

Procjena seizmičke otpornosti zidanih zgrada uporabom vizualnog programiranja prema normativno propisanim kriterijima pravilnosti konstrukcije

Karlo Ožić¹, doc. dr. sc. Mislav Stepinac², Anthony Ninčević³

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, karlo.ozic@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, mislav.stepinac@grad.unizg.hr

³Green Tech Construction d.o.o., anthony@greentech.hr

Sažetak

U Europi, a tako i u Hrvatskoj, tema procjene seizmičke otpornosti veoma je aktualna zbog nedavnih događaja koji su utjecali na podizanje svijesti. U ovom radu prikazana je mogućnost uporabe modernih alata pri procjeni jednostavne seizmičke otpornosti građevina. Koristeći Grasshopper, parametarski programski paket sadržan u Rhinoceros 3D-u, analizira se utjecaj konceptualnog oblikovanja na ponašanje konstrukcije. Provodi se analiza geometrijskih karakteristika konstrukcija prema kriterijima pravilnosti postavljenih u Eurokodu 1998-1. Najbitniji ispitani parametri su simetrija, kompaktnost, vitkost tlocrta i ekscentričnost konstrukcije. Također, rad je fokusiran na optimizaciju tlocrta postojećih konstrukcija. Cilj optimizacije je smanjenje udaljenosti između centra mase i centra krutosti tlocrta zgrade kako bi se smanjio utjecaj torzije na konstrukciju. U radu se ispituju mogućnosti korištenja parametarskog programiranja te se postavljaju temelji za daljnje istraživanje. *Ključne riječi: procjena stanja, parametarsko programiranje, Grasshopper, potres, seizmička otpornost, konceptualno oblikovanje, zidane konstrukcije*

Use of visual programming in seismic assessment of masonry buildings according to normatively prescribed criteria of construction regularity

Abstract

In Europe, as well as in Croatia, the topic of seismic resistance assessment is very relevant due to a large number of seismically active areas. This paper presents the possibility of using modern tools in assessing the seismic resistance of buildings. Using Grasshopper, a parametric software package contained in Rhinoceros 3D, the impact of conceptual design on structural behavior is analyzed. The analysis of geometrical characteristics of structures according to the regularity criteria set in Eurocode 1998-1 is carried out. The most important examined parameters are symmetry, compactness, slenderness of the floor plan and eccentricity of the construction. Also, the work is focused on optimizing the floor plan of existing structures. The goal of optimization is to reduce the distance between the center of mass and the center of rigidity of the building floor plan in order to reduce the impact of torsion on the structure. The paper examines the possibilities of using parametric programming and lays the foundations for further research.

Key words: assessment, parametric programming, Grasshopper, earthquake, seismic resistance, conceptual design, masonry constructions

