

Roko ŽARNIĆ*, Domagoj GRABOVAC**, Natko BILIĆ***

ANALIZA POTRESNE OTPORNOSTI KULTURNEGA SPOMENIKA NA MIROGOJU V ZAGREBU S PROGRAMOM 3MURI

Povzetek

Serija potresov v Zagrebu in njegovi okolici tekom leta 2020 je resno poškodovala zidane zgradbe kulturne dediščine grajene v 19.stoletju. Ena od teh je monumentalna stavba mrtvašnice na Mirogoju v Zagrebu, katere avtorstvo se pripisuje znanemu arhitektu Hermannu Bolleu. Gradnjo so dokončali 1886 leta, šest let po katastrofalmem potresu v Zagrebu. Stavbo so dograjevli in spreminali med dvema svetovnima vojnoma. Vsaka spremeba je vplivala na konstrukcijske njen lastnosti, ne vedno v pozitivni smeri. Konstrukcijo stavbe so bistveno ojačili je leta 1993, ko so vgradili montažne rebričaste a.b. stropovi in vodoravne a,b, vezi. Za potrebe popotresne obnove je opravljena analiza obstoječega stanja in poškodb in projekt prenove in z ojačitvami. Avtorja prispevka sta s pomočjo programa 3Muri 13.5 analizirala potresno odpornost zgradbe pred i po ojačitvi. V tem prispevku prikazujemo potek in rezultate analize potresne odpornosti konstrukcije ojačane v skladu s konzervatorskimi smernicami.

Ključne besede:kulturna dediščina, ojačitev, potresna odpornost, Mirogoj, potres Zagreb 2020, analiza, program 3Muri.

ANALYSIS OF THE SEISMIC RESISTANCE OF THE CULTURAL MONUMENT AT MIROGOJ IN ZAGREB WITH THE 3MURI PROGRAMME

Summary

A series of earthquakes in and around city of Zagreb, Croatia during the 2020 severely damaged the masonry cultural heritage buildings built in the 19th century. One of these is the monumental building of the morgue at Mirogoj in Zagreb, whose authorship is attributed to the famous architect Hermann Bolle. Construction was completed in 1886, six years after the catastrophic earthquake in Zagreb. The building was upgraded and modified during two world wars. Each change affected its structural properties, not always in a positive direction. The structure of the building was significantly reinforced in 1993, when r.c. prefabricated ribbed floors and horizontal r.c. tie beams were installed. For the purposes of post-earthquake retrofitting and strengthening, an analysis of the damaged structure has been carried out to obtain input information for selection of structural measures needed for strengthening of structure to the required level. The analysis was carried out by the 3Muri 13.5 software. In this paper the procedure and results of the analysis of seismic resistance of the original and strengthened structure is presented.

Key words: cultural heritage, strengthening, seismic resistance, Mirogoj, Zagreb earthquake 2020, analysis, 3Muri software.

* prof. dr. Roko ŽARNIĆ, univ.dipl.inž.grad., Slovensko društvo za potresno inženirstvo, Jamova 2, 1000 Ljubljana, roko.zarnic@gmail.com

** Domagoj GRABOVAC,univ.dipl.inž.grad., AdriaBim/Edisti d.o.o, Litijška cesta 259, 1261 Ljubljana-Dobrunje, domagoj@e-dist.com

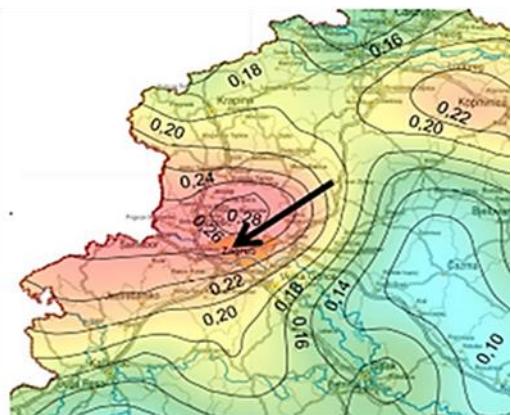
***Natko BILIĆ, MBA, PLANETARIS d.o.o., Vodnikova 11, 10000 Zagreb natko.bilic@planetaris.com

1. UVOD

V pozni jeseni leta 1880 je Zagreb prizadel močan potres magnitude 6.3 z epicentrom na severnem obrobju mesta na gori Medvednici. Stoštirideset let pozneje, pomladi 2020, je blizu epicentra iz leta 1880 ponovno zatreslo z magnitudo 5.3. Obema potresoma so nekaj mesecov sledili popotresni sunki. Potresa sta povzročila veliko škode na stavbah, med njimi še posebej tistimi, ki sodijo v grajeno kulturno dediščino. Med temi je tudi znana katedrala v Zagrebu, ki so jo močno poškodovala oba potresa. Razvoj Zagreba v veliko mesto se je začel leta 1865 z uvedbo prvega, za tiste čase naprednega urbanističnega načrta in začetkom gradnje sodobnih mestnih, tudi monumentalnih stavb. Leta 1878 se je v Zagrebu nastanil takrat 33 letni stavbenik Hermann Bolle iz Koelna, sicer brez formalne univerzitetne izobrazitve, a s solidnim znanjem o graditvi velikih stavb. Leta 1897 začnejo po njegovih načrtih in pod njegovim vodstvom graditi monumentalne arkade na pokopališču Mirogoj v Zagrebu v slogu historicizma. Veliki potres 1880 leta je poškodoval 1700 stavb, a na novozgarjenih arkadah ni pustil nobene poškodbe. To je bil dokaz kakovosti gradnje pod vodstvom Bollea in mu je bila zaupano nadaljevanje gradnje arkad do konca njegovega življenja 1926 leta. Poleg tega, so mu zaupali tudi vodenje popotresne obnove pomembnih stavb, med njimi tudi stolnice. Med prvimi njegovimi novogradnjami so leta 1886 dokončali stavbo mrtvašnice na Mirogoju (Slika 1(a)). Pri tem so upoštevali izkušnje pridobljene s popotresno obnovo v času njenega načrtovanja in gradnje, kar se je leta 2020 pokazalo kot velika prednost v primerjavi z nekaterimi drugimi zgodovinskimi stavbami v Zagrebu in okolici po potresu leta 2020.



