

Obnova zidane zgrade

Vukić, Gabriela

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:132419>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-01**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Gabriela Vukić

OBNOVA ZIDANE ZGRADE

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Gabriela Vukić

OBNOVA ZIDANE ZGRADE

ZAVRŠNI ISPIT

Izv. prof. dr. sc. Marta Šavor Novak

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Gabriela Vukić

RETROFIT OF A MASONRY BUILDING

FINAL EXAM

Assoc. prof. Marta Šavor Novak

Zagreb, 2024.

ZAHVALE

Hvala mentorici što mi je iskustvo pisanja rada učinila lijepim iskustvom uz minimalan stres i što mi je približila samu temu završnog rada.

Hvala mom zaručniku Tvrtku, za kojeg se udajem za 10 dana, što je cijele dane čuvao djecu kako bih se ja mogla posvetiti pisanju rada.

Hvala mojoj mami što je izmolila stotinu krunica za moju obranu.

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je obnova zidane zgrade nakon potresa. Konstrukcija zahvaćena potresom modelirana je u softveru ETABS temeljenom na metodi konačnih elemenata. Nakon što je napravljen numerički model i analiza opterećenja, proveden je proračun.

Nakon proračuna, donesen je zaključak o potresnoj otpornosti i opisane su mjere obnove te način pojačanja zida na posmično opterećenje.

Ključne riječi: potres, seizmičko opterećenje, posmik, pojačanje zida, obnova

SUMMARY

The topic of this final work is the reconstruction of a brick building after an earthquake. The structure affected by the earthquake was modeled in ETABS software based on the finite element method. After the numerical model and load analysis were made, the calculation was carried out.

After the calculation, a conclusion was made about the earthquake resistance and the reconstruction measures and the method of strengthening the walls against the shear load was described.

Key words: earthquake, seismic load, shear, reinforcement of walls, renovation

SADRŽAJ

ZAHVALE	i
SAŽETAK	ii
SUMMARY	iii
SADRŽAJ	iv
1. UVOD	1
2. METODE I TEHNIKE RADA	2
3. TEHNIČKI OPIS ZGRADE	3
4. NUMERIČKI MODEL ZGRADE	5
4.1. OPIS MODELA	5
4.2. ANALIZA OPTEREĆENJA	10
4.2.1. VLASTITA TEŽINA	10
4.2.2. DODATNO STALNO OPTEREĆENJE	10
4.2.3. UPORABNO OPTEREĆENJE	11
4.2.4. POTRES	11
4.2.5. SLUČAJEVI I KOMBINACIJE OPTEREĆENJA	13
4.2.6. REZULTATI ANALIZE OPTEREĆENJA	18
5. ZAKLJUČAK POTRESNE OTPORNOSTI I MJERE OBNOVE	23
5.1. POJAČANJE ZIDA NA POSMIK POMOĆU FRP-a ili TRM-a	24
5.1.1. FRP	24
5.1.2. TRM	25
5.1.3. USPOREDBA FRP-a I TRM-a	25
6. POJAČANJE ZIDA NA POSMIK	26
6.1. PONAŠANJE ZIDA IZLOŽENOG POSMIKU	26
6.2. OPIS POJAČANJA	29
6.3. PRORAČUN POJAČANJA ZIDA FRCM-om	30
7. ZAKLJUČAK	39
POPIS LITERATURE	40
POPIS SLIKA	41
POPIS TABLICA	42

1. UVOD

U ovom radu obrađujem temu obnove zidane zgrade nakon oštećenja nastalih u zagrebačkom potresu, 22. ožujka 2020. godine. Nastupila su dva snažna i uzastopna potresa u razmaku od svega 37 minuta – prvi potres magnitude 5,5 prema Richteru te naknadni magnitude 4,9 prema Richteru. Potresom je bilo zahvaćeno oko 25.000 zgrada od čega su najviše stradale zgrade u centru grada.

Velik dio stambenih jedinica (gotovo trećina) izgrađena je prije 1964. godine, odnosno prije nego što su doneseni prvi seizmički propisi; dok je dio stambenih jedinica sagrađenih nakon 1964. godine projektiran na znatno manje seizmičko opterećenje. Drugim riječima, zgrade užeg centra Grada Zagreba uopće nisu projektirane na potresno opterećenje, a samim time su one i najviše stradale.

Preliminarni pregledi uporabljivosti zgrada na terenu obavljao se primjenom aplikacije temeljene na GIS sustavu koja je već treći dan od potresa zamijenila tiskani obrazac. Zgrade su tako dobivale oznake: zelena (uporabljiva bez ograničenja – U1 ili s preporukom o postupanju – U2), žuta (privremeno neuporabljiva koju treba detaljno pregledati – PN1 ili može postati uporabljiva uz mjere hitne intervencije – PN2) i crvenu (neuporabljiva zbog vanjskih utjecaja – N1 ili zbog oštećenja – N2).

U ovome radu detaljnije ćemo opisati potresnu otpornost kao konstrukcije, kao i mjere obnove i pojačanja na posmik kojima bi se postigla viša razina mehaničke otpornosti i bolja tehnička svojstva konstrukcije.

2. METODE I TEHNIKE RADA

Za izradu ovog rada korišten je softverski paket prilagođen projektiranju u građevinarstvu – ETABS, temeljen na metodi konačnih elemenata, u kojem je izrađen numerički model.

Prikupljene su sve dostupne informacije i tlocrti te je napravljena analiza opterećenja. Zatim je napravljen numerički model te je proračunat na djelovanje potresa metodom spektra odziva. Analizirani su rezultati te je donesen zaključak o potresnoj otpornosti.

Rad je završen odabirom mjere obnove i proračunom pojačanja zida na posmik.

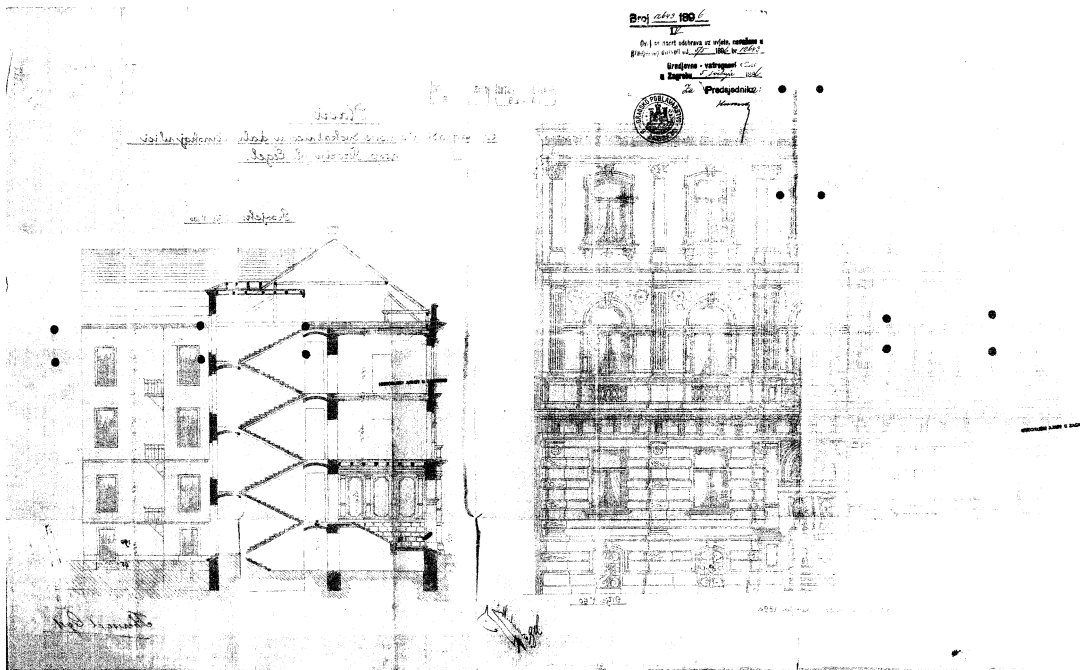
3. TEHNIČKI OPIS ZGRADE

Konstrukcija je zidana zgrada Donjeg grada izgrađena u 19. stoljeću, čiji projekt datira iz 1896. godine.

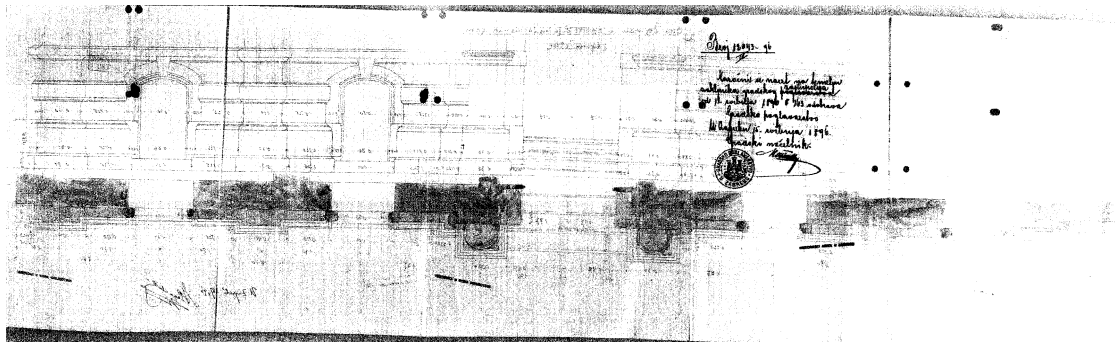
Zgrada ima četiri etaže – prizemlje i tri kata, a orijentirana je u smjeru sjever – jug. Oblik tlocrta je simetričan, približan slovu U, ukupne površine od 336,995 m².

Visina etaža počevši od prizemlja su 5 m, 4,5 m, 4,5 m i 3,5 m.

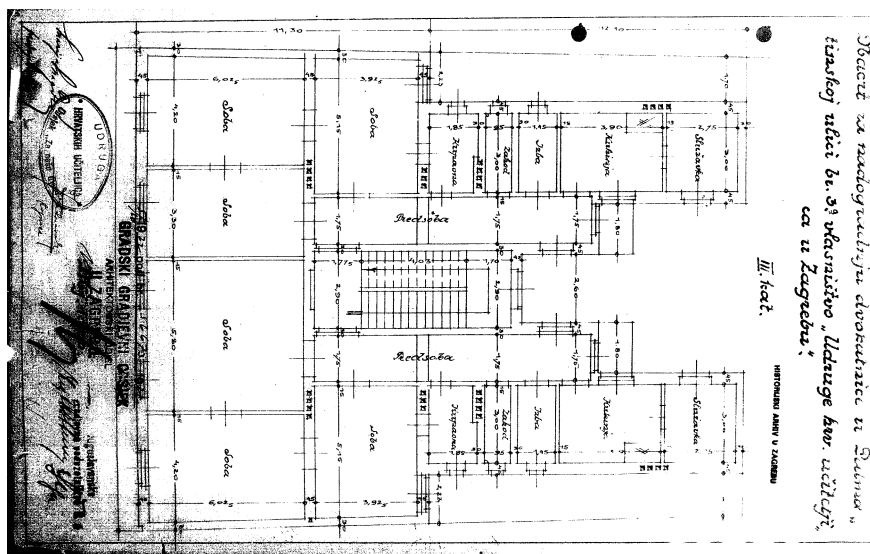
Nacrti:



Slika 1. – poprečni presjek zgrade (lijevo) i pogled s ulazne strane zgrade (desno)



Slika 2. – pogled



Slika 3. – tlocrt treće etaže

4. NUMERIČKI MODEL ZGRADE

4.1. OPIS MODELA

Za izradu numeričkog modela korišten je ETABS. Model je napravljen prateći dane tlocrte zgrade uz minimalna pojednostavljenja.