1 Uvod

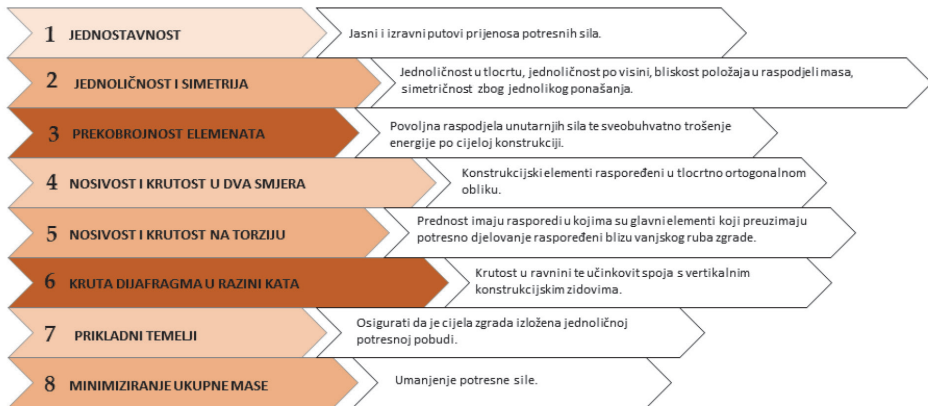
Potaknuti s nedavnim potresima u Hrvatskoj, odnosno Zagrebu (magnituda $M_L = 5,5$, intenziteta VII, u epicentru, prema EMS-98 skali [1]), Petrinji i okolici u 2020. (magnituda $M_L = 6,2$, intenziteta VIII-IX, u epicentru, prema EMS-98 skali [2]), pojavila se velika potreba za brzim i upotrebljivim procjenama postojećih građevina [3]. Prema rezultatima istraživanja Statističkih godišnjaka, građevinski fond Hrvatske sastoji se od više od 75 % građevina koje su starije od 30 godina te 40 % građevina starijih od uporabnog životnog vijeka koji iznosi 50 godina. Uz to, na područjima pogođenih potresom postoji veliki dio povijesnih zidanih građevina (većina starijih od 50 godina) [4] koje su još jednom pokazale znatnu podložnost teškim oštećenjima pri djelovanju potresa. Ubrzo nakon potresa, ukazala se potreba za jednostavnim i brzim metodama za procjenu postojećih građevina [5], a koje će u dostatnoj mjeri prikazati indikativno ponašanje promatranih građevina. Nakon nedavnih potresa donesen je Zakon o obnovi [6] u kojem inženjeri moraju dokazati ponašanje zidanih konstrukcija na pobudu potresa kroz elaborat ocjene postojećeg stanja. Potrebno je adekvatno modelirati i opteretiti konstrukciju kako bi je analitički pristupom provjerili. Nakon zagrebačkog potresa objavljeno je nekoliko relevantnih studija slučajeva s primjerima modeliranja zidanih konstrukcija [7-12]. Naposljetku, ako konstrukcija nije u skladu sa zahtjevima postavljenim u [13], potrebno je napraviti i projekt sanacije. U svrhu učinkovitijeg procesa, automatiziranja i implementacije tehnologije u proces procjene, razvijena je ideja brze analize konstrukcijskih parametara građevine pomoću geometrijskih zahtjeva definiranih u konstrukcijskim Eurokodovima [14] te posebno u hrvatskom nacionalnom dodatku [15]. Također, takva analiza bi dala brzu povratnu informaciju arhitektima i građevinskim inženjerima o rasporedu zidova, površini zidova i konceptualnom oblikovanju građevine. Pomoću rezultate analize olakšao bi se proces odabira najprikladnijih zidova za optimizaciju tlocrta što bi svakako dovelo do uštede vremena u projektiranju i izravnog smanjenja troškova.

2 Konceptualno oblikovanje u seizmičkim područjima

Konceptualno oblikovanje u seizmičkim područjima temelji se na načelima i zahtjevima postavljenim u Eurokodu 1998-1 [14] "Kriteriji pravilnosti konstrukcije" prikazanom grafički na slici 1.

Poseban osvrt dan je na točku 4.2.3.2. "Kriterij pravilnosti u tlocrtu" [14]. Na temelju analize uvjeta pravilnosti tlocrta prikazan je utjecaj oblika tlocrta i rasporeda zidova na ponašanje zgrade u potresu fokusirajući se analizu perioda različitih tlocrtnih oblika. Kriterij pravilnosti u tlocrtu navodi da zgrade koje su kategorizirane kao pravilne u tlocrtu moraju ispuniti sve uvjete navedene u točki 4.2.3.2. [14]. Obzirom da se ovaj rad bavi zidanim zgradama, potrebno je istaknuti i "Posebna pravila za

zidane zgrade“ koja određuju tlocrtne uvjete koje zidana zgrada mora ispunjavati, a to su u skladu s Eurokodom [15]: a) tlocrtni raspored nosivih elemenata mora biti kompaktan, b) omjer između duljine manje strane i duljine duge strane u tlocrtu ne smije biti manji od minimalne vrijednosti, $\lambda_{\min} = 0,25$, c) površina projekcija udubljenja iz pravokutnog oblika ne smije biti veća od postotka $p_{\max} = 15\%$ ukupne površine poda iznad razmatrane razine.