(a)



Karta potresnih območij Hrvaške za povratno obdobje 475 let (PMF Zg.+HZN)

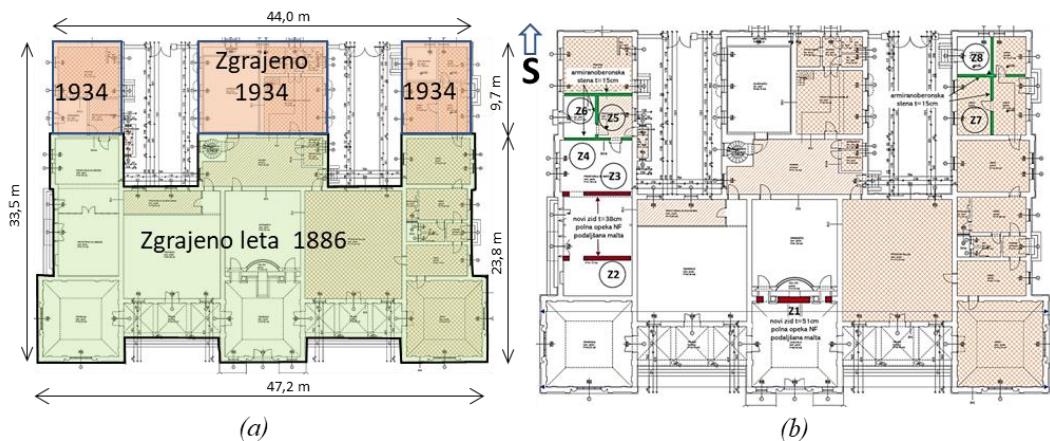
(b)

Slika 1: Stavba mrtvašnice na Mirogoju v Zagrebu leta 2020 (a) in lokacija stavbe na karti potresnih območij Hrvaške za povratno obdobje 475 let.

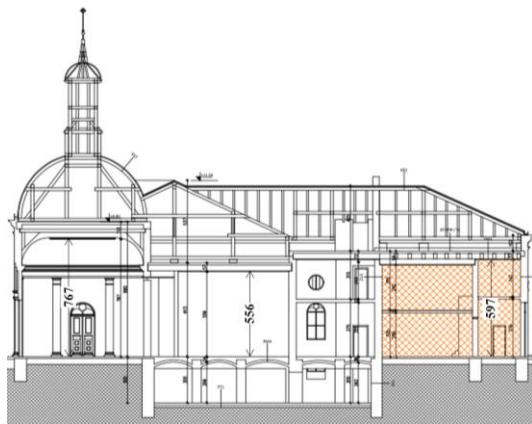
2. ZASNOVA STABE

Stavba je zasnovana kot pritlični, delno podkleten objekt različnih etažnih višin prostorov od 4,1m do 7,67m (Slika 3). Originalno zgrajeni stavbi so dodali tri trakte na severni strani, ki so bili načrtovani leta 1913 in zgrajeni 1934 leta (Slika 2(a)). Leta 1993 so celotno stavbo ojačali z montažnimi rebričastimi armiranobetoniskimi stropovi i močnimi armiranobetoniskimi nosilci v ravnini podstrešja starejšega dela stavbe, ki potekajo v smeri vzhod-zahod. Razpored zidov v ortogonalnih smereh je pravilen. Starejši in novejši del stavbe sta zgrajena iz polne opeke starega formata 30/15/7,5 cm v apneni mali. Nosilni zidovi so debeli 47cm, predelni pa 15cm. Po gradnji leta 1934 so stavbo preurejali in odstranili posamezne nosilne zidove oziroma zazidavali obstoječe in odpirali nove odprtine za vrata ali okna. Posledice sprememb so se pokazale kot škodljive, kar smo z analizami potresne odpornosti konstrukcije v zatečenem stanju po potresu 2020 leta tudi dokazali.

Na osnovi teh analiz in v sodelovanju s konzervatorji in arhitekti smo zasnovali ojačitvene ukrepe, ki obsegajo popravila s potresom poškodovanih zidov in vgradnjo novih. Novi opečni zidovi se bodo vgradili na mestu odstranjenih originalnih zidov v starejšem delu stavbe (Slika 2 (b), zidovi Z1, Z2 in Z3). Zidovi bodo pozidani s polno opeko normalnega formata 25/12/6 cm v podaljšani cementi mali. Zid Z1 bo debel 51 cm, zidova Z2 in Z3 pa 38 cm. Predelne zidove v novejšem vzhodnjem in zahodnjem traktu bodo nadomestili z armiranobetonskimi stenami debelimi 15cm. (Slika 2 (b), stene Z4 do Z8).



Slika 2: Shema faz gradnje stavbe mrtvašnice (a) in tloris pritličja z dodanimi ojačitvenimi zidovi (b)



Slika 3: Prerez skozi središče stavbe v smeri jug-sever

3. ANALIZA POTRESNE ODPORNOSTI STAVBE

V okviru popotresne prenove poškodovanih objektov v Zagrebu in okolici je upravitelj pokopališča mesta Zagreba, Zagrebački holding d.o.o., Podružnica Gradska groblja iz Zagreba pri podjetju Planetaris d.o.o. iz Zagreba naročil analizo potresne odpornosti zaradi potresa 2020 poškodovane stavbe mrtvašnice na Mirogoju in izdelavo projekta prenove, ki vključuje sanacijo poškodb in protipotresno ojačitev konstrukcije. Avtorji tega prispevka so aktivno sodelovali pri teh aktivnostih.

