

# PROCJENA STANJA I MODELIRANJE POJAČANJA ZGRADE GRAĐEVINSKOG FAKULTETA U ZAGREBU

---

Tašner, Luka

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:237:253805>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

**PROCJENA STANJA I MODELIRANJE POJAČANJA  
ZGRADE GRAĐEVINSKOG FAKULTETA U ZAGREBU**

**Diplomski rad**

**Luka Tašner**

**Zagreb, rujan 2023.**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GRAĐEVINSKI FAKULTET



**PROCJENA STANJA I MODELIRANJE POJAČANJA  
ZGRADE GRAĐEVINSKOG FAKULTETA U ZAGREBU**

**Diplomski rad**

**Luka Tašner**

**Mentor: doc. dr. sc. Mislav Stepinac**

UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING



**SEISMIC ASSESSMENT AND MODELLING OF  
STRENGTHENING OF EARTHQUAKE-DAMAGED  
BUILDING OF FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
IN ZAGREB**

**Master's thesis**

**Luka Tašner**

**Mentor: doc. dr. sc. Mislav Stepinac**

*Ovom prigodom izražavam iskrenu zahvalnost:*

*Mentoru doc.dr.sc. Mislavu Stepincu na pomoći, savjetima i strpljenju tijekom izrade ovog rada;*

*Svim profesorima i asistentima Građevinskog fakulteta na prenesenom znanju i pomoći tijekom studiranja; posebno Studio Arhing na ukazanoj prilici, svim materijalima i prekrasnom iskustvu;*

*Dragim prijateljima na podršci i razumijevanju, posebno dečkima „NK Čulinec“ koji su mi bili kao druga obitelj sve ove godine;*

*Mojoj obitelji i curi Luciji na pruženom strpljenju, razumijevanju i podršci tijekom svih uspona i padova.*

## Sadržaj

Sažetak

Abstract

1. Uvod.....	1
1.1. Potresi u Hrvatskoj 2020. godine .....	1
1.2. Tip građevina na potresom pogođenom području.....	4
1.3. Razvoj seizmičkih i građevinskih propisa.....	6
1.4. Posljedice potresa .....	6
2. Pregled stanja područja za postojeće konstrukcije.....	8
2.1. Općenito .....	8
2.2. Metode procjene stanja postojećih zidanih konstrukcija-nerazorne metode.....	10
2.2.1. Vizualni pregled.....	12
2.2.2. Ispitivanje sklerometrom .....	12
2.2.3. Ispitivanje ultrazvučnim metodaama .....	13
2.2.4. Ispitivanje plosnatim prešama.....	14
2.3. Destruktivne metode-in situ ispitivanje vlačne čvrstoće.....	15
2.4. Razvoj novih metoda procjene stanja.....	16
3. Metode seizmičkog proračuna zidanih konstrukcija.....	17
3.1. Metoda ekvivalentnog statičkog opterećenja .....	17
3.2. Modalna analiza .....	19
3.3. Metoda postupnog guranja.....	20
3.4. Nelinearna dinamička metoda u vremenu .....	25
4. Analiza postojećeg stanja konstrukcije te definiranje parametara potrebnih za seizmički proračun studije slučaja.....	26
4.1. Općenito o građevini .....	26

4.2.	Statički sustav i prikaz građevine.....	28
4.3.1	Kategorija građevine i razine uporabljivosti .....	31
4.3.2	Razine graničnih stanja.....	32
4.3.	Vizualni pregled i popis oštećenja građevine.....	34
4.4.	Krovište konstrukcije .....	40
4.5.	Istražni radovi i karakteristike materijala.....	43
4.6.	Zaključak pregleda i analiza postojećeg stanja .....	48
5.	Modeliranje postojeće konstrukcije .....	49
5.1.1	Modeliranje u 3Dmacro-u.....	51
5.1.2.	Modeliranje u programskom paketu 3Muri .....	56
5.2.	Zaključak o modelu nakon rezultata analize.....	61
6.	Metode pojačanja i pojačani model .....	61
6.1.	Metode pojačanja zidanih elemenata.....	61
6.1.1.	Popunjavanje sljubnica novim mortom .....	61
6.1.2.	Injektiranje pukotina i prezidavanje zida.....	63
6.1.3.	Povezivanje zidova armiranobetonskim serklažima .....	65
6.1.4.	FRCM i FRP metode .....	65
6.1.5.	Armirano-betonske obloge (torkretiranje) .....	68
6.1.6.	Metode pojačanja stropnih dijafragmi .....	69
6.2.	Potrebna pojačanja na promatranom modelu.....	71
6.3.	Proračun pojačanja i model u programskom paketu 3DMacro .....	73
7.	Zaključak.....	78
	Literatura.....	82
	Popis slika .....	86
	Popis tablica.....	89

## Sažetak

Tema ovog diplomskog rada jest modeliranje i proračun različitih metoda pojačanja postojeće zidane građevine koja se nalazi u Savskoj cesti u Zagrebu, a u njoj se nalazi odsjek za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Zgrada je oštećena u potresima u Zagrebu i u Petrinji koji se su dogodili 2020.godine. Rad se sastoji od teoretskog i praktičnog dijela. U prvom poglavlju dane su osnovne informacije o potresima u Hrvatskoj 2020. godine, tektonici područja, razvoju građevinskih propisa te šteti u obrazovnom sektoru. U drugom poglavlju opisane su metode procjene stanja postojećih zidanih konstrukcija. Treće poglavlje daje pregled metoda seizmičkog proračuna zidanih konstrukcija s naglaskom na metodi postupnog guranja koja se koristi u ovom radu. Četvrto poglavlje opisuje analizu postojećeg stanja konstrukcije te definiranje parametara potrebnih za seizmički proračun. U petom poglavlju nalazi se praktični dio rada te je dana usporedba modeliranja postojećeg stanja u 3DMacro i 3Muri-ju. Teoretski pregled tehnika popravka i pojačanja konstrukcija nalazi se u šestom poglavlju. Na kraju rada napravljena je zaključak te se osvrnulo na zakone i postojeću legislativu u Republici Hrvatskoj.

Ključne riječi: potres, procjena stanja, zidana konstrukcija, kulturna baština, potresno pojačanje, metoda postupnog guranja, *3Dmacro*, *3Muri*



## **Abstract**

The topic of this thesis is the modeling and calculation of different methods of strengthening the existing masonry building located in Savska cesta in Zagreb, which houses the Department of Hydrotechnics of the Faculty of Civil Engineering in Zagreb. The building was damaged in the earthquakes in Zagreb and Petrinja that occurred in 2020. The paper consists of a theoretical and a practical part. In the first chapter, basic information is given about the earthquakes in Croatia in 2020, the tectonics of the area, the development of building regulations and damage in the education sector. In the second chapter, the methods of assessing the condition of existing masonry structures are described. The third chapter provides an overview of the methods of seismic calculation of masonry structures with an emphasis on the gradual pushing method used in this paper. The fourth chapter describes the analysis of the existing state of the structure and the definition of the parameters required for the seismic calculation. In the fifth chapter, there is a practical part of the work and a comparison of the modeling of the existing state in 3DMacro and 3Muri is given. A theoretical overview of structural repair and strengthening techniques can be found in the sixth chapter. At the end of the paper, a conclusion was made and the laws and existing legislation in the Republic of Croatia were referred to.

Key words: earthquake, post-earthquake assessment, masonry, cultural heritage, seismic strengthening, pushover analysis, *3DMacro*, *3Muri*

## 1. Uvod

### 1.1. Potresi u Hrvatskoj 2020. godine

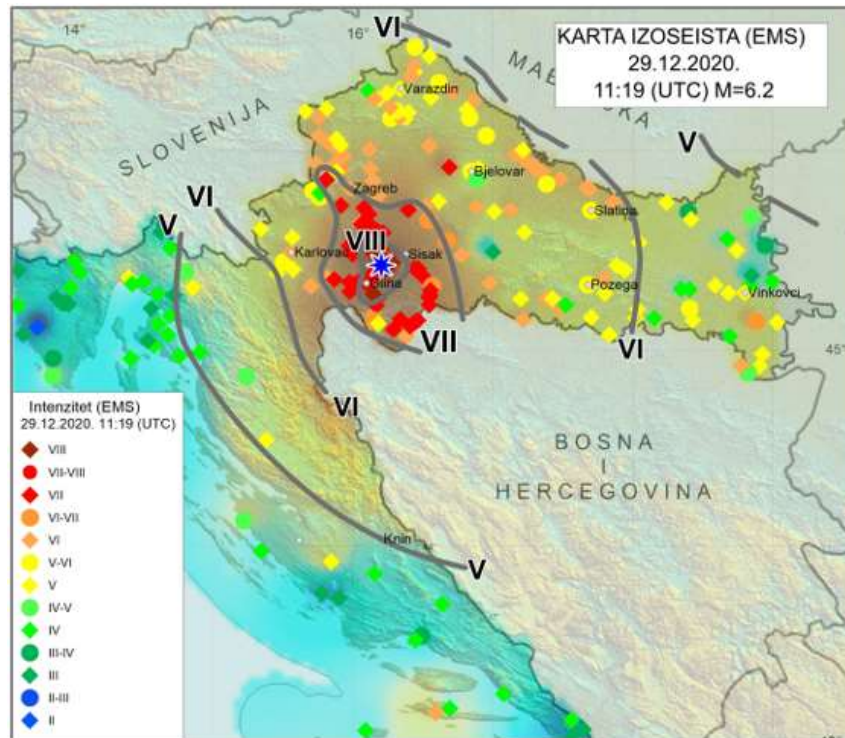
U Hrvatskoj su se 2020. godine dogodila dva razorna potresa koji su uzrokovali veliku štetu u materijalnom, socijalnom i ekonomskom aspektu kako u gradu Zagrebu, tako i u susjednim županijama. Potres je odnio osam ljudskih života, od kojih je prvi petnaestogodišnja djevojčica nastradala u Klaićevoj ulici u Zagrebu (1). Stotine obitelji izgubilo je svoje domove te su raseljeni diljem Hrvatske. Oštećena je mnoga kulturna baština, kao i velik broj građevina iz javnog ili ekonomskog aspekta života.

22. ožujka 2020. godine Zagreb su u ranojutarnjim satima dogodila dva potresa. Prvi potres bio je magnitude 5.5 po Richteru, procijenjenog intenziteta VII na EMS-98 ljestvici, što označava štetan potres. Epicentar potresa nalazio se 7 km sjeverno od donjeg grada, blizu gradskog naselja Markuševac, s procijenjenom dubinom hipocentra od 10 km, što ga svrstava u kategoriju plitkih potresa (2). Magnituda drugog potresa iznosila je 4.9 po Richteru (3). No međutim, to nije prvi potres ovakvih razmjera koji je pogodio grad Zagreb. Posljednji ovakav potres u Zagrebu dogodio se 1880. godine, kada je područje pogodio potres magnitude 6.2 po Richteru. Tada je velik dio grada pretrpio značajna oštećenja, a čak 13% građevina je srušeno (4,5). Na slici jedan su prikazana oštećenja uzrokovana potresom 2020. godine.



*Slika 1. Prikaz oštećenja tipične donjogradske zgrade u Zagrebu*

Drugi značajan, intenzitetom jači, potres na području Hrvatske dogodio se šest mjeseci kasnije, 29. prosinca 2020. godine. Oko 12 sati, područje Sisačko-moslavačke županije pogodio je potres magnitude 6.2 po Richteru, procijenjenog intenziteta u epicentru VIII-IX prema EMS-98 ljestvici (slika 2), što označava jako štetan, odnosno destruktivan potres. Potres je izazvao štetu i u Zagrebačkoj, Karlovačkoj i Krapinsko-zagorskoj županiji te Gradu Zagrebu (6).



Slika 2. Karta procijenjenog intenziteta (prema EMS-98) petrinjskog potresa s obzirom na prijave građana (7)

Dan ranije, 28. prosinca, glavnom potresu prethodilo je više potresa manjih magnituda. Zabilježen je potres magnitude 5.0 na udaljenosti 5 kilometara od Petrinje. Taj potres popraćen je desecima manjih, od kojih su najznačajniji bili magnitude 3.8 i 4.5. Vjerujući da je najgore i za njih, stanovnici Petrinje i okolnih područja nisu ni slutili šta ih čeka slijedeći dan, 29. prosinca, kada je to područje pogodio već spomenut, razoran potres. U slijedeća tri dana, to područje je bilo pogođeno sa više od 2000 potresa, od kojih je čak 9 bilo magnitude veće od 4.0 (7).

Kao i u gradu Zagrebu i područje središnje Hrvatske je u povijesti bilo pogođeno sa nekoliko jačih potresa. Najjači potres koji se do tada dogodio na tom području bio je magnitude 5.8, a dogodio se 1909. godine. Upravo je taj potres poslužio poznatom hrvatskom znanstveniku i

geofizičaru Andriji Mohorovičiću kako bi unaprijedio i dodatno istražio svoje znanje o širenju potresnih valova kroz samo tlo te postao prvi u svijetu koji je otkrio diskontinuitet brzine koja odvaja jezgru od zemljinog plašta. Njemu u čast taj diskontinuitet se naziva Mohorovićev diskontinuitet. Nakon tog potresa, također je slijedilo dosta naknadnih potresa, od čega je najznačajniji onaj iz siječnja 1910. godine, koji je bio magnitude 5.3. U zadnjih 100 godina, najznačajniji potres na tom području se zbio 1996. godine magnitude 4.5. Posljedice su bile dosta blaže nego od potresa koji se zbio 2020. godine, pri čemu su predmeti padali sa polica, popucali dijelovi dimnjaka i sa krova je pao pokoji crijep (7).

Seizmička aktivnost na području središnje Hrvatske može se opisati kao umjerena s rijetkom pojavom jakih potresa. Područja koja se posebno ističu su zagrebačko područje vezano uz Žumberačko-medvednički rasjed te područje Banije vezano uz Pokupski i Petrinjski. Međutim, potresi su česta pojava na području cijele Hrvatske. Seizmo-tektonske karakteristike na području Hrvatske vrlo su složene jer uključuju nezavisno gibanje Jadranske mikroploče te gibanje Afričke ploče prema Euroazijskoj. Jadranska mikroploča, koja se nalazi između Afričke i Euroazijske ploče, pomiče se prema relativno stabilnoj Euroazijskoj ploči pod utjecajem Afričke ploče (slika 3). Usljed tog kretanja dolazi do rasta naprezanja u stjenovitom, krtom dijelu Zemljine kore; kada dođe do prekoračenja posmične čvrstoće stijena ili rasjeda dolazi do sloma i naglog otpuštanja dotad akumulirane energije u obliku potresnih valova (8).

Prema izvješću Hrvatskog geološkog instituta razlog nastanka potresa na Banovini je aktivacija dva međusobno okomita rasjeda čije je sjecište samo nekoliko kilometara udaljeno od Petrinje: Pokupskog i Petrinjskog rasjeda (8). Rasjed se pruža smjerom SZ – JI, prolazi Pokupljem te se nalazi u području kontakta planinskog područja Dinarida i Panonskog bazena, na koje direktno utječe već spomenuto gibanje Jadranske mikroploče prema Euroazijskoj ploči (9).



Slika 3. Tektonske granice i gibanja tektonskih ploča na području istočnog Sredozemlja (8)

Petrinjski potres uzrokovao je veliku materijalnu štetu. Samo na području Sisačko-moslavačke županije, u kojoj se nalaze najteže pogođeni gradovi Petrinja, Sisak i Glina, šteta se procjenjuje na 4.8 milijarde eura, a troškovi rekonstrukcije i obnove na gotovo duplo više, 8.4 milijarde eura (10). Građevinski stručnjaci krenuli su obavljati brze preglede građevina nedugo nakon potresa, služeći se spoznajama i iskustvima nakon potresa u Zagrebu. Iako je fokus bio na Sisačko-moslavačkoj županiji, pregledi su izvršeni i u ostalim potresima pogođenim županijama. Pregled se sastojao od vizualne inspekcije građevine i upisivanja podataka u mobilnu aplikaciju koja je razvijena nakon zagrebačkog potresa. Za potrebe ovih pregleda aplikacija je unaprijeđena i modificirana s obzirom na tipologiju građevina u pogođenim područjima (10). Prema podacima Hrvatskog centra za potresno inženjerstvo, do 10. svibnja 2021. na području Sisačko-moslavačke županije prijavljeno je preko 57 000 oštećenih objekata, dok je preko 37 000 pregledano od strane stručnjaka (11). S obzirom da potresom pogođeno područje Banije već desetljećima ekonomski i socijalno stagnira (što je posljedica sporog oporavka nakon Domovinskog rata, između ostalog), šteta nastala potresom dodatno će otežati okolnosti ovog područja (10).

## 1.2. Tip građevina na potresom pogođenom području

Potresi u Zagrebu i Petrinji uzrokovali su nerazmjernu štetu na građevinama. Jedan od razloga je loša kvaliteta postojećeg građevinskog fonda u kontinentalnoj Hrvatskoj. Tipična zgrada za grad Zagreb sastoji se od suterena, prizemlja i tri dodatna kata (12). Zgrade su većinom građene od opeke, popunjavane mortom. Stopne dijafragme su drvene, najčešće grednici sa podgledom od

trstike. Građevine su izvedene prema pravilima i principima gradnje tadašnje Austro-ugarske s početka 20. stoljeća (2). Veliki dijelovi povijesnih gradskih jezgri izgrađeni su prije uvođenja prvih seizmičkih potresa u Jugoslaviji 1964. godine. Podjela građevina s obzirom na vrijeme izgradnje navedena je u nastavku:

- Do 1940. većina građevina izvodi se od nearmiranog ziđa, s masivnim zidovima od kamena ili pune opeke debljine 25-50 cm (kamen) ili 25-38-51 cm (opeka); kao vezno sredstvo koristi se vapneni mort često nedostatne kvalitete. Međukatne konstrukcije zgrada izgrađenih do 1920. činili su fleksibilni stropovi od drvenih grednika, slabo povezani sa nosivim zidovima. Pred kraj ovog razdoblja drvene stropove zamjenjuju krute betonske dijafragme čija se debljina postupno povećava. Dodatne karakteristike građevina iz ovog razdoblja su visoki, strmi drveni krovovi bez odgovarajućeg ukrućenja u ravnini krova, nepridržani visoki zabatni zidovi, zatim visoki, nepridržani masivni dimnjaci i brojni ukrasni elementi na pročelju. Procjenjuje se da je trećina svih građevina u Hrvatskoj iz ovog razdoblja.
- Od 1941. do 1970. uz tradicionalne tehnike gradnje i materijale postupno se povećava uporaba armiranog betona. Zidane konstrukcije izvode se sa vertikalnim i horizontalnim serklažima.
- Od 1971. do 1980. u urbanim sredinama grade se objekti od armiranog betona, uglavnom kruti okviri i zidni sustavi, a koriste se i predgotovljeni armirano-betonski elementi (zidovi i okviri). Zidane konstrukcije grade se od šuplje opeke, minimalne debljine zidova od 19 do 25 cm.
- Od 1981. do danas grade se zidane, armirano-betonske, metalne te, u manjoj mjeri, drvene konstrukcije od lijepljeno lameliranih drvenih elemenata.

Na području Sisačko-moslavačke županije građevine su uglavnom slične onima u Zagrebu, ali nešto niže katnosti. Odlike takovih zgrada su: fleksibilne međukatne konstrukcije, nedostatak kvalitete zidane opeke i morta, visoki zabatni zidovi, visoki masivni dimnjaci, masivni ukrasni elementi na pročeljima zgrada itd. Također valja napomenuti da postoje oštećenja i na nešto drugačijem tipu zgrada, a to su obiteljske kuće sanirane poslijeratnom obnovom krajem 90-ih goidna prošlog stoljeća. To su uglavnom zidane konstrukcije izvedene od sitne opeke s vapneno-cementnim mortom lošije kvalitete. Pretpostavlja se da su zgrade temeljene na tankoj betonskoj ploči ili trakastim temeljima, na tlu male nosivosti i velike deformabilnosti. Prizemlja su uglavnom izdignuta iznad terena, a čest je i izostanak vertikalnih serklaža. Vanjski zidovi često nisu zaštićeni žbukom te se često može vidjeti nedovoljna visina ili nedostatak horizontalnih serklaža.

Međukatna konstrukcija ovih zgrada izvedena je kao fert-strop ili tanka armirano-betonska ploča. Krovne konstrukcije uglavnom su drvene. Slabija kvaliteta izgradnje i nedostatak prijeko potrebnih omeđujućih konstrukcijskih elemenata može se povezati sa slabijim imovinskim stanjem stanovnika ovog područja (13).

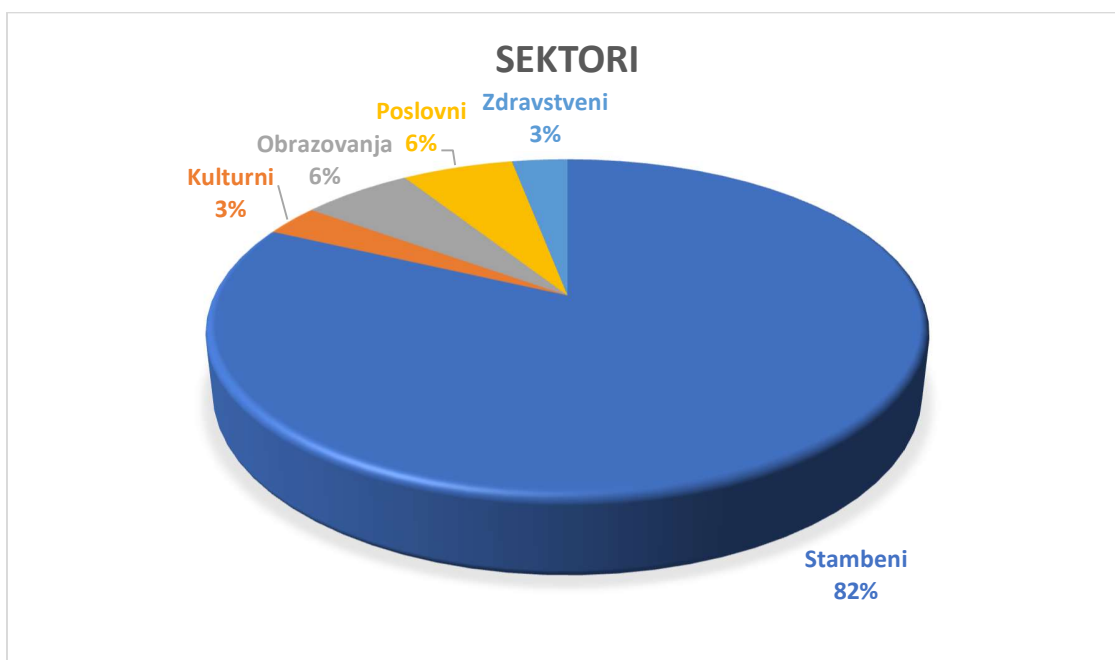
### **1.3. Razvoj seizmičkih i građevinskih propisa**

Nakon Drugog svjetskog rata zidane konstrukcije izvodile su se u skladu s postojećim nacionalnim propisima. 1948. godine donesena je odredba kojom se propisuje izvedba horizontalnih serklaža u zidanim konstrukcijama u seizmički aktivnim područjima, no odredba se slabo poštivala do 1964. godine, kada su nakon potresa u Skopju 1963. godine stupili na snagu novi propisi za gradnju u seizmički aktivnim područjima. Nisu se mijenjali do 1979. godine kada se dogodio potres u Crnoj Gori, a obnovljene norme izdane su 1981. godine. I propisi iz 1964. godine i propisi iz 1981. godine primjenjivali su se na području bivše Jugoslavije sve do njenog raspada početkom 90-ih godina prošlog stoljeća. Hrvatska je tek 2005. godine uvela prednormu HRN EN 1998 kao temeljni priručnik za projektiranje građevinskih konstrukcija, a od 2010. godine temeljna norma je Eurocode 1998 (14). Temeljni propis za projektiranje je Tehnički propis za građevinske konstrukcije.

### **1.4. Posljedice potresa**

Usljed zagrebačkog potresa, život je izgubila jedna osoba. Što se tiče materijalne štete, najviše štete uslijed potresa u Zagrebu pretrpio je stambeni sektor čak 64%. Njega slijedi sektor kulturne baštine i spomenika koji čini ukupno 13%, sektor obrazovanja 10%, zdravlje 8% te poslovanje 5%. Sveukupno je 78% šteta i gubitaka u privatnom sektoru, a 22% u javnom sektoru. U privatni sektor većinom ulaze stambeni i poslovni, dok u javni pripadaju obrazovni i zdravstveni sektor. Stambeni sektor je sektor najviše pogođen katastrofom sa oko 24 000 oštećenih zgrada raspoređenih po cijelom potresom pogođenom području. Procjenjuje se da ih oko 5% ima veliko strukturalno oštećenje, dok oko 19% ima umjereno strukturalno oštećenje. Ukupna vrijednost štete za stambeni sektor iznosi oko 6,88 milijardi eura. Ukupni broj zgrada zdravstvenog sektora je 214. Velika strukturalna oštećenja zabilježena su na 4% zgrada, a na 19% zabilježeno je umjereno strukturalno oštećenje. Ukupna šteta iznosi oko 826 milijuna eura. U sektoru obrazovanja pregledano je i procijenjeno 513 objekata. Teška strukturalna oštećenja zabilježena su na 2% zgrada, a umjerena na njih 31%. Ukupna šteta za ovaj sektor procjenjuje se na 1,07 milijardi eura.

U sklopu sektora kulturne baštine pregledane su 192 kulturne ustanove, 13 objekata državne baštine i 159 sakralnih objekata. Umjereni oštećenja utvrđena su na 32% građevina, a velika konstruktivna oštećenja na 11%. Ukupna šteta procjenjuje na 1,38 milijardi eura (5). Podaci su prikazani u grafičkom prikazu 1.

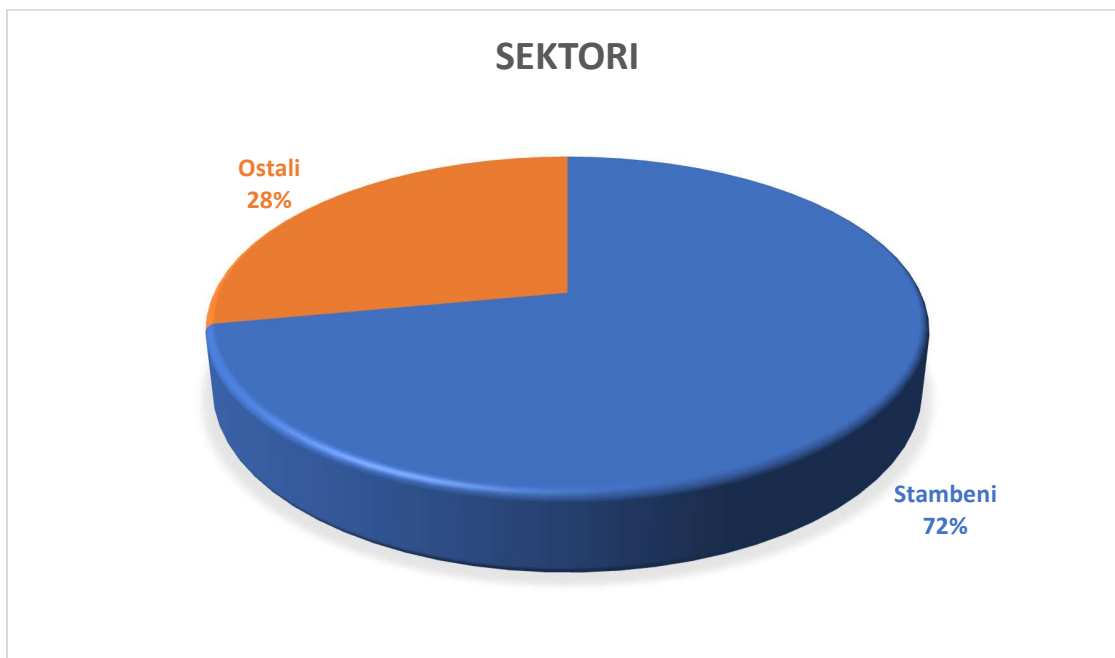


*Grafički prikaz 1. Oštećenost raznih sektora uslijed potresa u Zagrebu 2020. godine*

Prilikom potresa u Petrinji, život je izgubilo sedam osoba. Ukupno to daje osam žrtava u dva razorna potresa. Materijalna šteta je i ovoga puta najveća u stambenom sektoru, čak 72%, dok preostali sektori zauzimaju 28%. Najveći dio toga otpada na obiteljske kuće te na stambene zgrade. Procjenjuje se da je pregledano ukupno 34552 objekta. Od toga je pregledano 755, a za ostalih 25% zaključci su doneseni na temelju prethodno sakupljenih podataka i informacija. Količina teško oštećenih objekata je 8%, dok je 21% karakterizirano kao privremeno neuporabljivo, sa umjerenim oštećenjima. Ostalih 70% je pretrpjelo manja oštećenja i karakterizirane su kao uporabljive. U urbanim zonama Siska, Petrinje i Gline čak 53 % pretrpjelo je značajna oštećenja. Cijena za ovaj sektor procjenjuje se na 2,98 milijuna eura. U sektoru obrazovanja je pregledan 271 objekat, pri čemu se šteta procjenjuje na 174 miliona eura. U zdravstvenom sektoru pregledano je 274 objekta, od čega 58 nema strukturalno oštećenje, 1 zgrada je procijenjena neuporabljivom, a njih 4 kao privremeno neuporabljive. Ukupna šteta procjenjuje se na 167 milijuna eura. U sektoru



kulturne baštine pregledana su 442 objekta, od čega ih čak 28% ima jako strukruralno oštećenje. Totalna šteta procjenjuje se na 473.1 milijuna eura (6). Podaci su prikazani u grafičkom prikazu 2.