Slika 1. Kriteriji pravilnosti konstrukcije iz Eurokoda 1998-1 [14]

3 Parametarski model

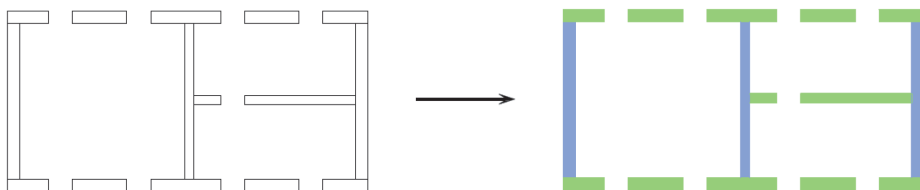
Parametarsko modeliranje vuče duboke korijene iz povijesti arhitekture i odnosi se na rješavanje problema u kojem se objekti diskretiziraju na parametre i parametarske jednadžbe koje definiraju odnos između ulaznih i izlaznih varijabli koje utječu na oblikovanje objekta. U kasnom 19. stoljeću arhitekti kao što su Antoni Gaudi i Frei Otto započinju korištenje parametarskog modeliranja u Europi. Koristili su ga kako bi projektirali složene konstrukcije koje se ne mogu dobiti ručnim proračunima. Za parametarsko programiranje korišten je vizualni programski jezik i softverski paket Grasshopper koji se temelji Microsoftovim programskim jezicima VB.NET i C # (C oštro) i postoji kao dodatak Rhinoceros 3D. Skup komponenti koje su povezane jedna s drugom preko ideje “box and arrow” čine smislenu cijenu programa. Primjenu programskog paketa već možemo vidjeti u području procjene zidanih konstrukcija s nekim drugačijim pristupom [16, 17].

Kako bi se analizirale razne karakteristike zgrade, parametarski model se sastoji od skupina komponenti od kojih svaka provodi određenu vrstu provjere:

- Karakteristike elemenata tlocrta
- Proračun središta mase zgrade
- Proračun središta krutosti zgrade
- Proračun vitkosti zgrade

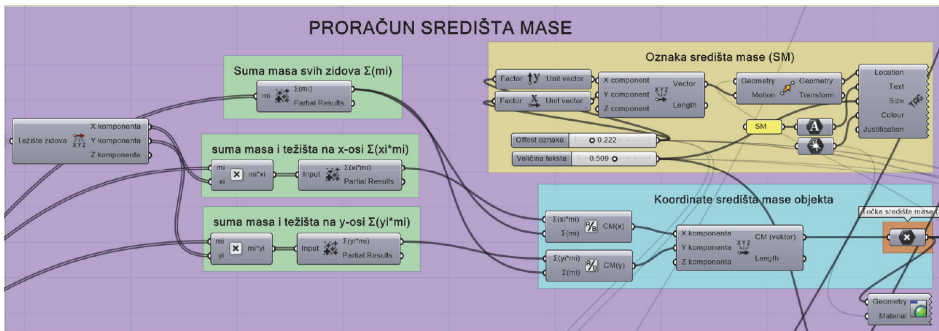
- Funkcija pojačanja zidova + optimizacija tlocrta
- Proračun jednolikosti zgrade
- Provjera minimalne ukupne površine nosivih zidova u oba glavna smjera
- Provjera proračunske debljine zidova
- Provjera omjera visine zida i njegove proračunske debljine
- Provjera omjera proračunske visine i proračunske debljine zida
- Kompaktnost tlocrta
- Proračun vlastitih frekvencija – modul Karamba
- Ispis rezultata – modul Pterodactyl.

Jedini dio procesa koji korisnik obavlja ručno je analiza tlocrta. Analizom uvezenog tlocrta u Rhino, korisnikov dio posla završava izuzev unošenja nekoliko parametara za kasniji proračun. Podaci za sve provjere su instantni bez dodatnih ručnih proračuna ili daljnjeg uplitanja u proces. Zidovi unutar tlocrta se moraju prilagoditi sintaksi kojom ih Grasshopper analizira. Obzirom da se analiziraju samo nosivi zidovi, svi zidovi koji ne doprinose nosivosti na horizontalne sile su uklonjeni s tlocrta. Nakon toga je potrebno zidove podijeliti na zidove koji se pružaju u x-smjeru i y-smjeru (slika 2). Na početku provjera potrebno je iz tlocrta dobiti izlazne parametre. Nakon definiranja geometrijskih podataka može se nastaviti u provjeru ostalih komponenti. Iz dobivenih podataka može se proračunati središte mase (slika 3) i središte krutosti tlocrta.