3.1 Zahtevana potresna odpornost stavbe

Po potresih v letu 2020 je Hrvaška sprejela poseben Zakon o obnovi stavb [1], ki v 16. členu predpisuje (citat): »Poškodovanost večstanovanjske stavbe, poslovne stavbe in družinske hiše se otpravlja s popravilom nekonstrukcijskih elementov v skladu s programom ukrepov, popravilom

konstrukcije oziroma njen ojačitvijo v skladu z Tehničnim predpisom [2], v kolikor ta Zakon ne predpisuje drugačne ukrepe.«

Tehnični predpis [2] obravnava štiri ravni obnove konstrukcije:

- raven 1: popravilo nekonstrukcijskih elementov
- raven 2: popravilo konstrukcije
- raven 3: ojačitev konstrukcije
- raven 4: celovita prenova

Obseg poškodb obravnavane stavbe zahteva ukrepe na 1. in 2. ravni. Na 2. ravni se dodatno zahteva približno enaka potresna odpornost v obeh smereh. Če ta pogoj ni ispoljen, se dovoljuje tudi vgradnja novih nosilnih elementov za doseganje simetričnega odziva konstrukcije. Obravnavana stavba sodi v to kategorijo in se je zato s projektom ojačitve stavbe spoštovala ta zahteva, kot je to prikazano na Sliki 2 (b).

Predpis zahteva dokaz potresne odpornosti z eno od uveljavljenih računskih metod in v skladu s standardom Eurocode 8 vključno s hrvaškim nacionalnim dodatkom [3]. Za 2. raven se zahteva doseganje vrednosti indeksa močne poškodovanosti nad 0,50, za 3. raven nad vrednostjo 0,75 in za 4. raven nad 1,0, ali popolno doseganje kriterijev predpisanih z [3].

3.2 Postopek izračuna potresne odpornosti stavbe

Obravnavana stavba je locirana na potresnem območju, kjer je treba pri analizi odpornosti stavbe na potres s povratno dobo 475 let upoštevati vrednost projektnega pospeška tal $a_g=0,255$, za povratno dobo 95 let pa $a_g=0,12$. V skladu s [2] je za obstoječe stavbe, kjer se je proces normalnega posedanja zaključil, treba upoštevati vršni pospešek tal tipa A ($S=1,0$) pri kateremu konstrukcija doseže stanje močne poškodovanosti. Obravnavana stavba je namenjena javni rabi in zato po pomebnosti sodi v kategorijo II ($\gamma =1$), ker pa je njena konstrukcija zgrajena iz nearmirane zidovine treba upoštevati vrednost faktoja obnašanja $q=1,5$.

Analize potresne odpornosti stavbe v zatečeni in projektirani, ojačeni konfiguraciji smo opravili s programom za analizo potresne odpornosti zidanih zgradb 3Muri [4], ki sledi zahtevam veljavnih standardov Eurocode 8, Eurocode 6 in Eurocode 2. S programom 3Muri izvajamo nelinearno statično analizo s postopkom postopnega narivanja (»push over«). Metoda je zaradi svoje natančnosti trenutno najbolj prikladno orodje za izračun potresne odpornosti zidanih zgradb. Temelji na znanju pridobljenem s pregledom in analizo obnašanja stavb poškodovanih in porušenih med potresi.

Pri metodi postopnega narivanja se konstrukcija obremenjuje s horizontalnimi silami, ki predstavljajo vztrajnostne sile, katerim je konstrukcija ispostavljena zaradi delovanja potresa. Izračun potresne odpornosti sestoji iz niza nelinearnih statičnih izračunov pri monotono naraščajočih horizontalnih silah do doseganja plastifikacije posameznih presekov konstrukcijskih elementov, povečanja deformacij konstrukcije in spremembe togosti celotnega konstrukcijskega sistema ob delovanju stalne vertikalne obtežbe. Po doseganju meje plastičnosti prereza obravnavanega elementa, rast notranje obremenitve doseže mejo od katere dalje se ne spreminja ne glede na velikost deformacij, ki se večajo. Postopek se nadaljuje z doseganjem enkega obnašanja tudi drugih elementov do porušitve konstrukcije ali doseganja njenega maksimalnega pomika. Najvišja sposobnost pomika ustreza pomiku kontrolnega vozlišča, ki ga izberemo na referenčni medetažni konstrukciji in ki je tlorisno blizu središču togosti. Mejni pomik je dosežen pri sili, ki v podnožju etaže pada pod 80% najvišje dosežene vrednosti, to je odpornosti konstrukcije. Metoda omogoča izračun razmereja med prečno silo nad temelji stvbe in premikom kontrolnega vozlišča.

