

Procjena potresne otpornosti zidane zgrade

Obrvan, Kristina

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:237:675566>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Kristina Obrvan

**PROCJENA POTRESNE OTPORNOSTI
ZIDANE ZGRADE**

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Kristina Obrvan

**PROCJENA POTRESNE OTPORNOSTI
ZIDANE ZGRADE**

ZAVRŠNI ISPIT

Mentor: assoc.prof.dr.sc. Marta Šavor Novak



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Kristina Obrvan

SEISMIC ASSESSMENT OF A MASONRY BUILDING

FINAL EXAM

Supervisor: assoc.prof.dr.sc. Marta Šavor Novak

Zagreb, 2024.

ZAHVALE

Hvala mojoj mentorici koja mi je maksimalno olakšala pisanje te približila temu rada.

Hvala mojim roditeljima, sestrama, bratu i prijateljima bez čije podrške ništa od ovog ne bi bilo moguće.

SAŽETAK

Završnim radom obrađena je tema procjene otpornosti zidane konstrukcije na potresno opterećenje. Zgrada je modelirana u programskom paketu ETABS temeljenom na metodi konačnih elemenata. U svrhu procjene oštećljivosti zgrade, prikupljeni su podaci o njenom konstrukcijskom sustavu. Definirane su karakteristike za analizu i određivanje oštećljivosti. Prikazani su učinci opterećenja na konstrukciju te predložene mjere sanacije i mehaničkog ojačanja elemenata kako bi se u budućnosti povećala nosivost na horizontalna djelovanja. Kao prikaz primjene mehaničkog ojačanja proračunata je nosivost zidnog elementa na posmično opterećenje.

SUMMARY

The final work dealt with the topic of assessing the resistance of masonry structures to seismic loads. The building was modeled in the etabs software package based on the finite element method. In order to assess the vulnerability of the building, data was collected on its structural system. Characteristics for analysis and determination of vulnerability are defined. The effects of the load on the structure are presented, as well as the proposed measures of repair and mechanical strengthening of the elements in order to increase the load capacity for horizontal actions in the future. As a representation of the application of mechanical reinforcement, the bearing capacity of the wall element for shear load was calculated.

SADRŽAJ

ZAHVALE (NEOBAVEZNO)	i
SAŽETAK	ii
SUMMARY	iii
SADRŽAJ	iv
1. UVOD	1
2. POSTOJEĆE STANJE I UČINAK POTRESA NA KONSTRUKCIJU	2
2.1. Opis konstrukcije.....	2
2.2. Učinak potresnog opterećenja na zgradu.....	7
3. NUMERIČKI MODEL KONSTRUKCIJE	8
3.1. Prikaz modela.....	9
3.2. Analiza opterećenja.....	12
3.2.1. Vlastita težina.....	12
3.2.2. Dodatno stalno opterećenje.....	12
3.2.3. Uporabno opterećenje.....	13
3.2.4. Potresno opterećenje.....	13
3.3. Slučajevi i kombinacije opterećenja.....	17
3.4. Analiza rješenja.....	20
4. OBNOVA ZIDANE ZGRADE	23
4.1. Potreba za obnovom.....	23
4.2. Tehnike popravka i pojačanja konstrukcija oštećenih u potresu.....	23
5. ZAKLJUČAK	38
POPIS LITERATURE	39
POPIS SLIKA	40
POPIS TABLICA	41

1. UVOD

U ovom radu obrađena je tema procjene potresne otpornosti zidane zgrade oštećene zagrebačkom u potresu 22. ožujka 2020. godine. Građevina je pretrpjela značajna oštećenja tijekom prvog potresa magnitude 5,5 prema Richteru te naknadnog magnitude 5,0 prema Richteru. Oštećene su mnoge zgrade u samom središtu grada a najveći broj njih tipične su zidane konstrukcije izgrađene krajem 19. i početkom 20. stoljeća. Takve zgrade imaju vrlo nisku seizmičku otpornost te je osim popravka nužno izvršiti i pojačanje konstrukcije. U svrhu ponovne uporabe zgrade potrebno je izvesti kompletne sanacije nastalih oštećenja. Izvedbom radova sanacije te popravaka oštećenja osigurala bi se zadovoljavajuća tehnička svojstva konstrukcije. Provedbom pojačanja pojedinih konstrukcijskih elemenata porasla bi razina mehaničke otpornosti cjelokupne zgrade.

2. POSTOJEĆE STANJE I UČINAK POTRESA NA KONSTRUKCIJU

2.1. Opis konstrukcije

Radom je obuhvaćena procjena potresne otpornosti stambene zidane zgrade u zagrebačkom donjogradskom bloku.

Procjena oštetljivosti zidane zgrade provedena je u programu ETABS temeljenom na metodi konačnih elemenata.

Predložen je način pojačanja ziđa metodama ugradnje čelične armature u sljubnice ziđa.

Za primjer proračuna korištena je čelična te FRP armatura.

Konstrukcija je karakteristična zidana zgrada izgrađena krajem 19. stoljeća.

Projekt konstrukcije datira iz 1897. godine.

Zgrada ima četiri etaže: podrum, prizemlje te prvi i drugi kat.

Orijentirana je u smjeru sjever-jug.

Izgrađena je unutar niza zgrada približno jednake visine i razine stropne konstrukcije.

Tlocrt građevine približno je pravokutnog oblika.

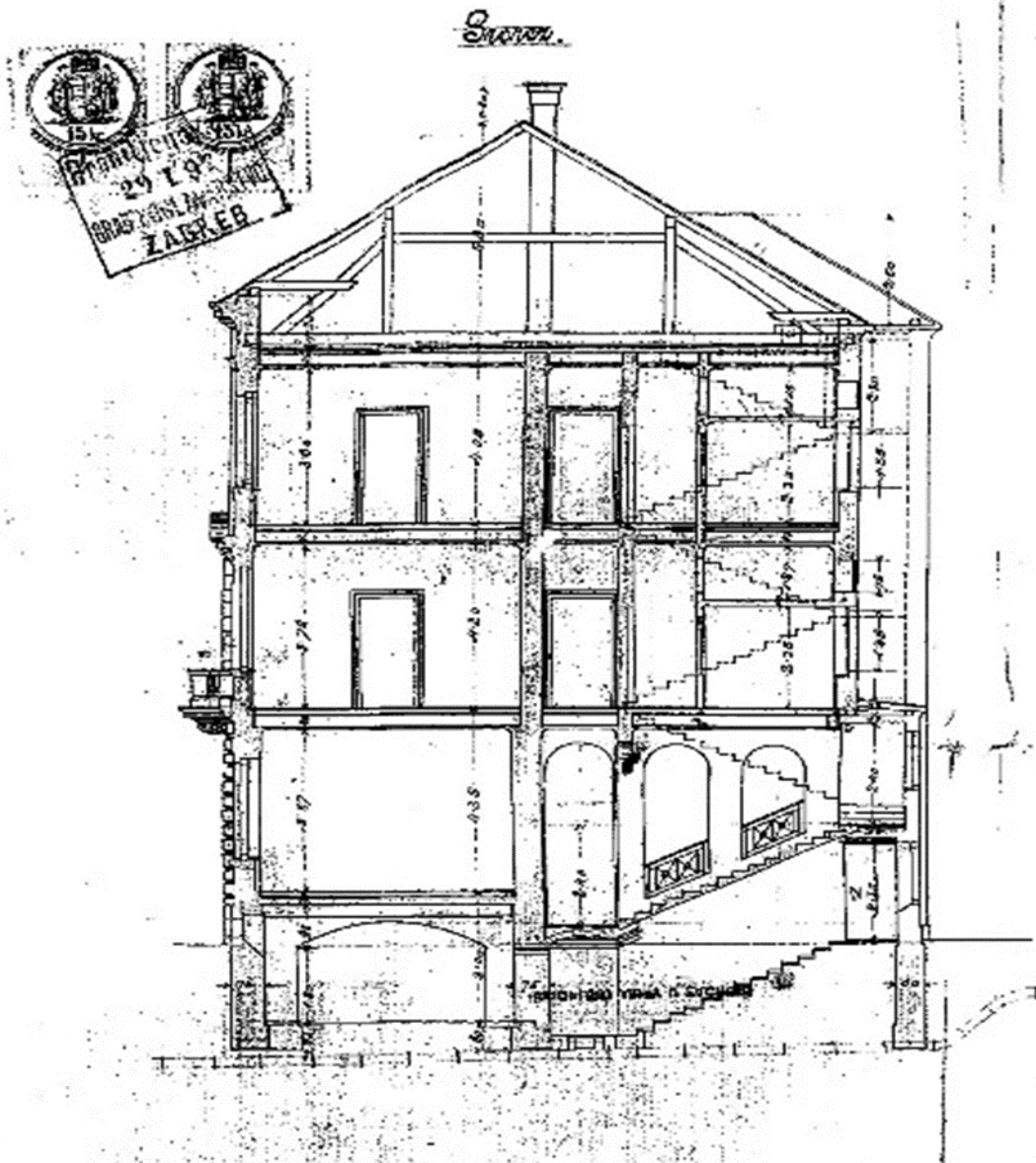
Visina zgrade je 12,73 m (od kote terena), a ukupna visina je 15,73 m.

Vanjske dimenzije su 14,45 x 13,05 m uključujući istaknute dijelove na prednjoj i dvorišnoj strani 3,2 x 1,0 m.

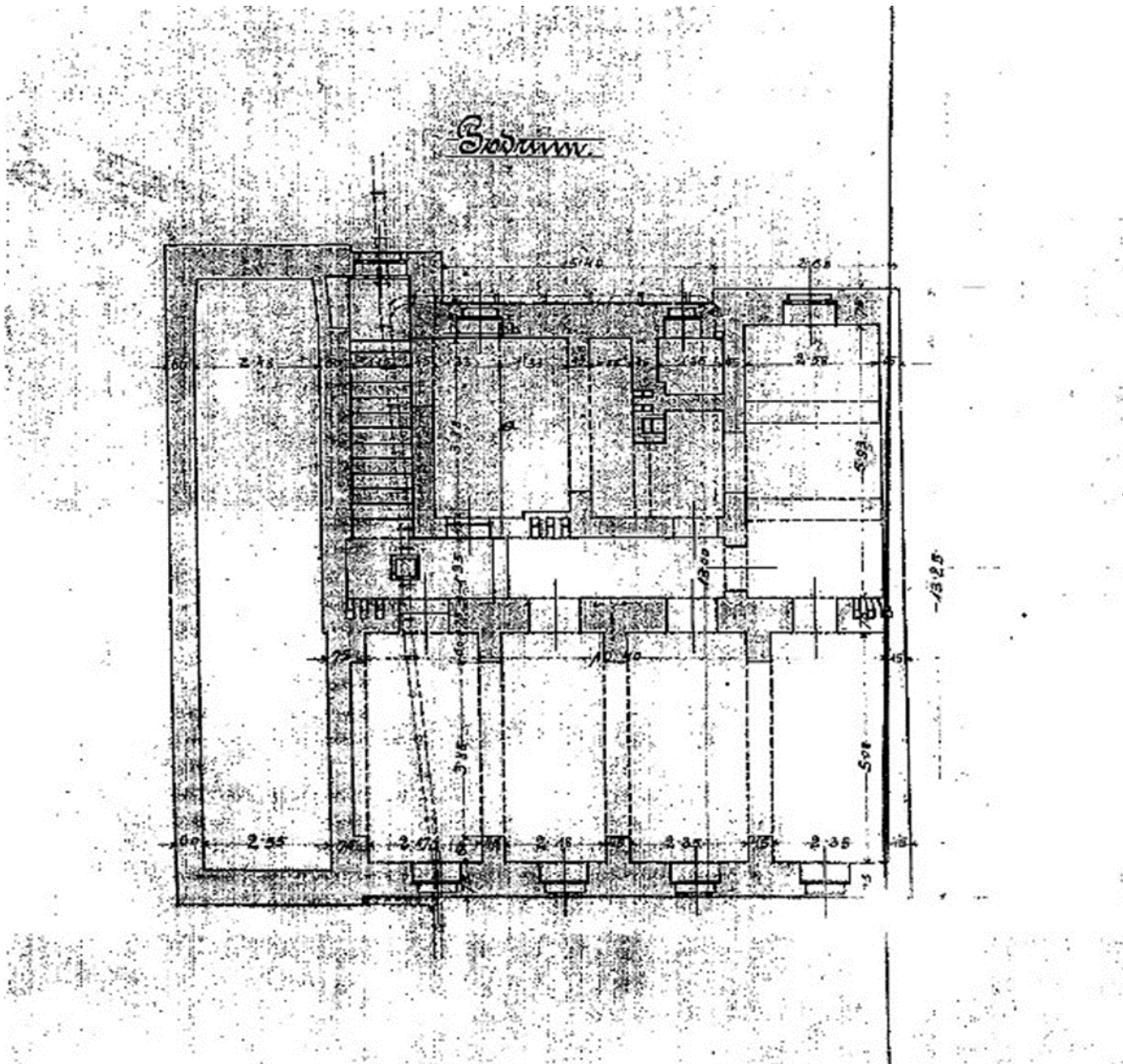
Visina podrumске etaže je 3,0 m, prizemlja 4,45 m, prvog kata 4,2 m drugog kata 4,08 m te je visina krovne konstrukcije 2,6 m.

