

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.21>

Utjecaj spojeva konstrukcijskih elemenata na seizmički odziv tradicijskih zidanih zgrada u blokovima

Influence of connections between structural elements on seismic response of traditional masonry aggregates

Sara Vaing¹, Maja Baniček¹, Igor Tomić², Josip Atalić¹

(1) Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, svaing@grad.hr, mbanicek@grad.hr, josip.atalic@grad.unizg.hr

(2) Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Švicarska, igor.tomic@epfl.ch

Sažetak

Nedavni potresi u Hrvatskoj istaknuli su ranjivost povijesne jezgre Zagreba koju karakteriziraju zidane zgrade, uglavnom povezane u blokovima. Procjena štete iz 2020. godine pokazala je često otkazivanje zidanih elemenata izvan ravnine, što je primarno uvjetovano kvalitetom spojeva konstrukcijskih elemenata. Međudjelovanje zgrada u nizovima vrlo je složeno i nedovoljno istraženo. Ovaj rad numerički istražuje utjecaj linearnih i nelinearnih spojeva zida sa zidom (zid-zid) i međukatne konstrukcije i zida (pod-zid) na seizmički odgovor dviju susjednih zidanih zgrada pri dinamičkom opterećenju. Primjenjuje se pristup modeliranja ekvivalentnim okvirom uz posebno razvijen makroelement koji obuhvaća ponašanje zidova u ravnini i izvan nje. Cilj je unaprijediti strategije modeliranja i analize za procjenu seizmičke otpornosti postojećih zidanih konstrukcija.

Ključne riječi: nearmirano ziđe, blokovi, nelinearne veze, otkazivanje van ravnine

Abstract

Recent earthquakes in Croatia highlighted the vulnerability of Zagreb's historic center, characterized by unreinforced masonry buildings (URM), mainly arranged in aggregates. Damage assessments from 2020 revealed common out-of-plane failures, primarily influenced by the effectiveness of connections between structural elements. In relation to aggregates, interaction of structures is very complex and currently under-researched. This paper numerically investigates the influence of linear and nonlinear wall-to-wall and floor-to-wall connections, on a seismic response of two adjacent URM buildings under dynamic loading. Equivalent frame modeling approach is considered with a macroelement formulated to capture both in-plane and out-of-plane behaviour of masonry elements. The aim of this research is to advance modeling and analysis strategies for the seismic assessment of existing unreinforced masonry structures.

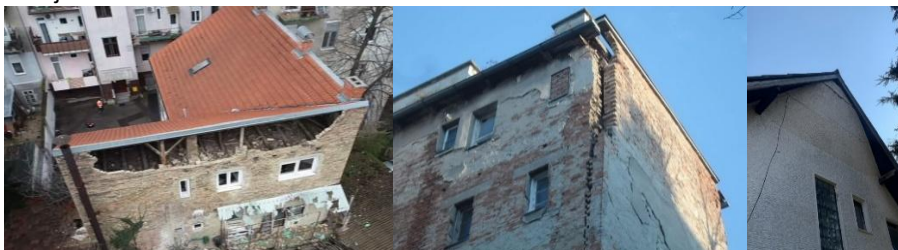
Keywords: unreinforced masonry, aggregates, nonlinear connections, out-of-plane response

1. Uvod

Nedavni potresi na području Hrvatske istaknuli su ranjivost Zagrebačke povijesne jezgre koju karakteriziraju zidane zgrade uglavnom građene kao dio bloka. Većina zgrada u donjem dijelu Zagreba građene su nakon Velikog potresa u Zagrebu iz 1880. godine kada započinje razvoj grada pod Austro-ugarskim utjecajem [1].