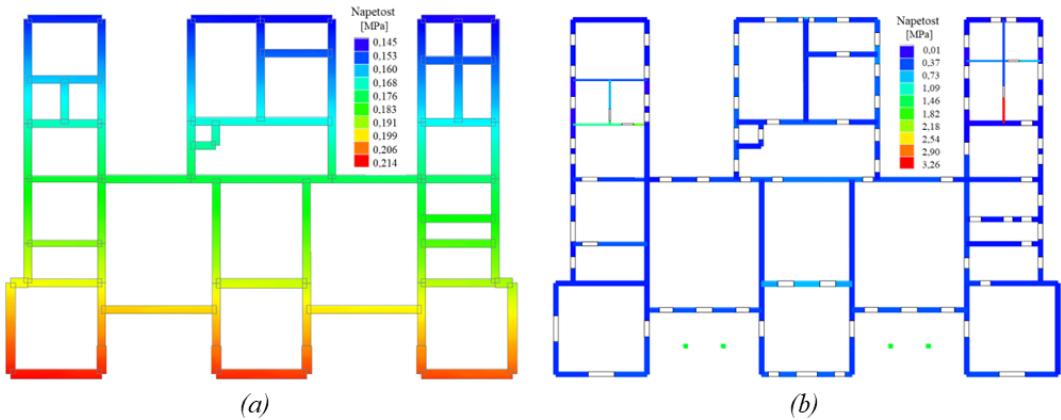
Rezultat analize se predstavi z etažnim diagramom potresne odpornosti. Poleg globalnega odziva konstrukcije, program 3Muri omogoča tudi vpogled v lokalno obnašanje vsakega elementa med postopnim narivanjem celotne konstrukcije.

Model stavbe se pripravi s pomočjo načrtov, kjer je natančno prikazana geometrija konstrukcije stavbe. Pri tem je treba poznati sestavo medetažnih konstrukcij in lastnosti temeljev in ostrešja. Verodostojnost rezultatov analize je pogojena s pravilnim upoštevanjem lastnosti vgrajenih materialov, kar zahteva terenske in laboratorijske preiskave njihovih mehanskih lastnosti. Pogosto se na terenu uporabljajo omejeno destruktivne metode, v laboratoriju pa destruktivne metode preskušanja materialov.

3.3 Rezultati analize potresne odpornost stavbe

3.3.1 Temelji in nosilni zidovi

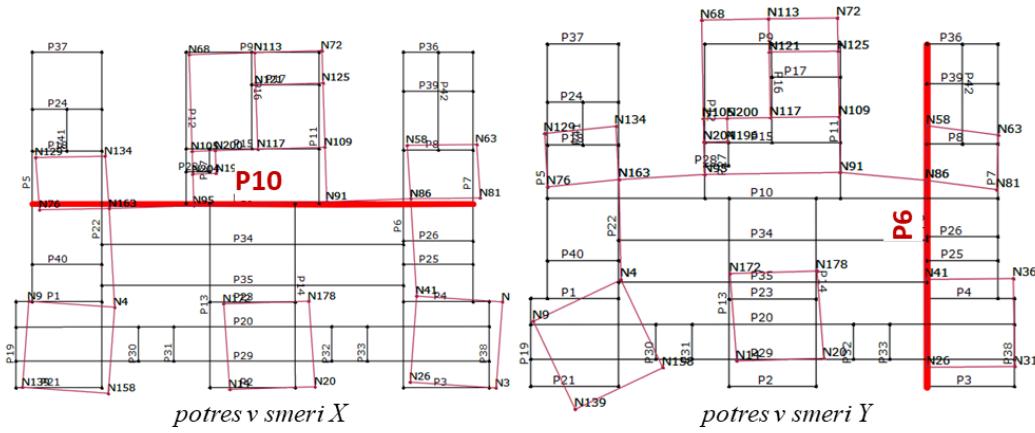
Program 3Muri izračuna tudi vpliv statičnih in potresnih obtežb izračunanih za 24 kombinacij delovanja vključno z ekscentričnostjo, ki je v skladu z Eurocodom 8 upoštevana v znesku 5% največje izmere v tlорisu stavbe v obravnavani smeri delovanja potresa. Na sliki 4 (a) so prikazane obremenitve temeljnih tal za projektirano ojačano konstrukcijo zgradbe ob upoštevanju maksimalnih vrednosti napetosti izračunanih zaradi statičnih in potresnih obremenitev. Najvišje dosežene vrednosti vzdolž temeljev pod zidovi južne fasade 0,21MPa so nižje od s terenskimi preiskavami določenih dopustnih obremenitev tal (projekirana odpornost tal) v iznosu 0,24MPa. Enako velja za napetosti v zidovih v ravnini nad temelji. Maksimalne vrednosti 3,26 MPa nastopajo v armiranobetonski steni iz betona klase C25/30, kar je bistveno pod mejo njegove tlačne trdosti.



Slika 4: Vrednosti napetosti v temeljnih tleh (a) in v zidovih nad temelji (b) za ojačano stavbo

