

Nelinearna statička analiza ponašanja postojeće zidane zgrade na potresno djelovanje

Mladen Kožul

Sveučilište u Mostaru, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, prof. dr. sc.
mladen.kozul@fgag.sum.ba

Valerija Kopilaš

Sveučilište u Mostaru, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, doc. dr. sc.
valerija.kopilas@fgag.sum.ba

Valentina Ivanković Mihalj

Addiko bank, mr. sc., valentina.ivankovic.mihalj@fgag.sum.ba

Sažetak: Na području Hercegovine nalazi se veliki broj zidanih objekata, čija starost premašuje 50 godina. Uglavnom se radi o manjim objektima, s jednom do dvije etaže, dok su nosivi zidovi uglavnom od obrađenog kamena u vapnenom mortu. Malo kasnije javljaju se i veći objekti s nosivim zidovima od opeke, i betonskih blokova u produžnom mortu. Stropne konstrukcije uglavnom se sastoje od drvenih hrastovih greda, oslonjenih na nosive zidove, s daščanom oplatom s gornje strane i mortom, po pletivu od trske, s donje strane. Takve konstrukcije su iznimno osjetljive na potresno djelovanje, te gotovo sigurno ne bi mogle izdržati projektno potresno opterećenje, bez značajnih oštećenja i rušenja. U ovom radu izvršena je nelinearna statička analiza konstrukcije jednog takvog objekta. U prvoj analizi izvršena je provjera postojećeg stanja, a u drugoj provjera djelomično ojačane konstrukcije. Iz analize je vidljivo da takvo ojačanje značajno poboljšava nosivost, dok je povećanje deformabilnosti (duktilnosti) znatno manje zbog jako velike krutosti ovakvih konstrukcija.

Ključne riječi: zidani zidovi, potresno djelovanje, nelinearna statička analiza, ojačanje konstrukcije

Nonlinear static analysis of the behavior of an existing masonry building under seismic action

Abstract: In the territory of Herzegovina there is a large number of masonry buildings, the age of which exceeds 50 years. These are mostly smaller buildings, with one to two floors, while the load-bearing walls are mainly made of cut stone in lime mortar. Larger buildings with load-bearing walls made of bricks and concrete blocks in cement-lime mortar appeared a little later. The floor structures mainly consist of timber oak beams, supported by load-bearing walls, with boarding on the upper side and plaster, on reed netting, on the lower side. Such structures are exceptionally sensitive to seismic action, and almost certainly could not withstand the design seismic load without significant damage and collapse. A nonlinear static analysis of the structure of one such building was performed in this paper. A check of the existing condition was performed in the first analysis, and a check of the partially strengthened structure in the second. It is evident from the analysis that such strengthening significantly improves the bearing capacity, while the increase in deformability (ductility) is significantly smaller due to the very high stiffness of such structures.

Key words: masonry walls, seismic action, nonlinear static analysis, structural strengthening

1. UVOD

Na našem području nalazi se veliki broj građevina sa zidanim zidovima kao glavnim vertikalnim nosivim elementima. Stariji objekti građeni su uglavnom sa zidovima od obrađenog kamena u vapnenom mortu, dok se sredinom 60-tih godina prošlog stoljeća započinje s izgradnjom objekta sa zidovima od opeke normalnog formata, u produžnom mortu. Kasnije su u upotrebu ušli opekarski blokovi, kao i betonski i blokovi od lakog betona, različitih dimenzija. Ti objekti su uglavnom jednostavnog tlocrtnog oblika, te imaju visinsku pravilnost. Najčešće su to objekti s dvije etaže, a rjeđe (kasnije) se grade zidani objekti i do pet etaža.

Druga bitna konstrukcijska karakteristika ovakvih objekata jesu drvene međukatne konstrukcije, sačinjene od drvenih greda i daščane oplata. Grede su uglavnom od tvrdog drva (hrast), dok je daščana oplata od mekog drva (jela, smreka). Drveni stropovi imaju malu krutost u svojoj ravnini, kao i malu krutost na savijanje, te je njihova povezanost s nosivim zidovima slaba, što izravno utječe na loše ponašanje takvih konstrukcija pri potresnom djelovanju.

Pokazalo se tijekom vremena da su ovakvi objekti jako osjetljivi na potresna djelovanja, te da bi ih trebalo ojačati, kako to zahtijevaju suvremeni propisi (EC 8-3. dio [1]). Ojačanja se odnose na povećanje integriteta cijele konstrukcije (povezanost svih elemenata u jednu cjelinu-koncept kutije), zatim na povećanje nosivosti veza između zidova i međukatne konstrukcije i/ili konstrukcije krovništva. Povećanje krutosti međukatne konstrukcije u njezinoj ravnini također je česta potreba, kao i povećanje nosivosti i deformabilnosti zidova u njihovoj ravnini i okomito na nju. Ponekad je potrebno izvesti i ukrućenje same konstrukcije krovništva i poboljšati njezinu povezanost sa zabatnim zidovima.

Prije bilo kakve intervencije na konstrukciji objekta potrebno je izvršiti analizu njezinog postojećeg stanja (nelinearna statička analiza), te na temelju tih rezultata izvršiti ojačanje konstrukcije i verifikaciju dobivenih rezultata. Kako bi se to moglo izvesti nužno je poznavanje mehaničkih svojstava ugrađenih materijala, kao i mehanička svojstva ziđa i međukatnih konstrukcija [2, 9, 15].

Metode analize poboljšanja seizmičkog odziva običnih zidanih konstrukcija stalno se poboljšavaju. Prethodna dva-tri desetljeća koncept analize utemeljen na pomacima doveo je do povećane primjene nelinearnih statičkih metoda (pushover) [5, 7, 10]. Ove metode rezultiraju usporedbom kapaciteta pomaka i zahtijevanog kapaciteta, iz koje se mogu izvesti važni zaključci o ponašanju zidane konstrukcije i njezinom stanju, pod djelovanjem potresnog opterećenja.

2. KRATKI OPIS OBJEKTA

U ovom radu izvršena je nelinearna analiza konstrukcije jedne postojeće zgrade, izgrađene u pedesetim godinama prošlog stoljeća, te je analiziran utjecaj ojačanja konstrukcije dodavanjem čeličnih prednapetih šipki u razini međukatnih konstrukcija, te ojačanje pojedinih zidova na isti način. Zgrada ima gabarite 14.6x10.5m, te tri etaže, od kojih je jedna podrumaska. Strop iznad podruma je nadsvođen svodom od opeke, standardnog formata (25x12x6.5 cm). Zbog velike krutosti podrumske etaže i činjenice da je skoro u potpunosti ukopana u tlo, neće se uzeti u obzir pri analizi konstrukcije na potresno djelovanje. Također, naknadno dodan dio nad ulazom u prizemlje nije uzet u obzir zbog vrlo male krutosti u odnosu na izvorni objekt. Krovništvo je klasično dvovodno, s drvenom krovnom konstrukcijom od mekog drva. Pokrov je crijep. Stropna konstrukcija iznad prizemlja i kata sastoji se od drvenih hrastovih greda, na približnom osovinskom razmaku od 65 cm, i jednoslojne daščane oplata. Grede su oslonjene na uzdužne nosive zidove i može se uzeti da nisu dovoljno povezane s nosivim zidovima. Nosivi zidovi imaju debljinu od 50 cm, a izgrađeni su od opeke

