

# Procjena oštećenja i otpornosti zidane zgrade u centru Zagreba nakon potresa

---

Črnjević, Helena

Master's thesis / Diplomski rad

2023

*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:237:672743>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-09**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

**Helena Črnjević**

**PROCJENA OŠTEĆENJA I OTPORNOSTI ZIDANE ZGRADE  
U CENTRU ZAGREBA NAKON POTRESA**

**Diplomski rad**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GRAĐEVINSKI FAKULTET



**PROCJENA OŠTEĆENJA I OTPORNOSTI ZIDANE ZGRADE  
U CENTRU ZAGREBA NAKON POTRESA**

**Diplomski rad**

**Helena Črnjević**

**izv. prof. dr. sc. Mario Uroš**

Zagreb, 2023.

## Sažetak

U radu je prikazan postupak oštećenja i uporabljivosti zidane zgrade u centru Zagreba nakon potresa koji se dogodio 22.3.2020. Predmet istraživanja je tipična zgrada u centru Zagreba koja je oštećena u potresu. U radu su opisana oštećenja te su ucrtana u poglede na pojedine zidove i stropove.

Napravljen numerički proračun postojećeg stanja konstrukcije u programskom paketu 3Muri. Proračunata je otpornost glavnih elemenata konstrukcije te su određeni njezini vlastiti periodi i oblici titranja. Proračunata je globalna otpornost konstrukcije nelinearnom statičkom metodom postupnog guranja te je dobiven indeks značajnog oštećenja (IZO) konstrukcije. Određeni su kritični elementi konstrukcije i dominantni mehanizam otkazivanja.

Također je napravljena usporedba otpornosti zgrade za slučaj fleksibilnih stropnih konstrukcija i relativno krutog stropa. Na kraju je napravljen kritički osvrt na metodu proračuna i izvornu koncepciju zgrade te su dani zaključci o uzrocima oštećenja zgrade u potresu.

Ključne riječi: potresna otpornost, zidana zgrada, nelinearna statička analiza

## Abstract

The paper presents the procedure for assessing the damage and usability of masonry building in the center of Zagreb after the earthquake that occurred on March 22, 2020. The subject of the research is a typical building in the center of Zagreb that was damaged in the earthquake. Damages are described and are drawn in views of individual walls and ceilings.

A numerical calculation of the existing damaged structure was made in the 3Muri software package. The resistance of the main elements of the structure was calculated and its natural periods and forms of vibration were determined. The global resistance of the structure was obtained. The critical elements of the structure and the dominant failure mechanism were determined. A comparison of building resistance was also made for the case of flexible diaphragms and a relatively rigid diaphragms.

At the end, a critical review of the analysis method and the original conception of the building was made, and conclusions were given about the causes of damage to the building in the earthquake.

Key words: seismic resistance, masonry building, nonlinear static analysis

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b> .....	1
<b>2</b>	<b>Općenito o građevini</b> .....	2
2.1	Lokacija i snimak postojećeg stanja .....	2
2.2	Tehnički opis.....	4
<b>3</b>	<b>Prikaz i ocjenjivanje oštećenja konstrukcije</b> .....	9
3.1	Opis oštećenja.....	17
3.2	Kategorizacija zgrade .....	18
<b>4</b>	<b>Metoda postupnog guranja</b> .....	19
4.1	Postupak proračuna nelinearne metode N2 .....	19
4.2	Metoda postupnog guranja u programu 3Muri.....	26
4.2.1	Mehanizmi ziđa .....	29
<b>5</b>	<b>Model zgrade</b> .....	32
5.1	Opis modela zgrade .....	32
5.2	Prikaz modela .....	35
5.3	Analiza opterećenja .....	38
5.3.1	Vlastita težina .....	38
5.3.2	Dodatno stalno opterećenje .....	38
5.3.3	Uporabno opterećenje .....	39
5.3.4	Potres .....	40
5.4	Opterećenje postupnog guranja .....	42
<b>6</b>	<b>Analiza rezultata</b> .....	45
6.1	Modalni oblici titranja i periodi.....	45
<b>7</b>	<b>Rezultati proračuna metodom postupnog guranja</b> .....	47
7.1	Indeksi sigurnosti i krivulje kapaciteta.....	47
7.2	Prikaz otkazivanja zida.....	50
7.2.1	Otkazivanje zida posmikom .....	51

7.2.2	Otkazivanje zida savijanjem.....	51
7.3	Mjerodavne analize.....	52
7.3.1	Mjerodavna analiza u smjeru x .....	52
7.3.2	Mjerodavna analiza u smjeru y .....	57
7.4	Usporedba modela s fleksibilnom dijafragmom sa modelom s krutom dijafragmom 62	
<b>8</b>	<b>Ojačanje konstrukcije.....</b>	<b>64</b>
8.1	Razine obnove .....	64
8.2	Predloženo ojačanje analizirane konstrukcije.....	66
8.2.1	Razina 1 .....	66
8.2.2	Razina 2.....	69
8.2.3	Razina 3.....	70
<b>9</b>	<b>Zaključak .....</b>	<b>71</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>73</b>
	<b>Popis slika.....</b>	<b>75</b>
	<b>Popis tablica .....</b>	<b>78</b>

# 1 Uvod

Većina zgrada u jezgri grada Zagrebu datiraju iz 19. stoljeća. Konstrukcije su tog perioda klasično građene opekom bez horizontalnih i vertikalnih serklaža. Debljine zidova najčešće su se smanjivale sa etažnosti konstrukcija, tako da bi debljina u prizemlju bila na primjer 75 cm, dok je na zadnjem katu debljine 45 cm. Također, važno je za naglasiti često korištenje nosivih lukova za nadvoje pa čak i za nosive zidove. Konstrukcija krovišta bila je jednostavna te se dimnjaci nisu posebno povezivali sa ostatkom krovišta. Sve navedeno rezultiralo je velikim oštećenjima konstrukcija tijekom potresa koji se dogodio 22.3.2020. godine u Zagrebu.

Analizirano je ponašanje zgrade nakon potresa na adresi Đorđićeva 20. Radi boljeg shvaćanja ponašanja građevine, svojstva i značajke konstrukcije su opširno opisane u tehničkom opisu. Za analiziranu zgradu, proveden je pregled konstrukcije te su oštećenja zgrade fotografirana i detaljno razrađena u ovom diplomskom radu. Opisani su koraci prema kojima se rangiraju oštećenja te smo zgradu kategorizirali prema EMS-98 ljestvici u jednu od pet kategorizacija.

Kao jedna od metoda proračuna posmične otpornosti zgrade opisana je metoda postupnog guranja koja predstavlja nelinearni statički proračun. Za numerički proračun koristio se programski paket 3Muri čija su obilježja i princip rada opisani. Bitna je značajka programskog paketa 3Muri da je temeljen na ekvivalentnim okvirima koje automatski određuje te time ubrzava cijeli postupak proračuna metode postupnog guranja. Modeliranje zgrade detaljno je opisano od samih parametara koje smo koristili pa sve do opterećenja i prikaza modela.

Rezultati modalne analize i metode postupnog guranja detaljno su razjašnjeni i opisani. Opširnije su prikazane mjerodavne analize za x i y smjer potresnog opterećenja. Također, izvedena je usporedba analizirane konstrukcije za slučaj fleksibilne dijafragme i relativno krute dijafragme. Imajući na umu sve rezultate numeričke analize i samog stanja pregledane zgrade, predloženi su određeni radovi sanacije i ojačanja konstrukcije.



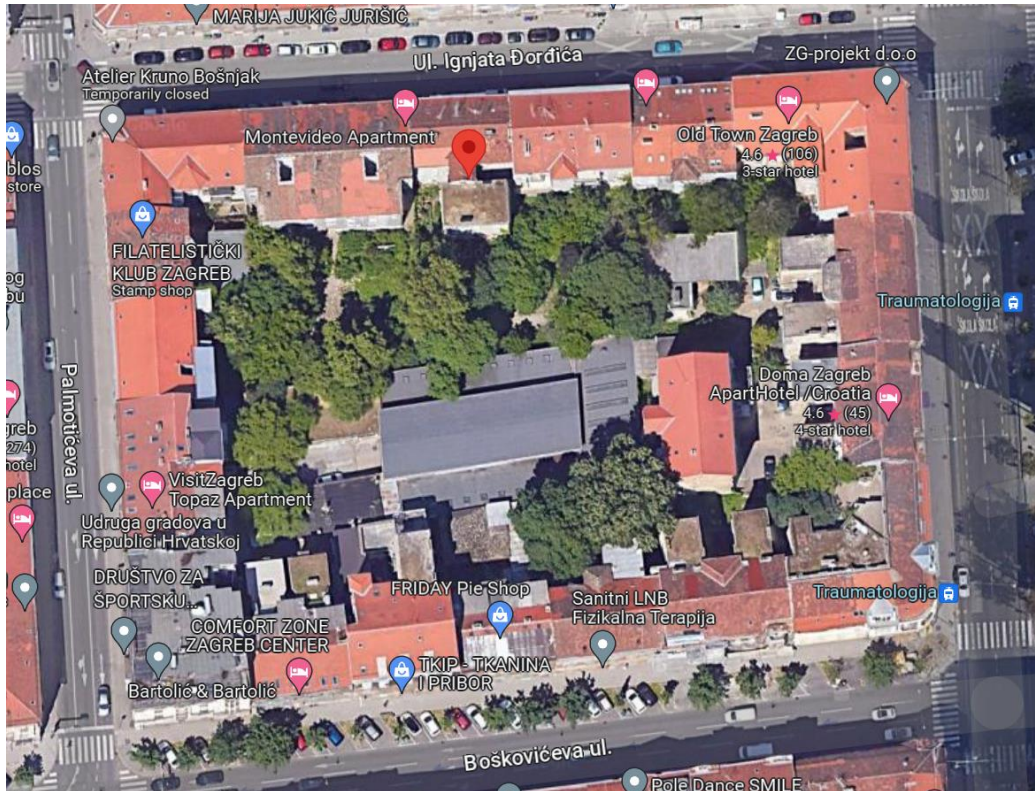
## 2 Općenito o građevini

### 2.1 Lokacija i snimak postojećeg stanja

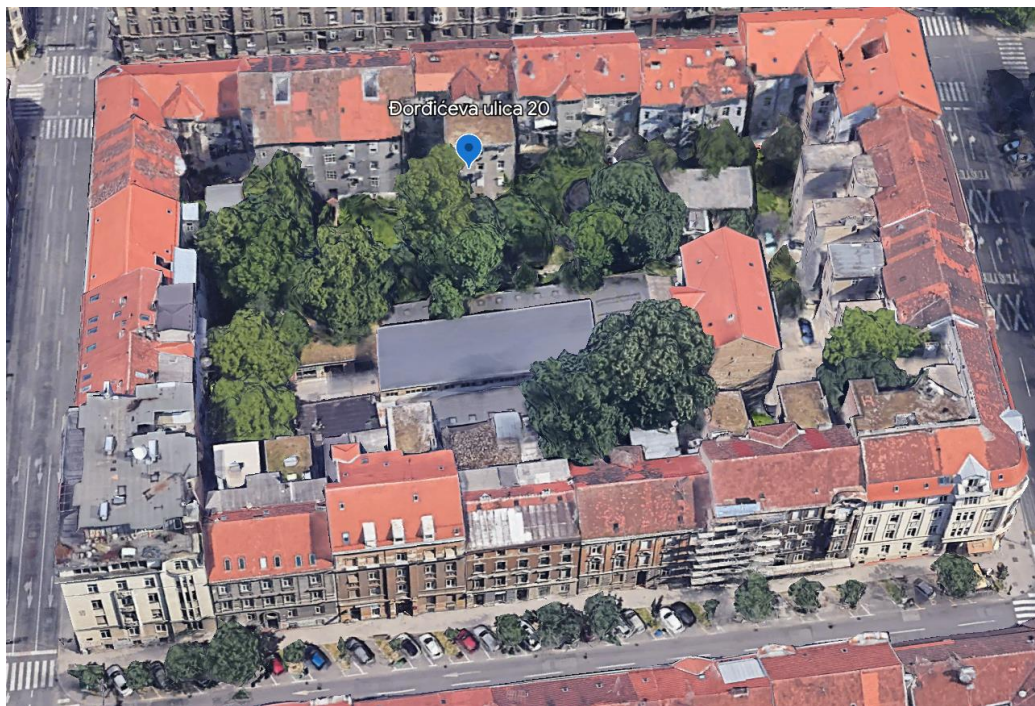
Građevina se nalazi u centru grada Zagreba na adresi Đorđićeva 20, smještena zapadno od Parka Zrinjevca, te unutar kulturno povijesne cjeline grada Zagreba. Smještena je u katastarskoj općini Centar, na katastarskoj čestici broj 6038 [1]. Kao što je vidljivo na slikama 1 i 2 zgrada se nalazi u nizu te je kao takva pridržana u poprečnom smjeru što utječe na odgovor konstrukcije na potres.



*Slika 1 Prikaz katastarske čestice [1]*



Slika 2 2D prikaz situacije [2]



Slika 3 3D prikaz situacije [2]



## 2.2 Tehnički opis

Nacrti koje smo preuzeli u Državnom arhivu u Zagrebu potječu iz 1908. godine. Konstrukcija je klasična iz tog perioda. Propisi kojima su se pridržavali tijekom izgradnje ove konstrukcije nisu zadovoljavali današnje zahtjeve potresne gradnje. Projektirana je na temelju osnovnih zakona statike za vertikalna djelovanja te je kao glavno horizontalno opterećenje bio vjetar.

Zgrada je etažnosti podrum, prizemlje, 1.kat, 2.kat, 3.kat i potkrovlje. Ukupna visina vijenca iznosi 21,60 m, a visina sljemena 25,25 m. Građevina je tlocrtno pravokutnog oblika ukupnih tlocrtnih vanjskih mjera 19,20 x 12,35 m .

Sustav temelja je nepoznat, međutim pretpostavljamo da se radi o trakastim temeljima koji prate nosive zidove podruma. Kako nisu provedena detaljna ispitivanja tla, sastav tla je nepoznat, ali u proračunu pretpostavljamo kategoriju tla C.

Podrum se dijelom koristi za stambeni prostor na sjevernoj strani sa izlazom na dvorište, te kao spremište na južnoj strani.

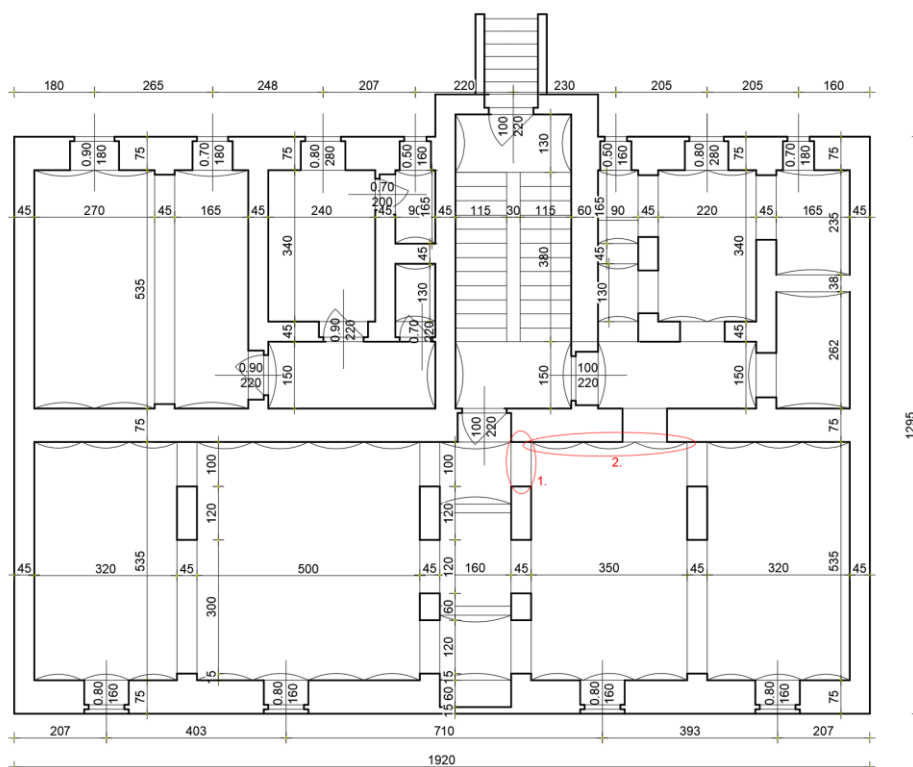
Nosiva konstrukcija sastoji se od zidova od opeke. Vanjski fasadni zidovi izvedeni su od opeke debljine 75 cm u podrumu, 60 cm u prizemlju i 1.katu, te 45 cm na 2. i 3. katu. Središnji nosivi zid prelazi sa 75 cm u podrumu na 60 cm na etažama 1.kata, 2.kata i 3.kata. U poprečnom smjeru na južnoj strani nalazi se nosivi zidani luk debljine 30 cm od 1.kata do 3.kata. Prilikom pregleda oštećenja zgrade taj dio luka izgleda kao zid jer su ga u prošlosti dogradili sa opekom, međutim prema oštećenju koje je nastalo na tom zidu, utvrdili smo da se zapravo radi o nosivom luku. U poprečnom smjeru radi se o zabatnim zidovima, zidovima stubišta i mnogo lučnih zidova koji su tipični primjer gradnje 90-ih godina. Zidani lukovi predstavljaju zakrivljenu gredu konveksnog oblika, a osobitost im je slaba nosivost na vlak. Svo ziđe je nearmirano, odnosno nisu izvedeni horizontalni i vertikalni serklaži što uvelike smanjuje krutost zidane zgrade te njezinu otpornost na potres. Upravo zbog slabe nepovezanosti međusobnih zidova je i došlo do većih oštećenja jer su se zidovi i međukatne konstrukcije ljuljale neovisno jedno o drugoj i na taj način sudarale međusobno. Uz to za dodatno smanjenje vlačne i posmične čvrstoće ziđa zaslužan je mort loše kvalitete. U krovu je mort izložen vanjskim utjecajima te je i zbog toga dodatno smanjena njegova kvaliteta tako da je nakon mnogo godina toliko oslabio da se prstima može micati sa sljubnica što samo znači da je tu povezanost opeke i morta skoro pa nikakva.

Pregradni zidovi su izvedeni od pune opeke debljina 15 cm. Kao tipičan primjer stare gradnje su i nadvoji koji su izvedeni kao plitki lukovi. Zbog mnogo otvora na nosivim zidovima konstrukciju smatramo mekom jer iako su nosivi zidovi debeli upravo zbog tih otvora ostaje jako malo nosivog djela zida koje je samo po sebi zbog neomeđenosti manje krutosti te time i manje nosivo.

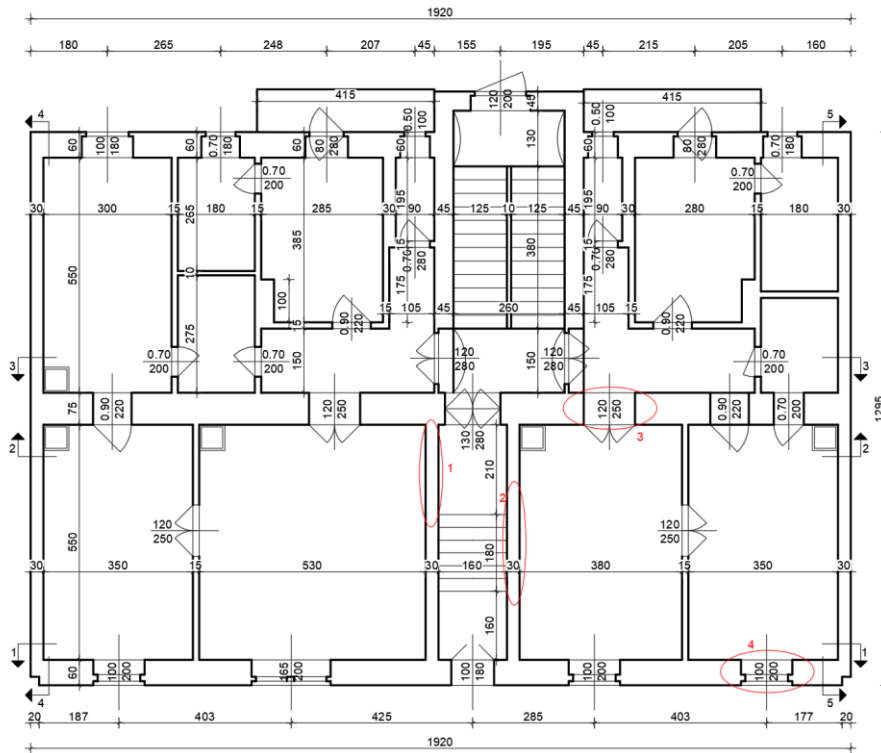
Stropne konstrukcije podruma su betonski stropovi, a gornjih etaža su drveni grednici sa daščanom oplatom ukupne debljine 45 cm. Slojevi stropne konstrukcije su pretpostavljeni prema iskustvenim podacima o slojevima poda ostalih konstrukcija iz tog perioda građenja. Prema tome međukatna konstrukcija sastoji se od šute između daščanih oplata iznad nosivih drvenih grednika koji su oslonjeni na nosive zidove u kraćem poprečnom smjeru.

Potkrovlje se koristi kao spremište, te je formirano ispod tipičnog drvenog kosog krovišta sa nagibom prema sjeveru i jugu.

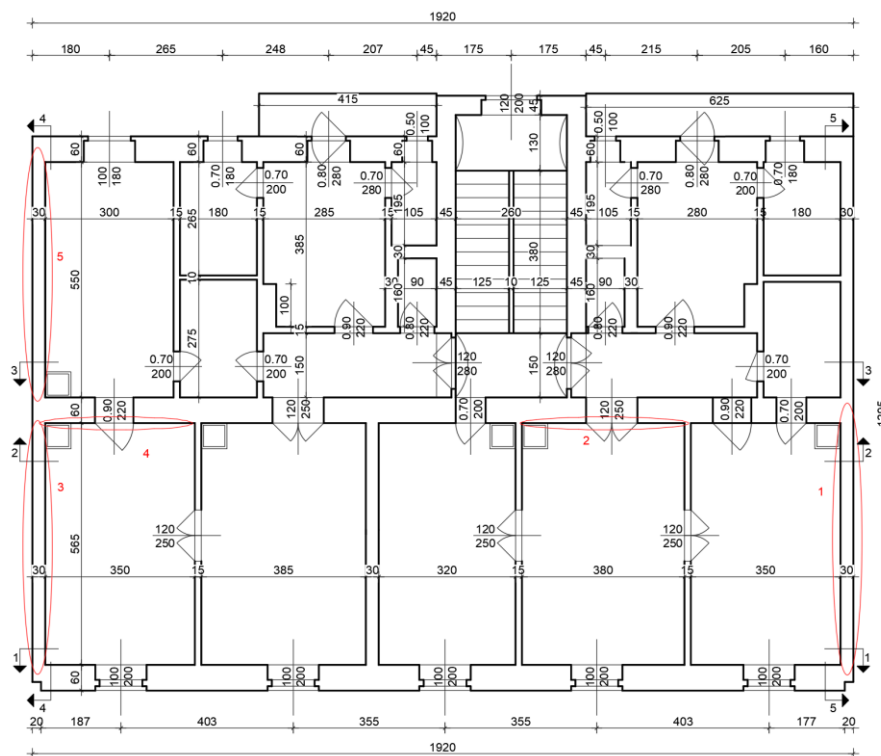
Na temelju nacрта iz Državnog arhiva konstruirani su slijedeći nacrti u programskom paketu AutoCad. Crvenom bojom označena su oštećenja na pojedinim zidovima.



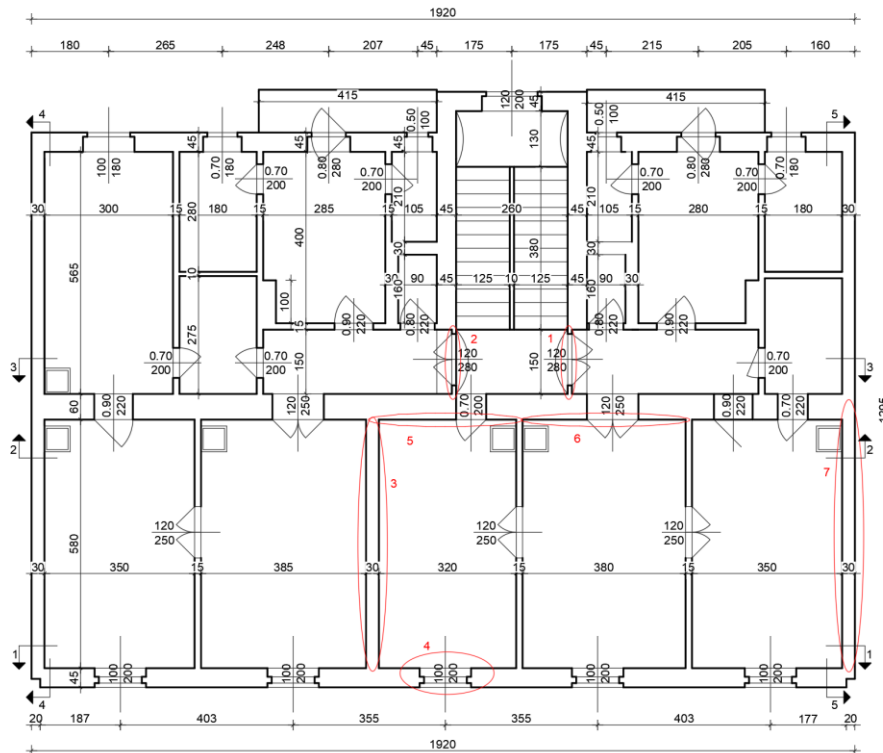
*Slika 4 Tlocrt podruma*



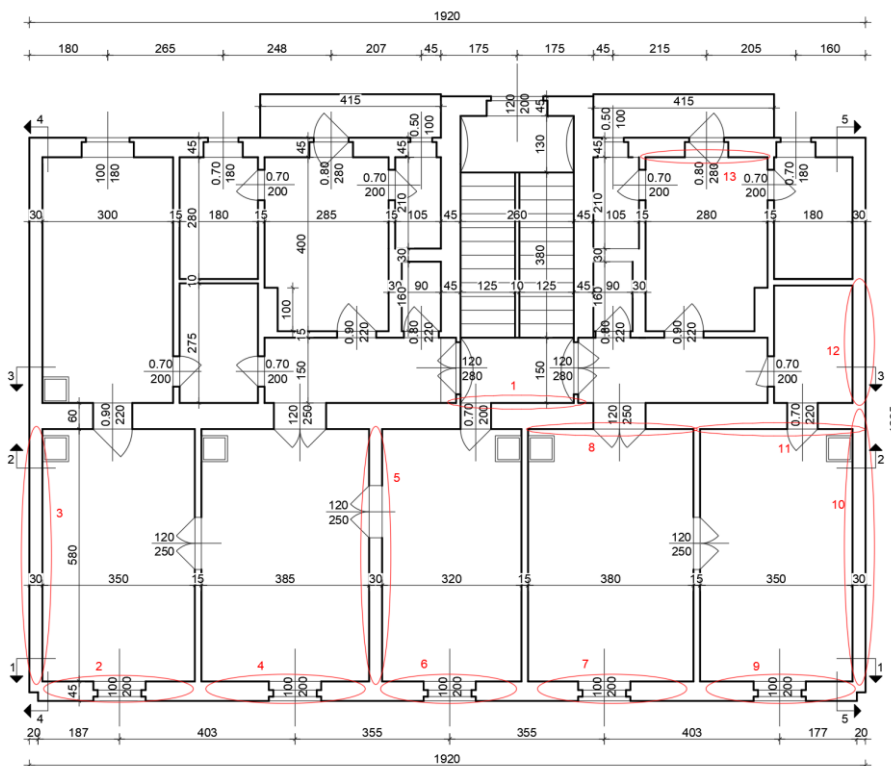
Slika 5 Tlocrt prizemlja



Slika 6 Tlocrt 1.kata



*Slika 7 Tlocrt 2. kata*



*Slika 8 Tlocrt 3. kata*



### 3 Prikaz i ocjenjivanje oštećenja konstrukcije

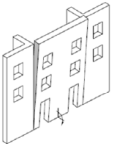
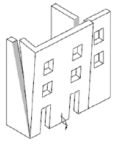
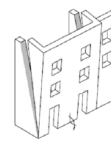
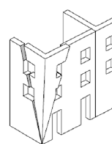
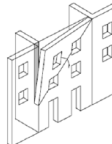
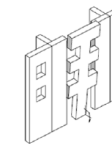
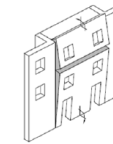
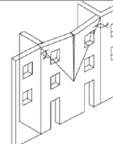
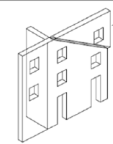
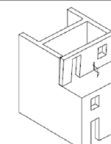

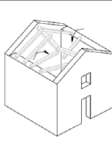
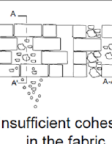
Nakon potresa koji je pogodio Zagreb 22. ožujka 2020. godine oformljen je stožer koji koordinira nekoliko tisuća volontera – građevinskih stručnjaka i cjelokupnu Civilnu zaštitu Grada Zagreba [3]. Zbog mogućnosti naknadnih potresa, organizirani su brzi pregledi konstrukcija građevina kako bi se procijenila narušena nosivost i stabilnost te utvrdili rizici i potrebe iseljenja građevine. Nakon pregleda građevinama su dodjeljivane naljepnice koje odgovaraju kategorijama ocjene uporabljivosti s bojama: zelena, žuta i crvena. Prikazana su na slici 10. U početnom periodu veliki broj građevina je dobio žutu i crvenu oznaku zbog narušene nosivosti i stabilnosti zabata i dimnjaka [4].