Za svojstva opeke je zadano sljedeće:

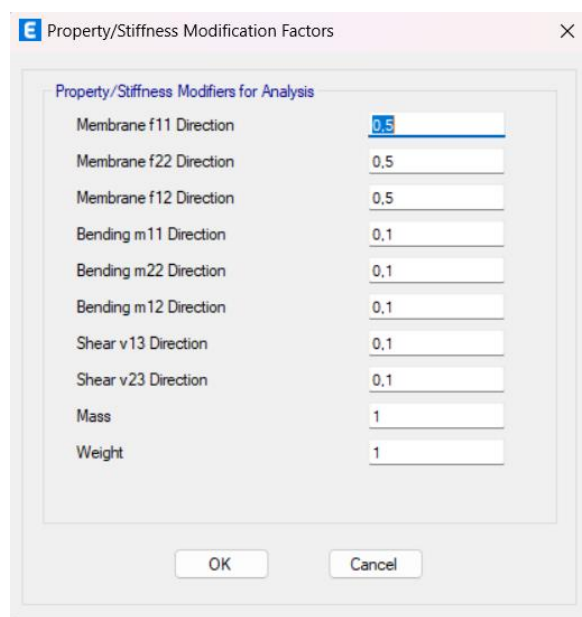
- Modul elastičnosti: 1500 MPa
- Poissonov koeficijent: 0,49
- Modul posmika: 503,36 MPa

Za svojstva betona zadani su:

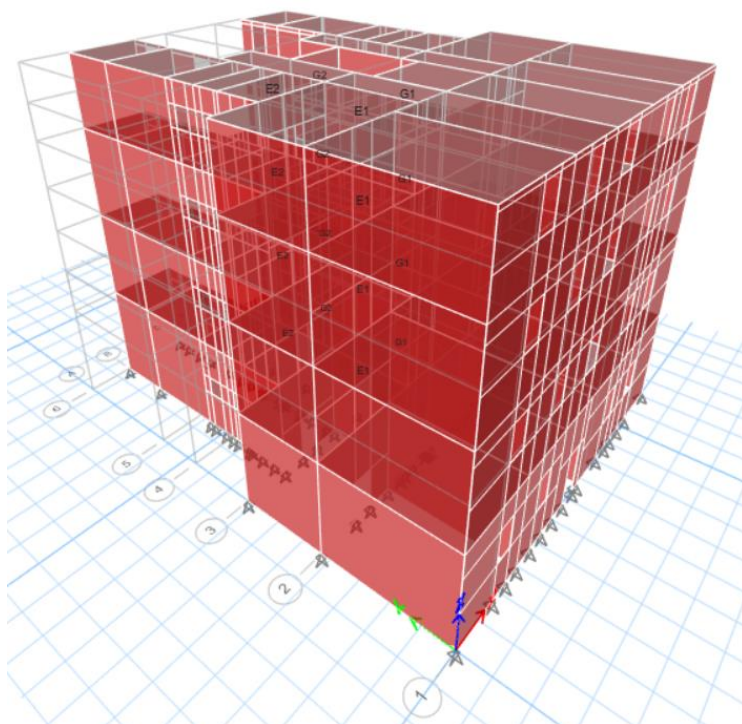
- Modul elastičnosti: 30000 MPa
- Poissonov koeficijent: 0,2
- Modul posmika: 125000 MPa

Modelirani su svi zidovi – nosivi su debljine 30 cm ili 40 cm, dok su svi pregradni zidovi debljine 15cm. Stropne konstrukcije i međupodesti su definirani kao '*slab*' debljine 10 cm i s karakteristikama betona. Sva unutarnja vrata širine su od 100 cm i visine 220 cm, dok su vanjska ulazna vrata visine 285cm. Prozori koji gledaju na ulicu modelirani su s dimenzijama 100x180cm, a prozori na stražnjoj strani su dimenzija 80x80 cm. Međupodesti su modelirani na polovici visine svake etaže.

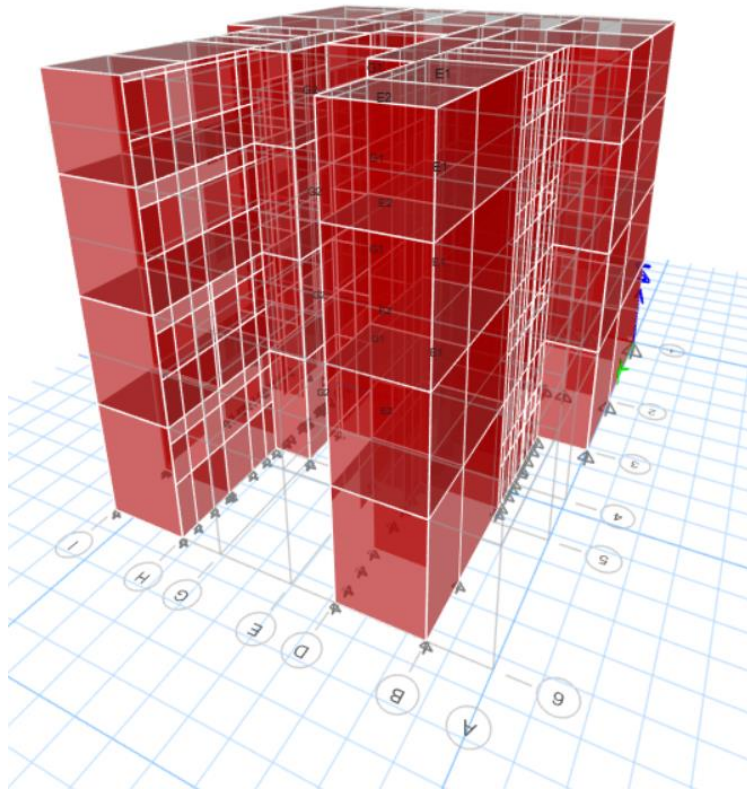
Krutost zidova je smanjena na sljedeći način:



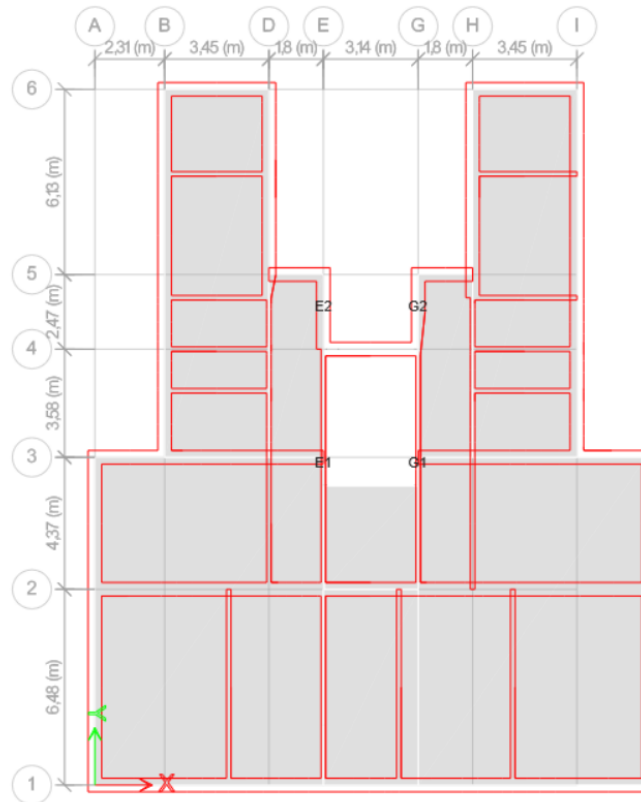
Slika 4. – modificirana krutost zida



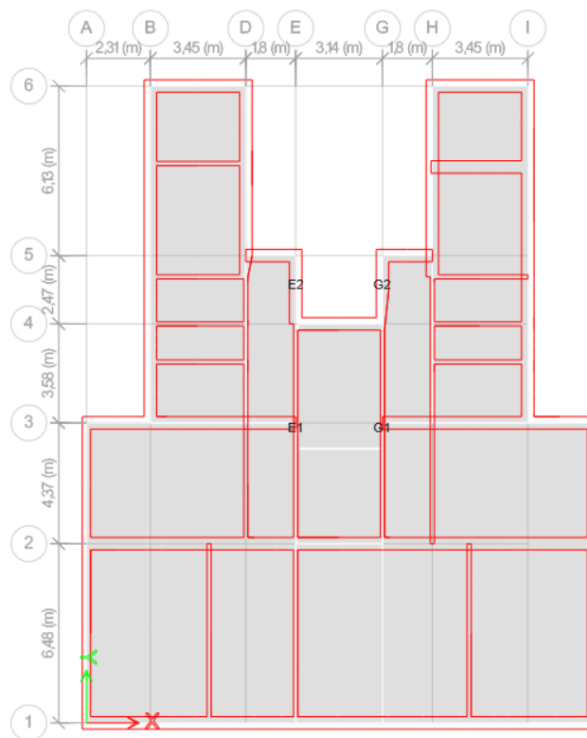
Slika 5. – model konstrukcije



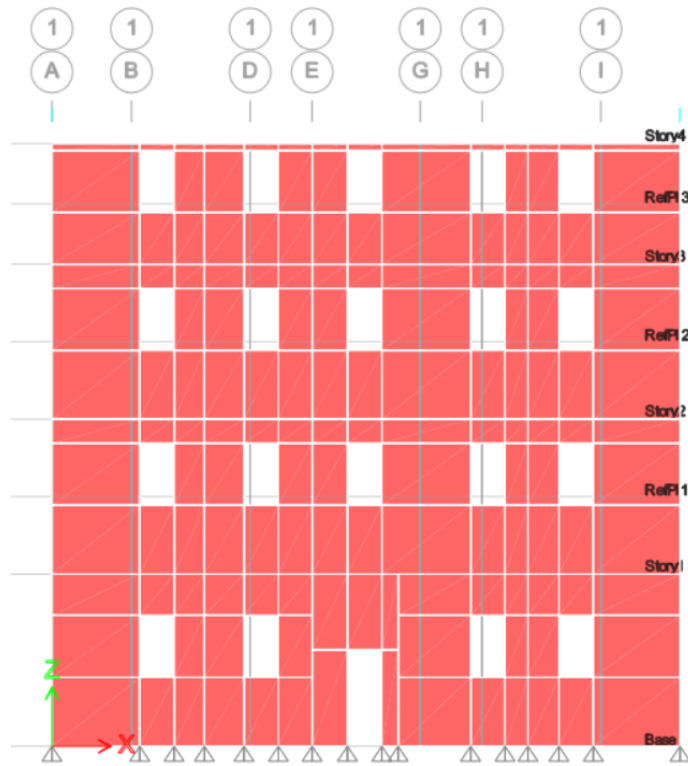
Slika 6. – model konstrukcije



Slika 7. – tlocrt prizemlja



Slika 8. – tlocrt ostalih etaža



Slika 9. – pogled na ulaznu stranu konstrukcije



Slika 10. – pogled na stražnju stranu konstrukcije

4.2. ANALIZA OPTEREĆENJA

4.2.1. VLASTITA TEŽINA

Vlastita težina konstrukcijskih elemenata ne unosi se kao zasebno opterećenje. Softver sam generira težine, ali potrebno je dodati dodatno stalno opterećenje.