Tlocrtna površina iznosi 191,772 m².

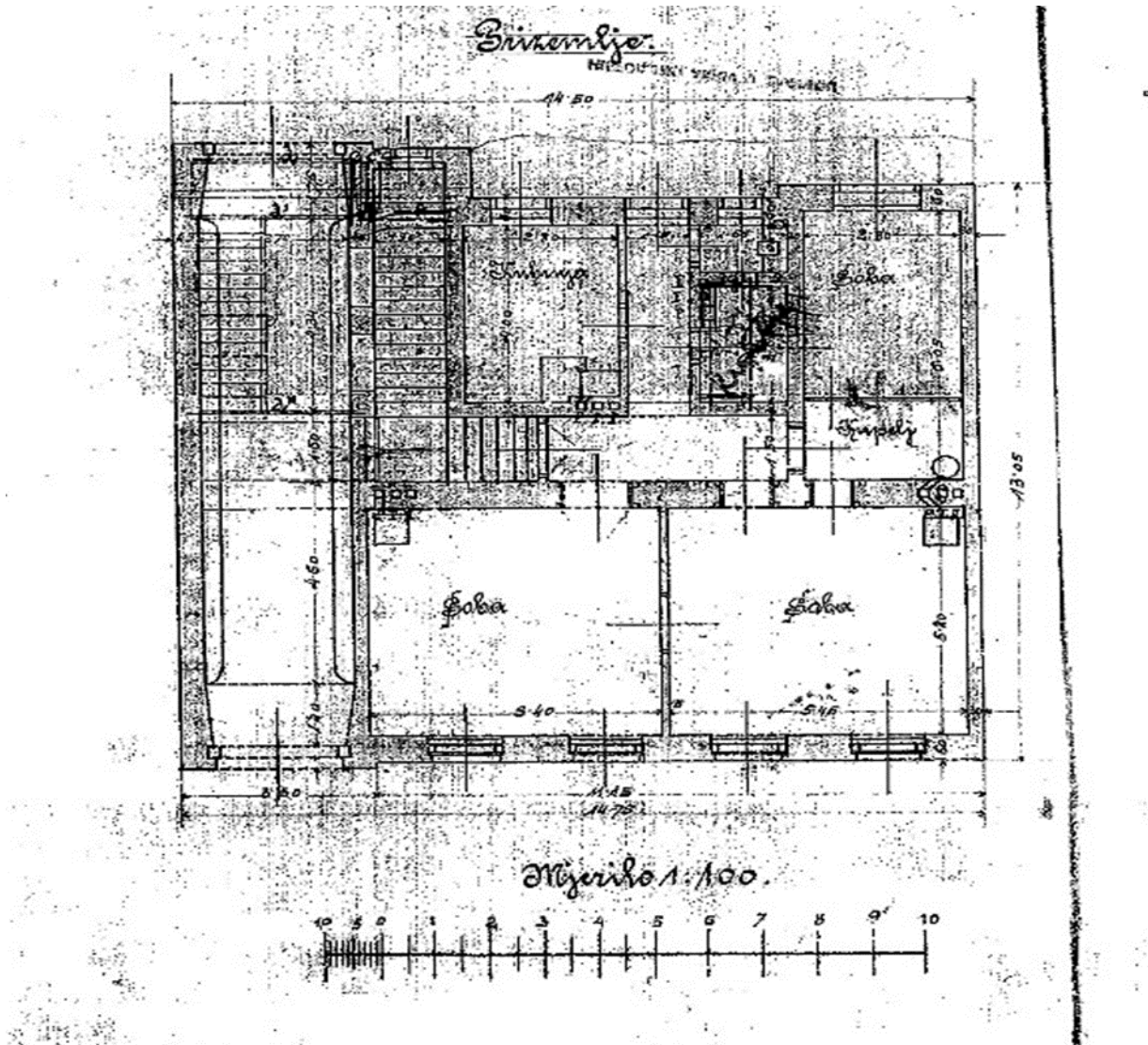
Nacrti:



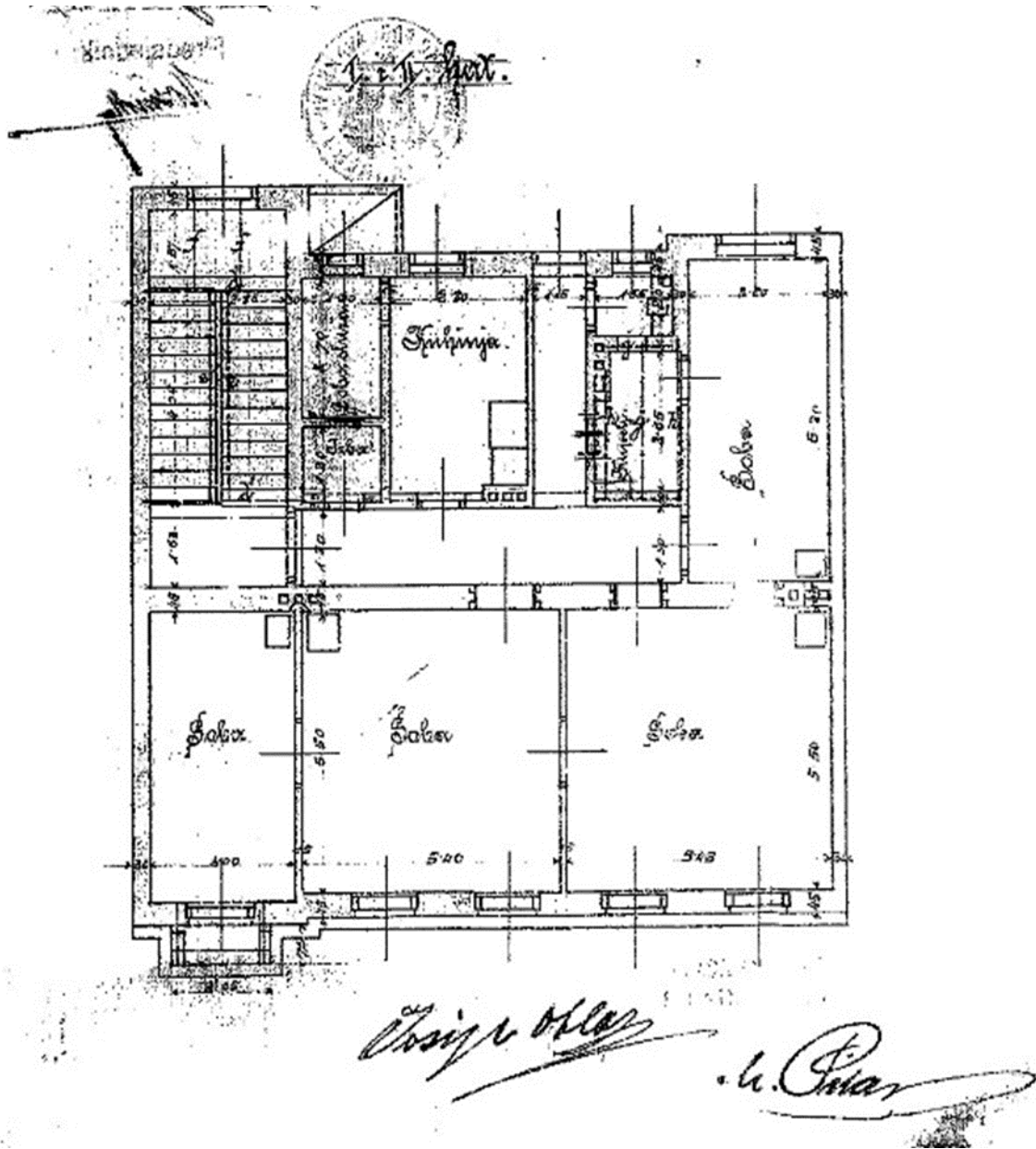
Slika 1: Poprečni presjek zgrade [Državni arhiv u Zagrebu]



Slika 2: Tlocrt podruma [Državni arhiv u Zagrebu]



Slika 3: Tlocrt prizemlja [Državni arhiv u Zagrebu]



Slika 4: Tlocrt prvog i drugog kata [Državni arhiv u Zagrebu]

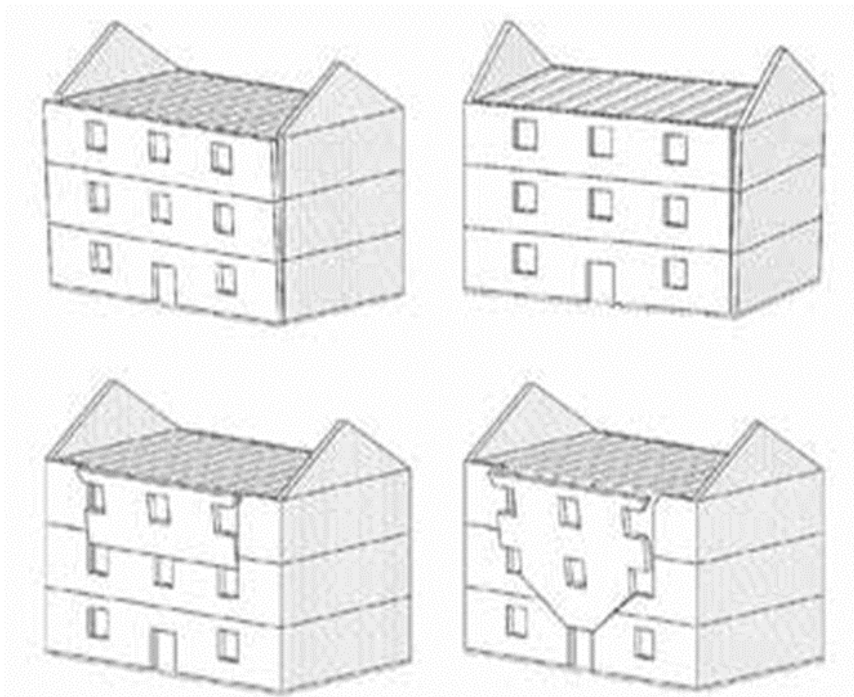
2.2. Učinak potresnog opterećenja na zgradu

Potresi su iznenadna prirodna pojava čije djelovanje uzrokuje oštećenja kod građevina koje nisu adekvatno projektirane ili izvedene kako bi podnijele ovu vrstu opterećenja.