Slika 10 Naljepnice oštećenja građevina

Za analizu oštećenja konstrukcije koja je opisana u ovom diplomskom radu organiziran je pregled zgrade. Prije samog dolaska na građevinu bilo je potrebno proučiti nacрте zgrade kako bi se čim bolje snalazili te odmah uočavali ako se nešto ne podudara sa nacrtima. Prilikom provođenja pregleda zgrade bitno je pridržavati se pravila sigurnosti: nositi zaštitnu kacigu i prsluk, paziti na opasne tvari, plin, oštećene instalacije, itd., ne uklanjati urušene dijelove, ne izlagati se opasnosti i ne upotrebljavati dizala. Pregled zgrade započinje izvana kako bi se provjerilo postoji li neka opasnost kao što je urušavanje same zgrade ili nekog njezinog dijela, slom konstrukcijskog elementa ili slično. Ukoliko nema oštećenja koja upućuju na neuporabljivost zgrade prelazi se na pregled unutrašnjosti, krećući od podruma pa sve do krovišta. Bitno je obratiti pažnju na zidove, stupove, grede i stubišta. Proučavajući oštećenja valja imati na umu mehanizme sloma do kojih može doći. Tipični mehanizmi otkazivanja zidanih zidova prikazani su na slici 11.



A	B1	B2	C	D	E	F
VERTIKALNO PREVRTANJE ZIDA	PREVRTANJE S JEDNIM BOČNIM KRILOM	PREVRTANJE S DVA BOČNA KRILA	SLOM KUTA	DJELOMIČNO PREVRTANJE	VERTIKALNO PREVRTANJE TRAKE	VERTIKALNI LUK
						
		OSTALI DJELOMIČNI SLOMOVI		PRATEĆI SLOMOVI		
G	H	I	L			
HORIZONTALNI LUK	SLOM U RAVNINI	VERTIKALNI DODATAK	PREVRTANJE LASTAVICE ZABATA	RUŠENJE KROVA/ KATA	SLOM ŽIDA	
						Insufficient cohesion in the fabric

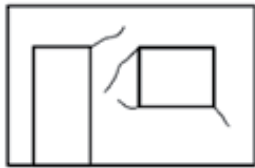
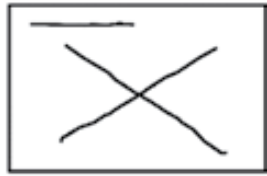
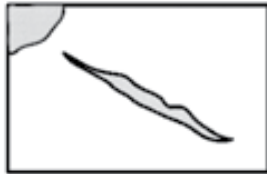
*Slika 11 Prikaz mehanizma otkazivanja zidanih zidova*

Nakon pregleda oštećene građevine ocjenjuje se oštećenje te uporabivost konstrukcije i kategorizira se u jednu od pet kategorija prema EMS-98 ljestvici. Pošto je zgrada koju analiziramo stara, prilikom ocjenjivanja uporabivosti potrebno je voditi računa o tome može li ta zgrada ponovno pretrpjeti još jedan potres sličnog intenziteta (ne potres prema suvremenim normama) [5].

U ukupnu ocjenu uporabivosti konstrukcije nam ulaze ocjena stanja oštećenja elemenata. Ovisno o kojem konstrukcijskom elementu se radi imamo različite tablice koje nam ocjenjuju ukupnu uporabivost ovisno o tome koja je razina oštećenja te kakva je rasprostranjenost oštećenja. Stanja oštećenja su uzeta prema grčkim kriterijima. Također, bitno je uzeti u obzir kriterije vertikalnosti zgrade i probleme s tlom.

Razine oštećenja za zidane zgrade prema [6] prikazane su u tablici 1. Granica uporabljivosti nije točno definirana te je kod slučajeva razine oštećenja 2 i 3 jako bitna inženjerska prosudba [5].

**Tablica 1** Razine oštećenja za zidane konstrukcije prema [6]

Razina oštećenja	Opis	Skica oštećenja
<b>1 nema</b>	Vlaknaste pukotine u pregradnim zidovima vidljive samo s jedne strane zida.	
Granica uporabljivosti – opseg oštećenja u katu i u pojedinom smjeru nosivosti takav da obuhvaćaju oko 60% zidova		
<b>2 blago</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manje pukotine u nosivim zidovima koje se šire iz uglova nekoliko otvora (<math>d \leq \sim 3\text{mm}</math>).</li> <li>- Male pukotine u pregradnim zidovima vidljive s obje strane zida (<math>d \leq \sim 3\text{mm}</math>).</li> <li>- Dijelovi žbuke koji padaju sa stropova i zidova. Padanje pojedinih crijepova.</li> </ul>	
Granica uporabljivosti – opseg oštećenja u katu i u pojedinom smjeru nosivosti takav da obuhvaćaju oko 30% zidova		
<b>3 umjereno do teško</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dijagonalno raspucavanje nosivih zidova (<math>d &lt; \sim 5\text{ mm}</math>), ali ne tolikog razmjera da bi dovelo do potpunoga otkazivanja nosivosti zida.</li> <li>- Znatno raspucavanje pregradnih zidova (<math>d &gt; \sim 3\text{ mm}</math>).</li> <li>- Pomicanje i/ili potpun slom dimnjaka, parapeta ili krova.</li> <li>- Pomicanje, odvajanje ili lokalno otkazivanje oslonaca krova ili oslonaca međukatne konstrukcije.</li> <li>- Lokalna, teška oštećenja u nekom dijelu zgrade.</li> </ul>	
<b>4 vrlo teško</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nosivi zidovi s otvorenim pukotinama (<math>d &gt; \sim 5\text{ mm}</math>) vidljivim s obje strane zida.</li> <li>- Djelomično ili potpuno otkazivanje i odvajanje nosivih zidova međukatne konstrukcije i/ili krova.</li> <li>- Bilo koja vrsta oštećenja koja upućuje na ozbiljnu opasnost ili rušenje.</li> </ul>	

Na slijedećim fotografijama je fotodokumentacija stanja konstrukcije građevine prilikom pregleda koji je obavljen 09.07.2020 [7]. Prikazana su samo najveća oštećenja koja su zabilježena tijekom pregleda zgrade.



*Slika 12 Oštećenje nosivog luka drugoga kata*

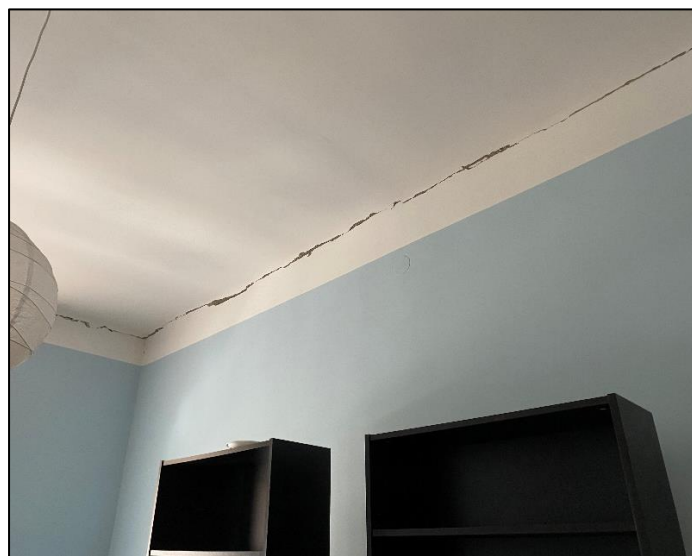
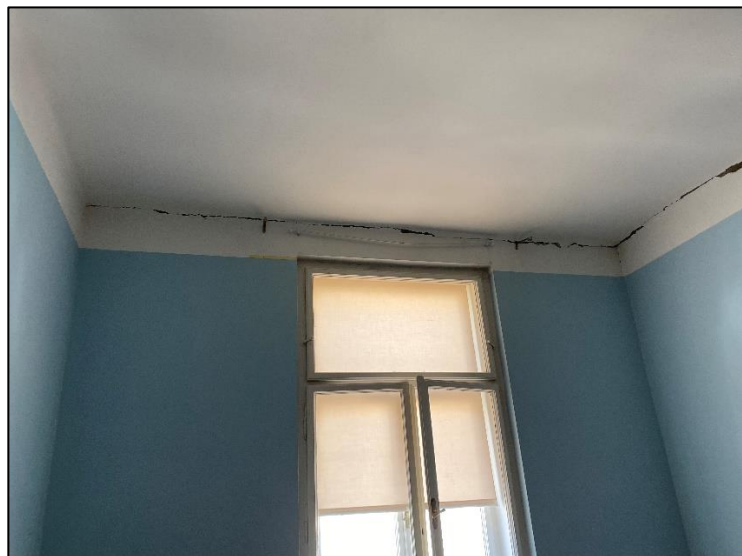


*Slika 13 Dijagonalno oštećenje zida drugoga kata*



*Slika 14 Vertikalna oštećenja na spojevima okomitih zidova drugoga kata*





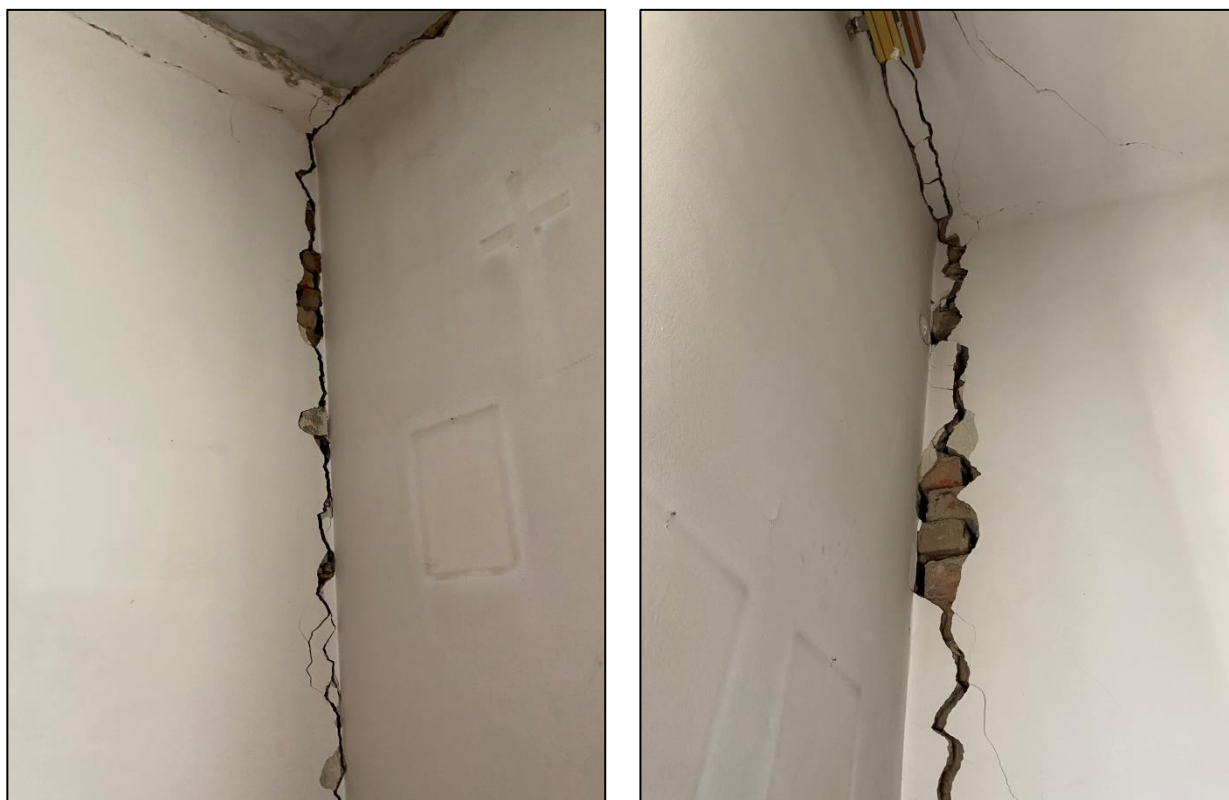
*Slika 15 Horizontalna oštećenja na razini stropa trećeg kata desnog stana*



*Slika 16 Horizontalna oštećenja na razini stropa trećeg kata lijevog stana*



*Slika 17 Odvajanje okomitih zidova trećeg kata desnog stana*

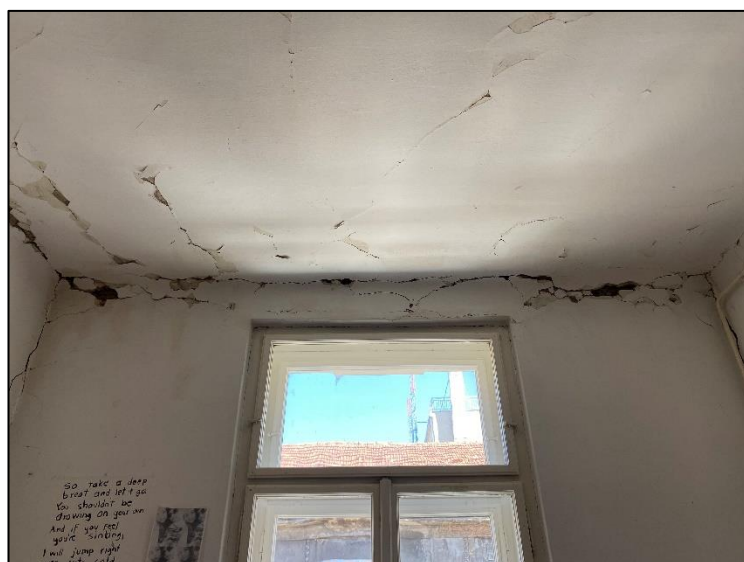


*Slika 18 Odvajanje okomitih zidova trećeg kata lijevog stana*

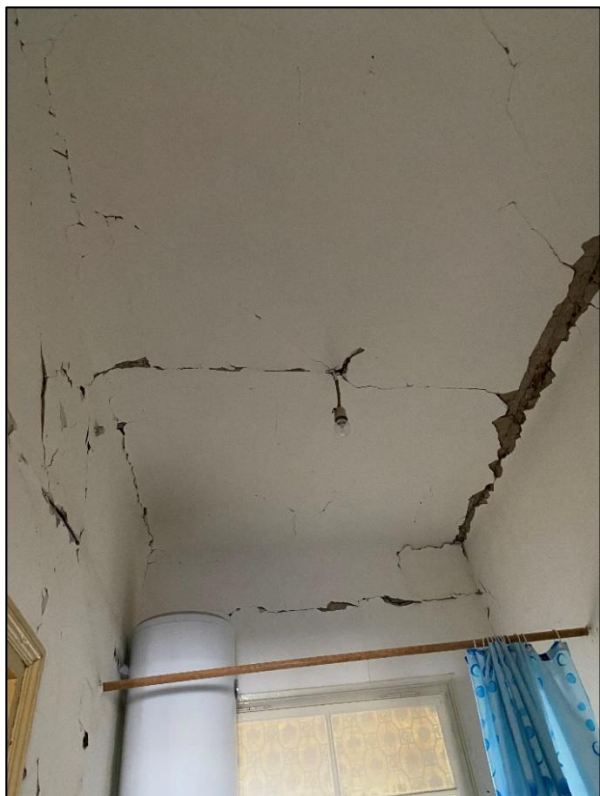




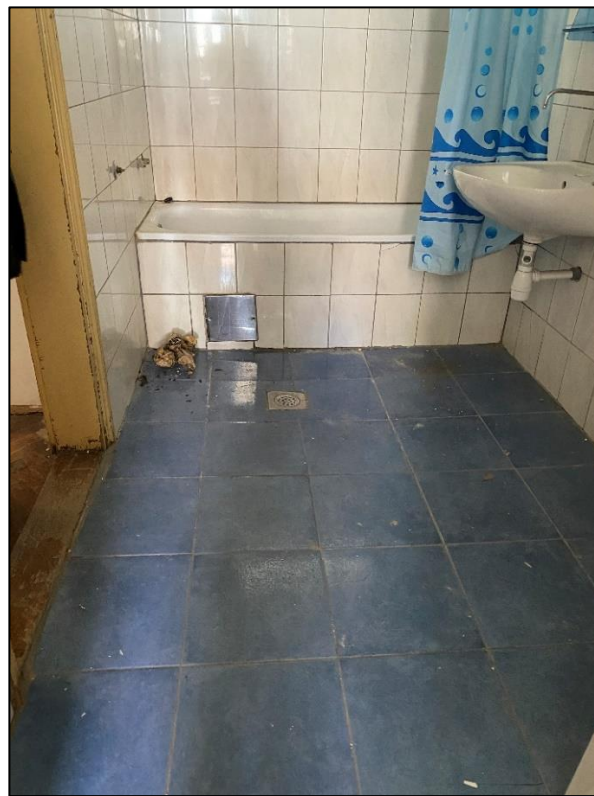
*Slika 19* Dijagonalno oštećenje zidnog zida i drobljenje stropa trećeg kata lijevoga stana



*Slika 20* Drobljenje stropa trećeg kata lijevoga stana



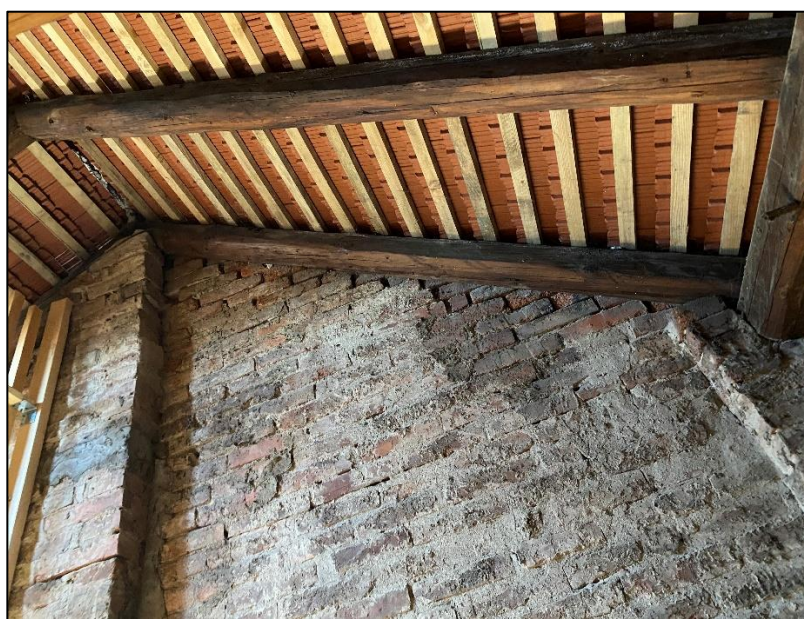
*Slika 21 Drobljenje stropa trećeg kata lijevog stana*



*Slika 22 Udubljenje poda kupaonice trećeg kata lijevog stana*



*Slika 23 Popuštanje zida lastavice*



*Slika 24 Oštećenje zabatnog zida*



### 3.1 Opis oštećenja

Građevina je nakon potresa 22.3.2020. pretrpjela dosta velika oštećenja. Oštećenje se postupno povećava po katnosti što je i očekivano.

Podrum i prizemlje pretrpjeli su najmanja oštećenja. Na prvom katu primjećujemo oštećenja na zabatnim zidovima koja se rasprostiru u istom smjeru.

Oštećenja na drugom katu su više prisutna nego na nižim etažama. Na slici 12 možemo vidjeti kako se prenosi tlačna opterećenja sa viših etaža tako da oštećenja prate linije nosivog luka.

Najviše je nastradao treći kat. Za razliku od zidova ostalih etaža, debljine zidova treće etaže su tek 45 cm. Također, nedostaje kruta dijafragma krovništa, odnosno stropna konstrukcija i krovnište nisu dovoljno povezani da bi se pomicali kao jedno. Cijeli južni dio građevine pomaknuo se za 1,5 cm prema cesti što je značajan pomak. Do toga je došlo odvajanjem okomitog zida kao posljedica nepostojanja vertikalnih i horizontalnih serklaža koji bi pridržali to zide te smo zabilježili rupe od 1,5 cm u desnom stanu i 2,5 cm u lijevom stanu.

Na fotografijama primjećujemo da je lijevi stan više oštećen u odnosu na desni jer na toj strani nema nosivog luka za razliku od desnog stana gdje taj luk postoji. Tako je razmak između dva nosiva zida 10 m što je značajna duljina bez bilo kakvog sustava pridržanja ploče gornje etaže. Do drobljenja stropa došlo je zbog pomicanja međukatne konstrukcije koja se zasebno pomicala u odnosu na zide te se takvim sudaranjem akumuliralo sve veće i veće oštećenje gdje se na nekim mjestima mogao vidjeti donji sloj gornje ploče. Rezultat navedenog je također i udubljenje poda kupaonice lijevog stana i kuhinje gdje je došlo do puknuća poda i vertikalnog pomaka od 2 cm.

Na zabatnim zidovima tavana možemo uočiti oštećenja koja prate sljubnice opeke zbog trenja. Starost zgrade i oslabljenje morta tijekom vremena zbog visokih temperatura, vlage, vibracije i mraza pridonose tome. Kao što je navedeno u tehničkom opisu, u vrijeme izgradnje ove konstrukcije nije se računalo na potres već samo na vjetar te su zbog uštede sagrađeni zidovi lastavice debljine  $\frac{1}{2}$  opeke. Također, takvi zidovi bili su bez armirano betonskih serklaža i bez drugih ojačanja stoga je statički sustav takvog zida obična vertikalna konzola bez značajnog povezivanja sa krovnom konstrukcijom. Sve to rezultiralo je nagnućem tog zida izvan ravnine.

Samo krovnište je niz godine par puta učvršćeno novim drvom, međutim niti to nije pomoglo pri potresu.



Dimnjaci su također pretrpjeli značajna oštećenja. Naime, tijekom izgradnje izbjegavalo se izravno pridržavanje dimnjaka drvenom krovnom konstrukcijom zbog straha od požara te je tako dimnjak pridržan tek toliko da može stajati prilikom značajnijeg vjetrova. Dimnjaci su tako tijekom potresa titrali kao visoka konzola i došlo je do oštećenja. Jedan od dimnjaka se urušio u dvorište zgrade dok je na drugom primijećeno oštećenje pri podu tavana.

### 3.2 Kategorizacija zgrade

Temeljem analize svih oštećenja moguće je predložiti kategorizaciju zgrade. U prizemlju i 1.katu nisu uočena neka veća oštećenja. Postoje vrlo tanke pukotine u ponekim zidovima, duž strujne linije, na nadvojima, te otpadanje malih komada žbuke. Prostor ne ugrožava sigurnost korisnika. Iz tih razloga oštećenja pripisujemo I. stupnju.

Na 2. i 3. katu oštećenja su mnogo veća. Za 2.kat oštećenja pripadaju II. stupnju, a za 3. kat oštećenja odgovaraju III. stupnju. Javljaju se vertikalne pukotine na nadvojima razine D1, pukotine koje su nastale zbog odvajanja na spoju okomitih zidova razine D1 zbog širine pukotine od 2,5 cm koje upućuje da je otkazivanje tek na početku, horizontalne pukotine u razini katova gdje smo izmjerili odmak ploče od zida veličine 1,2 cm što upućuje na više-manje ozbiljno klizanje između stropova i zidova koje je uzrokovano dodatnim pritiskom od krova, te se zbog navedenog konstrukcijski rizik može smatrati visokom razinom D4. Na 3.katu zabilježeno je i lokalno drobljenje zida gdje se na jednom mjestu mogu vidjeti donji slojevi gornje ploče te se kao takvo pripisuje visokim rizikom razine D4.

Cijelu konstrukciju označujemo II. stupnjem oštećenja koje odgovara umjerenim oštećenjem, međutim vrlo je blizu III. stupnja oštećenja zbog otkazivanja dimnjaka u razini krova, te većih pukotina i pomaka 3.kata. Stanje oštećenja na 2. i 3. katu podrazumijeva povišen rizik za stanare te se zbog toga taj dio može ocijeniti kao neuporabljivim, dok se prizemlje i 1.kat mogu uporabljivati. Potrebno je jasno naznačiti koji se dijelovi zgrade smatraju nepristupačnim te preporučiti ograničeno kretanje oko zgrade.

Prvotna seizmička otpornost zgrade je smanjena i može postojati opasnost od dodatnog potresa. Iz svega navedenog konstrukciju klasificiramo oznakom PN2 koja nam označava da je dio zgrade privremeno neuporabljiv te su potrebne mjere hitne intervencije, odnosno potrebno je popraviti i/ili ojačati oštećene i opasne dijelove zgrade te razmotriti potrebu za hitnim podupiranjem konstrukcije i dijelova zgrade. Nakon hitne intervencije moguće je korištenje građevine bez ograničenja.