4.2.2. DODATNO STALNO OPTEREĆENJE

Dodatno stalno opterećenje svih etaža:

- Završni pod parket h=12 cm	0,125 kN/m ²
- Daščana oplata	0,125 kN/m ²
- Šuta (h=14 cm)	1,70 kN/m ²
- Daščana oplata	0,125 kN/m ²
- Grednici	0,50 kN/m ²
- <u>Pregradni zidovi prizemlja</u>	<u>2,1 kN/m²</u>

Gdje ukupno ispada: $\Delta g_{kp} = 4,68 \text{ kN/m}^2$

Dodatno stalno opterećenje trećeg kata:

- Daščana oplata	0,125 kN/m ²
- Šuta (h=14 cm)	1,70 kN/m ²
- Daščana oplata	0,125 kN/m ²
- <u>Grednici</u>	<u>0,50 kN/m²</u>

Gdje ukupno ispada: $\Delta g_{kp} = 2,45 \text{ kN/m}^2$

Stropovi su modelirani kao betonska ploča debljine 10cm i težine 25kN/m² zbog čega će se opterećenje nanositi tako da od proračunatih dodatnih stalnih opterećenja oduzmemo težinu betonske ploče koja iznosi 2,5kN/m².

Odnosno, na stropove nanosimo $2,18\text{kN/m}^2$.

Dodatno stalno opterećenje krovišta:

- Glineni crijep $0,50\text{kN/m}^2$

Na stropnu ploču trećeg kata nanosimo opterećenje slojeva zajedno s dodatnim stalnim opterećenjem krovišta i s oduzetom težinom betonske ploče debljine 10cm. To ukupno iznosi $0,45\text{kN/m}^2$.

4.2.3. UPORABNO OPTEREĆENJE

Vrijednost uporabnog opterećenja iznosi 2kN/m^2 za međukatne konstrukcije, odnosno $1,0\text{kN/m}^2$ za krovište.

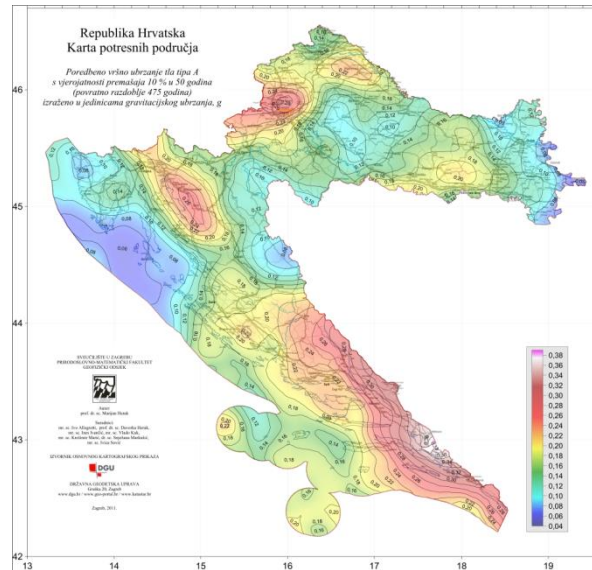
Uporabno opterećenje nanosi se istim postupkom kao što je nanijeto i dodatno stalno.

4.2.4. POTRES

Seizmičko opterećenje uzima se prema normama HRN EN 1998.1:2011 i HRN EN 1998.1:2011/NA:2011.

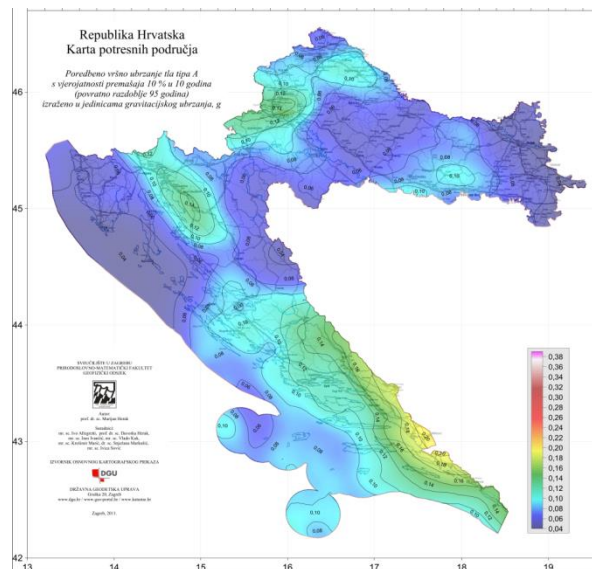
Ubrzanje tla za konkretnu lokaciju je ulazni podatak koji se koristi za proračun

Iz slike 11, koja prikazuje potresno područje povratnog perioda od 475 godina, iščitavamo da je $a_{475} = 0,256\text{ g}$.



Slika 11. – karta potresnih područja RH – povratni period 475 godina

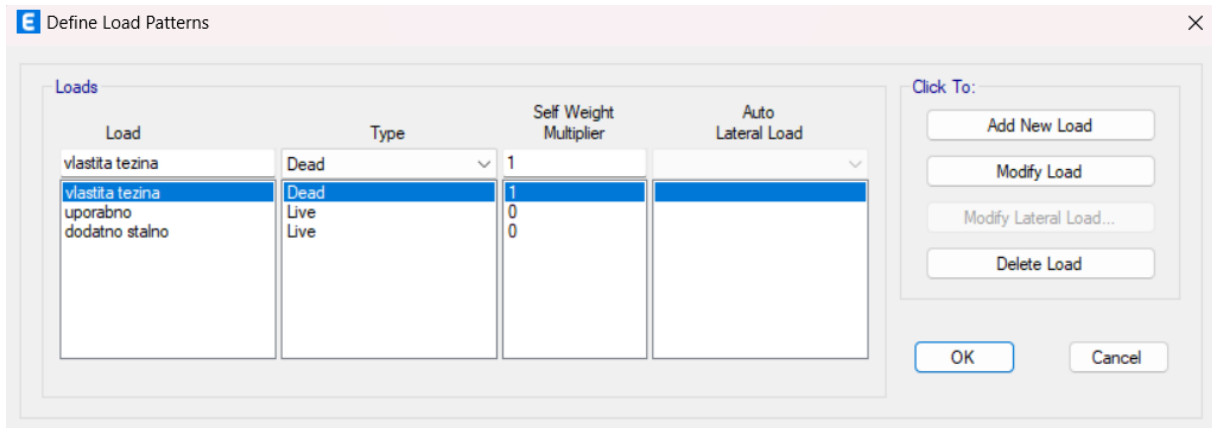
Iz karte potresnih područja RH povratnog perioda od 95 godina iščitavamo $a_{95} = 0,129$ g. Za proračun je uzeto ubrzanje $a_{95} = 0,129$ g, tlo C i $q = 1,5$ jer se pretpostavlja da će se zgrada obnavljati na Razinu 2 u skladu s Tehničkim propisom za građevinske konstrukcije.



Slika 12. – karta potresnih područja RH – povratni period 95 godina

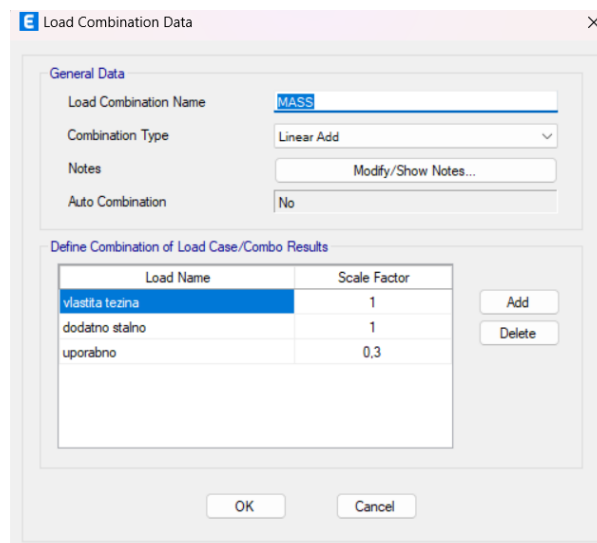
4.2.5. SLUČAJEVI I KOMBINACIJE OPTEREĆENJA

Za slučajeve opterećenja zadano je sljedeće:



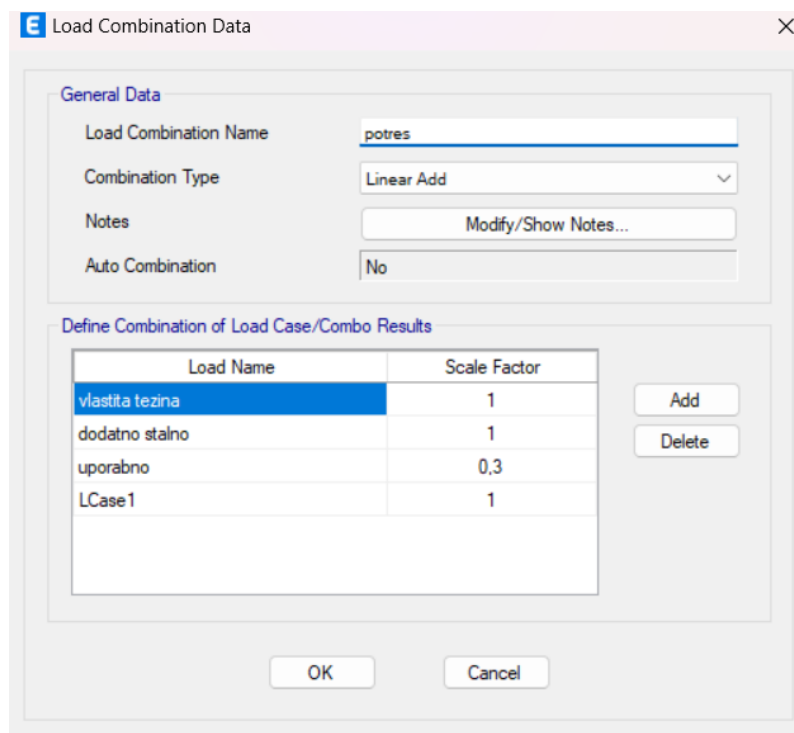
Slika 13. – slučajeve opterećenja

Nakon slučajeva opterećenja, definiramo kombinaciju 'MASS' za izračun vertikalnog djelovanja (potrebnog za proračunsku masu):



Slika 14. – kombinacija opterećenja MASS

Za izračun sila od potresa koristimo sljedeće kombinacije:



General Data

Load Combination Name: potres

Combination Type: Linear Add

Notes: Modify/Show Notes...