Od ove vrste oštećenja najčešće stradavaju starije zidane zgrade građene prije uvođenja seizmičkih propisa.

Djelovanjem potresa na konstrukciju ona prolazi kroz različite oblike slomova i deformacija. Zidane konstrukcije zbog raznovrsnih načina gradnje, primjene različitih materijala te horizontalnih i vertikalnih elemenata odlikuje raznolikost tipova konstrukcije.

Oštećenja kod tradicijskih zidanih konstrukcija najčešće nastaju zbog neravnomjerne raspodjele krutosti, neprikladnih međusobnih veza te loših kontakata s krovnim i međukatnim konstrukcijama.



Slika 5: Skice otklona zida izvan ravnine [1]

Uslijed štetnog djelovanja potresa na konstrukciju potrebno je provesti pregled i klasificirati stupanj oštećenja te temeljem tih podataka sanirati i pojačati građevinu.

3. NUMERIČKI MODEL KONSTRUKCIJE

Model konstrukcije izrađen je u programu ETABS. Model prati dane tlocrte uz neka pojednostavljena.

Za svojstva opeke zadani su:

- Modul elastičnosti: 1500 Mpa
- Poissonov koeficijent: 0,49
- Modul posmika: 505,36 Mpa

Za svojstva betona zadani su:

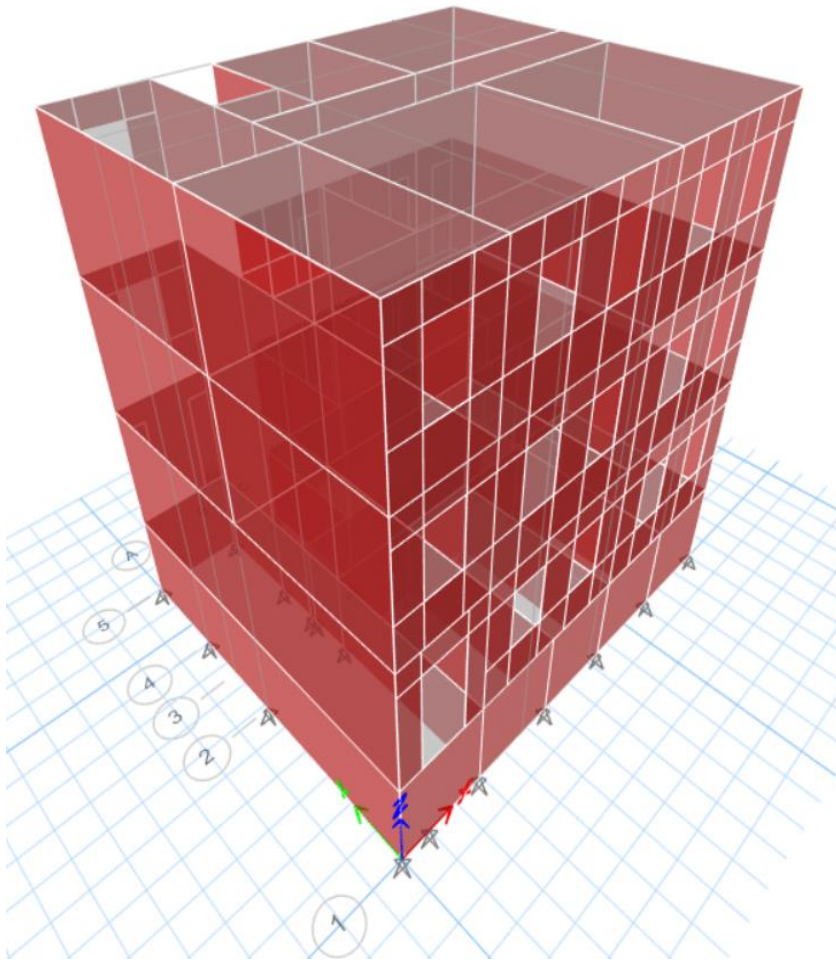
- Modul elastičnosti: 30000 Mpa
- Poissonov koeficijent: 0,2
- Modul posmika: 12500 Mpa

U softverskom programu modelirani su nosivi i pregradni zidovi konstrukcije. Debljine zidova odgovaraju debljinama iz nacрта a građevni materijal od kojih su izgrađeni je opeka. Ulazna vrata su visine 300 cm i širine 120 cm dok su preostala visine 280 cm. Prozori su na svim etažama oism podrumskoj modelirani na visini 200 cm te širini 120 cm.

Stropne konstrukcije, podesti te balkoni modelirani su kao ploče debljine 10 cm a material je beton klase C25/30.

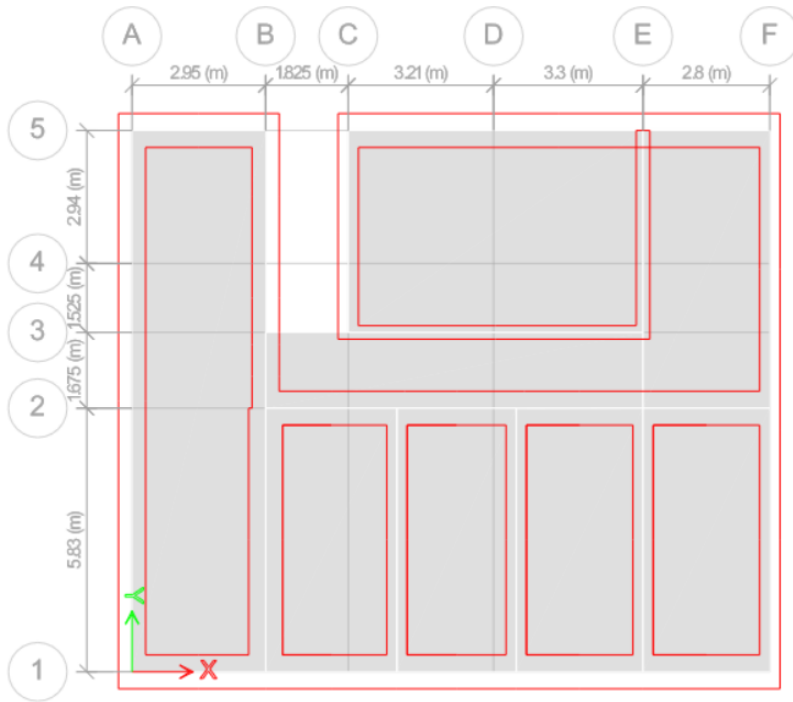
e

Prikaz modela

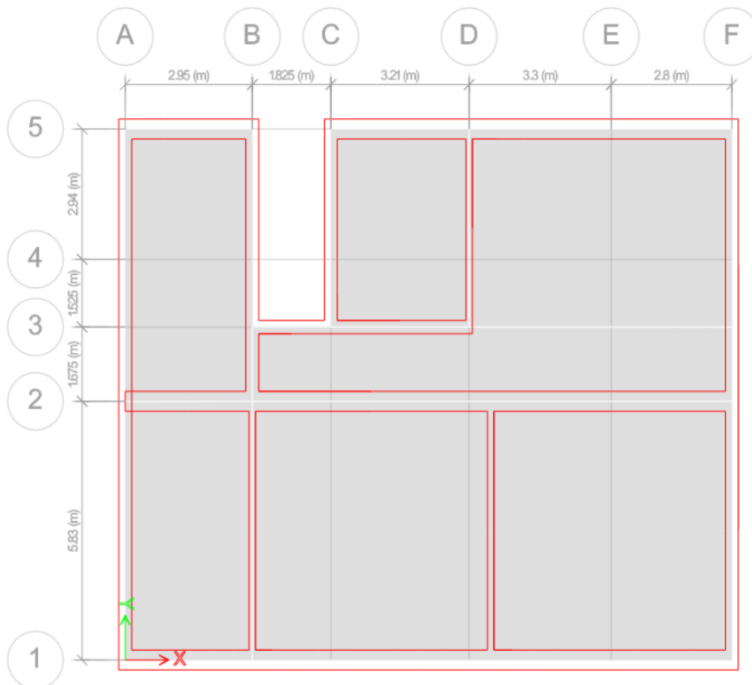


Slika 6: Prikaz modela

e

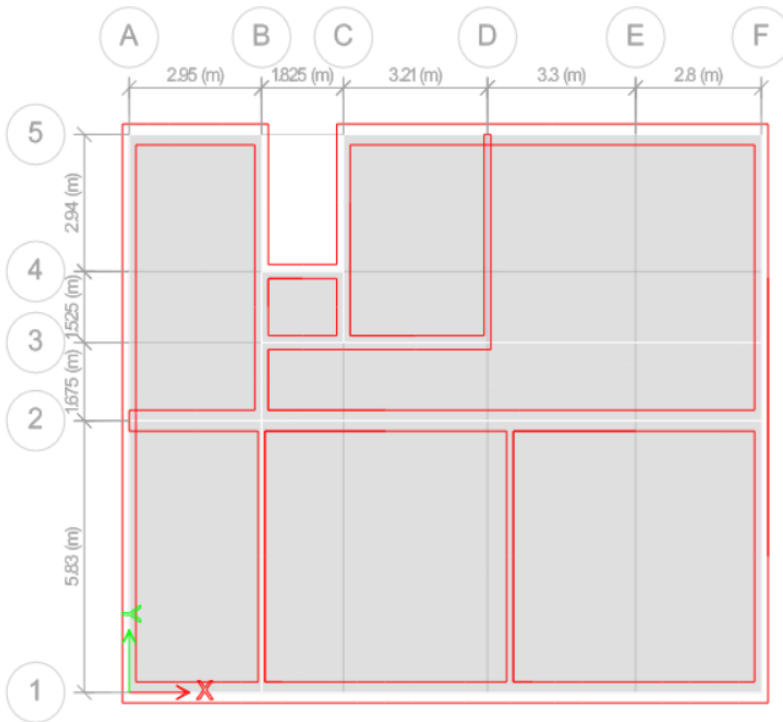


Slika 7: Tlocrt podruma

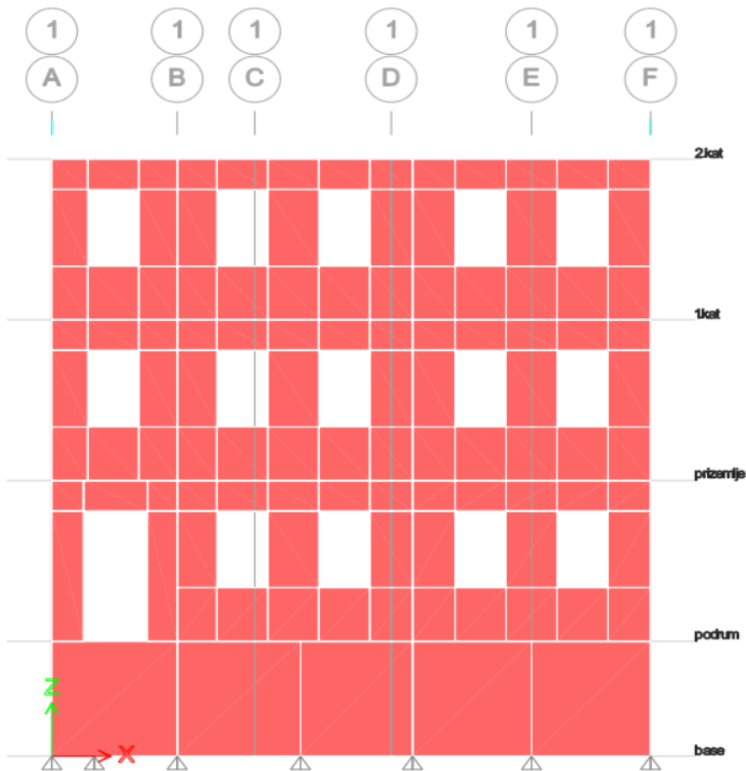


Slika 8: Tlocrt prizemlja

e



Slika 9: Tlocrt prvog i drugog kata



Slika 10: Model u pogledu

3.1. Analiza opterećenja

3.1.1. Vlastita težina

Vlastita težina konstrukcijskih elemenata već je uvrštena u program. Slijedi izračun dodatnog stalnog opterećenja.