3.3.2 Modalna analiza konstrukcije

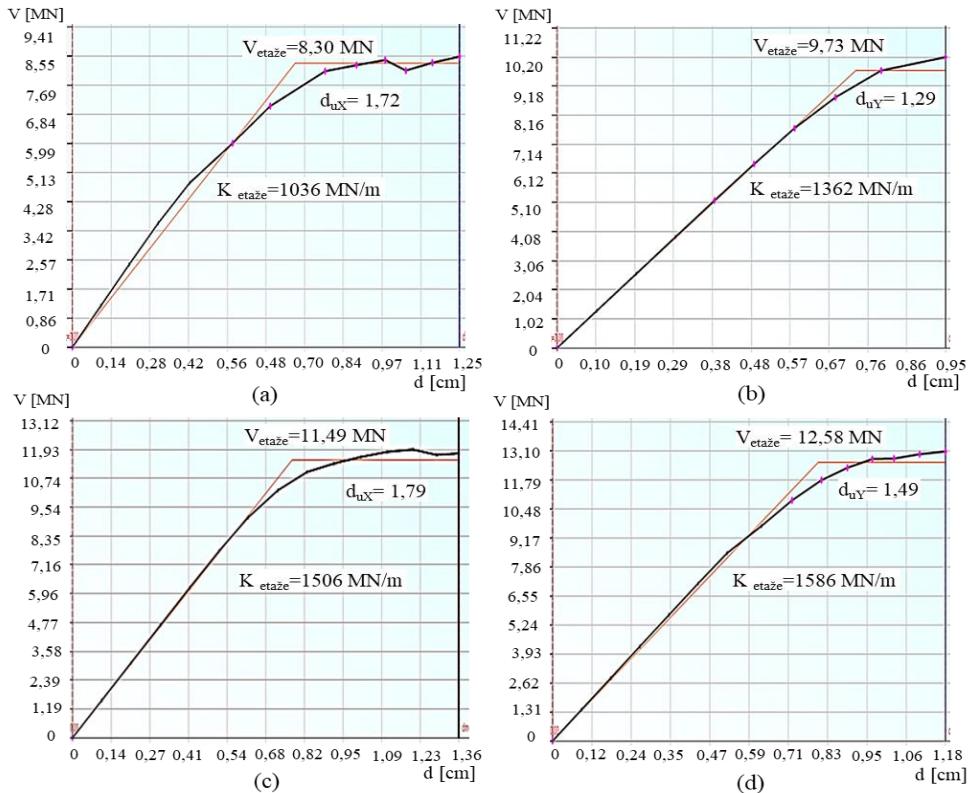
Pred analizo s postopnim narivanjem opravimo modalno analizo zato, da se lahko odločimo za merodajne nihajne oblike konstrukcije za katere opravimo analizo potresne odpornosti. Program omogoča izračun več kot 700 nihajnih oblik. Izkazalo se je, da izračun prvih 20 oblik povsem zadošča. Na Sliki 5 sta prikazani merodajni oblici nihanja za vsako od smeriu delovanja potresa. V prikazanem primeru ojačene konstrukcije je merodajna 4. oblika pri delovanju potresa v smeri x in 9. oblika pri delovanju potresa v smeri y. Izračunani nihajni čas konstrukcije v smeri x zunaša $T=0,31\text{s}$ in v smeri y $T=0,24\text{s}$.



Slika 5: Merodajne nihajne oblike ojačane konstrukcije

3.3.3 Analiza potresne opornosti s postopnim narivanjem

Na Sliki 6 so primerjani odzivi stavbe v zatečenem stanju in projektirane ojačane stavbe stavbe. Učinek ojačitve kažejo višje vrednosti doseženih etažnih nosilnosti in togosti ter duktilnosti konstrukcije v celoti.



Slika 6: Primerjava etažnih diagramov potresnega odziva stavbe v zatečenem stanu v smeri X (a) in smeri Y (b), ter ojačane stavbe v smeri X (c) in smeri Y (d) pri merodajni analizi

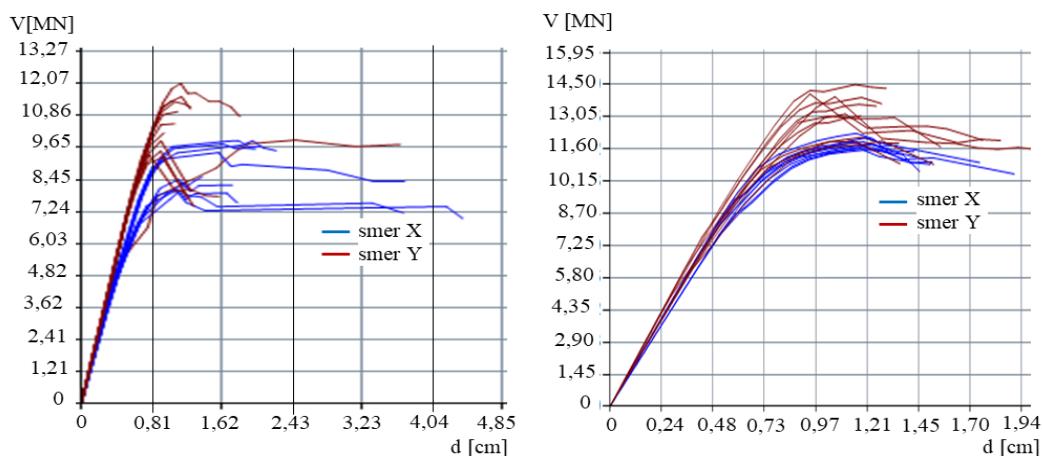
V Preglednici 1 so zbrane izračunane vrednosti indeksa močne poškodovanosti konstrukcije za vsako smer delovanja potresa. Prikazane vrednosti so merodajni rezultat 12 analiz v vsako smer. To pomeni, da so prikazane najnižje vrednosti izmed izračunanih v vsaki smeri. Prav tako so prikazani etažni diagrami rezultat merodajnih analiz, enako tudi vsi nadalje prikazani rezultati. Iz primerjave

indeksov močne popškodovanosti izhaja, da se je z ojačitvo doseglo zvišanje potresne odpornosti stavbe za 46% v x in za 55% v y smeri.