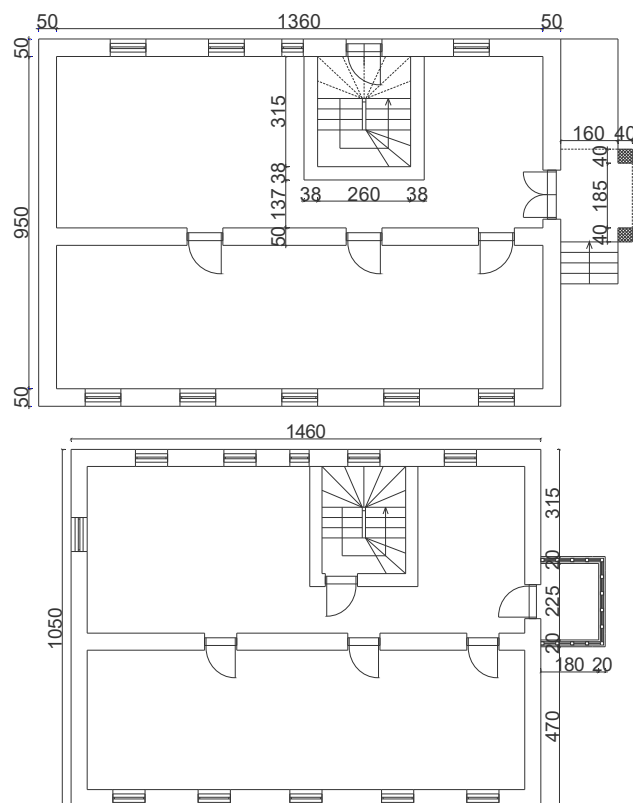
Kožul, M., Kopilaš, V., Ivanković Mihalj, V.

Nelinearna statička analiza ponašanja postojeće zidane zgrade na potresno djelovanje

normalnog formata. Vertikalnu komunikaciju između prizemlja i kata čini drveno spiralno stubište, uokvireno zidovima od opeke, debljine 38 cm (slika 2).



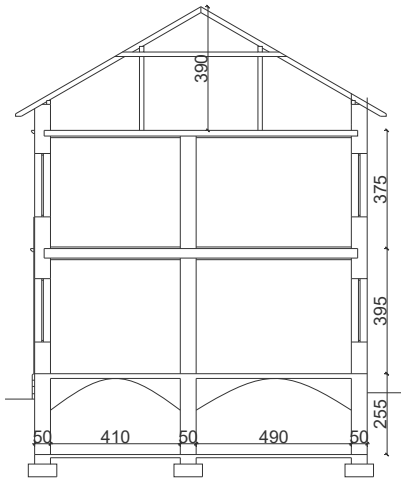
Slika 1. Fotografije objekta



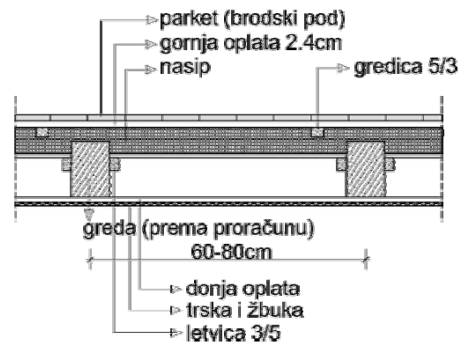
Slika 2. Tlocrt prizemlja i kata

Kožul, M., Kopilaš, V., Ivanković Mihalj, V.

Nelinearna statička analiza ponašanja postojeće zidane zgrade na potresno djelovanje



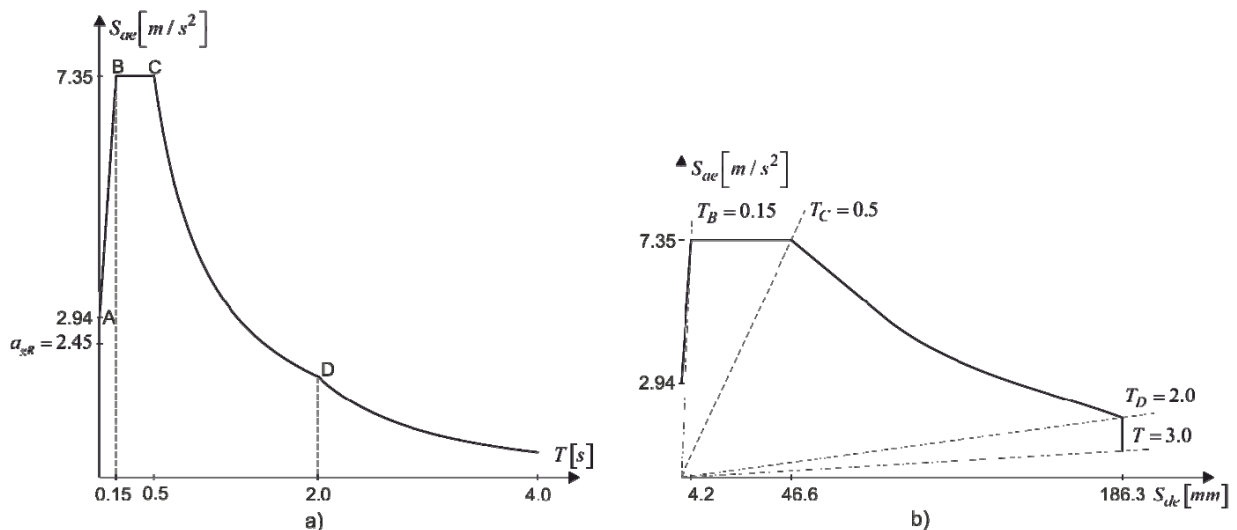
Slika 3. Poprečni presjek



Slika 4. Tipični presjek drvenog stropa [16]

3. SEIZMIČKO DJELOVANJE I MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA

Maksimalno ubrzanje tla lokacije objekta, za povratni period $T_{NCR} = 475$ godina, iznosi $a_{gR} = 0.25g$, s mogućnošću prekoračenja vjerojatnosti od 10% u 50 godina [11]. Ova vrijednost uzeta je za kontrolu graničnog stanja ZO (SD) (značajno oštećenje), dok granično stanje OO (DL) (ograničeno oštećenje) i granično stanje BR (NC) (blizu rušenja) nisu kontrolirana u ovom tekstu [1]. Na slici 5 a) prikazan je elastični spektar ubrzanja, za tip tla B i prigušenje od 5%, dok je na crtežu 5 b) prikazan elastični spektar u AD formatu. Faktor važnosti objekta iznosi $\gamma_I = 1.0$, tako da je računsko ubrzanje tla jednako $a_{gR} = 2.45 \text{ m/s}^2$.



Slika 5. a) elastični spektar za tip tla B i prigušenje 5% [1], b) AD format

Usvojena je kategorija kontrole zidanja B, te kategorija proizvodnje zidnih elementa II. Iz ovoga slijedi da koeficijent sigurnosti za zide iznosi $\gamma_m = 2.5$. Za postojeće zidane konstrukcije prosječna tlačna čvrstoća zida mora se podijeliti s faktorom povjerenja, koji ovisi

Kožul, M., Kopilaš, V., Ivanković Mihalj, V.

Nelinearna statička analiza ponašanja postojeće zidane zgrade na potresno djelovanje

o razini znanja. Za ovu konstrukciju uzeta je razina znanja RZ1, te je faktor povjerenja jednak $FP_{RZ1} = 1.35$ [1].

Mehanička svojstva ziđa i drvenih stropnih greda usvojena su prema Tablici 1. Kako nisu izvršena ispitivanja mehaničkih svojstava materijala, približne vrijednosti uzete su iz dostupne literature [3, 5, 8, 9]. Određivanje približno točnih vrijednosti mehaničkih svojstava postojećeg ziđa je kompleksna zadaća, što je razlog velikom rasponu vrijednosti, primjerice modula elastičnosti ziđa, u kojem se on kreće. Primjerice, prema Tomaževiću [8], modul elastičnosti ziđa nalazi se u području $200f_k \leq E \leq 2000f_k$.