3.1.2. Dodatno stalno opterećenje

Dodatno stalno opterećenje na stropove podruma:

- Završni slojevi poda.....	0,110 kN/m ²
- Oplata od daske.....	0,125 kN/m ²
- Šuta (h=14 cm).....	1,700 kN/m ²
- Oplata od daske.....	0,125 kN/m ²
- Grednici.....	0,500 kN/m ²
- Pregradni zidovi.....	2,100 kN/m ²
	$\Delta g = 4,660 \text{ kN/m}^2$

Dodatno stalno opterećenje na stropove prizemlja i prvog kata

- Završni slojevi poda.....	0,110 kN/m ²
- Oplata od daske.....	0,125 kN/m ²
- Šuta (h=14 cm).....	1,700 kN/m ²
- Oplata od daske.....	0,125 kN/m ²
- Grednici.....	0,500 kN/m ²
- Pregradni zidovi.....	2,100 kN/m ²
	$\Delta g = 4,660 \text{ kN/m}^2$

Dodatno stalno opterećenje na stropove drugog kata

- Oplata od daske.....	0,125 kN/m ²
- Šuta (h=14 cm).....	1,700 kN/m ²
- Oplata od daske.....	0,125 kN/m ²
- Grednici.....	0,500 kN/m ²
	$\Delta g = 2,450 \text{ kN/m}^2$

U svrhu postizanja zadovoljavajuće krutosti stropovi su zadani kao betonska ploča debljine 10 cm i težine 25 kN/m³ te će se opterećenje nanositi na način da se oduzme težina betonske ploče od dodatnih stalnih opterećenja etaža.

Na stropove etaža nanijeti će se opterećenje od 2,16 kN/m².

e

Dodatno stalno opterećenje krovišta

- Glineni crijep.....0,50 kN/m²

Na strop drugog kata nanosi se opterećenje slojeva sa dodatnim stalnim opterećenjem te se oduzima težina betonske ploče debljine 10 cm. Konačno opterećenje iznosi 0,45 kN/m².

3.1.3. Uporabno opterećenje

Za međukatne konstrukcije uzeto je uporabno opterećenje u iznosu 2,0 kN/m², te 1,0 kN/m² za krovište.

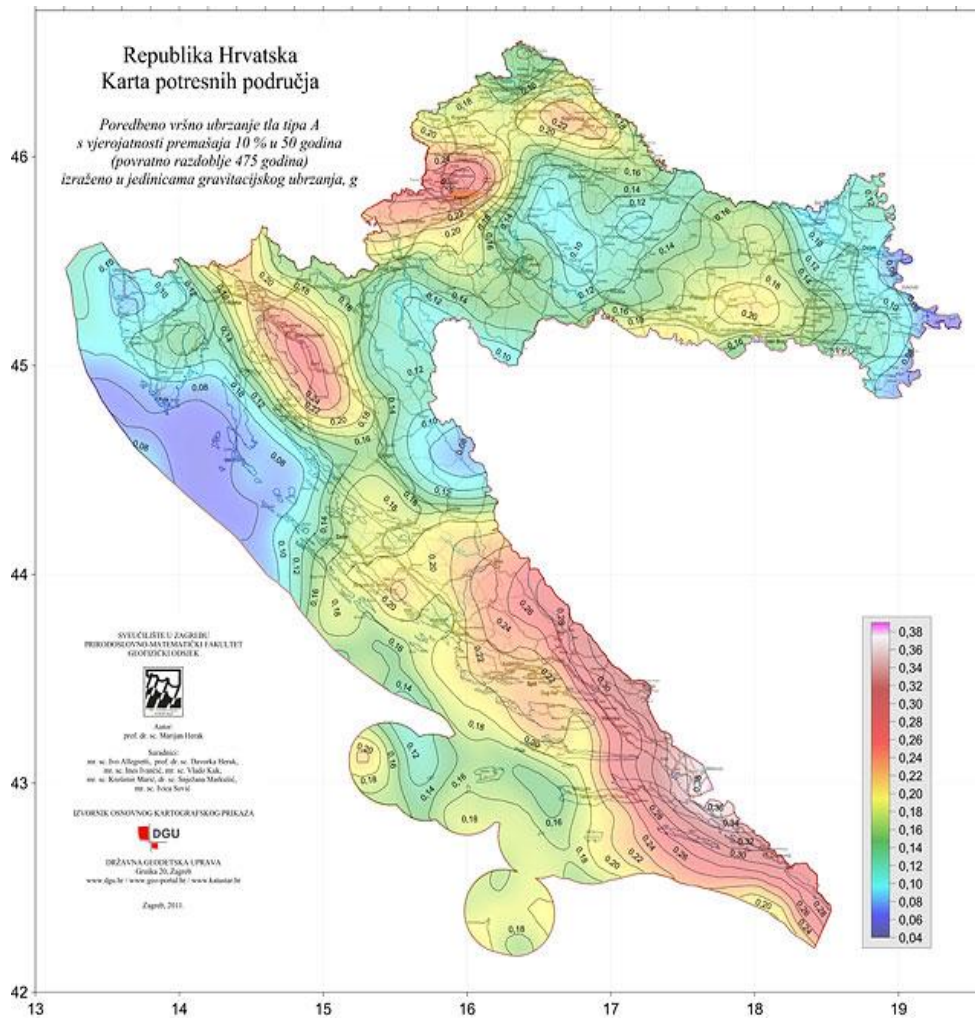
Opterećenje se nanosi istim principom kao i prethodna.

3.1.4. Potresno opterećenje

Ulazni podatak za proračun potresnog opterećenja je lokalno ubrzanje tla. Ubrzanje je očitano iz karte potresnih opterećenja povratnog perioda 475 godina te iznosi 0,256 g.

Čitavo seizmičko opterećenje proračunava se u skladu s HR EN 1998.1:2011 i HR EN 1998-1:2011/NA:2011.

e

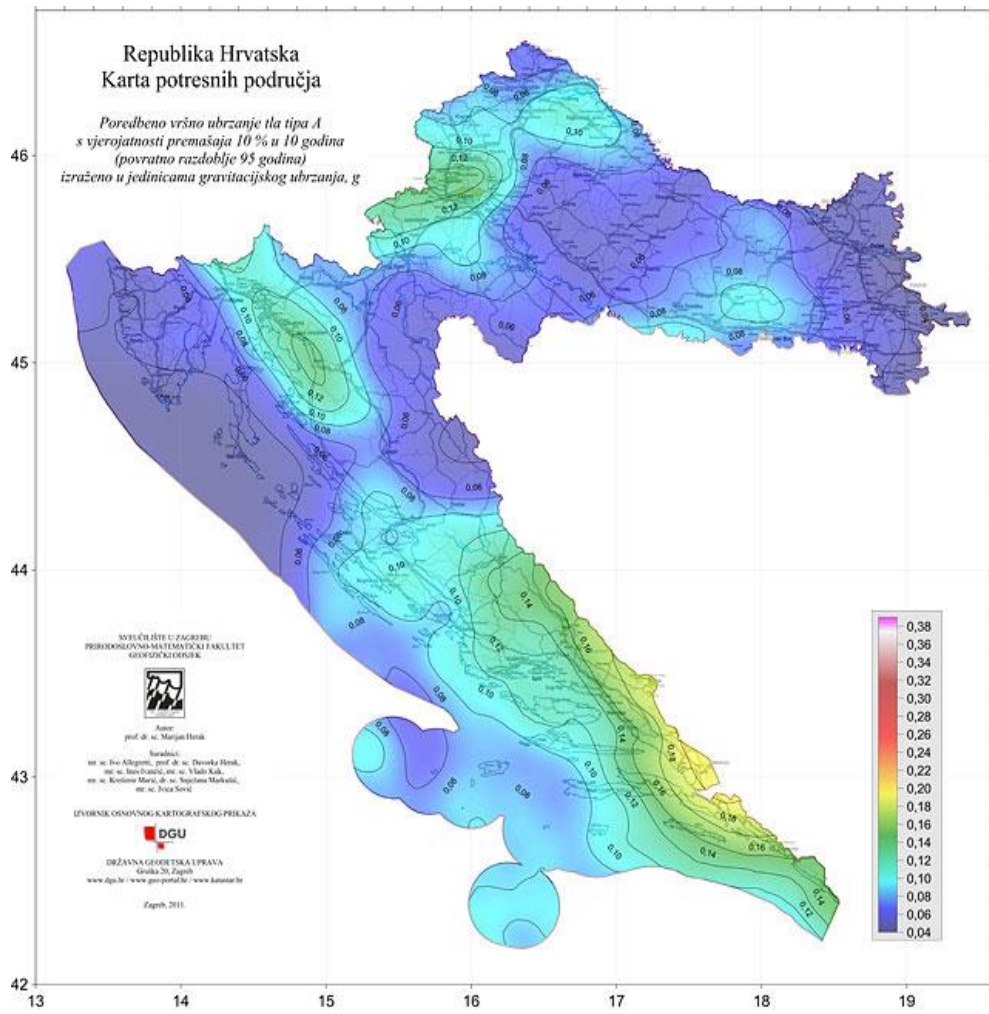


Slika 11: Karta potresnih područja RH za povratno razdoblje od 475 godina [3]

Iz karte potresnih područja povratnog razdoblja 95 godina očitavamo $a_{95} = 0,129$ g.