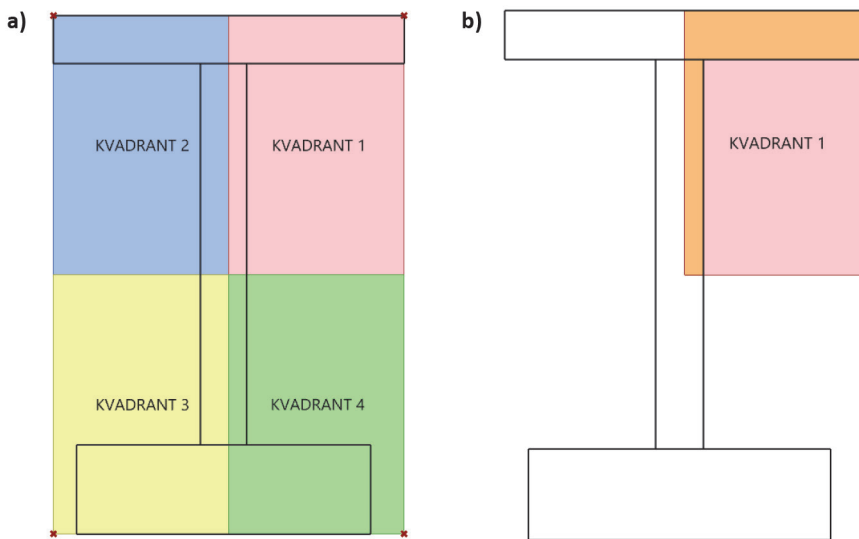
Slika 2. Zidovi u x (zeleno) i y smjeru (plavo)

Također, s tim podacima se može izračunati udaljenost između središta mase i krutosti. Što je ta udaljenost veća, tj., što je vektor udaljenosti između dvije točke veći, postoji i velika mogućnost izrazito nepovoljne torzije objekta prilikom djelovanja horizontalnih pobuda. Ako projektant smatra da je udaljenost prevelika, konstrukciju je moguće pojačati, odnosno jedna od opcija je optimizacija tlocrta. Funkcija optimizacije tlocrta kao ulazni podatak prima listu sa svim zidovima u tlocrtu. Primarna namjena funkcije je izolirati bilo koji zid indexa (i) iz liste sa n elemenata, povećati njegovu širinu i vratiti ga nazad u listu tako da zamijeni prvotni element koji se pojačava. Jednom kad se izolira zid, manipulira se dimenzijama tako da se manja dimenzija (širina) poveća za Δx , vrijednost koju zada korisnik. Na taj način smanjuje se udaljenost između središta mase i krutosti čime se optimizira tlocrt i ponašanje građevine.

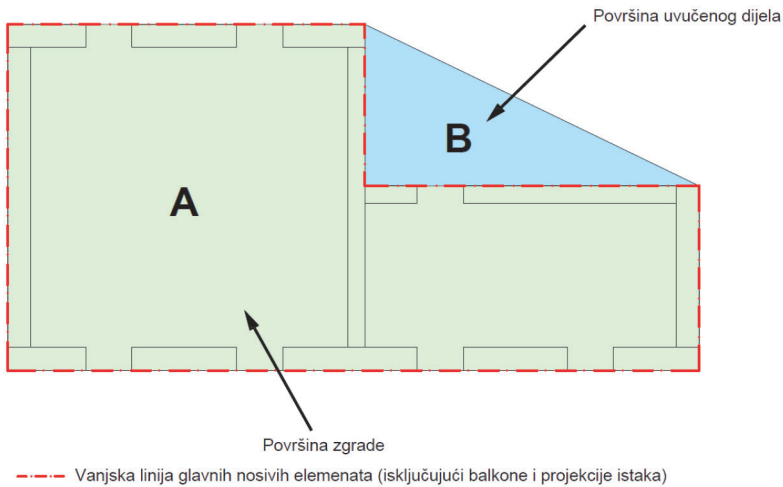


Slika 3. Prikaz sučelja za komponentu “Proračun središta mase”