*Grafički prikaz 2. Oštećenost raznih sektora uslijed potresa u Petrinji 2020. godine*

## 2. Pregled stanja područja za postojeće konstrukcije

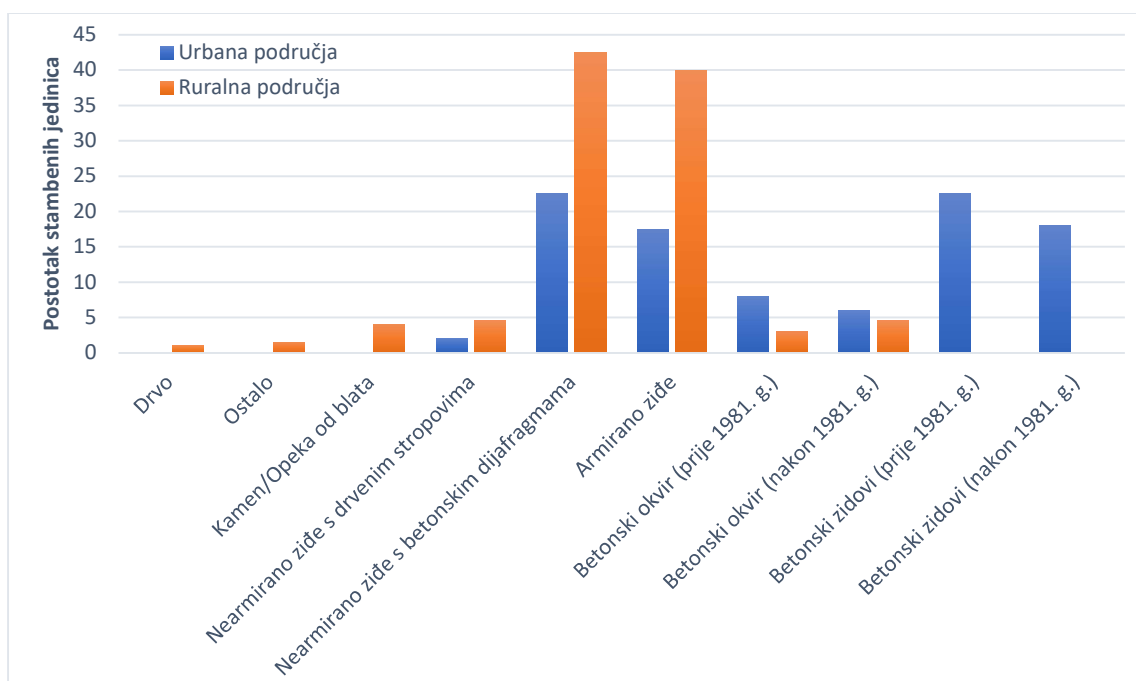
### 2.1. Općenito

Kako u Europi, tako i u Hrvatskoj, postoji dugogodišnja tradicija gradnje zidanih građevina. Mnoge građevine takvog tipa imaju veliku kulturnu i povijesnu važnost, stoga je procjena stanja i praćenje ponašanja postojećih građevina od presudne važnosti. Iako je za procjenu stanja i praćenje ponašanja konstrukcije potrebno uložiti vrijeme i značajna sredstva, rezultati tih napora su zaštita uložениh sredstava, sigurnost i pouzdanost konstrukcije te očuvanje kulturne i povijesne baštine.

Zidane konstrukcije su spregnuti sustavi koji se sastoje uglavnom od opečnih elemenata (opeke) koji su međusobno povezani slojevima morta. I opeka i mort mogu biti različitih mehaničkih karakteristika, kao i različitog materijala. Dimenzije opeke (širina, visina i duljina) kao i debljina morta koji pokriva određene površine također značajno utječu na mehaničko ponašanje zida. Tlačna čvrstoća je jedan od bitnijih parametara kod zidanog zida te je vrlo važna

njena procjena i nesigurnosti u njenom modeliranju. Pri ocjeni postojećih konstrukcija klase čvrstoća su najčešće nepoznate, stoga bi metode ocjenjivanja upravo trebale biti usmjerene ka određivanju tih svojstava do najvećeg stupnja sigurnosti, kako bi smo nesigurnost u pogledu otpornosti konstrukcije mogli svesti na minimum. Parametri koji se uvijek mjere pri procjeni zidanih konstrukcija su: tlačna čvrstoća zidnog elementa, tlačna čvrstoća morta za zidanje, čvrstoća na pritisak, posmik i savijanje ziđa, modul elastičnosti te geometriju zidane konstrukcije (15).

Izloženost građevina u Hrvatskoj vrlo slabo je definiran parametar te otežava procjenu stvarnog seizmičkog rizika za građevine. Jedan od projekata koji je imao za cilj definiranje izloženosti u Hrvatskoj je NERA (*Network of European Research Infrastructures for Earthquake Risk Assessment and Mitigation*). U sklopu tog projekta prikupljeni su podaci o tipovima stambenih jedinica, a klasifikacija građevina napravljena je prema procjeni stručnjaka i pomoću *Google Street View* aplikacije (15). Rezultati klasifikacije dani su na grafičkom prikazu 3.



Grafički prikaz 3. Zastupljenost stambenih jedinica po tipu građevine prema procjeni stručnjaka (15)

Prema prikazu se da lako zaključiti da je nearmirano ziđe dosta zastupljeno u ruralnim područjima. Kako se Hrvatska nalazi na području umjerene do visoke seizmičnosti, ocjene stanja postojećih građevina itekako su od velike važnosti.

Potreba za procjenom stanja postojeće konstrukcije može se javiti iz mnogo razloga, na primjer: produljenje uporabnog vijeka konstrukcije, promjena namjene konstrukcije, izloženost izvanrednim, nepredviđenim djelovanjima (npr. potres, požar), nedostatak pregleda i održavanja konstrukcije tijekom duljeg perioda itd. (15).

Pri procjeni stanja postojeće konstrukcije, prvi korak je preliminarna procjena stanja koja uključuje istraživanje i pregled postojeće dokumentacije, vizualni pregled konstrukcije, mjerenje geometrije, provjeru mehaničke otpornosti i stabilnosti te izradu preliminarnog izvještaja (snimka stanja postojeće konstrukcije). Zatim se provodi detaljan pregled materijala, konstrukcije, njezinih elemenata i spojeva. Zadnji korak je izrada glavnog projekta i projekta budućih intervencija (12).

## **2.2. Metode procjene stanja postojećih zidanih konstrukcija-nerazorne metode**

Metodama procjene stanja postojećih konstrukcija služimo se kako bismo odredili razinu svojstva određenog dijela, elementa, spoja ili čak ukupne građevine. Jako su važne jer nam pokazuju stvarno stanje građevine, koje se ne da naslutiti golim okom, a u nekim slučajevima, ako se ne spriječi, može biti katastrofalnih posljedica. Dijele se na razorne i nerazorne metode. Razorne metode zahtijevaju uzimanje uzorka materijala za ispitivanje, najčešće u laboratoriju te nisu prigodne za sve situacije, pogotovo u naseljenim stambenim zgradama gdje prilikom procesa vađenja uzorka uzrokuju veliku prašinu i komade žbuke te su veoma glasne i bučne. Nerazorne metode ne oštećuju građevinu, pa su vrlo bitne za procjenu stanja povijesnih građevina kod kojih je prioritet očuvanje graditeljske i kulturne baštine. U nastavku su navedene najčešće nerazorne metode u tablici 1.

Tablica 1. Najčešće nerazorne metode za procjenu stanja postojećih zidanih konstrukcija (15)

Nerazorna metoda	Uređaji/alati za mjerenje	Što se mjeri?	Kako se mjeri?
Vizualni pregled	-	Kvaliteta opeke (meh. karakteristike, geometrija, oblik), kvaliteta morta i kvaliteta spojeva među zidovima	Provodi se bez dodatnih uređaja; koriste se osnovna pravila i smjernice (npr. indeks kvalitete ziđa).
Mjerenje tvrdoće ziđa	Sklerometar	Tlačna čvrstoća zidnih elemenata, morta i ziđa (neizravno)	Unaprijed određen broj ispitivanja provodi se u horizontalnom i vertikalnom smjeru.
Ultrazvučna ispitivanja	Impulsni čekić i akcelerometar	Cjelovitost i homogenost ziđa, prisutnost šupljina i pukotina	Impulsni čekić i akcelerometar postavljaju se s obje strane ziđa. Udarcem čekića generira se mehanički val koji bilježi akcelerometar. Vrijeme prolaska vala koristi se za izračun brzine koja ukazuje na kvalitetu ziđa.
Infracrvena termografija	Infracrvene kamere, infracrveni termometar	Nepравilnosti i oštećenja u konstrukciji, prisutnost vlage, položaj i stanje armature	Snimanjem promjene raspodjele površinske temperature prilikom zagrijavanja i hlađenja utvrđuju se defekti i oštećenja.
Ispitivanje plosnatim prešama (engl. <i>flat-jack test</i> )	Tlačni jastuci	Tlačna i posmična čvrstoća ziđa te modul elastičnosti ziđa	U dva horizontalna ili jedan vertikalni izrez u ziđu postavlja se preša (tlačni jastuk) koja se puni tekućinom. Povećanjem volumena preše naprezanja se prenose na ziđe.

### ***2.2.1. Vizualni pregled***

Predstavlja korak od kojeg bi se trebalo krenuti pri svakoj procjeni stanja postojećih građevina. Njime se dobivaju vrlo korisne informacije o građevini: gruba procjena stanja, podaci o oštećenjima i nepravilnostima, specifičnosti lokacije itd. (15). Ovisno o rezultatima vizualnog pregleda, stručna osoba koja provodi pregled daje preporuke za daljnje postupanje, najčešće se rade daljnja ispitivanja ukoliko su uočene određene nepravilnosti ili sumnje u zadovoljenje pojedinih zahtjeva kvalitete (16). Prednosti ove metode su jednostavnost i brzina provođenja, mala cijena koštanja te rezultati koji su odmah dostupni. Nedostaci metode su potreba za iskusnim osobljem, mogućnost krivog interpretiranja uočenih oštećenja te uočavanje samo većih oštećenja na građevini (17). Za obavljanje vizualnog pregleda konstrukcija često je potrebno koristiti različite dizalice, pomične platforme ili specijalna vozila kojima bi se omogućio pristup svim mjestima na konstrukciji. Faze u provedbi vizualnog pregleda: zahtjev za provedbu vizualnog pregleda, definiranje radnog zadatka, priređivanje podloga za provedbu pregleda, provedba pregleda, obrada rezultata vizualnog pregleda, izrada izvješća s ocjenom stanja objekta, arhiviranje dokumentacije i predaja izvještaja naručitelju (16).

### ***2.2.2. Ispitivanje sklerometrom***

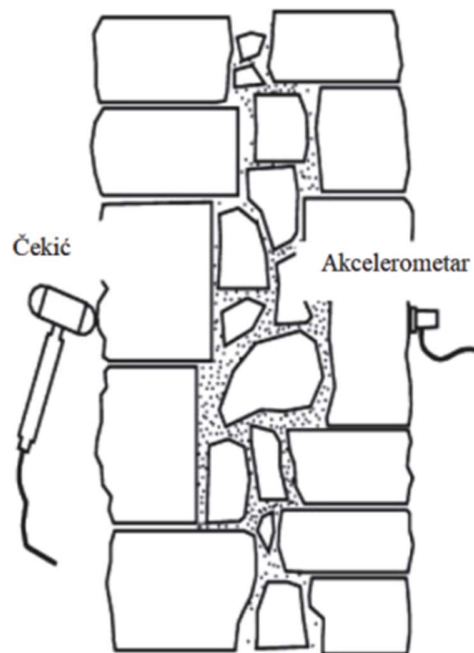
Sklerometar je alat kojim se neizravno određuje tlačna čvrstoća zida. To je zapravo instrument sastavljen od čeličnog čekića i opruge, koja ga pokreće. Ticalo koje se nalazi na vrhu udara u površinu otpuštanjem opruge. Zapravo se mjeri veličina odskoka sklerometra tj. Indeks sklerometra. Prije samog pokusa, sklerometar je potrebno kalibrirati pomoću posebnog uređaja (16). Metoda se smatra vrijednom zbog toga što je vrlo jednostavna za primjenu i dosta je jeftina, pa ima prednost u odnosu na druge postupke iako su ponekad oni i precizniji u određivanju potrebnog parametra (15). Nedostaci ove metode su sljedeći: rezultati pokazuju lokalno ponašanje, osjetljiva je na stanje površine i njenu vlažnost, prikladnija za kompozitne materijale poput betona te nije potpuno nedestruktivna jer ostavlja malu udubinu na mjestu mjerenja (17). Klasični sklerometar prikazan je na slici 4.



*Slika 4. Sklerometar tipa Digi Schmidt (16)*

### **2.2.3. Ispitivanje ultrazvučnim metodaama**

Mjerenje brzine zvuka ili tzv. ultrazvuk imaju jako široku primjenu u građevinarstvu, pogotovo u području zidanih konstrukcija. Metoda funkcionira na način da se sa svake strane zida nalazi po jedan pretvornik koji se na površinu zida spaja gelom ili gumenim pločicama. Razlog tome je da se ostvari maksimalan prijenos energije. Jedan pretvornik šalje ultrazvučni val kroz poprečni presjek zida te ga drugi prihvaća i pretvara nazad u električnu energiju. Za niske frekvencije koristi se gumeni čekić koji svojim materijalom od kojeg je izrađen određuje energiju i frekvenciju vala koji proizvodi. S druge strane zida nalazi se akcelerometar koji prihvaća valove proizvedene čekićem. Na temelju brzine prolaska vala moguće je dobiti niz informacija o materijalu od kojega je zid napravljen kao i o šupljinama unutar samog zida. Izuzev rasporeda šupljina unutar zida, moguće je dobiti vrijednost modula elastičnosti, faktora prigušenja kao i procjenu čvrstoće zida. Najveća je prednost ove metode ta da je relativno jeftina. Na kraju, bitno je napomenuti da iako se često koriste kod zidanih konstrukcija, ove metode nisu najprikladnije kod povijesnih građevina, pa se često se primjenjuju u kombinaciji s nekim drugim metodama (18). Nedostaci ove metode su potreba za educiranim osobljem, kriva interpretacija signala, manje nepravilnosti mogu značajno utjecati na konačan rezultat te se brzina valova automatski računa. Jedan od načina ove metode prikazan je na slici 5.

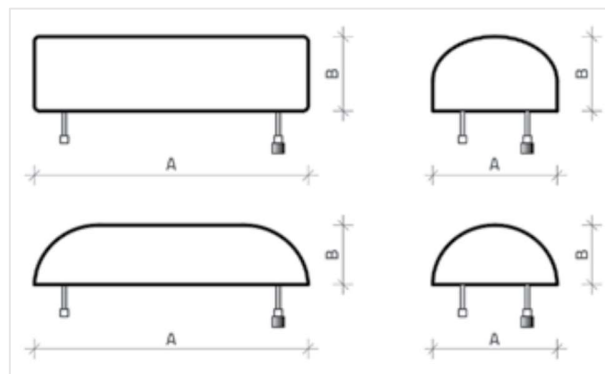


*Slika 5. Prikaz ultrazvučne metode za niske frekvencije*

#### **2.2.4. Ispitivanje plosnatim prešama**

U nizu nerazornih metoda, sustav testova sa plosnatim prešama (engl. flat jack) svakako je vrijedno izdvojiti (18). Primjena plosnatih preša vrlo je pouzdana metoda za određivanje mehaničkih svojstava zida – to se prvenstveno odnosi na vertikalno naprezanje u zidu i modul elastičnosti zida, no moguće je odrediti i tlačnu i posmičnu čvrstoću zida. Opremu za provođenje ispitivanja čine: plosnate preše i podložne ploče za umetanje preša u otvore u zidu, hidraulični sustav za nanošenje tlaka, mjerni uređaji za mjerenje pomaka/relativnih deformacija, alati za izradu otvora (npr. prstenasta pila) te alat za čišćenje. Plosnata preša ima oblik mjehurica koji se dobije zavarivanjem dviju čeličnih ploča po obodu: Tlak u nju se nanosi pomoću hidraulične preše za koju postoje odgovarajući ulazni i izlazni ventil na samoj plosnatoj ploči. Postoje različiti oblici koji su prikazani na slici 6. Čelične podložne ploče štite preše od oštećenja prilikom umetanja u otvore u zidu te njihove dimenzije odgovaraju dimenzijama plosnatih preša. Za izradu otvora koriste se razni alati (bušilice, ubodne pile, prstenaste pile), a vrlo je bitno da dimenzije otvora odgovaraju dimenzijama plosnate preše jer utječu na rezultate ispitivanja. U slučaju ispitivanja sa

plosnatim prešama polukružnog oblika, za otvaranje otvora koristi se ekscentrična prstenasta pila. Sustav za nanošenje tlaka sastoji se od hidraulične pumpe, manometra i spojnih crijeva. Za mjerenje pomaka/relativnih deformacija obično se koriste prijenosni komparatori. Ploče je prije uporabe potrebno kalibrirati posebnim uređajima (19). Negativne strane ove metode su svakako duže vrijeme provedbe, bušenje i rezanje zida nije jednostavno (pogotovo ako je on kamen), potrebno je česta kalibracija te nije u potpunosti nedestruktivna jer ostavlja rupe u mortu koje je potrebno naknadno nadopuniti (17).



*Slika 6. Različiti oblici plosnatih preša (19)*

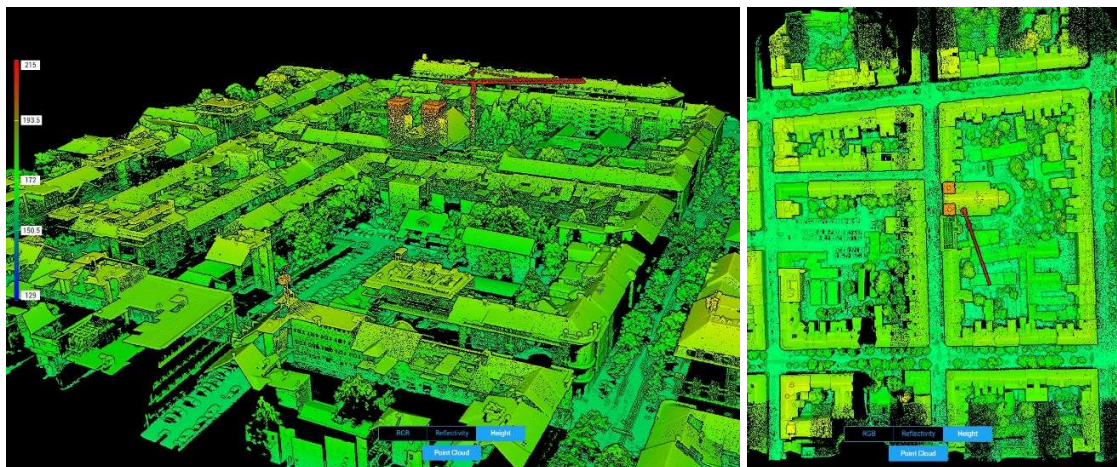
### **2.3. Destruktivne metode-in situ ispitivanje vlačne čvrstoće**

Ova metoda svakako spada u jednu od korisnijih jer je moguće poprilično točno odrediti vlačnu čvrstoću zida. Najprije se pronade odgovarajuće mjesto za provedbu ove metode, najčešće je to blizu već postojećeg otvora. Zatim se postavi hidraulična preša na polovicu visine zida pomoću koje se unosi horizontalna sila u nekoliko načina opterećenja i rasterećenja. Vlačni slom se očituje nastankom kosih pukotina ispod i iznad mjesta djelovanja horizontalne sile. Potrebno je unaprijed odrediti tlačno naprezanje u vertikalnom smjeru pomoću opterećenja zida i stropova iznad mjesta ispitivanja. Ovakav tip ispitivanja se najčešće provodi na nižim etažama, u prizemlju ako je moguće. Međutim ova metoda sa sobom povlači i negativne strane. Jako je teško odrediti povoljno mjesto za ispitivanje, pogotovo ako je potrebo izrezati dva vertikalna otvora ostavljajući pri tome neporemećeni dio zida između njih. Također preraspodjela naprezanja oko tih otvora otežava proračun tlačnim naprezanja na tom mjestu (19).



## 2.4. Razvoj novih metoda procjene stanja

U prošlosti se procjena stanja postojećih konstrukcija temeljila na vizualnom pregledu, nerazornim metodama i iskustvu/prosudbi inženjera, no razvojem novih tehnologija pojavile su se nove metode procjene stanja konstrukcija koje značajno olakšavaju procjenu pouzdanosti konstrukcije i njezino ponašanje u potresu. Infracrvene kamere primjenjuju se u dijagnostici stanja zgrada i omogućuju otkrivanje nedostataka i oštećenja vezanih uz prijenos topline. Multispektralne kamere koriste se za procjenu štete i otkrivanje pukotina. Snimanje dronom (engl. *Unmanned Aerial Vehicle, UAV*) koristi se u kriznim situacijama, za pronalazak pukotina obradom slika, procjenu potresne oštetljivosti te konstrukcijsku procjenu stanja građevina. LiDAR (engl. *Light Detection and Ranging*) uređaji koriste se nakon potresa za skeniranje pogođenih područja. LiDAR uređaji koriste impulsni laser i laserski skener za određivanje koordinata mjerenih točaka. Prikupljanjem dovoljnog broja podataka moguće je izraditi 3D model skeniranog područja (slika 7) ili objekta. Prednosti LiDAR uređaja su: brzo i precizno prikupljanje podataka; korištenje uglavnom ne ovisi o vremenskim uvjetima. Nedostaci metode su velike baze podataka, neisplativo korištenje za detektiranje manjih oštećenja građevina te visoka cijena.



*Slika 7. Model gradske jezgre dobiven laserskim snimanjem iz zraka (20)*

Koristeći kamere s multisenzornim sustavima i geoprostorne baze podataka moguće je kreirati fotorealistične 3D modele građevina visoke rezolucije, vršiti preglede teško dostupnih ili opasnih mjesta te detektirati slabo vidljiva oštećenja i deformacije. Prednost fotogrametrijske metode je njezina jednostavnost i brzina prikupljanja podataka; nedostatak je što mogućnost korištenja ovisi

o vremenskim uvjetima, a potrebna je i kompleksna obrada fotografija za dobivanje 3D modela građevine (21).

### 3. Metode seizmičkog proračuna zidanih konstrukcija

Seizmička analiza temeljni je dio potresnog projektiranja konstrukcija, a uvela se prije nešto više od 100 godina; prve inženjerske preporuke za seizmičku analizu uvedene su u Italiji, 1909. godine. Za proračun konstrukcija počela se koristiti statička metoda ekvivalentnog horizontalnog djelovanja koje je iznosilo oko 10% ukupne težine konstrukcije. 1957. godine u Sovjetskom savezu je razvijena linearna modalna analiza koja je kasnije postala glavna metoda proračuna u Europi. 1977. godine u Sloveniji je razvijena nelinearna statička metoda postupnim guranjem, koja se zadržala kao vrlo prikladna metoda za proračun postojećih zidanih konstrukcija (22). Napredak računala i računalnih programa omogućio je razvoj naprednijih i točnijih, ali složenijih metoda. Novije metode u sebi sadrže inženjerske koncepte temeljene na ponašanju konstrukcija (engl. *performance-based engineering concept*), čime se veća pažnja pridodaje kontroli oštećenja. Najprecizniji rezultati dobivaju se korištenjem nelinearnog dinamičkog proračuna uporabom zapisa ubrzanja u vremenu (engl. *Time-history method*). Međutim, ta je metoda uslijed svoje kompleksnosti još uvijek neprimjerena za svakodnevnu inženjersku praksu (23).

#### 3.1. Metoda ekvivalentnog statičkog opterećenja

Linearni statički proračun primjenom ekvivalentnog statičkog opterećenja najjednostavnija je metoda za seizmički proračun konstrukcija. Prema Eurokodu 8 (24) primjenjuje se na zgrade čiji odziv nije značajnije osjetljiv na doprinose oblika oscilacija većih od osnovnog oblika u svakom glavnom smjeru. Taj zahtjev je ispunjen ako vrijedi:

$$\bullet \quad T_1 \leq \begin{cases} 4 \cdot T_c \\ 2,0 \text{ s} \end{cases} \quad (1)$$

pri čemu je  $T_c$  – vrijednost perioda elastičnog spektra odziva ovisan o vrsti tla,  $T_1$  – period prvog oblika oscilacija zgrade u svakom glavnom smjeru.

- Zgrada ispunjava kriterije pravilnosti po visini.

Potresno djelovanje na koje se proračunava konstrukcija uzima se kao ukupna poprečna sila u podnožju građevine (engl. *base shear*) u dva horizontalna, međusobno okomita smjera:

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda \quad (2)$$

pri čemu je  $S_d(T_1)$  ordinata proračunskog spektra odziva za osnovni period titranja konstrukcije u promatranom smjeru,  $m$  ukupna masa konstrukcije, a  $\lambda$  popravni koeficijent čija vrijednost ovisi o osnovnom periodu i broju katova konstrukcije.

Potresno horizontalno opterećenje raspodjeljuje se po katovima konstrukcije u ovisnosti o masi i pomaku kata, tj. ukupna poprečna sila u podnožju građevine zamjenjuje se ekvivalentnim statičkim silama na konstrukciju:

$$F_i = F_b \cdot \frac{s_i \cdot m_i}{\sum(s_j \cdot m_j)} \quad (3)$$

pri čemu je  $F_i$  horizontalna sila na katu  $i$ ,  $F_b$  ukupna poprečna sila u podnožju građevine, a  $s_i$  i  $s_j$  pomaci masa  $m_i$  i  $m_j$  u osnovnom obliku oscilacija.

Ako je osnovni oblik oscilacija aproksimiran horizontalnim pomacima koji se linearno povećavaju prema vrhu, horizontalne sile računaju se kao:

$$F_i = F_b \cdot \frac{z_i \cdot m_i}{\sum(z_j \cdot m_j)} \quad (4)$$

pri čemu su  $z_i$  i  $z_j$  visine masa  $m_i$  i  $m_j$  iznad mjesta unosa sile u građevinu (temelji ili vrh krutog podruma).

### 3.2. Modalna analiza

Za seizmičku analizu građevina koje ne zadovoljavaju uvjete za primjenu metode ekvivalentnog statičkog djelovanja primjenjuje se linearni dinamički modalni proračun spektrima odziva. Za razliku od metode ekvivalentnog statičkog djelovanja koja uzima u obzir samo osnovni oblik oscilacija, modalna analiza uzima u obzir sve oblike oscilacija koji značajno doprinose globalnom odzivu konstrukcije (24). Modalna analiza referentna je metoda za proračun konstrukcija u Eurokodu 8 i najraširenija u primjeni.

Klasična modalna analiza zasniva se na transformaciji izvornih koordinata u matricnoj jednadžbi ravnoteže sustava s više stupnjeva slobode u modalne koordinate, čime se dobiva sustav neovisnih jednadžbi s jednim stupnjem slobode. Svaka jednadžba sadrži jedan oblik, period i prigušenje titranja. Ukupni odziv sustava dobiva se kao zbroj odziva za svaku jednadžbu. Iako ima široko područje primjene, postoje slučajevi kada se modalna analiza ne može primijeniti: kod sustava s izrazito različitim prigušenjima pojedinih dijelova sustava (npr. okolnog tla i građevine) i kod neelastičnih sustava (npr. kada se očekuje pojava plastičnih zglobova) (25).

Pri proračunu modalnom analizom moraju se uzeti u obzir svi oblici koji značajnije doprinose globalnom odzivu. Postoje dva uvjeta (24):

- Zbroj djelotvornih modalnih masa oblika koji su uzeti u obzir u proračunu mora iznositi najmanje 90% ukupne mase konstrukcije;
- Svi oblici s modalnom masom većom od 5% ukupne mase konstrukcije moraju se uzeti u obzir.