## 4 Metoda postupnog guranja

Za proračun seizmičke otpornosti konstrukcija postoje različite metode. Metode koje su na raspolaganju su sljedeće [8]:

- a) Linearni statički proračun primjenom ekvivalentnoga statičkog djelovanja
- b) Linearni dinamički modalni proračun spektrima odziva
- c) Nelinearna statička metoda postupnoga guranja ("pushover")
- d) Nelinearni dinamički proračun uporabom zapisa ubrzanja u vremenu ("time-history")

Redosljed metoda odgovara i njihovoj točnosti. Kako raste točnost metode tako raste i njezina kompleksnost. Kod novih zgrada linearne metode i pristup faktorom ponašanja biti će dovoljne za proračun jer su te zgrade često predimenzionirane te su poznati mehanizmi sloma. Međutim, kod starijih zgrada potreban je drugačiji pristup, odnosno, potrebno je dodatno provjeriti ponašanje konstrukcije primjenjujući nelinearni statički proračun. Dodatno, žiđe kao materijal se ne ponaša linearno te doživljava degradaciju krutosti odnosno pokazuje histerezna svojstva. Za takve materijale je puno prikladnije koristiti dokaz nosivosti preko pomaka, odnosno ograničiti deformaciju elementa.

Metoda postupnog guranja se temelji na pomacima. Sigurnost objekta u odnosu na potres određuje se usporedbom deformabilne sposobnosti konstrukcije sa zahtjevnim stupnjem deformabilnosti pod utjecajem normiranog potresnog djelovanja [9]. Metoda se provodi tako da se konstrukcija podvrgne monotono rastućem bočnom opterećenju [8]. Takvo opterećenje predstavlja inercijske sile koje nastaju prilikom ubrzanja temeljnog tla. Pri provođenju analize primjenjuje se nelinearni model pri kojem se ponašanje strukturnih elemenata pretpostavlja elasto-idealno plastično kao optimum kompleksnosti i točnosti rezultata. Kao rezultat analize dobiva se karakteristična nelinearna krivulja sile i pomaka koja se najčešće prikazuje kao odnos poprečne sile  $V$  u razini temelja i pomaka vrha zgrade  $D_t$  [8].

### 4.1 Postupak proračuna nelinearne metode N2

Nelinearna metoda N2 koristi se za proračun ciljanog pomaka konstrukcije koje su izložene potresnim djelovanjima. Proračun se temelji na kombinaciji metoda postupnog guranja modela s više stupnjeva slobode sa spektralnim proračunom ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode. N2 metoda je sastavni dio dodatka B norme HRN EN 1998-1 [10]. Slovo N u nazivu

metode označava da se radi o nelinearnom proračunu, a broj 2 predstavlja 2 matematička modela. Opisani postupak nelinearne metode N2 temelji se na [11].

Temeljni uvjet konstrukcijskih eurokodova je da učinci djelovanja moraju biti manji od otpornosti konstrukcije ( $E_d \leq R_d$ ). Uvjet možemo zapisati :

$$\gamma_{dem} \cdot \text{seizmički zahtjev} \leq \frac{1}{\gamma_{cap}} \cdot \text{kapacitet} \quad (1)$$

Seizmički zahtjev je dan spektrom određenog potresa ili spektrom koji je propisan u tehničkom propisu ili normi. Predstavlja učinke djelovanja na konstrukciju. Kapacitet je otpornost konstrukcije koja je rezultat metode postupnog guranja. Uvjet sadrži i koeficijente sigurnosti za djelovanja na konstrukciju  $\gamma_{dem}$  te otpornosti konstrukcije  $\gamma_{cap}$ .

### 1. KORAK : PODACI

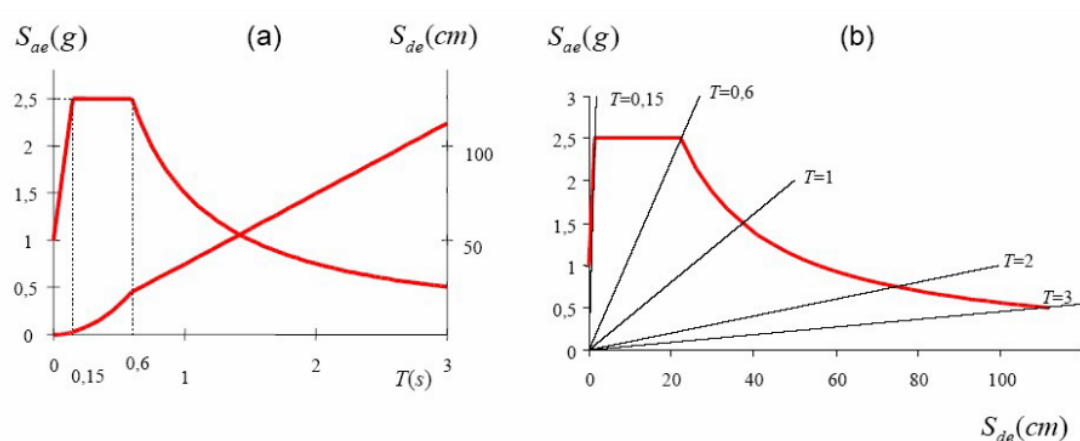
Potrebni su ulazni podaci : geometrija, materijali, nosivost elemenata kao i za svaki uobičajeni elastični proračun. Međutim, ovdje je potreban i podatak o nelinearnom odnosu sila - pomak za konstrukcijske elemente te nelinearni parametri.

### 2. KORAK : SEIZMIČKO OPTEREĆENJE U FORMATU AD

Potrebno je odrediti nelinearni spektar u formatu ubrzanje – pomak ("Acceleration – Displacement: AD"). Za elastični spektar s jednim stupnjem slobode vrijedi relacija:

$$S_{de} = \omega^2 S_{ae} = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} \quad (2)$$

gdje su  $S_{de}$  i  $S_{ae}$  vrijednosti iz elastičnih spektara ubrzanja i pomaka za odgovarajući period T i odabrano viskozno prigušenje. Na slici 25.a prikazani su zaglađeni elastični spektar ubrzanja i elastični spektar pomaka prema europskoj normi, a na slici 25.b. prikazani su u formatu AD.



Slika 25 Elastični spektri ubrzanja  $S_{ae}$  i pomaka  $S_{de}$ : (a) tradicionalni pomak, (b) format AD [11]

Kod nelinearnog sustava s jednim stupnjem slobode s bilinearnim odnosom sile i pomaka, spektralno ubrzanje  $S_a$  i spektralni pomak  $S_d$  određuju se prema slijedećim jednadžbama:

$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \quad S_d = \frac{\mu}{R_\mu} S_{de} = \frac{\mu}{R_\mu} \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} = \mu \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (3)$$

gdje je  $\mu$  faktor duktilnosti definiran kao omjer između najvećeg pomaka i pomaka na granici popuštanja, a  $R_\mu$  faktor redukcije uslijed duktilnosti. Za jednostavniju metodu N2 rabi se bilinearni spektar za određivanje faktora redukcije  $R_\mu$  gdje je  $T_C$  karakteristični period gibanja podloge:

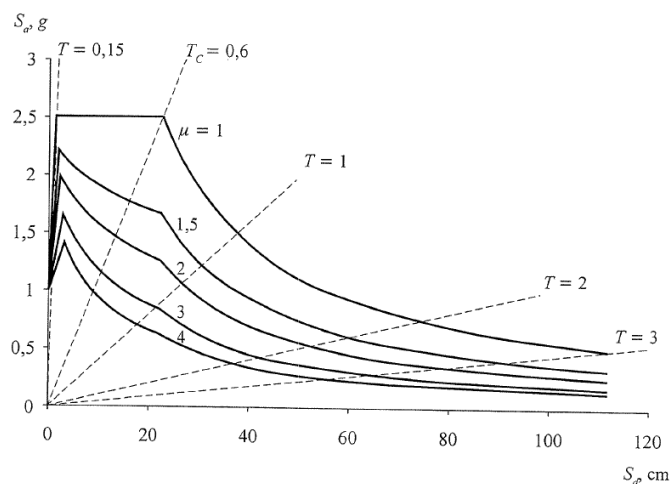
$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T}{T_C} + 1 \quad T < T_C \quad (4)$$

$$R_\mu = \mu \quad T \geq T_C \quad (5)$$

Uočavamo da u području srednjih i dugih perioda vrijedi da su pomak neelastičnog sustava i pomak elastičnog sustava jednaki:

$$S_d = S_{de}$$

Primjenom navedenih jednadžbi, započevši od elastičnog spektra, dobivamo spektar u AD formatu za konstantne koeficijente duktilnosti  $\mu$ .



Slika 26 Zahtijevani spektrar za konstantne vrijednosti koeficijenta duktilnosti  $\mu$  u formatu AD [11]

### 3. KORAK : METODA POSTUPNOG GURANJA (PUSHOVER)

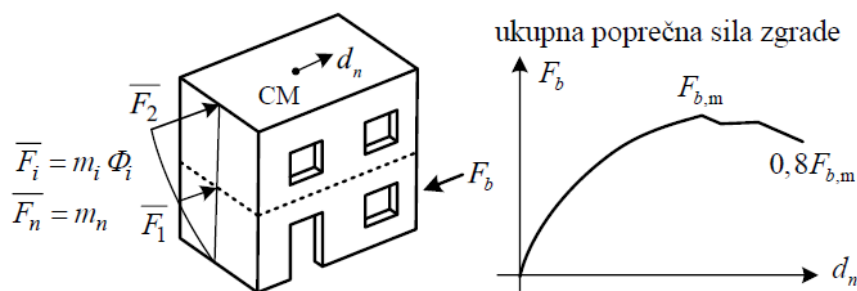
Bitan korak unutar metode postupnog guranja je odabir prikladne raspodjele bočnog opterećenja. Vektor bočnog opterećenja  $P$  određen je na slijedeći način:

$$P = p\psi = pm\Phi \quad (6)$$

Intenzitet bočnog opterećenja određen je vrijednosti  $p$ . Raspodjela bočnog opterećenja dana je s  $\psi$  te je se još zapisuje kao umnožak matrice masa  $m$  i pretpostavljenog oblika pomaka  $\Phi$ .

Iz prošle jednadžbe vrijedi da je bočna sila na  $i$ -tom katu proporcionalna komponenti  $\Phi_i$  pretpostavljenog oblika pomaka  $\Phi$  pomnožena s masom  $i$ -tog kata  $m_i$  :

$$P_i = pm_i\Phi_i \quad (7)$$



Slika 27 Zgrada opterećena bočnim opterećenjem i krivulja nosivosti zgrade [12]

Ukoliko je pretpostavljeni oblik pomaka točan i nepromjenjiv tijekom pomicanja podloge, raspodjela bočnih sila jednaka je raspodjeli efektivnih potresnih sila  $p_{ef}$ .

#### 4. KORAK : EKVIVALENTNI MODEL SUSTAVA S JEDNIM STUPNJEM SLOBODE I DIJAGRAM KAPACITETA

Potresni zahtjev kod metode N2 dobiven je uporabom spektra odziva za koje je poznato da su dobiveni za sustav s jednim stupnjem slobode. Prema tome, konstrukciju treba svesti na jedan stupanj slobode kako bi mogli uspoređivati zahtjev i kapacitet.

Za početak koristimo jednadžbu gibanja ravninskog modela s više stupnjeva slobode koja uzima u obzir samo bočno translacijske stupnjeve slobode:

$$m\ddot{u} + R = -m1a \quad (8)$$

Vektori  $\ddot{u}$  i  $R$  predstavljaju pomake i unutarnje sile,  $1$  je jedinični vektor, simbol " $a$ " je ubrzanje podloge.

Osnovna i najkritičnija pretpostavka samog postupka je da je oblik pomaka  $\Phi$  nepromjenjiv tijekom deformiranja (normiran je na amplitudu 1). Vektor pomaka definiran je sljedećim izrazom:

$$u = \Phi D_t \quad (9)$$

gdje je  $D_t$  karakteristični pomak vrha zgrade  $u$  ovisnosti o vremenu.

Unutarnje sile  $R$  jednake su statičkim vanjskim opterećenjem  $P$ :

$$P = R \quad (10)$$

Uvrštavanjem jednadžbi (6), (9) i (10) u jednadžbu (8) te množenjem s lijeve strane s transponiranim vektorom  $\Phi^T$ , dobiva se:

$$\Phi^T m \Phi \ddot{D}_t + \Phi^T m \Phi p = -\Phi^T m 1 a \quad (11)$$

Nakon množenja i dijeljenja lijeve strane s  $\Phi^T m 1$ , dobije se jednadžba gibanja ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode:

$$m^* \ddot{D}_t^* + F^* = -m^* a \quad (12)$$

gdje je  $m^*$  ekvivalentna masa sustava s jednim stupnjem slobode:

$$m^* = \Phi^T m 1 = \sum m_i \Phi_i \quad (13)$$

a  $D^*$  i  $F^*$  su pomaci i sile ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode:

$$D^* = \frac{D_t}{\Gamma} \quad (14)$$

$$F^* = \frac{V}{\Gamma} \quad (15)$$

$V$  je poprečna sila konstrukcije u nivou temelja sustava s više stupnjeva slobode:

$$V = \Sigma P_i = \Phi^T m \mathbf{1} p = p \Sigma m_i \Phi_i = p m^* \quad (16)$$

Konstanta  $\Gamma$  predstavlja faktor transformacije i kontrolira prijelaz sustava s više stupnjeva slobode na sustav s jednim stupnjem slobode:

$$\Gamma = \frac{\Phi^T m \mathbf{1}}{\Phi^T m \Phi} = \frac{\Sigma m_i \Phi_i}{\Sigma m_i \Phi_i^2} = \frac{m^*}{\Sigma m_i \Phi_i^2} \quad (17)$$

Bitno je napomenuti da se može upotrijebiti bilo koji razumni oblik  $\Phi$ . Tako se kao poseban slučaj može pretpostaviti prvi elastični vlastiti oblik.

Kako se koristi ista konstanta  $\Gamma$  za transformaciju pomaka i sila, odnos sila – pomak određen za sustav s više stupnjeva slobode ( $V - D_t$  dijagram) primijenjen je i na sustav s jednim stupnjem slobode ( $F^* - D^*$ ) dijagram. To postizemo mijenjanjem mjerila na obje osi sila – pomak dijagrama. Uzima se da je početna krutost  $k_{init}^*$  ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode jednaka krutosti sustava s više stupnjeva slobode koja je definirana za  $V - D_t$  dijagram.

Postupak koji se koristi u metodi N2 zahtijeva da krutost nakon što postigne graničnu vrijednost popuštanja ima nultu vrijednost.

Elastični period  $T^*$  idealiziranog sustava s jednim stupnjem slobode s bilinearnim odnosom sile i pomaka ima vrijednost:

$$T^* = \frac{2\pi}{\omega^*} = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k_{init}^*}} = 2\pi \sqrt{\frac{m^* D_y^*}{F_y^*}} \quad (18)$$

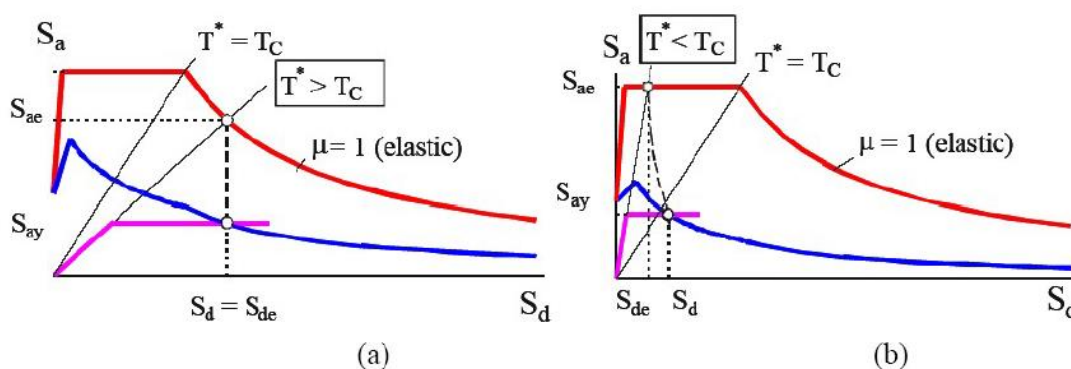
gdje su  $D_y^*$  i  $F_y^*$  pomak i čvrstoća na granici popuštanja.

Dijeljenjem dijagrama sila u sila – deformacija ( $F^* - D^*$ ) s ekvivalentnom masom  $m^*$  dobivamo dijagram kapaciteta u formatu AD:

$$S_a = \frac{F^*}{m^*} \quad (19)$$

## 5. KORAK : POTRESNI ZAHTJEV ZA EKVIVALENTNI SUSTAV S JEDNIM STUPNJEM SLOBODE

Potresni zahtjev za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode može se odrediti grafičkim postupkom ili analitičkim. Različiti su postupci za konstrukcije s kratkim, srednjim i dugim periodima. Na slici 28 crtani su i zahtijevani spektar i dijagram kapaciteta.



**Slika 28** Elastični i neelastični spektri u odnosu na dijagram kapaciteta za: a) konstrukcije sa srednjim i dugim periodima; b) konstrukcije s kratkim periodima [11]

Radikalni pravac odgovara periodu  $T^*$  idealiziranog bilinearnog sustava. Presjecište tog pravca s elastičnim zahtijevanim spektrom određuje zahtijevano ubrzanje (čvrstoću)  $S_{ae}$  potrebno za elastično ponašanje i odgovarajući zahtijevani elastični pomak  $S_{de}$ .

Ubrzanje na granici popuštanja  $S_{ay}$  predstavlja zahtijevano ubrzanje i kapacitet neelastičnog sustava. Faktor redukcije  $R_\mu$  određuje se kao omjer ubrzanja koje odgovara elastičnom i neelastičnom sustavu (nije q):

$$R_\mu = \frac{S_{ae}(T^*)}{S_{ay}} \quad (20)$$

Proračunsko ubrzanje  $S_{ad}$  redovito je manje od ubrzanja na granici popuštanja  $S_{ay}$ .

Ako je period  $T^*$  veći ili jednak  $T_C$ , zahtijevani neelastični pomak  $S_d$  jednak je zahtijevanom elastičnom pomaku  $S_{de}$  što vidimo iz jednačja (3) i (5) te na slici 28. Zahtijevana duktilnost može se odrediti iz trokuta na slici 28, definirana kao omjer  $\mu = S_d/D_y^*$ , slijedi da je jednaka  $R_\mu$ :



$$S_d = S_{de}(T^*) \quad T^* \geq T_C \quad (21)$$

$$\mu = R_\mu \quad (22)$$

Ako je period  $T^*$  manji od  $T_C$ , zahtijevana duktilnost dobiva se iz preoblikovane jednadžbe (4):

$$\mu = (R_\mu - 1) \frac{T_C}{T^*} + 1 \quad T^* < T_C \quad (23)$$

Zahtijevani pomak određujemo ili iz definicije duktilnosti ili iz jednadžbi (3) i (23):

$$S_d = \mu D_y^* = \frac{S_{de}}{R_\mu} \left( 1 + (R_\mu - 1) \frac{T_C}{T^*} \right) \quad (24)$$

## 6. KORAK : GLOBALNI I LOKALNI POTRESNI ZAHTJEV – SUSTAV S VIŠE STUPNJEVA SLOBODE

Zahtijevani pomak sustava s jednim stupnjem slobode  $S_d$  se transformira u globalni zahtijevani najveći pomak vrha zgrade  $D_t$  sustava s više stupnjeva slobode. To je moguće koristeći jednadžbu (14). Najveći pomak zgrade  $D_t$  predstavlja ciljani pomak iz dodatka B Eurokoda 8 [10].

Lokalni potresni zahtjev može se odrediti također pomoću postupnog guranja. Konstrukcija se "gura" sve dok ne postigne ciljani pomak  $D_t$ . Treba napomenuti da  $D_t$  predstavlja prosječnu vrijednost za primijenjeno potresno opterećenje te postoji znatno rasipanje oko prosječne vrijednosti. Upravo zbog toga je važno ispitati moguće ponašanje konstrukcije zbog ekstremnih slučajeva opterećenja koja prelaze proračunske vrijednosti. To postizemo povećanjem ciljanog pomaka.

## 7. KORAK : PROCJENA PONAŠANJA

Posljednji korak obilježava usporedbu potresnih zahtijeva (globalnih i lokalnih) s kapacitetima odgovarajuće razine ponašanja. Globalno ponašanje moguće je vidjeti usporedbom kapaciteta pomaka i pomaka prema seizmičkom zahtjevu.

### 4.2 Metoda postupnog guranja u programu 3Muri

Modeliranje trodimenzionalnog modela započinje pretpostavkama njihovog strukturalnog i seizmičkog ponašanja. Zidovi su glavni nosivi elementi dok se podovi smatraju elementima ravninske ukrute. Lokalna ponašanja podova prilikom savijanja te odgovori zidova izvan

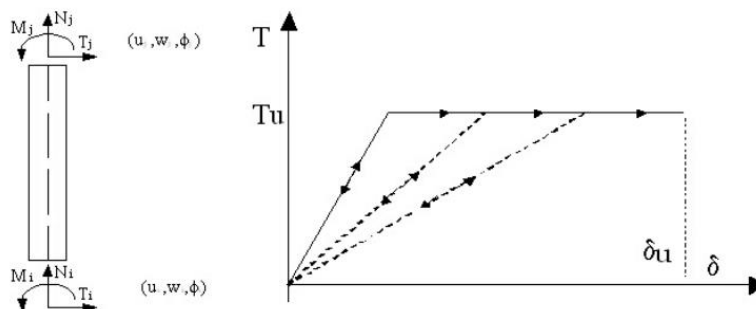
ravnine se ne uzimaju u obzir jer se smatraju nebitnima u odnosu na globalno ponašanje građevine [13]. Međutim, moguće je proći analizu lokalnih mehanizma izvan ravnine.

Nelinearna statička metoda, odnosno metoda postupnog guranja koristi makro elemente i ekvivalentne okvire što zatim omogućuje jednostavan, brz i učinkoviti proračun te lakše prepoznavanje mehanizme slomova i lokalnih nestabilnosti. Ekvivalentni okviri su nastali upravo proučavajući oštećene konstrukcije nakon potresa i ispitivanjem ziđa, odnosno zidanih konstrukcija, gdje su se jasno mogli razlikovati vertikalni nosivi elementi koji se nazivaju "pier paneli", rasponski elementi koji su "spandrel paneli" odnosno nadvoji te "joint paneli" koji predstavljaju spojnice tih elemenata. Na tom principu radi i sam računalni program 3Muri gdje se neki zid idealizira preko tih makro elemenata i stvaraju se ti ekvivalentni okviri. Okviri se nazivaju ekvivalentima jer je očuvana ekvivalentna odnosno globalna krutost na način da softver radi supstituciju da zadrži samu krutost elemenata. Značajke nelinearnih elemenata od kojih se sastoji ekvivalentni okvir su:

- 1.) Početna krutost dobivena elastičnim svojstvima
- 2.) Bilinearno ponašanje sa maksimalnim vrijednostima poprečne sile odnosno momenata savijanja
- 3.) Redistribucija unutarnjih sila na temelju ravnoteže elemenata
- 4.) Identifikacija graničnih stanja uzimajući u obzir globalne i lokalne parametre oštećenja
- 5.) Degradacija krutosti u fazi plastifikacije
- 6.) Kontrola duktilnosti na temelju vršnog relativno pomaka  $\delta_u$  za određene mehanizme otkazivanja, prema Eurokodu 8:

$$\delta_m^{DL} = \frac{\Delta_m}{h_m} = \delta_u \begin{cases} 0,004 \text{ posmik} \\ 0,006 \text{ tlak - savijanje} \end{cases}$$

- 7.) Otkazivanje elementa kod maksimalnog pomaka bez prekidanja globalne analize



Slika 29 Nelinearni element i njegova degradirajuća svojstva [14]

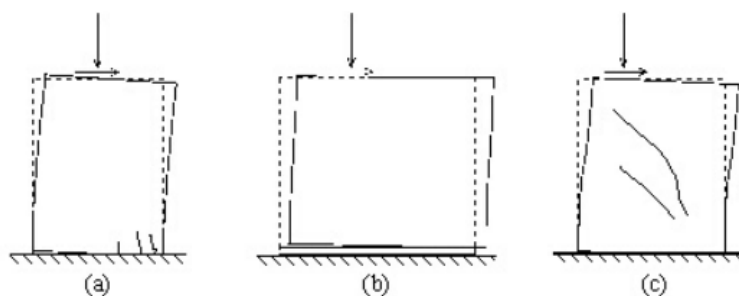
Matrica krutosti elemenata glasi:

$$\begin{Bmatrix} T_i \\ N_i \\ M_i \\ T_j \\ N_j \\ M_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EJ}{h^3(1+\psi)} & 0 & -\frac{6EJ}{h^2(1+\psi)} & -\frac{12EJ}{h^3(1+\psi)} & 0 & -\frac{6EJ}{h^2(1+\psi)} \\ 0 & \frac{EA}{h} & 0 & 0 & -\frac{EA}{h} & 0 \\ \frac{6EJ}{h^2(1+\psi)} & 0 & \frac{EJ(4+\psi)}{h(1+\psi)} & \frac{6EJ}{h^2(1+\psi)} & 0 & \frac{EJ(2-\psi)}{h(1+\psi)} \\ \frac{12EJ}{h^3(1+\psi)} & 0 & \frac{6EJ}{h^2(1+\psi)} & \frac{12EJ}{h^3(1+\psi)} & 0 & \frac{6EJ}{h^2(1+\psi)} \\ 0 & -\frac{EA}{h} & 0 & 0 & \frac{EA}{h} & 0 \\ -\frac{6EJ}{h^2(1+\psi)} & 0 & \frac{EJ(2-\psi)}{h(1+\psi)} & -\frac{6EJ}{h^2(1+\psi)} & 0 & \frac{EJ(4+\psi)}{h(1+\psi)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ w_i \\ \phi_i \\ u_j \\ w_j \\ \phi_j \end{Bmatrix}$$

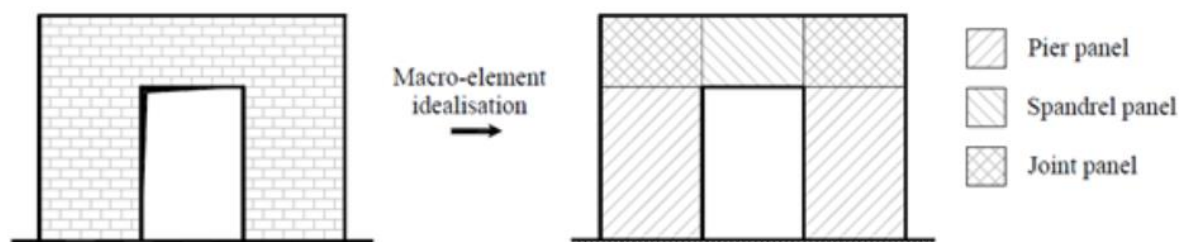
gdje je

$$\psi = 24(1+\nu)\chi\left(\frac{r_1}{h}\right)^2 = 24\left(1 + \frac{E-2G}{2G}\right)1.2\frac{b^2}{12h^2} = 1.2\frac{E}{G}\frac{b^2}{h^2} \quad (25)$$

Nelinearno ponašanje započinje kada sile na jednom od krajeva elemenata dosegnu maksimalnu vrijednost koja je procijenjena prema minimalnoj vrijednosti kriterija čvrstoće: savijanje-ljuljanje, posmik-klizanje ili dijagonalno posmično pucanje.



**Slika 30** Otkazivanje zida u ravnini : (a) savijanje-ljuljanje; (b) posmik-klizanje; (c) dijagonalno posmično pucanje [14]



**Slika 31** Idealizacija zidanog elementa makro elementima [14]

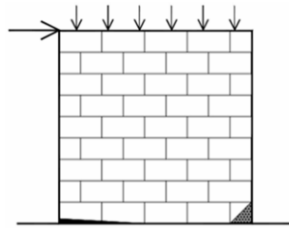
Formiranjem ekvivalentnog štapnog okvira od vertikalnih i horizontalnih elemenata određene krutosti pojednostavljuje se analiza. Kao posljedice pojednostavljenja zanemaruju se membranska ponašanja zidova te krutosti zidova izvan ravnine.