Za proračun se uzima ova vrijednost jer će se zgrada obnavljati na Razinu 2 prema Tehničkom propisu građevinske konstrukcije.

e

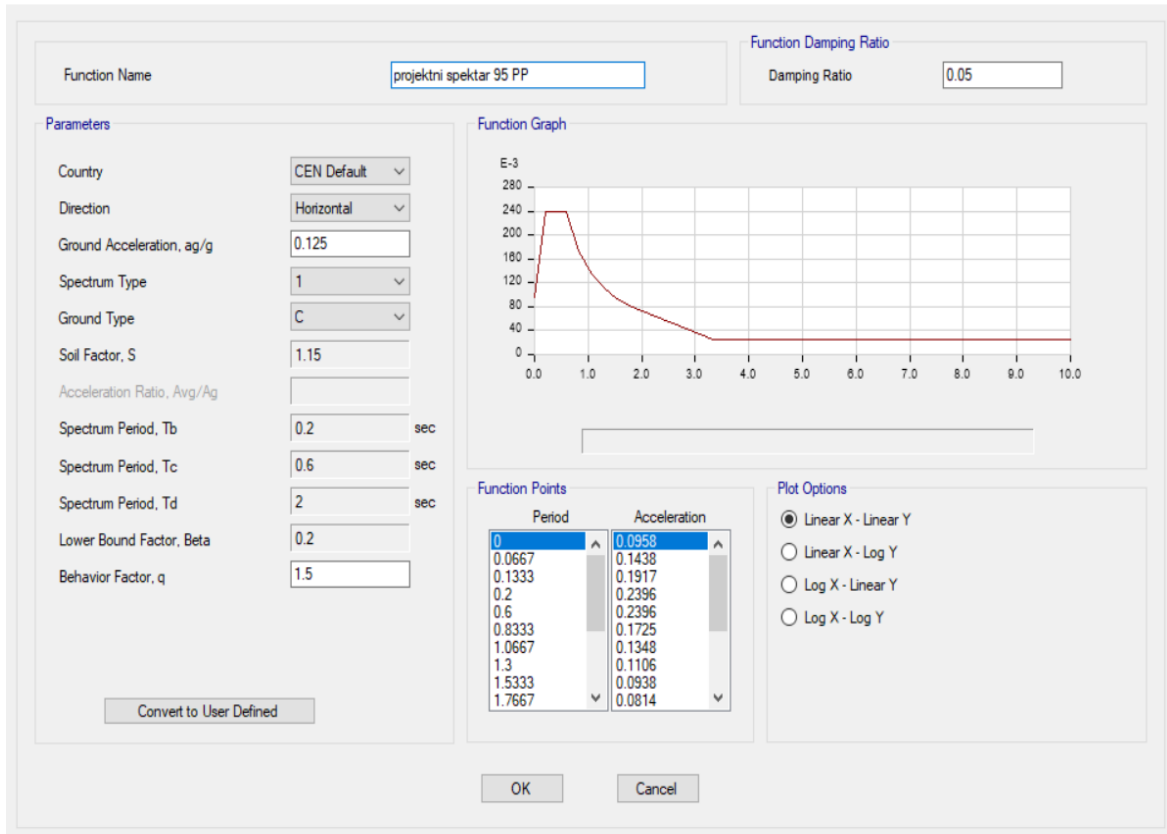


Slika 12: Karta potresnih područja RH za povratno razdoblje od 95 godina [3]

e

EuroCode 8 - 2004 Function Definition

×

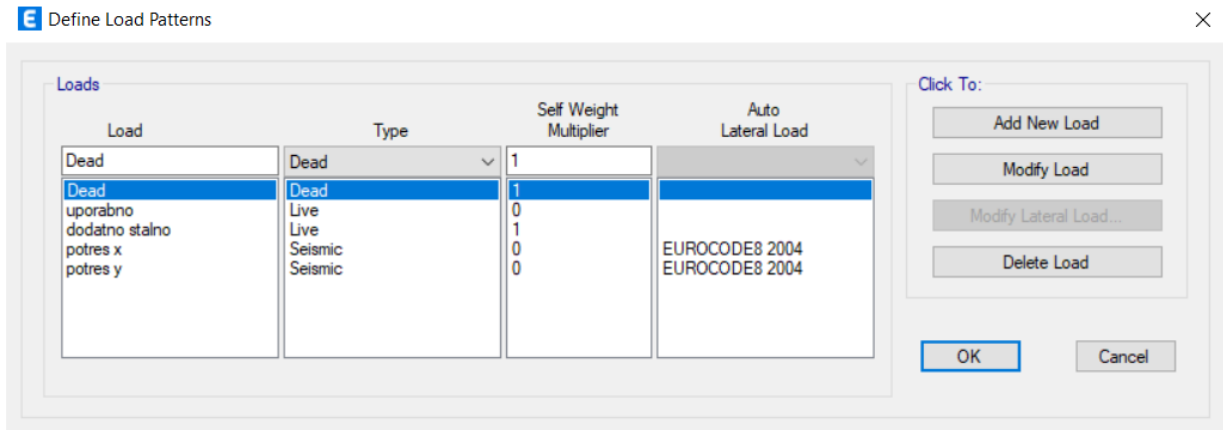


Slika 13. Projektni spektr

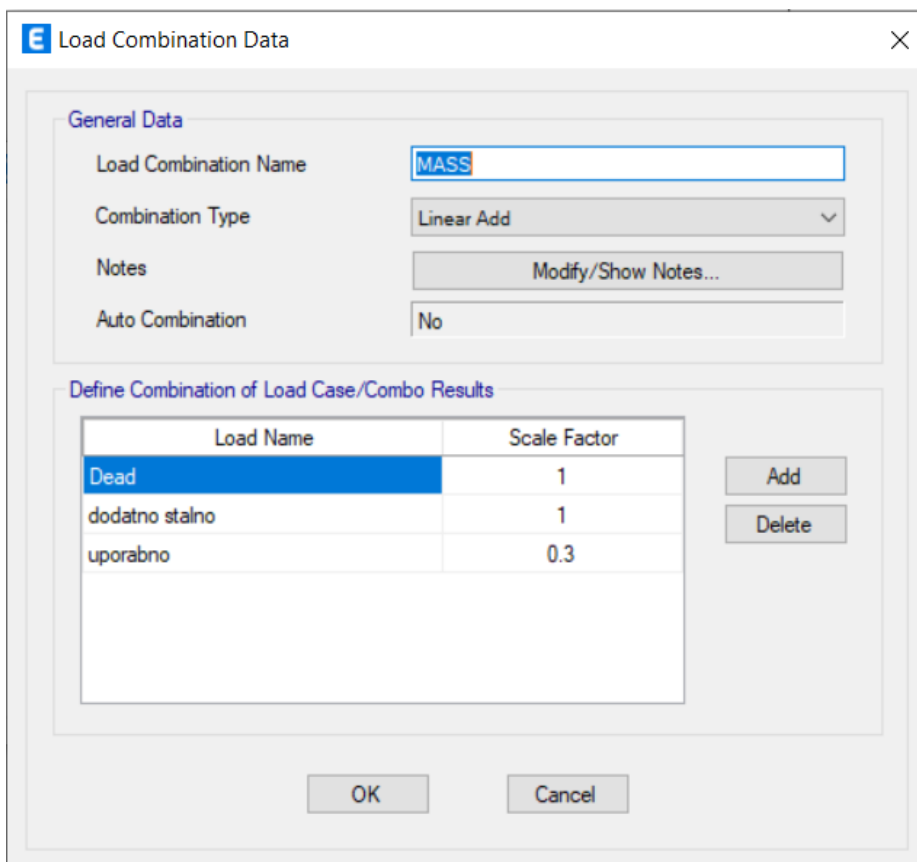
e

3.2. Slučajevi i kombinacije opterećenja

U nastavku su prikazani slučajevi opterećenja u modelu.



Slika 14: Slučajevi opterećenja



Slika 15: MASS kombinacija izračuna vlastite težine

e

Za proračunavanje sila od potresa u x i y smjeru koristimo kombinaciju:

Load Combination Data

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
Dead	1
dodatno stalno	1
uporabno	0.3
slučaj 1	1

Add

Delete

OK Cancel

Slika 16: Kombinacija 1

Potres u smjeru osi x:

e

The screenshot shows the 'Load Combination Data' dialog box. The 'General Data' section includes:

- 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
Dead	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 potresno opterećenje u x smjeru

Potres u smjeru osi y:

The screenshot shows the 'Load Combination Data' dialog box. The 'General Data' section includes:

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

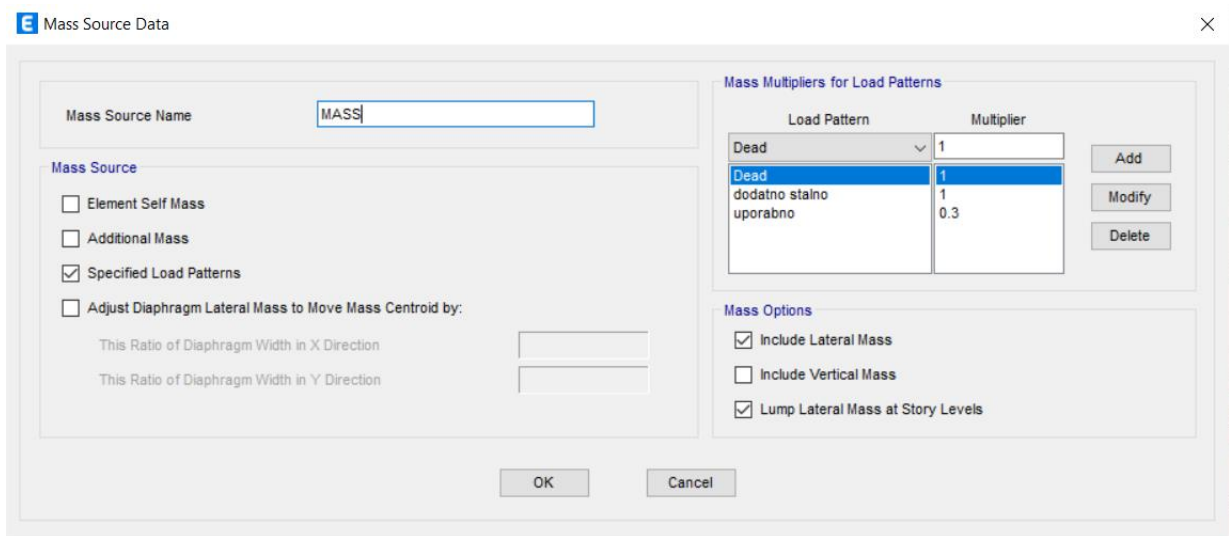
 The 'Define Combination of Load Case/Combo Results' section contains a table with the following data:

Load Name	Scale Factor
Dead	1
dodatno stalno	1
potres y	1
potres x	0.3
uporabno	0.3

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

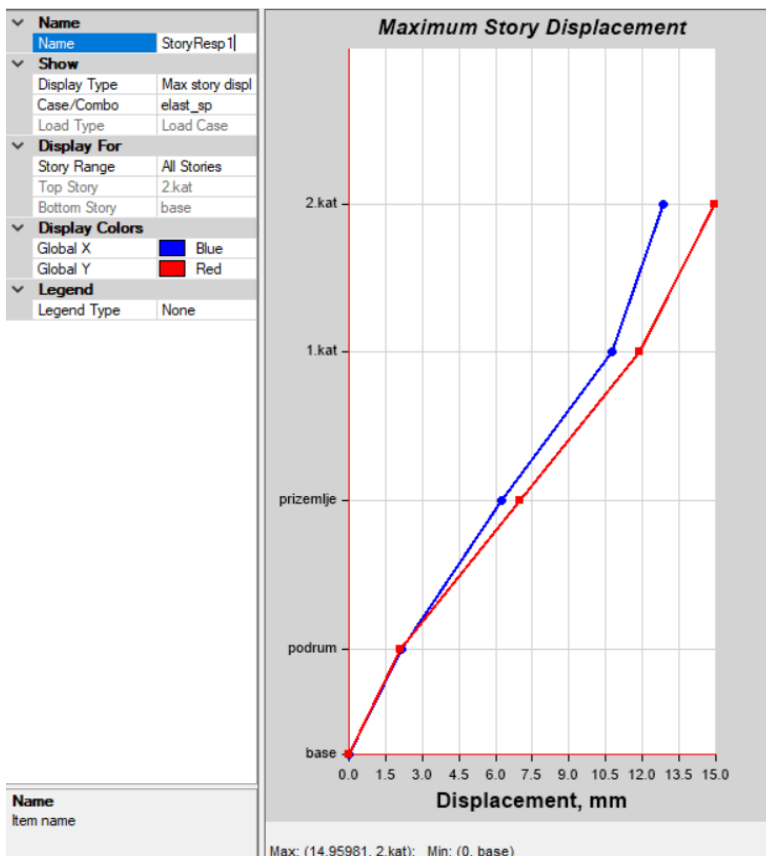
Slika 18: Kombinacija za potresno opterećenje u y smjeru