Za dobivanje vrijednosti odziva (pomak, moment savijanja, poprečna sila i dr.) koja će se koristiti pri dimenzioniranju konstrukcije, nužno je koristiti pravila modalnih kombiniranja. ABSSUM ili pravilo apsolutne sume glasi da je gornja granica ukupnog odziva jednaka zbroju apsolutnih vrijednosti vršnih odziva za sve oblike oscilacija koji su uzeti u obzir. Ovo pravilo je konzervativno i neekonomično, pa se rijetko primjenjuje za proračune uobičajenih konstrukcija. SRSS ili pravilo drugog korijena sume kvadrata je odlična aproksimacija za konstrukcije s udaljenim periodima, a loša aproksimacija za konstrukcije s bliskim periodima (npr. nesimetrične građevine). Za takve konstrukcije koristi se CQC ili pravilo potpune kvadratne kombinacije koje uvodi koeficijent korelacije promatranih oblika oscilacija (25).

### 3.3. Metoda postupnog guranja

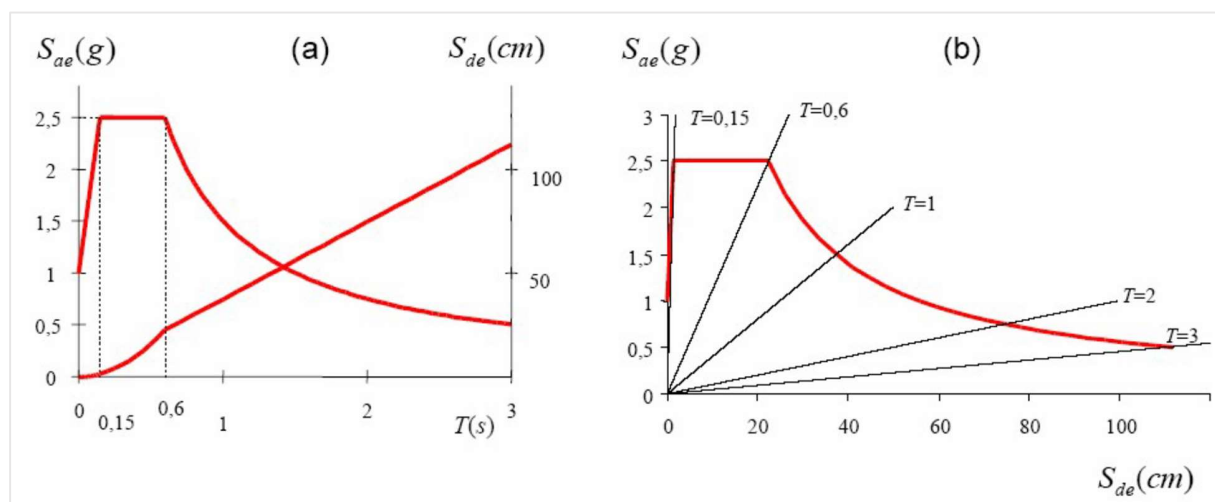
Metoda postupnog guranja (engl. *Pushover analysis*) je nelinearna statička analiza koja se provodi za stalna gravitacijska opterećenja i monotono rastuća horizontalna opterećenja. Metoda se koristi za ocjenu ponašanja novih ili postojećih konstrukcija, za određivanje mjerodavnih plastičnih mehanizama te kao alternativa linearno-elastičnim metodama proračuna koje se temelje na koeficijentu ponašanja  $q$  (24). Iako se metoda može koristiti za proračun nesimetričnih građevina i mostova, najtočniji rezultati dobivaju se pri proračunu ravninskih, tj. simetričnih konstrukcija koje osciliraju u prvom modu (obliku) (26). Eurokod 8 koristi N2 metodu postupnog guranja razvijenu na Sveučilištu u Ljubljani, no postoje i druge slične metode: metoda spektra kapaciteta definirana u FEMA 440, metoda koeficijenata i nelinearni statički proračun u FEMA 356. Sve tri metode koriste postupak postupnog guranja, a razlikuju se u načinu definiranja ciljanog pomaka konstrukcije. U nastavku je dan detaljan opis N2 (N – nelinearan model, 2 – dva matematička modela) metode prema (26)(27):

I. korak metode odnosi se na prikupljanje podataka o konstrukciji i definiranje elastičnog spektra ubrzanja tla  $S_{ae}$ . Podaci o konstrukciji uključuju informacije o geometriji i materijalima, ali i nelinearne odnose sile-deformacija za konstrukcijske elemente podvrgnute monotono rastućem horizontalnom opterećenju. Elastični spektar pseudoubrzanja tla određuje seizmički zahtjev na konstrukciju.

II. korak metode odnosi se na definiranje spektra zahtjeva na konstrukciju u obliku AD (ubrzanje-pomak) (slika 8). Za elastični sustav s jednim stupnjem slobode (engl. *Single degree of freedom, SDOF*), spektar ubrzanja  $S_{ae}$  i spektar pomaka  $S_{de}$  povezani su sljedećim odnosom:

$$S_{de} = \left( \frac{T^2}{4\pi^2} \right) \cdot S_{ae}$$

(5)



Slika 8. Elastični spektar ubrzanja i pomaka u tradicionalnom formatu (a) i formatu AD (b) (27)

Nakon određivanja elastičnog spektra, za nelinearni SDOF sustav određuju se reducirani spektri ubrzanje-pomak (slika 9) putem sljedećih odnosa:

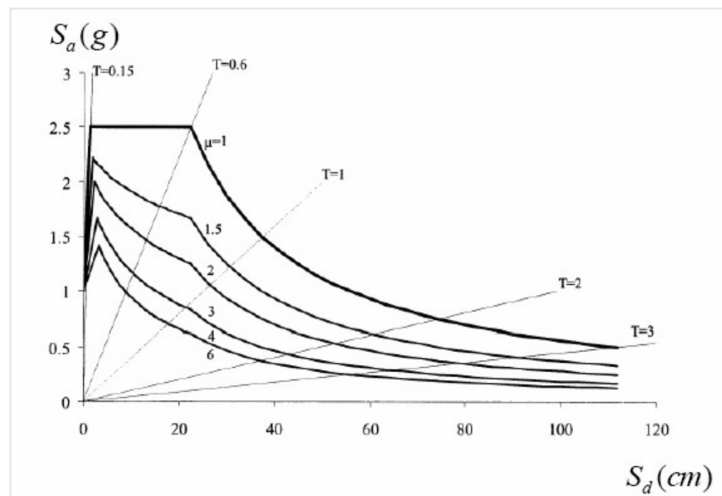
$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \quad (6)$$

$$S_d = \left( \frac{\mu}{R_\mu} \right) \cdot S_{de} = \frac{\mu}{R_\mu} \cdot \frac{T^2}{4\pi^2} \cdot S_{ae} \quad (7)$$

pri čemu je  $\mu$  koeficijent duktilnosti koji se može definirati kao odnos najvećeg pomaka i pomaka pri popuštanju materijala, a  $R_\mu$  faktor umanjenja uslijed histereznog ponašanja duktilne konstrukcije i trošenja potresne energije. Faktor  $R_\mu$  ovisi o više parametara kao što su krutost nakon popuštanja, histerežno ponašanje, vrsta i veličina prigušenja, amplitude neelastičnih pomaka, period vlastitih vibracija itd. Za bilinearni spektar koeficijent redukcije određuje se kao:

$$R_\mu = \begin{cases} (\mu - 1) \cdot \frac{T}{T_C} + 1, & T < T_C \\ \mu, & T \geq T_C \end{cases} \quad (8)$$

gdje je  $T_C$  vrijednost perioda elastičnog spektra odziva ovisan o tipu tla.



Slika 9. Elastični spektar i reducirani spektri za različite vrijednosti  $\mu$  (27)

III. korak metode je proračun postupnim guranjem. Potrebno je prvo pretpostaviti vektor oblika pomaka za model  $\{\Phi\}$  i odrediti raspodjelu horizontalnih sila po visi kao umnožak mase kata i komponente pretpostavljenog oblika pomaka:  $P_i = m_i \cdot \phi_i$ . Odabir odgovarajućeg rasporeda horizontalnog opterećenja bitan je korak za određivanje nelinearnog odnosa između poprečne sile i najvećeg pomaka u sustavu s više stupnjeva slobode (engl. *Multiple degrees of freedom, MDOF*) koji se dobije postupnim guranjem.

IV. korak metode je transformacija MDOF sustava u ekvivalentni SDOF sustav. Pretvorba se vrši konstantom  $\Gamma$  koja predstavlja faktor sudjelovanja pojedinog oblika oscilacija i određuje se kao:

$$\Gamma = \frac{\sum(m_i \cdot \phi_i)}{\sum(m_i \cdot \phi_i^2)} \quad (9)$$

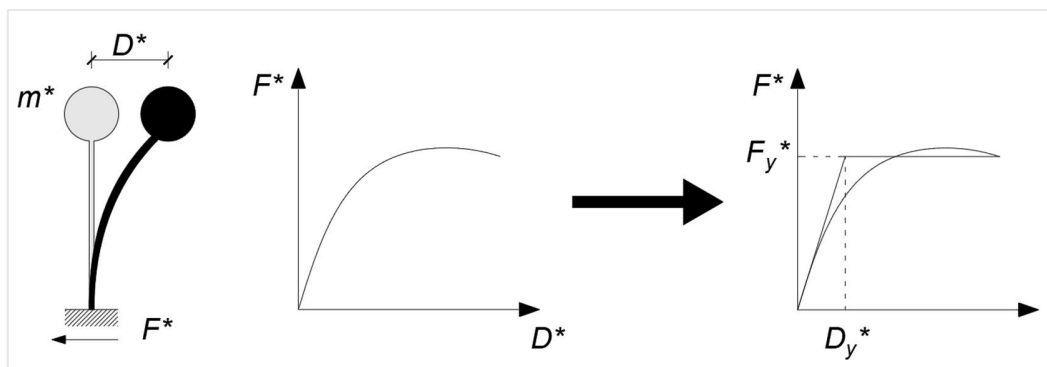
pri čemu je  $m_i$  masa, a  $\phi_i$  vektor pomaka  $i$ -te razine promatranog MDOF sustava. Pomak  $D^*$  i poprečna sila u podnožju zgrade  $F^*$  ekvivalentnog SDOF sustava procjenjuju se pomoću izraza:

$$D^* = \frac{D}{\Gamma} \quad (10)$$

$$F^* = \frac{F}{\Gamma}$$

(11)

pri čemu su  $D$  i  $F$  vršni pomak i vršna poprečna sila u podnožju MDOF sustava. S obzirom da se za transformaciju pomaka i sile koristi ista veličina, početna krutost ekvivalentnog SDOF sustava ostaje ista kao za početni MDOF sustav. Nelinearan odnos sila-pomak za SDOF sustav potrebno je aproksimirati odgovarajućim elastoplastičnim oblikom (slika 10). Pri tome se često koristi inženjerska prosudba, iako se ponekad mogu naći i odgovarajuće upute u propisima.



Slika 10. Idealizacija nelinearne krivulje sila-pomak bilinearnom krivuljom

Krutost  $k^*$  i period  $T^*$  zamjenskog sustava određuju se kao:

$$k^* = \frac{F^*}{D^*}$$

(12)

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k^*}} = 2\pi \sqrt{\frac{\sum(m_i \cdot \phi_i)}{k^*}}$$

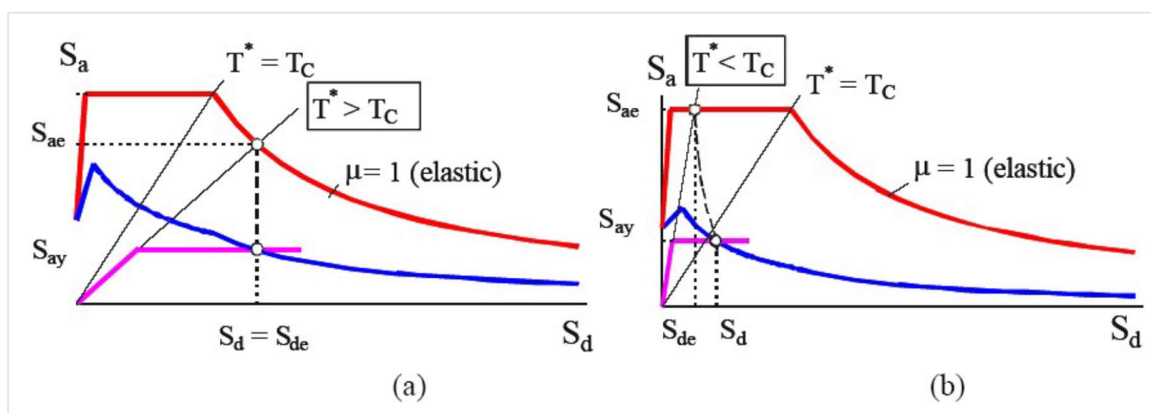
(1)

Konačno, krivulja kapaciteta (odnos ubrzanja i pomaka) određuje se tako da se sile sadržane u krivulji sila-pomak ekvivalentnog SDOF sustava podijele s ekvivalentnom masom  $m^*$ :



$$S_a = \frac{F_y^*}{m^*} \quad (2)$$

V. korak metode odnosi se na određivanje seizmičkih zahtjeva na SDOF sustav. Seizmički zahtjev može se odrediti grafičkim postupkom prikazanim na slici 11. Sjecište radialne linije koja odgovara elastičnoj krutosti u bilinearnom idealiziranom sustavu (ljubičasto) i elastičnog spektra zahtjeva (crveno) označava potrebnu nosivost za elastično ponašanje i odgovarajući elastični pomak. Zahtjev neelastičnog pomaka (plavo) dobiva se pomoću faktora umanjenja  $R_\mu$  iz II. koraka.



Slika 11. Grafički postupak za određivanje zahtjeva elastičnog i neelastičnog pomaka (27)

Ako je elastični period  $T^*$  veći od  $T_c$ , tada je zahtjev neelastičnog pomaka jednak zahtjevu elastičnog pomaka. U protivnom je zahtjev neelastičnog pomaka veći od zahtjeva elastičnog pomaka. Grafički zahtjev neelastičnog pomaka može se definirati kao sjecište krivulje kapaciteta i spektra zahtjeva neelastičnosti za odgovarajući faktor umanjenja  $R_\mu$ .

U VI. Koraku potrebno je najveći pomak SDOF sustava transformirati u najveći pomak vrha zgrade, tj. MDOF sustava:

$$D_t = \Gamma \cdot D^* \quad (3)$$

VII. korak metode odnosi se na određivanje lokalnih seizmičkih zahtjeva. Ponovno se provodi proračun postupnim guranjem do pomaka  $D_t$  na MDOF modelu. Pomak  $D_t$  predstavlja ciljani

pomak (engl. *target displacement*) iz dodatka B Eurokoda 8 (24). Na kraju je potrebno odrediti potrebne veličine (katne pomake, rotacije čvorova) koje odgovaraju pomaku  $D_t$ .

Posljednji i VIII. korak je ocjena ponašanja konstrukcije. Seizmički zahtjevi iz VII. koraka uspoređuju se s kapacitetom nosivosti odgovarajuće razine ponašanja. Ocjena ponašanja vrši se na globalnoj i lokalnoj razini. Primjerice, ocjena ponašanja na globalnoj razini može se provesti usporedbom kapaciteta pomaka i pomaka prema seizmičkom zahtjevu.

### 3.4. Nelinearna dinamička metoda u vremenu

Nelinearna dinamička metoda u vremenu, unatoč većoj preciznosti od navedenih metoda, još uvijek nije prikladna za svakodnevnu inženjersku praksu zbog svoje kompleksnosti. Razlikuju se dvije metode: modalna analiza i direktna numerička integracija. Pri primjeni modalne analize ukupan pomak masa MDOF sustava izražava se kao linearna kombinacija karakterističnih modalnih pomaka u funkciji vremena. Direktna numerička integracija koristi se za rješavanje diferencijalnih jednadžbi gibanja sustava pri čemu je gibanje temeljnog tla uslijed potresa zadano preko zabilježenih akceleroograma stvarnih potresa. Rješenje diferencijalnih jednadžbi je odziv konstrukcije u vremenu (24). Prednost metode je što uzima u obzir nelinearno ponašanje konstrukcije te vremensko trajanje i promjenu opterećenja. Nedostatak metode je velika količina podataka i dugotrajno vrijeme potrebno za njihovu obradu.

## 4. Analiza postojećeg stanja konstrukcije te definiranje parametara potrebnih za seizmički proračun studije slučaja

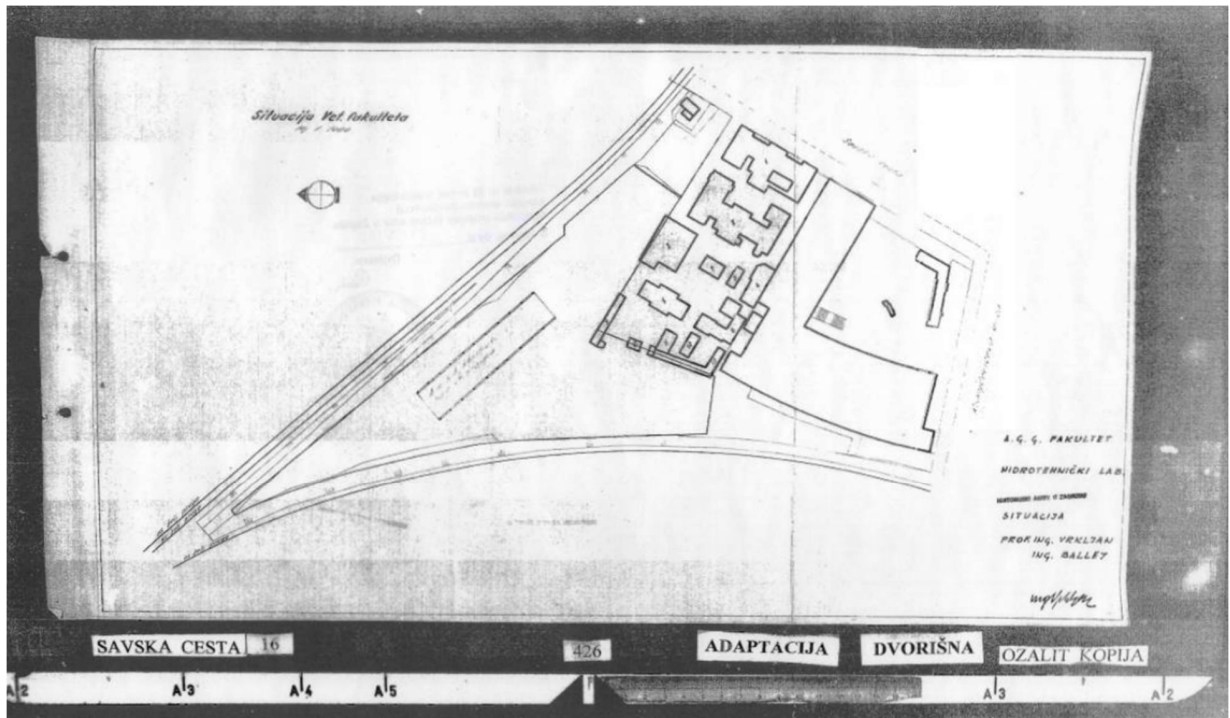
### 4.1. Općenito o građevini

Javna građevina smještena je na adresi Savska cesta 16/1 u Zagrebu. Nalazi se na katastarskoj čestici k.č.br. 823/4, katastarska općina k.o. Trešnjevka. Prostorni položaj građevine prikazan je na slici 12. Površina katastarske čestice iznosi 923 m<sup>2</sup> i nepravilnog je oblika, tj. prati oblik građevine i orijentirana je u smjeru sjeveroistok - jugozapad. Predmetna građevina nalazi se unutar Povijesne urbane cjeline grada Zagreba koja je kulturnopovijesna cjelina te kao takva ima status zaštićenog kulturnog dobra te je upisana u Registar kulturnih dobara RH pod brojem Z-1525. Zgrada je izgrađena u drugoj polovici 19. stoljeća te je tijekom povijesti dograđivana i rekonstruirana, a zadnja građevinska dozvola izdana je 1960. godine kad se namjena zgrade 1 i zgrade 2 mijenjala za potrebe hidrotehničkog laboratorija tadašnjeg Arhitektonsko-građevinsko-geodetskog fakulteta. Izvadak iz arhiva prikazan je na slikama 13 i 14.

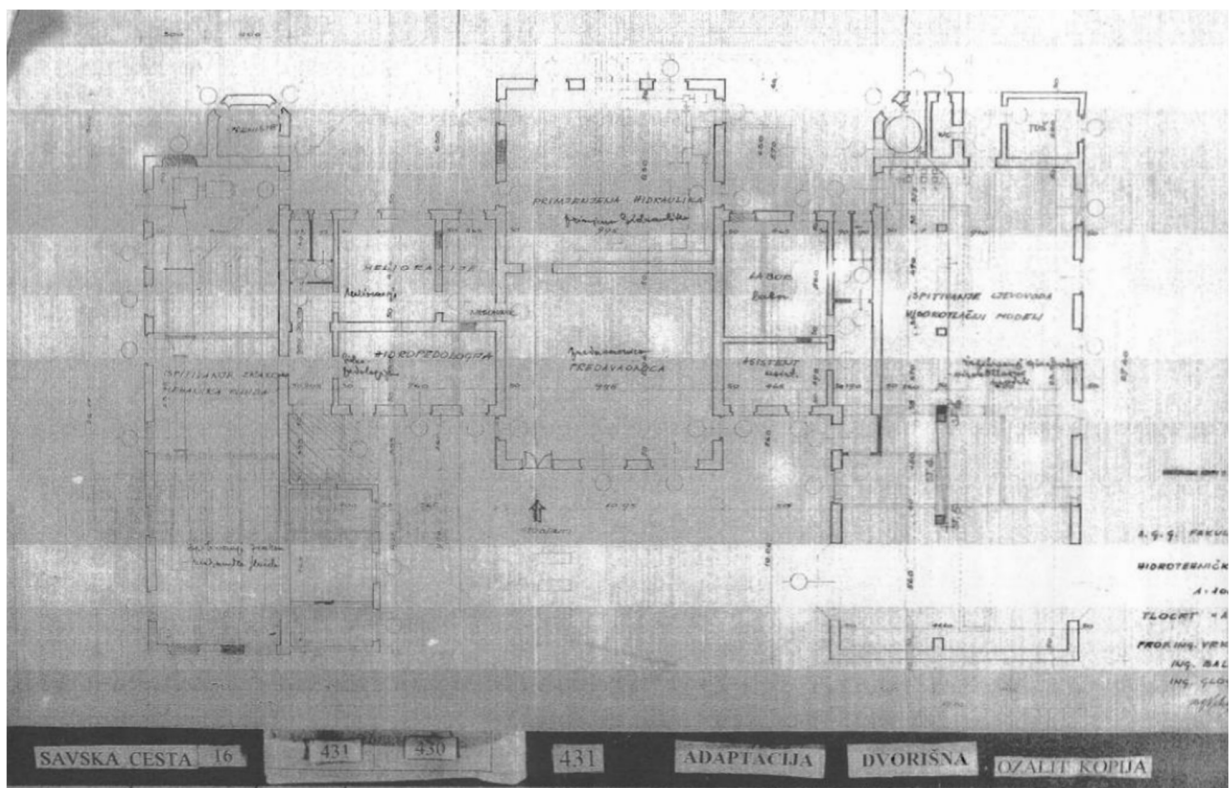


Slika 12. Geografski smještaj u prostoru

Procjena stanja i modeliranje pojačanja zgrade Građevinskog fakulteta



Slika 13. Izvadak građevinske dozvole iz 1960. godine



Slika 14. Tlocrt građevine iz građevinske dozvole iz 1960. godine

#### 4.2. Statički sustav i prikaz građevine

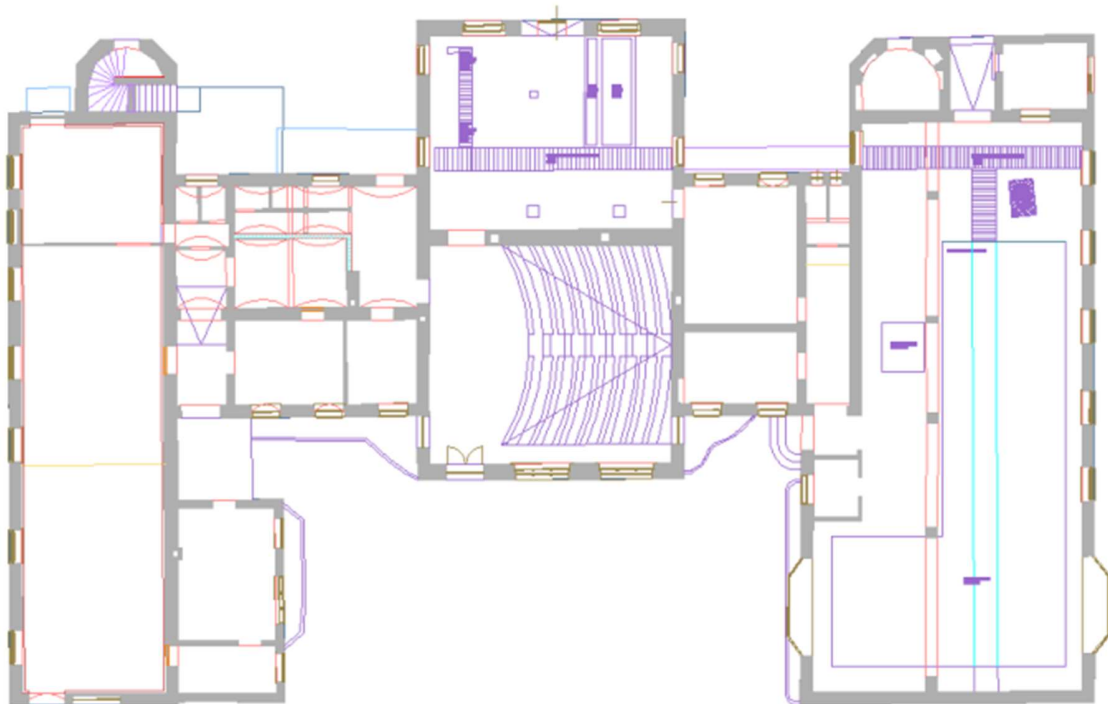
Građevina je tlocrtno nepravilnog oblika, a sastoji se od tri krila međusobno povezanih užim uvučenim dijelovima. Prikaz građevine nalazi se na slikama 15-19. Građevina se sastoji od prizemlja i potkrovlja. Glavnu nosivu konstrukciju prizemlja čine opečni zidovi debljine 30-65 cm i stupovi promjenjivih poprečnih presjeka u prostoru laboratorija. Izvedeni su mješovitim zidarskim tehnikama s mortom loše kvalitete. Stropnu konstrukciju čine drveni grednici poprečnog presjeka 20/22 cm postavljeni na osnim razmacima od 80 – 96 cm koji se oslanjaju na nosive zidove odnosno na čelične traverze u stropu predavaonice. Svijetla visina prizemlja iznosi 4,0 – 4,3 m, te 5,25 m u predavaonici. Potkrovlje građevine nije uređeno te se ne koristi, a vertikalna komunikacija s prizemljem ostvarena je čeličnim ljestvama koje su smještene u spremištu sjeveroistočnog krila zgrade i spiralnim stubištem koje se nalazi na kraju jugozapadnog krila zgrade. Krovnište građevine je složeno četverostrešno s dvije kupolne krovne istake na zapadnoj strani. Nagib krovništa je približno 44°. Krovnište je izvedeno od drva crnogorice klasičnom tesarskom tehnikom. Sustav krovništa iznad rubnih krila zgrade je jednostruka visulja s razmakom vezača od približno 4,0 m, dok je iznad središnjeg krila i uvučenih dijelova izvedena dvostruka visulja s razmakom vezača od približno 4,2 m do 4,8 m. U središnjem krilu, poprečno na vezače visulje ispod stupova, postavljene su čelične traverze na koje se oslanjaju drveni grednici stropa. U južnom krilu nalazi se betonska greda koja se nalazi na stupovima od opeke različitih dimenzija, na koju se oslanjaju grednici stropnih konstrukcija u tom krilu. Pokrov je biber crijep. Na jugoistočnom pročelju, s unutrašnjih strana krajnjih krila, manji dijelovi krova izvedeni su kao ravni krovovi sa završnim slojem bitumenske ljepenke. Na podu građevine izvedena je betonska podna ploča različitih debljina (7-8 cm) na koju je postavljen završni sloj estriha ili asfalta ovisno o poziciji unutar građevine. Istražni radovi vezani za temeljnu konstrukciju nisu provedeni, ali se iz postojeće dokumentacije zaključuje da se temeljna konstrukcija sastoji od temeljnih traka ispod svih nosivih zidova čija je debljina neznatno veća od debljine zidova. Dubina temelja nije poznata.