#### 4.2.1 Mehanizmi zida

Nosivost i duktilnost konstrukcije ovise o mehanizmu otkazivanja. Faktori koji utječu na mehanizme sloma su: geometrija, kvaliteta zidanja, materijali, rubni uvjeti te opterećenje koje djeluje. Postoje četiri osnovna mehanizma otkazivanja zida:

a) Otkazivanje savijanjem :

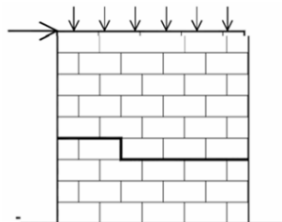
Karakteriziran je horizontalnim pukotinama u sljubnicama morta na vlačnoj strani zida (lijevo) uz drobljenje tlačnog dijela zida (desno) [15]. Najčešće se događa kod visokih i vitkih zidova.



*Slika 32 Mehanizam otkazivanja savijanjem [16]*

b) Otkazivanje klizanjem zbog posmika:

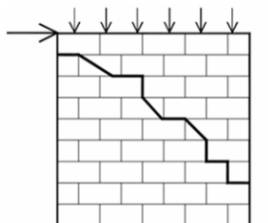
Zbog loše kvalitete morta dolazi do horizontalnih pukotina uzduž sljubnica. Do otkazivanja dolazi pri horizontalnim silama koje izazivaju klizanje ili smicanje duž sljubnica morta. Razlog je neadekvatno horizontalno ojačanje i nedostatak pravilne povezanosti između zidova (horizontalni serklaži). Područje otkazivanja je najčešće u gornjim dijelovima zidanih zgrada ispod krovnih konstrukcija.



*Slika 33 Mehanizam otkazivanja klizanjem zbog posmika [16]*

## c) Otkazivanje po dijagonali:

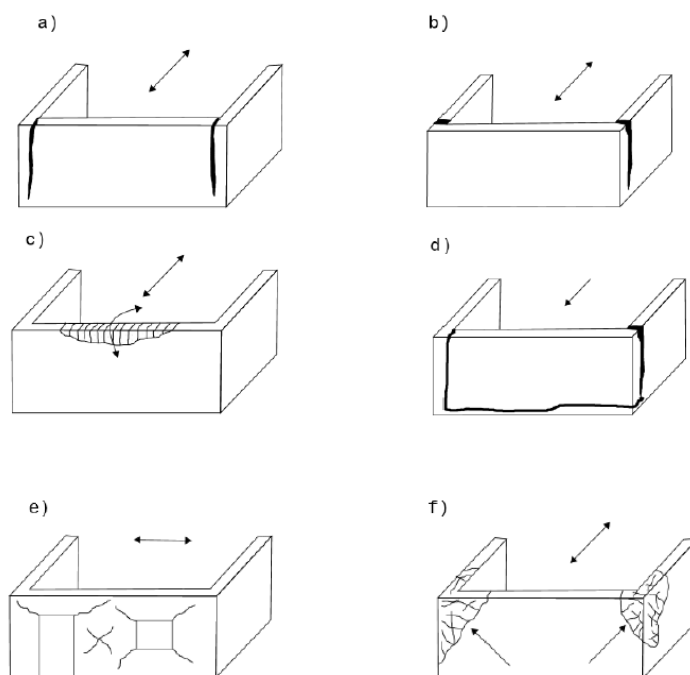
Dijagonalna pukotina rezultat je posmičnog sloma. Do toga dolazi kada zide iscrpi svoju vlačnu čvrstoću te mort počinje klizati duž sljubnica morta kao stepeničasti uzorak ili kroz opeku i mort [15]. Često do dijagonalnog raspucavanja dolazi u kutovima otvora kao što su vrata ili prozori.



*Slika 34* Mehanizam otkazivanja po dijagonali [16]

## d) Ispadanje zida izvan ravnine:

Najčešći uzrok oštećenja starih zidanih konstrukcija upravo zbog nepostojanja vertikalnih i horizontalnih serklaža te loše povezanosti međukatne konstrukcije sa zidom.

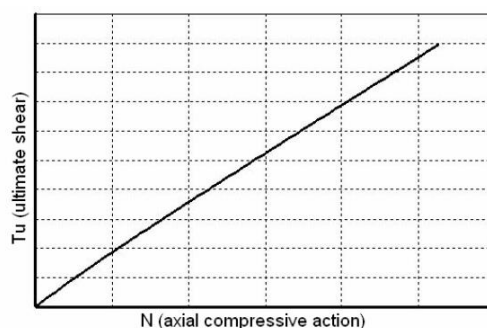


*Slika 35* Tipični mehanizmi otkazivanja zidanih konstrukcija: a) posmični slom zida i vertikalna pukotina na uglu; b) vlačni slom zida i vertikalna pukotina na uglu; c) horizontalna pukotina, otkazivanje dugih zidova izvan ravnine; d) globalno otkazivanje zidnog panela; e) dijagonalna pukotina zbog djelovanja sile u ravnini zida; f) otkazivanje na uglovima van ravnine [16]

Programski paket 3Muri daje mogućnost izbora jednoga od dva kriterija za posmični lom zida [14].

### 1.) Mohr-Coulombov kriterij:

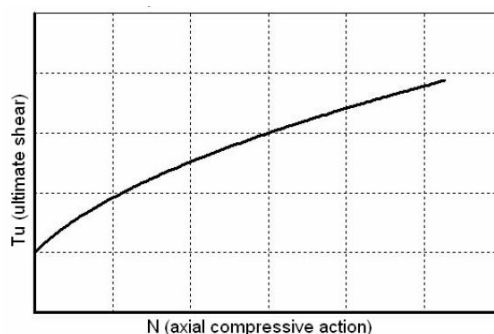
Klasičan kriterij popuštanja koji se koristi kod različitih materijala, uključujući i materijale zida. Povezuje posmično naprezanje sa normalnim tlačnim naprežanjem koje djeluje na ravninu popuštanja. Kriterijem se dobiva linearna anvelopa sloma koja ovisi o poprečnoj i tlačnoj sili gdje kut ovisi o unutarnjem trenju. Do otkazivanja dolazi po sljubnicama morta. Prilikom modeliranja smo odabrali Mohr-Coulombov kriterij budući da je propisan za posmično otkazivanje zidova prema HRN EN 1998-3 [17].



*Slika 36 Mohr-Coulombov kriterij posmičnog popuštanja [14]*

### 2.) Turnšek-Čačović kriterij:

Kriterij specifično kreiran za zidane konstrukcije. Uzima u obzir karakteristična svojstva zida, parametre kao što su tlačna i vlačna čvrstoću zida te svojstva morta. Za razliku od linearne anvelope Mohr-Coulombovog kriterija, kod Turnšek-Čačović kriterija anvelopa je zakrivljena, odnosno nije linearna raspodjela poprečne i tlačne sile. Razlog tome je što se osim tlačnog otkazivanja razmatra i vlačno te prema tome predstavlja točniju analizu kompleksnog ponašanja zida kod otkazivanja. Do otkazivanja dolazi dijagonalnim raspucavanjem.



*Slika 37 Turnšek-Čačović kriterij posmičnog popuštanja [14]*

## 5 Model zgrade

### 5.1 Opis modela zgrade

Za modeliranje konstrukcije koristimo programski paket 3Muri [14]. Računalni program je posebno dizajniran za strukturnu i potresnu analizu zidanih i miješanih konstrukcija, odnosno onih konstrukcija kod kojih se javljaju nelinearna svojstva materijala. U samom programu koristi se analiza konstrukcija pomoću metode postupnog guranja čiji je postupak opisan u prošlom poglavlju. Proračun se računa prema vrijednostima parametara danih po EC8 propisu. Sastavljen je model koji prati dane tlocrte zgrade uz poneka pojednostavljenja.

Zbog prirode softvera stubište je modelirano na način da se uzeo u obzir samo podest, odnosno međupodesti se nisu modelirali, a na mjestu gdje bi stubište trebalo biti ostavljeno je prazno pošto je konstrukcija stara te nije očekivano da je stubište dodatno ukrućeno u zidove stubišta. Na sam rub podesta gdje bi došlo stubište stavljen je čelični profil IPE 160. Također, u prizemlju stavljen je čelični profil IPE 160, zbog nepostojanja zida na mjestu gdje postoji zid na višim etažama, kako bi se omogućila pravilna raspodjela sila.

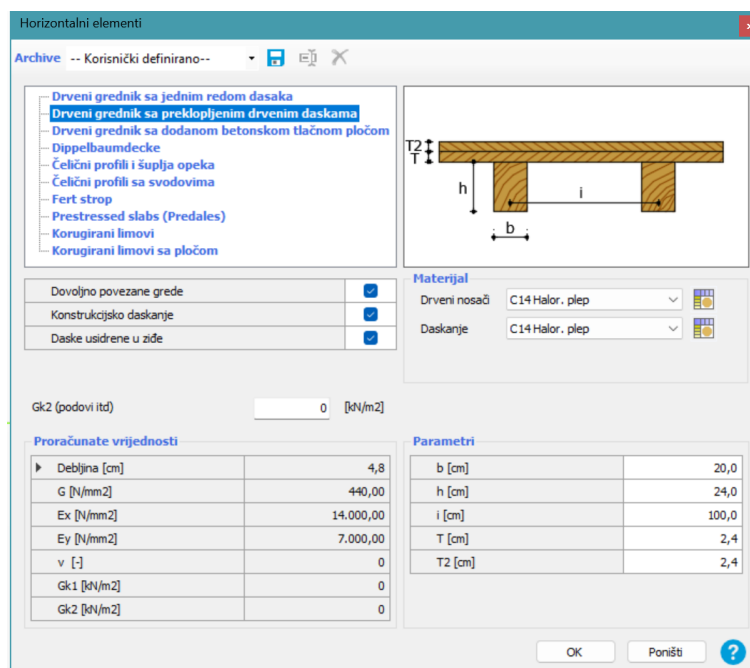
Prilikom zadavanja svojstva materijala pretpostavlja se puna opeka sa slijedećim vrijednostima parametara:

**Tablica 2** Svojstva opeke u programu 3Muri

Mehanički parametri	Vrijednosti
E [N/mm <sup>2</sup> ]	1500
G [N/mm <sup>2</sup> ]	500
w [kN/m <sup>3</sup> ]	18
f <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	4
f <sub>vm0</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,19
f <sub>vlim</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,6
f <sub>k</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	3,2
Faktor povjerenja	1
γ <sub>m</sub>	3
Pomak od posmika	0,0053
Pomak od savijanja	0,0107
φ	0

Za uvjet otkazivanja uslijed posmika zadaje se Mohr-Coulombov kriterij otkazivanja koji odgovara uvjetu otkazivanja po sljubnici morta. Dodatno zadajemo da program smanji elastične module za 50% čime pretpostavljamo raspucane poprečne presjeke. Na taj način se uzima u obzir da konstrukciju koju analiziramo, razmatramo u stanju ZO.

Međukatne konstrukcije modelirane su kao fleksibilne dijafragme što pravilno opisuje stvarnu konstrukciju kod koje ne postoji pravilna povezanost zida sa međukatnom konstrukcijom tako da to u modelu omogućuje relativne pomake između ekvivalentnih okvira te se horizontalne sile neravnomjerno prenose između nosivih elemenata. Modelirana međukatna konstrukcija sastoji se od grednika dimenzija 20/24 cm na razmaku 100 cm te dviju daščanih oplata debljine 2,4 cm. Grednici nose u kraćem smjeru, a za daščane oplata se pretpostavlja dobra povezanost sa zidom te također sudjeluje u krutosti dijafragme.

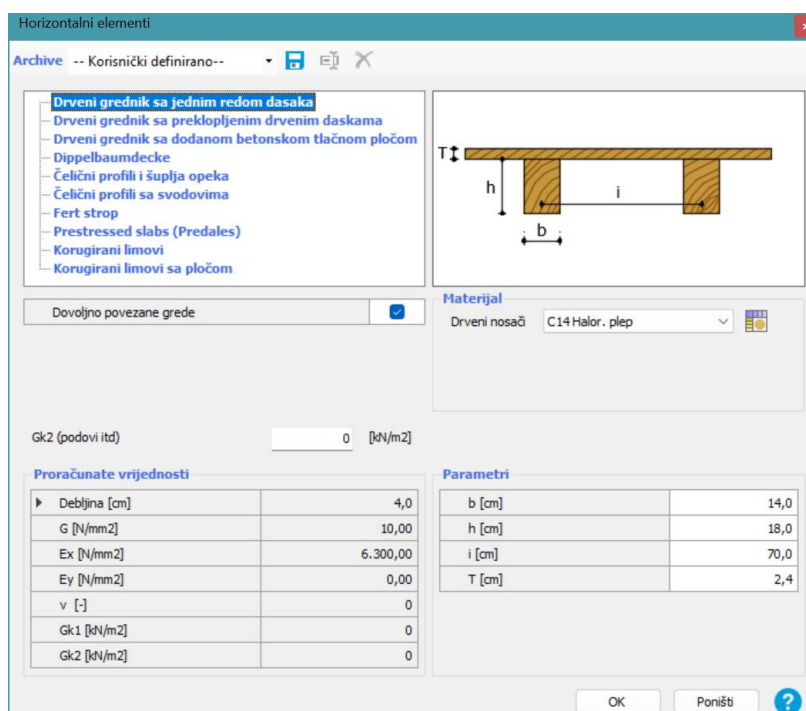


Slika 38 Parametri međukatne konstrukcije modelirane u 3Muri programu

Modelirani su samo nosivi zidovi visine 340 cm. Debljine zidova usklađene su prema nacrtima zgrade, a zadana svojstva zidova su svojstva opeke. Pošto program 3Muri automatski stvara makroelemente, odnosno raspodjeljuje zidove na vertikalne zidove i nadvoje, svi otvori su stavljeni prema dimenzijama koje su dane u nacrtima s time da su parapeti izračunati na način da je kod svih otvora prozora pretpostavljena visina nadvoja od 90 cm te nakon oduzimanja visine prozora sa nadvojem od visine etaže dobije se visina parapeta. Također, 3Muri automatski stvara i diskretizaciju elemenata konstrukcije.



Pošto je krovšte staro i loše povezano sa ostatkom konstrukcije, krovšte je modelirano kao ne konstrukcijsko, odnosno ne ulazi u potresnu analizu zbog vrlo male krutosti, nego samo prenosi opterećenja koja su dana na plohamo krova. Krov nije detaljno modeliran, već su samo postavljene plohe krova koje su modelirane na određenim visinama. Krovne plohe definirane su na isti način kao i stropne konstrukcije, a parametri su prikazani na slici 39.



Slika 39 Parametri krovnih ploha modelirane u 3Muri programu

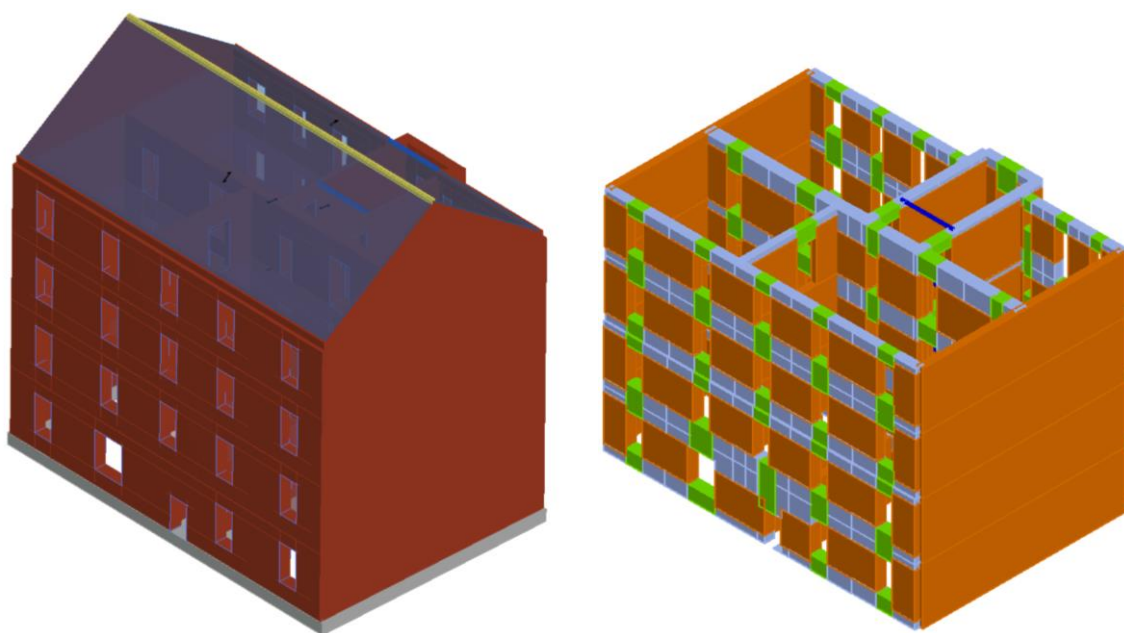
Visina sljemena je 18,25m. Također, kako bi se osigurao prijenos opterećenja sa krovnih ploha, zadali smo samo nužne elemente odnosno drvene grede dimenzija 20x24 cm.

Ulaz u zgradu, te izlaz na dvorište u realnosti su na drugačijim razinama, međutim prilikom modeliranja te razine su zanemarene te je uzeto da je cijelo prizemlje u jednoj razini.

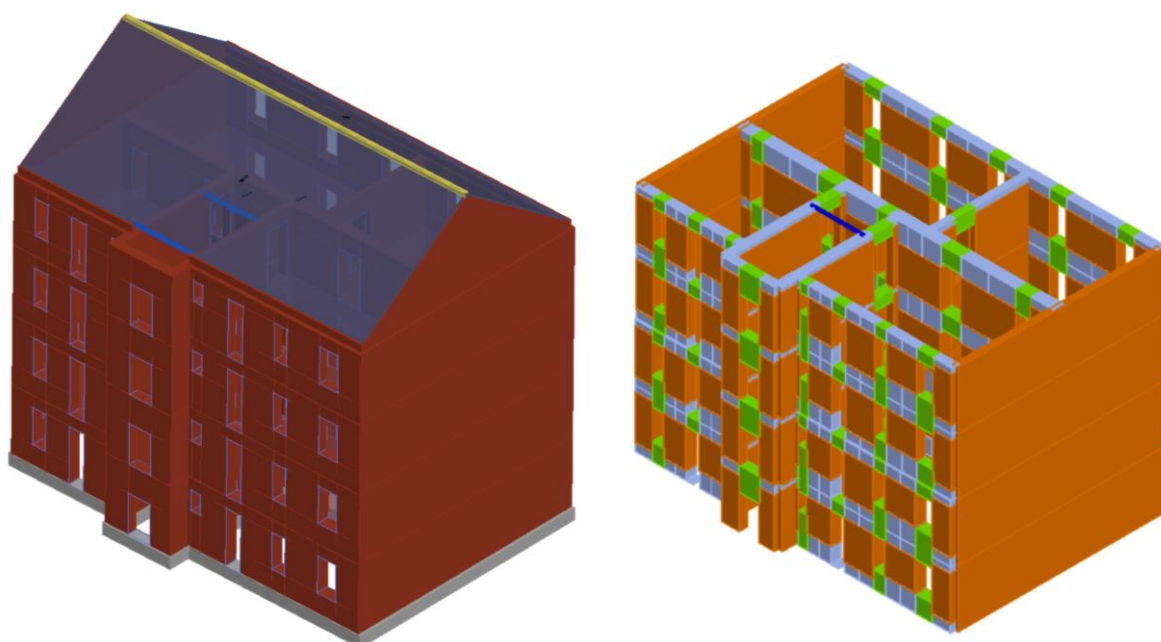
Podrum nije modeliran budući da je armirano betoniran i nalazi se ispod zemlje te je samim time izrazito krući od ostatka konstrukcije pa je pretpostavljeno da njegovo izostajanje neće promijeniti rezultate potresne analize.

Za temelje je modeliran temeljni trakasti sustav dimenzija 60x60 cm koji prati zidove prizemlja.

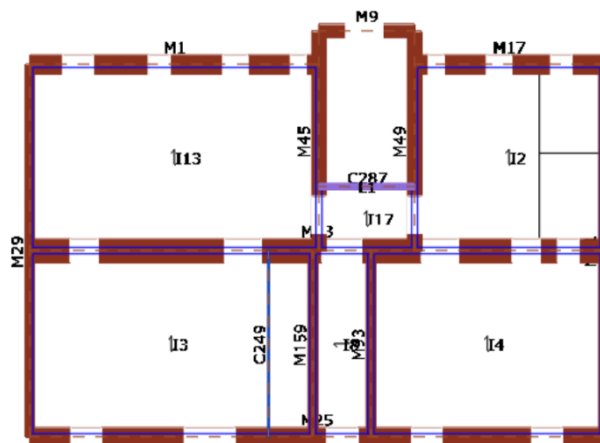
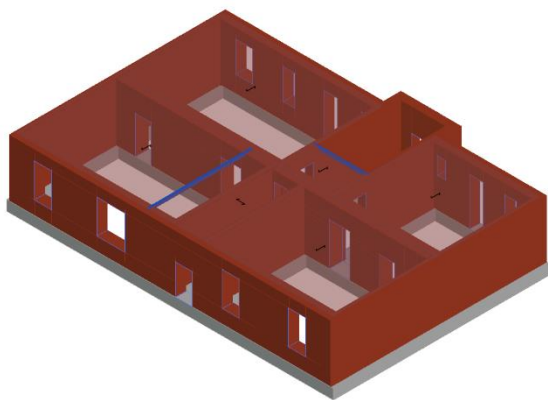
## 5.2 Prikaz modela



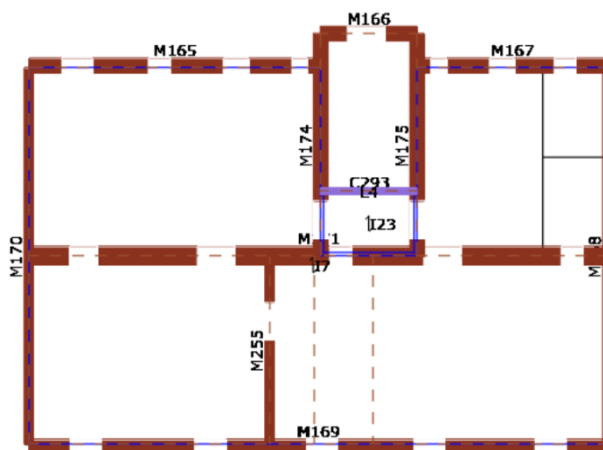
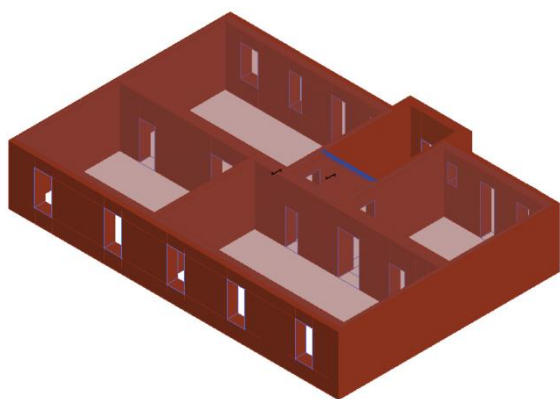
*Slika 40 Južni 3D prikaz modela i ekvivalentni okviri u programu 3Muri*



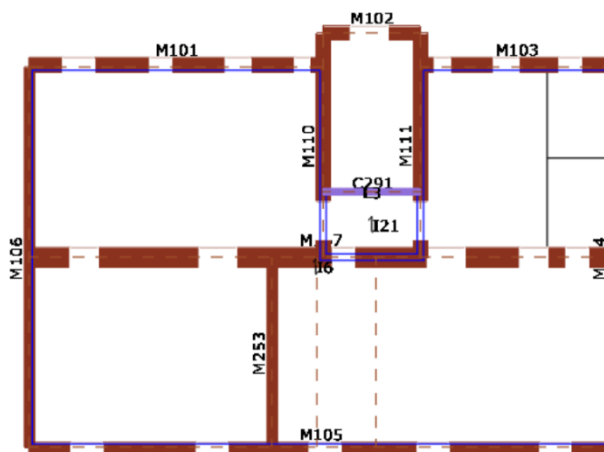
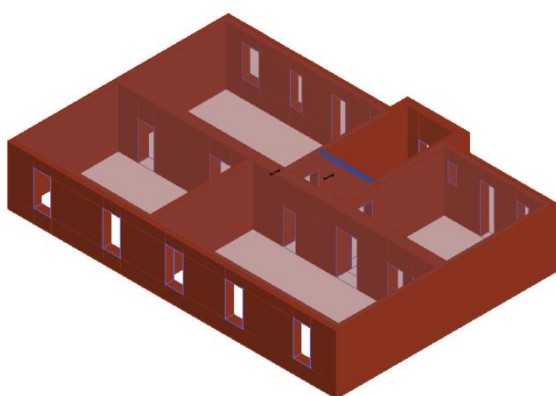
*Slika 41 Sjeverni 3D prikaz modela i ekvivalentni okviri u programu 3Muri*



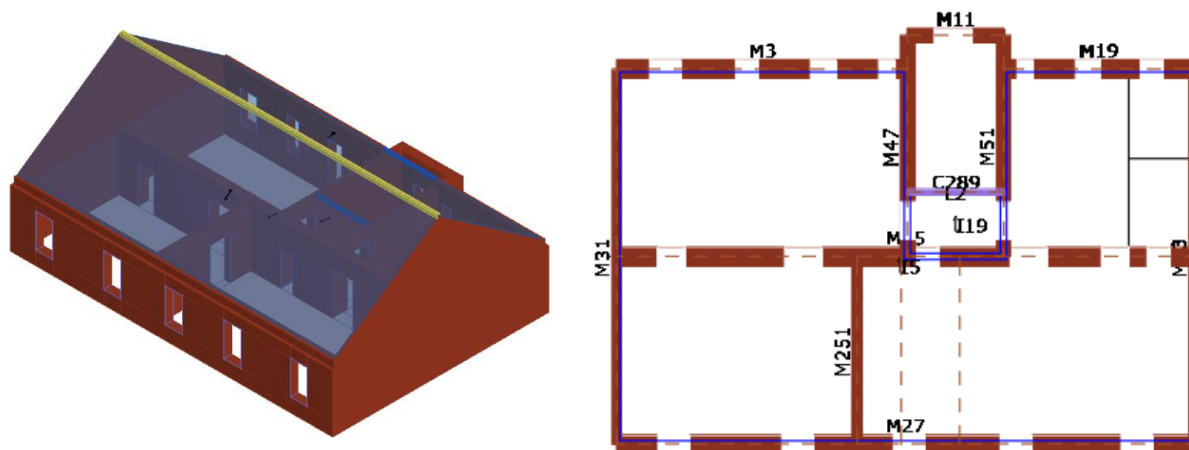
Slika 42 3D prikaz i tlocrtni prikaz prizemlja u programu 3Muri



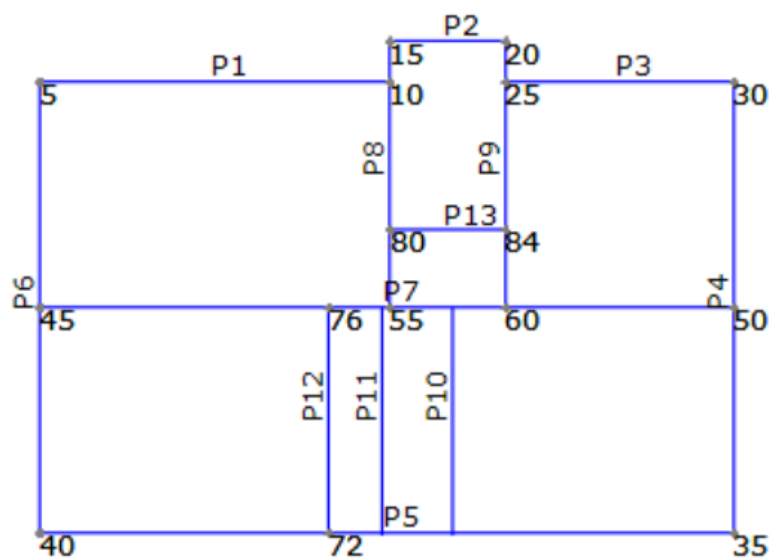
Slika 43 3D prikaz i tlocrtni prikaz 1.kata u programu 3Muri



Slika 44 3D prikaz i tlocrtni prikaz 2.kata u programu 3Muri



Slika 45 3D prikaz i tlocrtni prikaz 3.kata u programu 3Muri



Slika 46 Dispozicija čvorova i zidova 4.kata u programu 3Muri

## 5.3 Analiza opterećenja

### 5.3.1 Vlastita težina

Vlastita težina konstrukcijskih elemenata se ne unosi posebno kao opterećenje već ih program sam generira na temelju parametara koje smo unijeli za materijal koji se koristi. Međutim, potrebno je dodati dodatno stalno opterećenje.