Procjena štete nakon potresa iz 2020. godine pokazala je da su najviše oštećene bile tradicionalne zidane zgrade čije nosive zidove povezuju međukatne konstrukcije drvenih grednika. Iako su zidovi dosegнули svoju nosivost na smicanje u ravnini, najveća oštećenja takvih građevina prouzročena su mehanizmom otkazivanja van ravnine nekonstrukcijskih elemenata poput dimnjaka, krovišta, lastavica, konzolnih elemenata itd. U nekim slučajevima zabilježena su otkazivanja zabatnih zidova ne samo na razini krovišta već po cijeloj visini građevine, a primijećena su i otkazivanja fasadnih zidova van ravnine [2]. Neki od slučajeva prikazani su na slici 1. Mehanizam otkazivanja elemenata van ravnine u slučaju zidanih zgrada uvjetovan je prije svega kvalitetom spoja između konstrukcijskih elemenata. Ovdje se primarno misli na kontakt između zidova te kontakt između horizontalnih elemenata sa zidovima. U slučaju zidanih zgrada u Zagrebu, međukatna konstrukcija nosiva je u jednom smjeru, najčešće okomito na fasadne zidove, gdje su grede naslonjene na zid, a zabatni zidovi su ne pridržani. Kvaliteta spojeva greda i zidova temelji se na trenju te veza često nije dostatna u slučaju srednjih ili jačih potresa [3]. Osim što ovakav mehanizam otkazivanja utječe na globalnu stabilnost građevine, iznimno je opasan jer može dovesti u opasnost ljudske živote te doprinosi ukupnom riziku od potresa a često se ne uzima u obzir radi nedostatka alata koji bi u proračunu konstrukcija uzimali u obzir i otkazivanje unutar i otkazivanje elemenata izvan ravnine [4].

Zbog velikog broja postojećih zidanih građevina u svijetu koje su potencijalno izrazito ranjive na potrese, nužno je unaprijediti razumijevanje njihova seizmičkog ponašanja te razviti pouzdane analitičke i numeričke modele za njihovu procjenu. Pouzdanost takvih modela ključna je ne samo u projektiranju novih zgrada, već osobito u procjeni i ojačavanju postojećih konstrukcija [5]. Interakcija zgrada u blokovima nije dovoljno istraжена zbog nedostatka eksperimentalnih ispitivanja. Iz tog razloga niti propisi ne daju jasne smjernice za modeliranje interakcije a u inženjerskoj praksi često se takve zgrade modeliraju kao samostojeće.

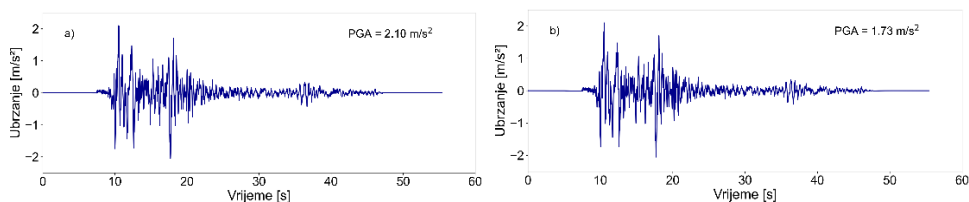


Slika 4 Otkazivanje zidova van ravnine u zagrebačkom potresu 2020. godine [4]

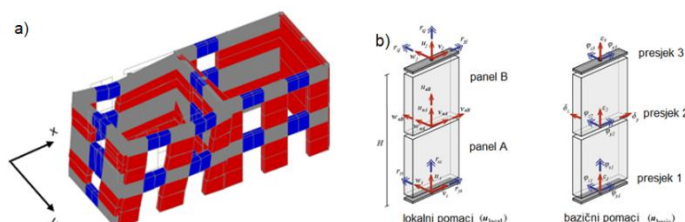
2. Numerički model bloka

Model dviju zgrada u nizu temeljen je na metodi ekvivalentnih okvira [6] koja se često koristi za izradu numeričkih modela zidanih zgrada, primjenjiva je u inženjerskoj praksi te se preporuča i u nekim propisima [7, 8]. Ovakav pristup modeliranju idealizira zidove kao okvire diskretizirane na tri tipa elemenata: zidovi (eng. *piers*) i nadvoji (eng. *spandrels*) koji su deformabilni, te krute zone (eng. *rigid nodal panels*). Na temelju pregleda oštećenja nastalih nakon potresa te eksperimentalnih ispitivanja, zaključilo se da se pukotine i mehanizmi otkazivanja pojavljuju na određenim mjestima na zidu na temelju čega se formira geometrija deformabilnih elemenata koje spajaju krute zone. Postojeće metode s ekvivalentnim okvirima koriste elemente koji mogu opisati ponašanje samo unutar ravnine, a mehanizam otkazivanja izvan ravnine potrebno je uzeti u obzir zasebnim proračunima [9].