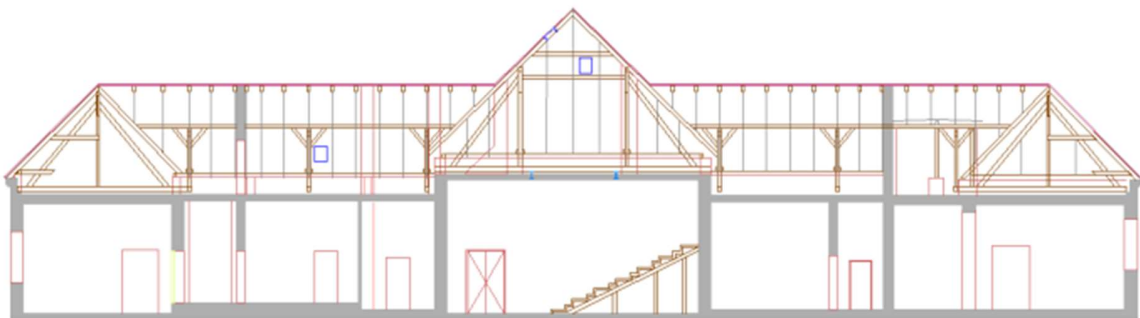
*Slika 15. Prikaz sjeverozapadnog pročelja građevine*



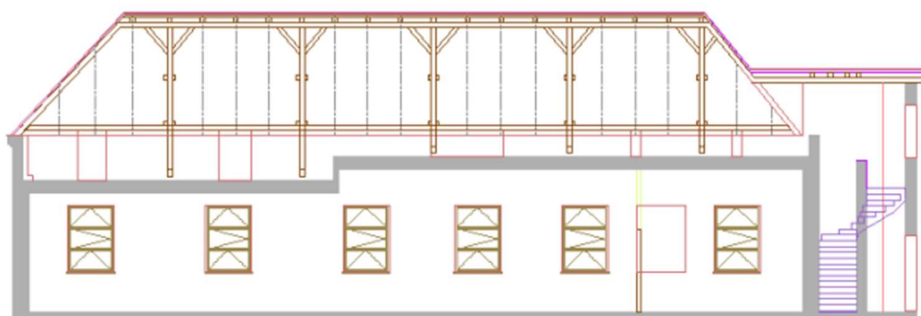
*Slika 16. Prikaz jugoistočnog pročelja građevine*



*Slika 17. Tlocrt građevine*



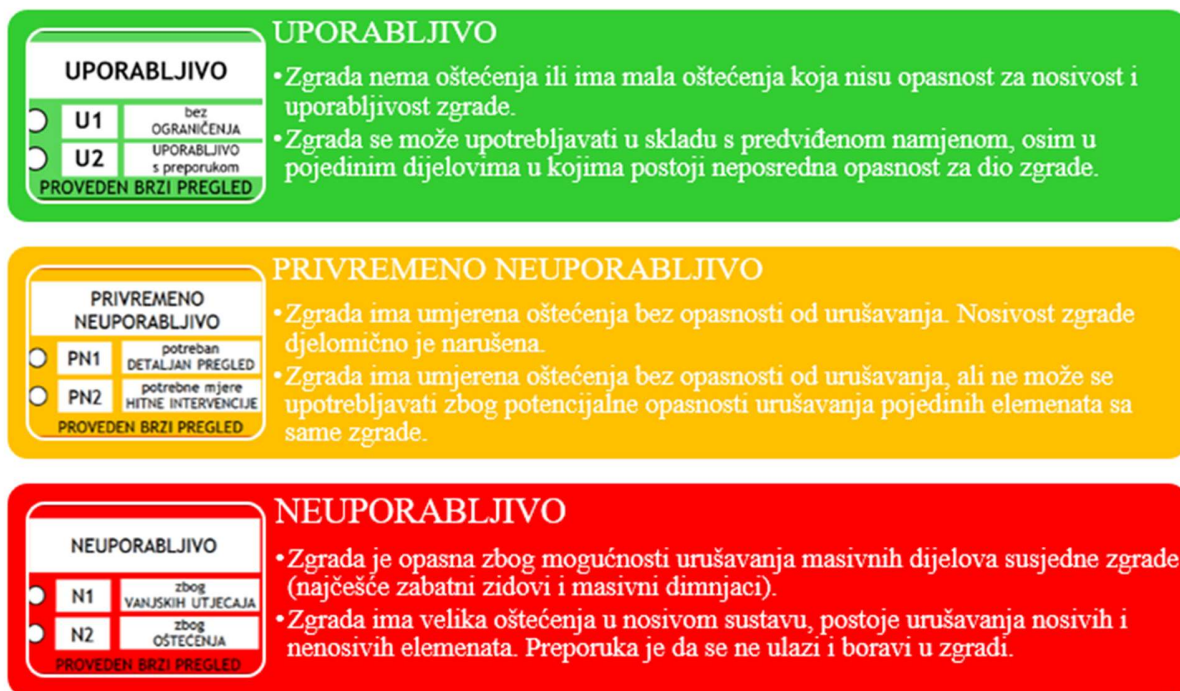
*Slika 18. Uzdužni presjek građevine*



*Slika 19. Poprečni presjek građevine*

### 4.3.1 Kategorija građevine i razine uporabljivosti

Kako bi građevina uopće dobila „naljepnicu“, potrebno je provesti brzi pregled. Brzi pregledi su pregledi čiji je cilj utvrditi stupanj oštećenja neke građevine s ciljem zaštite života i imovine, odnosno određivanje je li zgrada uporabljiva, neuporabljiva ili privremeno neuporabljiva. Moguće je ocijeniti pojedini dio zgrade ili nju u cijelosti. Važno je napomenuti da oni ne uključuju pregled instalacija, projekt konstrukcije i sl. te nisu mjerodavni za procjenu štete, osiguranja i tako dalje. Dobivena naljepnica se može shvatiti kao savjet stručnjaka koji sugerira sugrađanima o sigurnosti življenja u zgradama koje nastanjuju i o potrebnim hitnim mjerama sanacije. Hitne sanacije su urgentne mjere koje je potrebno što prije poduzeti kako bi se spriječilo daljnje pogoršanje i smanjila vjerojatnost ugrožavanja ljudskih života, kao i zaštitila zgrada od utjecaja atmosferilija. To su npr. uklanjanje dimnjaka, stabilizacija zabatnog zida, popravak stubišta, popravak dizala. Kategorije uporabljivosti navedene su ispod na slici 20.



Slika 20. Oznake za kategorije uporabljivosti korištene prilikom brzih pregleda

#### U1 – Uporabljivo bez ograničenja

Zgrada se može upotrebljavati. Zgrada nema oštećenja ili ima mala oštećenja koja ne predstavljaju opasnost za nosivost i uporabljivost zgrade.

#### U2 – Uporabljivo s preporukom



Zgrada se može upotrebljavati u skladu s predviđenom namjenom, osim u pojedinim dijelovima gdje postoji neposredna opasnost za dio zgrade. Građevinski stručnjak daje preporuke za uklanjanje opasnosti (primjerice dimnjaka) i preporuke korisnicima za privremeno ograničavanje boravka u pojedinim dijelovima zgrade. Nakon uklanjanja opasnosti zgrada se može koristiti bez ograničenja.

**PN1 – Privremeno neuporabljivo – potreban detaljan pregled**

Zgrada ima umjerena oštećenja bez opasnosti od urušavanja. Nosivost zgrade je djelomično narušena. Ne preporučuje se boravak u zgradi odnosno građani u takvoj zgradi borave na vlastitu odgovornost. Kraći boravak u zgradi je moguć, uz savjete građevinskog stručnjaka koji se odnose na potrebne mjere i ograničenje boravka (ovisno o opasnosti). Građevinski stručnjak daje preporuke za uklanjanje opasnosti.

**PN2 – Privremeno neuporabljivo – potrebne mjere hitne intervencije** Zgrada ima umjerena oštećenja bez opasnosti od urušavanja, ali ne može se upotrebljavati zbog potencijalne opasnosti urušavanja pojedinih elemenata sa same zgrade. Građevinski stručnjak utvrđuje hitne mjere intervencije i daje upute korisnicima. Dok se ne provedu mjere, zgrada ili njezin dio nije uporabljiv (primjerice krovšte). Privremena neupotrebljivost može se odnositi samo na neke dijelove (jedinice) građevine.

**N1 – Neuporabljivo – zbog vanjskog utjecaja**

Građevina je opasna zbog mogućnosti urušavanja masivnih dijelova susjedne građevine (najčešće zidovi i masivni dimnjaci). Usljed takve opasnosti preporuka je da se nikako ne boravi u takvim zgradama (posebice s obzirom na veliki broj ponavljanja potresa).

**N2 - Neuporabljivo – zbog oštećenja**

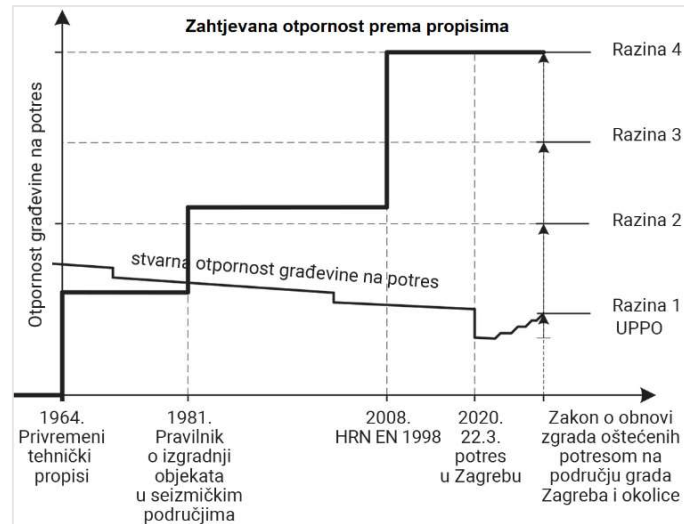
Zgrada ima velika oštećenja u nosivom sustavu, postoje urušavanja nosivih i nenosivih elemenata. Preporuka je da se ne ulazi i boravi u zgradi. To nužno ne znači da se zgrada mora rušiti - takve odluke se donose u sljedećim fazama.

Građevina u Savskoj ulici pretrpjela je umjerena oštećenja te je svrstana u kategoriju privremeno neuporabljivo (žuta naljenica), a u idućem poglavlju su detaljnije nabrojana i obisana oštećenja. Važnost sanacije ove građevine jest u tome što se ona koristi kao edukacijska zgrada te hidrotehnički laboratorij te u njoj dnevno vrijeme provodi jako puno ljudi, čiji su životi potencijalno ugroženi ako se ništa ne poduzme po tom pitanju.

### 4.3.2 Razine graničnih stanja

Tehničkim propisom o izmjeni i dopunama Tehničkog propisa za građevinske konstrukcije (NN 75/2020) definirane su razine obnove potresom oštećenih konstrukcija zgrada u odnosu na mehaničku otpornost i stabilnost. Razine otpornosti svih konstrukcija oštećenih u potresu nije potrebno dovesti na razinu koju zahtjeva Eurokod 8 – to bi bilo vrlo neekonomično i vremenski zahtjevno, stoga Tehnički propis za građevinske konstrukcije razlikuje četiri razine obnove s

obzirom na stupanj oštećenja, važnost i namjenu građevine te financijsku moć investitora. Slika 21 prikazuje odnos stvarne razine otpornosti građevine i razine koja se osigurava obnovom.



*Slika 21. Vrste graničnih stanja (28)*

Razina 1: popravak nekonstrukcijskih elemenata. Pretpostavlja se da je nosiva konstrukcija građevine bez oštećenja ili s vrlo malim oštećenjima koja bitno ne utječu na njezinu nosivost. Radovi na konstrukciji na ovoj razinu uključuju popravak zabatnih zidova, parapeta, dimnjaka i pregradnih zidova, lokalno pojačanje krovne konstrukcije i slično.

Razina 2: popravak konstrukcije. Vršiti se popravak ili zamjena nosivih elemenata oštećenih u potresu te se izvode određena poboljšanja konstrukcije građevine kao cjeline. Radovima na konstrukciji mora se postići mehanička otpornost i stabilnost zgrade na potresno djelovanje za poredbenu vjerojatnost premašaja od 10% u 10 godina (povratni period 95 god.) za granično stanje znatnog oštećenja. Radovi na konstrukciji na ovoj razini uključuju popravak većih pukotina u nosivim zidovima, popravak i pojačanje krovništa i međukatnih konstrukcija, mjere stabilizacije nepridržanih zidova, itd. Ova razina odabire se za zgrade stambene, poslovne i stambeno-poslovne namjene te zgrade javne namjene koje su lakše oštećene u potresu.

Razina 3: pojačanje konstrukcije. Otpornost konstrukcije zgrade na djelovanje potresa se povećava, ali ne do razine koju zahtijevaju postojeći Tehnički propis za građevinske konstrukcije i norme HRN EN. Radovima na konstrukciji mora se postići mehanička otpornost i stabilnost zgrade u odnosu na potresno djelovanje za poredbenu vjerojatnost premašaja od 20% u 50 godina



(povratni period 225 god.) za granično stanje znatnog oštećenja. Radovi na konstrukciji na ovoj razini uključuju pojačanja nosivih zidova (FRP i FRCM sustavima, injektiranjem, torkretiranjem), pojačanje ili izvedbu novih krovnih i međukatnih konstrukcija, izvedbu novih omeđujućih elemenata itd. Ova razina odabire se za zgrade čija je potresna otpornost važna s obzirom na posljedice vezane s rušenjem (razred važnosti zgrade III prema HRN EN 1998), a koje su teže oštećene u potresu. U tu skupinu ubrajaju se kina, kazališta, sportske građevine, zdravstvene ustanove manje važnosti, škole, vrtići, fakulteti, ako nisu svrstane u razred važnosti IV.

Razina 4: cjelovita obnova. Razina otpornosti građevine na djelovanje potresa diže se na razinu koja je propisana Tehničkim propisom za građevinske konstrukcije i normama HRN EN. Radovima na konstrukciji mora se postići mehanička otpornost i stabilnost zgrade u odnosu na potresno djelovanje za poredbenu vjerojatnost premašaja od 10% u 50 godina (povratni period 475 god.). Ova razina obnove odabire se za zgrade čija je cjelovitost tijekom potresa od važnosti za funkcioniranje zajednice (zgrade razreda važnosti IV prema HRN EN 1998). To su, primjerice, zdravstvene ustanove veće važnosti, građevine interventnih službi, energetske građevine itd.

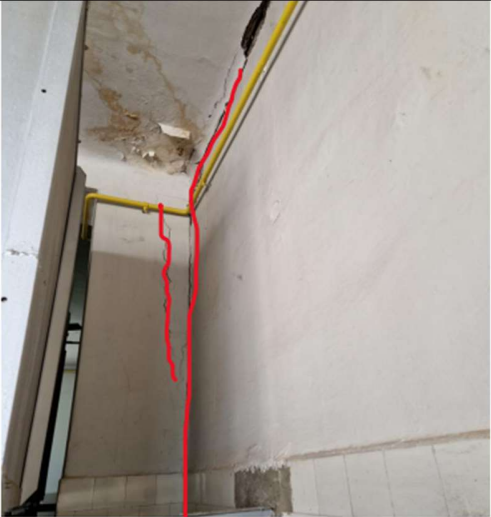

### **4.3. Vizualni pregled i popis oštećenja građevine**

Vizualni pregled i bilježenje oštećenja na nosivoj konstrukciji i nekonstruktivnim elementima građevine izvršen je u nekoliko izlazaka na teren tijekom travnja 2023. godine. Kao rezultat pregleda utvrđena su konstruktivna i mehanička oštećenja elemenata (pukotine, pomaci i deformacije) i stanje slojeva (žbuke). Na slikama slijedi prikaz karakterističnih oštećenja s komentarima i opisom stanja.



Tablica 2. Prikaz oštećenja na zidovima

Pozicije oštećenja	Grafički prikaz
<p>Sjeveroistočno pročelje sjevernog krila zgrade</p>	
<p>Sjeverozapadno pročelje uvučenog volumena zgrade.</p>	
<p><b>Opis oštećenja</b></p>	<p>Vertikalne pukotine pojavljuju se na nosivim zidovima s vanjske, ali i s unutarnje strane zidova. Najizraženije su u dijelovima zgrade koji povezuju krajnja krila zgrade sa središnjim krilom. Može se zaključiti da odziv na potresnu pobudu nije bio jednak za sva krila te su se uslijed međusobno neujednačenog gibanja krila javljala dodatna naprezanja u uvučenim volumenima zgrade što je prouzročilo nastanak spomenutih pukotina.</p>

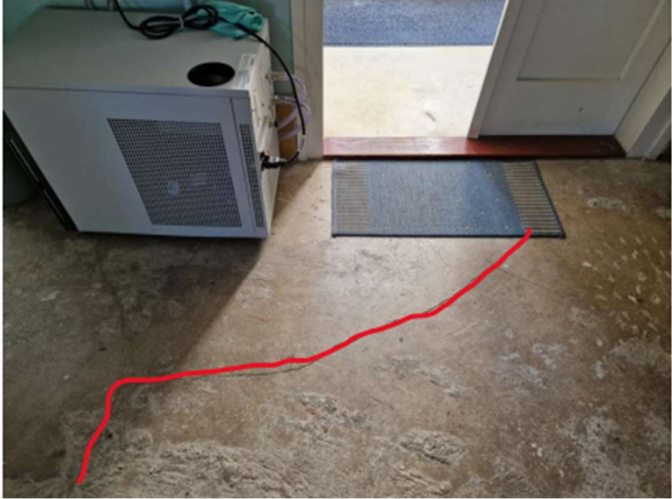

Tablica 3. Oštećenja na spojevima zidova

Pozicije oštećenja	Grafički prikaz
<p>Spoj stupa i jugoistočnog zida u velikom laboratoriju</p>	
<p>Pregradni zid između velikog laboratorija i radne sobe</p>	
<p><b>Opis oštećenja</b></p>	<p>Na spoju jugoistočnog zida velikog laboratorija i stupa otvorila se vertikalna pukotina uslijed neadekvatnog zidarskog spoja tih dvaju dijelova nosive konstrukcije koji su se zbog cikličkog djelovanja potresa počele razdvajati. Neposredno uz nju, uočljiva je još jedna vertikalna pukotina na samom stupu. Na većini pregradnih zidova izgrađenih od pune opeke otvorile su se dijagonalne pukotine uslijed pojave prekomjernih posmičnih i vlačnih naprezanja te pomaka izazvanih djelovanjem potresnih sila</p>

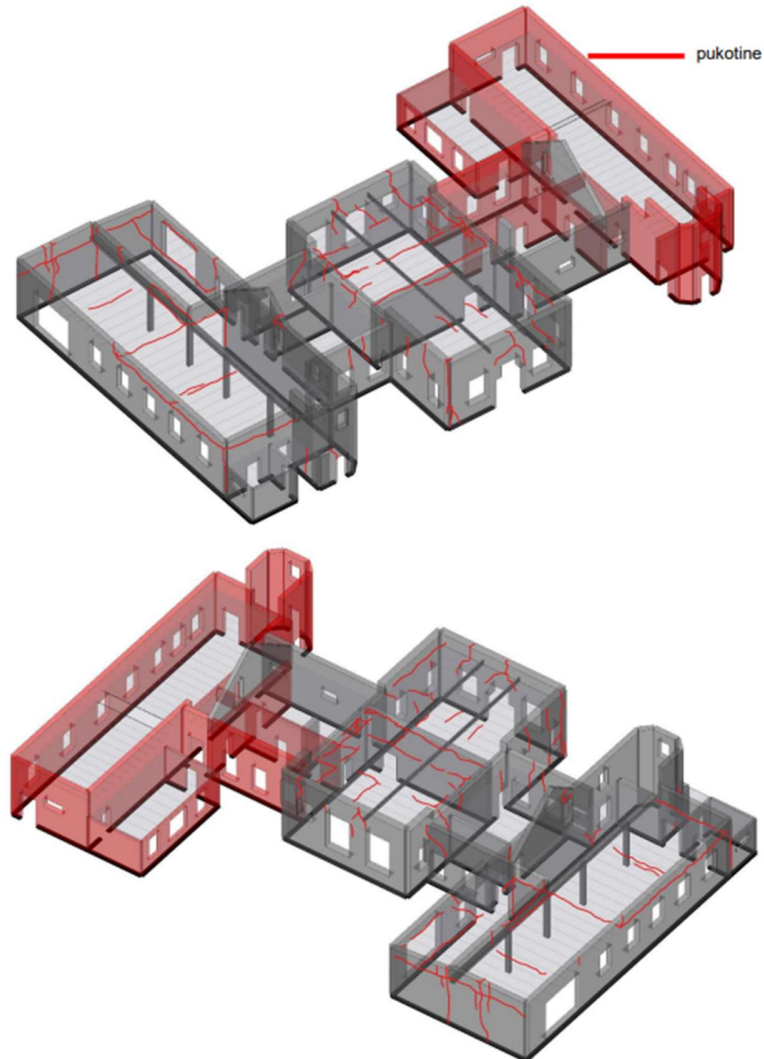
Tablica 4. Prikaz oštećenja na stropnim konstrukcijama

Pozicije oštećenja	Grafički prikaz
Spoj stropa i nosivog zida malog laboratorija	
Spoj stropne konstrukcije i isturenog dijela prozora u velikom laboratoriju	
<b>Opis oštećenja</b>	Na većini spojeva stropova (drvenih grednika) i nosivih zidova otvorile su se horizontalne pukotine uslijed nepostojanja krute dijafragme što je dovelo do pojave vlačnih naprezanja u spojevima i neujednačenih pomaka zidova i stropnih konstrukcija.

Tablica 5. Ostala oštećenja

Pozicije oštećenja	Grafički prikaz
Pod velikog laboratorija	
Nadozid u potkrovlju	
<p><b>Opis oštećenja</b></p>	<p>U podnoj ploči unutar velikog laboratorija prema ulaznom prostoru uočena je pukotina nepravilnog oblika. U podu laboratorija i cijele zgrade postoje kanali za protok vode koji su naknadno izvođeni i rekonstruirani te se može pretpostaviti da je uslijed njihovog izvođenja došlo do pojave lokalnog smanjenja zbijenosti tla ispod ploče što je rezultiralo pojavom pukotina koje su se u potresu dodatno proširile i povećale.</p>

	<p>Nadozid potkrovlja izveden je od pune opeke bez horizontalnih i vertikalnih omeđujućih elemenata što je rezultiralo stepenastim pukotinama na par mjesta.</p>
--	--



*Slika 22. Prikaz oštećenja na 3D modelu*

Na slici 22 prikazana su sva oštećenja zabilježena tijekom vizualnih pregleda. Važno je napomenuti da je dio koji je obojan crvenom bojom bio nedostupan za pregled, pa tamo nije bio moguć vizualni pregled. Crvenim linijama prikazane su pukotine na konstrukciji.



#### 4.4. Krovište konstrukcije

Krovište iznad sjevernog krila (slika 23) zgrade je statičkog sustava jednostruke visulje s kliještima s razmacima krovnih vezača ~4,0 m. Nagib krovišta iznosi 44°. Rogovi su dimenzija 12/16 cm postavljeni na međusobnom osnom razmaku od 100 cm. Stupovi visulja su dimenzija 12/15 cm, a vezne grede 15/20 cm. Kliješta se nalaze na visini od približno 2,15 m iznad kote poda, a dimenzija su 2x8/15 cm. Ista vrsta krovišta ponavlja se i iznad južnog krila zgrade. Građa je piljena crnogorica. Mjestimično se na elementima uočavaju tragovi vlaženja te pukotine od rasušivanja. Pojedine podrožnice bočno su izvijene uslijed horizontalnih sila od rogova. Na trećem krovnom vezaču (gledano s ulične strane) nedostaje element uzdužne stabilizacije – „ruka“ na spoju stupa visulje i sljemene grede. Rog sjeveroistočne strehe krova mehanički je oštećen blizu sredine raspona čime mu je značajno smanjena nosivost. Na rogu se uočavaju raniji zahvati sanacije i pojačanja u vidu zakivanja drvenih dasaka na bočna lica rogova. Iznad središnjeg krila zgrade (slika 24) izvedeno je četverostrešno krovište, svijetle visine u sljemenu 6,15 m što ga čini višim od ostatka krovišta. Pod potkrovlja u tom je dijelu povišen za 80 cm u odnosu na ostatak poda. Statički sustav krovišta je dvostruka visulja s razmakom krovnih vezača od cca. 4,0 m. Rogovi su dimenzija 12/16 cm postavljeni na međusobnom osnom razmaku od ~105 cm. Oslanjaju se na podrožnice dimenzija 12/15 cm i nazidnicu dimenzija 12/15 cm. Stupovi visulje dimenzija su 12/15 cm poduprti kosnicima i razuporom te u uzdužnom smjeru rukama dimenzija 12/12 cm. Kosnici visulje pridržani su za nadozid kliještima dvostrukog presjeka dimenzija 2x8/15 cm. Vezna greda visulje dimenzija je 22/28 cm. U podu središnjeg dijela potkrovlja, ispod veznih greda visulja, u smjeru istok-zapad uočavaju se dva para čeličnih traverzi oslonjenih na nosive zidove prizemlja. Traverze služe kao oslonci drvenim grednicima stropa prizemlja. Drvene letve ispod pokrova su većim dijelom oštećene i trule. U ovom dijelu se nalaze 4 dimnjaka koji nisu u funkciji i srušeni su do pod krov. Pretpostavka je da se ta intervencija izvela u prošlosti kako bi se spriječilo prodiranje oborinskih voda u krov jer se na elementima u neposrednoj blizini dimnjaka uočavaju značajna oštećenja od vlage.



*Slika 23. Prikaz jednostruke visulje nad sjevernim krilom zgrade*



*Slika 24. Dvostruka visulja nad središnjim dijelom građevine*

Na zapadnom pročelju na sjevernom i južnom krilo zgrade, iznad kupolastih istaka, izveden je ravni krov, koji je prikazan na slici 25. Nosivu konstrukciju čine drveni grednici izvedeni u nagibu kako bi se osigurao pad u krovu za otjecanja vode s krova. Može se zaključiti da konstrukcija ravnog krova nije izvedena adekvatno ili je s vremenom degradirala jer su pojedini elementi u prilično lošem stanju, oštećeni od vode.



*Slika 25. Prikaz ravnog krova nad kupolom na zapadnom pročelju*

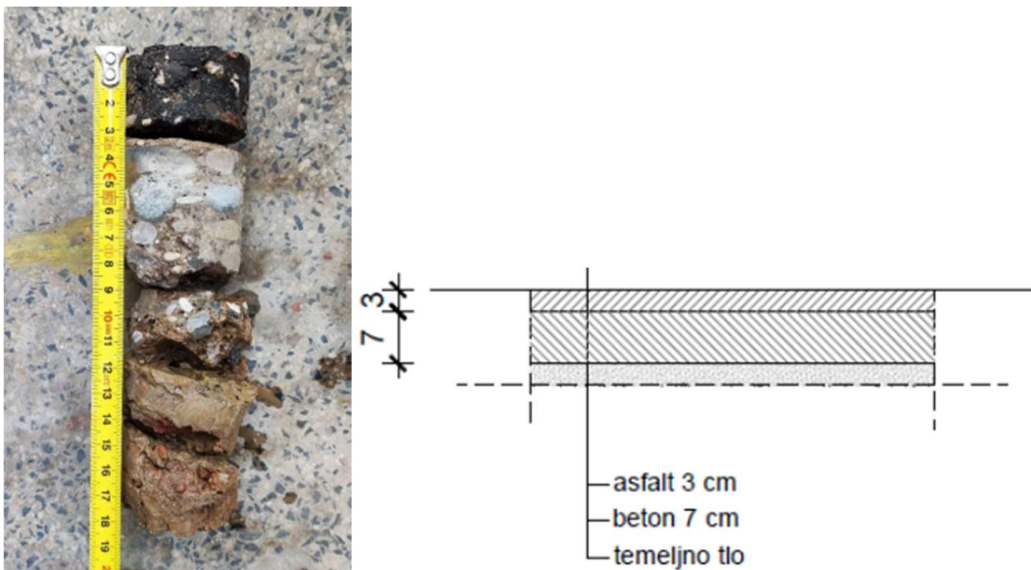
Na većini nosivih elemenata krovišta vidljive su uzdužne pukotine nastale uslijed promjene vlage u drvetu i sušenja drveta. Prikaz takvog oštećenja nalazi se na slici 26. Na konstrukciji su na više mjesta zabilježeni nepravilno izvedeni (ekscentrični) ili vremenom dotrajali spojevi elemenata krovišta koji daljnjim propadanjem mogu smanjiti stabilnost krovišta. Mnogobrojni elementi krovišta, većinom rogovi, nazidnice i vezne grede, na sebi imaju vidljive tragove vlaženja. Uglavnom se radi o onim elementima koji se nalaze u neposrednoj blizini srušenih dimnjaka koji su nekad prodirali kroz krov, a prodori nisu bili primjereno osigurani od procurivanja oborinskih voda.