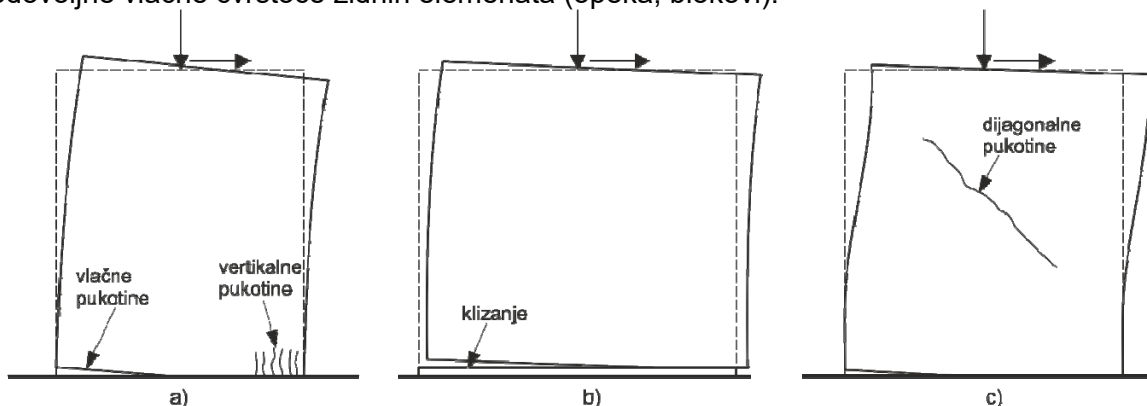
Tablica 1. Mehanička svojstva materijala

Materijal	Modul elastičnosti E [N/mm ²]	Modul posmika G [N/mm ²]	Tlačna čvrstoća f_{c0k} [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća f_{t0k} [N/mm ²]	Posmična čvrstoća f_{vk} [N/mm ²]
Tvrdo drvo D30	10000.0	600.0	23.0	18.0	3.0
Ziđe	1440.0	360.0	3.0	0.0	0.25

4. MODELIRANJE ZIDANIH KONSTRUKCIJA

Seizmičko ponašanje modernih zidanih konstrukcija karakterizirano je otporom pojedinih zidova u njihovoj ravnini, te uz krute međukatne konstrukcije koje dobro povezuju zidane zidove, ove konstrukcije razvijaju prostornu otpornost na potresno djelovanje. Ova činjenica uglavnom ne vrijedi za starije konstrukcije, s drvenom međukatnom konstrukcijom, koja ne osigurava dobru povezanost zidanih zidova u horizontalnoj ravnini.

Tipični mehanizmi otkazivanja zidanih zidova prikazani su na slici 6. Postoji više faktora koji utječu na mehanizam otkazivanja zidanih zidova, kao što je geometrija zida (odnos dužine i visine zida, te veličina i položaj otvora u zidu), kvaliteta materijala (zidni element i mort), rubni uvjeti i opterećenje zida. Otkazivanje savijanjem (a) javlja se zbog odizanja i spuštanja krajeva zida, pri čemu se pritisnuti rub zida drobi. Otkazivanje klizanjem (b) javlja se zbog loše kvalitete morta i niske razine vertikalnog tlačnog naprezanja. Mehanizam kosih pukotina (c) također je posljedica djelovanja posmičnih sila. U ovom slučaju pukotina može nastati po horizontalnim i vertikalnim sljubnicama (stepenasto), što je posljedica loše kvalitete morta. Kosa pukotina može se protezati i kroz zidni element, što je posljedica nedovoljne vlačne čvrstoće zidnih elemenata (opeka, blokovi).



Slika 6. Tipični načini otkazivanja dovratnika [6]: a) odizanje, b) posmično klizanje, c) dijagonalno pucanje

Kožul, M., Kopilaš, V., Ivanković Mihalj, V.

Nelinearna statička analiza ponašanja postojeće zidane zgrade na potresno djelovanje

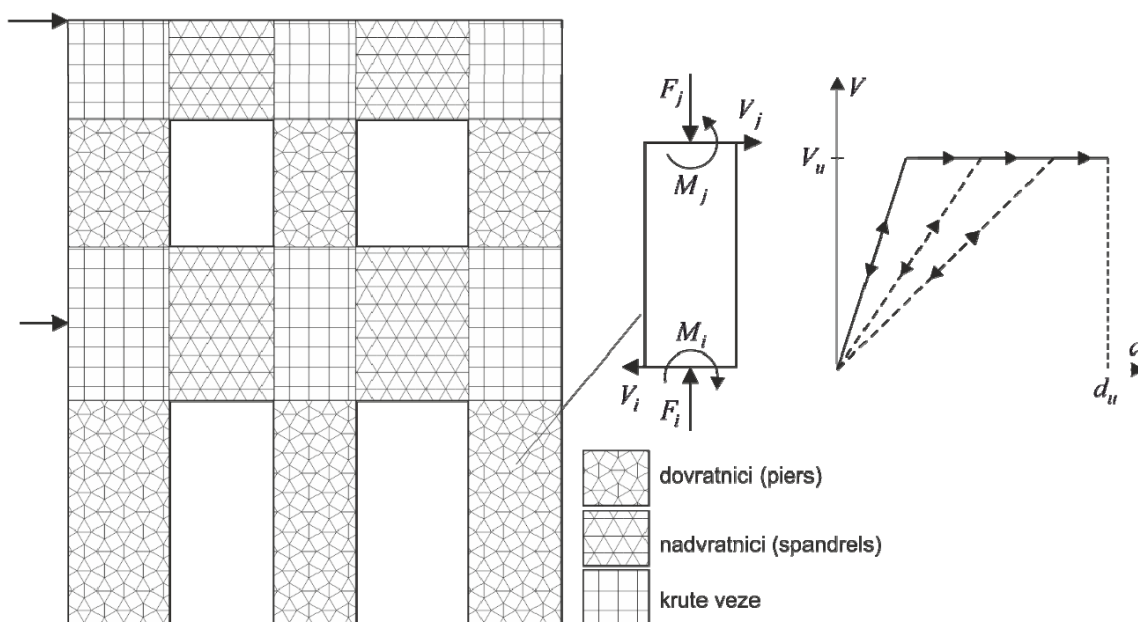
Različiti pristupi modeliranju zidanih zidova lijepo su opisani u literaturi [12]. Metoda konačnih elemenata je najraširenija metoda za analizu konstrukcija, a točnost njezinih rezultata uvelike ovisi o usvojenom modelu materijala. Kako je zida složen heterogen materijal, praktična primjena MKE iziskuje veliki proračunski obujam i složene modele ponašanja materijala. Stoga se u praksi, za modeliranje zidanih konstrukcija, sve više koriste modeli utemeljeni na njihovoj simulaciji grednim i elementima u vidu panela (makro elementi).

Nelinearno ponašanje nearmiranih zidanih zidova uglavnom se odnosi na njihovo ponašanje u ravnini (ravninsko stanje naprezanja). Ovom činjenicom vode se modeli utemeljeni na makro-elementima. Modeliranje zidanih zidova makro-elementima uglavnom se svodi na dva pristupa. Prvi pristup zidove tretira kao okvire, koji se sastoje od krutih čvorova i deformabilnih grednih elemenata. Takav pristup implementiran je u programski paket 3Muri [4], koji se koristi u ovoj analizi. Drugi pristup koristi ravninske makro-elemente.

Zadnjih decenija izvršena su mnoga eksperimentalna istraživanja ponašanja zidanih zidova u njihovoj ravnini, kao i izvan ravnine, na potresna djelovanja. Neka od njih opisana su literaturi [2 i 3].

4.1 Ekvivalentni okviri

Ekvivalentni okviri predstavljaju jednostavan pristup nelinearnoj analizi zidanih konstrukcija. Zidovi se promatraju kao idealizirani okviri, pri čemu su deformabilni elementi dovratnici (piers) i nadvratnici (spandrels) povezani krutim vezama (slika 7). Nelinearno ponašanje zida sadrži cikličku vezu naprezanja i deformacija, pri čemu je isključena vlačna čvrstoća zida. Dovratnici su glavni nosivi vertikalni elementi, koji preuzimaju bočna i vertikalna opterećenja, dok se nadvratnici nazivaju sekundarnim horizontalnim elementima, koji povezuju susjedne deformabilne dovratnike. Oni utječu na rubne uvjete dovratnika, te stoga imaju značajan utjecaj na ponašanje zida opterećenog seizmičkim silama.