### 5.3.2 Dodatno stalno opterećenje

Dodatno stalno opterećenje stropova prizemlja, 1.kata i 2.kata:

- Završni pod parket h=1,2 cm .....	0,125 kN/m <sup>2</sup>
- Daščana oplata .....	0,125 kN/m <sup>2</sup>
- Šuta ( h=14 cm) .....	1,70 kN/m <sup>2</sup>
- Daščana oplata .....	0,125 kN/m <sup>2</sup>
- Grednici .....	0,50 kN/m <sup>2</sup>
- <u>Pregradni zidovi prizemlja .....</u>	<u>1,64 kN/m<sup>2</sup></u>
	$\Delta g_{kp} = 4,22 \text{ kN/m}^2$

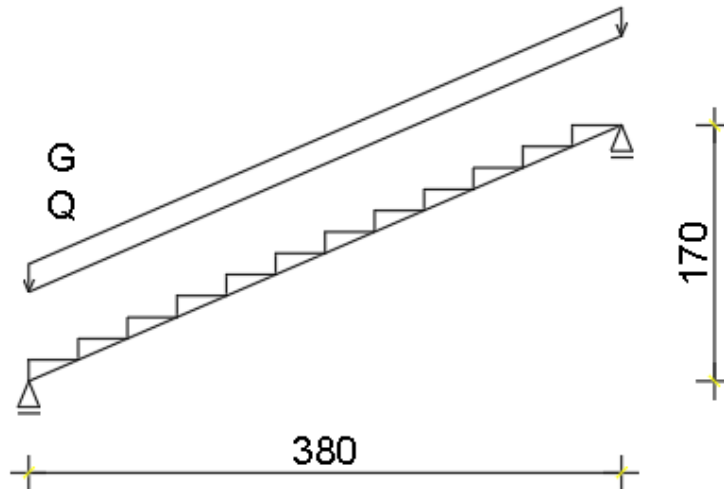
Dodatno stalno opterećenje stropa 3.kata:

- Daščana oplata .....	0,125 kN/m <sup>2</sup>
- Šuta ( h=14 cm) .....	1,70 kN/m <sup>2</sup>
- Daščana oplata .....	0,125 kN/m <sup>2</sup>
- <u>Grednici .....</u>	<u>0,50 kN/m<sup>2</sup></u>
	$\Delta g_e = 2,45 \text{ kN/m}^2$

Dodatno stalno opterećenje krovišta:

- Glineni crijep.....	0,50 kN/m <sup>2</sup>
-----------------------	------------------------

Dodatno stalno opterećenje stubišta:



Slika 47 Opterećenje stubišta

Dodatno stalno opterećenje izračunato je tako da je uzeta kosa betonska ploča od 10 cm težine  $25 \text{ kN/m}^3$ . Prema tome dodatno stalno opterećenje stubišta iznosi  $2,5 \text{ kN/m}^2$ .

$$L = \sqrt{v^2 + h^2} = \sqrt{1,7^2 + 3,8^2} = 4,16 \text{ m}$$

$$\frac{G * L}{2} = \frac{2,5 * 4,16}{2} = 5,2 \text{ kN/m'}$$

Dodatno stalno opterećenje od stubišta dodano je I profilu koji podupire podest, s time da je uzeta polovica opterećenja pošto bi druga polovica trebala ići na međupodest.

### 5.3.3 Uporabno opterećenje

Uporabno opterećenje će se uzeti u iznosi od  $2,0 \text{ kN/m}^2$  za međukatne konstrukcije, te  $1,0 \text{ kN/m}^2$  za krovnište.

Uporabno opterećenje stubišta iznosi  $3,0 \text{ kN/m}^2$  prema HRN EN 1991-1-1:2012.

$$\frac{Q * L}{2} = \frac{3,0 * 4,16}{2} = 6,24 \text{ kN/m'}$$

Uporabno opterećenje stubišta će se nanositi na isti princip kao i dodatno stalno.

### 5.3.4 Potres

Seizmičko opterećenje se uzima prema normi HRN EN 1998:1:2011 i HRN EN 1998-1:2011/NA:2011. Provjera se mora izvršiti za slijedeću kombinaciju potresnog opterećenja sa ostalim opterećenjima (Eurocode 0 - p.6.5.3).

$$\gamma_1 E + G_{k1} + G_{k2} + \sum_i \psi_{2i} Q_{Ki} \quad (26)$$

Posljedice seizmičkog djelovanja se procjenjuju uzimajući u obzir mase povezane sa slijedećim gravitacijskim opterećenjima:

$$G_{k1} + G_{k2} + \sum_i \psi_{Ei} Q_{Ki} \quad (27)$$

gdje je:

$\gamma_1$  faktor važnosti (Eurocode 8 - p.4.2.5.);

E potresno djelovanje za granično stanje koje se provjerava

$G_{k1}, G_{k2}$  karakteristična vrijednost stalnih djelovanja

$Q_{Ki}$  karakteristična vrijednost promjenjivog opterećenja

$\psi_2$  kombinacijski koeficijent kojim se uzima u obzir kvazi-stalno promjenjivo

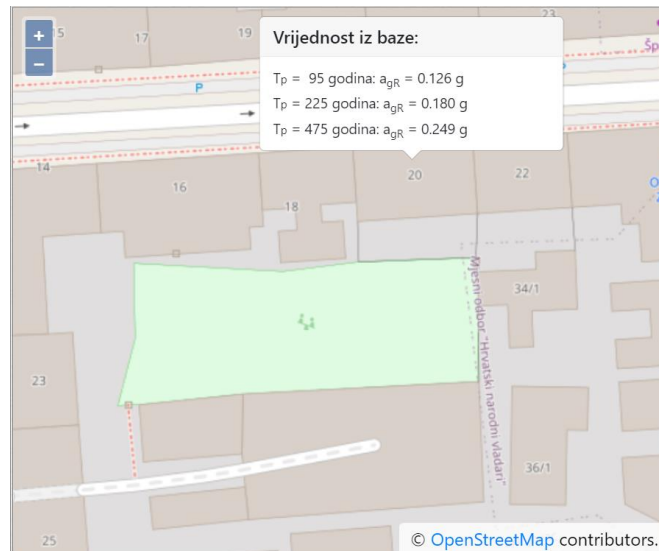
djelovanje

$\psi_{Ei}$  kombinacijski koeficijent od promjenjivog djelovanja kojima se uzima u obzir

vjerojatnost da su sva opterećenja prisutna na cijeloj konstrukciji u trenutku potresa

Ulazni podatak, koji se koristi za proračun, je ubrzanje tla za konkretnu lokaciju.

Na slici 48. prikazana je karta potresnih područja povratnog perioda 475 godina iz koje možemo iščitati da je  $a_{475}=0,249$  g.



Slika 48 Prikaz položaja zgrade sa vršnim ubrzanjem tla [18]

U programu 3Muri postoje 3 verifikacije koje označavaju krajnje stanje na koje provjeravamo konstrukciju. Prema tome BR označava stanje blizu rušenja, ZO znatno oštećenje, a OO ozbiljno oštećenje. Prema Eurokodu analizu postupnog guranja provodimo samo za stanje znatnog oštećenja kod kojeg se zadaje ubrzanje tla povratnog perioda od 475 godina. Zadani tip tla je C, a faktor važnosti iznosi 1.

Seizmičko opterećenje

Oblik spektra: Parametarski

Spektar

	BR	ZO	OO
Verifikacija	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
$a_{gR}$ [m/s <sup>2</sup> ]	0,00	2,49	1,25
Tip tla	C	C	C
S	1,15	1,15	1,15
$T_B$ [s]	0,20	0,20	0,20
$T_C$ [s]	0,60	0,60	0,60
$T_D$ [s]	2,00	2,00	2,00

Faktor važnosti: 1,00

Učitaj zadano OK Poništi ?

Slika 49 Seizmičko opterećenje u programu 3Muri



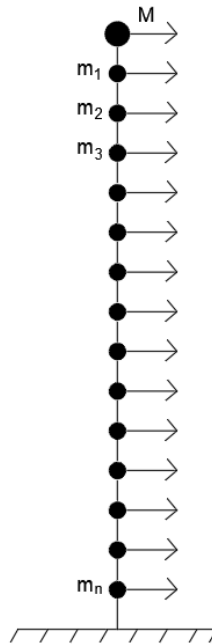
## 5.4 Opterećenje postupnog guranja

U metodi postupnog guranja postoje različite raspodjele potresnog opterećenja na konstrukciju koje su bazirane na raznim metodama kojima se simulira ponašanje konstrukcije u potresu.

Program 3Muri nudi tri raspodjele potresnog opterećenja na odabrani kontrolni čvor zgrade:

➤ Uniformna raspodjela:

Raspodjela sila je uniformna te je akceleracija pri potresu na svakoj etaži konstrukcije jednaka. Raspodjela pojednostavljuje metodu postupnog guranja jer u stvarnosti raspodjela potresnih sila je puno kompleksnija, međutim koristi se kod brzih analiza da se ustanovi kako se ponaša konstrukcija uslijed potresnog opterećenja. Također, karakteristična je kod mekih konstrukcija kao što je i promatrana konstrukcija.

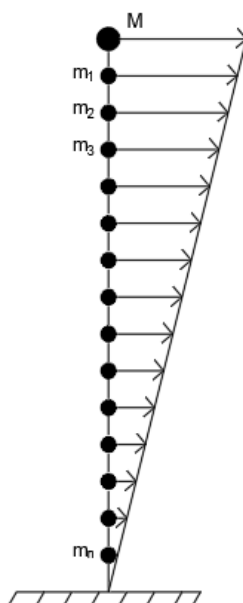


*Stika 50 Uniformna raspodjela potresnog opterećenja "pushover" analize*

## ➤ Statičke sile:

Predstavlja trokutastu raspodjelu sila. Metoda kojom se nanose proporcionalna raspodjela statičkih sila koje su izračunate prema izrazu :

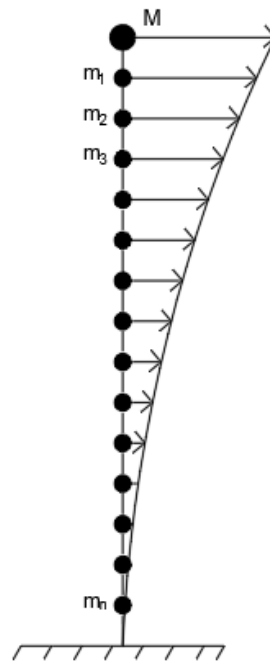
$$F_i = F_h \cdot z_i \cdot \frac{W_i}{\sum z_j \cdot W_j} \quad (28)$$



*Slika 51 Statička raspodjela potresnog opterećenja "pushover" analize*

## ➤ Modalna raspodjela :

Alternativa statičkoj raspodjeli sila koja je proračunata na temelju odabranih značajnih modalnih oblika nakon proračuna modalne analize. Odnosno raspodjela sila je takva da se dobije odabrani modalni oblik zgrade kao odgovor konstrukcije. Distribucija seizmičkog opterećenja može se definirati kao kombinacija nekoliko modalnih oblika sve dok nije uključeni određeni postotak mase koja je aktivirana tijekom potresa.



*Slika 52 Modalna raspodjela potresnog opterećenja "pushover" analize*

Prilikom metode postupnog guranja koristila se uniformna raspodjela i raspodjela statičkih sila. Mjesto na koje se nanosi opterećenje naziva se kontrolni čvor. Kao kontrolni čvor prvotno se uzimao čvor koji je najviše u sredini konstrukcije odnosno najbliže centru mase. Prema tome izabran je čvor 55. Nakon toga su pregledane sve analize s tim čvorom te se ovisno o rezultatima taj čvor korigirao na mjesta koja su prikazivala puno veće deformacije i oštećenja u odnosu na druge čvorove.

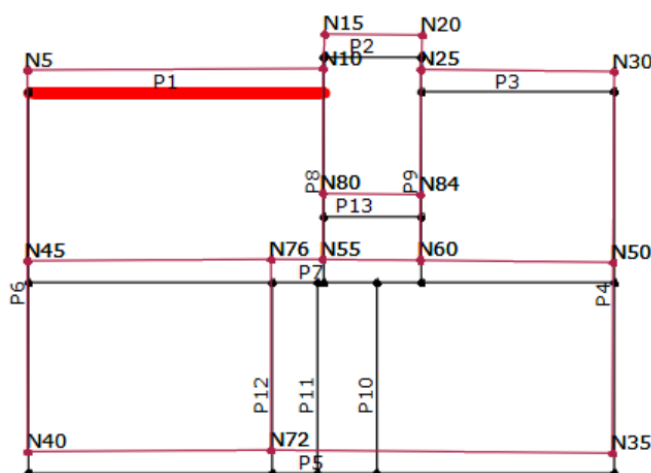
## 6 Analiza rezultata

### 6.1 Modalni oblici titranja i periodi

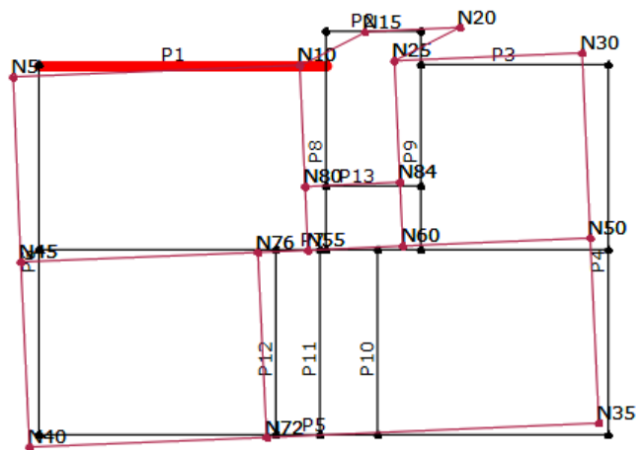
Prije samog proračuna metode postupnog guranja izvedena je modalna analiza. Modalna analiza je proračun konstrukcije čiji je rezultat dinamičko ponašanje konstrukcije. Pri tome najvažniji dinamički parametri su: frekvencija konstrukcije, modalni oblici osciliranja i koeficijent prigušenja. Modalni oblici opisuju kako se konstrukcija giba i deformira prilikom određenih frekvencija, a koeficijent prigušenja karakterizira kako konstrukcija troši energiju tijekom pobude. Prilikom modalne analize rezultati su dobiveni za stanje raspucalih poprečnih presjeka i reducirane krutosti elemenata na savijanje i posmik i to na 50% početne krutosti. Masa je određena prema kombinaciji opterećenja ( $VT + G + 0,3 \cdot Q$ ).

Za proračun smo zadali prvih 20 modalnih oblika pri kojima su prva dva modalna oblika najbitnija jer se aktivira najviše mase. Upravo postotak aktivirane mase u određenom smjeru nam prikazuje kritične oblike koje je moguće odabrati za modalnu raspodjelu sila u metodi postupnog guranja.

Prvi oblik titranja je translacija u smjeru y, a drugi oblik translacija u smjeru x sa torzijom konstrukcije. Prvim oblikom titranja aktivirano je 81% mase u smjeru y što je pogodno za odabir raspodjele potresnog opterećenja metodom postupnog guranja. Drugi oblik ima aktivirano tek 53% mase te i uz to izraženu torziju pa se iz tih razloga ne koristi za raspodjelu potresnog opterećenja.



Slika 53 Prvi modalni oblik u programu 3Muri



Slika 54 Drugi modalni oblik u programu 3Muri

Aktivno u pushoveru		Mod	T [s]	mx [kg]	Mx [%]	my [kg]	My [%]	mz [kg]	Mz [%]
X smjer	Y smjer								
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0,54284	2.750	0,14	1.599.592	81,25	45	0,00
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2	0,49497	1.050.141	53,34	1.166	0,06	24	0,00
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3	0,41736	484.224	24,59	3.174	0,16	18	0,00
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4	0,39105	57.951	2,94	65	0,00	0	0,00
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5	0,21472	273	0,01	1.772	0,09	382	0,02
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6	0,20641	2.171	0,11	632	0,03	52	0,00
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7	0,18368	64	0,00	247.465	12,57	69	0,00
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8	0,17635	3.856	0,20	6.464	0,33	116	0,01
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9	0,16844	212.532	10,79	727	0,04	1.247	0,06
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10	0,15524	21.757	1,11	6.828	0,35	22	0,00
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	11	0,14466	8.780	0,45	6.274	0,32	7.665	0,39
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	12	0,13848	3.427	0,17	2.492	0,13	109.149	5,54
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	13	0,13225	1.105	0,06	1.371	0,07	1.127.099	57,25
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	14	0,13086	392	0,02	58	0,00	48.790	2,48
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	15	0,12498	1.565	0,08	14	0,00	6.008	0,31
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16	0,11494	381	0,02	134	0,01	14.650	0,74
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	17	0,11363	174	0,01	60.416	3,07	11.355	0,58
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	18	0,10900	23.508	1,19	494	0,03	14.231	0,72
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	19	0,10250	25	0,00	701	0,04	155.063	7,88
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	20	0,10153	14.218	0,72	580	0,03	57.683	2,93

Slika 55 Periodi, modalni oblici i postotak aktivirane mase u određenom modalnom obliku

## 7 Rezultati proračuna metodom postupnog guranja

### 7.1 Indeksi sigurnosti i krivulje kapaciteta

Proračun metodom postupnog guranja proveden je kao što je objašnjeno u prethodnim poglavljima. Za opterećenje koje se nanosi uzete su uniformne i statičke raspodjele koje su prethodno opisane. Analiza je provedena za granično stanje značajnog oštećenja za povratni period od 475 godina sa vrijednošću horizontalnog vršnog ubrzanja  $2,49 \text{ m/s}^2$ . S obzirom na raspodjelu i smjer opterećenja te veličinu uzetog ekscentriciteta izvršene su 24 analize čiji rezultat su ključne vrijednosti parametara pomaka prema kojima se dobivaju vrijednosti indeksa sigurnosti. Provjera koja se provodi prema Eurocodu zapisuje se:

$$d_t^{SD} \leq d_m^{SD} \quad (29)$$

gdje je  $d_t^{SD}$  pomak zahtjevan prema normi, a  $d_m^{SD}$  krajnji pomak pri graničnom stanju značajnog oštećenja. Za svako granično stanje proračunava se indeks sigurnosti:

$$\alpha_{SD} = \frac{PGA_{CSD}}{PGA_{DSD}} \quad (30)$$

gdje je  $PGA_{CSD}$  kapacitet akceleracije pri značajnom oštećenju, a  $PGA_{DSD}$  akceleracija tla pri značajnom oštećenju, odnosno alfa nam prikazuje koliki postotak akceleracije pri potresu može preuzeti konstrukcija. Ukoliko je indeks sigurnost veći od 1 konstrukcija ima zadovoljavajući kapacitet da preuzme potresne sile, odnosno pomaci konstrukcije su manji od kritičnih pomaka za granično stanje značajnog oštećenja. Žuta boja označava mjerodavne analize za x i y smjer, zelena boja označava analize koje zadovoljavaju zadane propise, dok crvena boja označava da analize nisu zadovoljile zadane propise. Kao što je vidljivo prema tablici 3 niti jedna od 24 provedenih analiza nije zadovoljila zadane propise za povratni period od 475 godina. Rezultati su očekivani budući da se radi o konstrukciji čija izgradnja potječe iz 19.stoljeća te se u tom periodu nije provjeravala otpornost zgrade na potres. Najmanji indeks sigurnosti je dobiven analizom broj 22 te iznosi 0,306 što znači da konstrukcija može podnijeti 30,6% zadane akceleracije za povratni period od 475 godina.

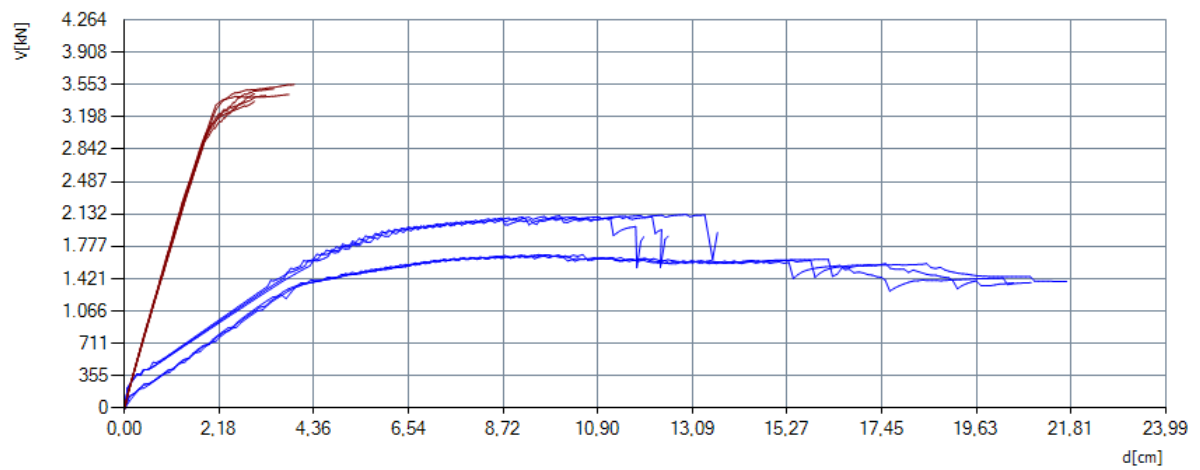
Također, proračunom metode postupnog guranja dobivene su i krivulje kapaciteta za svaku analizu. Na slici 56 prikazane su sve krivulje kapaciteta za uniformnu raspodjelu, a na slici 57 sve krivulje kapaciteta za raspodjelu statičkih sila. Moguće je uočiti da je konstrukcija ima i do tri puta veću mogućnost deformacije u x smjeru u odnosu na y smjer. Razlog tome je da su

posmični zidovi sa manjim otvorima dominantni u y smjeru, dok u x smjeru dominiraju veliki otvori kojih ima mnogo više pa se prema tome zidovi ponašaju više kao okviri koji su prema tome otporniji na savijanje. Maksimalna nosivost što se tiče poprečnih sila iznosi 2,080 kN za x smjer, dok za smjer y iznosi 3,553 kN. Međutim, kao što je naglašeno na početku rada, deformacije konstrukcije su značajnije od maksimalne nosivosti pa prema tome se može zaključiti da je konstrukcija otpornija u x smjeru što se također može primijetiti u tablici 3 gdje su indeksi sigurnosti veći u analizama gdje su potresna opterećenja zadana u x smjeru u odnosu na analize gdje su zadana u y smjeru.

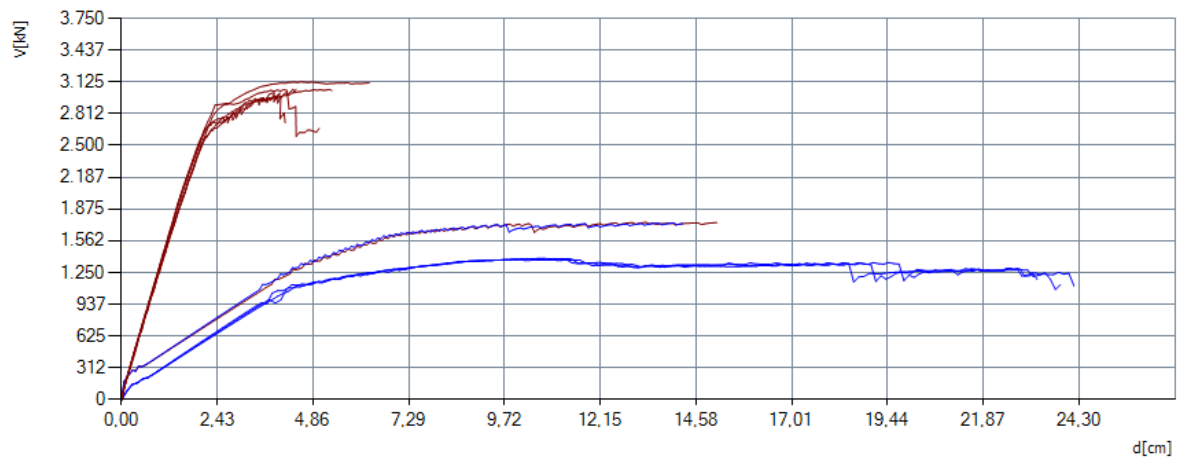
Bitno je imati na umu da se konstrukcija nalazi u nizu te je time ograničen pomak u x smjeru. Pošto to nije bilo moguće simulirati u programu 3Muri, rezultati analize za potres u x smjeru u stvarnosti su vjerojatno drugačijih rezultata pomaka te bi neke analize vrlo vjerojatno i zadovoljile provjere prema Eurokodu.