*Slika 26. Uzdužno oštećenje na jednoj veznoj gredi*

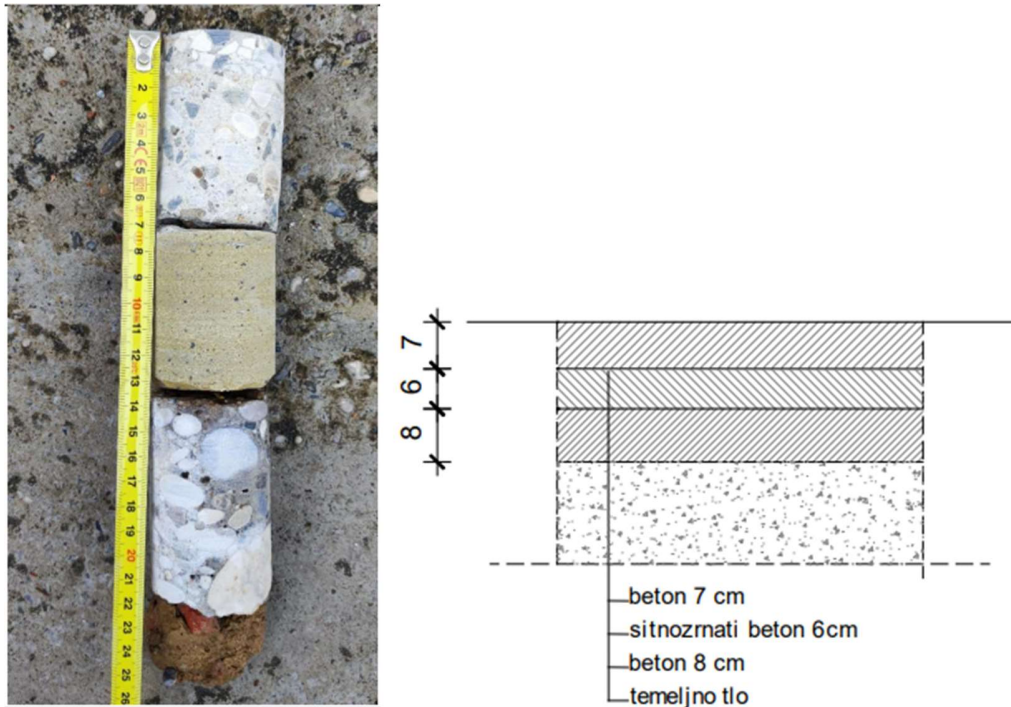
#### 4.5. Istražni radovi i karakteristike materijala

Sondaža je otvorena bušenjem dijamantnom krunom promjera 50mm. Podnu konstrukciju čini betonska podna ploča debljine 7 cm na kojoj je izveden završni sloj asfalta debljine 3 cm. Prikaz sondaže nalazi se na slici 27.



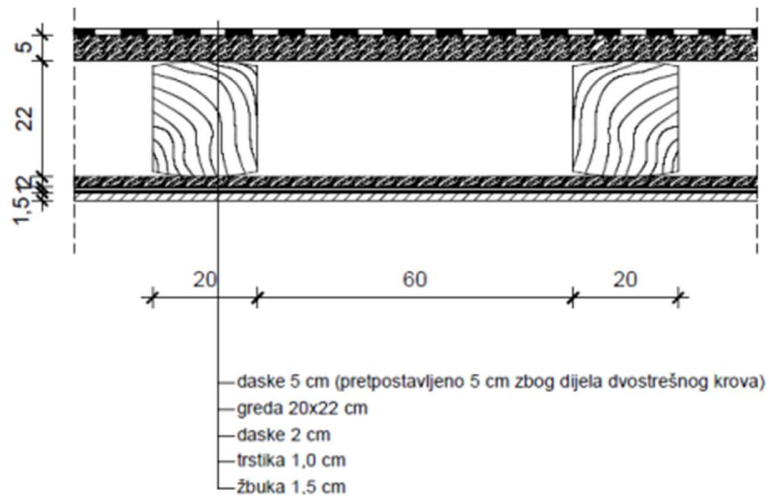
*Slika 27. Prikaz sondaže pod velikog labaratorija*

Sondaža je otvorena bušenjem dijamantnom krunom promjera 50mm. Podnu konstrukciju čine tri sloja betonskih podnih ploča debljine 8 cm, 6 cm i 7 cm bez završne obloge. Prikaz sondaže nalazi se na slici 28.



*Slika 28. Prikaz sondaže pod malog laboratorija*

Sastav stropne konstrukcije na dijelu iznad glavnih greda je pretpostavljen. Nije ga bilo potpuno sigurno odrediti zato što bi određivanje podrazumijevalo oštećenje hidroizolacije ravnog krova. Nosivu stropnu konstrukciju čine drveni grednici poprečnog presjeka 20/22 cm na osnom razmaku od 80 cm ispod kojih se nalazi daščana oplata debljine 2 cm te sloj trstike i žbuke. Iznad drvenih grednika nalazi se daščana oplata. Presjek stropa nazali se na slici 29, a 3D model na slici 30.

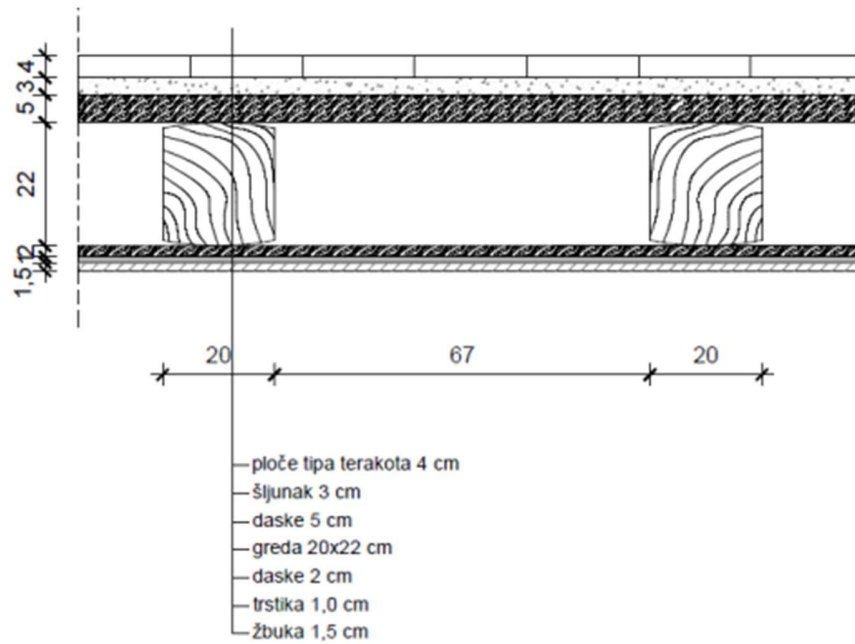


Slika 29. Presjek stropa velikog laboratorija uz jugoistočno pročelje



Slika 30. Presjek stropa velikog laboratorija u 3D-u

Nosivu stropnu konstrukciju čine drveni grednici poprečnog presjeka 20/22 cm na osnom razmaku od 87 cm ispod kojih se nalazi daščana oplata debljine 2 cm te sloj trstike i žbuke. Iznad drvenih grednika nalazi se daščana oplata debljine 5 cm na kojoj se nalazi sloj šljunka debljine 3 cm, a kao završna obloga postavljene su ploče tipa terakota debljine 4 cm. Presjek se nalazi ispod na slici 31, a 3D model stropa na slici 32.

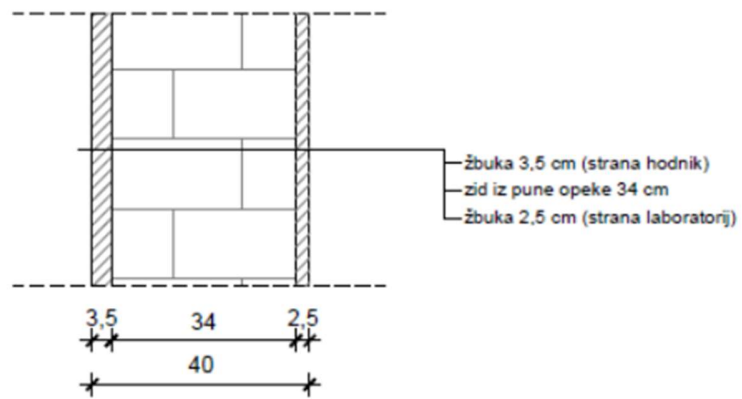


Slika 31. Presjek stropa velikog laboratorija uz jugoistočno pročelje, otprilike ispod sljemena krovišta

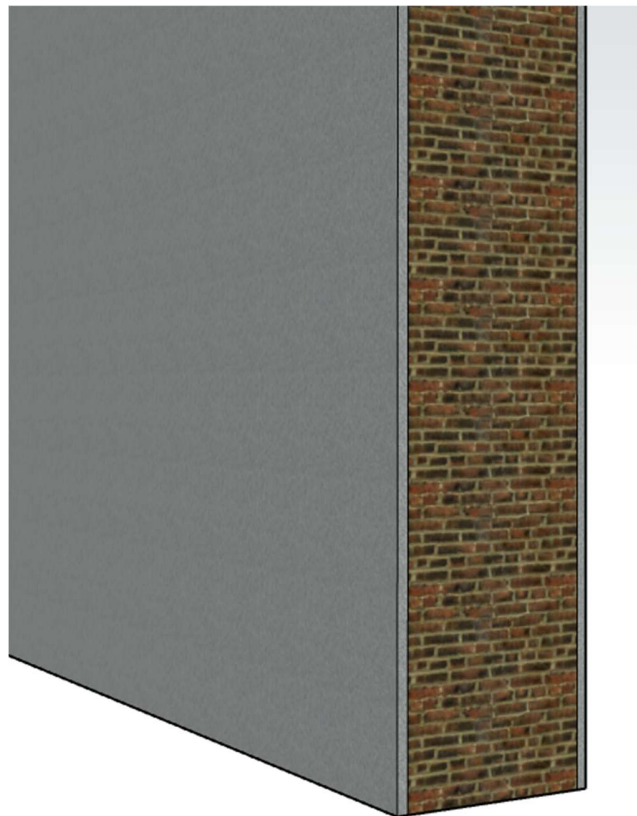


Slika 32. 3D prikaz stropa uz jugoistočno pročelje ispod sljemena

Određivanje sastava zida provedeno je na način da se bušenjem svrdlom odredila debljina žbuke, a na dijelu uz otvor zida provelo mjerenje točne debljine zida i štemanjem određivanje njegovog sastava. Presjek zida nalazi se na slici 33. Na temelju iznad prikazanih istražnih sondaža, zaključuje se da je zide izvedeno od pune opeke starog formata u vapnenom mortu. Kvaliteta osnovnog materijala ocjenjuje se srednjom ocjenom, dok je kvaliteta veznog materijala loša. 3D prikaz zida nalazi se na slici 34.



Slika 33. Presjek zida između laboratorija i hodnika na južnoj strani



Slika 34. 3D prikaz zida



Tablica 6. Karakteristike zida dobivene istražnim radovima

VRSTA ZIDA	Tlačna čvrstoća  fm (MPa)	Modul elastičnosti  E (MPa)	Posmična čvrstoća  To (MPa)	Modul posmika  G (MPa)	Vlačna čvrstoća  ft (MPa)
Opečno zide	2,00	800	0,10	50	0,09

#### 4.6. Zaključak pregleda i analiza postojećeg stanja

Glavna oštećenja uočena prilikom vizualnih pregleda valjalo bi razdjeliti na ona na nosivim elementima, nenosivim elementima i krovu. Oštećenja nosivih elemenata su vertikalne i pukotine na spojevima nosivih zidova i stupova, horizontalne pukotine na spojevima nosivih zidova i stropova, vertikalne pukotine u zidovima, vertikalne i dijagonalne pukotine oko otvora, vertikalne pukotine na spojevima zidova te pukotine na podnim pločama.

Od oštećenja nenosivih elemenata svakako valja izvodvojiti dijagonalne pukotine u pregradnim zidovima, vertikalne pukotine na spojevima pregradnih i nosivih zidova, pukotine u nadozidima potkrovlja te lokalna oštećenja boje i žbuke same građevine.

Statički sustav krovišta te prostorna stabilizacija krovišta prikladno su odabrani i izvedeni. Zabilježeno je nekoliko intervencija u vidu umetanja dodatnih elemenata kojima se pojačavaju postojeći elementi, smanjuju rasponi ili saniraju oštećenja na elementima. Drvena konstrukcija krovišta nema vidljivih prekomjernih deformacija koje bi se dovele u vezu s prekoračenjem nosivosti elemenata, osim kod dva para podrožnica u sjevernom i južnom krilu koje su statičkog sustava grede s prepustom duljine ~1,4 m, a koje su se osim velikog progibanja i bočnotorzijski izvile, što kao posljedicu ima gubitak oslonca uvalnoj gredi. Drvena građa nema većih oštećenja uslijed bioloških čimbenika, ali je uočen velik broj raspucalih elemenata uslijed sušenja i promjene vlage u drvetu. Na dijelu rogova, nazidnica i veznih greda zabilježena su oštećenja uslijed prodora vode s krova, što je najizraženije u područjima uz dimnjake te na sjeverozapadnom uglu krovišta, neposredno iznad komunikacijskih ljestava koje vode u prizemlje. Na spomenutom dijelu došlo je do potpune degradacije i sloma pojedinih elemenata, što je u recentnoj prošlosti sanirano

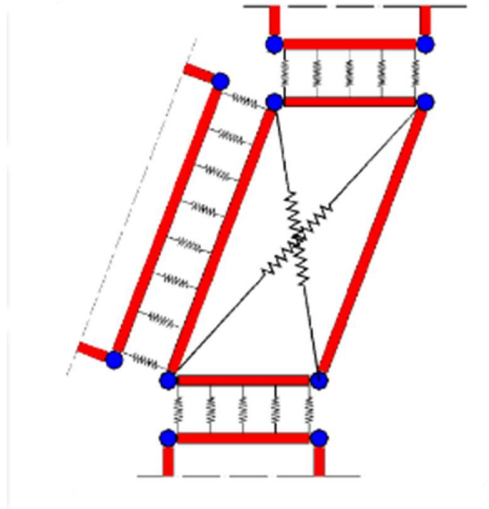
umetanjem novih drvenih elemenata koji su na postojeće spajani čelični pločicama, čavlima i vijcima. Spojevi su izvedeni izrazito loše i mimo pravila struke. Na nekoliko elemenata uočena su mehanička oštećenja koja uzrokuju smanjenje mehaničke otpornosti i stabilnosti elementa. Na krovu je postavljen novi pokrov od biber crijepa na novim drvenim letvama, osim u središnjem dijelu krovišta gdje letve i crijep nisu zamijenjeni. Letve su u vrlo lošem stanju, trule od prodora vode te prekomjerno deformirane. Po obodu krovišta izveden je nadozid visine ~60 cm, odnosno ~130 cm u dijelu južnog krila. Nadozid je izveden u sustavu neomeđenog ziđa i na nekoliko mjesta se uočavaju veće dijagonalne pukotine ili ispadanje opečnih elemenata.

## 5. Modeliranje postojeće konstrukcije

Promatrana građevina modelirana je u 2 programska paketa: 3Muri [29] i 3Dmacro [30]. 3Muri je posebno pogodan za provođenje nelinearne analize postupnim guranjem koja daje vrlo dobre rezultate za zidane konstrukcije. Unatoč svojoj jednostavnosti, linearne metode nisu prikladne za seizmički proračun zidanih konstrukcija, koje pokazuju neduktilno ponašanje prilikom potresa te deterioraciju krutosti uslijed cikličkog opterećenja. Nelinearne metode stoga su prikladnije jer daju uvid u ponašanje konstrukcije tijekom potresa.

Osim metode postupnog guranja, programski paket 3Muri ima mogućnost provođenja statičke analize prema Eurokodu 6 (nosivost na vertikalno opterećenje i nosivost na savijanje izvan ravnine) i modalne analize. 3Muri za proračun konstrukcija koristi metodu proračuna ekvivalentnih okvira sačinjenih od makroelemenata (engl. *Frame by Macro Element, FEM*). Svaki zidni element pretvara se u skup stupnih elemenata (engl. *Pier*) i elemenata nadvoja (engl. *Spandrel*) koji su međusobno povezani krutim čvorovima (engl. *Rigid node*) te tvore okvire (29).

3Dmacro funkcionira na malo drugačiji način. Model za simulaciju ponašanja zidova u ravnini predstavljen je ekvivalentnim mehaničkim modelom u kojem se dio ziđa ponaša kao zglobni četverokut čiji su vrhovi povezani nelinearnim dijagonalnim oprugama, dok su krute strane u interakciji sa stranicama ostalih makroelemenata pomoću opruga koje imaju ograničenu vlačnu čvrstoću. Prikaz makroelemenata nalazi se na slici 35 (30).



Slika 35. Prikaz makroelemenata u 3DMacru (30)

Model zgrade Građevinskog fakulteta izrađen je u suradnji s projektantskim uredom „Studio Arhing d.o.o“ na temelju stvarnih dimenzija građevine. Slojevi i stalno opterećenje stropnih konstrukcija svoda i stropa od drvenih grednika određeni su prema rezultatima istražnih radova.

Za seizmički proračun odabran je tip temeljnog tla C. Sukladno Tehničkom propisu za građevinske konstrukcije, predmetna građevina ubraja se u građevine razreda važnosti III prema HRN EN 1998-1 te je odabran faktor važnosti  $\gamma_I = 1,2$ . Za predmetnu lokaciju građevine očitane su vrijednosti vršnog ubrzanja tla (slika 36):



Slika 36. Prikaz povratnih perioda i ubrzanja tla (31)

S obzirom da je građevina svrstana u razred važnosti III i da je stupanj oštećenja konstrukcije 2 prema EMS-98 (slika 37), predmetna građevina pripada Razini obnove 3: pojačanje konstrukcije. Prema Tehničkom propisu o izmjenama i dopunama Tehničkog propisa za građevinske konstrukcije - Prilog III, Razine obnove potresom oštećenih konstrukcija zgrada u odnosu na mehaničku otpornost i stabilnost (NN 17/17, 75/20, 7/22), predviđa se popravak konstrukcije uz pojačanja kojima se postiže mehanička otpornost i stabilnost zgrade na potresno djelovanje. Globalni nedostaci građevine su izostanak djelovanja međukatnih konstrukcija kao krutih dijafragmi te su stoga zidovi na koje drveni grednici nisu oslonjeni, nepridržani cijelom svojom visinom. Lokalni mehanizam ispadanja tih zidova ključan je nedostatak građevine koji ugrožava globalnu stabilnost građevine. Nakon preliminarnе analize potresne otpornosti, detaljnog pregleda te zatečenih oštećenja, zaključuje se kako je građevina pogodna za obnovu. Radi se o zgradi javne namjene koja je umjereno oštećena u potresu te je stoga potrebna razina obnove 3 - pojačanje konstrukcije.

Kategorizacija	I	II	III	IV	V
	Blago oštećenje	Umjereno oštećenje	Značajno oštećenje	Vrlo teško oštećenje	Otkazivanje
AB					
zidane					
opis	zanemarivo konstrukcijsko oštećenje i blago nekonstrukcijsko oštećenje	blago konstrukcijsko oštećenje i umjereno nekonstrukcijsko oštećenje	umjereno konstrukcijsko oštećenje i teško nekonstrukcijsko oštećenje	teško konstrukcijsko oštećenje i vrlo teško nekonstrukcijsko oštećenje	v vrlo teško konstrukcijsko oštećenje

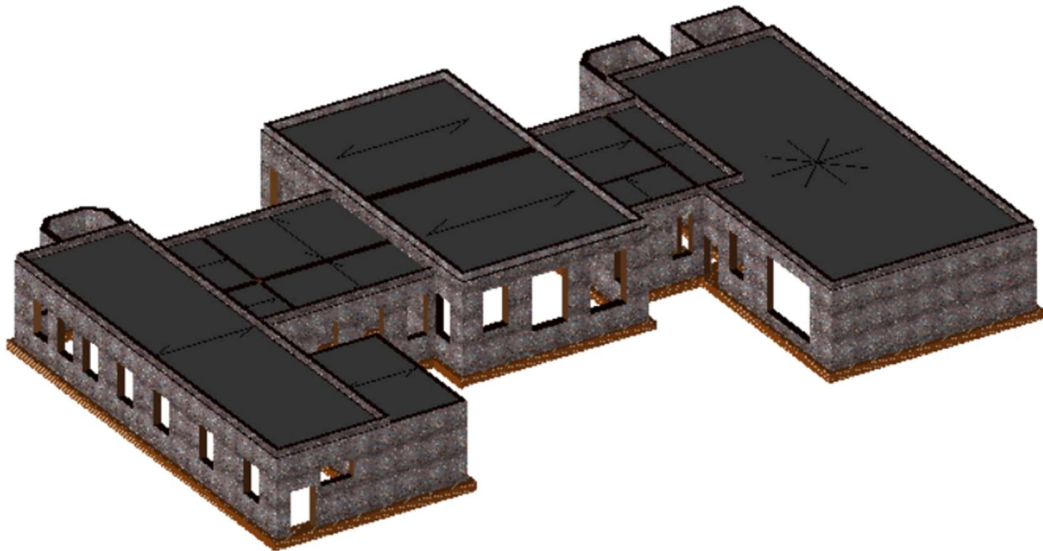
Slika 37. Prikaz kategorija mogućih oštećenja građevine

### 5.1.1 Modeliranje u 3Dmacro-u

3D model prikazan je na slici ispod (slika 38), zajedno s modelom podijeljenim u konačne elemente. Modelirana je konstrukcija bez krovišta, na način da je izračunato opterećenje krovišta i nanoseno na zidove u obliku malih parapeta visine 40 cm kojima je mijenjana zapremninska težina. Na taj način je dobivena stvarna raspodjela sila sa krovišta na pojedine zidove. Karakteristike ziđa korištene za model navedene su na slici 39. Debljine ziđa kreću se od 30 do 60 cm, ovisno o

## Procjena stanja i modeliranje pojačanja zgrade Građevinskog fakulteta

poziciji na građevini te o tome jel zid nosiv ili nije. Provedena je nelinearna statička analiza postupnim guranjem. Središnji dio građevine je visine 5,25 metara, a ostali dijelovi su visine 4,8m.



Slika 38. Jugoistočno pročelje

Unit Measurements According to the code  Use design values defined by Close

Mechanical parameters	Minimum	Average	Maximum	Base value	Corrective coefficient	CF	Design value
Young's modulus, E	690	870	1050	<input type="text" value="800"/> N / mm <sup>2</sup>	1	1	<input type="text" value="800"/> N / mm <sup>2</sup>
Shear modulus, G	230	290	350	<input type="text" value="50"/> N / mm <sup>2</sup>	1	1	<input type="text" value="50"/> N / mm <sup>2</sup>
Compressive strength, f <sub>m</sub>	100	150	200	<input type="text" value="200"/> N / cm <sup>2</sup>	1.3	1	<input type="text" value="260"/> N / cm <sup>2</sup>
Shear Strength, tau <sub>0</sub>	1.8	2.5	3.2	<input type="text" value="9"/> N / cm <sup>2</sup>	1.3	1	<input type="text" value="11.7"/> N / cm <sup>2</sup>
Density, w		19					<input type="text" value="19"/> kN / m <sup>3</sup>

Applicable corrective factors


- Good mortar (1,5)
- Opus listatum (1,3)
- Transversal connectio...
- Injections of binding mort...

Automatic evaluation of corrective factors

Not applicable corrective factors

[More details](#)

Typology

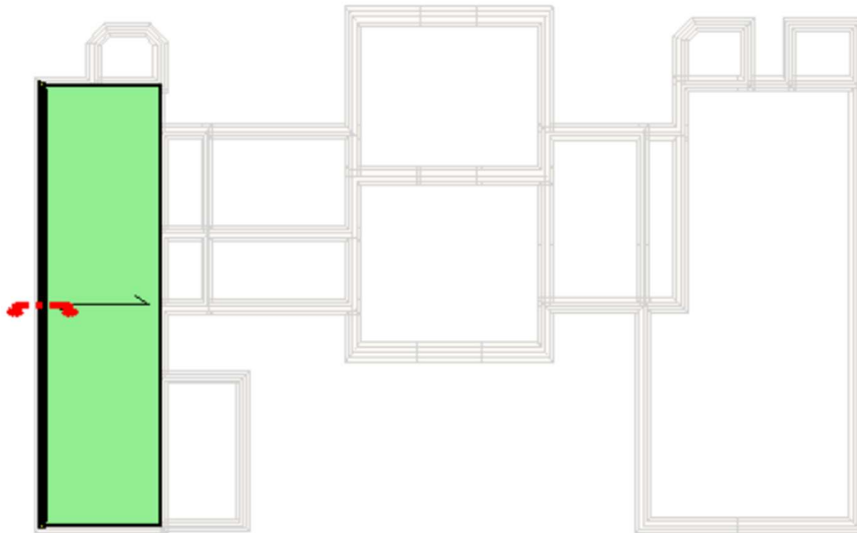


**Stones**

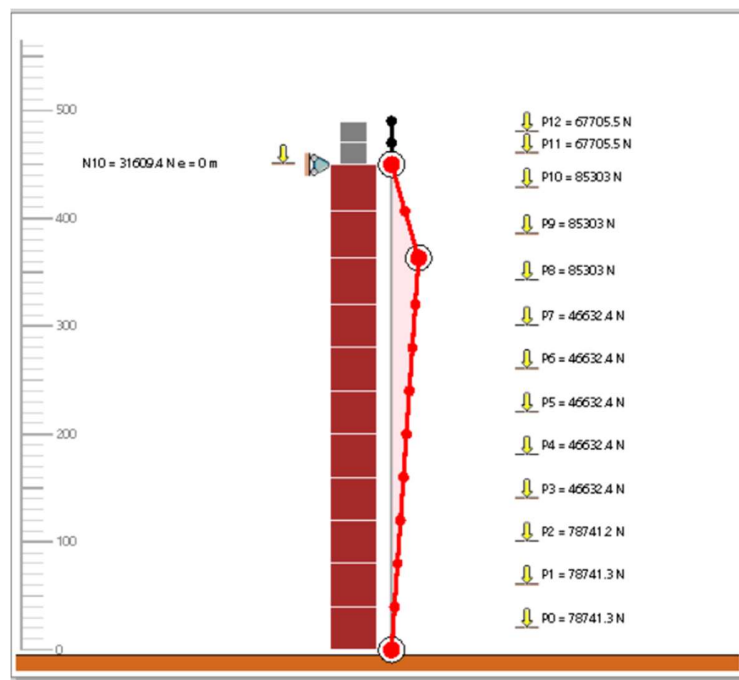
masonry with disordered stones (pebbles, irregular stones)

Slika 39. Karakteristike zida korištene za model

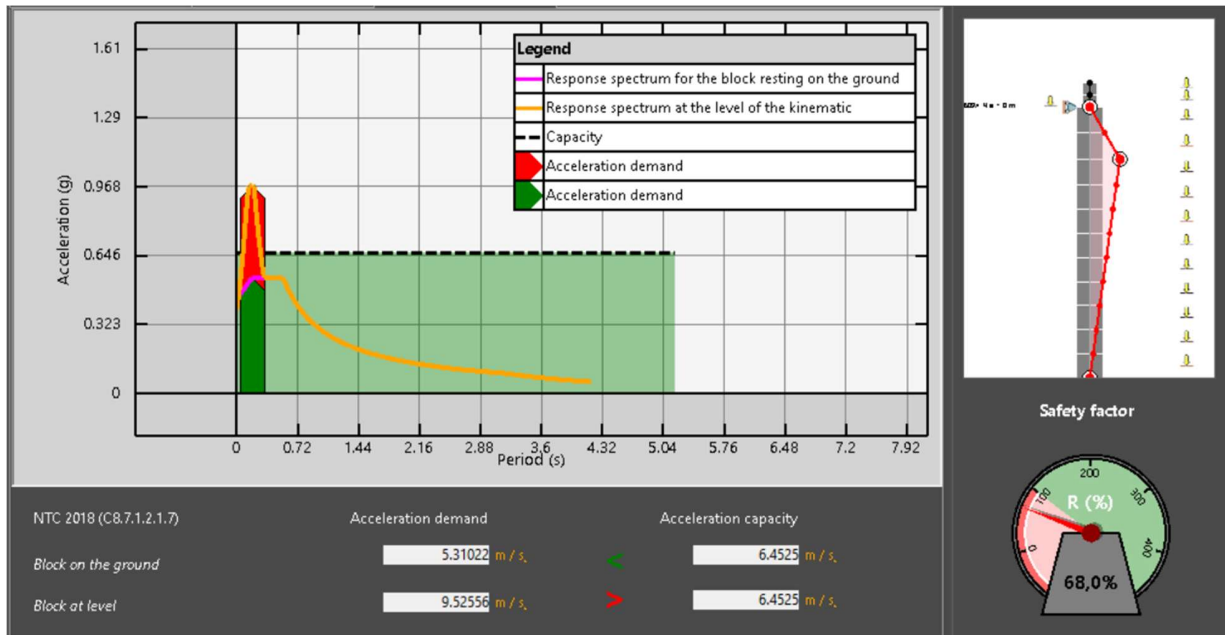
U 3Dmacro-u bilo je važno provjeriti i prevrtanje zidova te otvaranja plastičnih zglobova. Provjere su napravljene za mjerodavan zid u x i y smjeru. Postoci i izgled plastičnih zglobova nalazi se na slikama 40-45. Zidovi su proveravani na povratni period od 475 godina i ne zadovoljavaju, tj po rezultatima nisu stabilni na prevrtanje van ravnine.