Slika 7. Idealizacija zida ekvivalentnim okvirom [6]

Kožul, M., Kopilaš, V., Ivanković Mihalj, V.

Nelinearna statička analiza ponašanja postojeće zidane zgrade na potresno djelovanje

Nelinearni gredni element koristi se za modeliranje dovratnika i nadvratnika. Početna krutost elementa definirana je elastičnim svojstvima, ili svojstvima raspucalog materijala. Veza posmične sile i pomaka (momenta i kuta rotacije) je bilinearna (slika 7). Element omogućuje preraspodjelu unutarnjih sila, te otkrivanje oštećenja pri graničnim stanjima. Degradacija krutosti u plastičnom području odvija se prema definiranoj vezi sile i pomaka. Kontrola duktilnosti provodi se na temelju određivanja maksimalnog pomaka d_u , koji se javlja pri određenom mehanizmu sloma. Prema EC 8, za granično stanje OO (ograničeno oštećenje) taj pomak iznosi:

$$d_u = \begin{cases} 0.004 & \text{posmik} \\ 0.008 \frac{H_0}{l_w} & \text{tlak - savijanje} \end{cases}, \quad (1)$$

pri čemu je l_w dužina zida, a H_0 udaljenost od presjeka gdje je dostignuta sposobnost na savijanje do točke infleksije.

Granični moment savijanja dan je izrazom

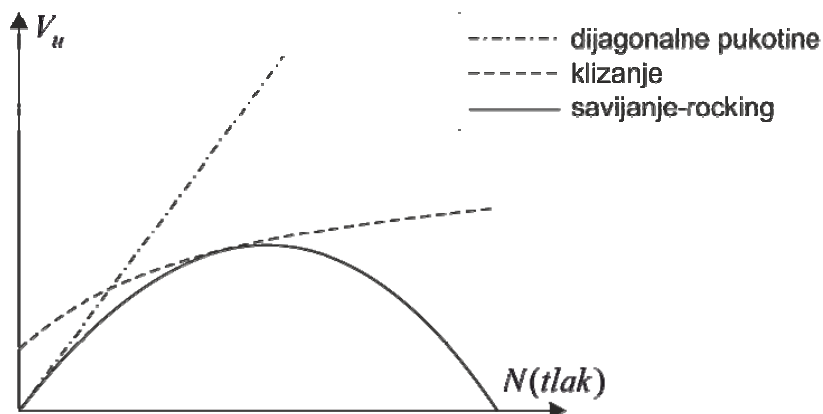
$$M_u = \frac{l_w^2 b_w \sigma_0}{2} \left(1 - \frac{\sigma_0}{0.85 f_m} \right) = \frac{N l_w}{2} \left(1 - \frac{N}{N_u} \right), \quad (2)$$

pri čemu je b_w debljina zida, f_m prosječna tlačna čvrstoća zida, N uzdužna sila, te $\sigma_0 = N / l_w b_w$. Za postojeće zidane konstrukcije prosječna tlačna čvrstoća zida f_m mora se podijeliti s faktorom povjerenja, koji ovisi o razini znanja. Kako se ovdje radi o zgradi izgrađenoj 50-tih godina prošlog stoljeća uzima se prva razina znanja RZ1, te je faktor povjerenja jednak $FP_{RZ1} = 1.35$ [1].

Posmični slom definiran je Turnšek-Čačović kriterijem [13], koji je prikladniji za postojeće zidane konstrukcije od Mohr-Coulombovog kriterija:

$$V_u = l_w b_w \frac{1.5\tau_0}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5\tau_0}} = l_w b_w \frac{1.5\tau_0}{b} \sqrt{1 + \frac{N}{1.5\tau_0 l_w b_w}}. \quad (3)$$

Koeficijent b ovisi o odnosu visine i širine zida, $b = h_w / l_w$, uz ograničenje $1 \leq b \leq 1.5$.



Slika 8. Usporedba kriterija [4]

Kožul, M., Kopilaš, V., Ivanković Mihalj, V.

Nelinearna statička analiza ponašanja postojeće zidane zgrade na potresno djelovanje

5. ANALIZA KONSTRUKCIJE OBJEKTA

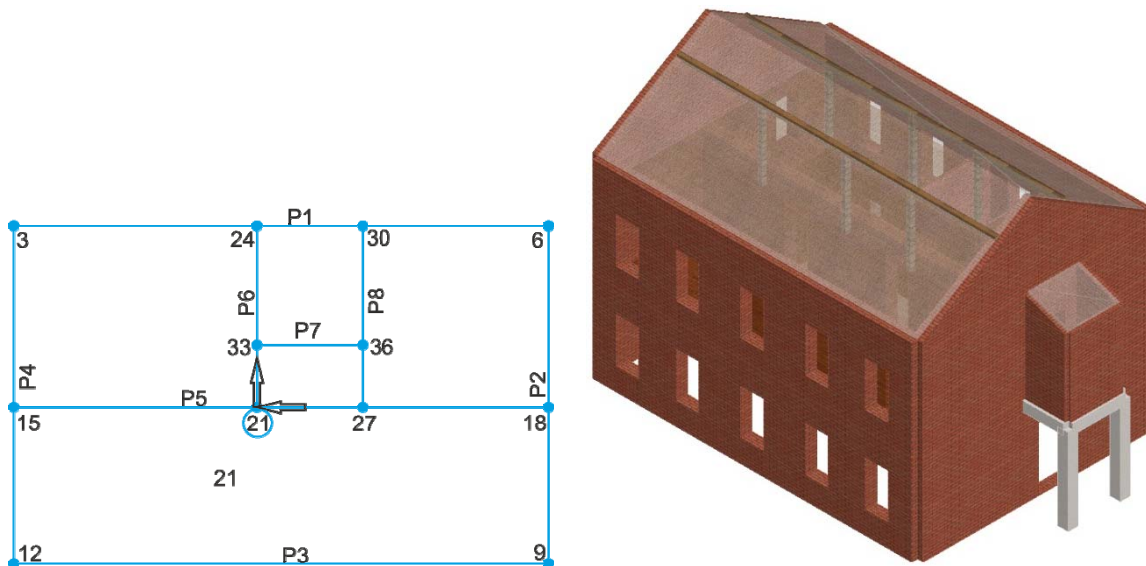
Izvršene su dvije analize konstrukcije ovog zidanog objekta. Prva analiza odnosi se na izvornu konstrukciju, dok se druga odnosi na ojačanu konstrukciju. Ojačanje je izvedeno prednapetim čeličnim šipkama ($4\Phi 16$) u pravcu svih nosivih zidova, u razinama stropnih konstrukcija. Šipke su ugrađene u utore, po dvije šipke s vanjske i unutarnje strane zida, te usidrene preko sidrenih ploča $d=20\text{mm}$, koje se nalaze na krajevima zidova. Utori se naknadno zapune mortom. Šipke u zidovima debljine 50 cm prednapete su ukupnom silom od 20 kN, dok su šipke u zidovima debljine 38 cm prednapete ukupnom silom od 10 kN. Uzet je čelik kvalitete S335. Također je izvršeno dijagonalno ojačanje zidova P2, P6 u prizemnoj etaži, prednapetim čeličnim šipkama S335, promjera 32 mm. Sila prednapinjanja iznosi 10.0 kN. Jednako tako, izvršeno je ojačanje zida P2 (ulaz u zgradu) na isti način, u obje etaže. Dijagonalne šipke, promjera 32 mm, prednapete su silom od 20.0 kN.