Sljedećim korakom provjerava se jednoličnost (slika 4) i kompaktnost građevine (slika 5). Za provjeru, jednoličnost zgrada se dijeli u četiri dijela (slika 4.a) te se za svaki kvadrant gleda površina zidova unutar tog kvadranta (slika 4.b). Ako se površine zidova u dva kvadranta u odnosu na os x ili y razlikuju manje od 10 % od druga dva kvadranta, presjek se smatra jednoličnim. Ovaj postotak nije definiran normom te je podložan i drugačijim interpretacijama. Kompaktnost građevine se provjerava jednostavnim zahtjevom prema Eurokodu HRN EN-1998-1:2011 [14]. Površina uvučenog dijela građevine mora biti manja od 5 % ukupne površine građevine. Potrebne geometrijske zahtjeve za zidove prema Eurokodu može se vidjeti u tablici 1. Također, uzima se u obzir i zahtjev iz Nacionalnog dodatka [18] za minimalnu površinu poprečnih presjeka nosivih zidova u svakom smjeru izražene kao postotak bruto površine kata za “jednostavne zidane zgrade”.



Slika 4. Jednoličnost građevine



Slika 5. Kompaktnost građevine ($B/A < 5\%$ - građevina je kompaktna) [14]

Tablica 1. Preporučeni geometrijski zahtjevi za nosive zidove[14]

Tip zida	$t_{ef,min}$ [mm]	$(h_{ef}/t_{ef})_{max}$	$(l/h)_{min}$
Nearmirano sa zidnim elementima od prirodnog kamena	350	9	0,
Nearmirano sa svim drugim tipovima zidnih elemenata	240	12	0,4
Nearmirano sa svim drugim tipovima zidnih elemenata za malu seizmičnost	170	15	0,35
Omeđeno zižde	240	15	0,3
Armirano zižde	240	15	nema ograničenja

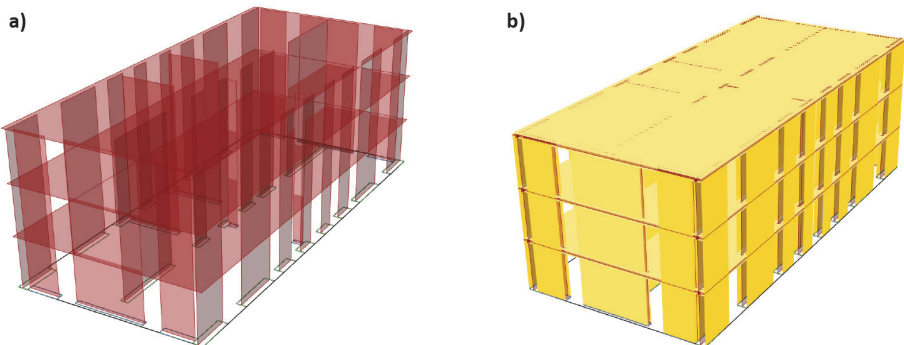
Upotrijebljeni simboli imaju sljedeće značenje:
 t_{ef} – debljina zida (vidjeti normu EN 1996-1-1:2004), h_{ef} – proračunska visina zida (vidjeti normu EN 1996-1-1:2004), h – veća svijetla visina otvora uz zid, l – duljina zida

Ako nosivi zidovi ispunjavaju sve geometrijske zahtjeve, sljedeći korak je izračunavanje vlastitih oblika i frekvencija. Kako bi ih mogao izračunati, korisnik postavlja nekoliko ulaznih parametara. Budući da se radi o nosivim zidovima koji se protežu od podnožja do vrha zgrade, moguće je podići cijeli model zgrade definiranjem sljedećih ulaznih parametara: katnost, visina svake etaže, visina (debljina) zgrade, ploča i broj izračunatih modova. Nakon 3D modela (slika 6.a) s točnim rasporedom zidova, ploča, visina poda i katova potrebno je definirati još nekoliko stvari. Debljine zidova se automatski učitavaju s popisa tlocrtnih zidova, a za definiranje elementa potrebno je definirati njegov presjek i spojiti ga s ravnim površinama zidova i ploča u ravninskom modelu. Na taj se način od elemenata konstruira mrežasti model koji