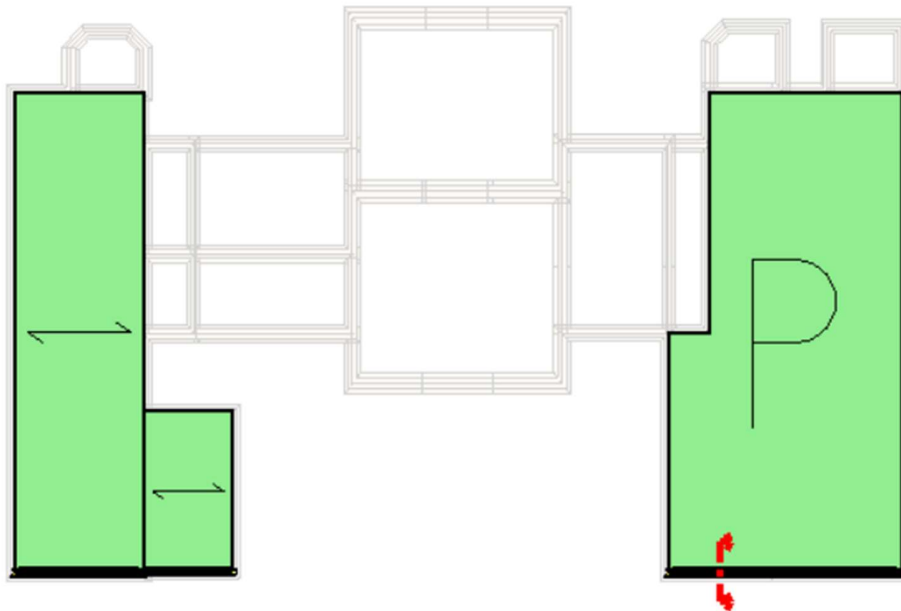
Slika 40. Pozicija zida za y smjer u tlocrtu



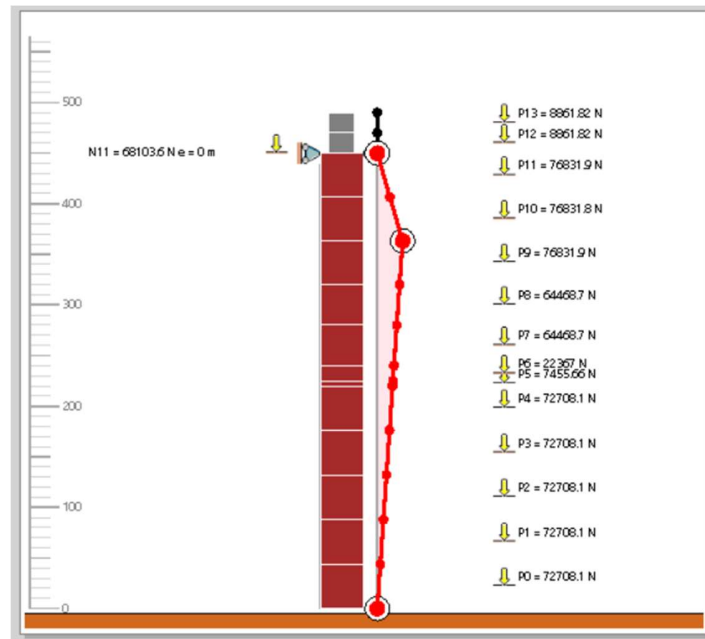
Slika 41. Otkazivanje zida u y smjeru van ravnine; shema otvaranja zgloba



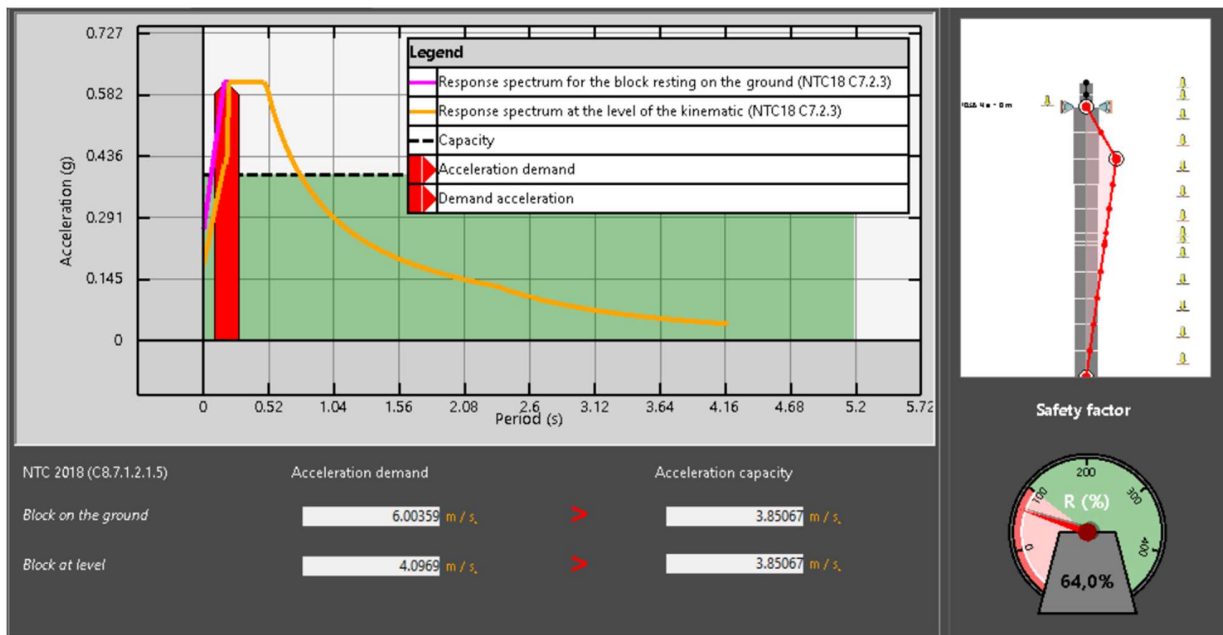
Slika 42. Prikaz kapaciteta nosivosti zida u y smjeru u odnosu na ubrzanje tla za granično stanje( PP 475 godina)



Slika 43. Pozicija zida za x smjer u tlocrtu



Slika 44. Otkazivanje zida u x smjeru van ravnine; shema otvaranja zgloba



Slika 45. Prikaz kapaciteta nosivosti zida u x smjeru u odnosu na ubrzanje tla za granično stanje (PP 475 godina)



### 5.1.2. Modeliranje u programskom paketu 3Muri

Uvjet koji konstrukcija treba zadovoljiti jest da ciljani pomak definiran potresnim zahtjevom (proračunskim ubrzanjem) bude manji od mogućeg pomaka konstrukcije definiranog pomoću kapaciteta konstrukcije prema sljedećem izrazu:

$$d_t^{SD} \leq d_m^{SD}$$

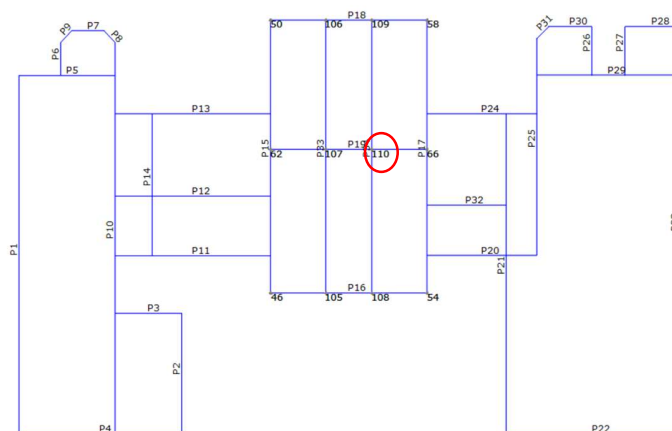
Pri čemu je  $d_t^{SD}$  – ciljani pomak zahtjevan prema propisu za granično stanje znatnog oštećenja,  $d_m^{SD}$  – mogući pomak konstrukcije za graničnog stanje znatnog oštećenja.

Rezultat analize za pojedino granično stanje je indeks sigurnosti koji se definira sljedećim izrazom:

$$\alpha = \frac{PGA_{CSD}}{PGA_{DSD}}$$

Pri čemu je  $PGA_{CSD}$  – vršno ubrzanje tla za koje konstrukcija dođe u granično stanje znatnog oštećenja,  $PGA_{DSD}$  – vršno ubrzanje tla prema propisu za granično stanje znatnog oštećenja. Granično stanje je zadovoljeno ukoliko je  $\alpha > 0,75$ .

Još jedan bitan parametar za analizu postupnim guranjem je kontrolni čvor koji predstavlja točku konstrukcije čiji se pomak u odnosu na poprečnu silu prikazuje na krivulji kapaciteta. Kontrolni čvor nalazi se na posljednjoj etaži čiji je pomak najveći te što bliže centru mase. Odabrani čvor prikazan je na slici 46.



Slika 46. Kontrolni čvor

Provedene su 24 analize, ovisno o tipu opterećenja (uniformna ili modalna raspodjela), smjeru ( $\pm X$ ,  $\pm Y$ ) te vrijednosti slučajnog ekscentriciteta. U tablici 7 i slikama 47-53 prikazani su rezultati metode postupnim guranjem za model bez pojačanja. Na temelju rezultata iz tablice vidljivo je da konstrukcija zadovoljava oba granična stanja za razinu obnove 3, ali za razinu obnove 4 ne zadovoljava u potpunosti niti u jednom smjeru (alfa manji od 1).

Tablica 7. Rezultati analiza

No.	Seism dir.	Seismic load	Eccentricity [cm]	$\alpha$ SD	$\alpha$ DL
1	+X	Uniform	0,00	0,848	1,365
2	+X	Static forces	0,00	4,451	1,036
3	-X	Uniform	0,00	4,194	0,851
4	-X	Static forces	0,00	4,125	0,844
5	+Y	Uniform	0,00	9,183	19,534
6	+Y	Static forces	0,00	8,960	19,799
7	-Y	Uniform	0,00	9,665	17,489
8	-Y	Static forces	0,00	9,024	16,816
9	+X	Uniform	137,75	3,072	1,028
10	+X	Uniform	-137,75	1,360	1,320
11	+X	Static forces	137,75	4,381	0,967
12	+X	Static forces	-137,75	4,920	1,109
13	-X	Uniform	137,75	4,009	0,869
14	-X	Uniform	-137,75	0,978	1,010
15	-X	Static forces	137,75	4,003	0,848
16	-X	Static forces	-137,75	4,015	0,894
17	+Y	Uniform	220,54	6,994	14,286
18	+Y	Uniform	-220,54	8,449	17,461
19	+Y	Static forces	220,54	6,900	14,124
20	+Y	Static forces	-220,54	7,503	16,424
21	-Y	Uniform	220,54	8,991	16,576
22	-Y	Uniform	-220,54	8,589	20,118
23	-Y	Static forces	220,54	8,632	16,217
24	-Y	Static forces	-220,54	7,471	19,684

Legenda boja:

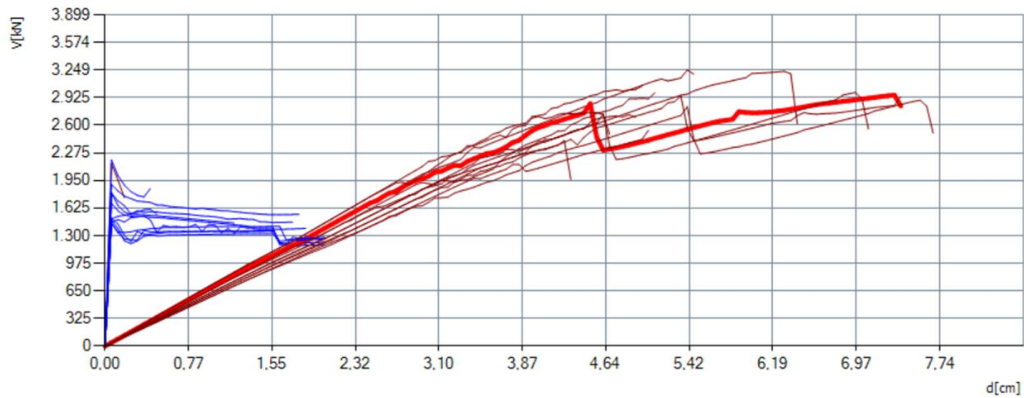
	Analiza je zadovoljila ubrzanje tla povratnog perioda 475 god za SD i 95 god za DL
	Analiza nije zadovoljila ubrzanje tla povratnog perioda 475 god za SD i 95 god za DL
	Mjerodavna analiza

Legenda boja oštećenja:

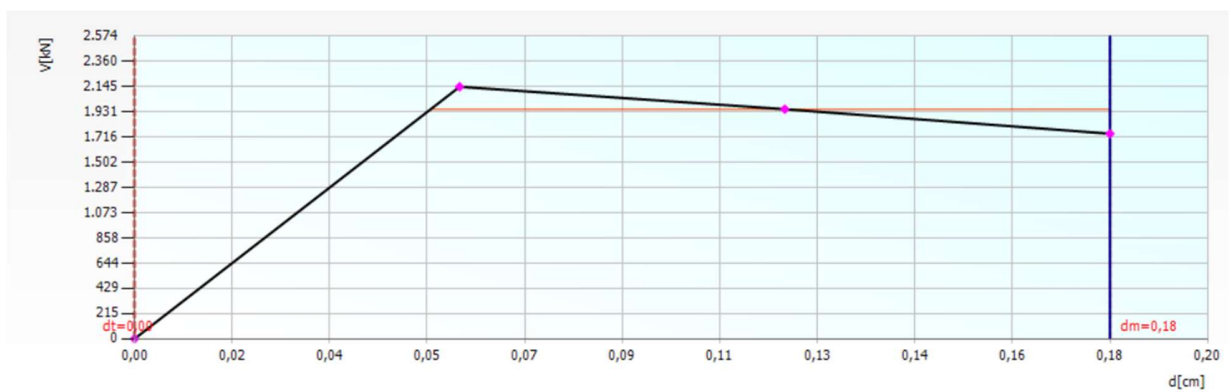
	Otkazivanje prije plastifikacije (elastična faza)		Oštećenje uslijed savijanja
	Nedjelotvoran element		Početak otkazivanja uslijed savijanja
	Plastifikacija elementa		Otkazivanje uslijed savijanja
	Neoštećen		

Procjena stanja i modeliranje pojačanja zgrade Građevinskog fakulteta

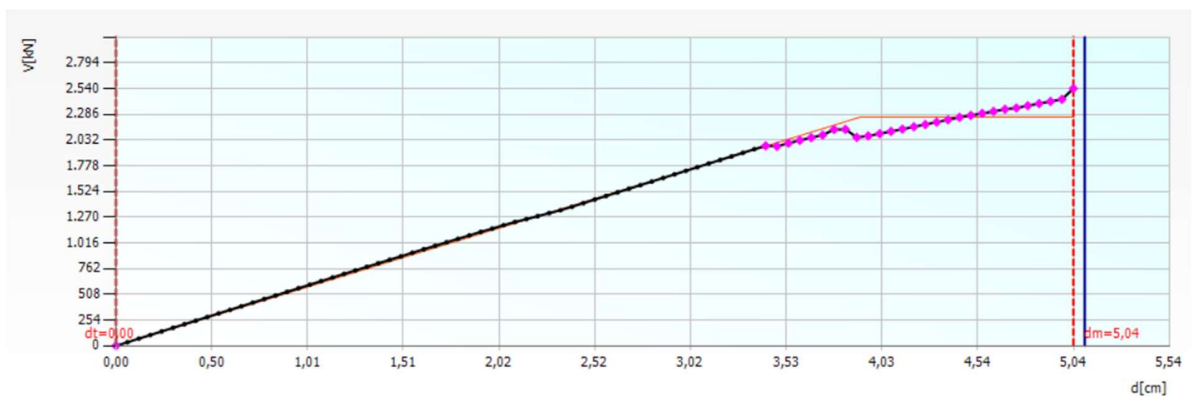
Oštećenje uslijed posmika	Pred otkazivanje elementa
Početak otkazivanja uslijed posmika	Otkazivanje uslijed tlaka
Otkazivanje uslijed posmika	Otkazivanje uslijed vlaka



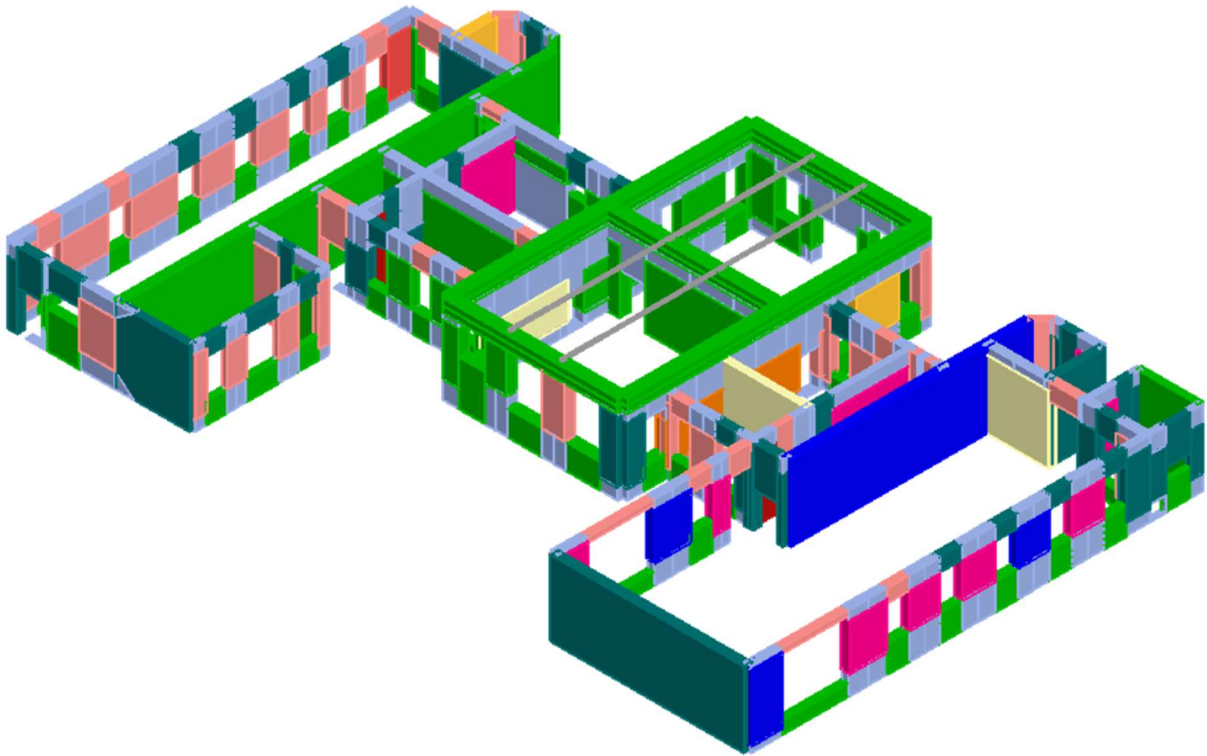
Slika 47. Krivulje kapaciteta nosivosti za X smjer (plavo) i Y smjer (crveno)



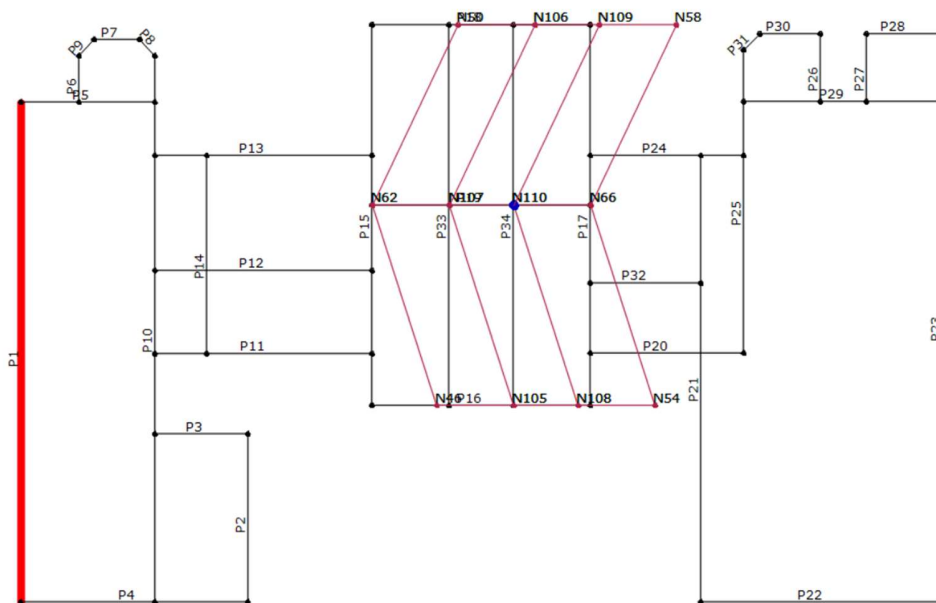
Slika 48. Krivulja kapaciteta nosivosti za mjerodavnu analizu u X smjeru (analiza br. 1)



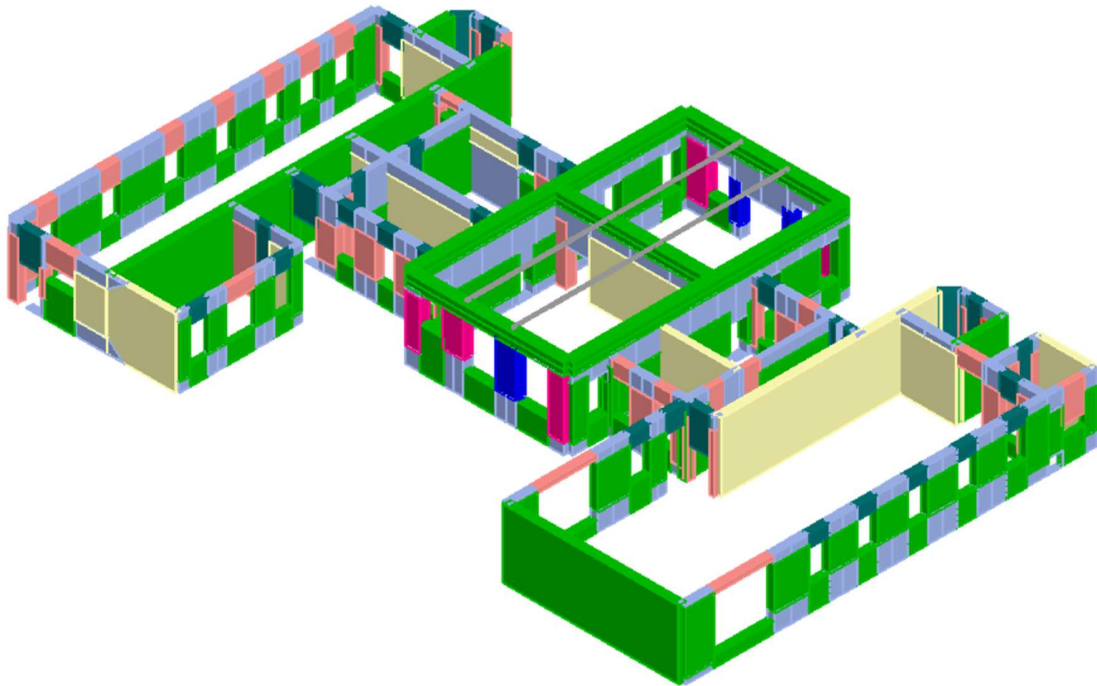
Slika 49. Krivulja kapaciteta nosivosti za mjerodavnu analizu u Y smjeru (analiza br. 19)



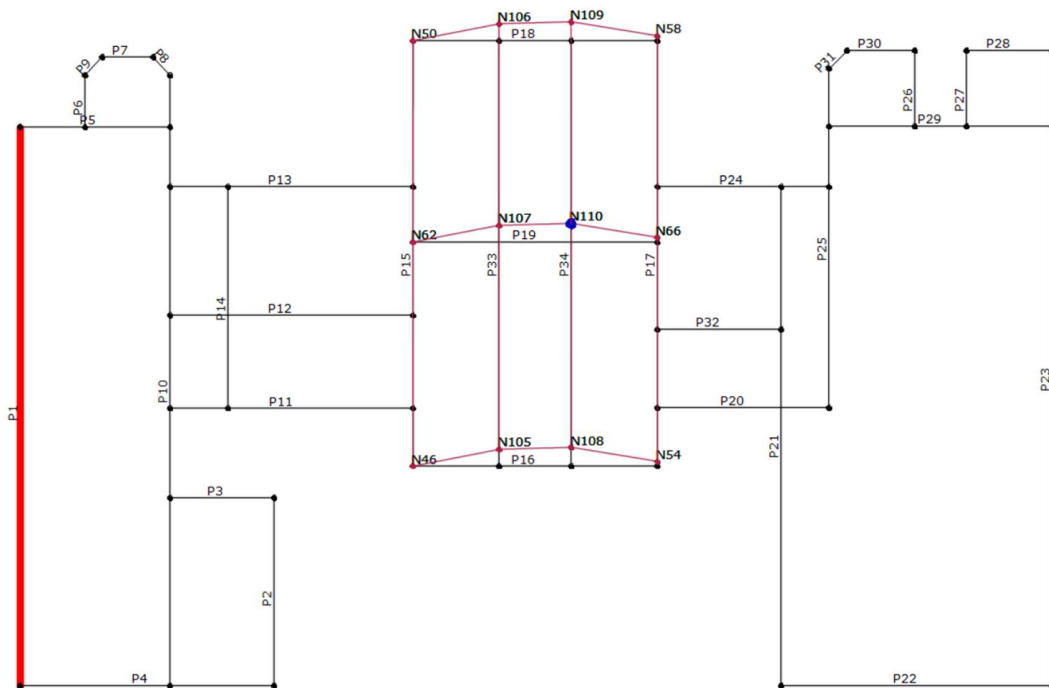
Slika 50. 3D prikaz oštećenja za mjerodavnu analizu u X smjeru (analiza br. 1)



Slika 51. Tlocrtni prikaz pomaka za mjerodavnu analizu u X smjeru (analiza br.1)



Slika 52. 3D prikaz oštećenja za mjerodavnu analizu u Y smjeru (analiza br. 19)



Slika 53. Tlocrtni prikaz pomaka za mjerodavnu analizu u Y smjeru (analiza br. 19)

## 5.2. Zaključak o modelu nakon rezultata analize

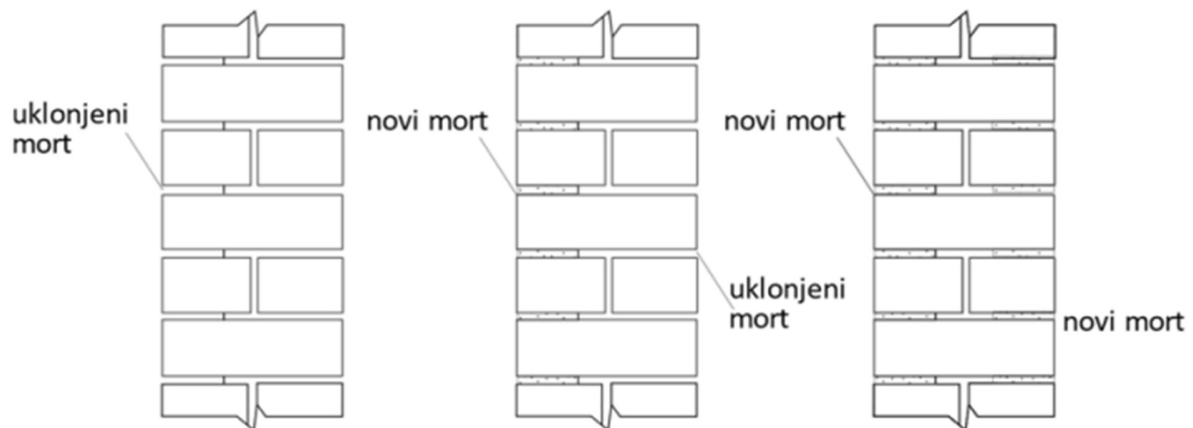
U dva softvera kombinirana su najbolja svojstva od svakog. U 3DMacru provjeravano je prevrtanje zida van ravnine jer 3Muri ne pokazuje dobre rezultate. S druge strane, 3Dmacro nije pokazivao dobre rezultate u nelinearnoj analizi. Razne greške su se javljale kao rezultat, najčešće Singularna matrica (eng. Singular matrix). Pretpostavka je da model nije imao dostatnu posmičnu krutost koja ovisi o težini, a težine praktički nema jer je građevina prizemnica. S druge strane 3Muri je izbacio rezultate analize s očekivanim oštećenjima, dovoljno velika razina otpornosti da se premaši zahtjevana razina 3, ali opet premalu otpornost da bi se dostigla razina 4. Model se ne ponaša kao jedna cjelina jer nema krutu dijafragmu te je nemoguće ostvariti tzv. efekt kutije (eng. *box effect*), a zbog nepravilnog oblika ponašanje je još nepovoljnije. Javlja se torzija središnjeg dijela koji je za cca 80 cm viši od ostalih te otkazivanja i oštećenja na samim nadozidima po cijeloj konstrukciji.