Numerički model predstavlja dvije zidane zgrade u bloku. Zgrade su istih tlocrta i geometrije a glavna razlika je u spojevima konstrukcijskih elemenata između zidova te podova i zidova, što je detaljno opisano u poglavlju 2.1.. Zgrade su pravilne u smislu geometrije, visine i otvora. Stropne konstrukcije su definirane kao ortotropne elastične membrane [10] nosive u smjeru okomito na fasadne zidove. Model je izrađen u programu otvorenog koda OpenSees (eng. *Open System for Earthquake Engineering Simulations*) koji je namijenjen prvenstveno seizmičkoj analizi konstrukcija [11]. Provedena je nelinearna dinamička analiza a korišten je potresni zapis Montenegro Albatros 1979 [12], te je potres zadan u dva međusobno okomita smjera: u x smjeru zadan je potresni zapis koji odgovara horizontalnoj komponenti potresa istok-zapad ($PGA = 2.10 \text{ m/s}^2$), a u y smjeru sjever-jug ($PGA = 1.73 \text{ m/s}^2$), slika 2. Analiza zgrada temelji se na utjecaju idealno krutih i nelinearnih spojeva na seizmički odziv elemenata van ravnine. Spojevi koji se promatraju su zid-zid, ploča-zid te zgrada-zgrada, kao i slučaj kada nije zadan kontakt između jedinica u nizu. Za elemente zidova i nadvoja korišten je makroelement koji uzima u obzir odziv zidanog elementa u ravnini i zvan nje [13]. Makroelement je formuliran kao jednodimenzijski element definiran s tri čvora u trodimenzijском prostoru. Dva čvora predstavljaju početak i kraj elementa dok treći predstavlja sredinu. Odgovor unutar ravnine temeljen je na formulaciji makroelementa od Penna et al [14] koji se koristi u programima poput TREMURI, te je nadograđen ponašanjem izvan ravnine P- Δ formulacijom uz proširenje odgovora svakog presjeka da obuhvaća rotaciju u dva smjera. Definicija elementa kao i deformacije prikazane su na slici 3. Element je primijenjen u programskom paketu OpenSEES [10].



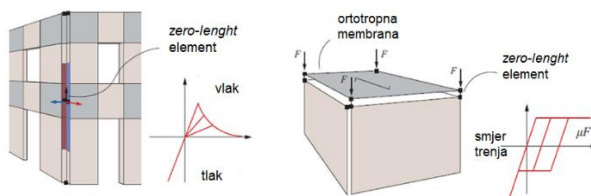
Slika 5 Horizontalne komponente potresnog zapisa zadan u a) x smjeru, b) y smjeru



Slika 6 a) numerički model dvije zgrade u nizu, b) definicija makroelementa [10]

2.1. Spojevi između konstrukcijskih elemenata

U inženjerskoj praksi često se spojevi između konstrukcijskih elemenata modeliraju kao idealno kruti što nije realno za slučaj zidanih zgrada. Treba naglasiti da je materijal tradicionalnih zgrada dotrajavao s vremenom, te nema zadovoljavajuća mehanička svojstva [15]. U ovom radu navedeni spojevi zadaju se na dva načina: kao idealno kruti i nelinearni, te bez spoja u slučaju kontakta između jedinica. Kruti spojevi zadaju se pomoću tzv. equalDOF naredbe u OpenSees-u koja predstavlja kruto ograničenje ponašanja čvorova, to jest zadaju se „master“ i „slave“ čvorovi te se „slave“ čvoru zadaju isti pomaci kao „master“ čvoru. Nelinearni spojevi definiraju se pomoću tzv. Zero-Length elementa koji je zadan pomoću dva čvora na istoj lokaciji. Nelinearnost se postiže pridruživanjem materijalnog modela ponašanja elementu odnosom sile i deformacije. U slučaju spoja između poda i zidova, glavni izvor nelinearnog ponašanja može biti proklizavanje drvenih greda ili eventualno otkazivanje spoja. Trenje raste do granične vrijednosti, nakon čega dolazi do klizanja i povećanja pomaka. Moguća nelinearnost spoja između zidova može se javiti otvaranjem vertikalnih pukotina, što može dovesti do gubitka stabilnosti zida izvan njegove ravnine. Takvi spojevi se mogu modelirati dodjeljivanjem elemenata rubnim čvorovima zidova, uz pridruživanje odgovarajućih vlačnih svojstava. Maksimalna sila koju spoj može prenijeti u vlačnom smjeru može se odrediti integriranjem vlačnih sila i trenja između zidova, dok se ponašanje u tlaku smatra linearnim [16]. Nelinearni kontakt između zgrada također je moguće zadati, ali to područje za zgrade u blokovima u Zagrebu nije još istraženo te će biti tema daljnjeg istraživanja.