Auto Combination: No

Define Combination of Load Case/Combo Results

Load Name	Scale Factor
vlastita tezina	1
dodatno stalno	1
uporabno	0,3
LCCase1	1

Add

Delete

OK Cancel

Slika 15. – kombinacija 'potres'

The dialog box 'Load Combination Data' is shown with the following settings:

- Load Combination Name: kombinacija spektar elast
- Combination Type: Linear Add
- Notes: Modify/Show Notes...
- Auto Combination: No

The 'Define Combination of Load Case/Combo Results' section contains a table with the following data:

Load Name	Scale Factor
vlastita tezina	1
dodatno stalno	1
LCase1-elast	0,3
uporabno	1

Buttons for 'Add' and 'Delete' are visible to the right of the table. 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom.

Slika 16. – kombinacija spektar

The dialog box 'Load Combination Data' is shown with the following settings:

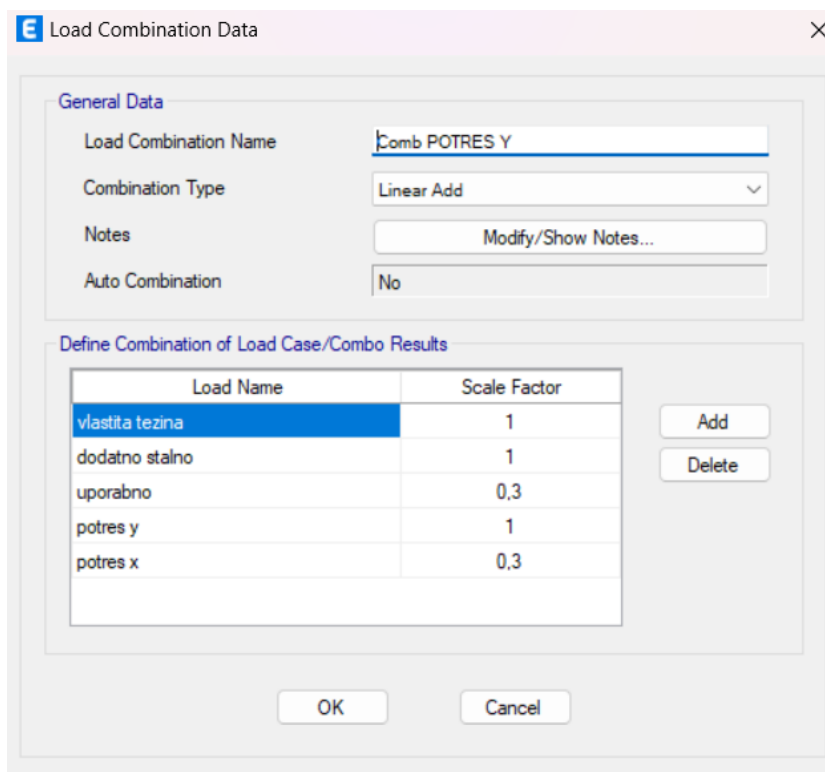
- Load Combination Name: Comb POTRES X
- Combination Type: Linear Add
- Notes: Modify/Show Notes...
- Auto Combination: No

The 'Define Combination of Load Case/Combo Results' section contains a table with the following data:

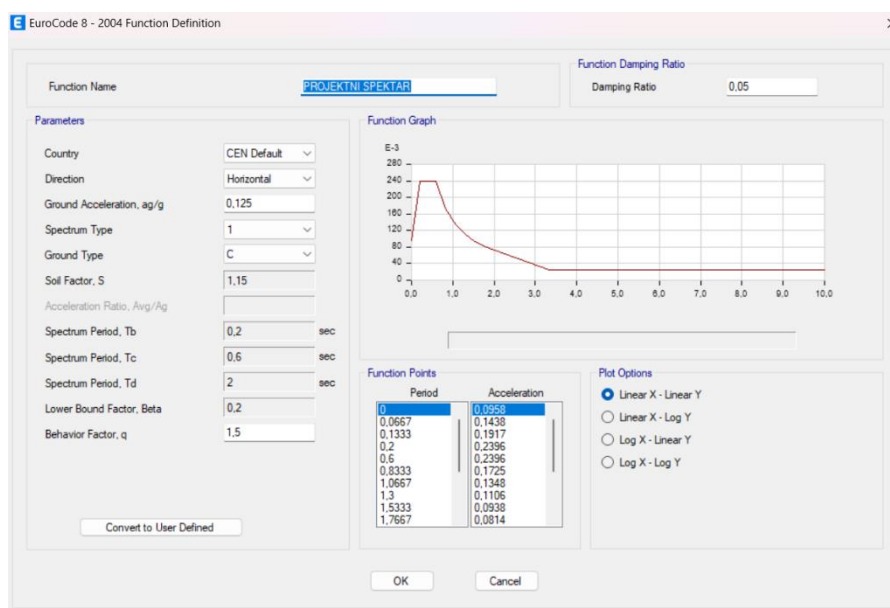
Load Name	Scale Factor
vlastita tezina	1
dodatno stalno	1
uporabno	0,3
potres x	1
potres y	0,3

Buttons for 'Add' and 'Delete' are visible to the right of the table. 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom.

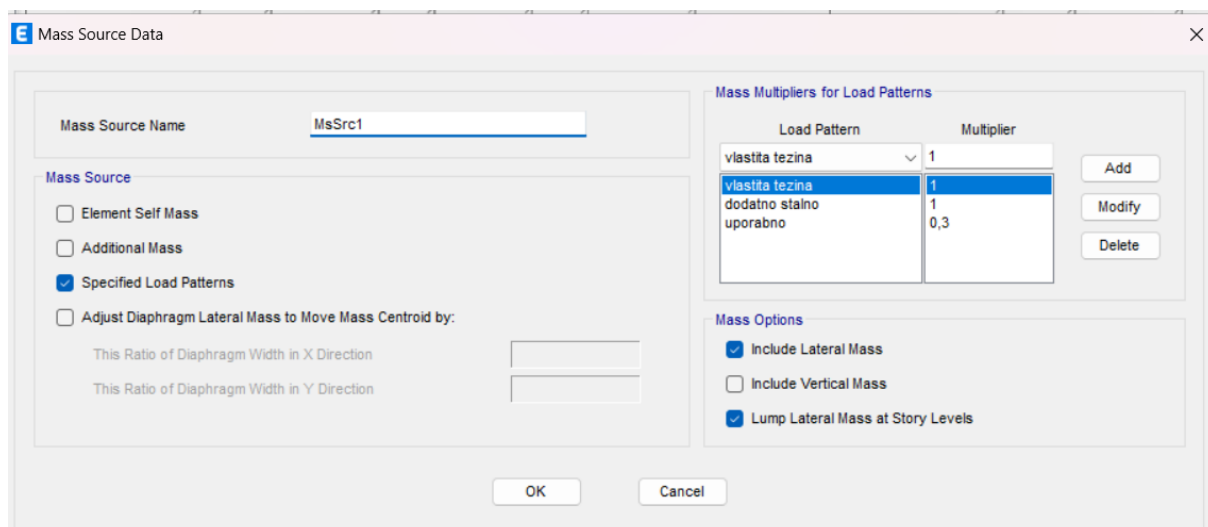
Slika 17. – kombinacija za potres u x smjeru