Ukupno gravitacijsko opterećenje međukatnih konstrukcija uzeto je prema sljedećem izrazu:

$$q = 1.0g + 0.3p = 1.0 \cdot 2.5 + 0.3 \cdot 2.0 = 3.1 \text{ kN} / \text{m}^2,$$

dok je opterećenje krovišta uzeto u iznosu:

$$q = 1.0g + 0.3s = 1.0 \cdot 1.2 + 0.3 \cdot 1.0 = 1.5 \text{ kN} / \text{m}^2.$$



Slika 9. Položaj zidova i čvorova, te 3D model objekta

U oba slučaja izvršeno je osam analiza postupnim guranjem, kako je to prikazano u Tablici 2.

Kožul, M., Kopilaš, V., Ivanković Mihalj, V.

Nelinearna statička analiza ponašanja postojeće zidane zgrade na potresno djelovanje

Tablica 2. Globalne analize konstrukcije postupnim guranjem

Analiza	Smjer	Raspodjela bočnih sila po visini	Računsko ubrzanje tla a_{gR} [m/s ²]	Razina	Kontrolni čvor
1	+x	jednolika	2.45 m/s ²	2	21
2	+x	statička		2	
3	-x	jednolika		2	
4	-x	statička		2	
5	+y	jednolika		2	
6	+y	statička		2	
7	-y	jednolika		2	
8	-y	statička		2	

5.1 Postojeće stanje konstrukcije

U Tablici 3 prikazani su rezultati analize postojeće konstrukcije, bez ojačanja. Vidljivo je da konstrukcija ne zadovoljava, pri čemu su najznačajnije analize 4 i 6, u smjerovima -X i +Y, redom (redci obojani žuto). Krivulje kapaciteta (pushover) prikazane su na slikama 11 i 13, za globalne smjerove X i Y. Očito je iz dispozicije objekta da je deformabilnost konstrukcije u Y pravcu znatno veća, te su stoga i oštećenja zidova koji leže u tom pravcu veća od oštećenja zidova koji leže u X pravcu. Osim toga, stropne grede oslonjene su na zidove koji leže u X pravcu, pa je njihova povezanost veća od povezanosti zidova koji leže u Y pravcu.

Tablica 3. Rezultati globalne analize konstrukcije postupnim guranjem (stvarno stanje)

Analiza	Smjer	Raspodjela bočnih sila po visini	Eksc. [mm]	dt SD [mm]	dm SD [mm]	SD Ver.
1	+X	Jednolika	0	43,54	32,31	Ne
2	+X	Statička	0	43,36	55,40	Da
3	-X	Jednolika	0	20,15	13,66	Ne
4	-X	Statička	0	22,48	13,40	Ne
5	+Y	Jednolika	0	15,52	10,19	Ne
6	+Y	Statička	0	17,16	10,83	Ne
7	-Y	Jednolika	0	13,67	11,14	Ne
8	-Y	Statička	0	15,32	12,09	Ne
Analiza	Smjer	Raspodjela bočnih sila po visini	Eksc. [mm]	α SD		
1	+X	Jednolika	0	0,754		
2	+X	Statička	0	1,267		
3	-X	Jednolika	0	0,727		
4	-X	Statička	0	0,646		
5	+Y	Jednolika	0	0,719		
6	+Y	Statička	0	0,689		
7	-Y	Jednolika	0	0,865		
8	-Y	Statička	0	0,839		

Faktor ispunjenja α označava maksimalnu vrijednost opterećenja, uzetog u obzir u pojedinom graničnom stanju, koje konstrukcija može preuzeti, odnosno:

Kožul, M., Kopilaš, V., Ivanković Mihalj, V.

Nelinearna statička analiza ponašanja postojeće zidane zgrade na potresno djelovanje

$$\alpha_{SD} = \frac{PGA_{CSD}}{PGA_{DSD}} = \frac{\text{kapacitet}}{\text{zahtjev}}, \quad (4)$$

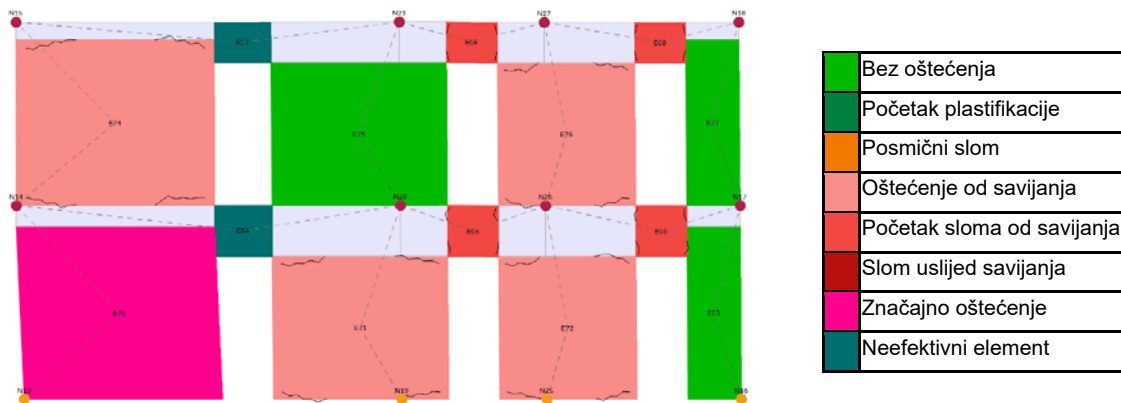
pri čemu je PGA_{CSD} kapacitet ubrzanja koji odgovara graničnom stanju ZO (SD), a PGA_{DSD} je vršno ubrzanje tla, koje odgovara graničnom stanju ZO (SD).

Provjera kolapsa zida vrši se preko relativnih katnih pomaka:

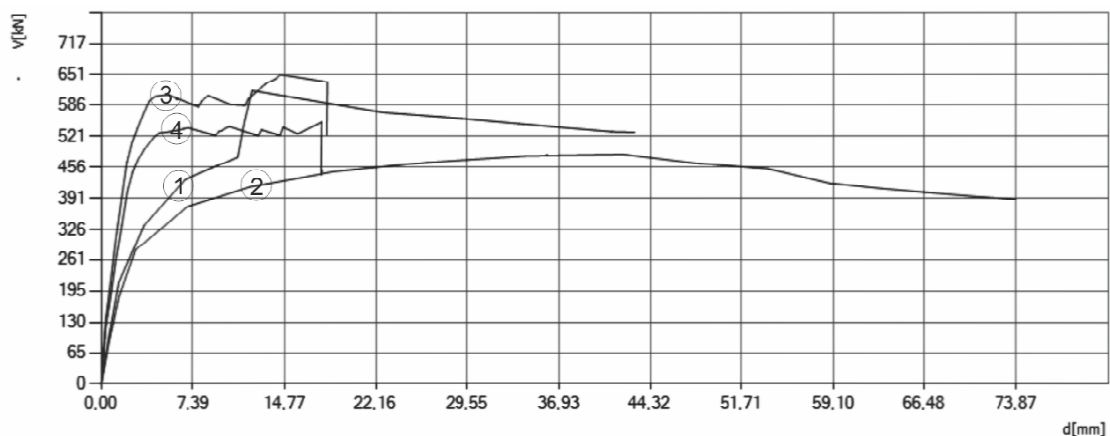
$$\delta = \frac{u_{i+1} - u_i}{h_{kata}} + \frac{\varphi_i + \varphi_{i+1}}{2} \leq \delta_0, \quad (5)$$

gdje granična vrijednost relativnog katnog pomaka δ_0 ovisi o tipu otkazivanja zida, a kreće se u granicama od 0.4% do 0.8%. Vrijednosti relativnih katnih pomaka postojeće konstrukcije, za pravac X, dane su u tablici 4, dok su u tablici 5 dane te vrijednosti za pravac Y.

Za pravac X najznačajnija je analiza 4, dok je za pravac Y najznačajnija analiza 6. Na slici 10 prikazan je stupanj oštećenja zida P5, za maksimalno dosegnute pomake u X pravcu, dok je na slici 12 prikazan stupanj oštećenja zida P2.