Preglednica 1: Izračunani indeksi močne poškodovanosti (IMO)

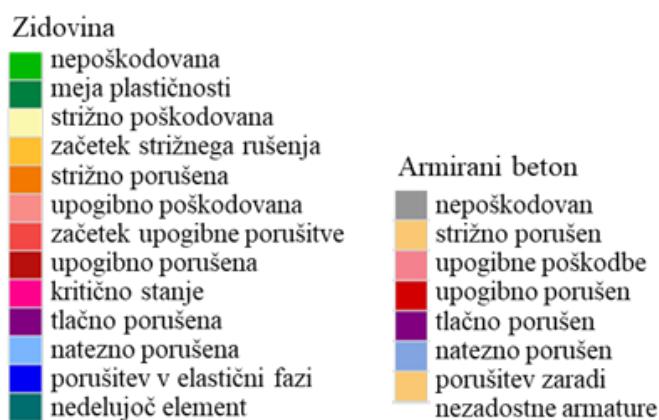
MODEL	a_{SD} (IMO), tip tla A	
	smer X	smer Y
Zatečena konstrukcija leta 2022	0,63	0,58
Ojačana konstrukcija (projekt)	0,92	0,90

Učinek ojačitvenih ukrepov ponazarjajo tudi diagrami na Sliki 7, kjer so prikazani etažni diagrami za vseh 24 analiz konstrukcije v zatečenem stanju in projektiranem ojačenem stanju. Učinek ojačitve se kaže v podobnosti odzivov dobljenih s posameznim analizam pri ojačani konstrukciji in različnosti odzivov konstrukcije v zatečenem stanju. Poleg tega so odzivi v obeh smereh pri ojačani konstrukciji podobni, kar ni slučaj pri obstoječi zgradbi.



Slika 7: Primerjava etažnih diagramov potresnega odziva stavbe v zatečenem stanju (a) in ojačane stavbe pri vseh 24 analizah

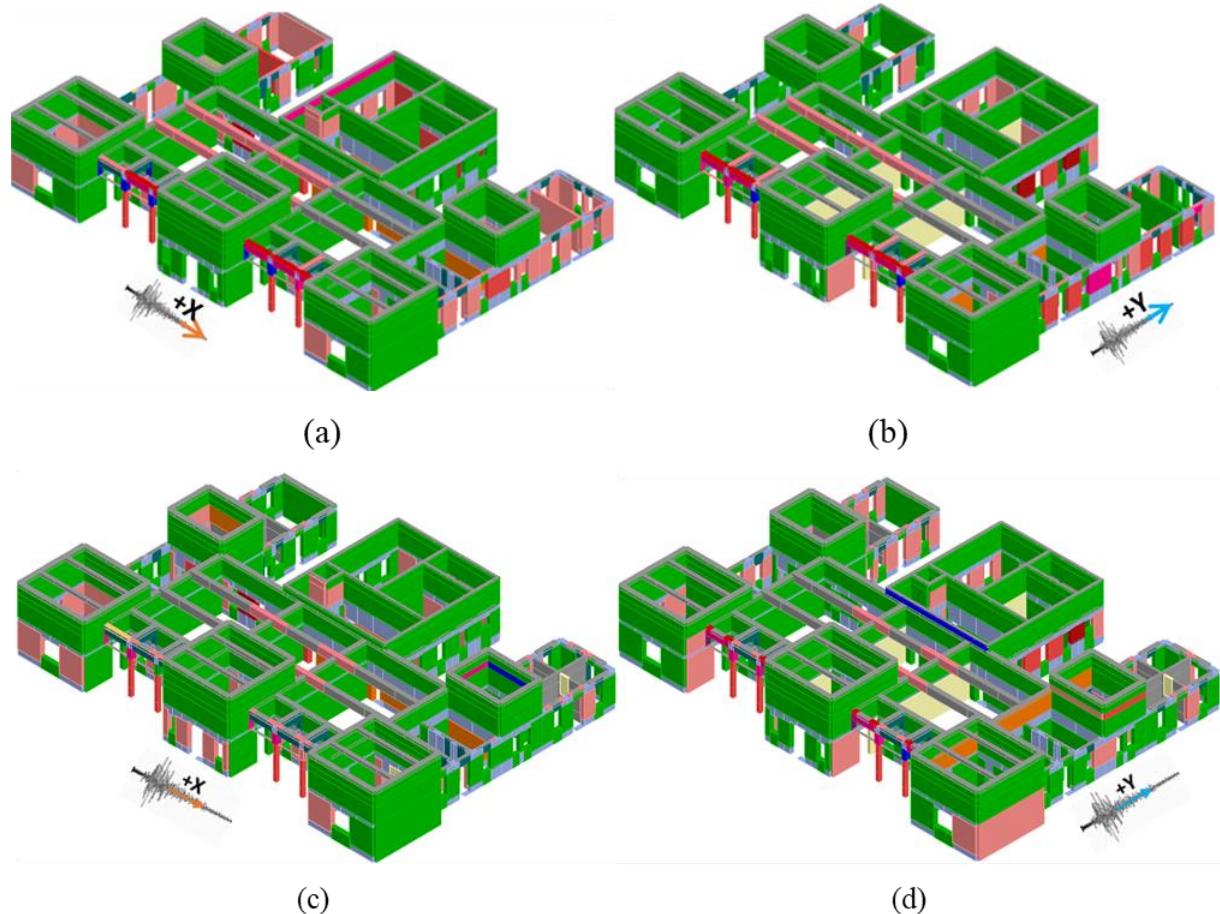
3.3.4 Prikaz poškodovanosti konstrukcije