Slika 4 Definicija nelinearne veze zid-zid i ploča-zid [15]

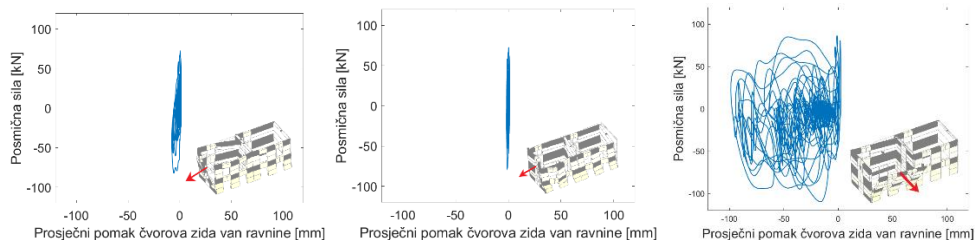
3. Rezultati

Premda je u analizi uzeto u obzir ponašanje elemenata u ravnini i izvan nje, analizirani su prosječni pomaci najkritičnijih zidanih elemenata isključivo izvan ravnine dviju zgrada u nizu te međusobno uspoređeni za slučaj kada se zgrade promatraju kao zasebne jedinice i slučaj kada je spoj između njih zadan kao idealno kruti. Unutar tih slučajeva promatra se utjecaj

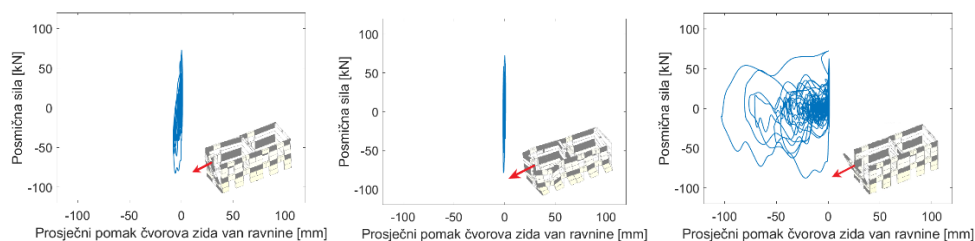
spojeva između zidova te spojeva poda i zida. Varijante nelinearnih spojeva prikazane su u tablici 1. U prvoj varijanti zgrade su promatrane kao zasebne, bez kontakta između njih, te su za desnu zgradu veze zid-zid i pod-zid zadani kao idealno kruti dok su za lijevu zgradu promatrani pomaci kada je spoj zid-zid zadani kao nelinearan a ostali spojevi idealno kruti, spoj pod-zid nelinearan a ostali spojevi idealno kruti te za kombinaciju zid-zid i pod-zid nelinearni. Istim principom analizirane su zgrade s idealno krutim spojem između jedinica. Na slikama 5 i 6 prikazani su odnosi posmične sile i prosječnog pomaka čvorova kritičnih zidova za svaku varijantu idealno krutih i nelinearnih spojeva. Vidljivo je kako za svaku od kombinacija otkazuje različiti element. Kod slučaja nelinearnih spojeva zid-zid vidljivo je otvaranje vertikalne pukotine na spoju fasadnog i zabatnog zida te otkazivanje elementa u x smjeru. U slučaju nelinearnih spojeva pod-zid pomaci ne dosežu otkazivanje van ravnine, a najveći utjecaj na otkazivanje elemenata izvan ravnine ima kombinacija kada su spojevi pod-zid i zid-zid zadani kao nelinearni. U slučaju samostojećih zgrada izvan ravnine otkazuje fasadni zid u y smjeru, dok za povezane zgrade otkazuje zabatni u x smjeru. Slike 7 i 8 prikazuju prosječne pomake kritičnih elemenata u vremenu po smjerovima otkazivanja.