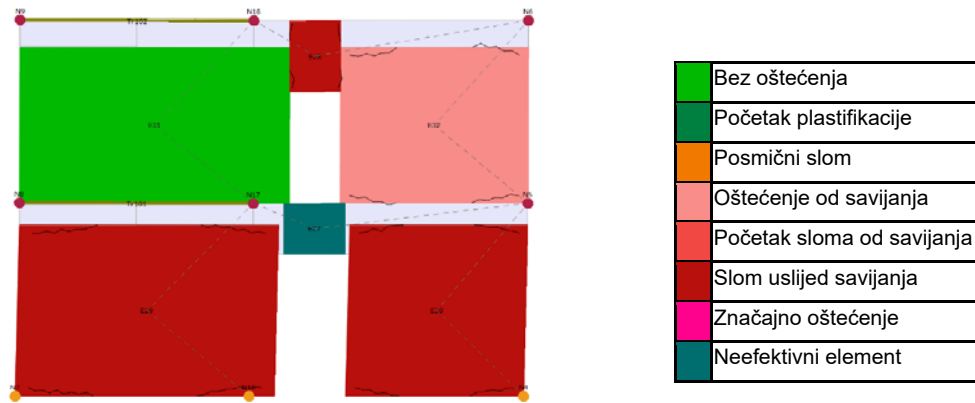
Slika 10. Mehaniizam otkazivanja zida P5 pri dostignutom pomaku $d_m = 13.4 \text{ mm}$ (3)



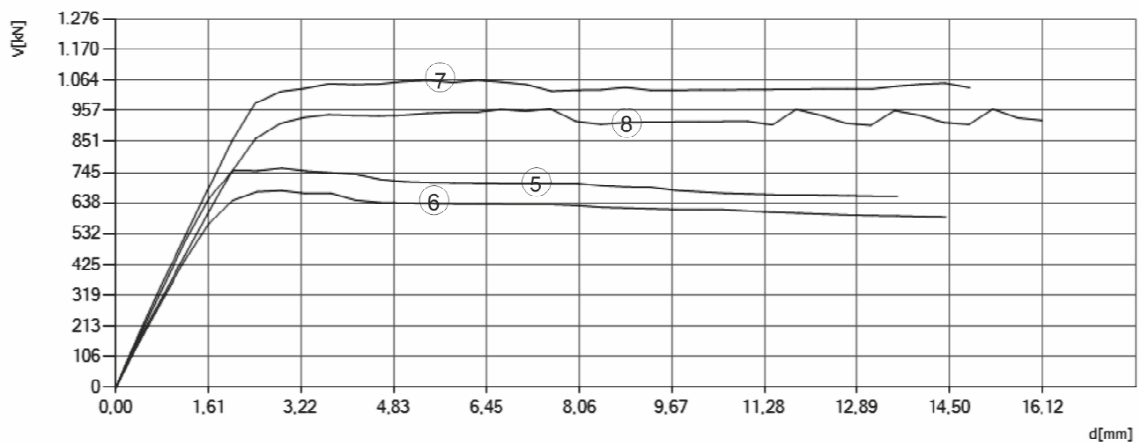
Slika 11. Krivulje postupnog guranja (kapacitet) za smjer X (stvarno stanje)

Kožul, M., Kopilaš, V., Ivanković Mihalj, V.

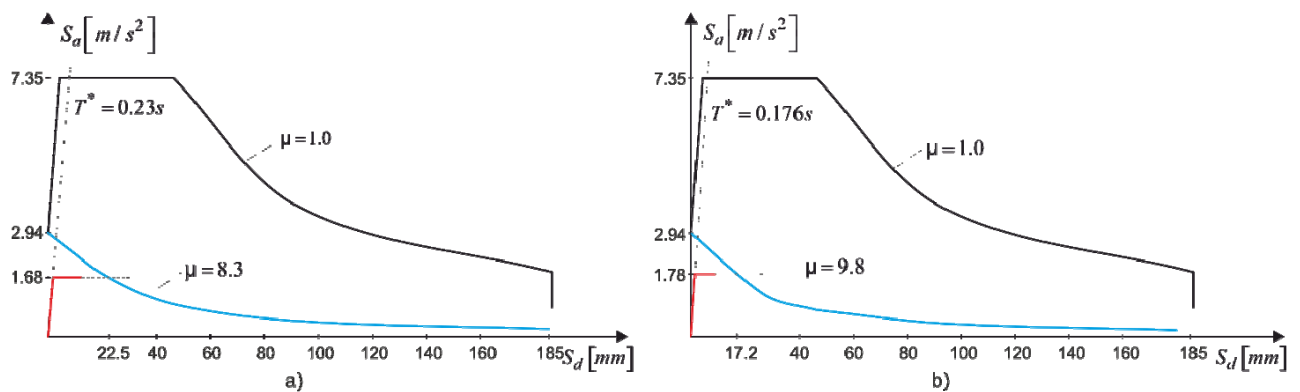
Nelinearna statička analiza ponašanja postojeće zidane zgrade na potresno djelovanje



Slika 12. Mehanizam otkazivanja zida P2 pri dostignutom pomaku $d_m = 10.8 \text{ mm}$ (6)



Slika 13. Krivulje postupnog guranja (kapacitet) za smjer Y (stvarno stanje)



Slika 14. Rezultati analize neojačane konstrukcije, a) analiza 4, b) analiza 6

Kožul, M., Kopilaš, V., Ivanković Mihalj, V.

Nelinearna statička analiza ponašanja postojeće zidane zgrade na potresno djelovanje

Tablica 4. Relativni katni pomaci X pravac (4)

Zid	Čvor na dnu	Čvor na vrhu	Relativni pomak [mm]	Etaža
1	1	2	16,95	1
1	2	3	19,36	2
3	10	11	12,37	1
3	11	12	21,70	2
5	13	14	34,33	1
5	14	15	0,45	2
7	31	32	0,89	1
7	32	33	16,45	2

Tablica 5. Relativni katni pomaci Y pr. (6)

Zid	Čvor na dnu	Čvor na vrhu	Relativni pomak [mm]	Etaža
2	7	9	22,78	1
2	8	9	3,27	2
4	10	11	0,28	1
4	11	12	0,28	2
6	19	20	12,07	1
6	20	21	1,93	2
8	25	26	16,60	1
8	26	27	2,54	2

Iz tablice 4 može se vidjeti da relativni pomak prve etaže zida P5 iznosi 0.9%, druge etaže zida P7 on iznosi 0.47% , zida P3, u drugoj etaži 0.57%, dok je relativni katni pomak zida P1 u drugoj etaži 0.51%. Prema tome, zid P5 koji se pruža u X pravcu, ne zadovoljava kriterij dan izrazom (5), odnosno (1). Ovo treba promatrati u svjetlu činjenice da postojeća konstrukcija nije ispunila zahtjev definiran spektrom (slika 14). Slično vrijedi i za Y pravac.