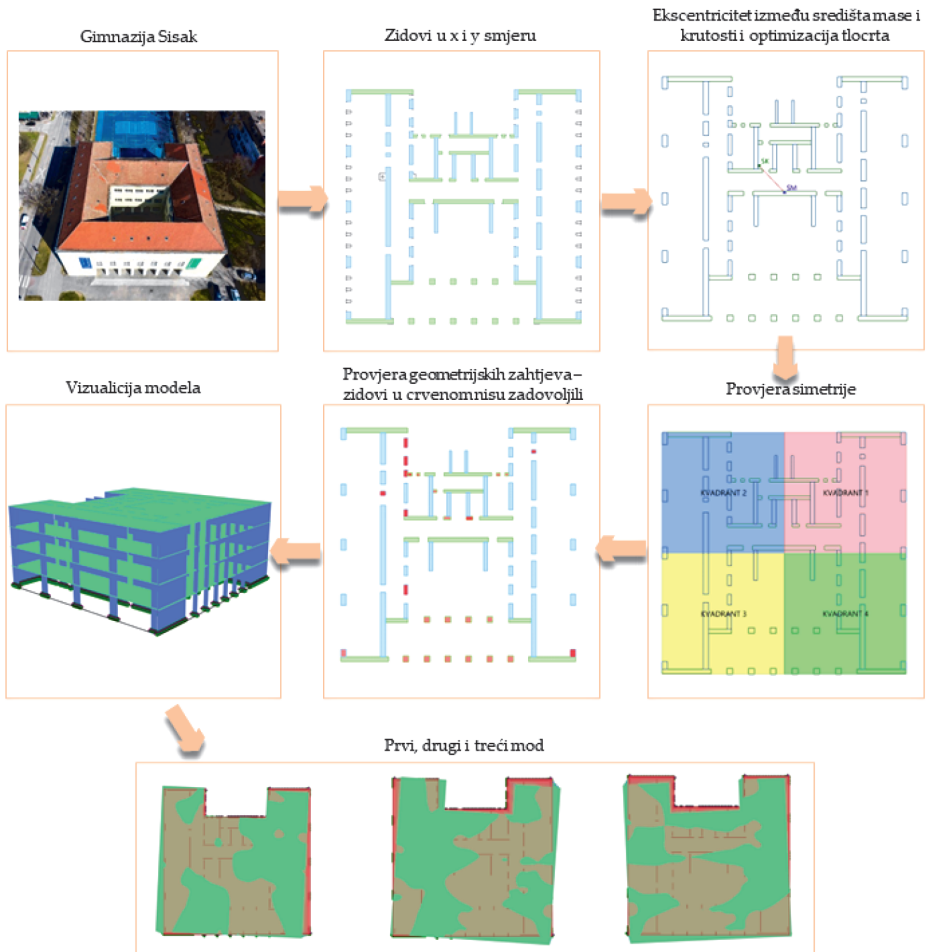
zahtijeva definiranje ležajeva kako bi se dobio konačni model (slika 6.b). Za prikaz rezultata nakon analize, izabran je plug-in Karamba [19] koji nudi module s kojima se mogu vizualizirati načini vibracija zgrade i deformacije točaka u sva 3 glavna smjera koordinatnog sustava. Za ispis rezultata u pdf formatu, modul Pterodactyl prima izlazne parametre funkcija koje želimo ispisati kao ulazne parametre. Svi rezultati s gore navedenim uvjetima ispisuju se, automatski u stvarnom vremenu, u odnosu na odabrani tlocrt.