Slika 18. – kombinacija za potres u y smjeru



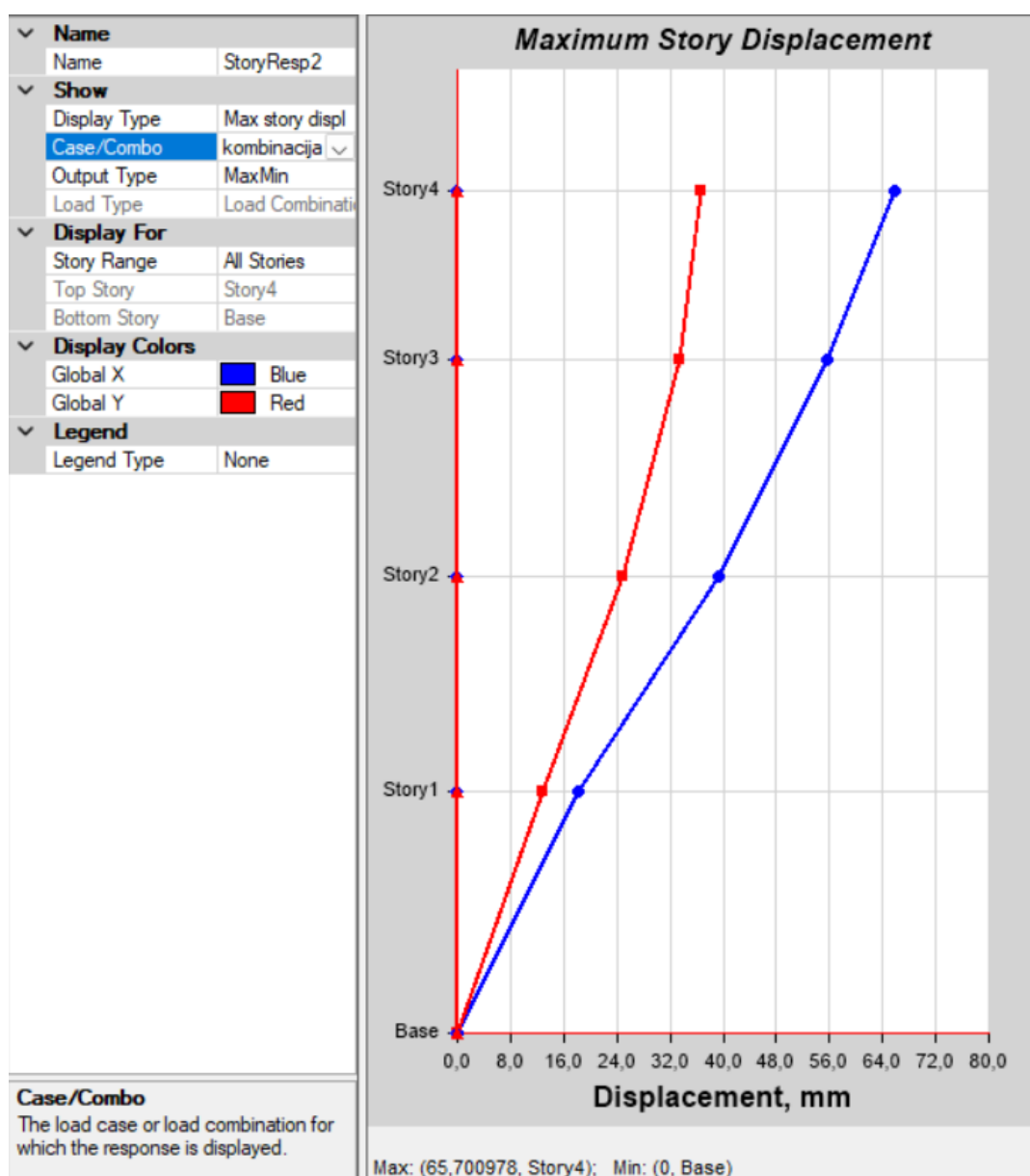
Slika 19. – projektni spektar



Slika 20. – proračunska masa kod proračuna potresa

i) REZULTATI POMAKA

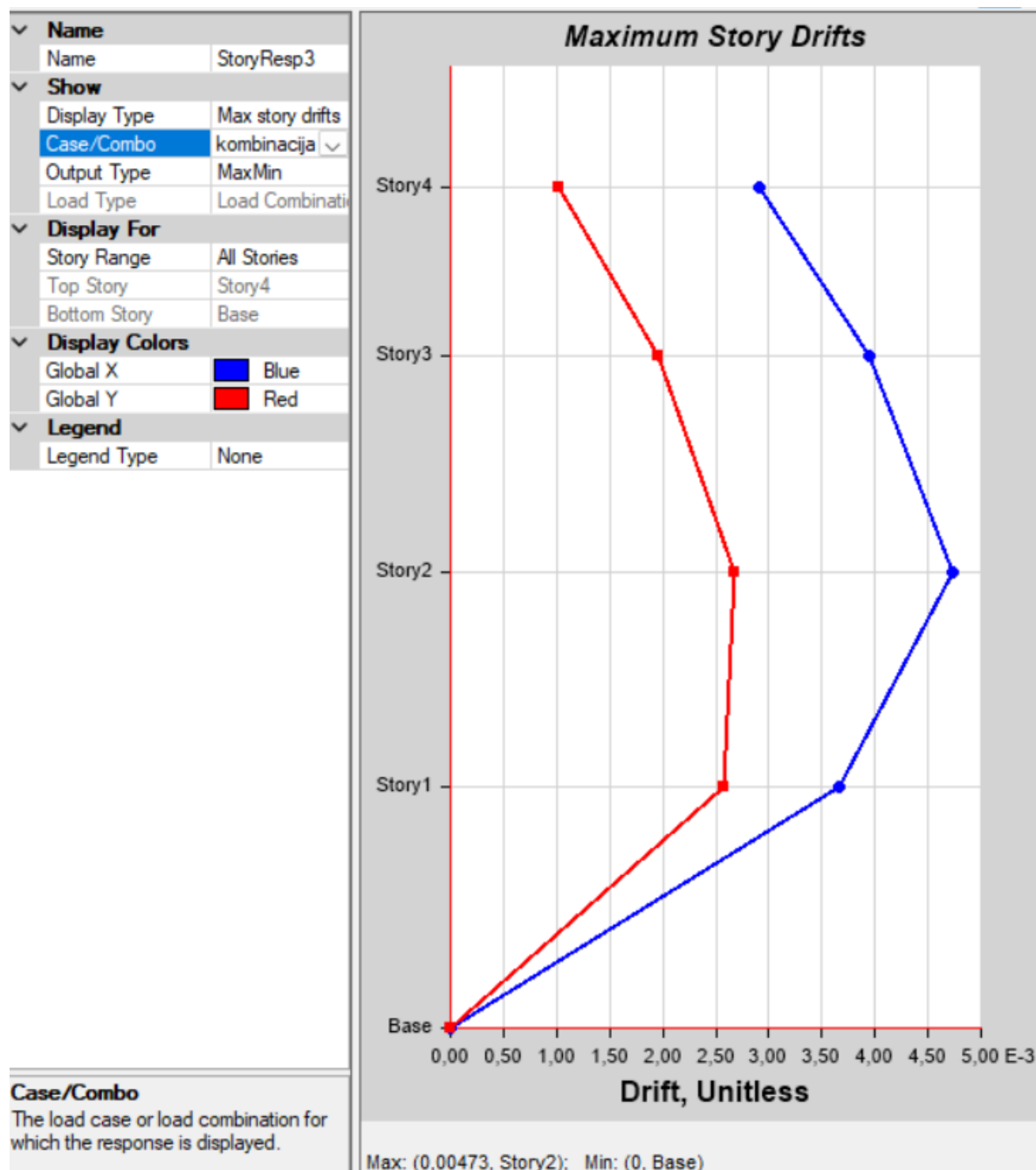
Analizom pomaka, primjećujemo pomake većih vrijednosti u y smjeru. To se najlakše uočava grafom maksimalnih pomaka po katovima gdje također vidimo i da se pomaci povećavaju s katnosti.



Slika 21. – maksimalni pomaci po katovima

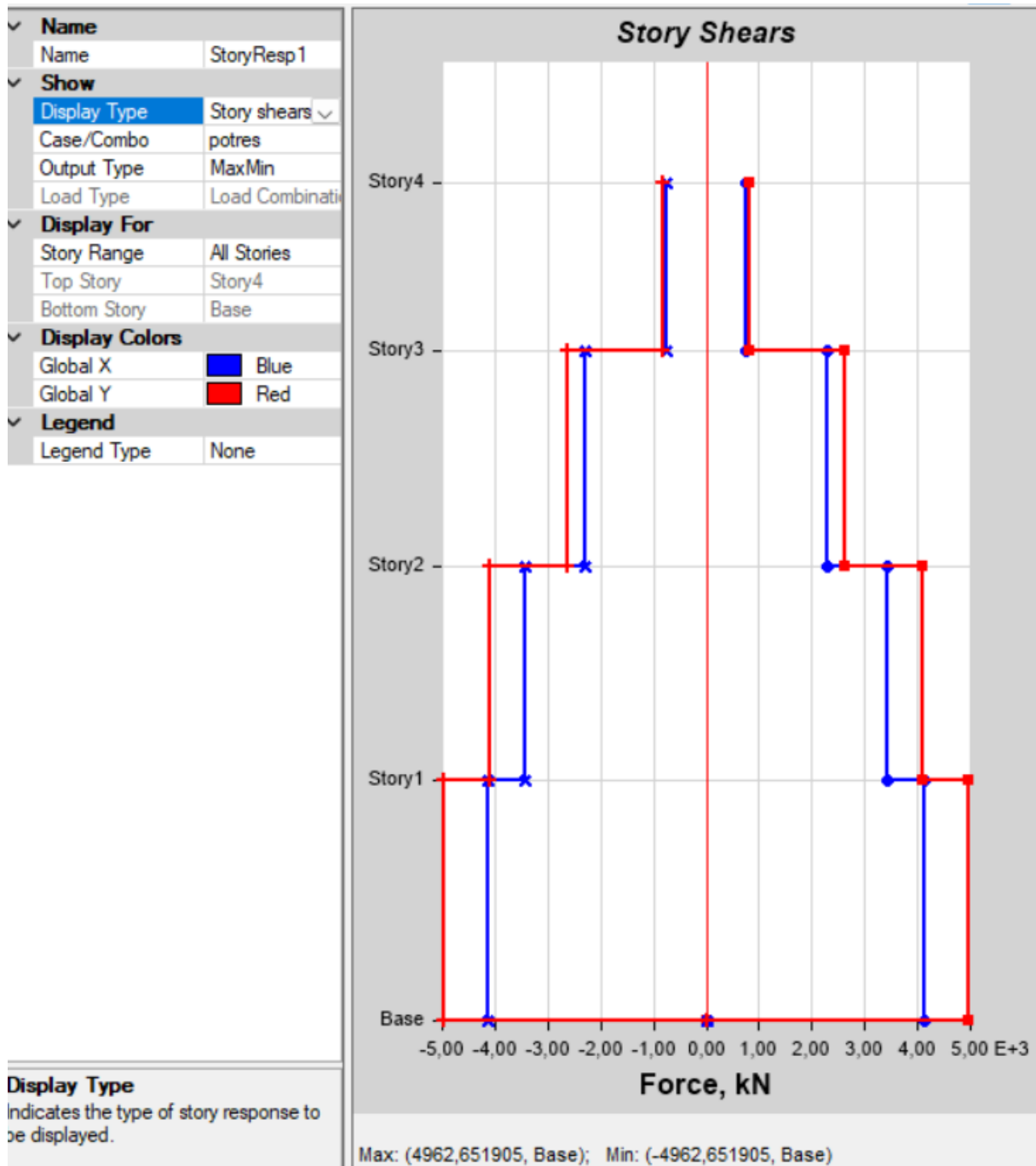
Grafom maksimalnih međukatnih pomaka uočavamo da je do najvećih pomaka došlo na prvom katu.

Kako se međukatni pomak povećava, tako krutost opada – tako možemo zaključiti da je na prvom katu najmanja krutost.



Slika 22. – maksimalni međukatni pomak

Grafom horizontalnih sila po etažama vidimo koliko horizontalnog opterećenja, nastalog kao posljedica potresa, djeluje na svakoj etaži. Vidljivo je i kako se to opterećenje smanjuje s visinom.



Slika 23. – graf horizontalne sile po katovima

ii) ANALIZA SEIZMIČKE OTPORNOSTI

Provodimo analizu prosječnog naprezanja zidova u prizemlju.

U softveru provjeravamo maksimalne sile F_x i F_y za kombinaciju:

$$1,0 \cdot V.T. + 1,0 \cdot G + 0,3 \cdot Q + \text{projektini spektar}$$

Težina konstrukcije očitava se za kombinaciju *MASS*:

$$1,0 \cdot V.T. + 1,0 \cdot G + 0,3 \cdot Q$$

Razina poprečne sile iznosi, uzeta je iz kvazistatike, i iznosi:

$$F_b = 5587,02 \text{ kN}$$

Udio ukupne težine koji se aktivira potresnim djelovanjem:

$$B.S. = \frac{F_b}{W} = \frac{5587,02}{23319,75} = 0,24$$

Na temelju kvazistatičke procjene potresne sile, dobiveno je da potresno djelovanje aktivira 24% ukupne težine konstrukcije.

Određene su prosječne vrijednosti posmičnih naprezanja u zidovima prizemlja:

$$\tau_x = \frac{5587,02}{30,94} = 0,18 \text{ MPa}$$

$$\tau_y = \frac{5587,02}{33,96} = 0,16 \text{ MPa}$$

Proračunata je ploština zidova za prizemlje:

$$A_{zidovi,x} = 3 \cdot (0,45 \cdot 18,55) + 8 \cdot (0,15 \cdot 3,23) + 2 \cdot (0,30 \cdot 1,35) + 0,45 \cdot 2,69 = 30,94 \text{ m}^2$$

$$\frac{\text{ploština zidova u x smjeru}}{\text{ploština etaže}} = \frac{30,94}{544,77} = 5,6\%$$

$$A_{zidovi,y} = 2 \cdot (0,3 \cdot 10,4) + 4 \cdot (0,15 \cdot 6,03) + 4 \cdot (0,15 \cdot 3,93) + 2 \cdot (0,45 \cdot 12,10) + 2 \cdot (0,45 \cdot 6,27) + 2 \cdot (0,15 \cdot 5,68) + 2 \cdot (0,45 \cdot 2,85) + 2 \cdot (0,15 \cdot 3,13) = 33,96 \text{ m}^2$$

$$\frac{\text{ploština zidova u y smjeru}}{\text{ploština etaže}} = \frac{33,96}{544,77} = 6,2\%$$

Na isti način je proračunata ploština zidova etaža:

$$\frac{\text{ploština zidova u x smjeru}}{\text{ploština etaže}} = \frac{30,94}{544,77} = 5,6\%$$

$$\frac{\text{ploština zidova u y smjeru}}{\text{ploština etaže}} = \frac{33,05}{544,77} = 6,07\%$$

Uočeno je da je krutost manja u y smjeru. Odnosno, zgrada će se lošije ponašati u slučaju potresa u tom smjeru.

5. ZAKLJUČAK POTRESNE OTPORNOSTI I MJERE OBNOVE

Rezultati analize pokazuju da bi zgrada mogla biti oštećena i pri nižim intenzitetima potresa. Iako je zgrada pokazivala određenu razinu otpornosti i potres nije bio snažan, uočeni su nedostatci u strukturalnim elementima građevine.