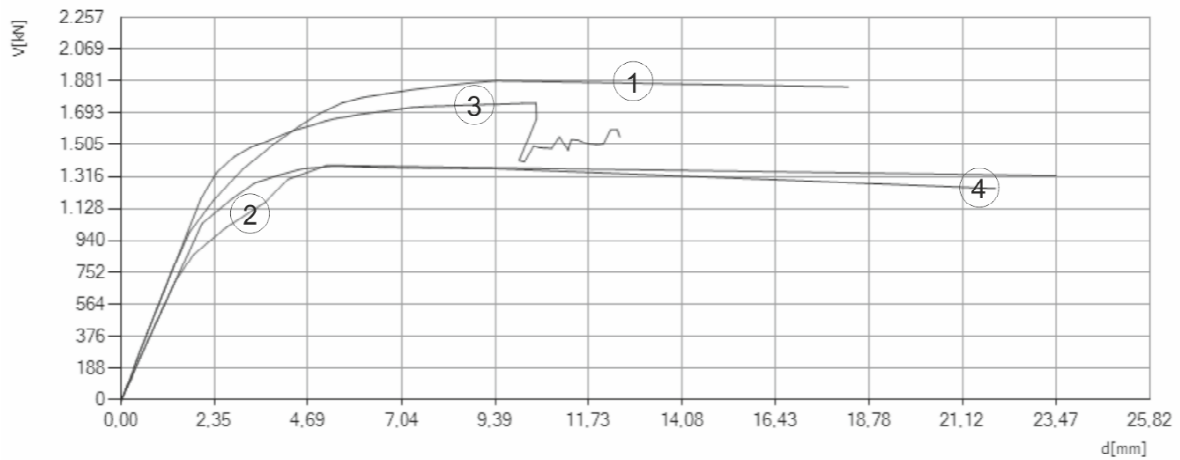
U tablici 6 prikazani su rezultati analize ojačane konstrukcije. Vidljivo je da konstrukcija zadovoljava projektno potresno opterećenje, pri čemu su najznačajnije analize 3 i 6, u smjerovima +X i +Y, redom (redci obojani žuto). Krivulje kapaciteta (pushover) prikazane su na slikama 15 i 16, za globalne smjerove X i Y, dok su na slici 17 prikazane razine oštećenja zidova P2 i P5. Iz te je slike vidljivo da se oba zida dominantno deformiraju savijanjem, a razina oštećenja je niska. U ojačanom zidu P2 prednapete zatege preuzimaju glavna vlačna naprezanja, te u određenoj mjeri i posmična naprezanja, što je dovelo do prihvatljivog ponašanja ovog zida pri djelovanju projektnog seizmičkog opterećenja.

Tablica 6. Rezultati globalne analize konstrukcije postupnim guranjem (ojačana konstrukcija)

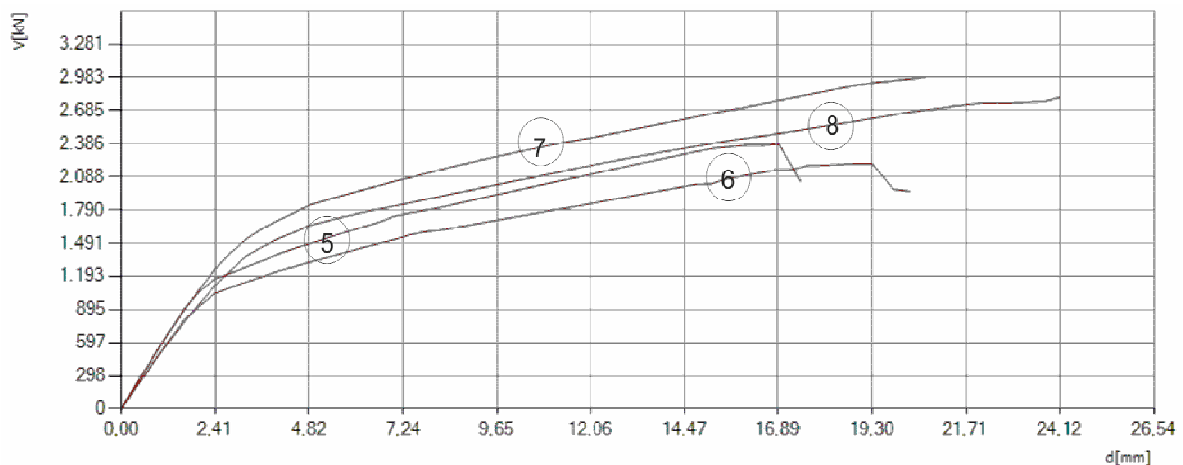
Analiza	Smjer	Raspodjela bočnih sila po visini	Eksc. [mm]	dt SD [mm]	dm SD [mm]	SD Ver.
1	+X	Jednolika	0	7,46	13,69	Da
2	+X	Statička	0	10,74	17,60	Da
3	-X	Jednolika	0	6,23	9,39	Da
4	-X	Statička	0	8,93	16,46	Da
5	+Y	Jednolika	0	11,31	13,09	Da
6	+Y	Statička	0	14,41	15,21	Da
7	-Y	Jednolika	0	9,23	15,51	Da
8	-Y	Statička	0	11,68	18,09	Da
Analiza	Smjer	Raspodjela bočnih sila po visini	Eksc. [mm]	α SD		
1	+X	Jednolika	0	1,371		
2	+X	Statička	0	1,386		
3	-X	Jednolika	0	1,227		
4	-X	Statička	0	1,489		
5	+Y	Jednolika	0	1,074		
6	+Y	Statička	0	1,030		
7	-Y	Jednolika	0	1,339		
8	-Y	Statička	0	1,286		

Kožul, M., Kopilaš, V., Ivanković Mihalj, V.

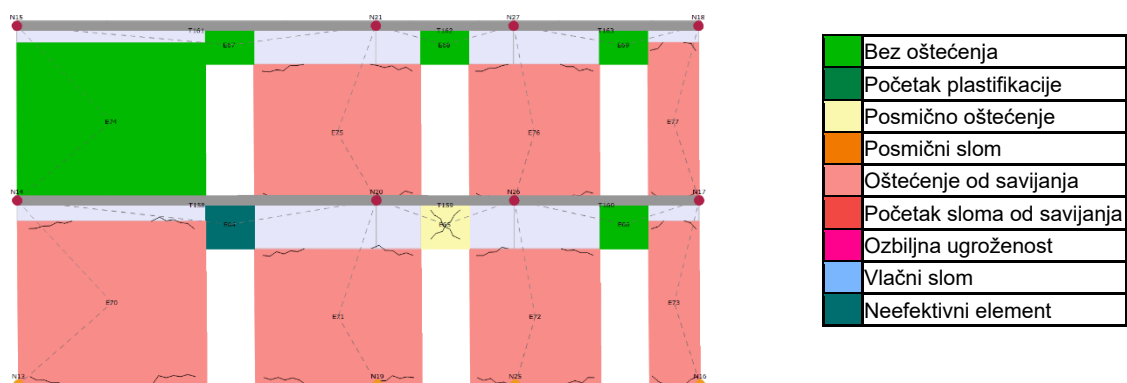
Nelinearna statička analiza ponašanja postojeće zidane zgrade na potresno djelovanje



Slika 15. Krivulje postupnog guranja (kapacitet) za smjer X (ojačana konstrukcija)



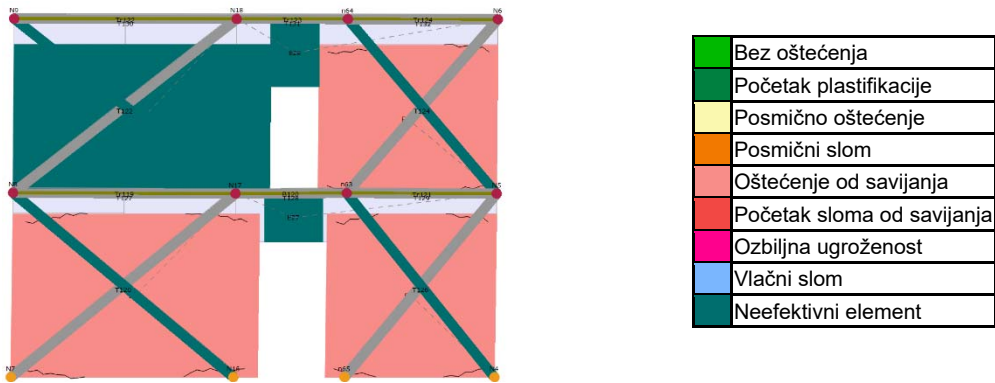
Slika 16. Krivulje postupnog guranja (kapacitet) za smjer Y (ojačana konstrukcija)