**Tablica 3** Rezultati metode postupnog guranja

No.	Smjer potresnih sila	Raspodjela opterećenja	Ekscentricitet [cm]	$\alpha$ SD
1	+X	Uniform	0,0	0,608
2	+X	Static forces	0,0	0,617
3	-X	Uniform	0,0	0,602
4	-X	Static forces	0,0	0,544
5	+Y	Uniform	0,0	0,386
6	+Y	Static forces	0,0	0,416
7	-Y	Uniform	0,0	0,390
8	-Y	Static forces	0,0	0,511
9	+X	Uniform	66,5	0,527
10	+X	Uniform	-66,5	0,560
11	+X	Static forces	66,5	0,444
12	+X	Static forces	-66,5	0,620
13	-X	Uniform	66,5	0,601
14	-X	Uniform	-66,5	0,602
15	-X	Static forces	66,5	0,545
16	-X	Static forces	-66,5	0,534
17	+Y	Uniform	93,8	0,332
18	+Y	Uniform	-93,8	0,314
19	+Y	Static forces	93,8	0,337
20	+Y	Static forces	-93,8	0,342
21	-Y	Uniform	93,8	0,344
22	-Y	Uniform	-93,8	0,306
23	-Y	Static forces	93,8	0,358
24	-Y	Static forces	-93,8	0,331



*Slika 56* Krivulje kapaciteta za x (plavo) i y (crveno) smjer pri uniformnoj raspodjeli potresnog opterećenja



*Slika 57* Krivulje kapaciteta za x (plavo) i y (crveno) smjer pri raspodjeli statičkih sila



## 7.2 Prikaz otkazivanja zida

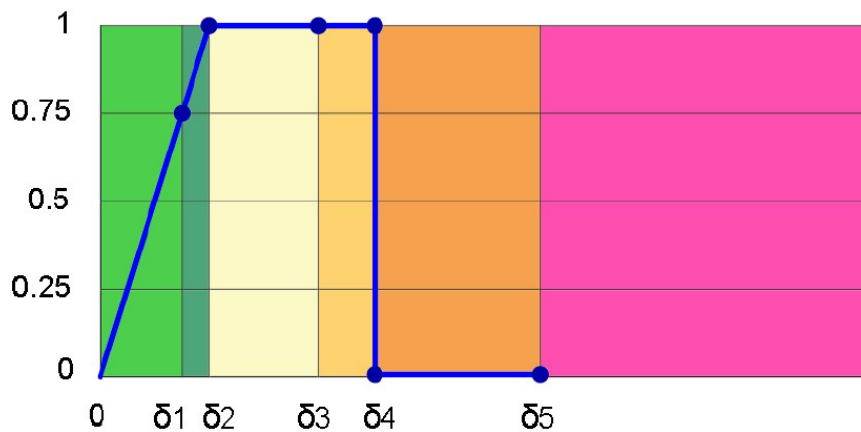
Analizirani su makroelementi kojima su pridruženi mehanizmi savijanja i posmika. Prilikom 3D prikaza modela za neku od 24 analiza primjenjuju se različite boje koje označavaju različite vrste otkazivanja koje su prikazane u tablici 4.

*Tablica 4 Prikaz boja koje označavaju različite vrste otkazivanja [14]*

	Neoštećen element
	Početak plastifikacije
	Posmično oštećenje
	Početak otkazivanja posmikom
	Otkazivanje posmikom
	Oštećenje savijanjem
	Početak otkazivanja savijanjem
	Otkazivanje savijanjem
	Blizu rušenja
	Otkazivanje na tlak
	Otkazivanje na vlak
	Otkazivanje tijekom elastične faze

Stanje blizu rušenja događa se nakon što otkáže neki element. U trenutku otkazivanja tog elemenata deformacije postaju toliko značajne da taj element više ne prenosi niti vertikalnu silu. Time dolazi do lokalnog kolapsa. Na temelju toga postoje dva dijagrama koji opisuju kako se troši zid s obzirom na otkazivanje savijanjem i otkazivanje posmikom.

### 7.2.1 Otkazivanje zida posmikom

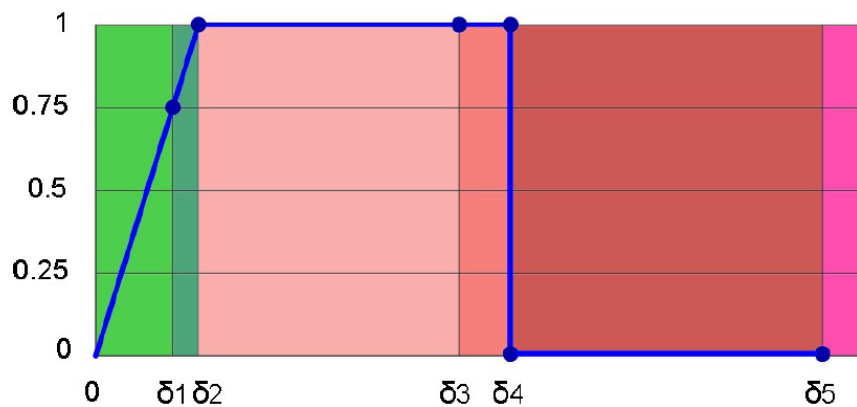


Slika 58 Otkazivanje zida posmikom [14]

Tablica 5 Faze na dijagramu prikazanom na slici 58

$0 - \delta_1$	elastični dio
$\delta_1 - \delta_2$	početak plastifikacije
$\delta_2 - \delta_3$	plastični dio posmika
$\delta_3 - \delta_4$	početak otkazivanja posmikom
$\delta_4 - \delta_5$	otkazivanje posmikom
$\delta_5 - \infty$	stanje blizu rušenja

### 7.2.2 Otkazivanje zida savijanjem



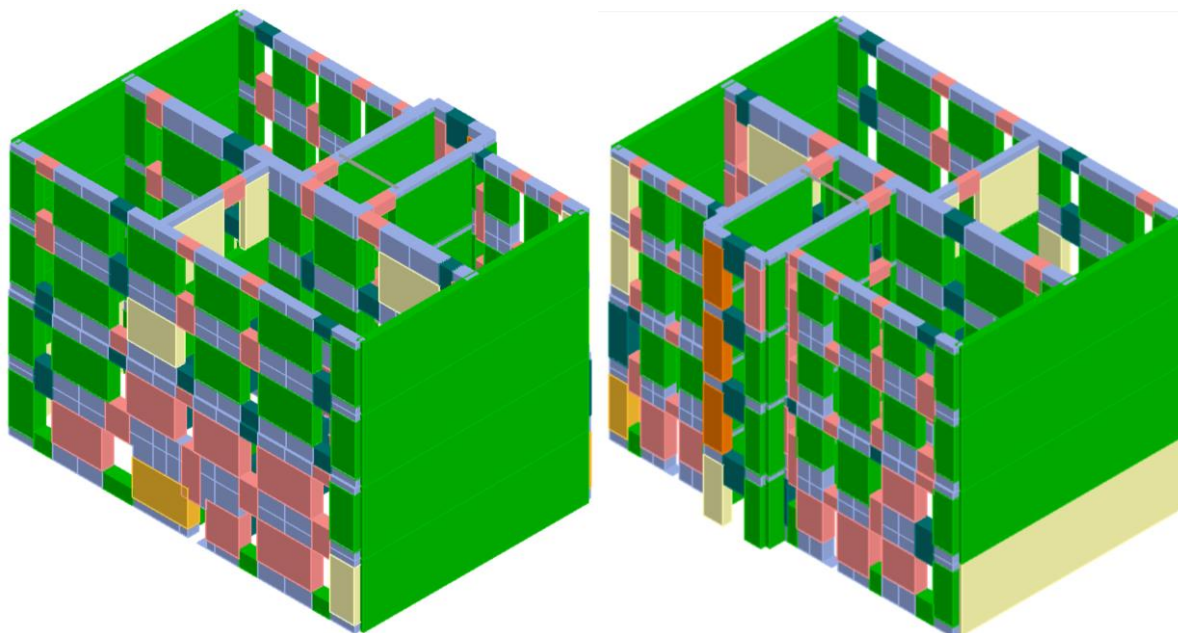
Slika 59 Otkazivanje zida savijanjem [14]

Tablica 6 Faze na dijagramu prikazanom na slici 59

$0 - \delta_1$	elastični dio
$\delta_1 - \delta_2$	početak plastifikacije
$\delta_2 - \delta_3$	plastični dio savijanja
$\delta_3 - \delta_4$	početak otkazivanja savijanjem
$\delta_4 - \delta_5$	otkazivanje savijanjem
$\delta_5 - \infty$	stanje blizu rušenja

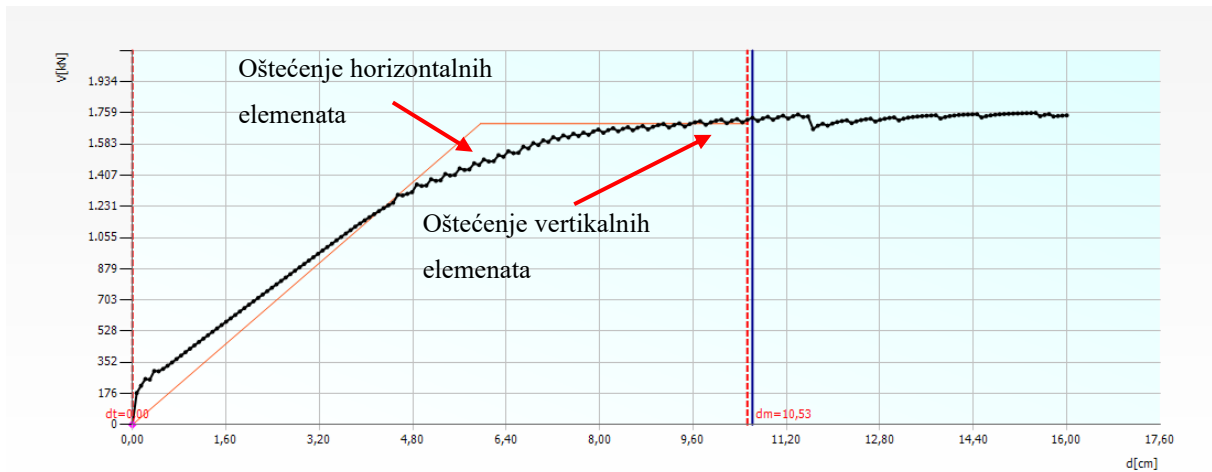
## 7.3 Mjerodavne analize

### 7.3.1 Mjerodavna analiza u smjeru x

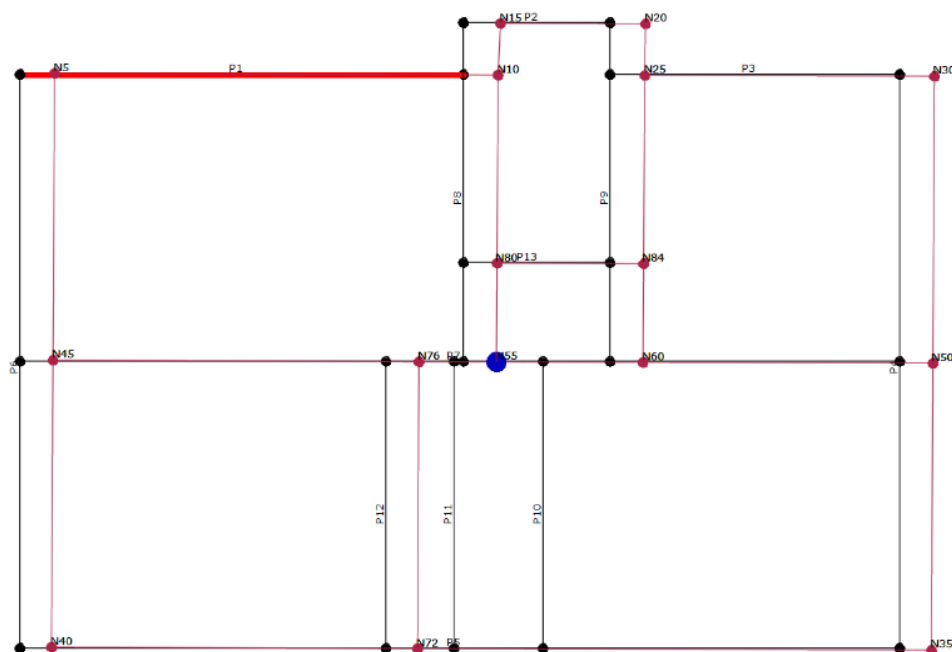


*Slika 60 3D prikaz modela sa oštećenjima mjerodavne analize u smjeru x*

Mjerodavna analiza u smjeru x nam je analiza broj 11 pri kojoj je smjer opterećenja statičke raspodjele pozitivan u x smjeru uz ekcentricitet 66,50 cm. Za odabranu analizu izračunati je tražen pomak  $d_t^{SD}$  koji iznosi 17,78 cm, a granični pomak  $d_m^{SD}$  koji konstrukcija može podnijeti pri značajnom oštećenju iznosi 7,90 cm te prema tome ne zadovoljava dane propise. Indeks sigurnosti prema tome iznosi 0,444, odnosno definira da konstrukcija može podnijeti 44,4% dane akceleracije u određenom smjeru i sa danim ekscentricitetom. Na slici 61 prikazana je krivulja kapaciteta. Početak krivulje označava elastično ponašanje do trenutka kada se počinju trošiti horizontalni elementi. Ovaj tip zig-zag krivulja je tipičan kod zidanih konstrukcija [19]. Krivulja se počinje izravnavati dok se pomaci deformacija povećavaju te ponašanje konstrukcije postaje nelinearno. Do izravnavanja krivulje dolazi upravo zbog oštećenja pojedinih elemenata što uzrokuje da se opterećenje raspodjeli na druge elemente. Upravo to možemo vidjeti na krivulji gdje se vidi da sila nakon što je pala ponovno naraste. Tipično analiza završava nakon što poprečna sila padne za 20%, međutim ponekad je potrebno korigirati zadnji korak. Korigiranje zadnjeg koraka je inženjerska prosudba. Tako je i u ovoj analizi korigiran zadnji korak iz razloga što su se uočila oštećenja blizu rušenja u osi okvira P2 te je time pretpostavljeno da daljnji pomaci bi mogli rezultirati rušenjem konstrukcije.



Slika 61 Krivulja kapaciteta za mjerodavni smjer x



Slika 62 Tlocrtni prikaz pomaka konstrukcije za krajnji pomak mjerodavnog proračuna u x smjeru

Na slici 62 prikazani je tlocrtni pomak konstrukcije u krajnjoj točki te kontrolni čvor koji je označen plavom bojom, dok su na slici 63 prikazani dobiveni parametri metodom N2. Kako bi bolje prikazali kako se trošila konstrukcija, u tablici 7 prikazani su određeni zidovi u par faza otkazivanja. Zidovi koji su odabrani za prikaz su zidovi koji su zadobili najviše oštećenja, odnosno zidovi koji su najviše sudjelovali u prijenosu opterećenja potresa.

Detalji rezultata

**BR**

dt - [cm] - dm - [cm]  
 qu = - dm/dt = -  
 -

**ZO**

dt 17,78 [cm] > dm 7,90 [cm]  
**Verifikacija nije zadovoljena**



**OO**

Sd - [cm] - d\*y - [cm]  
 -

Granično stanje	PGA [m/s <sup>2</sup> ]	$\alpha$
BR	-	-
ZO	1,138	0,444
OO	-	-

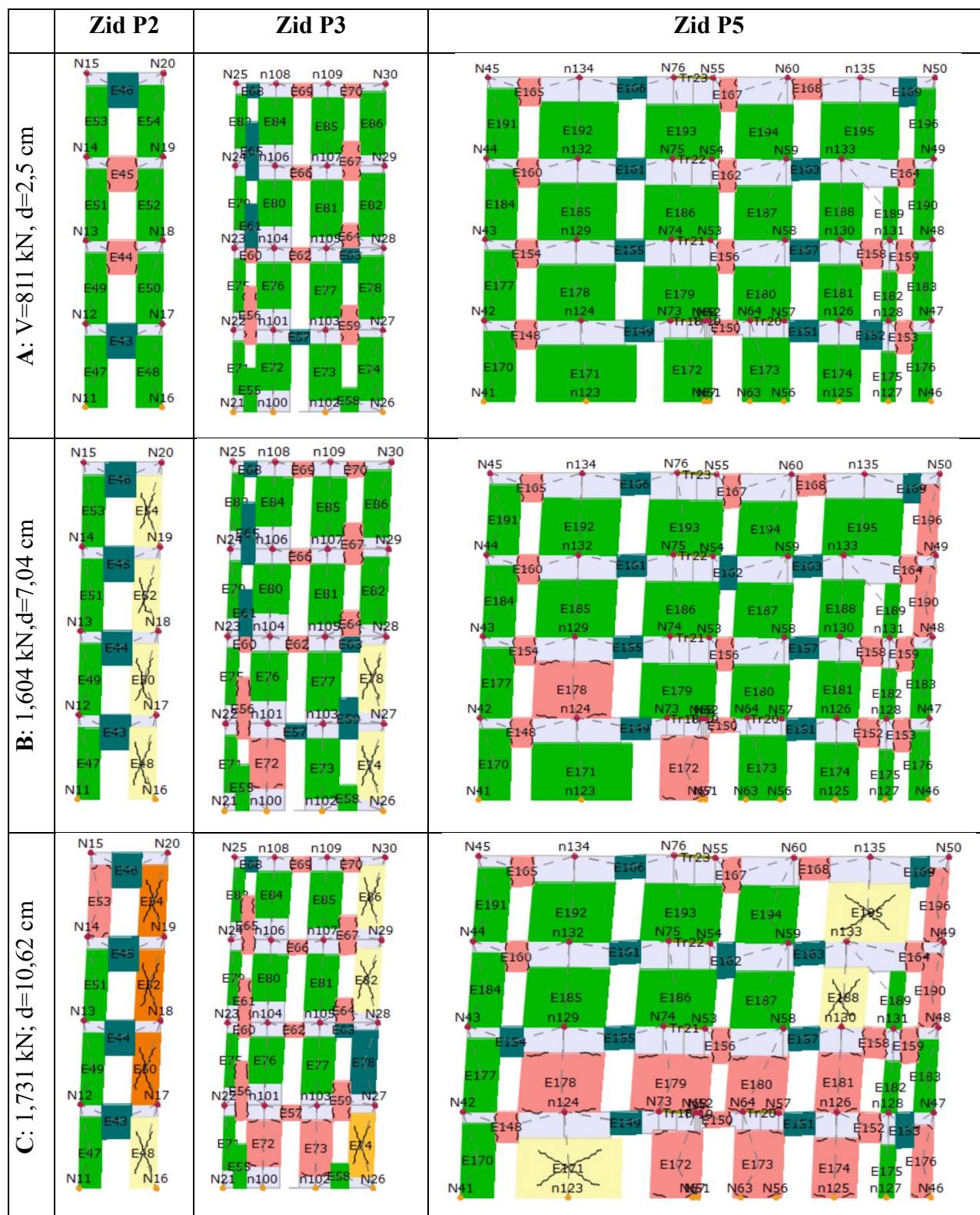
**Analiza parametara**

T* [s]	1,387
m* [kg]	1388130
w [kN]	20559
M [kg]	2095668
m*/M [%]	66,238
$\Gamma$	1,15
F*y [kN]	1482
d*y [cm]	5,2
d*m [cm]	9,19

Norma  Izlaz 

*Slika 63 Parametri za mjerodavni proračun u x smjeru N2 metode*

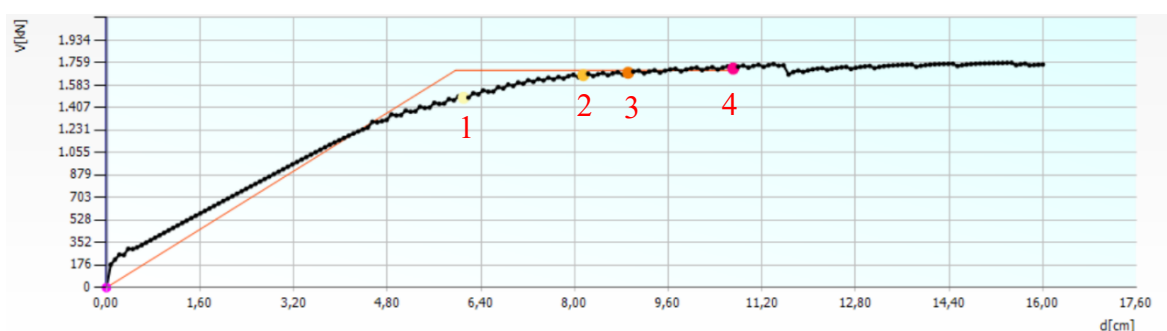
**Tablica 7** Oštećenje zidova metodom postupnog guranja za mjerodavni proračun u x smjeru





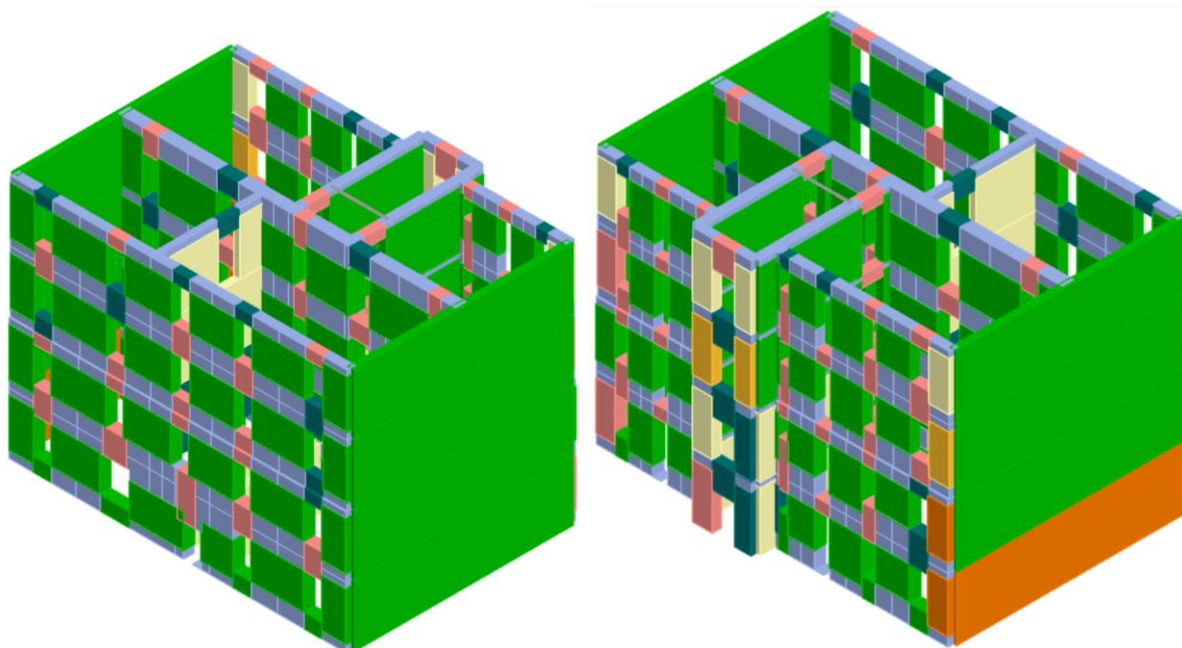
Prema tablici 7 možemo uočiti kako kraći elementi zida P2 otkazuju na posmik, dok dulji elementi zida P5 otkazuju na savijanje. Također, kraći zidovi pretrpjeli su veća oštećenja u odnosu na duže zidove. Većina horizontalnih elemenata je pretrpjela oštećenja te su većina tih oštećenja u fazi početka otkazivanja savijanjem.

Kao najkritičniji zid smatramo zid P2, odnosno zid stubišta koji je odmaknut od fasadnog zida te upravo zbog toga trpi najveća oštećenja. Zidovi P1 i P3 guraju zidove stubišta koji su manje debljine te sa istakom zbog koje je taj dio konstrukcije mekši od ostatka budući da nisu u istoj osi te pored ostalog dolazi do većih oštećenja. Faza A prikazuje zidove u elastičnoj fazi. U fazi B dolazi do posmičnih oštećenja elemenata E48, E50, E52 i E54 koja daljnjim napredovanjem dolaze do potpunog otkazivanja posmikom u fazi C. Također je bitno za uočiti da oštećenja napreduju sa najniže etaže prizemlja prema gornjim etažama. Razlog tome je mekana konstrukcija. Za zid E52 na zidu P2 moguće je prikazati točke na krivulji kapaciteta koje označavaju tijekom otkazivanja tog zida. Navedeno je prikazano na slici 64. Zid započinje elastičnim ponašanjem sve do točke 1 kada nastupa plastifikacija zbog posmika. Ono što je bitno za naglasiti je to da plastifikacija do koje dolazi zbog posmika označena točkom 2 traje dosta kratko, odnosno točka 3 koja predstavlja početak otkazivanja posmikom dolazi vrlo brzo nakon točke 2. Također, točka 4 nam označava potpuni kolaps toga zida, a ukoliko usporedimo kolaps cijele konstrukcije sa tim zidom vidimo da se kolaps tog zida događa daleko prije toga što samo znači da je zid preslab i da ga je potrebno dodatno ojačati kako bi se produžio tijekom plastifikacije, odnosno njegova otpornost na potres.



Slika 64 Krivulja kapaciteta za mjerodavan smjer x na kojem su označene točke oštećenja zida 52 na zidu P2

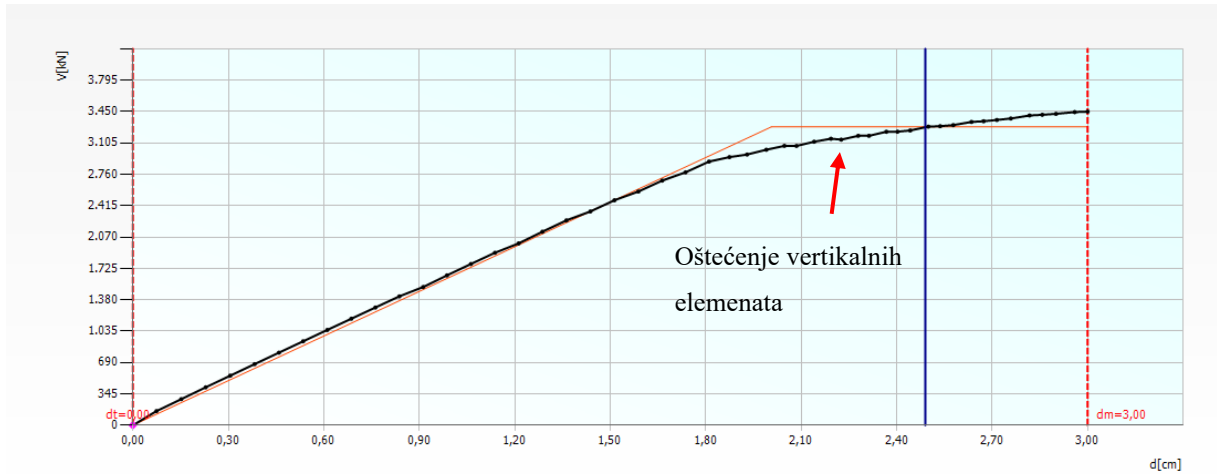
### 7.3.2 Mjerodavna analiza u smjeru y



*Slika 65 3D prikaz modela sa oštećenjima mjerodavne analize u smjeru y*

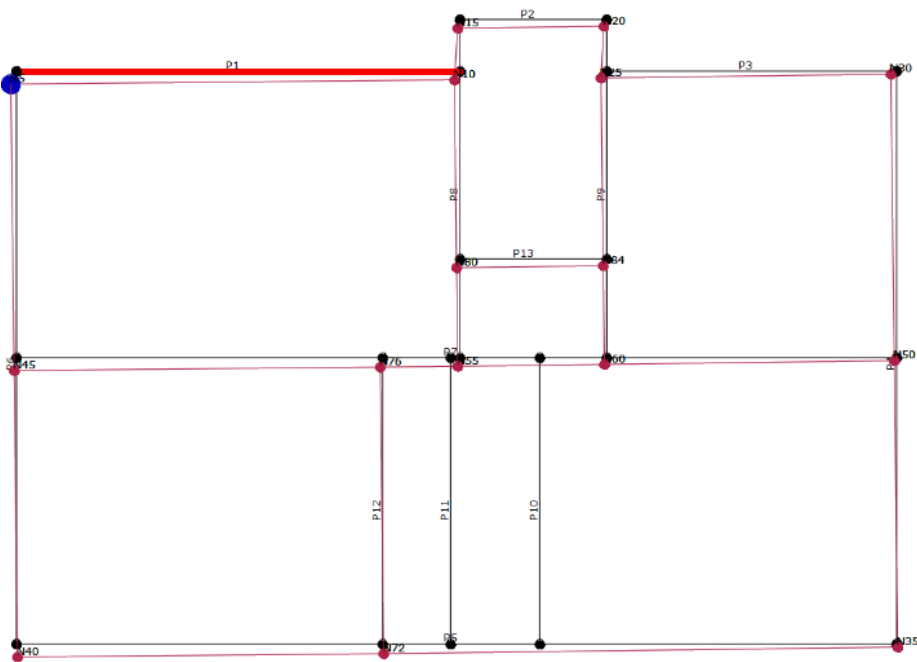
Mjerodavna analiza u smjeru y je analiza pod brojem 22. Raspodjela opterećenja je uniformna sa ekscentricitetom od -93,75 cm, a smjer y je u negativnom smjeru. Za odabranu analizu izračunati je tražen pomak  $d_t^{SD}$  koji iznosi 7,80 cm, a granični pomak  $d_m^{SD}$  koji konstrukcija može podnijeti pri značajnom oštećenju iznosi 2,25 cm te prema tome ne zadovoljava dane propise. Indeks sigurnosti iznosi 0,306 što znači da konstrukcija može podnijeti 30,6% dane akceleracije u određenom smjeru i sa danim ekscentricitetom. Na slici 66 prikazana je krivulja kapaciteta koja prikazuje odnos poprečne sile pri temelju sa pomakom konstrukcije. Početak krivulje se nalazi u elastičnom stanju sve do prvog oštećenja vertikalnog elementa. Nakon toga krivulja ima zig-zag krivljenja koja upućuju na to da vertikalni elementi popuštaju te se tako sila raspodjeli na druge elemente. U krajnjoj točki sila padne čak za 52% što označava kraj proračuna.