4 Studija slučaja

Današnja zgrada Gimnazije Sisak sagrađena je tridesetih godina prošlog stoljeća. Škola s atrijem u središnjem dijelu ukupne je površine cca 1.500 m². Zgrada Gimnazije Sisak je zidana i ima podrum, prizemlje i dva kata. Svi nosivi zidovi izvedeni su od pune opeke starog formata 29 (30) × 15 (14) × 6,5 cm, debljine zidova su 60 i 80 cm u podrumu, te 50 i 60 cm u prizemlju i na katu. Pregradni zidovi su izrađeni od šuplje blok opeke debljine 15 cm. Na slici 7 prikazan je tijek rada u softveru te izlazni podaci nakon analize građevine.



Slika 6. Ravninski model i krajnji model



Geometrijski zahtjevi nisu zadovoljeni	Ekscentricitet između CM i CK	Simetrija	Kompaktan oblik	Površina zidova	Torzijski nefleksibilan
25 zidova	5, 6 m	X smjer ✘ Y smjer ✔	✔	X smjer ✔ Y smjer ✘	✔

Slika 7. Tijek rada za studiju slučaja

5 Zaključak

Zidane konstrukcije se i danas grade radi raznih prednosti poput vatrootpornosti, toplinske i zvučne izolacije te naposljetku ekonomskih aspekata. Oko 70 % građevina u svijetu izvedeno je kao zidane konstrukcije [20], a slična procjena vrijedi i u Hrvatskoj. Svakako treba uzeti u obzir da je u Hrvatskoj velika većina zidanih građevina izvedena prije prvih potresnih normi (1960-tih) te su uglavnom građene bez betonskih elemenata u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Iz tog razloga su nam nedavni potresi u Zagrebu i Petrinji ponovno pokazali potrebu što brže provjere sigurnosti i upotrebljivosti zgrada. Obzirom na sporiji razvoj i primjenu tehnologije u građevinskom sektoru, prikazan je nekonvencionalan pristup s primjenom suvremenih alata u analizi zgrada. Predstavljan je primjer automatizacije procesa verifikacije zgrade prema postavljenim seizmičkim zahtjevima. Korišten je Grasshoper softver u kojem je uspješno programiran kod pomoću kojeg se uz jednostavni uvoz podataka kao izlazne podatke dobiva analiza seizmičke otpornosti po kriterijima pravilnosti konstrukcije.

Osim komponenti geometrijskih karakteristika, u razvijeni model se mogu implementirati različiti skupovi podataka. Primjerice, vrijednosti karakteristika materijala dobivene razornim ili polurazornim metodama mogu se vrlo lako ugraditi u postojeće modele. Zanimljiva komponenta od strane građevinske struke bila bi nadogradnja modela različitim tehnikama i materijalima kako bi se pojačala postojeća konstrukcija (npr. FRP, FRCM, itd.). Potresna oštetljivost preko parametarske analize još je jedan od izazova koji se može rješavati parametarskim vizualnim programiranjem. Što se tiče održivosti, dodatni modul koji bi izračunao količinu ugrađenog (ili uklonjenog) CO₂ bio bi vrlo koristan za predstavljanje europskih ciljeva održivog razvoja. Također, implementacija cijene obnove može biti jedna od komponenta modula. Daljnjim razvojem ovog modela moguće je izraditi alat koji će pomoći arhitektima u preliminarnom odabiru tlocrta i rasporeda zidova bez poznavanja principa statičkog proračuna i seizmičkih zahtjeva na konstrukciju. Mogućnosti nadogradnje razvijenog modela su brojne, a model se praktički beskonačno može poboljšavati.

Zahvala

Autori se zahvaljuju Hrvatskoj zakladi za znanost na financijskoj potpori istraživanja kroz projekt ARES: Procjena stanja i obnova postojećih građevina – Razvoj suvremenih metoda za zidane i drvene konstrukcije (UIP-2019-04-3749).