Tablica 1 Kombinacije nelinearnih spojeva lijeve zgrade u nizu

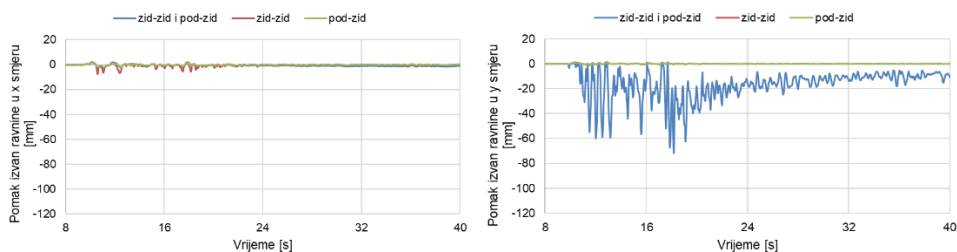
spoj	Zgrade bez spoja		Zgrade spojene krutim spojem	
	zid-zid	pod-zid	zid-zid	pod-zid
1	X		X	
2		X		X
3	X	X	X	X



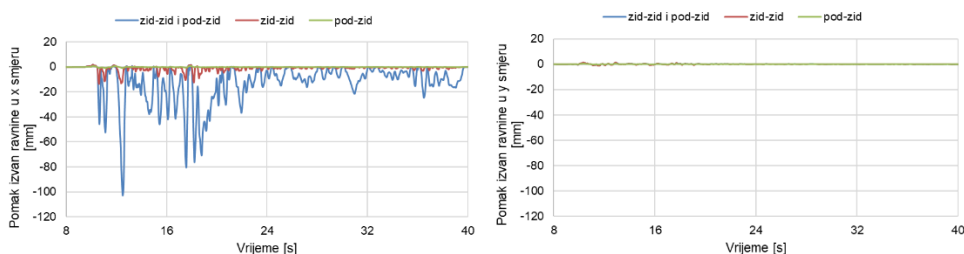
Slika 5 Odnosi posmične sile i prosječnog pomaka elemenata izvan ravnine za slučaj nepovezanih zgrada za kombinacije redom 1, 2 i 3



Slika 6 Odnosi posmične sile i prosječnog pomaka elemenata izvan ravnine za slučaj povezanih zgrada idealno krutim spojem za kombinacije redom 1, 2 i 3



Slika 7 Pomaci izvan ravnine u vremenu za slučaj odvojenih zgrada



Slika 8 Pomaci izvan ravnine u vremenu za slučaj povezanih zgrada

4. Zaključak

U ovom radu analiziran je utjecaj nelinearnih i krutih spojeva između konstrukcijskih elemenata, kao i idealno krutih ili nepostojećih spojeva između zgrada u nizu, na njihovo seizmičko ponašanje s naglaskom na otkazivanje elemenata izvan ravnine. Dobiveni rezultati ukazuju na značajnu ovisnost procjene mehanizma otkazivanja o načinu modeliranja tih spojeva. Pokazalo se da kod postojećih zidanih zgrada spoj između podova i zidova, spoj među zidovima te kontakt između susjednih zgrada ne bi trebalo u svim slučajevima smatrati idealno krutima. Stvarno stanje spoja postojećih zidanih zgrada trebalo bi se uzeti u obzir te po potrebi, vrlo ih je važno modelirati kao nelinearne. Najveći utjecaj na ponašanje konstrukcije uočen je kod kombinacije u kojoj su spojevi zid–zid i pod–zid modelirani kao nelinearni, a zgrade povezane kruto. U slučaju postojećih zgrada u blokovima, vrlo je teško eksperimentalno ispitati mehaničke karakteristike spojeva, te to područje u slučaju zagrebačkih blokova trenutno nije dovoljno istraženo. S obzirom da modeliranje spoja između zgrada kao idealno kruto nije uvijek primjenjivo, za buduća istraživanja zgrada u blokovima na području Zagreba preporučuje se uključivanje nelinearnog kontakta. Zanemarivanje utjecaja nelinearnih spojeva na rezultate može rezultirati netočnom procjenom seizmičke otpornosti zgrade i krivom procjenom mehanizma oštećenja, što je osobito važno pri projektiranju mjera za pojačanje konstrukcije. U radu je predstavljen idealiziran slučaj u pogledu geometrije zgrada, te se za buduće istraživanje planiraju uzeti u obzir geometrijski parametri poput različitog broja etaža, različitih visina etaža, te različitih tlocrtnih oblika i dimenzija susjednih zgrada, za koje se očekuje da imaju utjecaj na otkazivanje elemenata van ravnine.