Potrebne su tehnički zahvati kojima bi se postigla dostatna otpornost u skladu s današnjim građevinskim standardima.

Nakon zagrebačkog potresa, predviđena su četiri načina (razine) obnove, ovisno o stupnju oštećenja i namjeni zgrade. Ti su načini detaljno opisani u stručnim smjernicama koje su prilog Zakonu, a nedugo nakon potresa donesen je i *Urgentni program potresne obnove – UPPO*. UPPO pokriva prvu razinu obnove, odnosno obrađuje tehnička građevinska rješenja za izvođenje neodgodivih zahvata sanacije.

Sama sanacija nije dovoljna jer ona oštećenu konstrukciju vraća u stanje prije potresa koje, zbog razloga kojih smo se ranije dotaknuli, nije bilo zadovoljavajuće potresne otpornosti. Stoga je nužno napraviti pojačanja koja će osigurati zadovoljavajuću potresnu otpornost postojećih građevina.

Razlikujemo tradicionalne i novije metode pojačanja. Tradicionalne metode su torkretiranje ili injektiranje žiđa, a, sve češće korištene, modernije metode su polimeri armirani vlaknima (FRP) te tekstilom armirani mortovi (TRM).

Iako su tradicionalne metode sigurne i provjerene, nerijetko su i prilično neuredne pa sve veću pažnju privlače modernije metode iako je njihova cijena viša.

5.1. POJAČANJE ZIDA NA POSMIK POMOĆU FRP-a ili TRM-a

5.1.1. FRP

Vlaknima armirani polimer, odnosno FRP, je vlaknasti kompozitni materijal kod kojeg su vlakna u funkciji armature ugrađena u polimernu matricu.

Glavne prednosti FRP-a su otpornost na koroziju, mala zapreminska težina i velika vlačna čvrstoća u smjeru vlakana.

Razlikujemo više vrsta vlakana, a time i FRP proizvoda: staklena (GFRP), ugljična (CFRP), bazaltna (BFRP) i aramidna (AFRP), dok se za izradu matrica koriste se epoksidne, nezasićene poliesterske, vinilesterske, bismelamidne i cijanatesterske smole.

Staklena vlakna imaju manji modul elastičnosti i (70 do 76 GPa) i čvrstoću (1800 do 3600 MPa), a veću težinu od čelika u (2270 do 2600 kg/m³). Međutim, ona su i jeftinija od čeličnih pa i češće korištena. Njihov je najveći nedostatak osjetljivost na koroziju.

Ugljična vlakna dijelimo na vlakna visoke čvrstoće ili vlakna visokog modula elastičnosti, ovisno o temperature grafitizacije. Naime, ugljična se vlakna dobivaju kontroliranom oksidacijom, karbonizacijom i grafitizacijom organskih tvari iz poliakrilonitrila (PAN), katrana, bitumena i celuloze.

Aramidna vlakna su sintetizirani polimer koji velike čvrstoće (3500 do 4200 MPa) i otpornosti na udarna opterećenja, toplinske utjecaje i propadanje uslijed kemijskih utjecaja, a njihov je nedostatak slabija otpornost na UV zračenje.

Bazaltna vlakna su u uporabi već desetak godina. Posjeduju znatno manju vlačnu čvrstoću (1100 MPa) u odnosu na ugljična vlakna, ali imaju osjetno veću termičku stabilnost i toplinsku otpornost.

Polimerne matrice povezuju vlakna i fiksiraju ih te im osiguravaju zaštitu od vanjskih utjecaja. Razlikujemo epoksidne smole, nezasićene poliesterske i vinilesterske smole, bismelamidne smole te cijanatesterske smole.

5.1.2. TRM

TRM ili tkaninom armirani mort nastao je s namjerom da se riješe navedeni nedostaci FRP-a, a to se postiglo zamjenom organskog veziva (matrice) s anorganskim (cementni ili vapneni mort). Ovi materijali sastoje se od mreže (tkanine) izrađene od snopova vlakana u najmanje dva (najčešće ortogonalna) smjera i anorganske matrice. Ovisno o korištenim vlaknima, razlikujemo GTRM (staklena), BTRM (bazaltna) i CTRM (ugljična).

Osim što se TRM-om povećava otpornost zida na posmik, povećava se i otpornost na savijanje u ravnini, savijanje izvan ravnine te vertikalna nosivost. Također se koristi za pojačanje zidanih lukova, svodova i kupola.

Problem koji se javlja kod pojačavanja zidova na posmik je veza između pojačanja i zida. Mehaničkim sidrenjem slojeva TRM-a za zide ostvaruje se kvalitetna veza između podloge i matrice, kao i između matrice i tekstila koja je potrebna za prijenos sila sa zida na TRM.

5.1.3. USPOREDBA FRP-a I TRM-a

Iako oba sustava doprinose nosivosti, duktilnosti i krutosti zida izvan ravnine i u ravnini, postoje i određene razlike.

FRP je dulje u upotrebi i povoljniji je za beton, a TRM je razvijen kako bi se ispravili njegovi nedostaci te je prikladniji za konstrukcijska pojačanja i obnove zidanih građevina.

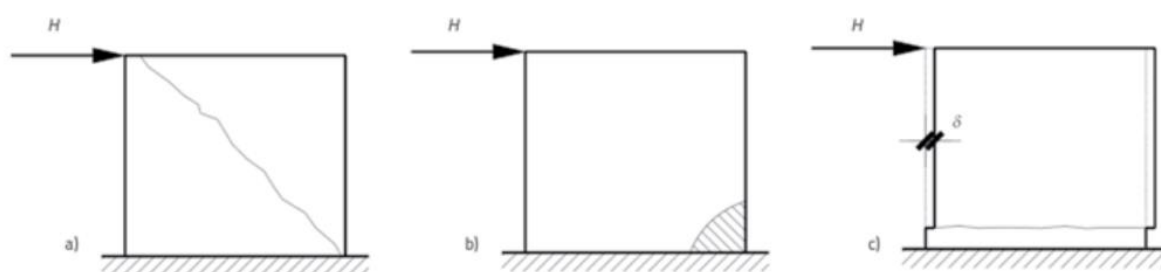
TRM se, za razliku od FRP-a, može koristiti i na hladnoj i vlažnoj površini zida zahvaljujući svojoj anorganskoj matrici. TRM-ova anorganska matrica ponaša se bolje od FRP-ove epoksidne i pod utjecajem visokih temperatura.

FRP-om i TRM-om zidovi se mogu pojačati jednostrano ili obostrano. Oba načina pojačanja značajno pridonose otpornosti na posmik i savijanje, ali od iznimne je važnosti omogućiti odgovarajuće sidrenje kako ne bi došlo do preuranjenog odvajanja FRP ili TRM traka ili mreža s površine zida.

6. POJAČANJE ZIDA NA POSMIK

6.1. PONAŠANJE ZIDA IZLOŽENOG POSMIKU

Ziđe koje je opterećeno horizontalnim silama u ravnini izložen je posmiku, a ukoliko dođe do prekoračenja posmične nosivosti, dolazi do sloma. Razlikujemo tri osnovna oblika sloma – dijagonalni, savojni i slom klizanjem.



Slika 24. – oblici sloma: a) dijagonalni slom, b) savojni slom, c) slom klizanjem

Oblik sloma koji će se pojaviti ovisi o geometriji i materijalu zida kao i o iznosu vertikalnog opterećenja. Ako je vertikalno opterećenje malo, može doći do proklizavanja duž jedne sljubnice. Prilikom djelovanja bočne sile, javljaju se moment savijanja i posmik; a zbog male vertikalne sile, već se pri malom momentu savijanja stvara pukotina koja se potom širi. Horizontalna pukotina se u svakom ciklusu djelomično ili potpuno zatvori, ali materijal je raspucavanjem izgubio koheziju pa se na mjestu bivše pukotine jednostavnije događa slom. Opisani oblik sloma bio je karakterističan u zagrebačkom potresu 22. ožujka, 2020. kada su dimnjaci uglavnom otkazivali duž jedne horizontalne sljubnice.

Slom klizanjem opisuje se Mohr-Coulombovim modelom ponašanja materijala:

$$f_v = f_{v0} + \mu \cdot \sigma_d$$

Gdje je:

f_v = posmična čvrstoća ziđa

f_{v0} = početna posmična čvrstoća ziđa

μ = koeficijent trenja

σ_d = proračunsko vertikalno tlačno naprezanje

Za postojeće zidove preporuka je koristiti srednje vrijednosti karakteristika materijala dok se za novo ziđe koriste karakteristične vrijednosti. To znači da za postojeće ziđe koristimo $\mu = 0,5$ s preporukom $f_{v0} = 0,1$, a za novo ziđe vrijedi da je $\mu = 0,4$ s preporukom $f_{v0} = 0,16$.

Prema novom prijedlogu norme EC1998-3, ne korigira se materijal nego nosivost. Odnosno, koristi se parcijalni koeficijent sigurnosti za otpornost γ_{Rd} , čija vrijednost ovisi o razini znanja i vrsti sloma - kod sloma klizanjem za najnižu razinu znanja iznosi 1,65, za srednju razinu 1,5 i za najvišu razinu znanja 1,35.

Posmičnu nosivost određujemo izrazom u nastavku:

$$V_{p,Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot f_v \cdot L_c \cdot t_w$$

Gdje je:

γ_{Rd} = parcijalni koeficijent sigurnosti za otpornost

L_c = duljina tlačnog područja ziđa

t_w = debljina ziđa

Dijagonalni slom je karakterističan za umjeren iznos vertikalne sile što je vrlo čest slučaj pu nižim dijelovima konstrukcije. Pukotina prolazi ili kroz opeku i mort ili samo kroz mort (stepenasti oblik sloma). Pukotina se širi kroz opeku uglavnom ako je mort kvalitetan, a opeka nekvalitetna; dok je stepenasti oblik sloma karakterističan u suprotnom slučaju.

Sadašnja norma HRN EN 1996-1-1 ne razmatra ovakav oblik sloma jer je on češći kod starijeg ziđa.

Ravni dijagonalni slom javlja se zbog prekoračenja glavnih kosih vlačnih naprezanja, a posmična nosivost određuje se izrazom:

$$V_{t1,Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot L \cdot t_w \cdot \frac{f_t}{b} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_t}}$$

Gdje parcijalni koeficijent sigurnosti za pravilno zide za najnižu razinu znanja iznosi 1,7, za srednju razinu 1,55, a za najvišu razinu 1,4.

Gore navedeni izraz je ujedno i izraz za koji je, rezultatima ispitivanja, pokazano da je prikladniji za opis dijagonalnog sloma (i ravnog i stupnjevitog).