Literatura

- [1] Stepinac, M.; Lourenco, P.B.; Atalić, J.; Kišiček, T.; Uroš, M.; Baniček, M.; Šavor Novak, Damage classification of residential buildings in historical downtown after the ML5.5 earthquake in Zagreb, Croatia in 2020 Mislav. .
- [2] Program mjera obnove zgrada oštećenih potresom, 2021.
- [3] C. Kišiček, T.; Stepinac, M.; Renić, T.; Hafner, I.; Bedon, Methods for the assessment of critical properties in existing masonry structures under seismic loads-the ARES project, Applied Sciences (Switzerland), vol. 10, no. 5. 2020, doi: 10.3390/app10051576.
- [4] Benedetti, D., Benzoni, G., Parisi M.A., Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei, Earthq. Eng. Struct. Dyn., vol. 16, no. 2, pp. 183–201, Feb. 1988, doi: <https://doi.org/10.1002/eqe.4290160203>.
- [5] Goretti, A., Di Pasquale, G., An overview of post-earthquake damage assessment in Italy. Earthquake Eng. Res. Inst., Earthquake Eng. Res. Inst. (EERI) Invitational workshop report, Pasadena, CA, USA, 18 pp. 2002, [Online]. Available: https://www.eeri.org/~eeriorg/lfe/pdf/italy_molise_goretti_pasadena_paper.pdf.
- [6] Law on the Reconstruction of Earthquake-Damaged Buildings in the City of Zagreb, Krapina-Zagorje County and Zagreb County (NN 102/2020). 2020, [Online]. Available: <https://www.zakon.hr/z/2656/Zakon-o-obnovi-zgrada-oštećenih-potresom-na-području-Grada-Zagreba-%2C-Krapinsko-zagorske-županije-%2C-Zagrebačke-županije-%2C-Sisačko-moslavačke-županije-i-Karlovačke-županije>.
- [7] Lulic, L.; Ožić, K.; Kišiček, T.; Hafner, I.; Stepinac, Post-Earthquake Damage Assessment—Case Study of the Educational Building after the Zagreb Earthquake, Sustainability, vol. 13, no. 6353, 2021.
- [8] Hafner, I., Lazarević, D., Kišiček, T., Stepinac M., Post-Earthquake Assessment of a Historical Masonry Building after the Zagreb Earthquake—Case Study, Buildings, vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/buildings12030323.
- [9] Milić, M., et al., Assessment and rehabilitation of culturally protected prince rudolf infantry barracks in zagreb after major earthquake, Buildings, vol. 11, no. 11, 2021, doi: 10.3390/buildings11110508.
- [10] Moretić A., Stepinac M., Lourenço, P.B., Seismic upgrading of cultural heritage – A case study using an educational building in Croatia from the historicism style, Case Stud. Constr. Mater., vol. 17, no. May, p. e01183, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01183.
- [11] Perić, Lj., Matorić, I., Pouzdanost tradicionalnih zidanih građevina s drvenim stropovima na potresno djelovanje, vol. 72, pp. 869–893, 2020.
- [12] Pojatina, J. Barić, D. Anđić, D., Bjegović, D., Obnova građevinske konstrukcije stambene zgrade u Zagrebu nakon potresa 22. ožujka 2020., vol. 73, pp. 633–648, 2021.

- [13] Ministarstvo graditeljstva i prostornoga uređenja, Tehnički propis o izmjeni i dopunama tehničkog propisa za građevinske konstrukcije, vol. 2020, pp. 1–4, 2012.
- [14] HRN EN 1998-1:2011 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1:2004+AC:2009).
- [15] HRN EN 1998-3:2011/NA:2011 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings - National Annex. .
- [16] Funari, M.F., Mehrotra, A., Lourenço, P.B., A tool for the rapid seismic assessment of historic masonry structures based on limit analysis optimisation and rocking dynamics, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 3. pp. 1–22, 2021, doi: 10.3390/app11030942.
- [17] Funari, M.F., Hajjat, A.E., Masciotta, M.G., Oliveira, D.V., Lourenço, P.B., A Parametric Scan-to-FEM Framework for the Digital Twin Generation of Historic Masonry Structures, *Sustainability*, vol. 13, no. 11088.
- [18] HRN EN 1998-1:2011/NA:2011 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings - National Annex. .
- [19] Preisinger, C., Linking structure and parametric geometry, *Architectural Design*, vol. 83, no. 2. pp. 110–113, 2013, doi: 10.1002/ad.1564.
- [20] Babatunde, S.A., Review of strengthening techniques for masonry using fiber reinforced polymers, *Compos. Struct.*, vol. 161, pp. 246–255, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.10.132.