Literatura

- [1] Simović, V. (2000). 'Potresi na zagrebačkom području', *Građevinar*, 52(11.), str. 637-645. Preuzeto s: <https://hrcak.srce.hr/13067> (Datum pristupa: 01.05.2025.)
- [2] Šavor Novak, M., Uroš, M., Atalić, J., Herak, M., Demšić, M., Baniček, M., Lazarević, D., Bijelić, N., Crnogorac, M., Todorić, M. (2020). Zagreb earthquake of 22 March 2020 – preliminary report on seismologic aspects and damage to buildings, *GRAĐEVINAR*, 72 (10), 843-867, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2966.2020>
- [3] Šavor Novak, M., Uroš, M., Demšić, M., Jevtić Rundek, R., Pilipović, A. and Atalić, J., 2024. Detailed structural typology of existing substandard masonry and reinforced concrete buildings in the city of Zagreb, Croatia. *Buildings*, 14(11), p.3644. <https://doi.org/10.3390/buildings14113644>
- [4] Crnogorac M. Izvorni i stečeni nedostaci konstrukcija zgrada. U: Uroš M., Todorić M., Crnogorac M., Atalić J., Šavor Novak M., Lakušić S. (ur.) Potresno inženjerstvo – obnova zidanih zgrada. Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; 2021, str. 219-243.
- [5] D'Altri, Antonio Maria, Vasilis Sarhosis, Gabriele Milani, Jan Rots, Serena Cattari, Sergio Lagomarsino, Elio Sacco, Antonio Tralli, Giovanni Castellazzi, and Stefano de Miranda: Modeling Strategies for the Computational Analysis of Unreinforced Masonry Structures: Review and Classification, *Archives of Computational Methods in Engineering* 27 (2020), pp. 1153-1185, doi: 10.1007/s11831-019-09351-x.
- [6] D'Altri, Antonio Maria, Vasilis Sarhosis, Gabriele Milani, Jan Rots, Serena Cattari, Sergio Lagomarsino, Elio Sacco, Antonio Tralli, Giovanni Castellazzi, and Stefano de Miranda: Modeling Strategies for the Computational Analysis of Unreinforced Masonry Structures: Review and Classification, *Archives of Computational Methods in Engineering* 27 (2020), pp. 1153-1185, doi: 10.1007/s11831-019-09351-x.
- [7] EN 1998-1. Eurocode 8. Design provisions for earthquake resistance of structures. Part 1-1: General rules – seismic actions and general requirements for structures. CEN, Brussels, Belgium; 2004.
- [8] NTC 2008. Decreto Ministeriale 14/1/2008. Norme tecniche per le costruzioni. Ministry of Infrastructures and Transportations. G.U. S.O. n.30 on 4/2/2008; 2008 [na talijanskom].
- [9] Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A. & Cattari, S., 2013. TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering Structures*, 56, pp.1787–1799.
- [10] EESD-EPGL Github Repository, <https://github.com/orgs/eesd-epfl/repositories>
- [11] OPENSEES, <https://opensees.berkeley.edu/>
- [12] Luzi, L., Lanzano, G., Felicetta, C., D'Amico, M. C., Russo, E., Sgobba, S., ... ORFEUS Working Group 5. (2020, July 10). Engineering Strong Motion Database (ESM), version 2.0 (Version 2.0). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/ESM.2>

- [13] Vanin, F., Penna, A. & Beyer, K., 2020. A three-dimensional macroelement for modelling the in-plane and out-of-plane response of masonry walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49(7), pp.682–704. doi:10.1002/eqe.3277.
- [14] Penna, A., Lagomarsino, S. & Galasco, A., 2014. A nonlinear macroelement model for the seismic analysis of masonry buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43, pp.159–179. doi:10.1002/eqe.2335.
- [15] Perić, L. and Matorić, I., 2020. *Reliability of traditional timber-floor masonry buildings to seismic action*. *Građevinar*, 72(10), pp.881–892. <https://doi.org/10.14256/JCE.2965.2020>
- [16] Vanin, F., Penna, A. & Beyer, K., 2020. Equivalent-frame modeling of two shaking table tests of masonry buildings accounting for their out-of-plane response. *Frontiers in Built Environment*, 6, p.42. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00042>.