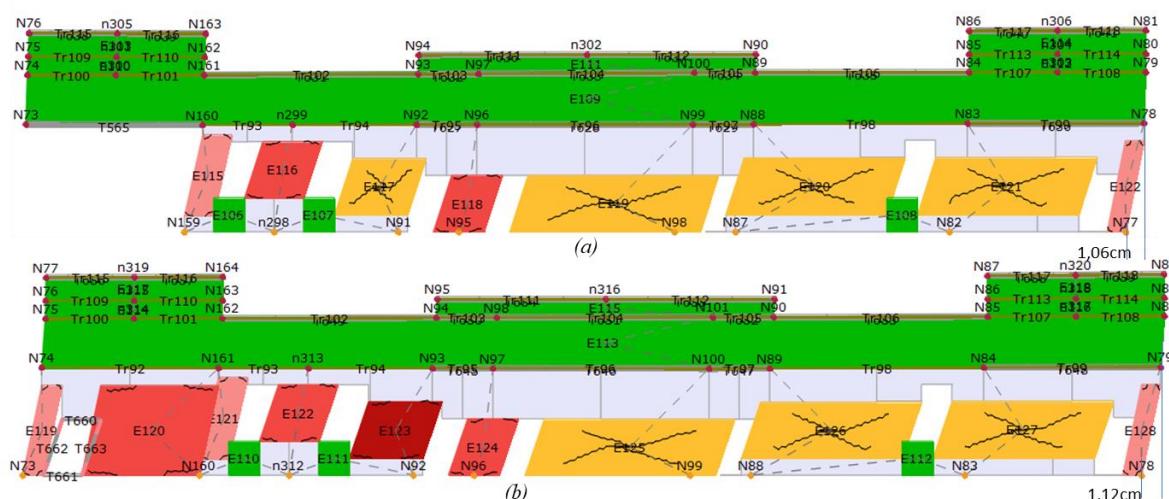
Slika 8: Legenda barvnih oznak stopnje poškodovanosti zidov in a.b. elemntov

Dobra lastnost programa 3Muri je, da omogoča identifikacijo kritičnih elementov in oceno

nevarnosti globalne porušitve zaradi poškodovanosti ali porušitve posameznih njenih delov. Na Sliki 8 je prikazana barvna legenda tipov poškodb nosilnih elementov konstrukcije, ki so prikazane na slikah 9, 10 in 11.

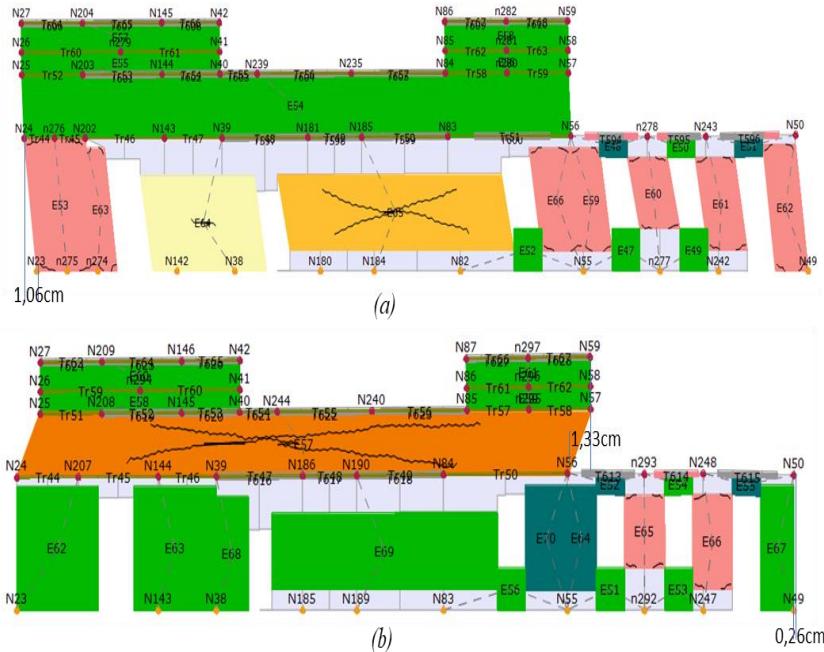


Slika 9: Prikaz poškodb konstrukcijskih elementov zgradbe v zatečenem stanju pri delovanju potresa v smeri x (a) in smeri y (b) ter ojačane stavbe v smeri x (c) in smeri y (d).



Slika 11: Primerjava poškodb zidov v nizu P10 pri delovanju popresa v smeri x

Iz prikaza poškodb na Sliki 9 se vidi učinek ojačitve konstrukcije na razporeditev poškodb v nosilnih zidovih in stenah. Pri zatečenem stanju so prikazane poškodbe v smeri x nastale pri vodoravni obtežbi 8,3 MN in v smeri y pri vodoravni obtežbi 9,73 MN, kot je to razvidno iz diagramov na Sliki 6. Prikazane poškodbe ojačane konstrukcije so nastale pri delovanju sil, ki so 38% višje v smeri x in 55% višje v smeri y. Na naslednjih dveh slikah je prikazan učinek ojačitve v dveh značinah presekih zgradbe. Na Sliki 5 je označena situacija obravnnavanih zidov v smeri x (niz P10) in v smeri y (niz P6). Kot navedeno, primerjamo stanje poškodb pri različnih vrednostih delujocih horizontalnih sil. V nizu P10 je dodan novi zid (E119, E120), ki prispeva k nosilnosti. Poškodbe na meji nosilnosti so praktično enake kot pri neojačanem nizu pri 38% nižji horizontani sili. V smeri y (niz P6) se učinek ojačitve pokaže v večji togosti konstrukcije.