e



Slika 19: Vertikalno djelovanje u proračunu potresne otpornosti

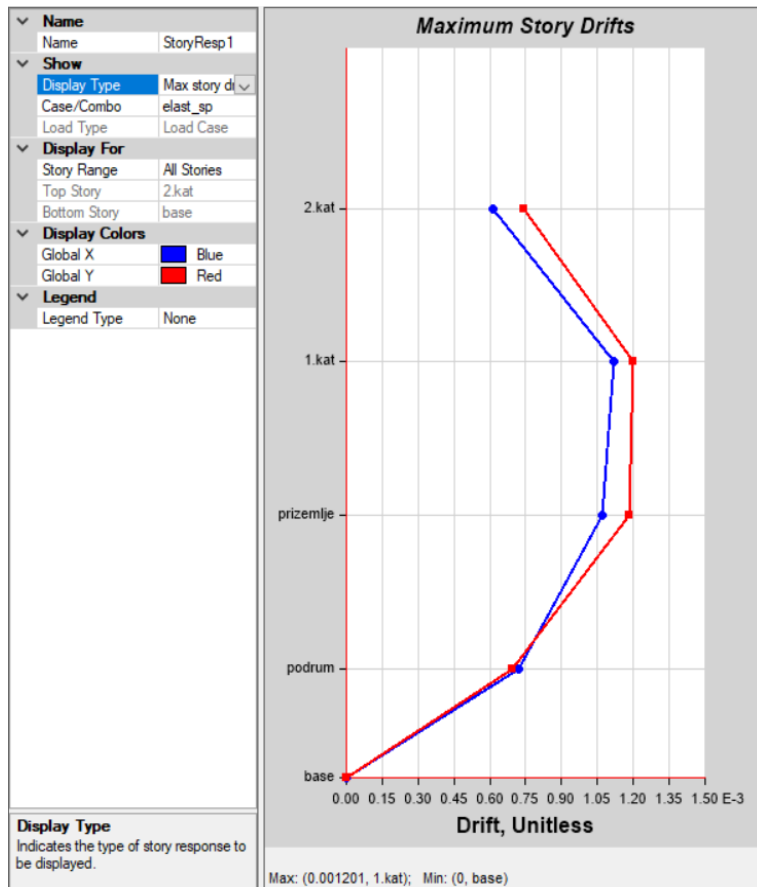
3.3. Analiza rješenja



Slika 20: Maksimalni pomaci po etažama

e

Analizom rješenja uočavamo da pomaci rastu povećanjem katnosti konstrukcije.

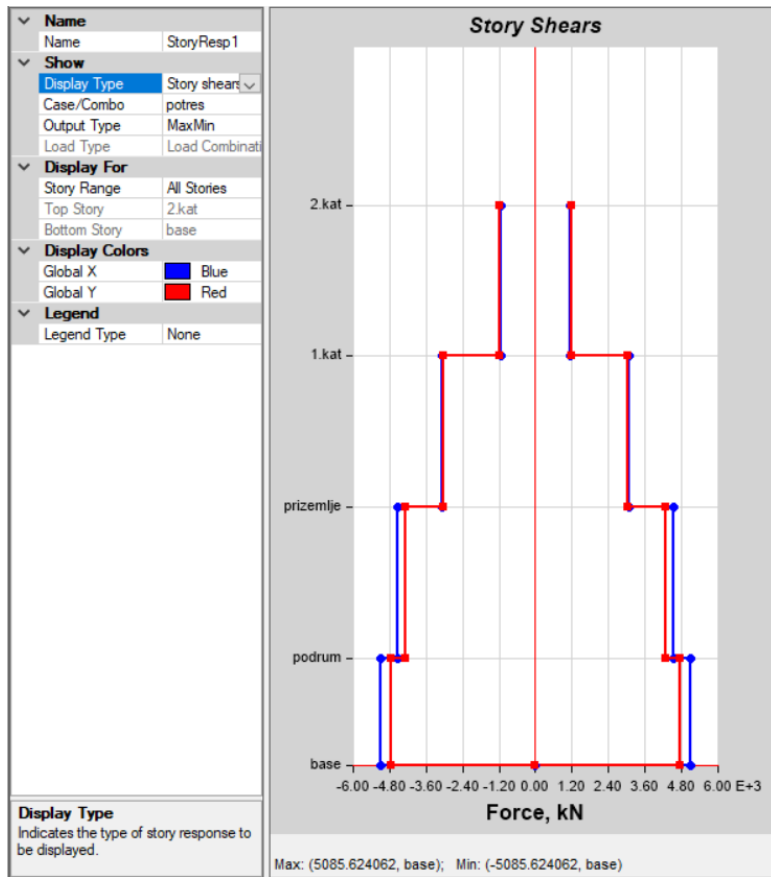


Slika 21: Maksimalni pomaci

Na slici primjećujemo da je do najvećih međukatnih pomaka došlo u prizemlju zgrade.

Dolazimo do zaključka da je najlošija krutost upravo na ovoj etaži. Ovakve pojave česte su kod višekatnih građevina.

e



Slika 22: Ukupne poprečne sile po etažama

Ovim grafom prikazan je utjecaj potresa u vidu horizontalnih pomaka. Najveći pomaci ostvaruju se na najnižoj etaži te se prema vrhu konstrukcije smanjuju.

4. OBNOVA ZIDANE ZGRADE

4.1. Potreba za obnovom

Nužnost obnove ove zidane zgrade ogleda se u tome što je izgrađena koncem 19. kada su se procesi projektiranja i izvedbe zgrada odvijali prema iskustveno prihvaćenoj graditeljskoj praksi koju su stvarali projektanti i izvoditelji radova te prema minimalnim graditeljskim propisima. Najveća oštećenja pretrpjele su zgrade izvedene bez vertikalnih i horizontalnih serklaža s drvenim međukatnim konstrukcijama. Osnovni problemi koji se javljaju kod ovog tipa građevina su nosivi zidovi izvedeni od neomeđenog ziđa, nepravilnosti u tlocrtnoj dispoziciji te dispoziciji zidova po visini, nedostaci stropne i krovne konstrukcije te konstrukcije stubišta. Postoji niz metoda sanacije i pojačanja kojima je moguće osigurati i poboljšati strukturalnu čvrstoću građevine. Prvi korak u obnovi često uključuje sanaciju temeljnog tla. Važno je prepoznati podložnost tla eroziji i vlažnosti. Uslijed sanacije tla, postojeći temelji se mogu ojačati i poboljšati raznim metodama poput zamjene oštećenih dijelova ili dodavanja potpornih elemenata. Pukotine i druga oštećenja zidova moguće je sanirati ugradnjom stakloplastičnih traka ili čeličnih konstrukcija te dodavanjem slojeva morta. Često kod zidanih zgrada nailazimo na probleme kod drvenih stropnih konstrukcija. Stropovi ne posjeduju svojstva krutih dijafragmi te nisu u mogućnosti povezati sklopove glavne konstrukcije u jedinstvenu protupotresnu cjelinu. Kod oštećenja ovog tipa moguće je ugraditi dodatnu potporu ili zamijeniti oštećene grede.

Svi procesi obnove zahtijevaju preciznu analizu i provedbu. Zahvati se trebaju izvoditi u skladu sa propisanim građevinskim normama i standardima.

4.2. Tehnike popravka i pojačanja konstrukcija oštećenih u potresu

Postoji niz metoda popravaka i pojačanja kojima se osigurava strukturalna stabilnost oštećene zgrade. Provedba ovih tehnika važan je čimbenik u obnovi jer se njima osigurava sigurnost i trajnost obnovljene građevine.

Metode popravka i pojačanja su:

1. Sanacija i ojačanje temeljnog tla

Ovi postupci čine prvu fazu obnove zgrade te obuhvaćaju niz postupaka kojima se poboljšavaju fizikalno-mehanička svojstva koja bi povećala njegova sposobnost da

podnese potresno opterećenje. Potencijalne nestabilnosti određuju se ovisno o geofizičkim uvjetima konstrukcije.

2. **Popravak i pojačanje temelja**

Temelji su iznimno važan konstrukcijski element koji omogućuje prenošenje opterećenja s konstrukcije na temeljno tlo ili stijenu. Metode koje se često primjenjuju kod ovakvih zahvata su izvedba armiranobetonske grede koje se dodatno ojačavaju prednapetim kabelima ili armaturom te metoda mlaznog betoniranja postojećih temelja.

3. **Popravak i pojačanje zidova**

Kod starijih zgrada u zagrebačkom donjogradskom bloku pročelja su izvođena od mineralne žbuke, dok je opeka povezivana vapnenim mortom koji se sastoji od mineralnog veziva, pijeska i vode.

Uslijed otkrića portland cementa, primjena vapna značajno je opala. Međutim, unatoč povećanoj čvrstoći i kratkom vremenu vezivanja portland cement ipak nije prikladan izbor za pojačanje povijesnih zidanih građevina. Kao glavna poteškoća kod korištenja cementnih mortova ističe se njihova nespojivost s obzirom na poroznost, čvrstoću i fleksibilnost.

4. **Popravak i pojačanje drvenih i stropnih konstrukcija**

Mogućnosti pojačanja drvene stropne konstrukcije bazirane su na zamjeni oštećenih greda ili ugradnji dodatne potpore za povećanje mehaničke otpornosti.

Zbog poteškoća izvedbe naknadnih sanacija važno je prilikom obnove provesti sva potrebna ispitivanja u vezi s prekomjernom količinom vlage u materijalu te opasnošću od truljenja. Konstrukcijski zahvati na drvenim stropnim konstrukcijama uključuju pojačanje grednika te plošno ukrućivanje postojećih grednika.

5. **Popravak i pojačanje tavanskog bloka i krovne konstrukcije**

Obnovi tavanskog bloka potresom oštećene građevine pristupa se kao dijelu cjelovite obnove svake zgrade pojedinačno. Potrebno je rekonstruirati sve glavne konstrukcijske sklopove tavanskog bloka te njihove veze. Također je nužno pristupiti i popravku tavanskih zidova i dimnjaka te rekonstrukciji stropa zadnjeg kata i krovne konstrukcije.

