 zgrada od ukupno 322 podložne ovom tipu otkazivanja. Time je potvrđeno da je uzorak građevina relevantan i reprezentativan, a u velikom broju slučajeva je i karakterističan za tipologije starih gradskih jezgri u Hrvatskoj. Analiza također pokazuje da je iz podataka koji su prikupljeni tijekom brzih pregleda moguće identificirati zgrade koje su podložne aktivaciji ovakvog mehanizma, što može poslužiti i kao orijentir samih preporuka za daljnje postupanje ovim zgradama. Ipak, bitan je rezultat ovog istraživanja udio zgrada kod kojih je realiziran mehanizam OIR-a – 106 zgrada (33 %) te te zgrada kod kojih su nastale pukotine koje upućuju na njihovu aktivaciju – 32 zgrade (10 %).

Zgrade su zatim raspodijeljene u kategorije prema položaju i geometrijskim karakteristikama mehanizama kako bi se utvrdilo koja kategorija mehanizma najviše zastupljena – u ovom uzorku to su očekivano bili mehanizmi zabatnih zidova. S obzirom na utvrđenu najučestaliju kategoriju mehanizma, rezultati kategorizacije realiziranih mehanizama otkazivanja – prema smjeru otkazivanja, lokalno u odnosu na smjer pružanja ulice te globalno u odnosu na prostornu orijentaciju prema stranama svijeta – prikazuju se paralelno s očekivanim globalnim smjerom otkazivanja najučestalije kategorije mehanizma na svim zgradama s mogućnošću OIR-a (njih 270). Razlog takvog paralelnog prikaza jest mogućnost pogrešnog zaključka da su određeni globalni smjerovi otkazivanja učestaliji zato što su mehanizmi skloniji aktivaciji u tim smjerovima, a u stvarnosti je najučestaliji mehanizam jednostavno orijentiran u skladu s pružanjem ulica u promatranom uzorku. Promatra li se ovo zajedno s kartom na kojoj su ucrtane osi zgrada kod kojih je došlo do OIR-a, jedini se zaključak nameće da su položaji zabatnih zidova u promatranom uzorku izrazito nepovoljno smješteni u prostoru u odnosu na skalirane izolinije vršnog ubrzanja potresa, odnosno u odnosu na epicentar.

Provedene dodatne analize pokazuju da se na znatnom udjelu zgrada, njih 14 % (46 zgrada), pojavila oštećenja uzrokovana OIR-om zidova susjednih građevina u nizu. To naglašava da u starim povijesnim jezgrama, gdje su zgrade najčešće u nizu, odnosno blokovski građene, mehanizmi OIR-a ne predstavljaju rizik samo za zgradu u kojoj se razvijaju, nego i za susjednu, nižu zgradu.

Također, zanimljiv je podatak da je 27 % promatranih zgrada uklonjeno nakon potresa, ukupno njih 85. I ako uzmemo u obzir samo zgrade kod kojih je aktiviran mehanizam OIR-a, taj se udio penje na 48 % – odnosno na 51 od 106 zgrada, što potvrđuje da se radi o prevladavajućem mehanizmu oštećenja starih zidanih zgrada.

Ova metodologija pruža solidnu osnovu za istraživanja OIR mehanizama koji su karakteristični za tipologiju građevina starih gradskih jezgri u kontinentalnoj Hrvatskoj, što može biti i relevantan faktor za analizu potresnog rizika tih dijelova grada. Osim toga, uzevši u obzir potrese koji su se dogodili, dodatna komponenta istraživanja bila bi utvrditi slijed događaja. Odnosno, je li se mehanizam OIR-a dogodio nakon oštećenja elementa u ravnini, budući da postoji ograničena količina podataka o oštećenjima od prethodnog potresa Mw 5,2 od 28. prosinca 2020. Uzimajući to u obzir, analiza lokalnih mehanizama otkazivanja u ravnini mogla bi omogućiti cjelovitiju analizu oštećenja na promatranom području, a bilo bi poželjno i proširenje promatranog uzoraka na područje cijelog grada Petrinje. Budući da se istraživanje temelji na zatečenom stanju i pregledima nakon potresa, korisno bi bilo uključiti i fond obnovljenih zgrada kako bi se dobila aktualizirana procjena rizika od potencijalne realizacije mehanizama OIR-a.

Zahvala

Posebna zahvala Hrvatskom centru za potresno inženjerstvo – interventnoj službi na omogućenom pristupu bazi fotografija, kao i svim inženjerima koji su sudjelovali u formiranju te baze. Autori zahvaljuju financijskim potporama Hrvatske zaklade za znanost (UIP-2020-02-1128) te Hrvatskom centru za potresno inženjerstvo (A679117 HPC).

LITERATURA

- [1] Atalić, J., Demšić, M., Baniček, M., Uroš, M., Dasović, I., Prevolnik, S., Kadić, A., Šavor Novak, M., Nastev, M.: The December 2020 magnitude (Mw) 6.4 Petrinja earthquake, Croatia: seismological aspects, emergency response and impacts, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21 (2023), pp. 5767–5808, <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01758-z>
- [2] Costa, A.A., Arêde, A., Costa, A., Oliveira, C.S.: Out-of-plane behaviour of existing stone masonry buildings: Experimental evaluation, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10 (2012), pp. 93–111, <https://doi.org/10.1007/s10518-011-9332-9>
- [3] Costa, A.A., Arêde, A., Campos Costa, A., Penna, A., Costa, A.: Out-of-plane behaviour of a full-scale stone masonry façade, Part 1: specimen and ground motion selection, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42 (2013), pp. 2087–2095, <https://doi.org/10.1002/eqe.2313>
- [4] Costa, A.A., Arêde, A., Campos Costa, A., Penna, A., Costa, A.: Out-of-plane behaviour of a full scale stone masonry façade, Part 2: Shaking table tests, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42 (2013), pp. 2097–2111, <https://doi.org/10.1002/eqe.2314>