## 6. Metode pojačanja i pojačani model

### 6.1. Metode pojačanja zidanih elemenata

#### 6.1.1. Popunjavanje sljubnica novim mortom

Cilj ove metode je zamijeniti postojeći mort u sljubnicama sa novim mortom koji ima poboljšane mehaničke karakteristike te produženu trajnost, a sve to kako bi se povećala otpornost zidanih konstrukcija na djelovanje vertikalnih i horizontalnih sila. Važno je napomenuti da se metoda koristi isključivo ako su oštećenja lokalizirana u mortu. Sam proces se sastoji od uklanjanja postojeće oštećene žbuke (ispiranje i čišćenje sljubnica) te zapunjavanja novim mortom. Maksimalno uklanjanje morta je do trećine debljine zida (slika 54). Novi mort bi trebao imati slična mehanička svojstva kao i postojeći zid, ali s otpornijim karakteristikama na uzročnike propadanja (28).



Slika 54. Čišćenje i ispiranje te zapunjavanje sljubnica (32)

Ovu metodu je moguće malo unaprijediti i dodatno pojačati zid na način da se u sljubnice umetnu čelične šipke. Vrlo je važno te šipke premazati epoksidnim ili sličnim premazom kako ne bi došlo do korozije armature. Sa napretkom tehnologije, javljaju se i šipke od novih materijala, poput plastike ili na bazi FRP-a (eng. *Fiberglass-reinforced polymer*). Takav primjer prikazan je na slici 55. Uloga armature je preuzimanje vlačnih i posmičnih naprezanja zbog dobre adhezije s mortom (32).

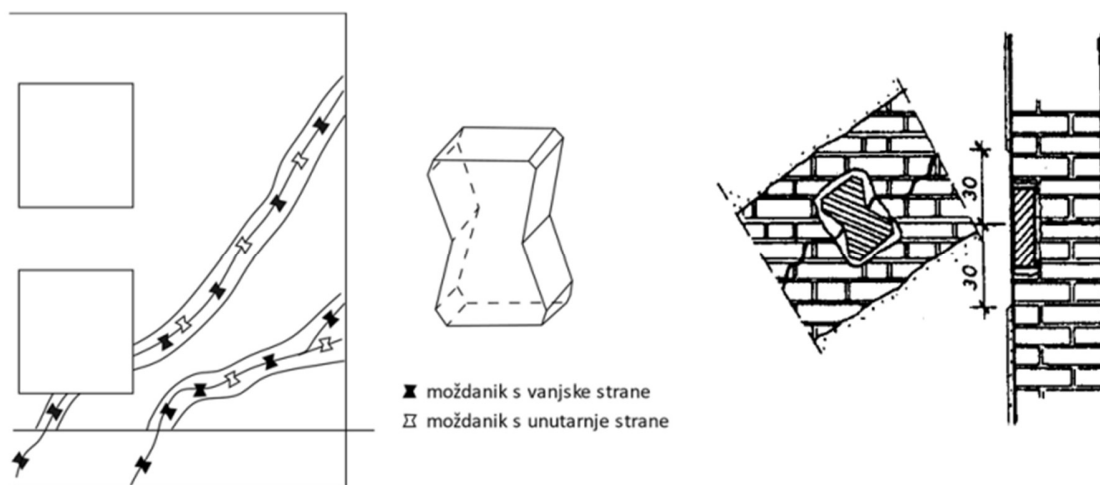


Slika 55. Umetanje čeličnih šipki (28)

### 6.1.2. Injektiranje pukotina i prezidavanje zida

Ova metoda varira ovisno o širini i vrsti pukotine. Ako je pukotina relativno mala, tj. Njena širina manja od 10 mm, onda se sanacija provodi injektiranjem pukotina. Injektiranje se vrši epoksi mortom ili lijepilom ako je širina puotnije manja od 0,5 mm. Između 0,5 mm i 10 mm , koristi se smjesa morta koja se sastoji od cementa, vapna i pijeska određene granulacije, vodivši računa o udjelu pojedinog sastojka u smjesi. , jer armatura preuzima vlačna i posmična naprezanja zbog dobre adhezije s mortom. Postupak injektiranja provodi se na način da se sa svake strane pukotine zid očisti 50-60 cm u širinu. Nakon toga se uzduž pukotine buše rupe na razmaku 30-50 cm u koje se postavljaju cjevčice promjera 12 mm. Zatim se mortom cjevčice učvrste te se popuni pukotina između cjevčica. Kada taj mort očvrstne, zatvore cjevčice te se otvaraju u parovima i ispiruju se vodom te ispušuju zrakom. Nakon toga provodi se injektiranje i to odozdo prema gore, sve dok mort ne izađe na gornju cjevčicu (28,32).

Ukoliko su pukotine širine 6-10 mm, moguće je također ubaciti betonske moždanike ili čelične šipke te zatim injektirati mrtom. Primjer moždanika prikazan je na slici 56.

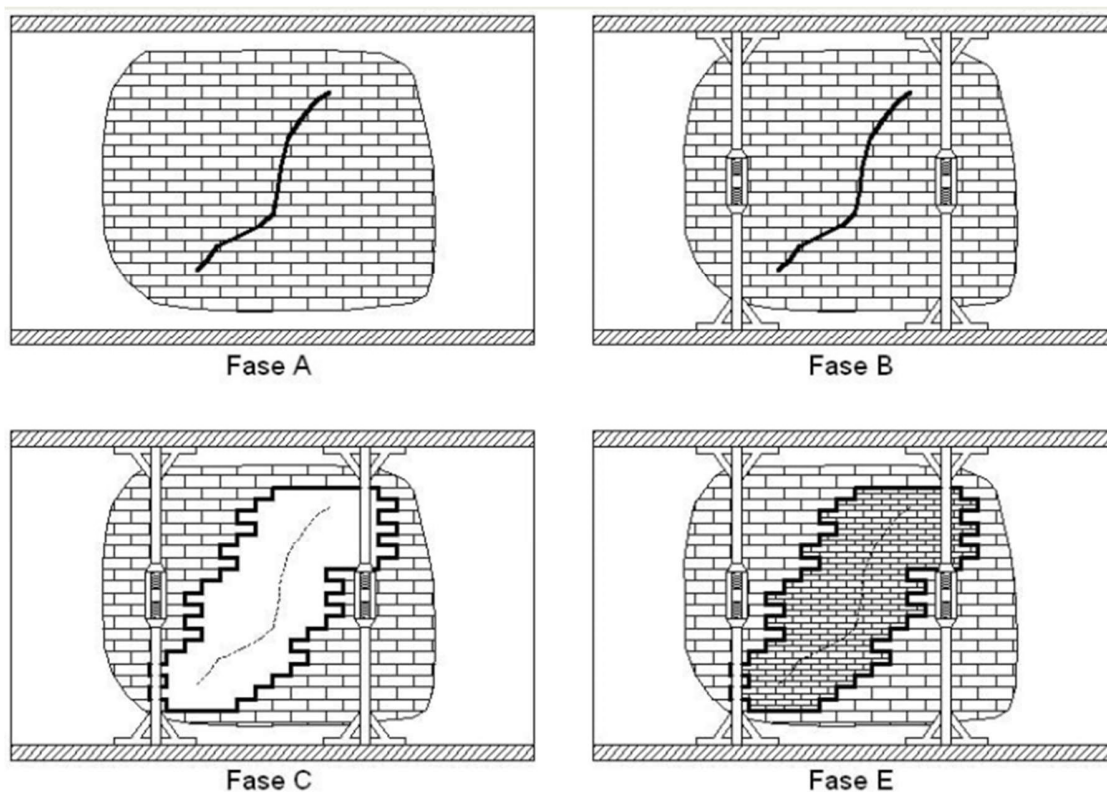


Slika 56. Tipično pojačanje moždanicima (32)

Ako su pukotine veće od 10 m i nemoguće je injektirati, potrebno je presložiti postojeći zid. Lokalna metodologija uklanjanja i ponovne izgradnje ("scuci-cuci") ima za cilj obnavljanje kontinuiteta zida uzduž linijskih pukotina (zamjena oštećenih elemenata novima, ponovno uspostavljanje konstrukcijskoga kontinuiteta) i obnavljanje teško oštećenih dijelova zidova. Postupak je prikazan na slici 57. Poželjna je uporaba materijala koji su oblikom, dimenzijama,



krutošću i čvrstoćom slični onima u izvornom zidu. Treba osigurati odgovarajuće veze kako bi se dobilo monolitno ponašanje. Učinkovitost intervencije strogo je povezana s povratom prethodnih svojstava zida. Načini izvođenja razlikuju se ovisno o stupnju oštećenja i tipologiji zida. Ako je oštećenje razmjerno malo i zahvaća samo jedan sloj zida, intervencija se može izvesti samo na zahvaćenoj strani. Ako oštećenje prolazi kroz veći dio zida, intervenciju treba izvesti postupnom zamjenom zidnih elemenata samo s jedne strane ili djelovanjem na obje strane koordinirano, u slučaju veće debljine zida. Općenito, u zahvatima “scuci-cuci” posebna se pozornost posvećuje kompatibilnosti novoga dijela s ostatkom zidane konstrukcije. Ponekad se, ako su stari zidani elementi još uvijek u dobrom stanju, izvorni materijal može ponovno upotrijebiti. Posebnu pozornost treba posvetiti žbuki koja mora biti kompatibilna s mehaničkim, kemijskim i fizikalnim karakteristikama zida. Treba napraviti redosljed zamjene zidnih elemenata podjelom zida u dijelove u kojima se može raditi naizmjenično. Zidne elemente koji su znatno oštećeni kao i one koji mogu prenijeti silu na područja u kojima se provodi zamjena treba poduprijeti radi ograničenja daljnjega širenja oštećenja (28).



Slika 57. Postupak preslagivanja zida (33)

### 6.1.3. Povezivanje zidova armiranobetonskim serklažima

Izvedba novih armirano-betonskih omeđujućih elemenata može se upotrijebiti kao metoda pojačanja kada je potrebno ojačati zidanu konstrukciju, ako je veza između zidova neadekvatna te kada se želi osigurati cjelovitost konstrukcije. Izvedbom serklaža povećava se nosivost i duktilnost konstrukcije te sama disperzija potresne energije zidane konstrukcije, a sam postupak vrlo je jednostavan: na spoju zidova i na razini stropova ukloni se dio zidanog zida i izvede serklaž (slika 58). Potrebno je ostvariti dobru vezu između zidanog elementa i serklaža. Horizontalni serklaži izvode se kako bi povezali vertikalne serklaže te kada je međukatna konstrukcija od drvenih grednika, a ne kruta armirano-betonska ploča. Drvene grednike potrebno je povezati sa serklažem i tako osigurati vezu između stropne konstrukcije i zida (28,34).



Slika 58. Prikaz izvedbe serklaža od ideje do izvedbe

U slučaju kada postojeći zidovi nisu dostatni za potresnu otpornost ili se želi povećati krutost građevine u nekom smjeru (čest slučaj kod starih građevina), moguće je dodati nove zidove, armirano-betonske ili zidane. Ukoliko je moguće, najprije se izvodi temelj za novi zid, zatim se izvede zid koji se spaja sa susjednim zidovima i stropnom konstrukcijom. Ako se dodaju zidani zidovi, potrebno je izvesti i nove vertikalne serklaže (28).

### 6.1.4. FRCM i FRP metode

FRCM (eng Fabric reinforced cementitious matrix) je jedan od novijih sustava ojačanja, kompozit koji se sastoji od tkanine (mreže) i anorganske matrice, a njihova povezanost ostvaruje se mehaničkim uklinjavanjem, odnosno impregnacijom morta kroz otvore u mreži načinjene od vlakana. Može se postavljati s obje strane ili jednostrano. Mreže (tkanine) mogu biti od različitih

vlakana – staklenih, bazaltnih, ugljičnih ili polifenilen benzobisoksazol (PBO) vlakana, a sama matrica je anorganske matrice (35). U FRCM sustavima vlakna preuzimaju vlačna naprezanja, dok matrica štiti mrežu i prenosi naprezanja sa zida na vlakna. Prianjanje morta i tkanine rezultat je mehaničkog uklinjavanja, tj. prodiranja morta između vlakanaca; gustoća mreže može se kontrolirati u svakom smjeru te se tako utječe na stupanj prodiranja morta i mehanička svojstva kompozitnog sustava. Primjenom FRCM sustava povećava se otpornost zida na posmik i savijanje u ravnini, savijanje van ravnine te vertikalna nosivost. Sustavi se još koriste za pojačanje zidanih lukova, svodova i kupola. Izvedba je slična kao kod FRP sustava; najčešće se koristi ručno polaganje (engl. *hand lay-up*) – najprije se nanosi sloj morta, zatim se postavlja mreža, pa sloj morta, a postupak se ponavlja ovisno o potrebnom broju slojeva. Problem koji se može javiti jest ostvarivanje kvalitetne veze između pojačanja i zida, a koja je potrebna da bi se ostvario prijenos sila sa zida na FRCM sustav. Veza se može poboljšati mehaničkim sidrenjem slojeva FRCM-a za zide. Glavne prednosti su: povećanje krutosti, zanemariva masa, povećana duktilnost, jednostavnost ugradnje i povećanje duktilnosti. Nedostataka je malo, a najznačajniji je mala požarna otpornost. FRCM kompozitni materijali pogodni su za pojačanje starih zidanih konstrukcija zbog bolje kompatibilnosti sa zidom, paropropusnosti, veće otpornosti na vanjska djelovanja te zbog reverzibilnosti postupka. Nadalje, kod anorganskih matrica ne dolazi do degradacije svojstava uslijed visokih temperatura – naprotiv, cementni mort služi kao dodatni sloj vatrozaštite. Klasično pojačanje prikazano je na slici 59 (28,32,35).



Slika 59. FRCM mreža (33)

FRP (engl. *Fiber reinforced polymer*) ili vlaknima armirani polimer jest kompozitni materijal kojeg čine određena vlakna ugrađena u polimernu matricu, pri čemu vlakna imaju funkciju armature, a polimerna matrica omogućuje finalni oblik proizvoda. Prikaz klasičnog ojačanja FRP-om prikazan je na slici 60. Na svojstva konačnog proizvoda utječu vrsta i orijentacija vlakana te sastav i količina polimerne matrice. Razlikuju se sljedeće vrste vlakana i odgovarajući FRP proizvodi: staklena vlakna (engl. *Glass fiber reinforced polymer, GFRP*), ugljična vlakna (engl. *Carbon fiber reinforced polymer, CFRP*), aramidna vlakna (engl. *Aramid fiber reinforced polymer, AFRP*) te bazaltna (engl. *Basalt fiber reinforced polymer, BFRP*). Vlakna se međusobno razlikuju po svojim mehaničkim karakteristikama pa tako npr. aramidna vlakna imaju vlačnu čvrstoću 3500 – 4200 MPa, dok bazaltna vlakna imaju vlačnu čvrstoću oko 1100 MPa.



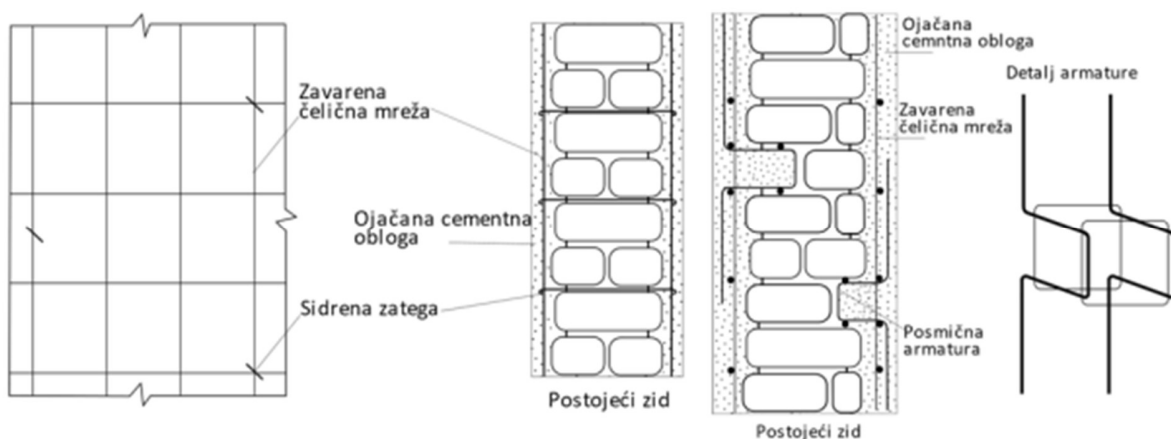
*Slika 60. Ojačanje greda u jednoj garaži (36)*

Polimerne matrice povezuju vlakna te ih štite od vanjskih utjecaja. Za mehanička svojstva FRP materijala izrazito je bitna posmična čvrstoća veze vlakana i matrice jer se njome prenosi opterećenje na vlakna. Za matricu se koriste različiti tipovi smola (epoksidne, nezasićene poliesterske i vinilesterske, cijanatesterske smole i dr.) čija svojstva također utječu na konačni proizvod. Glavne prednosti FRP-a su: zanemariva masa, mala zapremninska težina, velika vlačna čvrstoća u smjeru vlakana te mala osjetljivost na korziju. Glavni nedostaci nisu toliko prisutni kod zidanih konstrukcija kao što su kod betonskih, a glavni je kao i kod FRCM-a, a to je mala otpornost na visoke temperature te neduktilno linearno-elastično ponašanje do sloma, relativno visoka cijena materijala. Kod zidanih konstrukcija linearno-elastično ponašanje FRP-a ima manji značaj jer slom

pojačanih zidanih konstrukcija uglavnom nastupa preko zida; kako nije potreban velik modul elastičnosti mogu se koristiti jeftiniji materijali na bazi staklenih i bazaltnih vlakana. U zidanim konstrukcijama FRP materijali primjenjuju se za pojačavanje drvenih stropnih i krovnih konstrukcija, povećanje nosivosti zida na horizontalne sile u ravnini i savijanje van ravnine, povećanje duktilnosti zida, ovijanje stupova, povećanje nosivosti svodova i kupola (28,35).

#### 6.1.5. Armirano-betonske obloge (torkretiranje)

Ova metoda ima široku primjenu i kod kamenih i građevina od opeke. Koristi se kada je potrebno znatno povećati krutost ili posmično pojačati zid te kod velikih oštećenja. Ne može se primjenjivati kod zgrada koje su zaštićeno kulturno dobro iz razloga što mijenja vizuru građevine. Obloga se izvodi s jedne ili obje strane zida te se tako povećava otpornost na horizontalne sile i duktilnost sustava (slika 61).



Slika 61. Moguće povezivanje zida i obloge, čeličnom žicom(lijevo) i "koševima"(desno) (32)

Postupak započinje uklanjanjem žbuke i injektiranjem postojećih pukotina u zidu. Kroz zidove se izbuše rupe u koje se postavljaju vezne šipke promjera 8-12 mm koje povezuju dva sloja armature. Moguće je izvesti i džepove (niše) u zidu u koje se umeće armatura kako bi se ostvario prijenos sile. Nakon toga se ispore površina zida i postavlja armatura; najčešće se koriste armaturne mreže. Zatim se nanosi mlazni beton ili se postavlja oplata i lijeva novi betonski sloj; debljina sloja iznosi 6-8 cm u slučaju torkretiranja, odnosno do 16 cm u slučaju lijevanja betona u oplatu. Armaturna mreža povećava duktilnost, a zajedno sa oblogom prihvaća posmične sile i osigurava krutost uslučaju pojave pukotine u zidanom dijelu zida. Postupak je prikazan na slici 62 (28,32).



*Slika 62. Armiranje obloge(lijevo), torkretiranje(desno) (32)*

#### **6.1.6. Metode pojačanja stropnih dijafragmi**

Stropna konstrukcija od drvenih grednika koja je tipična za starije zidane konstrukcije često ima nedovoljnu krutost u ravnini. Takve konstrukcije nepovoljno se ponašaju u potresu te ih je potrebno pojačati, tj. ukrutiti u ravnini kako bi se osigurala ravnomjerna raspodjela potresnih horizontalnih sila na zidove. Potrebno je izvesti i pravilne veze sa zidovima kako bi se spriječilo njihovo odvajanje. Pojačanje stropne konstrukcije od drvenih grednika može se izvesti na više načina:

- postavljanje sloja dasaka u jednom smjeru, okomito na smjer nošenja drvenih grednika pri čemu se svaka daska čavla sa minimalno dva čavla
- ojačanje šperpločom u tri sloja. Prednosti uključuju brzinu i jednostavnost izvedbe te ukrućenje u ravnini i van ravnine.
- postavljanje dva sloja dasaka – prvi se postavlja okomito na smjer nošenja grednika, a drugi pod kutom od  $45^\circ$  u odnosu na prvi pri čemu se svaka daska čavla s min. dva čavla. Dijagonalni raspored dodatnog sloja osigurava veću krutost u obje ravnine te veću tlačnu otpornost
- ojačanje s križnim čeličnim trakama. Ovo je vrlo ekonomična metoda ojačanja, jednostavna i reverzibilna, brzo se izvodi, uz malo povećanje vlastite težine stropne konstrukcije

- Sprezanje sa betonskom tlačnom pločom. Pravilnim odabirom i rasporedom spajala ostvaruje se željeni stupanj sprezanja te se povećava nosivost i krutost sustava. Ovaj način prikazan je na slici 63.

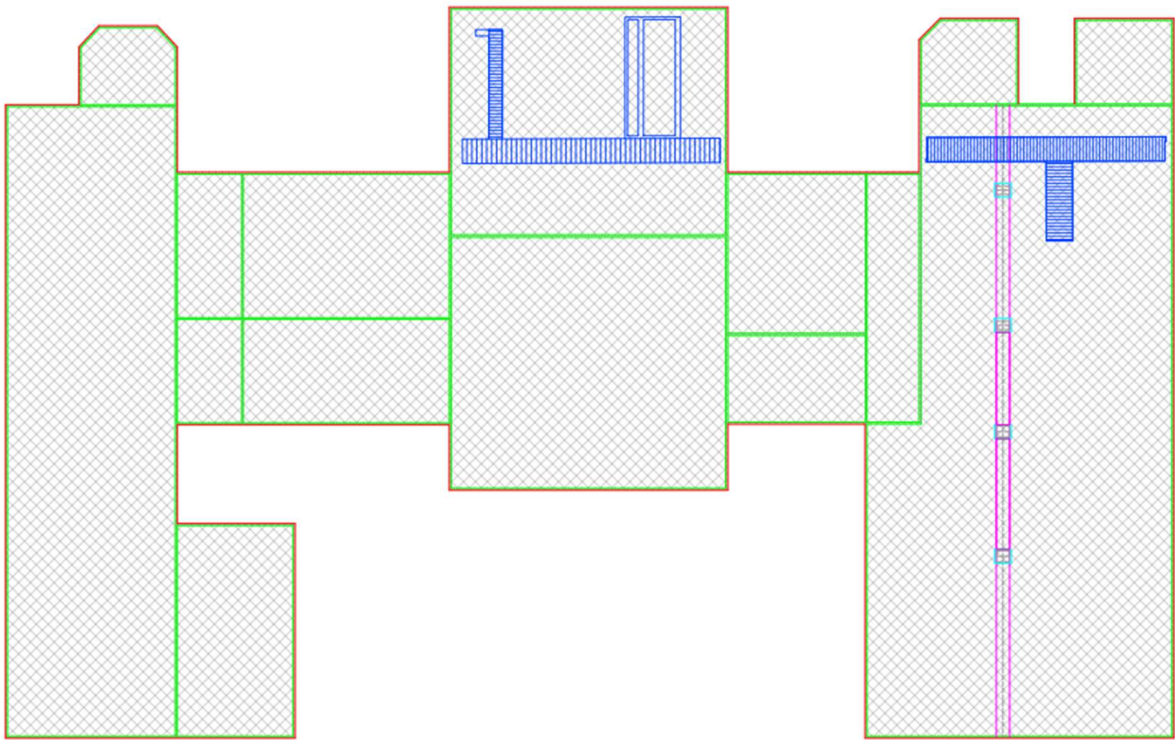


*Slika 63. Betonska tlačna ploča spregnuta s drvenim grednicima, tzv: "kruta dijafragma"*

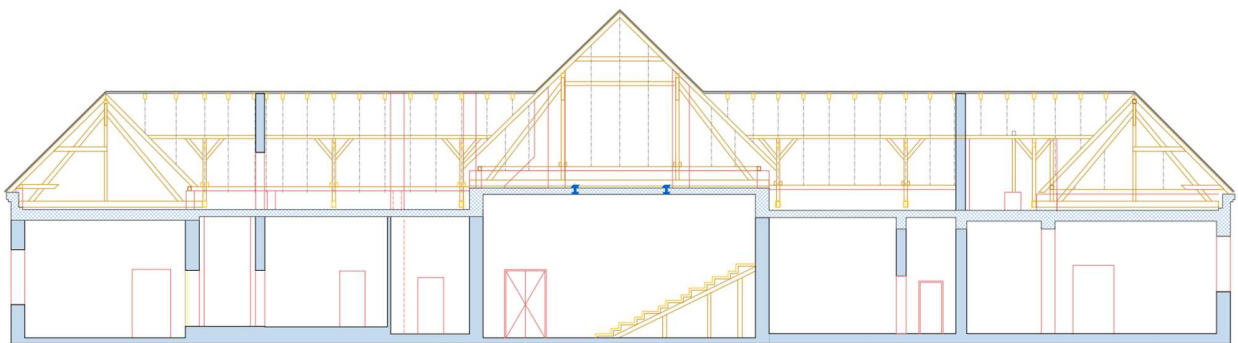
Vrlo je važno osigurati dobru vezu između betonske ploče i zidova u svrhu ograničavanja pomaka zidova te osiguranja prijenosa sile sa ploče na zidove.. Debljina ploče obično je 6-8 cm kako ne bi bilo preveliko povećanje vlastite težine. Ovisno o željenom stupnju sprezanja, za sprezanje se koriste štapasta spajala (vijci, vijci za drvo, trnovi), moždanici, armaturne šipke, epoksidno ljepilo itd. (28,37).