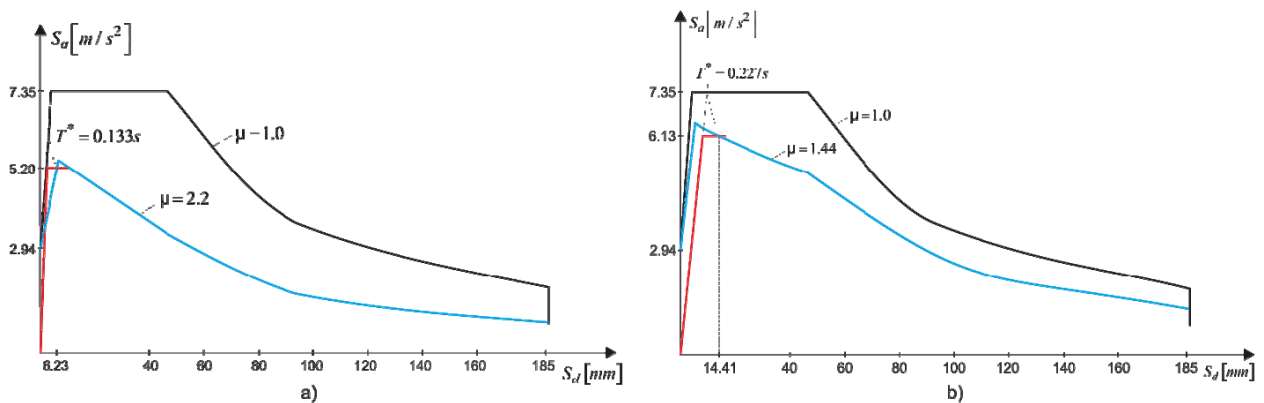
Slika 17. Razine oštećenja zida P5 (6) pri ciljanom pomaku (ojačana konstrukcija)

Kožul, M., Kopilaš, V., Ivanković Mihalj, V.

Nelinearna statička analiza ponašanja postojeće zidane zgrade na potresno djelovanje



Slika 18. Razine oštećenja zida P2 (3) pri ciljanom pomaku (ojačana konstrukcija)



Slika 19. Rezultati analize ojačane konstrukcije, a) analiza 3, b) analiza 6

Tablica 7. Relativni katni pomaci X pravac (3)

Zid	Čvor na dnu	Čvor na vrhu	Relativni pomak [mm]	Etaža
1	1	2	3,18	1
1	2	3	1,51	2
3	10	11	0,71	1
3	11	12	0,55	2
5	13	14	15,18	1
5	14	15	4,96	2
7	31	32	1,38	1
7	32	33	18,92	2

Tablica 8. Relativni katni pomaci Y pr. (6)

Zid	Čvor na dnu	Čvor na vrhu	Relativni pomak [mm]	Etaža
2	7	9	25,3	1
2	8	9	5,74	2
4	10	11	4,58	1
4	11	12	2,77	2
6	19	20	15,3	1
6	20	21	4,68	2
8	25	26	19,44	1
8	26	27	5,34	2

Nakon ojačanja konstrukcije dodavanjem čeličnih prednapetih elemenata (4 Φ 16~1 Φ 32) u visini stropne konstrukcije, kao i ojačavanjem zidova P2, P6 i P8, vidljivo je poboljšanje u njezinoj nosivosti. Iz usporedbe krivulja kapaciteta (slike 11 i 15, te 12 i 16) vidljivo je značajno povećanje nosivosti konstrukcije u oba pravca, dok je kapacitet deformabilnosti puno manje izražen.

6. ZAKLJUČCI

Na temelju izvršenih analiza konstrukcije zgrade može se vidjeti utjecaj ojačanja najugroženijih dijelova (zidova) konstrukcije. Postupnim guranjem konstrukcije u dva ortogonalna pravca dobije se prilično jasan uvid u njezino stanje, što se tiče nastanka i širenja zona plastifikacije (oštećenja), pod pretpostavkom da mogući torzijski vlastiti vektori nisu značajnije izraženi. Na temelju tih saznanja pristupilo se ojačanju zidova u razinama međukatnih konstrukcija, kao i pojedinih zidova u njihovoj ravnini, čeličnim prednapetim šipkama. Iz usporedbe dviju analiza uočljivo je poboljšanje odziva konstrukcije na projektno seizmičko opterećenje.

Obične zidane konstrukcije su jako krute, te je ojačanjem teško postići povećanje njihove deformabilnosti, odnosno duktilnosti. Nasuprot tome, ojačanjem se može znatno povećati nosivost konstrukcije, što je vidljivo iz krivulja kapaciteta nosivosti postojeće i ojačane konstrukcije.

Ojačanje zidanih konstrukcija moguće je izvesti na više načina (armirani sloj prskanog betona, prednapinjanje u vertikalnom pravcu, FRP trakama, ojačanje međukatnih konstrukcija, ojačanje zabatnih zidova i konstrukcije krovišta, te drugim metodama). Pri tome uvijek treba voditi računa o praktičnoj primjeni pojedinog načina ojačanja konstrukcija od zidanih zidova, jer se radi o intervencijama koje nisu jednostavne, te obično iziskuju značajna financijska sredstva.

LITERATURA

1. Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija-3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada (HRN EN 1998-3: 2011).
2. Magenos, G., Calvi, G. M.: Cyclic behaviour of brick masonry walls, Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, pp. 3517-3522, 1992.
3. Tomažević, M., Lutman, M., Petković, I.: Seismic behaviour of masonry walls: experimental simulation, Journal of Structural Engineering, 122(9), 1996.
4. Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., Cattari, S.: TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings, Engineering Structures, 56, pp. 1737-1799, 2013.
5. Asikoglu, A., Vasconcelos, G., Lourenco, P. B., Panto, B.: Pushover analysis of unreinforced irregular masonry buildings: Lessons from different modeling approaches, Engineering Structures, 2020.
6. Calderini, C., Cattani, S., Lagomarsino, S.: In-plane strength of unreinforced masonry piers, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 38, pp. 243-267, 2009.
7. Zahir, A., Rizzo, S., Celebi, E., Stempniewski, L.: Seismic Pushover Analysis of Existing Masonry Structures, IESKO, 2019.
8. Tomažević, M.: Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings, Imperial College Press, 2000.
9. Ademović, N., Hrasnica, M., Oliveira, D. V.: Pushover analysis and failure pattern of a typical masonry residential building in Bosnia and Herzegovina, Engineering Structures, 50, pp. 13-29, 2013.
10. Fajfar, P., Fischinger, M.: N2-Method for Nonlinear Seismic Analysis of Regular Structures, Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol. 5, pp. 111-116, 1988.
11. Eurocode 6. Design of Masonry Structures-Part 1-1: General Rules for Reinforced and Unreinforced Masonry Structures, Bruxelles, 1996.

Kožul, M., Kopilaš, V., Ivanković Mihalj, V.

Nelinearna statička analiza ponašanja postojeće zidane zgrade na potresno djelovanje

12. D'Altri A., Sarhosis V., Milani G., Rots J., Cattari S., Lagomarsino S., Modeling Strategies for the Computational Analysis of Unreinforced Masonry Structures: Review and Classification, Archives of Computational Methods in Engineering, 2019.
13. Parisi F., Augenti N., Seismic capacity of irregular unreinforced masonry walls with openings, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, John Wiley & Sons, 2012.
14. Piazza M., Baldessari C., Tomasi R., Acler E., Behaviour of refurbished timber floors characterized by different in-plane stiffness, Structural Analysis of Historical Constructions, U. K. Bath, D. D'Ayala, E. Fodde (Eds.), 2008.
15. Perić Lj., Matorić I., Pouzdanost tradicionalnih zidanih građevina s drvenim stropovima na potresno djelovanje, Građevinar 72, Zagreb, 2020.
16. Peulić Đ., Konstruktivni elementi zgrada – Drugi dio, Tehnička knjiga Zagreb, 1983.