- [5] Ferreira, T.M., Costa, A.A., Arêde, A., Gomes, A., Costa, A.: Experimental characterization of the out-of-plane performance of regular stone masonry walls, including test setups and axial load influence, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13 (2015), pp. 2667–2692, <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9742-1>
- [6] Lagomarsino, S.: Seismic assessment of rocking masonry structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13 (2015), pp. 97–128, <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9609-x>
- [7] Doherty, K.: An Investigation of the weak link in the seismic load path of unreinforced masonry buildings, PhD Thesis, Adelaide University, Department of Civil and Environmental Engineering, 2000.
- [8] Degli Abbatì, S., Cattari, S., Lagomarsino, S.: Theoretically-based and practice-oriented formulations for the floor spectra evaluation, *Earthquakes and Structures*, 15 (2018) 5, pp. 565–581, <https://doi.org/10.12989/eas.2018.15.5.565>
- [9] Degli Abbatì, S., Cattari, S., Lagomarsino, S.: Validation of a practice-oriented floor spectra formulation through actual data from the 2016/2017 Central Italy earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20 (2022), pp. 7477–7511, <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01498-6>
- [10] Grillanda, N., Valente, M., Milani, G.: ANUB-Aggregates: a fully automatic NURBS-based software for advanced local failure analyses of historical masonry aggregates, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18 (2020) 8, pp. 3935–3961.
- [11] Chiozzi, A., Grillanda, N., Milani, G., Tralli, A.: UB-ALMANAC: An adaptive limit analysis NURBS-based program for the automatic assessment of partial failure mechanisms in masonry churches, *Engineering Failure Analysis*, 85 (2018), pp. 201–220.
- [12] Lestuzzi, P.: Simplified out-of-plane seismic behavior assessment of non-structural rocking walls, *Frontiers in Built Environment*, 9 (2023), 10.3389/fbuil.2023.1113847.
- [13] Pinasco, S., Demšić, M., Pilipović, A., Šavor Novak, M., Uroš, M., Lagomarsino S., Cattari S.: Seismic fragility assessment of existing masonry buildings in aggregate located in Zagreb, *Bull Earthquake Eng*, 23 (2025), pp. 2715–2741, <https://doi.org/10.1007/s10518-025-02156-3>
- [14] Vanin, F., Penna, A., Beyer, K.: A three-dimensional macroelement for modelling the in-plane and out-of-plane response of masonry walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49 (2020) 12, pp. 1365–1389, <https://doi.org/10.1002/eqe.3277>
- [15] D'Ayala D, Speranza E.: Definition of Collapse Mechanisms and Seismic Vulnerability of Historic Masonry Buildings. *Earthquake Spectra*, 19 (2003) 3, pp. 479–509, <https://doi.org/10.1193/1.1599896>
- [16] Atalić, J.; Uroš, M.; Šavor Novak, M.; Demšić, M.; Baniček, M.; Kadić, A.; Oreb, J.: The Croatian Centre for Earthquake Engineering: establishment, activities and future opportunities. *Proceedings of the Third European Conference on Earthquake Engineering and Seismology – 3ECCES*. Arion, Cristian; Scupin, Alexandra; Țigănescu, Alexandru (ur.). Bukurešt, CONSPRESS, pp. 2088–2097, 2022.
- [17] HCPI: Building usability database, Croatian Center for Earthquake Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb. (2020).
- [18] Lipovac, N.: Petrinja, Prostorno-povijesni razvoj grada očit na starih grafika, planova i karata, Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.
- [19] Potresno inženjerstvo - Obnova zidanih zgrada, Uroš, M., Todorić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., & Lakušić, S. (ur.). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet. ISBN: 978-953-8168-43-7, 2021.
- [20] Google: Google Street View imagery of Petrinja, Croatia, 2011, 2012, 2018, dostupno na: <https://www.google.com/streetview>, pristupljeno 10. 10. 2025.
- [21] Uroš, M., Šavor Novak, M., Atalić, J., Sigmund, Z., Baniček, M., Demšić, M., Hak, S.: Post-earthquake damage assessment of buildings – procedure for conducting building inspections, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 12, pp. 1089–1115, <https://doi.org/10.14256/JCE.2969.2020>
- [22] USGS – United States Geological Survey: Earthquake map: M6.4 – Croatia, 29 December 2020, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000d3zh/map>, pristupljeno 29. 10. 2025.
- [23] Vukobratović, V., Fajfar, P.: Code-oriented floor acceleration spectra for building structures, *Bull Earthquake Eng*, 15 (2017), pp. 3013–3026, <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0076-4>
- [24] HRN EN 19981:2011. Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004 + AC:2009), Zagreb: Hrvatski zavod za norme, 2011.
- [25] HRN EN 1998-3:2011. Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada (EN 1998-3:2005 + AC:2010), Zagreb: Hrvatski zavod za norme, 2011.
- [26] HRN EN 1998-1-1:2024. Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – Dio 1-1: Opća pravila i potresna djelovanja (EN 1998-1-1:2024), Zagreb: Hrvatski zavod za norme, 2024.
- [27] HRN EN 1998-3:2025. Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada i mostova (EN 1998-3:2025), Zagreb: Hrvatski zavod za norme, 2025.
- [28] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008). Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 29, 4. veljače 2008.
- [29] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018). Decreto Ministeriale 17 januar 2018. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 42, 20. veljače 2018.