6. **Proračun pojačanja ziđa**

Proračuni pojačanja ziđa provode se u svrhu odabira najprikladnije metode pojačanja te osiguranja funkcionalnosti i trajnosti građevine. Metode proračuna uključuju:

1. Pojačanje ziđa na posmik armiranobetonskom oblogom
2. Pojačanje ziđa na posmik uporabom moždanika
3. Pojačanje ziđa na posmik nemetalnom armaturom kao što su:
 - Pojačanje ziđa FRP-om prema CNR-DT 200/2013
 - Pojačanje ziđa FRCM-om prema CNR-DT 215/2018

4. Pojačanje зида armiranjem sljubnica

- Pojačanje čeličnom armaturom
- Pojačanje FRP armaturom

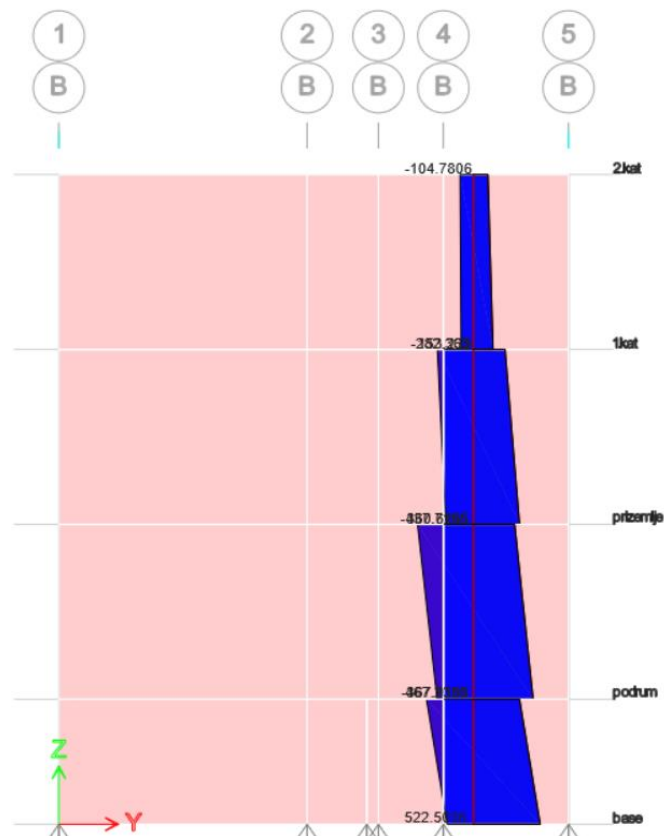
4.3. Proračun nosivosti na posmik nepojačanog зида

Slijedi primjer proračuna zidanog зида stubišta opterećenog vertikalnom tlačnom silom, horizontalnom silom te momentom savijanja u ravnini. Proračunom je određena njegova sposobnost prenošenja posmičnog naprezanja te su u skladu s njom razmotrene mogućnosti pojačanja.

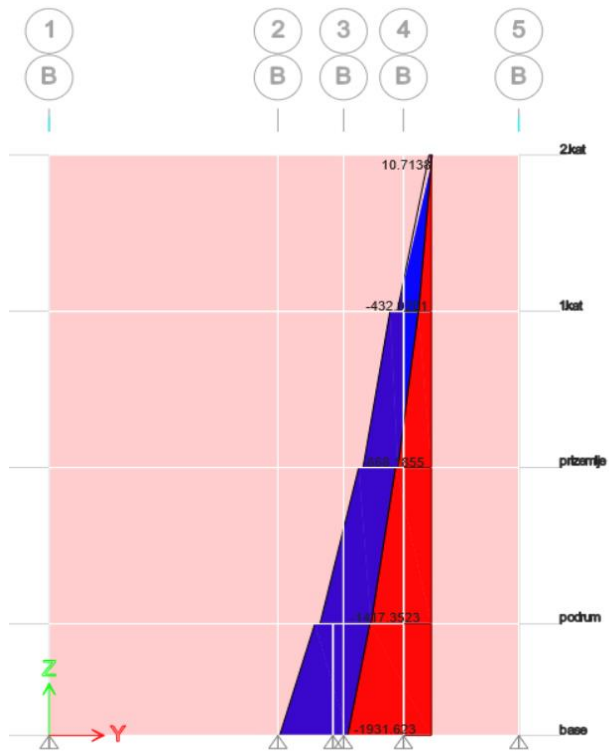
Zidni element izrađen je od opeka dimenzija $v/\text{š}/d = 6,5/15/30$ cm, mort je vapneni.

Prosječne debljine horizontalnih sljubnica su 1,0 cm, duljina зида $L = 4,48$ m, visina $h = 3,0$ m te širina 0,45 m.

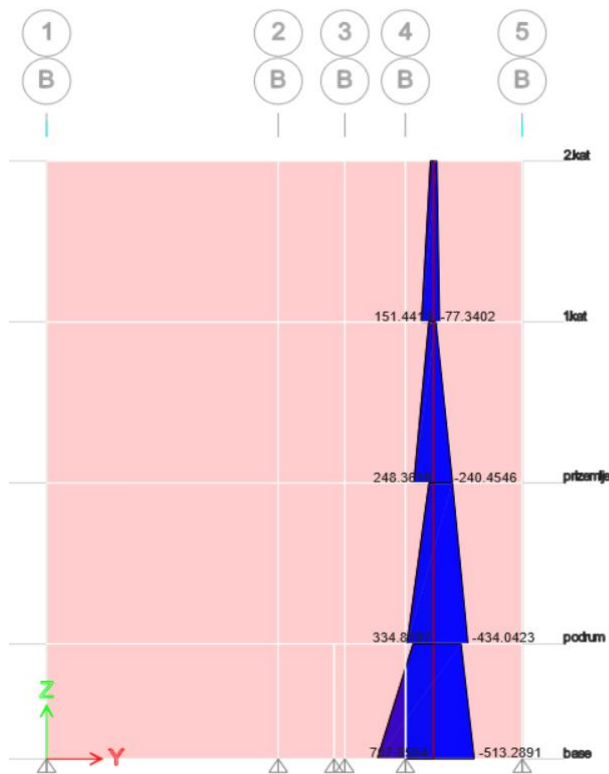
Ulazni parametri:



Slika 23: Maksimalna poprečna sila V_{Ed}



Slika 24: Maksimalna uzdužna sila N_{Ed}



Slika 25: Maksimalni moment savijanja M_{Ed}

U tablici su prikazane vrijednosti koje se u stvarnosti obično utvrđuju putem ispitivanja svake pojedine konstrukcije.

Tablica 1.: Karakteristike ziđa [4]

f_v [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

- Srednje tlačno naprezanje određuje se izrazom

$$\sigma_0 = \frac{N_{Ed}}{L \cdot t_w}$$

Gdje su :

N_{Ed} - uzdužna tlačna sila

L – duljina zida

t_w – debljina zida

$$\sigma_0 = \frac{1931,62}{448 \cdot 45} = 0,1 \text{ kN/cm}^2 = 1,0 \sim \text{N/mm}^2$$

Dio zida u tlaku:

$$L_c = 3 \cdot \left(\frac{L}{2} - \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} \right)$$

Gdje su:

M_{Ed} = uzdužna tlačna sila

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

$$L_c = 3 \cdot \left(\frac{4,48}{2} - \frac{707,86}{1931,62} \right) = 5,62 \text{ m} = 562 \text{ cm}$$

Zaključujemo da je čitav zid u tlaku.

- Proračunsko tlačno naprezanje u zidu:

$$\sigma_d = \frac{N_{Ed}}{L_c \cdot t_w}$$

Gdje je

- L_c = duljina zida u tlaku

$$\sigma_d = \frac{1931,62}{448 \cdot 45} = 0,1 \text{ kN/cm}^2 = 1,0 \sim \text{N/mm}^2$$

- Posmična čvrstoća zida :

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

Gdje su:

- f_{v0} = posmična čvrstoća zida
- μ = koeficijent trenja
- σ_d = proračunsko tlačno naprezanje u zidu

$$f_v = 0,16 + 0,5 \cdot 1,0 = 0,66 \sim \text{N/mm}^2 = 0,066 \text{ kN/cm}^2$$

Za potrebe proračuna uzete su srednje vrijednosti karakteristike materijala gdje koeficijent trenja iznosi 0,5.

Mora vrijediti uvjet:

$$f_v < 0,065 \cdot f_b$$

$$0,66 < 0,065 \cdot 15$$

$$0,66 \text{ N/mm}^2 < 0,98 \text{ N/mm}^2$$

Gdje je:

f_b = tlačna čvrstoća zidnog elementa

Za daljnji proračun uzeta je mjerodavna vrijednost $f_v = 0,66 \text{ N/mm}^2$.

- Nosivost zida na klizanje određuje se izrazom:

$$V_{p,Rd} = \frac{1}{\gamma_M} \cdot f_v \cdot L_C \cdot t_w$$

Gdje su:

γ_M = parcijalni koeficijent sigurnosti za materijal

f_v = posmična čvrstoća

$$V_{p,Rd} = \frac{1}{1,5} \cdot 0,066 \cdot 448 \cdot 45 = 887,04 \text{ kN}$$

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

Za daljnji proračun uzimaju se vrijednosti $\gamma_M = 1,5$ i $FP = 1,35$ (razina znanja 1).

- Nosivost zida na dijagonalni ravni slom određuje se izrazom:

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

Gdje su:

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

$$b = h/b = 300/448 = 0,67 \leq 1$$

$$V_{t1,Rd} = 448 \cdot 45 \cdot \frac{0,011}{1,5 \cdot 1,35 \cdot 1,0} \cdot \sqrt{1 + \frac{1,5 \cdot 1,35 \cdot 0,1}{0,011}} = 482,46 \text{ kN}$$

- 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 su:

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

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

$$V_{t2,Rd} = \frac{448 \cdot 45}{1,0} \cdot \left(\frac{0,016}{1,5 \cdot 1,35 \cdot (1 + 0,6 \cdot 1,0)} + \frac{0,6}{1 + 0,6 \cdot 1,0} \cdot 0,1 \right) = 855,56 \text{ kN}$$

- 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 $f_{bt} = 0,1 f_b$

$$V_{d,lim} = 448 \cdot 45 \cdot \frac{0,1 \cdot 1,5}{1,5 \cdot 1,35 \cdot 2,3 \cdot 1,0} \cdot \sqrt{1 + \frac{1,5 \cdot 1,35 \cdot 0,1}{0,1 \cdot 1,5}} = 995,32 \text{ kN}$$

$$V_{t2,Rd} = 855,56 \text{ kN} \leq V_{d,lim} = 995,32 \text{ kN}$$

- Nosivost zida na savijanje:

$$V_{f,RD} = \frac{L \cdot N_{Ed}}{2 \cdot h_0} \cdot (1 - 1,15 \cdot v)$$

Gdje su:

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

v – normalizirana uzdužna sila

$$V_{f,RD} = \frac{448 \cdot 1931,62}{2 \cdot 0,5 \cdot 300} \cdot (1 - 1,15 \cdot 0,56) = 1026,90 \text{ kN}$$

- Normalizirana uzdužna sila

$$v = \frac{N_{Ed}}{L \cdot t_w \cdot f_d}$$

Gdje je:

f_d = proračunska tlačna čvrstoća zida

$$v = \frac{1931,62}{448 \cdot 45 \cdot 0,17} = 0,56$$

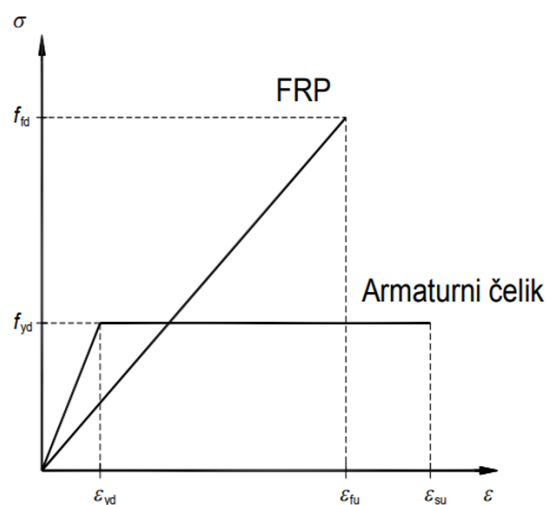
Zaključak:

Nosivost zida na klizanje	$V_{p,Rd} = 887,04 \text{ kN}$
Nosivost zida na dijagonalni ravni slom	$V_{t1,Rd} = 482,46 \text{ kN}$
Nosivost zida na dijagonalni stepeničasti slom	$V_{t2,Rd} = 855,56 \text{ kN}$
Nosivost zida na savijanje	$V_{f,RD} = 1026,90 \text{ kN}$

Mjerodavna nosivost zida je najmanja vrijednost dobivena proračunom tj. 482,46 kN. Djelujuća poprečna sila iznosi 522,5 kN pa zaključujemo da je nužno ojačati zid kako bi povećali nosivost.