Slika 11: Primerjava poškodb zidov v nizu P6 pri delovanju potresa v smeri y

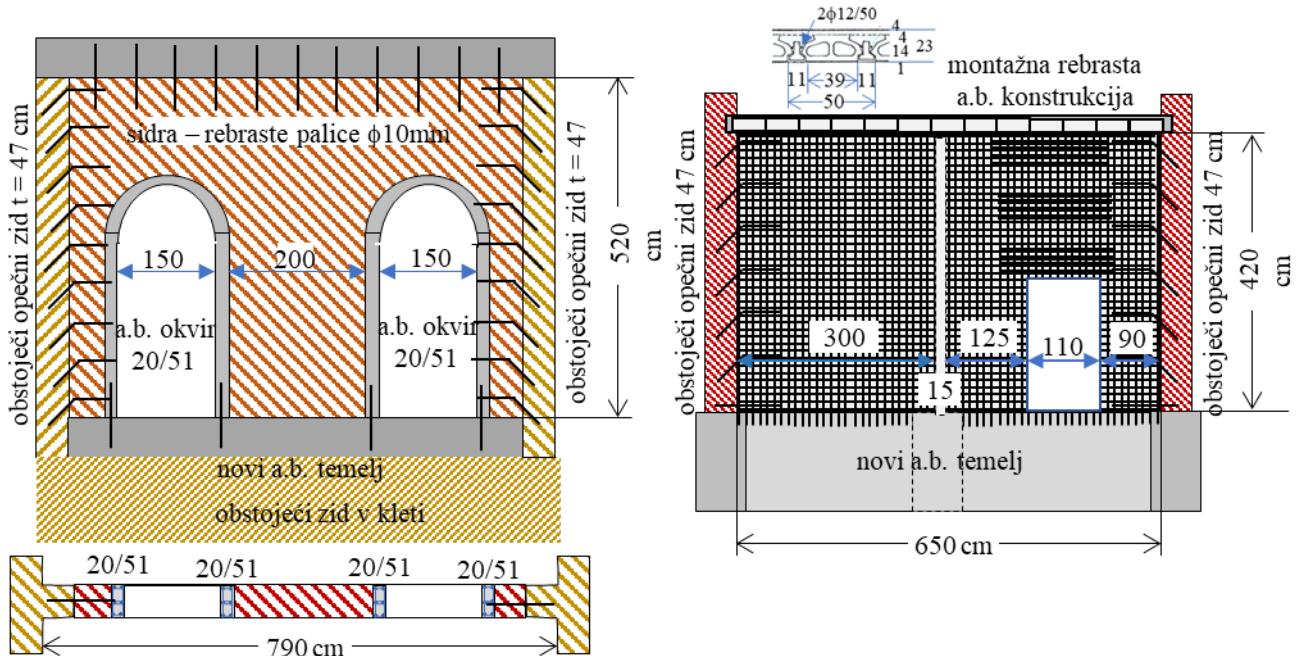
3.4 Opis ojačitvenih ukrepov

S projektiranim obsegom ojačitev se potresna odpornost konstrukcije zviša nad zahtevano po veljavnih predpisih na Hrvaškem. Ojačitveni ukrepi bodo obsegali:

- sanacijo obstoječih zidov, ki jih je poškodoval potres in ostalih poškodovanih delov stavbe
- vgradnjo novih opečnih zidov
- vgradnjo novih armiranobetonskih sten.

Pri pregledu stavbe po potresu smo ugotovili, da poleg poškodb, ki jih je povzročil potres so tudi poškodbe zaradi dolgotrajnega delovanja meteornih vod in talne vlage. Posebnost zgradbe je tudi montaža nove armiranobetonske rebricaste konstrukcije preko obstoječih leseni stropov, ki so leta 1993 med izvedbo del služili kot opaž za montažo. Pri tem niso odstranili nasipov na stropovih in je konstrukcija stavbe obtežena z nepotrebnimi masami v ravnini medetažnih konstrukcij. Z analizo potresne odpornosti smo ugotovili, da jo nepotrebna masa znižuje za približno 7% ne glede na smer delovanja potresa. Med izvedbo sanacije in ojačitve bodo odstranili vse omete tako na zidovih kot na stropovih in ugotovili dejanski obseg poškodb zaradi potresnih sil in zaradi dolgotrajnih procesov propadanja vgrajenih materialov. Na osnovi teh ugotovitev, bodo pred vgradnjo novih zidov in sten ustrezno sanirali obstoječe zidove z injektiranjem ali delno zamenjavo dela

nekvalitetne malte v zidnih fugah. V primeru ugotovljenega propadanja lesenih stropnikov bodo odstranili stare stropne konstrukcije. Poleg sanacije zidov, bodo z ustreznimi ukrepi odpravili vplive meteorne vode in talne vlage na trajnost konstrukcije.



Slika 12: Prikaz sidranja novega zida Z1 in a.b.stene Z5

Novi zidovi in armiranobetonske stene bodo ugrajene tako, da bo dosežena največja možna mera sodelovanja pri prenosu bodoče potresne obtežbe. Zato bodo novi konstrukcijski elementi sidrani v obstoječe, predhodno sanirane zidove in stropove ter postavljeni na nove temelje. Na stičnih območjih novovgrajenih zdov in sten bodo uporabili betone in malte z ekspanzijskimi dodatki.

Stavba je delno podkletena in opečni zidovi kleti predstavljajo temelje zidov v pritličju. Kletni zidovi so površinsko poškodovani zaradi vlage in zmrzovanja in tajanja. Po sanaciji vplivov vlage bodo kletni zidovi ojačani z enostransko armirano in sidrano cementno oblogo.

4. LITERATURA

- [1] Zakon o obnovi zgrada oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-moslavačke županije i Karlovačke županije (NN 102/20 i 10/21) Vir: [Zakon o obnovi zgrada oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-moslavačke županije i Karlovačke županije - Zakon.hr](#). Dostop: 3.10.2022
- [2] Tehnički propis o izmjenama i dopunama tehničkog propisa za građevinske konstrukcije, NN 75/20,. Vir: [Tehnički propis o izmjenama i dopunama Tehničkog propisa za građevinske konstrukcije \(nn.hr\)](#). Dostop: 3.10.2022.
- [3] Eurocode 8 (HRN EN 1998-1:2011;HRN EN 1998-3/NA).
- [4] [3Muri - www.adriabim.com](#) Dostop:3.10.2022