*Slika 66 Krivulja kapaciteta za mjerodavni smjer y*

Na slici 67 prikazan je tlocrtni pomak konstrukcije u krajnjoj točki te kontrolni čvor koji je označen plavom bojom. Za kontrolni čvor prvobitno je izabran čvor 55, međutim takvom analizom dobiveno je da je pomak izražen na lijevoj strani konstrukcije te smo zbog toga korigirali čvor na čvor 5.



*Slika 67 Tlocrtni prikaz pomaka za mjerodavnu analizu u smjeru y*

Detalji rezultata

BR  
 $dt$  - [cm] -  $dm$  - [cm]  
 $qu =$  -  $dm/dt =$  -  
 -



ZO  
 $dt$  7,80 [cm] >  $dm$  2,25 [cm]  
**Verifikacija nije zadovoljena**

OO  
 $Sd$  - [cm] -  $d^*y$  - [cm]  
 -

Granično stanje	PGA [m/s <sup>2</sup> ]	$\alpha$
BR	-	-
ZO	0,783	0,306
OO	-	-

Analiza parametara

$T^*$ [s]	0,546
$m^*$ [kg]	1236125
$w$ [kN]	20559
$M$ [kg]	2095668
$m^*/M$ [%]	58,985
$\Gamma$	1,31
$F^*y$ [kN]	2505
$d^*y$ [cm]	1,53
$d^*m$ [cm]	2,29

Norma  Izlaz 

Slika 68 Parametri za mjerodavni proračun u y smjeru N2 metode

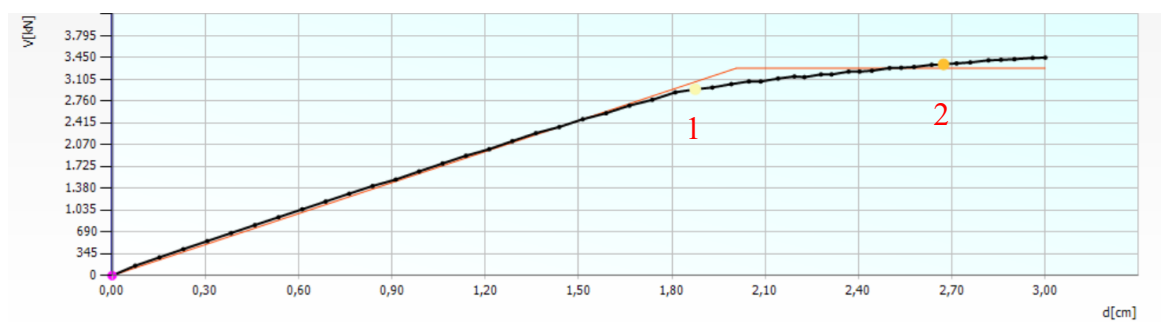
**Tablica 8** Oštećenje zidova metodom postupnog guranja za mjerodavni proračun u y smjeru

	Zid P1	Zid P2	Zid P6
<b>A:</b> $V=2,254$ kN, $d=1,36$ cm			
<b>B:</b> $3,302$ kN, $d=2,58$ cm			
<b>C:</b> $4,862$ kN; $d=2,49$ cm			

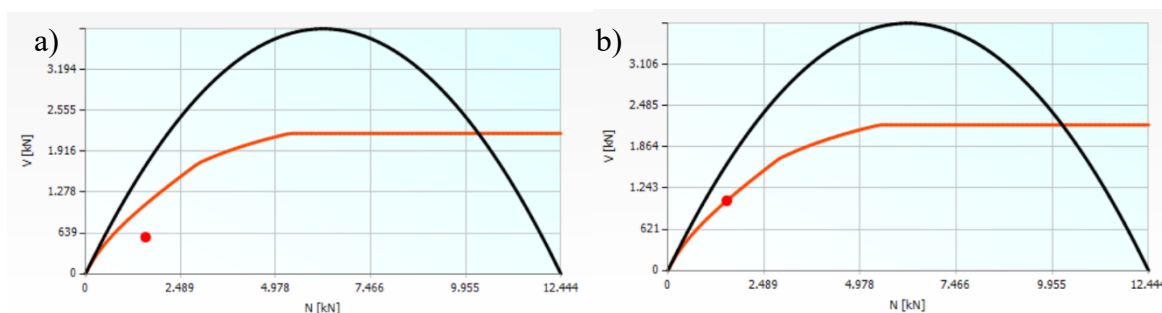
U tablici 8 prikazani su zidovi koji su zadobili najviše oštećenja tijekom mjerodavne analize u y smjeru. Prikazani su kroz 3 faze oštećenja gdje je kritična faza C u kojoj dolazi do otkazivanja

elementa E144 zida P6 na posmik. Time i završava analiza jer otkazivanjem tog zida konstrukcija više nije stabilna. Mjerodavna analiza u y smjeru otkazuje pri manjim pomacima u odnosu na mjerodavnu analizu u x smjeru, a razlog tome je taj što se većina nosivog zida rasprostire u x smjeru pa je time i konstrukcija čvršća u tom smjeru. Zid P6 je zabatni zid koji je jako loše povezan sa ostatkom konstrukcije. Međukatna konstrukcija nije oslonjena na njega i okomito zide na njega nije povezano nikakvim serklažem. Sve to rezultira time da je zabatni zid jako mekan i brzo otkazuje pri djelovanju potresa jer ga praktički ništa ne pridržava. Zid P2 je zid stubišta i možemo uočiti kako otkazuje. U fazi A dolazi do prvih znakova oštećenja od posmika koje se onda širi dalje na druge elemente zida P2 u fazi B. U fazi C dolazi do početka otkazivanja od posmika elemenata E51 i E52 te početka otkazivanja savijanjem elementa E48.

Na slici 69 prikazana je krivulja kapaciteta sa označenim stanjima oštećenja zida P6. Krivulja započinje elastičnim ponašanjem sve do točke 1 gdje nastupa početak plastifikacije posmikom. Završetkom plastifikacije kreće početak otkazivanja posmikom u točki 2. Točka 3 nije označena na krivulji, međutim ona bi se nalazila na mjestu zadnjeg koraka koji se može vidjeti na slici 66. Točka 3 bi označavala otkazivanje zida posmikom.



*Slika 69 Krivulja kapaciteta za mjerodavan smjer y na kojem su označene točke oštećenja zida P6*



*Slika 70 Krivulje doseg otpornosti zida P6 s obzirom na poprečnu i uzdužnu silu; a) elastična faza i b) faza u točki 2*

Slike 70 prikazuju krivulje doseg otpornosti zida P6 s obzirom na poprečnu i uzdužnu silu. Crna krivulja prikazuje otkazivanje na savijanje, a narančasta otkazivanje na posmik.

Uočavamo da je u elastičnoj fazi točka otpornosti zida ispod obje krivulje, odnosno time znamo da ne dolazi do oštećenja zida i možemo vidjeti koliko još otpornosti zida preostaje. U fazi točke 2 primjećujemo da točka otpornosti zida leži na krivulji otkazivanja na posmik. U svakoj drugoj fazi također ostaje na toj krivulji i time prikazujemo da je došlo do oštećenja zida pod utjecajem posmika. Program 3Muri omogućuje simulaciju ojačanog zida tako da se vidi razlika između ojačanog i zida koji nam je dostupan. Taj pristup ubrzava proračune vezane za ojačanje konstrukcije, to jest moguće je vidjeti ukoliko bi određeno ojačanje bilo dovoljno ili ne.

#### **7.4 Usporedba modela s fleksibilnom dijafragmom sa modelom s krutom dijafragmom**

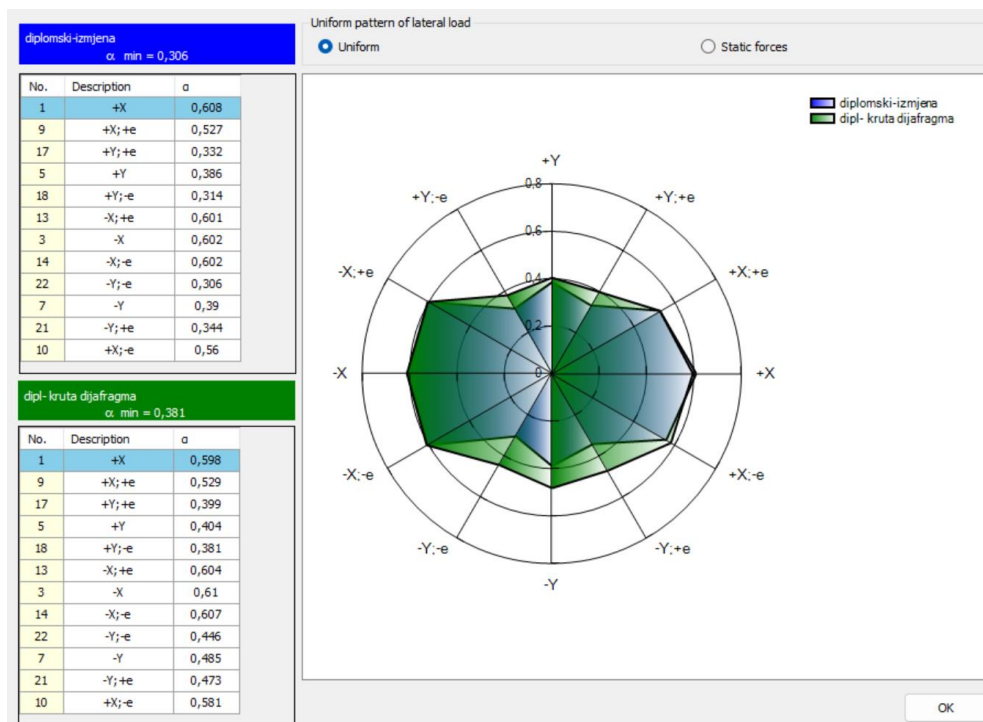
Dijafragmom nazivamo međukonstrukciju, odnosno horizontalni strukturni element unutar konstrukcije koji može biti kruti, polukruti ili fleksibilan. Dijafragme postoje kako bi prenijele bočno opterećenje, odnosno opterećenje potresa, na vertikalne nosive elemente konstrukcije kao što su stupovi i zide. Prenose se preko unutarnjih poprečnih naprezanja. Glavni zadatak dijafragme je da pruža stabilnost cijeloj konstrukciji pri bočnom opterećenju [20].

Krute dijafragme nazivamo krutim jer su puno kruće u odnosu na druge elemente okvira. Deformacija unutar ravnine dijafragme je jako mala u odnosu na horizontalne otklone okvira te se zanemaruje. Modeliranjem sa krutom dijafragmom omogućujemo njezin translacijski pomak i rotaciju te sprječavamo njezinu deformaciju čime osiguravamo da se bočna opterećenja raspodjeljuju prema relativnoj krutosti elemenata koji se odupiru tim opterećenjima.

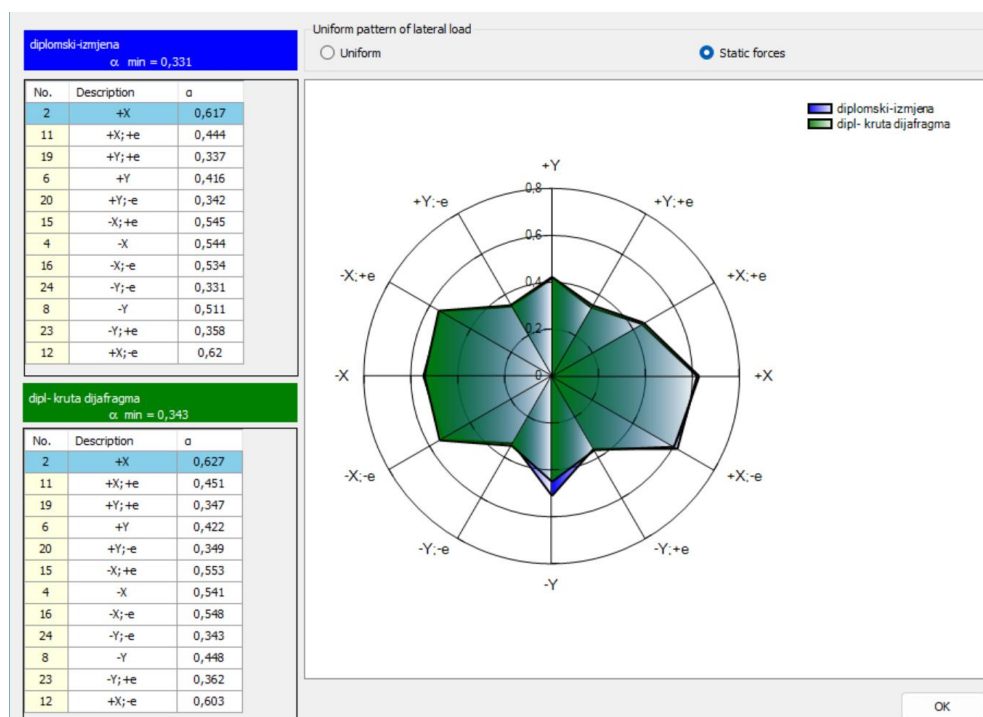
S druge strane krutost fleksibilnih dijafragmi mnogo je manja u odnosu na krutost ostalih elemenata okvira pa prema tome ima mali utjecaj u prijenosu bočnog opterećenja i velike deformacije. Poznato je od prije navedenog da je dijafragma analizirane konstrukcije fleksibilna. Većina starih konstrukcija u Zagrebu građena je sa drvenim grednicima koji nisu povoljno povezani sa ostatkom zida čija je posljedica neovisno titranje međukonstrukcija u odnosu na zide. Prema tome konstrukcija može iskusiti mnogo veću akceleraciju i pomake u odnosu na konstrukciju sa krutom dijafragmom [12].

Na slikama 71 i 72 prikazani su rezultati usporedbe modela sa fleksibilnom dijafragmom (plava boja) i modela sa krutom dijafragmom (zelena boja). Moguće je uočiti da su rezultati modela s krutom dijafragmom bolji u smjeru y za uniformnu raspodjelu, dok u smjeru x nema nekih velikih razlika. Kod statičke raspodjele uočena je tek mala razlika u negativnom y smjeru. Razlika u y smjeru je više izražena zato što je konstrukcija kruća u x smjeru, odnosno kruta

dijafragma nam pomaže kod potresa u y smjeru jer omogućuje bolju povezanost međukonstrukcija sa ostalim zidom i upravo time konstrukcija može podnijeti veće pomake te su time i indeksi sigurnosti veći.



**Slika 71** Usporedba vrijednosti koeficijenta sigurnosti modela sa krutom dijafragmom (zeleno) i modela sa fleksibilnom dijafragmom (plavo) kod uniformne raspodjele potresnog opterećenja



**Slika 72** Usporedba vrijednosti koeficijenta sigurnosti modela sa krutom dijafragmom (zeleno) i modela sa fleksibilnom dijafragmom (plavo) kod statičke raspodjele potresnog opterećenja

## 8 Ojačanje konstrukcije

Nakon potresa koji je zahvatio Zagreb 22.3.2020. većina starih zgrada zadobile su velika oštećenja zbog kojih je njihova uporabivost bila nepostojeća. Kako bi se oštećene zgrade ponovno mogle koristiti potrebna su ojačanja konstrukcije. Neke od metoda popravka i pojačanja zidova su zamjena znatno oštećenih zidova, ponovno zidanje dijela zida te potpuno preslagivanje zida.

Cilj sanacija zidane konstrukcije jest da se osigura potrebna razina otpornosti i sigurnosti uz što manje intervencije. Pošto se analizirana konstrukcija nalazi unutar kulturno povijesne cjeline grada Zagreba potrebno je da su tehnike sanacija i pojačanja reverzibilne te u skladu s vremenom izgradnje zgrade. U sklopu takovog ojačanja surađuju konstruktori, arhitekti, vlasnici zgrade te konzervatori [16].

S obzirom na tehnologiju sanacija i pojačanja razlikujemo dvije: konvencionalne i specijalne. Konvencionalne tehnike koriste uobičajene uređaje i materijale te se dijele na lokalne i globalne intervencije. S druge strane, specijalne tehnike koriste specijalne uređaje i nove sofisticirane materijale [16]. Glavni zadatak svih tehnika je povećati otpornost zida na bočna opterećenja.

### 8.1 Razine obnove

Kao što je navedeno, intervencije mogu biti lokalne i globalne. Razine obnove za potresom oštećene konstrukcije zgrada u odnosu na mehaničku otpornost i stabilnost definirane su prema tehničkom propisu o izmjeni i dopuni Tehničkog propisa za građevinske konstrukcije (NN 75/2020) u Prilogu III [22]. Sveukupno postoje 4 razine gdje prva razina predstavlja popravak nekonstrukcijskih elemenata, a zadnja razina cjelovitu obnovu. U nastavku su te razine nešto detaljnije opisane.

#### ➤ Razina 1 – popravak nekonstrukcijskih elemenata

Razinom 1 fokusira se nekonstrukcijske elemente dovesti do razine lokalne nosivosti i stabilnosti kroz popravke ili zamjene. U ovu razinu obnove spadaju slijedeće mjere:

- Popravak ili uklanjanje i ponovna izvedba oštećenih dimnjaka, krovnih vijenaca i parapeta, balkonskih ogradnih zidova
- Popravak ili uklanjanje i ponovna izvedba dijelova zabatnih zidova na tavanu ili potkrovlju

- Djelomično ili potpuno prezidavanje pregradnih zidova materijalom iste ili manje mase
- Popravlak krovišta (lokalna zamjena rogova, letvi, kosnika)
- Zamjena dijelova pokrova
- Popravlak pukotina u nekonstrukcijskim elementima
- Ostale slične mjere.

➤ Razina 2 – vrši se popravlak ili zamjena nosivih elemenata

Radovima razine 2 ojačavaju se kritična mjesta u objektu i elementi koji su oštećeni u potresu. Potrebno je postići razinu otpornosti objekta od 50% razine koju traži EC 8. Neki od radova su:

- Popravlak većih pukotina u nosivim zidovima
- Obuhvatniji popravlak krovne konstrukcije
- Popravlak stubišta
- Popravlak i povezivanje zidova
- Popravlak međukatnih konstrukcija i sidrenje u zidove
- Mjere stabilizacije nepridržanih zidova
- Izmjena dimnjaka vezano uz zamjenu atmosferskog uređaja za loženje kondenzacijskim plinskim bojlerima
- Sva lokalna ojačavanja AB elementima, FRP-om ili sl.

➤ Razina 3 – poboljšana razina otpornosti zgrade na djelovanje potresa u odnosu na razinu 2

Cilj razine 3 je postići seizmičku otpornost od 75-100 % prema EC 8 te se obavezno primjenjuje kod zgrada razreda važnosti III. U razinu 3 spadaju:

- Ojačanja nosivih zidova (injektiranje, fugiranje, prezidavanje, FRP, torketiranje)
- Ojačanje ili izvedba novih međukatnih konstrukcija i krovišta, sa propisanim sidrenjem u zidove
- Popravlak i/ili izvedba novih stubišnih krakova i podesta
- Izvedba novih dodatnih nosivih zidova
- Ojačanje temelja
- Izvedba novih vertikalnih i horizontalnih serklaža



## ➤ Razina 4 – cjelovita obnova

Prioritet razine 4 je postizanje mehaničke otpornosti i stabilnosti prema pripadnim normama niza HRN EN 1998 i to postizanje 90-100% zahtjeva EC 8. Radovima razine 4 cjelovito se obnavlja građevinska konstrukcija zgrade.

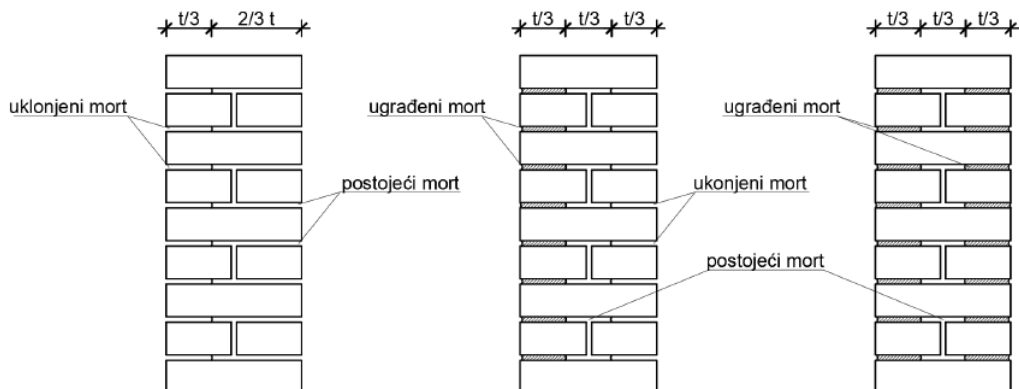
## 8.2 Predloženo ojačanje analizirane konstrukcije

Najveća oštećenja nastala su kao posljedica slijedećih činjenica. Fleksibilna dijafragma, odnosno međukonstrukcija koja nije dovoljno spojena sa ostatkom zidova rezultirala je odvajanjem zida od međukonstrukcije, a samim time i njegovo oštećenje. Otpornost zida na potres izuzetno je mala, a starost konstrukcije to dodatno umanjuje. Također, nosivi zidovi nisu međusobno kvalitetno spojeni te su kao takvi podložni otkazivanju van ravnine. Kako bi se sve navedeno saniralo, preložene su slijedeće mjere ojačanja analizirane konstrukcije.

### 8.2.1 Razina 1

#### 8.2.1.1 Zapunjavanje sljubnica

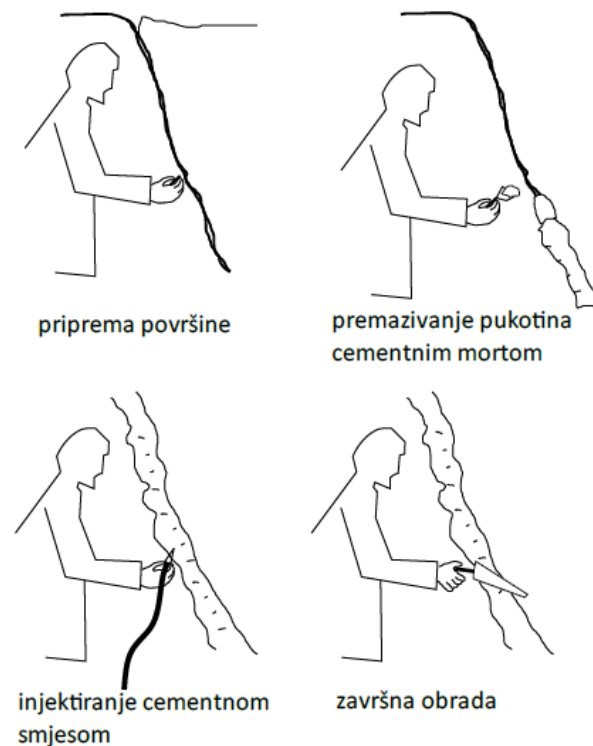
Većina morta je zbog svoje starosti oslabjela toliko da više nije imala nikakvu krutost, a povezanost između opeka zida bila je skoro pa nikakva. Prema tome radi se djelomična zamjena morta u sljubnicama. Na slici 73 prikazano je proces uklanjanja morta i utiskivanje novog morta. Ugrađeni mort je na bazi vapna, kompatibilan je s kamenom strukturom zida te ima manju krutost i veću propusnost. Njegovom obnovom povećana je konsolidacija zida. Također, moguće je u sljubnicu postaviti čeličnu šipku zbog dodatnog ojačanja zida [23].



Slika 73 Uklanjanje postojećeg morta i utiskivanje novog morta [23]

### 8.2.1.2 Sanacija pukotina

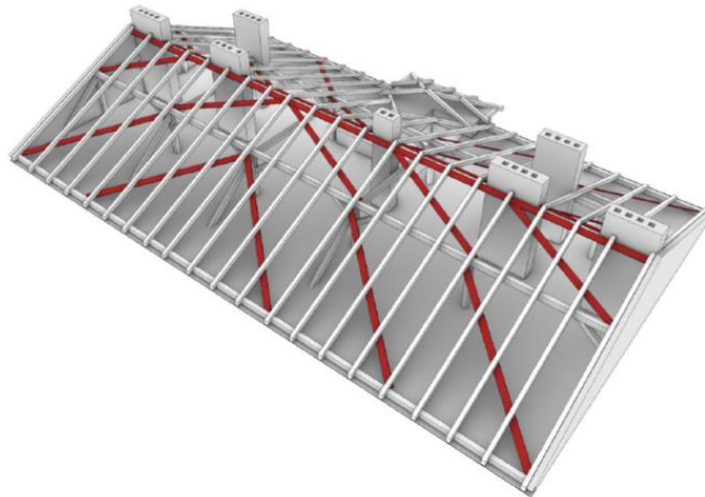
Sanacija pukotina izvodi se njihovim injektiranjem. Materijal koji se koristi kao injekcijska smjesa treba imati slične veličine čvrstoće, deformacijskih svojstva, modula elastičnosti i Poissonovog koeficijenta kao kod osnovnog materijala. Bitno je injektirati niskim pritiskom kako bi se izbjeglo zadržavanje zraka u pukotinama i finim šupljinama te potencijalno oštećenje zida. Injektiranjem zidova povećavamo nosivost za više od 50%, a samim time i duktilnost zida [23].