4.4. Primjer pojačanja FRP-om prema CNR-DT 200/2013

FRP ili vlaknima armirani polimer je kompozitni materijal čija su vlakna u funkciji armature ugrađena u polimernu matricu. Ovaj materijal posjeduje niz povoljnih karakteristika poput vlačne čvrstoće, izrazite otpornosti na koroziju te male težine. Postoji više vrsta vlakana a najčešće se upotrebljavaju staklena (GFRP), aramidna (AFRP), ugljična (CFRP) te bazaltna (BFRP).



Slika 26: Proračunski dijagram betona, armaturnog čelika i FRP-a [5]

Slijedi primjer proračuna pojačanja zida gdje će se koristiti horizontalne vertikalne predgotovljene FRP trake na punoj opeki.

Tablica 2.: Pretpostavljene karakteristike FRP-a u primjeru [4]

E_f [N/mm ²]	t_f [cm]	l_f [cm]	d_f [cm]	$\varepsilon_{u,f}$ [%]
170000	0,1	10	195	1,65

Pretpostavljamo da je horizontalna tlačna čvrstoća zida

$$f_{d,h} = 0,5 \cdot f_d$$

$$f_{d,h} = 0,5 \cdot \frac{3,4}{1,0 \cdot 1,5} = 1,13 \sim \text{N/mm}^2 = 0,11 \text{ kN/cm}^2$$

Maksimalna dopuštena sila u zidu:

$$V_{Rd,max} = 0,3 \cdot f_{d,h} \cdot t_w \cdot d_f$$

Gdje su:

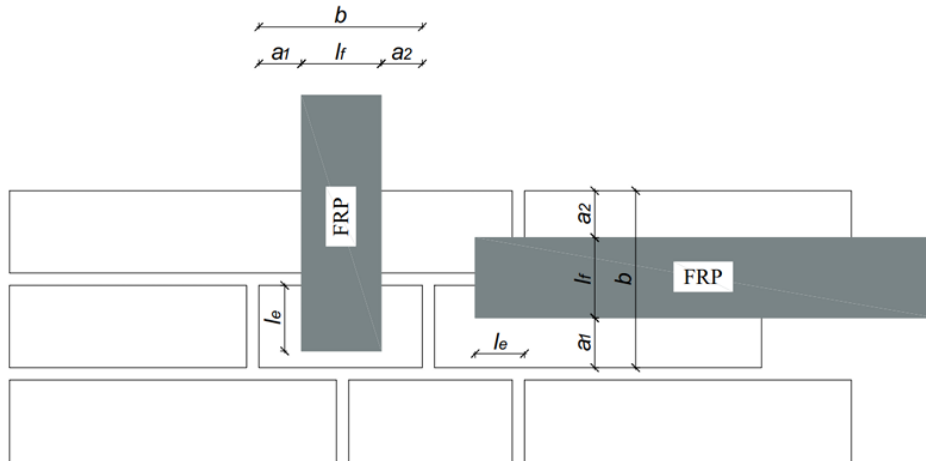
$f_{d,h}$ - horizontalna tlačna čvrstoća zida

d_f – udaljenost od najnapregnutijeg vlakanca armature u vlaku do najnapregnutijeg vlakanca zida u tlaku

$$V_{Rd,max} = 0,3 \cdot 0,11 \cdot 45 \cdot 195 = 289,58 \text{ kN}$$

U ovom primjeru pretpostavit ćemo da su horizontalne trake nalijepljene preko dvije ili tri opeke. Kako bi bili na strani sigurnosti tri opeke po visini.

Potrebno je odrediti dimenziju b sa slike.



Slika 27: Prikaz dimenzije b [4]

$$b = 3 \cdot 6,5 + 2 \cdot 1,0 = 21,5 \sim \text{cm}$$

Izraz za korekcijski faktor:

$$k_b = \sqrt{\frac{3 \cdot l_f / b}{1 + l_f / b}}$$

Gdje je :

l_f – učinkovita visina pojačanja

$$k_b = \sqrt{\frac{3 \cdot 10 / 21,5}{1 + 10 / 21,5}} = 0,98$$

Izraz kojim računamo energiju loma:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_b \cdot f_{bt}}$$

Gdje su:

k_G - korekcijski faktor ovisan o vrsti ziđa

k_b – geometrijski korekcijski faktor

$$\Gamma_{Fd} = \frac{0,98 \cdot 0,012}{1,35} \cdot \sqrt{15 \cdot 1,5} = 0,041 N/mm$$

Najveće dopušteno naprezanje:

$$f_{td} = \frac{1}{\gamma_{t,d}} \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}}$$

Gdje su:

$\gamma_{t,d}$ – parcijalni koeficijent sigurnosti za gubitak prijanjanja

E_f – modul elastičnosti materijala vlakana

Γ_{Fd} – proračunska vrijednost energije loma

$$f_{td} = \frac{1}{\gamma_{t,d}} \sqrt{\frac{2 \cdot 170000 \cdot 0,041}{1,0}} = 98,39 N/mm^2$$

Pretpostavljeno klizanje pri slomu je 0,3 mm, a posmično naprezanje glasi:

$$\tau_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{s_u}$$

Gdje je:

s_u – proklizavanje pri slomu

$$\tau_{bd} = \frac{2 \cdot 0,041}{0,3} = 0,27 \text{ N/mm}^2$$

Izraz za duljinu sidrenja glasi:

$$l_e = \max\left(\frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot \tau_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 150 \sim \text{mm}\right)$$

Zahtjeva se da djelujuća sila ne premašuje 85% ukupne nosivosti. Iz toga slijedi:

$$V_{Ed} = 0,85 \cdot (V_{Rd} + V_{t,f})$$

$$V_{t,f} = 132,25 \text{ kN}$$

Posmična sila FRP pojačanja glasi:

$$V_{t,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot \frac{0,6 \cdot d_f \cdot 2 \cdot A_{fw} \cdot f_{fd}}{p_f}$$

Gdje su:

γ_{Rd} – parcijalni koeficijent sigurnosti

A_{fw} – ploština FRP-a

p_f – razmak između susjednih traka FRP-a

Razmak je:

$$p_f \leq \frac{0,6 \cdot 195 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 0,1 \cdot 11,50}{1,2 \cdot 132,25} = 16,9 \sim \text{cm}$$

Odabran je razmak 17 cm.

Nosivost pojačanja s odabranim razmakom:

$$V_{t,f} = \frac{1}{1,2} \cdot \frac{0,6 \cdot 195,0 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 0,1 \cdot 11,50}{17} = 131,91 \text{ kN}$$

Konačna nosivost pojačanog zida:

$$V_{RD} = 482,46 + 131,91 = 614,37 \text{ kN}$$

Nosivost se primjenom FRP traka povećala za 27 %.

5. ZAKLJUČAK

Potres koji je pogodio Zagreb 2020. godine uzrokovao je znatna oštećenja na zgradama u zaštićenoj, povijesno-urbanoj zoni grada. Činjenica da je potres seizmološki gledano bio umjerene magnitude a prouzročio ogromne materijalne štete otkriva nedostatnu mehaničku otpornost velikog broja objekata na ovom području.

Upravo je stambeni fond pretrpio najznačajnija oštećenja. Predmetna zgrada dobila je oznaku neuporabljivosti (PN2) uz preporuku izvođenja hitnih intervencija. Analizom nosivosti otkriveni su nedostaci u izvornom projektu te problemi dugotrajnog lošeg i neadekvatnog održavanja.

Uočeni su nedostaci u konstrukciji stubišta, stropova te podruma.

Velik nedostatak u izvedbi konstrukcije predstavlja materijal. Elementi od opeke ne posjeduju dovoljnu krutost za preuzimanje sila kojima su izloženi te je djelovanjem potresa njihova nosivost iscrpljena.

Stropovi zgrade također ne pokazuju dostatnu krutost te su pretrpjeli niz deformacija.

Potrebno je provesti niz mjera koje će povećati krutost i sigurnost predmetne građevine.

Jedan od ključnih zahvata je pojačanje nosivih elemenata. Preporučuje se armiranje sljubnica zida čeličnom armaturom ili FRP materijalima. Primjenom ovakvih sustava osigurala bi se dostatna čvrstoća ziđa.

Iz navedenih podataka možemo zaključiti da je kontinuirano i kvalitetno prikupljanje podataka o stanju građevina nužno kako bi se ovakvi događaji u budućnosti izbjegli.

POPIS LITERATURE

- [1] Crnogorac, M. (2021): Izvorni i stečeni nedostaci konstrukcija zgrada, u Potresno inženjerstvo – Obnova zidanih zgrada. Uroš, M., Todorić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lakušić, S. (Eds.), Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2021.
- [2] Kišiček, T., Stepinac, M., Renić, T., Hafner, I., Lulić, L. (2020): Pojačanje ziđa na posmik pomoću FRP-a ili TRM-a, GRAĐEVINAR, 72 (10) 937-953, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2983.2020>
- [3] Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Sović I. (2011): Karte potresnih područja Republike Hrvatske, <http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/>
- [4] Uroš, M., Todorić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lakušić, S. (Eds.) (2021): Potresno inženjerstvo – Obnova zidanih zgrada, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2021.
- [5] Pavić, K.: Ojačavanje armiranobetonskih konstrukcija proizvodima od polimera armiranog vlaknima, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2012.
- [6] Sorić, Z.; Kišiček, T.: BETONSKE KONSTRUKCIJE 1, Projektiranje betonskih konstrukcija prema europskim normama EN. Skripta Građevinskog fakulteta, 2010./2011., Zagreb
- [7] HRN EN 1998-3: Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada, HNZ, Zagreb, 2011.
- [8] HRN EN 1998-1:2011+NA:2011+A1:2014+ Ispr.2:2015, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade, HZN, Zagreb, Hrvatska

POPIS SLIKA

Slika 1: Poprečni presjek zgrade (izvor: [Državni arhiv u Zagrebu]).....	3
Slika 2: Tlocrt podruma (izvor: [Državni arhiv u Zagrebu])	4
Slika 3: Tlocrt prizemlja (izvor: [Državni arhiv u Zagrebu])	5
Slika 4: Tlocrt prvog i drugog kata (izvor: [Državni arhiv u Zagrebu]).....	6
Slika 5: Skice otklona zida izvan ravnine (izvor: [5])	7
Slika 6: Prikaz modela	9
Slika 7: Tlocrt podruma	10
Slika 8: Tlocrt prizemlja	10
Slika 9: Tlocrt prvog i drugog kata.....	11
Slika 10: Model u pogledu.....	11
Slika 11: Karta potresnih područja RH za povratno razdoblje od 475 godina (izvor [3])	14
Slika 12: Karta potresnih područja RH za povratno razdoblje od 95 godina (izvor [3])	15
Slika 13: Projektni spektar	16
Slika 14: Slučajevi opterećenja.....	17
Slika 15: MASS kombinacija izračuna vlastite težine	17
Slika 16: Kombinacija 1	18
Slika 17: Kombinacija za potresno opterećenje u x smjeru	19
Slika 18: Kombinacija za potresno opterećenje u y smjeru	19
Slika 19: Vertikalno djelovanje u proračunu potresne otpornosti	20
Slika 20: Maksimalni pomaci po etažama.....	20
Slika 21: Maksimalni pomaci.....	21
Slika 22: Ukupne poprečne sile po etažama.....	22

POPIS TABLICA

Tablica 1: Karakteristike ziđa (Izvor: [4]).....	27
Tablica 1: Pretpostavljene karakteristike FRP-a (Izvor: [4])	33