Stepenasti oblik sloma moguće je opisati i sličnim izrazom kao i za proklizavanje, uz određene modifikacije. Posmična nosivost pri stepenastom slomu određuje se slijedećim izrazom:

$$V_{t,Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot \frac{L \cdot t_w}{b} \cdot \left(\frac{f_{v0}}{1 + \mu_j \cdot \phi} + \frac{\mu_j}{1 + \mu_j \cdot \phi} \cdot \sigma_0 \right) \leq V_{d,lim}$$

Gdje je:

μ_j = lokalni koeficijent trenja sljubnice

ϕ = koeficijent uklještenja

Koeficijent uklještenja predstavlja odnos visine zidnog elementa i prosječne duljine preklopa dvaju zidnih elemenata. Odnosno, on predstavlja prosječni nagib plohe sloma (tangens kuta pod kojim se širi stepenasti slom). Granična vrijednost nosivosti pri stepenastom slomu je:

$$V_{d,lim} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot L \cdot t_w \cdot \frac{f_{bt}}{2,3 \cdot b} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{bt}}}$$

6.2. OPIS POJAČANJA

Pojačanje zida nemetalnom armaturom predstavlja inovativan pristup u građevinskoj industriji koji se sve češće koristi zbog svojih prednosti u odnosu na tradicionalne metode. Nemetalna armatura, kao što su kompozitni materijali ili stakleno-rezina vlakna, otporna je na koroziju, što može produljiti trajanje i poboljšati stabilnost konstrukcije. Također su i otporni na vlagu i kemijske utjecaje što uvelike smanjuje potrebe za održavanjem.

Ova vrsta armature može biti integrirana u zidne konstrukcije kroz različite tehnike - ugradnja armature u betonske elemente ili njen dodatan sloj na postojećim zidovima.

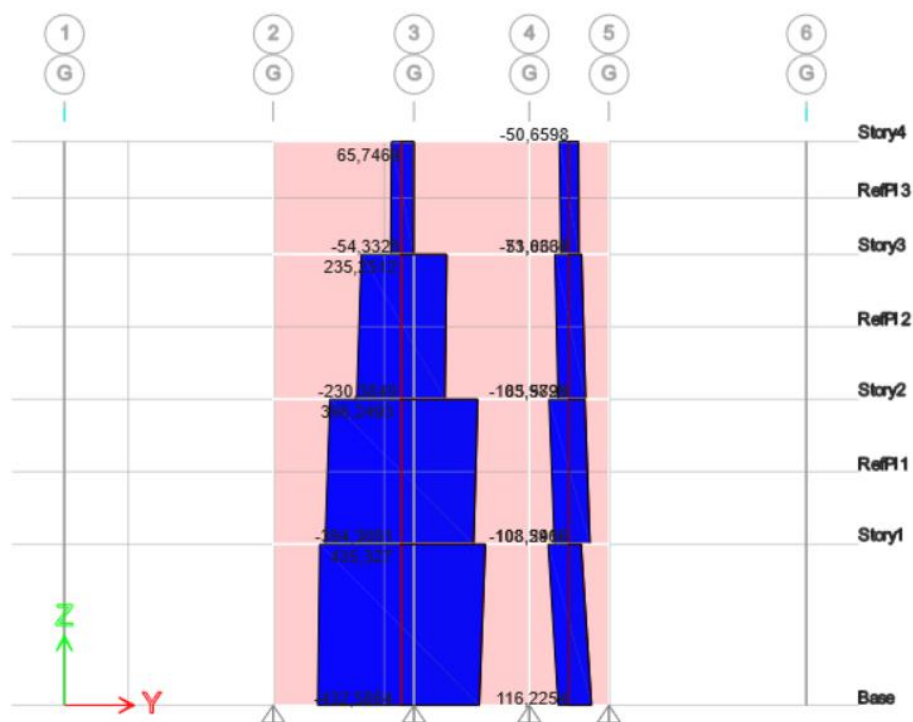
Korištenje nemetalne armature u pojačanju zida također može doprinijeti povećanju energetske efikasnosti građevinskih objekata jer neki od materijala imaju bolje toplinske izolacijske karakteristike.

POJAČANJE ZIDA FRCM-om

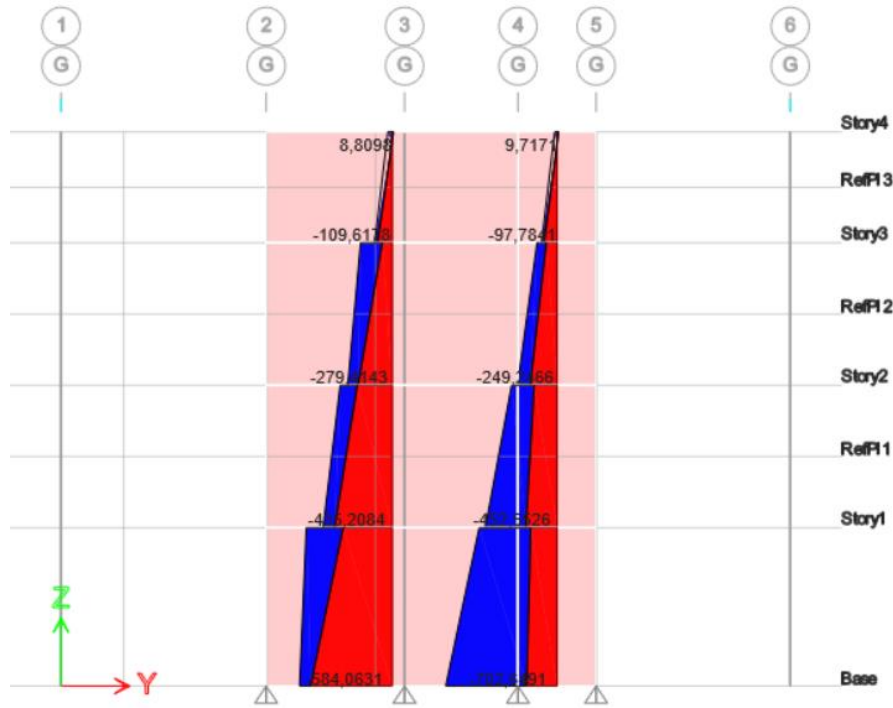
FRCM (Fiber-Reinforced Cementitious Matrix) sastoji se od vlakana koja su ugrađena u cementni matriks. Vlakna mogu biti staklena, karbonska ili aramidna te pružaju dodatnu čvrstoću i otpornost materijalu.

6.3. PRORAČUN POJAČANJA ZIDA FRCCM-om

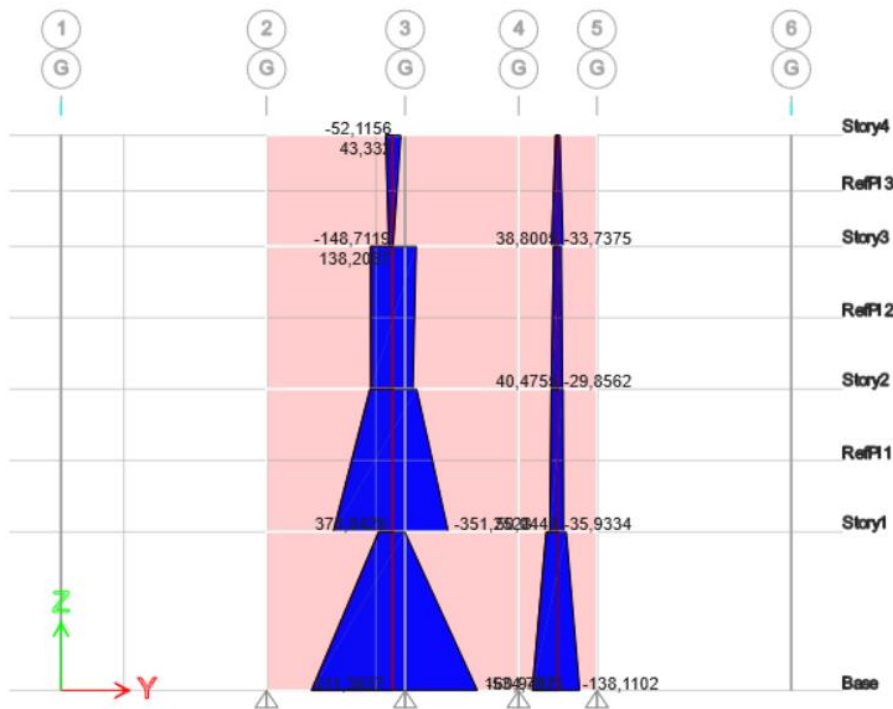
Pojačava se zid na prizemlju, na osi G, prema CNR-DT 215/2018. Ovo je samo primjer proračuna pojačanja te je uzet vezni zid debljine 15cm. Zid pojačavamo koristeći ugljične mreže. Promatrani zid nema otvora.



Slika 25. – maksimalne poprečne sile



Slika 26. – maksimalna uzdužna sila



Slika 27. – maksimalni moment savijanja

i) PRORAČUN NOSIVOSTI NA POSMIK NEPOJAČANOG ZIDA

Duljina zida je $L = 3,93$ m, visina $h = 4,5$ m te širina $0,15$ m.

Ulazni parametri:

$$V = 435,33 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 584,06 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 511,63 \text{ kNm}$$

U stvarnosti se karakteristike zida utvrđuju ispitivanjima, a u ovom primjeru korištene su sljedeće vrijednosti:

f_{v0} [N/mm ²]	RZ	γ_M	f_t [N/mm ²]	ϕ	f_b [N/mm ²]	f_{bt} [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]
0,16	3	1,5	0,11	1,0	15	1,5	3,4

Tablica 1. – karakteristike zida

Srednje tlačno naprezanje određuje se kao:

$$\sigma_0 = \frac{N_{Ed}}{L \cdot t_w} = \frac{584,06}{3,93 \cdot 15} = 0,099 \text{ kN/cm}^2 \sim 1 \text{ N/mm}^2$$

Gdje je :

N_{Ed} - uzdužna tlačna sila

L – duljina zida

t_w – debljina zida

Dio zida u tlaku:

$$L_c = 3 \cdot \left(\frac{L}{2} - \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} \right) = 3 \cdot \left(\frac{3,93}{2} - \frac{511,63}{584,06} \right) = 3,27 \text{ m} = 327 \text{ cm}$$

Gdje je:

M_{Ed} = uzdužna tlačna sila

$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}$ = ekscentricitet uzdužne sile

Proračunsko tlačno naprezanje u zidu:

$$\sigma_d = \frac{N_{Ed}}{L_c \cdot t_w} = \frac{584,06}{327 \cdot 15} = 0,12 \text{ kN/cm}^2 = 1,2 \text{ N/mm}^2$$

Gdje je:

L_c = duljina zida u tlaku

Posmična čvrstoća zida :

$$f_v = f_{v0} + \mu \cdot \sigma_d = 0,16 + 0,5 \cdot 1,2 = 0,76 \text{ N/mm}^2 = 0,076 \text{ kN/cm}^2$$

Gdje je:

f_{v0} = posmična čvrstoća zida

μ = koeficijent trenja

σ_d = proračunsko tlačno naprezanje u zidu

Posmična čvrstoća zida ne smije biti veća od:

$$\begin{aligned} f_v &< 0,065 \cdot f_b \\ 0,76 &< 0,065 \cdot 15 \\ 0,76 \text{ N/mm}^2 &< 0,98 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Nosivost zida na klizanje određuje se izrazom:

$$V_{p,Rd} = \frac{1}{\gamma_M} \cdot f_v \cdot L_C \cdot t_w = \frac{1}{1,5} \cdot 0,076 \cdot 327 \cdot 15 = 248,52 \text{ kN}$$

Gdje je:

γ_M = parcijalni koeficijent sigurnosti za materijal

f_v = posmična čvrstoća

Parcijalni koeficijent sigurnosti prema normi EC 8 [HRN EN 1998-3] jednak je umnošku parcijalnog koeficijenta i faktora povjerenja. Parcijalni koeficijent sigurnosti uzima se, prema normi EC 6 [HRN EN 1996-1-1], kao 1/3 vrijednosti (ali ne manji od 1,5).