*Slika 74 Postupak injektiranja zidanih zidova [16]*

### 8.2.1.3 Pojačanje krovišta

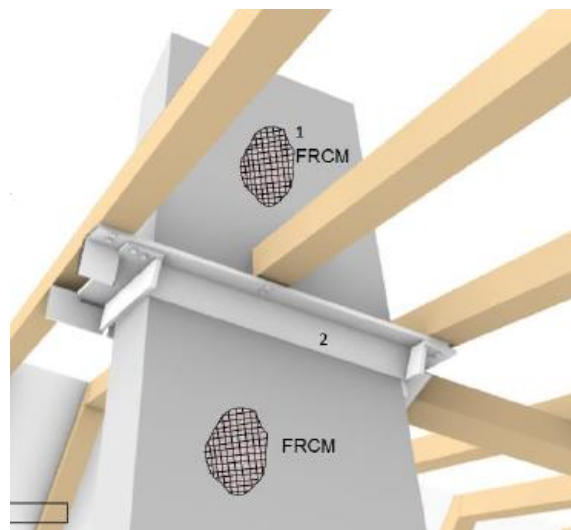
Tijekom pregleda zgrade utvrđeno je izrazito loše krovište te se zahtjeva rekonstrukcija krovne konstrukcije. Dodatno će se ugraditi kosnici koji se spajaju na rogove, a povećavaju horizontalnu krutost te postižu stabilizaciju krovišta. Rekonstruirano krovište potrebno je povezati sa stropnom pločom.



*Slika 75 Stabilizacija krovne konstrukcije kosnicima [16]*

### 8.2.1.4 Dimnjaci

Oštećene dimnjake rušimo te ponovno zidamo tako da ga ovijamo u FRCM (eng. "Fabric-Reinforced Cementitious Matrix"), a u razini krovne konstrukcije ga stabiliziramo dodavanjem L profila koji sprječavaju njegovo prevrtanje. Potrebno je također paziti da je osigurana dobra povezanost sa krovnom konstrukcijom.

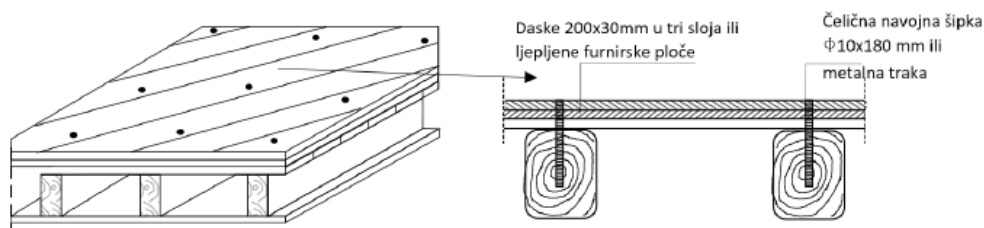


*Slika 76 Pojačanje dimnjaka FRCM sustavom [16]*

## 8.2.2 Razina 2

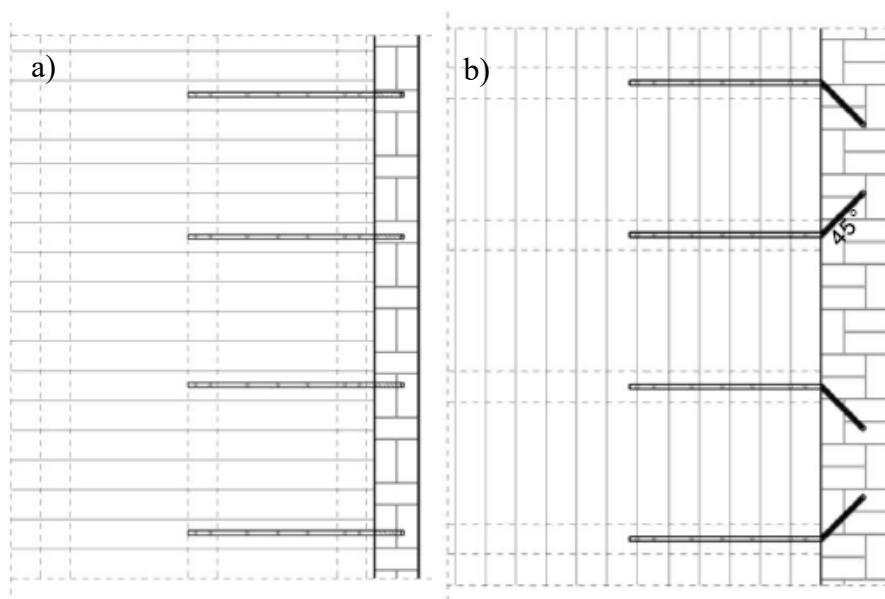
### 8.2.2.1 Pojačanje stropova i poboljšanje veze između stropa, krova i zida

Kako bi ojačali stropnu konstrukciju izvode se tlačne ploče koje se lijepljenjem ili vijcima povezuju za drvene grednike. Drvene tlačne ploče sastoje se od dasaka u tri sloja na način da je prvi okomit na grednike, a drugi i treći sloj su zaokrenuti za  $45^\circ$  odnosno  $135^\circ$  (slika 77).



*Slika 77 Postavljanje drvenih ploča (dasaka) na postojeću oplatu poda [16]*

Ploču je potrebno povezati sa zidovima čime se osigurava učinkovitost tlačne ploče. Čelični limovi presjeka 30x6 mm se koriste za povezivanje stropnih konstrukcija sa zabatnim i nosivim zidovima. Čelični lim se sidri u zabatni zid te se vijčano spaja za drveni podgled, a rupa u zidu se dodatno injektira. Kod nosivih zidova razlika je da se čelični limovi sidre pod kutom od  $45^\circ$  (slika 78) [16]. Navedenim radovima postiže se ojačanje na vertikalna i horizontalna opterećenja, te se međukatna konstrukcija ponaša kao kruta dijafragma.

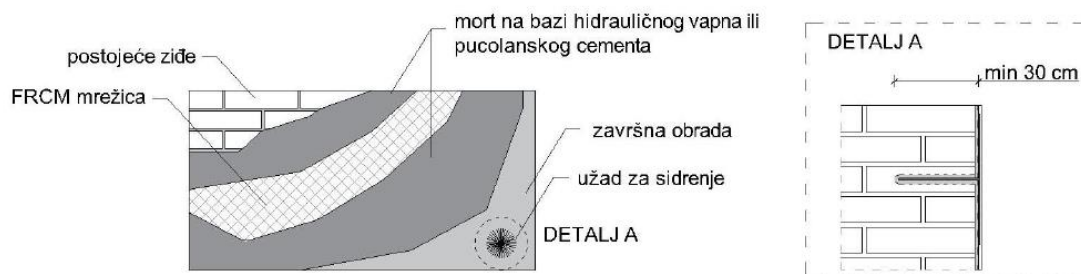


*Slika 78 Povezivanje postojećeg stropa sa: a) zabatnim zidom; b) nosivim zidom [16]*

### 8.2.3 Razina 3

#### 8.2.3.1 Pojačanje zidane zgrade oblogama od vlaknima armiranih polimera (FRP)

FRP su kompozitni materijali koji su sastavljeni od matrice i vlakana. Matrica je najčešće epoksidna, nezasićena poliesterska i vinilesterska smola, dok vlakna mogu biti staklena, aramidna ili ugljična [23]. Poželjno je cijelu zgradu oviti u FRP obloge čime ostvarujemo povezanost zida te samim time onemogućujemo odvajanje zidova budući da se te obloge ponašaju kao horizontalni serklaži. Glavna prednost dodavanja FRP-a umjesto armirano-betonskih ojačanja je ta da se čvrstoća povećava, a krutost i masa ostaju iste. Korištenjem FRP-a također povezujemo međusobne zidove te se ojačavaju i nadvoji. Navedenim ojačanjem rezultiramo povećanjem posmične otpornosti i otpornosti zida na savijanje.



*Slika 79 Pojačanje zidanih zgrada FRCM sustavom [23]*

## 9 Zaključak

Analizirana građevina na adresi Đorđićeva 20 je tipična zidana zgrada iz 19. stoljeća kada se nije računalo na potres već na vjetar. Građena je sa tankim zabatnim zidovima koji stoje nepovezani sa ostatkom konstrukcije. Međutim, kako je zgrada građena u nizu, zabatni zidovi su donekle pridržani sa jedne strane. U protivnome oštećenja bi bila još veća zbog velikog rizika loma zabatnog zida izvan ravnine. Također, krovnište i dimnjaci međusobno nisu dobro povezani zbog straha od požara u to vrijeme te su se dimnjaci gradili kao samostalne konzole. Krovnište nije pravilno povezano sa ostatkom konstrukcije te su se njihovim titranjem stvarala velika oštećenja i jedan su od razloga zašto je treći kat zadobio veća oštećenja u odnosu na druge etaže.

Zgrada je u potresu pretrpjela mnoga oštećenja od kojih su ona najveća na 2. i 3. katu. Iznutra su u grubo izmjereni pomaci od maksimalnih 2,5 cm koji upućuju da se cijela prednja strana zgrade pomaknula prema van, iako se oštećenje ne može primijetiti izvana. Lijevi stan je više stradao zbog nedostatka nosivog zida gdje razmak nosivih zidova iznosi 10,50 što je za 2 m veće vrijednosti od preporučene.

Najveći dio štete posljedica je nepostojanja horizontalnih i vertikalnih serklaža. Njihovim nedostajanjem, zide stoji samostalno bez međusobnog povezivanja sa ostalim zidovima i međukonstrukcijom koja je samo naslonjena na njih. Zbog navedenog došlo je do mnogo većih naprezanja u zidovima nego što to oni mogu podnijeti, a samim time i otkazivanje zida najčešće posmikom i savijanjem uz mnoga pucanja uz otvore prozora.

Zgradu smo kategorizirali oznakom PN2, odnosno dijelovi zgrade se neupotrebljivi te je potrebna hitna intervencija i obnova zgrade.

Proračunom metode postupnog guranja u programskom paketu 3Muri dokazano je da zgrada ne prolazi zahtijevane propise za posmičnu otpornost. Kod svih 24 provedenih analiza različitih raspodjela sila sa različitim ekscentricitetima niti jedna ne zadovoljava uvjete, odnosno kod svih analiza indeks sigurnosti je manji od 1 i to za puno što označava da konstrukcija ne može podnijeti veliki postotak danog potresnog ubrzanja za povratni period od 475 godina. Najmanji indeks značajnog oštećenja dobiven je za mjerodavnu analizu u y smjeru te iznosi 0,306.

Krivulje kapaciteta prikazuju da je konstrukcija duktilna u x smjeru, odnosno za manje vrijednosti bočnog opterećenja ostvaruje veće pomake. S druge strane, konstrukcija sadrži krute kraće zidove u y smjeru koji mogu podnijeti veće vrijednosti potresne sile, ali s druge

strane ostvaruju manji pomak, odnosno nisu duktilni. Dobivenim rezultatima zaključujemo već dokazano, a to je da je zgrada slabija u y smjeru. To smo mogli i zaključiti od ranije budući da je većina nosivih zidova u x smjeru, odnosno konstrukcija je otpornija na potres u x smjeru. Kao kritični mehanizam otkazivanja pokazuje se posmični slom ziđa do kojeg dolazi kada ziđe iscrpi svoju vlačnu čvrstoću do kojeg često dolazi kod otvora prozora i vrata te zabatnih zidova. Najčešće otkazivanje koje karakterizira krajnji korak događa se u prednjem južnom zidu koji se sastoji od iznimno mnogo otvora te stražnjih kratkih zidova zajedno sa stubištem koje je istaknuto iz konstrukcije. Te zidove smatramo kritičnim zidovima te je njihovo ojačanje prijeko potrebno.

Usporedbom modela s fleksibilnom dijafragmom sa modelom s krutom dijafragmom utvrđeno je da se povećanjem krutosti međukonstrukcije dobiva nešto bolji rezultat posmične otpornosti zgrade u smjeru y. Stavljanjem krute dijafragme povećava se indeks sigurnosti za smjer y sa 0,306 na 0,446 za uniformnu raspodjelu sila. S druge strane, za trokutastu raspodjelu sila nisu dobiveni neki značajni učinci na ponašanje zgrade.

Obnovom konstrukcije bitno je povećati posmičnu otpornost zgrade, te se prema tome zahtjeva obnova razine 2 čiji je uvjet minimalni indeks značajnog oštećenja od 0,5. Budući da kritični indeks sigurnosti za analiziranu zgradu iznosi 0,306 nije potrebno puno kako bi ojačali konstrukciju da njezin indeks sigurnosti dignemo na 0,5. Prema tome predloženi su popravci dimnjaka, krovništa, sljubnica i pukotina, a kao znatno ojačanje zgrade dobiva se korištenjem FRP materijala na zidove koji pomaže kod vlačnih naprezanja što je iznimno bitno pošto se kao kritični mehanizam sloma javlja slom posmikom. Kako bi se cijela zgrada ponašala kao jedno, obavezno je osigurati dobru povezanost između zidova te međukatne konstrukcije sa ostatkom konstrukcije. Sukladno s time predložena je izvedba tlačnih ploča čijom izvedbom se povećava krutost međukatne konstrukcije.

Predloženi radovi obnove i ojačanja konstrukcije predloženi su imajući na umu da se želi povećati posmična otpornost zgrade na način da se masa zgrade ne mijenja budući da se povećanjem mase zgrade dobivaju značajne sile inercije. Prema tome pojačanje zidova dodavanjem armiranih cementnih slojeva, horizontalnim zategama, izvedbom AB serklaža ili okvira bačene su u vjetar iako je korištenje FRP materijala znatno skuplje.

## Literatura

- [1] Zajednički informacijski sustav zemljišnih knjiga i katastra-javna aplikacija [Internet]. oss.uredjenazemlja.hr. [Pristupljeno :11.05.2023.]. Dostupno na: <https://oss.uredjenazemlja.hr/map>
- [2] Google. Google Maps [Internet]. Google Maps. Google; 2023 [Pristupljeno: 11.05.2023.]. Dostupno na: <https://www.google.com/maps>
- [3] Uroš, M. Klasifikacija oštećenja zgrada. 2020.
- [4] Kovač D, Šilec V, Jagačić M. Projekt izvanrednog odražavanja popravak i pojačanje konstrukcije. Zagreb: Capital ING d.o.o.; 2020 Srpanj
- [5] Uroš M, Šavor Novak M, Atalić J, Sigmund Z, Baniček M, Demšić M, i sur. Procjena oštećenja građevina nakon potresa - postupak provođenja pregleda zgrada. Lakušić S, urednik. Građevinar. 2021 Srpanj 10;72(12):1089–115.
- [6] Anagnostopoulos, S. A., Moretti, M., Panoutsopoulou, M., Panagiotopoulou, D., Thoma, T.: Post earthquake damage and usability assessment of buildings: further development and applications, Final report, European Commission - D.G. Environment, Civil Protection - EPPO, 2004.
- [7] Črnjević, H. Oštećenje tipične zidane zgrade u Zagrebačkom potresu [Završni rad]. [Građevinski fakultet u Zagrebu]; 2020.
- [8] Mitrović S, Čaušević M. Nelinearni statički seizmički proračuni konstrukcija. Građevinar. 2009 Srpanj 28;61(6):521-31.
- [9] Građevinski fakultet. Analiza potresno otpornih konstrukcija metodom temeljenom na pomacima: Metoda postupnog guranja - Pushover Analysis. Mostar: Sveučilište u Mostaru; 2008 Rujna.
- [10] HRN EN 1998-1:2011. Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC:2009). Hrvatski zavod za norme. Zagreb
- [11] Čaušević M, Zehentner E. Nelinearni seizmički proračun konstrukcija prema normi EN 1998-1:2004. Građevinar. 2007 Travanj 16;9(59):767–77.



- [12] Uroš M, Atalić J, Šavor Novak M, Demšić M, Baniček M. Proračun postojećih konstrukcija u seizmički aktivnim područjima [Bilješke s predavanja-Pushover]. Zagreb: Građevinski fakultet
- [13] Galasco A, Lagomarsino S, Penna A. On the use of pushover analysis for existing masonry buildings. In proceedings of the 1st European conference on earthquake engineering and seismology 2006 Rujan 3 (pp. 3-8). Switzerland: Geneva.
- [14] S.T.A. Data. 3Muri User Manual Release 12.1.1. 2012. Dostupno na: [https://www.3muri.com/documenti/brochure/en/3Muri12.1.1\\_ENG.pdf](https://www.3muri.com/documenti/brochure/en/3Muri12.1.1_ENG.pdf) [Pristupljeno: lipanj 2023].
- [15] Matošević Đ. Ravninski model ponašanja omeđenog ziđa pri cikličkom horizontalnom opterećenju [Doktorska disertacija]. [Građevinski fakultet Osijek]; 2015.
- [16] Galić J, Vukić H, Andrić D, Stepinac L. Tehnike popravka i pojačanja zidanih zgrada. Arhitektonski fakultet; 2020.
- [17] HRN EN 1998-3:2011: Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada (EN 1998-3:2005+AC:2010) Hrvatski zavod za norme. Zagreb
- [18] Karte potresnih područja Republike Hrvatske [Internet]. [seizkarta.gfz.hr](http://seizkarta.gfz.hr). [Pristupljeno: 12.06. 2023]. Dostupno na: <http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/karta.php>
- [19] Pojatina J, Barić D, Anđić D, Bjegović D. Obnova građevinske konstrukcije stambene zgrade u Zagrebu nakon potresa 22. ožujka 2020. Građevinar. 2021 Lipanj 1;73(06):633–48.
- [20] Diaphragms [Internet]. [www.thestructuralengineer.info](http://www.thestructuralengineer.info). [Pristupljeno: 25.06.2023]. Dostupno na: <https://www.thestructuralengineer.info/education/structural-analysis/structural-stability/diaphragms#:~:text=Flexible%20diaphragms%20resist%20lateral%20forces>
- [21] Tena-Colunga A, Abrams DP. Seismic Behavior of Structures with Flexible Diaphragms. Journal of Structural Engineering. 1996 Travanj;122(4):439–45.
- [22] Tehnički propis o izmjeni i dopunama Tehničkog propisa za građevinske konstrukcije [Internet]. [narodne-novine.nn.hr](http://narodne-novine.nn.hr). [Pristupljeno: 26.6.2023.]. Dostupno na: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2020\\_07\\_75\\_1448.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2020_07_75_1448.html)

[23] Uroš M, Atalić J, Šavor Novak M, Demšić M, Baniček M. Proračun postojećih konstrukcija u seizmički aktivnim područjima [Bilješke s predavanja-Ojačanja zgrada]. Zagreb: Građevinski fakultet

## Popis slika

<b>Slika 1</b> Prikaz katastarske čestice [1].....	2
<b>Slika 2</b> 2D prikaz situacije [2] .....	3
<b>Slika 3</b> 3D prikaz situacije [2] .....	3
<b>Slika 4</b> Tlocrt podruma .....	5
<b>Slika 5</b> Tlocrt prizemlja .....	6
<b>Slika 6</b> Tlocrt 1.kata.....	6
<b>Slika 7</b> Tlocrt 2.kata.....	7
<b>Slika 8</b> Tlocrt 3.kata.....	7
<b>Slika 9</b> Poprečni presjek .....	8
<b>Slika 10</b> Naljepnice oštećenja građevina .....	9
<b>Slika 11</b> Prikaz mehanizma otkazivanja zidanih zidova.....	10
<b>Slika 12</b> Oštećenje nosivog luka drugoga kata .....	12
<b>Slika 13</b> Dijagonalno oštećenje zida drugoga kata .....	12
<b>Slika 14</b> Vertikalna oštećenja na spojevima okomitih zidova drugoga kata.....	12
<b>Slika 15</b> Horizontalna oštećenja na razini stropa trećeg kata desnog stana.....	13
<b>Slika 16</b> Horizontalna oštećenja na razini stropa trećeg kata lijevog stana.....	13
<b>Slika 17</b> Odvajanje okomitih zidova trećeg kata desnog stana.....	14
<b>Slika 18</b> Odvajanje okomitih zidova trećeg kata lijevog stana.....	14
<b>Slika 19</b> Dijagonalno oštećenje zabatnog zida i drobljenje stropa trećeg kata lijevoga stana.	15
<b>Slika 20</b> Drobljenje stropa trećeg kata lijevoga stana.....	15
<b>Slika 21</b> Drobljenje stropa trećeg kata lijevog stana.....	16
<b>Slika 22</b> Udubljenje poda kupaonice trećeg kata lijevog stana .....	16
<b>Slika 23</b> Popuštanje zida lastavice .....	16
<b>Slika 24</b> Oštećenje zabatnog zida .....	16
<b>Slika 25</b> Elastični spektri ubrzanja $S_{ae}$ i pomaka $S_{de}$ : (a) tradicionalni pomak, (b) format AD [11] .....	21
<b>Slika 26</b> Zahtijevani spektar za konstantne vrijednosti koeficijenta duktilnosti $\mu$ u formatu AD [11] .....	22

<b>Slika 27</b> Zgrada opterećena bočnim opterećenjem i krivulja nosivosti zgrade [12].....	22
<b>Slika 28</b> Elastični i neelastični spektri u odnosu na dijagram kapaciteta za: a) konstrukcije sa srednjim i dugim periodima; b) konstrukcije s kratkim periodima [11] .....	25
<b>Slika 29</b> Nelinearni element i njegova degradirajuća svojstva [14] .....	27
<b>Slika 30</b> Otkazivanje ziđa u ravnini : (a) savijanje-ljuljanje; (b) posmik-klizanje; (c) dijagonalno posmično pucanje [14] .....	28
<b>Slika 31</b> Idealizacija zidanog elementa makro elementima [14] .....	28
<b>Slika 32</b> Mehanizam otkazivanja savijanjem [16].....	29
<b>Slika 33</b> Mehanizam otkazivanja klizanjem zbog posmika [16] .....	29
<b>Slika 34</b> Mehanizam otkazivanja po dijagonali [16] .....	30
<b>Slika 35</b> Tipični mehanizmi otkazivanja zidanih konstrukcija: a) posmični slom ziđa i vertikalna pukotina na uglu; b) vlačni slom ziđa i vertikalna pukotina na uglu; c) horizontalna pukotina, otkazivanje dugih zidova izvan ravnine; d) globalno otkazivanje zidnog panela; e) dijagonalna pukotina zbog djelovanja sile u ravnini zida; f) otkazivanje na uglovima van ravnine [16] .....	30
<b>Slika 36</b> Mohr-Coulombov kriterij posmičnog popuštanja [14].....	31
<b>Slika 37</b> Turnšek-Čačović kriterij posmičnog popuštanja [14] .....	31
<b>Slika 38</b> Parametri međukatne konstrukcije modelirane u 3Muri programu.....	33
<b>Slika 39</b> Parametri krovnih ploha modelirane u 3Muri programu.....	34
<b>Slika 40</b> Južni 3D prikaz modela i ekvivalentni okviri u programu 3Muri .....	35
<b>Slika 41</b> Sjeverni 3D prikaz modela i ekvivalentni okviri u programu 3Muri .....	35
<b>Slika 42</b> 3D prikaz i tlocrtni prikaz prizemlja u programu 3Muri .....	36
<b>Slika 43</b> 3D prikaz i tlocrtni prikaz 1.kata u programu 3Muri .....	36
<b>Slika 44</b> 3D prikaz i tlocrtni prikaz 2.kata u programu 3Muri .....	36
<b>Slika 45</b> 3D prikaz i tlocrtni prikaz 3.kata u programu 3Muri .....	37
<b>Slika 46</b> Dispozicija čvorova i zidova 4.kata u programu 3Muri .....	37
<b>Slika 47</b> Opterećenje stubišta.....	39
<b>Slika 48</b> Prikaz položaja zgrade sa vršnim ubrzanjem tla [18].....	41
<b>Slika 49</b> Seizmičko opterećenje u programu 3Muri .....	41
<b>Slika 50</b> Uniformna raspodjela potresnog opterećenja "pushover" analize .....	42
<b>Slika 51</b> Statička raspodjela potresnog opterećenja "pushover" analize.....	43
<b>Slika 52</b> Modalna raspodjela potresnog opterećenja "pushover" analize.....	44
<b>Slika 53</b> Prvi modalni oblik u programu 3Muri.....	45

<b>Slika 54</b> Drugi modalni oblik u programu 3Muri .....	46
<b>Slika 55</b> Periodi, modalni oblici i postotak aktivirane mase u određenom modalnom obliku	46
<b>Slika 56</b> Krivulje kapaciteta za x (plavo) i y (crveno) smjer pri uniformnoj raspodjeli potresnog opterećenja .....	49
<b>Slika 57</b> Krivulje kapaciteta za x (plavo) i y (crveno) smjer pri raspodjeli statičkih sila.....	49
<b>Slika 58</b> Otkazivanje zida posmikom [14].....	51
<b>Slika 59</b> Otkazivanje zida savijanjem [14] .....	51
<b>Slika 60</b> 3D prikaz modela sa oštećenjima mjerodavne analize u smjeru x .....	52
<b>Slika 61</b> Krivulja kapaciteta za mjerodavni smjer x .....	53
<b>Slika 62</b> Tlocrtni prikaz pomaka konstrukcije za krajnji pomak mjerodavnog proračuna u x smjeru .....	53
<b>Slika 63</b> Parametri za mjerodavni proračun u x smjeru N2 metode .....	54
<b>Slika 64</b> Krivulja kapaciteta za mjerodavan smjer x na kojem su označene točke oštećenja zida 52 na zidu P2 .....	56
<b>Slika 65</b> 3D prikaz modela sa oštećenjima mjerodavne analize u smjeru y .....	57
<b>Slika 66</b> Krivulja kapaciteta za mjerodavni smjer y .....	58
<b>Slika 67</b> Tlocrtni prikaz pomaka za mjerodavnu analizu u smjeru y.....	58
<b>Slika 68</b> Parametri za mjerodavni proračun u y smjeru N2 metode .....	59
<b>Slika 69</b> Krivulja kapaciteta za mjerodavan smjer y na kojem su označene točke oštećenja zida P6.....	61
<b>Slika 70</b> Krivulje dosega otpornosti zida P6 s obzirom na poprečnu i uzdužnu silu; a) elastična faza i b) faza u točki 2 .....	61
<b>Slika 71</b> Usporedba vrijednosti koeficijenta sigurnosti modela sa krutom dijafragmom (zeleno) i modela sa fleksibilnom dijafragmom (plavo) kod uniformne raspodjele potresnog opterećenja .....	63
<b>Slika 72</b> Usporedba vrijednosti koeficijenta sigurnosti modela sa krutom dijafragmom (zeleno) i modela sa fleksibilnom dijafragmom (plavo) kod statičke raspodjele potresnog opterećenja .....	63
<b>Slika 73</b> Uklanjanje postojećeg morta i utiskivanje novog morta [23].....	66
<b>Slika 74</b> Postupak injektiranja zidanih zidova [16] .....	67
<b>Slika 75</b> Stabilizacija krovne konstrukcije kosnicima [16] .....	68
<b>Slika 76</b> Pojačanje dimnjaka FRCM sustavom [16].....	68
<b>Slika 77</b> Postavljanje drvenih ploča (dasaka) na postojeću oplatu poda [16].....	69

**Slika 78** Povezivanje postojećeg stropa sa: a) zabatnim zidom; b) nosivim zidom [16]..... 69

**Slika 79** Pojačanje zidanih zgrada FRCM sustavom [23] ..... 70

## **Popis tablica**

**Tablica 1** Razine oštećenja za zidane konstrukcije prema [6] ..... 11

**Tablica 2** Svojstva opeke u programu 3Muri..... 32

**Tablica 3** Rezultati metode postupnog guranja..... 48

**Tablica 4** Prikaz boja koje označavaju različite vrste otkazivanja [14]..... 50

**Tablica 5** Faze na dijagramu prikazanom na slici 58..... 51

**Tablica 6** Faze na dijagramu prikazanom na slici 59..... 51

**Tablica 7** Oštećenje zidova metodom postupnog guranja za mjerodavni proračun u x smjeru  
..... 55

**Tablica 8** Oštećenje zidova metodom postupnog guranja za mjerodavni proračun u y smjeru  
..... 60