U nastavku proračuna uzete su vrijednosti:

$\gamma_M = 1,5$ i $FP = 1,35$ (razina znanja 1).

Nosivost zida na **dijagonalni ravni slom** određuje se izrazom:

$$\begin{aligned} V_{t1,Rd} &= L \cdot t_w \cdot \frac{f_t}{\gamma_M \cdot FP \cdot b} \cdot \sqrt{1 + \frac{\gamma_M \cdot FP \cdot \sigma_0}{f_t}} \\ &= 393 \cdot 15 \cdot \frac{0,011}{1,5 \cdot 1,35 \cdot 1,0} \cdot \sqrt{1 + \frac{1,5 \cdot 1,35 \cdot 0,099}{0,011}} = 140,41 \text{ kN} \end{aligned}$$

Gdje je:

f_t = vlačna čvrstoća

FP = faktor povjerenja

b = koeficijent raspodjele posmičnog naprezanja

σ_0 = srednje tlačno naprezanje u zidu

Koeficijent b varira ovisno o omjeru visine i duljine zida te mora biti između 1 i 1,5:

$$b = h/L = 450/393 = 1,15$$

Nosivost zida na **dijagonalni stepeničasti slom** određuje se izrazom:

$$V_{t2,Rd} = \frac{L \cdot t_w}{b} \cdot \left(\frac{f_{v0}}{\gamma_M \cdot FP \cdot (1 + \mu_j \cdot \emptyset)} + \frac{\mu_j}{1 + \mu_j \cdot \emptyset} \cdot \sigma_0 \right) \leq V_{d,lim}$$

Gdje je:

μ_j = lokalni koeficijent trenja sljubnice (uzima se 0,6)

\emptyset = koeficijent uklještenja (uzima se 1,0)

$$V_{t2,Rd} = \frac{393 \cdot 15}{1,15} \cdot \left(\frac{0,016}{1,5 \cdot 1,35 \cdot (1 + 0,6 \cdot 1,0)} + \frac{0,6}{1 + 0,6 \cdot 1,0} \cdot 0,099 \right) = 215,62 kN$$

Granična nosivost na dijagonalni poprečni slom računa se prema izrazu:

$$V_{d,lim} = L \cdot t_w \cdot \frac{f_{bt}}{\gamma_M \cdot FP \cdot 2,3 \cdot b} \cdot \sqrt{1 + \frac{\gamma_M \cdot FP \cdot \sigma_0}{f_{bt}}}$$

Gdje je vlačna čvrstoća zidnog elementa $f_{bt} = 0,1 f_b$

$$V_{d,lim} = 393 \cdot 15 \cdot \frac{0,1 \cdot 1,5}{1,5 \cdot 1,35 \cdot 2,3 \cdot 1,15} \cdot \sqrt{1 + \frac{1,5 \cdot 1,35 \cdot 0,099}{0,1 \cdot 1,5}} = 252,35 \text{ kN}$$

$$V_{t2,Rd} = 215,62 \text{ kN} \leq V_{d,lim} = 252,35 \text{ kN}$$

Nosivost zida na savijanje:

$$v = \frac{N_{Ed}}{L \cdot t_w \cdot f_d} = \frac{584,06}{393 \cdot 15 \cdot 0,17} = 0,58$$

$$V_{f,RD} = \frac{L \cdot N_{Ed}}{2 \cdot h_0} \cdot (1 - 1,15 \cdot v) = \frac{393 \cdot 584,06}{2 \cdot 0,5 \cdot 450} \cdot (1 - 1,15 \cdot 0,58) = 169,86 \text{ kN}$$

Gdje je:

$h_0 = 0,5 h$ – udaljenost od promatrane točke do točke infleksije

v – normalizirana uzdužna sila

Mjerodavna nosivost zida je najmanja vrijednost dobivena proračunom - $V_{t1,Rd} = 140,41 \text{ kN}$. Poprečna sila iznosi $435,33 \text{ kN}$ pa zaključujemo da je nužno ojačati zid kako bismo povećali nosivost.

ii) PRIMJER POJAČANJA ZIDA FRM-om PREMA CNR-DT 215/2018

Karakteristike materijala definira proizvođač na temelju ispitivanja, a ovdje su korištene sljedeće vrijednosti:

E_t (N/mm ²)	t_f (cm)	d_f (cm)	ε_{fk} (%)
170000	0,0048	195	0,65

Tablica 2. – pretpostavljene karakteristike FRM-a

Maksimalna dopuštena sila, određuje se izrazom:

$$V_{Rd,max} = 0,25 \cdot f_{d,h} \cdot t_w \cdot d_f = 0,25 \cdot \frac{0,34}{1,0 \cdot 1,5} \cdot 15 \cdot 195 = 165,75 \text{ kN}$$

Faktor izloženosti η za ugljična vlakna iznosi 0,95 za unutarnji i 0,85 za vanjski sloj.

Dopuštena proračunska relativna deformacija ε_{fd} određuje se prema:

$$\varepsilon_{fd} = \eta \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_M}$$

Gdje su:

η = faktor koji ovisi o uvjetima izloženosti zida

ε_{fk} = karakteristična relativna deformacija pri otkazivanju

γ_M = parcijalni koeficijent sigurnosti za FRCM

Dopuštena proračunska relativna deformacija iznosi:

$$\varepsilon_{fd} = 0,95 \cdot \frac{0,0065}{1,5} = 0,0041$$

Posmična nosivost, određuje se prema:

$$V_{t,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot n_f \cdot t_{vf} \cdot l_f \cdot \alpha_t \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f$$

Gdje su:

γ_{Rd} = parcijalni koeficijent sigurnosti za otpornost (2,0)

n_f = ukupni broj slojeva pojačanja

t_{vf} = ekvivalentna debljina jednog sloja pojačanja u smjeru posmika

l_f = učinkovita visina pojačanja

α_t = koeficijent smanjenja vlačne čvrstoće (0,95)

ε_{fd} = dopuštena proračunska relativna deformacija FRCM-a

E_f = modul elastičnosti FRCM-a

S obzirom da je $L < h$, $l_f = L = 393\text{cm}$.

$$V_{t,f} = \frac{1}{2,0} \cdot 2 \cdot 0,0048 \cdot 393 \cdot 0,8 \cdot 0,0039 \cdot 17000 = 100,05\text{kN}$$

Kao što je ranije izračunato, mjerodavna nosivost zida iznosi $V_{t1,Rd} = 140,41\text{ kN}$

Stoga je konačna nosivost pojačanog zida:

$$V_{Rd} = 140,41 + 100,05 = 180,63\text{ kN}$$

Povećanje nosivosti, u ovom je slučaju, 71%.

Za pojačanje s dva sloja mreže na svakom licu zida, posmična nosivost FRFCM-om iznosi:

$$V_{t,f} = \frac{1}{2,0} \cdot 4 \cdot 0,0048 \cdot 393 \cdot 0,8 \cdot 0,0039 \cdot 17000 = 200,11\text{kN}$$

Odnosno, u ovom slučaju, povećanje nosivosti iznosi 142%.

7. ZAKLJUČAK

Zagrebački potres 2020. godine, prouzročio je znatna oštećenja u povijesno-urbanoj zoni grada. Posljedica golemih šteta je, između ostalog, pretrpio i stambeni fond.

U ovome smo se radu bavili zgradom koja je evaluacijom dobila oznaku PN2 – odnosno, neuporabljivost uz preporuku hitne intervencije.

Analizom nosivosti uočeni su nedostaci samog projekta kao i u konstrukciji stubišta, stropova te zidova nižih etaža – posebice prizemlja i prvog kata, što je vrlo čest slučaj kod starijih zgrada.

Nadalje, elementi od opeke nemaju dovoljnu krutost za preuzimanje velikih opterećenja kakvima su bili izloženi tijekom potresa

Potrebno je provesti niz mjera obnove i zahvata koji bi povećali krutost i sigurnost građevine. U ovome su radu opisane mjere obnove i pojačanja ziđa te je dan prijedlog za korištenje FRCM-a u svrhu pojačanja. Primjer takvog pojačanja je i proračunat te je donesen zaključak kako bi se primjenom takvog sustava osigurala dostatna čvrstoća ziđa.

POPIS LITERATURE

Popis literature treba izraditi u skladu s odabranim stilom navođenja prema [1].

- [1] Uroš M., Todorić M., Crnogorac M., Atalić J., Šavor Novak M., Lakušić S.: Potresno inženjerstvo – obnova zidanih zgrada
- [2] Šavor Novak M., Uroš M., Atalić J., Herak M., Demšić M., Baniček M., Lazarević D., Bijelić N., Crnogorac M., Todorić M.: Građevinar 10/2020 - Potres u Zagrebu 22. ožujka 2020. - Preliminarni izvještaj o seizmološkim istraživanjima i oštećenjima zgrada
- [3] Kišiček T., Stepinac M., Renić T., Hafner I., Lulić L.: Građevinar 10/2020. - Pojačanje zida na posmik pomoću FRP-a ili TRM-a
- [4] Šavor Novak M., Uroš M., Atalić J., Sigmund Z., Baniček M., Demšić M., Hak S.: Građevinar 12/2020. - Procjena oštećenja građevina nakon potresa - postupak provođenja pregleda zgrada

POPIS SLIKA

Slika 1: Poprečni presjek zgrade (lijevo) i pogled s ulazne strane zgrade (desno)	3
Slika 2: Pogled	4
Slika 3: Tlocrt treće etaže	4
Slika 4: Modificirana krutost zida	6
Slika 5: Model konstrukcije	6
Slika 6: Model konstrukcije	7
Slika 7: Tlocrt prizemlja	8
Slika 8: Tlocrt ostalih etaža	8
Slika 9: Pogled na ulaznu stranu konstrukcije	9
Slika 10: Pogled na stražnju stranu konstrukcije	9
Slika 11: Karta potresnih područja RH – povratni period 475 godina	12
Slika 12: Karta potresnih područja RH – povratni period 95 godina	12
Slika 13: Slučajevi opterećenja	13
Slika 14: Kombinacija opterećenja <i>MASS</i>	13
Slika 15: Kombinacija <i>potres</i>	14
Slika 16: Kombinacija spektar	14
Slika 17: Kombinacija za potres u x smjeru	15
Slika 18: Kombinacija za potres u y smjeru	15
Slika 19: Projektni spektar	16
Slika 20: Vlastita težina kod proračuna potresa	16
Slika 21: Maksimalni pomaci po katovima	17
Slika 22: Maksimalni međukatni pomak	18
Slika 23: Graf horizontalne sile po katovima	19
Slika 24: Oblici sloma: a) dijagonalni slom, b) savojni slom, c) slom klizanjem (Izvor [3]).....	24
Slika 25: Maksimalne poprečne sile	28

POPIS TABLICA

Tablica 1: karakteristike ziđa (Izvor: [1]).....	32
Tablica 2: Pretpostavljene karakteristike FRCM-a (Izvor: [1]).....	37