## 6.2. Potrebna pojačanja na promatranom modelu

Za promatranu građevinu, kako bi se osigurala potrebna razina obnove (razina 3), predviđeni su sljedeći koraci prikazani na slikama 64 i 65, te tablici 8:



*Slika 64. Tlocrtni prikaz pojačanja*



*Slika 65. Prikaz pojačanja u presjeku*

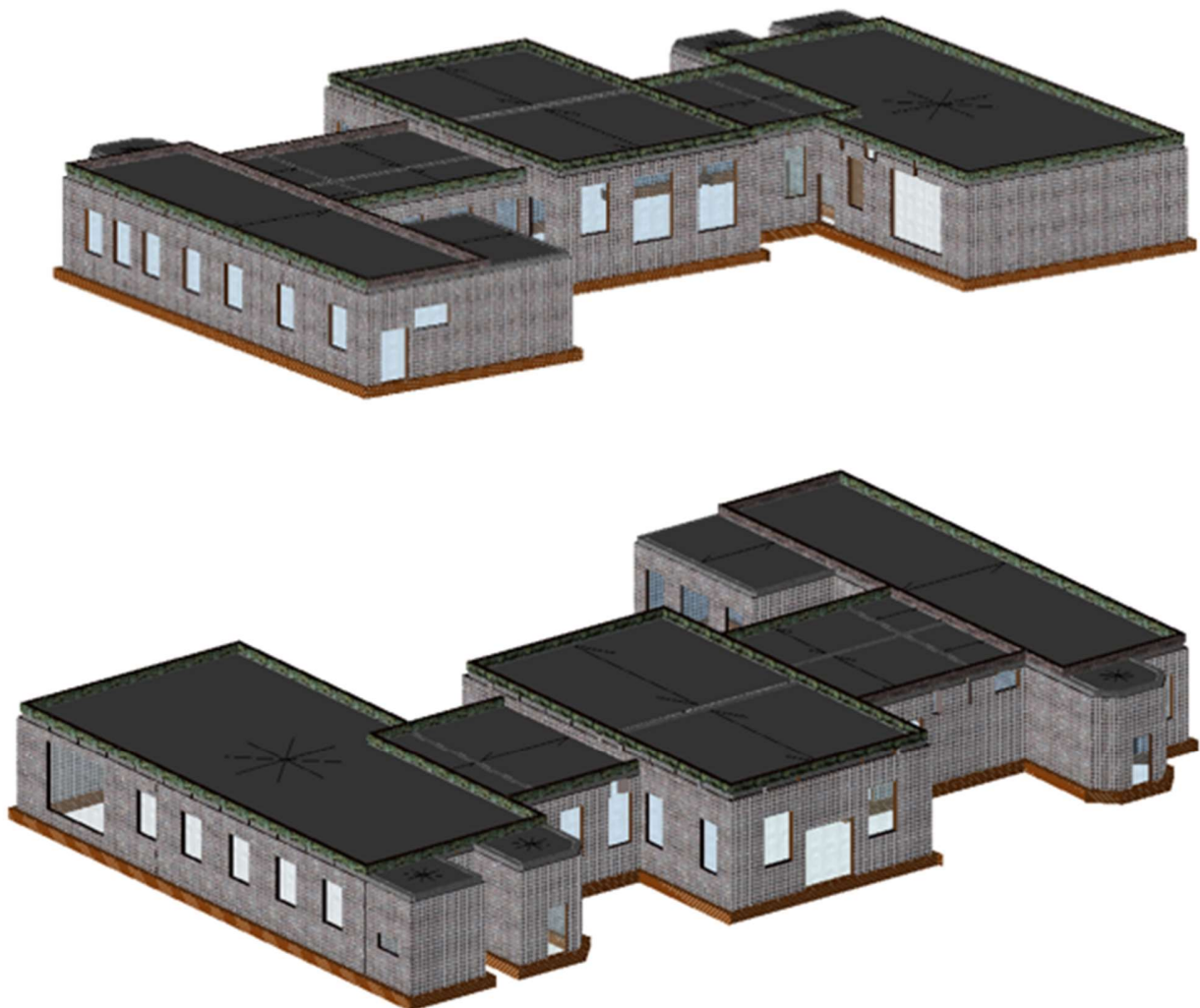


Tablica 8. Grafički prikaz pojačanja

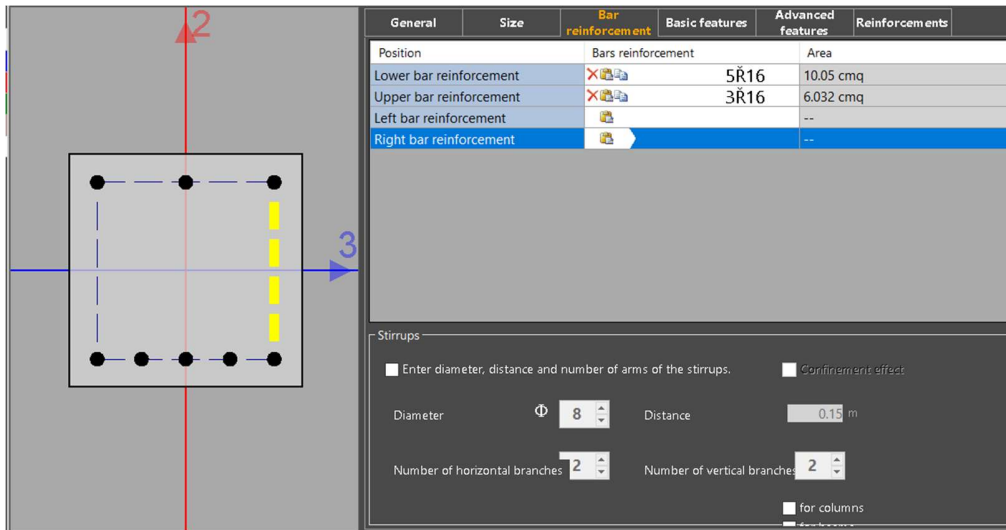
Grafički prikaz pojačanja	Opis pojačanja
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pojačanje nosivih zidova pročelja izvođenjem torkretnih obloga s unutarnje strane zidova</li> <li>• pojačanje unutarnjih nosivih zidova izvođenjem obostranih torkretnih obloga</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pojačanje nosivih zidova pročelja izvođenje punoplošnog pojačanja zida s vanjske strane sustavom CRM</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ovijanje stupova armiranobetonskom oblogom (tzv. „jacketing“)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pojačanje ab greda ugradnjom FRP traka</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pojačanje temeljne konstrukcije,</li> <li>• izvedba novih podnih ploča i podzemnih kanala za vodu</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lokalna zamjena dotrajalih drvenih grednika stropova ili njihovih dijelova</li> <li>• izvedba faksimilnog krovišta</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• izvedba armiranobetonskih tlačnih ploča iznad drvenih grednika te njeno sprezanje s istima</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• izvedba novog nadozida u sustavu omeđenog zida s horizontalnim armiranobetonskim serklažem na vrhu i vertikalnim armiranobetonskim serklažima na mjestima krovnih vezača</li> </ul>

### 6.3. Proračun pojačanja i model u programskom paketu 3DMacro

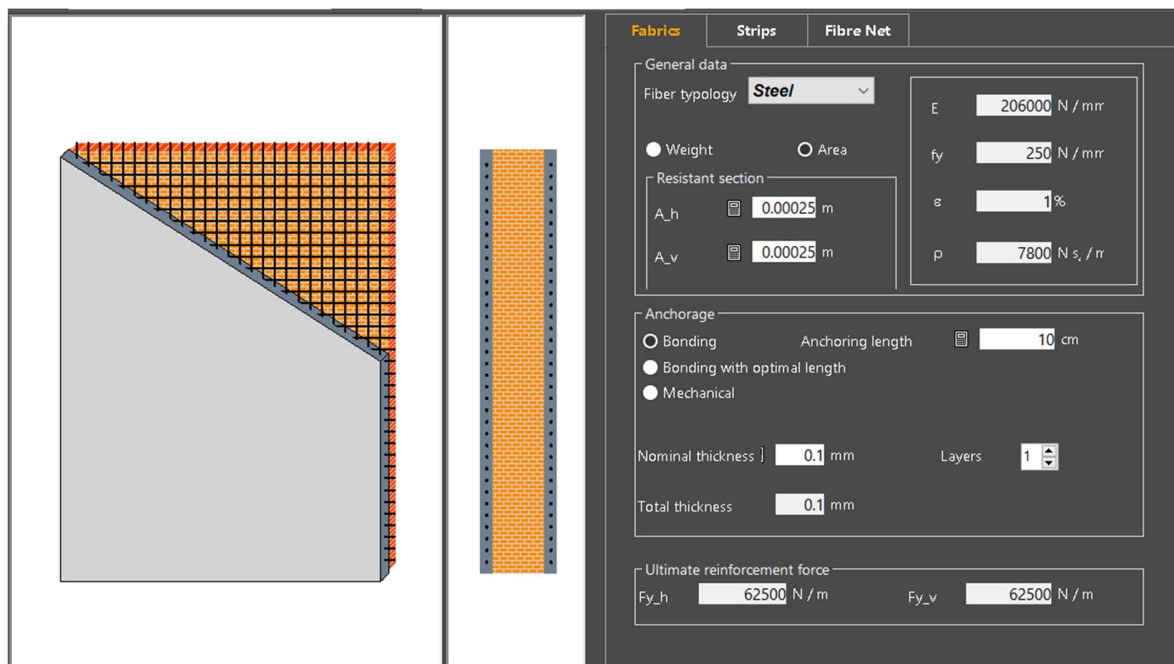
Modelirani su samo zidovi za koje su usvojene debljine te položaji otvora, prema nacrtima. Također su u modelu ucrtane nove armiranobetonske ploče te horizontalni serklaži. Ostala pojačanja simulirana su povećanjem karakteristika mreže, promjena površine armature i samog popuštanja čelika, kako bismo dobili svojstva koja su približna onima od torkreta, zbog nemogućnosti nanošenja preciznijeg pojačanja. Stavljena je tlačna ploča debljine 10 cm iznad drvenih grednika. Prikaz korištenih materijala i 3D modela prikazan je na slikama 66-70.



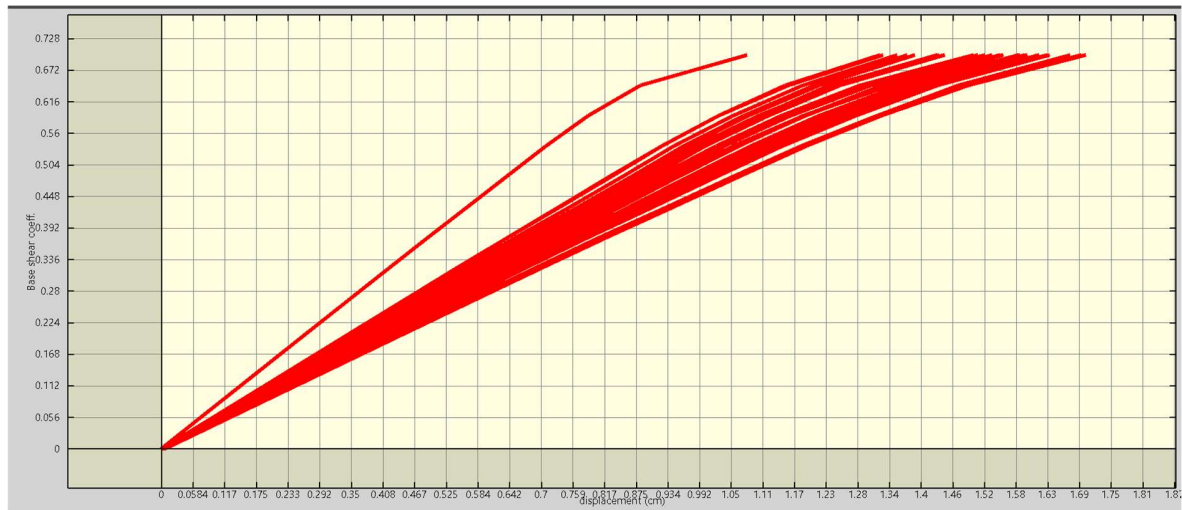
*Slika 66. Prikaz 3D modela sa horizontalnim serklažima, pojačanjem i tlačnim pločama*



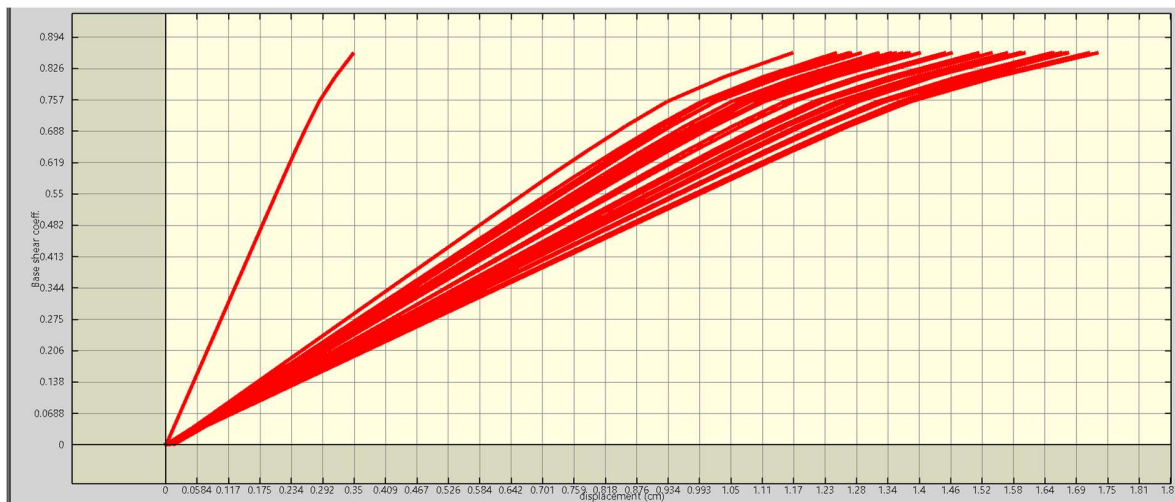
Slika 67. Karakteristike horizontalnih serklaža



Slika 68. Karakteristike pojačanja

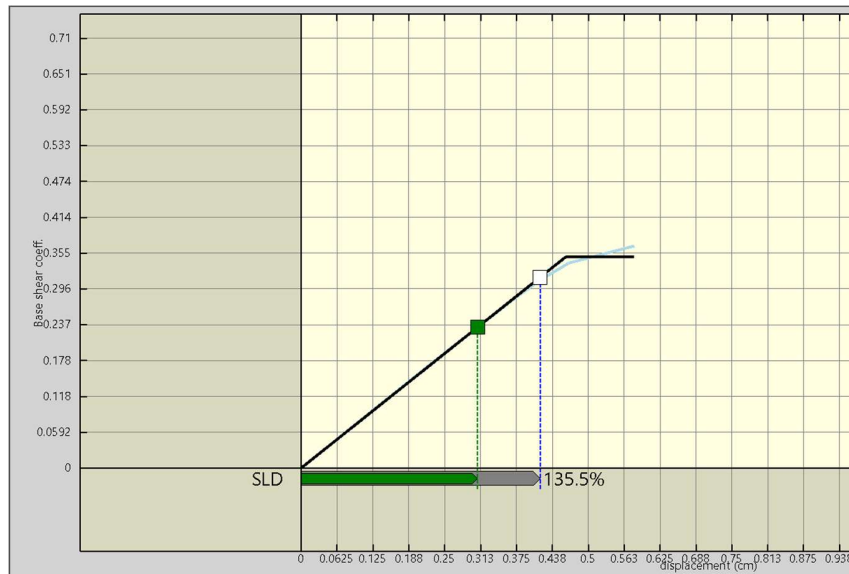


*Slika 69. Prikaz krivulje kapaciteta za X smjer*

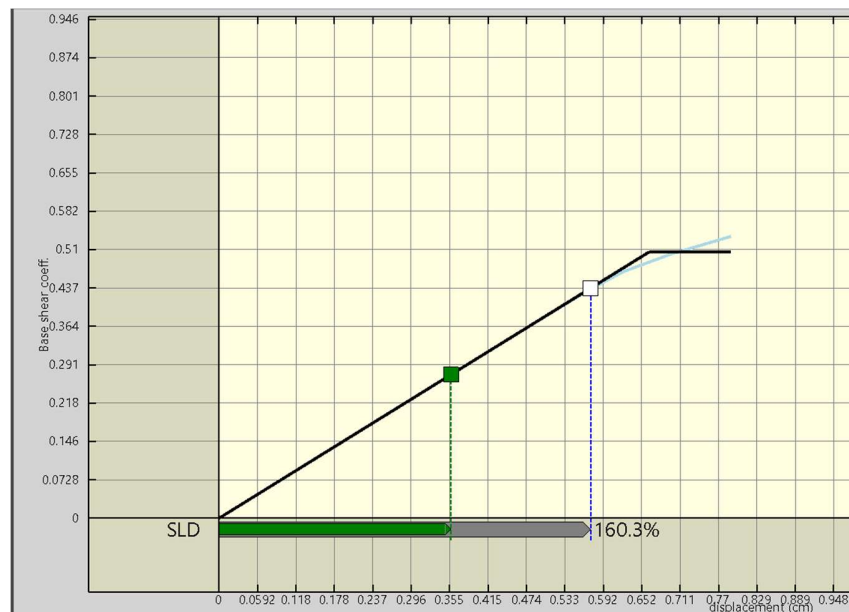


*Slika 70. Prikaz krivulje kapaciteta za Y smjer*

Uspoređuje se potresni zahtjev, u smislu pomaka, s raspoloživim kapacitetom konstrukcije, u korespondenciji s postizanjem razmatranih graničnih stanja. Na slikama 71 i 72 su prikazane push-over krivulje stvarnog i reduciranog sustava te ekvivalentna bilateralna krivulja. Za svako od graničnih stanja grafički se prikazuje i usporedba - u smislu pomaka - između kapaciteta i zahtjeva. Pored svakog od ovih redaka nalazi se grafički simbol koji označava na koje se granično stanje odnosi (DL). Kapacitet konstrukcije označen je sivom bojom, zahtjev je označen zelenom bojom ako je unutar kapaciteta, a crvenom bojom ako je izvan kapaciteta.



Slika 71. Pushover X, procjena seizmičke ranjivosti



Slika 72. Pushover Y, procjena seizmičke ranjivosti

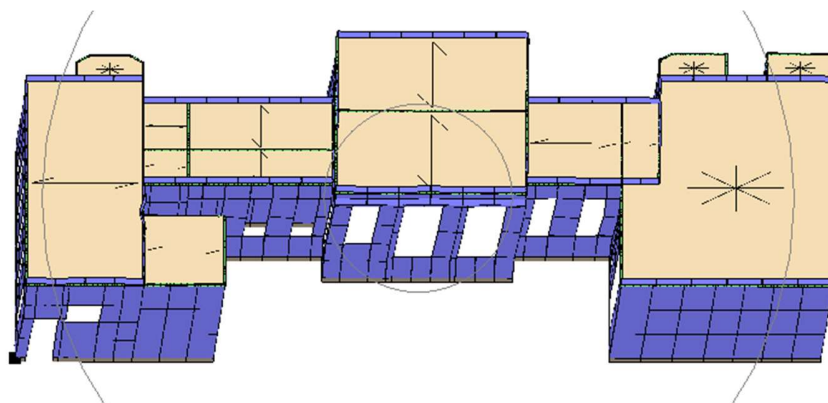
Procjenom seizmičke ranjivosti građevine za povratni period od 225 godina kapacitet u X smjeru iznosi 135,5 %, dok u Y smjeru kapacitet iznosi 160,3 %, čime je prosječni kapacitet 147,9 %. Potrebno je napomenuti kako nisu svi zahvati pojačanja konstrukcije uzeti u obzir prilikom modeliranja pa je kapacitet konstrukcije nešto veći od prikazanog. Također je provedena i modalna

## Procjena stanja i modeliranje pojačanja zgrade Građevinskog fakulteta

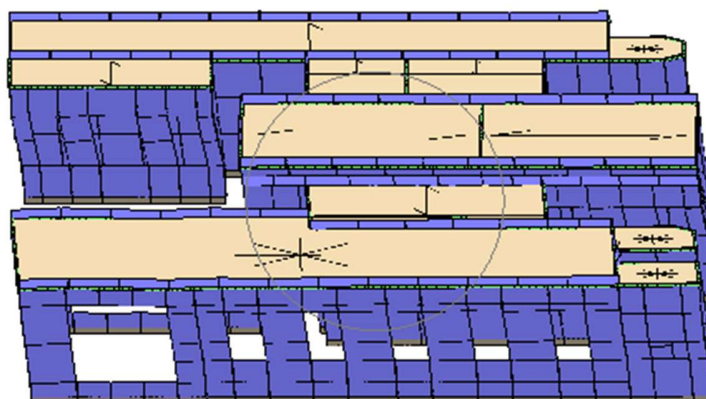
analiza, gdje se su prva dva moda translacije, a treći mod rotacija te je u njima aktivirano više od 70% mase u oba smjera (slike 73-75, tablica 9).

Tablica 9. Modovi u modalnoj analizi

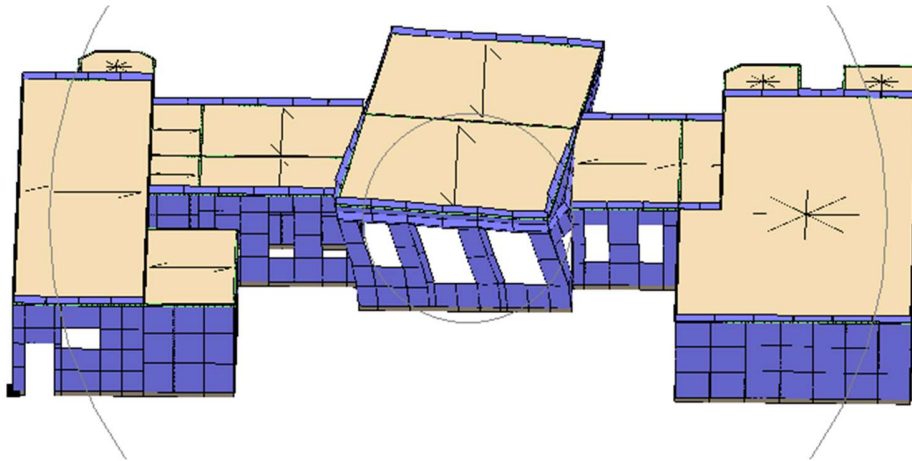
Mode	T [sec]	w [rad/sec]	Mx $\sqrt{\text{sec}^2/\text{ci}}$	My $\sqrt{\text{sec}^2/\text{ci}}$	Mz $\sqrt{\text{sec}^2/\text{ci}}$	Mx [%]	My [%]	Mz [%]	Mx Sum [%]	My Sum [%]	Mz Sum [%]	Gx	Gy	Gz
1	0,263498	23,845	11,028	0,004	0,000	75,68	0,02	0,00	75,68	0,02	0,00	3,321	0,060	0,000
2	0,236121	26,610	0,002	10,546	0,000	0,01	72,37	0,00	75,69	72,40	0,00	0,044	-3,247	0,001
3	0,223931	28,059	0,007	0,123	0,000	0,05	0,84	0,00	75,74	73,24	0,00	-0,084	0,351	0,000
4	0,211053	29,771	0,019	0,002	0,000	0,13	0,01	0,00	75,87	73,25	0,00	0,137	-0,041	0,000
5	0,180219	34,864	0,017	0,149	0,000	0,12	1,03	0,00	75,99	74,28	0,00	-0,130	0,387	-0,001
6	0,170281	36,899	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	75,99	74,28	0,00	0,004	0,017	0,000
7	0,170233	36,909	0,011	0,172	0,000	0,07	1,18	0,00	76,06	75,46	0,00	0,104	0,414	-0,002
8	0,167946	37,412	0,000	0,001	0,000	0,00	0,01	0,00	76,06	75,47	0,00	0,002	-0,037	0,000
9	0,166399	37,760	0,001	0,001	0,000	0,00	0,01	0,00	76,06	75,48	0,00	0,026	0,037	-0,001
10	0,164889	38,105	0,002	0,010	0,000	0,01	0,07	0,00	76,08	75,54	0,00	-0,047	0,098	-0,001
11	0,162566	38,650	0,003	0,021	0,000	0,02	0,15	0,00	76,10	75,69	0,00	0,055	0,146	-0,001
12	0,158944	39,531	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	76,10	75,69	0,00	-0,012	-0,016	0,000
13	0,156122	40,245	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	76,10	75,69	0,00	-0,001	-0,010	0,000
14	0,150980	41,616	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	76,10	75,69	0,00	0,009	0,002	0,000
15	0,147197	42,686	0,030	0,027	0,000	0,20	0,19	0,00	76,30	75,88	0,00	-0,172	-0,166	0,001



Slika 73. Prvi mod (translacija u X smjeru)



Slika 74. Drugi mod (translacija u Y smjeru)



*Slika 75. Treći mod (rotacija)*

## 7. Zaključak

Zbog svog geografskog položaja Republika Hrvatska spada u skupinu seizmički najugroženijih država u Europi. Dva umjerna potresa proteklih godina samo su zagrebala površinu pravih problema vezanih za gradnju u Republici Hrvatskoj. Greške u projektiranju i u gradnji, zastarjelost materijala i građevina, neadekvatna obnova, nepoštivanje zakona samo su neki od tih problema. Stručnjaci već godinama upozoravaju na moguću opasnost od potresa te katastrofalne posljedice koje su moguće, međutim većina pažnje je do tada bila usmjerena na energetska obnova i rekonstrukciju fasada, posebice u gradskoj jezgri, gdje je većina građevina dio kulturne baštine te je obnova takovih fasada veoma kompleksna i skupa. Potresi su pokazali da „ušminkavanje“ građevina nije rješenje, iz razloga što su ukrasi, vijenci i sl. na takvim obnovljenim zgrada uništeni. Problematika užeg centra grada Zagreba jest baš gradnja u blokovima, gdje se zgrade ponašaju kao jedna velika cjelina, što je veoma nepovoljno prilikom potresa, pogotovo ako su one nesimetrične. Kao velik problem se pokazao i nedostatak nosivih zidova u smjeru istok-zapad, koji bi pružili kakav takav otpor potresu. Postojeće zgrade zahtijevaju velika ulaganja u rekonstrukciju i održavanje kako bi zadovoljile suvremene propise o sigurnosti, protupotresnoj otpornosti i energetska učinkovitosti. Ciljevi protupotresne obnove jesu smanjiti ekonomsku štetu, zaštititi ljudske živote te povećati nosivost, krutost i duktilnost građevine.

Prema Programu mjera obnove zgrada oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-moslavačke županije i Karlovačke

Županije prioriteta za obnovu zgrada oštećenih u potresu određuju se prema sljedećim parametrima: namjena, lokacija, stupanj oštećenja, raspoloživa financijska sredstva te inženjerski i izvođački kapaciteti. Prvenstvo za obnovu imaju zgrade čije je održavanje cjelovitosti tijekom potresa od važnosti za širu zajednicu, kao što su: zdravstvene ustanove veće važnosti (klinički bolnički centri i sl.), građevine interventnih službi (vatrogasne, hitne pomoći, javne i nacionalne sigurnosti i sl.), zgrade javne uprave od vitalne važnosti za funkcioniranje nakon potresa, građevine od životne važnosti za opskrbu, telekomunikacije, energetske građevine, građevine za skladištenje zapaljivih tekućina, plinova i toksičnih materijala, te obiteljske kuće i višestambene zgrade u kojima je vlasnik, odnosno suvlasnik stanovao na dan 22. ožujka 2020. te 28. i 29. prosinca 2020. godine i koja mu je jedina nekretnina. Prvenstvo kod obnove obiteljskih kuća i višestambenih zgrada imaju oni vlasnici ili suvlasnici koji su smješteni u kontejnerima ili drugim oblicima privremenog smještaja na teret državnog proračuna, zatim vlasnici ili suvlasnici koji su primatelji socijalne skrbi te osobe s invaliditetom, u statusu branitelja ili drugom statusu prema posebnom zakonu. Planiranje grupa prioriteta zgrada određuje se na godišnjoj razini prema predviđenim godišnjim sredstvima iz Državnog proračuna te proračuna Grada Zagreba i Županija kao i drugim izvorima sredstava. Nakon analize raspoloživih sredstava planirati će se provedba postupaka javne nabave, odnosno ugovaranje temeljem provedbenih postupaka javne nabave. Oštećene zgrade kategorizirane crvenom oznakom prema klasifikaciji uporabljivosti predstavljaju prioritet pri uklanjanju/obnovi (38).

Zakon o obnovi zgrada oštećenih potresom ba području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-Moslavačke županije i Karlovačke županije propisuje slijedeće: cjelovita obnova konstrukcije je izvođenje radova koji uključuju pojačanja i popravke potresom oštećene građevinske konstrukcije zgrade kojima se postiže mehanička otpornost i stabilnost zgrade u odnosu na potresno djelovanje u skladu s Tehničkim propisom za građevinske konstrukcije, cjelovita obnova zgrade podrazumijeva obnovu građevinske konstrukcije te izvođenje potrebnih pripremnih, građevinskih, završno-obrtničkih i instalaterskih radova odnosno radova kojima se zgrada dovodi u stanje potpune građevinske uporabljivosti do razine koju zahtijevaju pravila struke, a uz ostale potrebne radove, po potrebi, obuhvaća i popravak nekonstrukcijskih elemenata, popravak konstrukcije, pojačanje konstrukcije zgrade i/ili cjelovitu obnovu konstrukcije. Osim temeljnog zahtjeva za građevine koji se odnosi na mehaničku otpornost i stabilnost te gospodarenje energijom i očuvanje topline, drugi temeljni zahtjevi se u cjelovitoj



obnovi zgrade ispunjavaju ako je to moguće bez znatnijih zahvata na zgradi i bez znatnijeg povećanja troškova. Također, važno je naglasiti par glavnih pojmova o kojima se govori svakodnevno u medijima, a čitatelji nisu u potpunosti upoznati sa činjenicom što točno taj pojam obuhvaća. Pa je tako pojačanje konstrukcije izvođenje radova pojačanja potresom oštećene građevinske konstrukcije zgrade kojima se postiže povećanje mehaničke otpornosti i stabilnosti zgrade u odnosu na potresno djelovanje u skladu s Tehničkim propisom, a popravak konstrukcije je izvođenje radova popravka i pojačanja potresom oštećene građevinske konstrukcije zgrade kojima se postiže mehanička otpornost i stabilnost zgrade na potresno djelovanje u skladu s Tehničkim propisom, uz to je važno još dodati i popravak nekonstrukcijskih elemenata je popravak ili zamjena nekonstrukcijskih elemenata zgrade (pokrova, zabata, parapeta, pregradnih zidova, dimnjaka, dizala i dr. određenih Tehničkim propisom). Sredstva za organiziranu nekonstrukcijsku obnovu, popravak konstrukcije obiteljskih kuća, poslovnih, stambeno-poslovnih i višestambenih zgrada te gradnju i opremanje zamjenskih obiteljskih kuća koje su neuporabljive odnosno privremeno neuporabljive ili uništene, uključujući i cjelovitu obnovu pojedinačno zaštićenog kulturnog dobra osiguravaju za područje Grada Zagreba odnosno Krapinsko-zagorske županije:

- Republika Hrvatska u državnom proračunu u visini od 80%
- Grad Zagreb odnosno Krapinsko-zagorska županija u visini od po 20%

Na temelju ovoga Zakona obnavljaju se postojeće oštećene zgrade, i to: zgrade javne namjene, višestambene zgrade, poslovne zgrade, stambeno-poslovne zgrade te obiteljske kuće. Oštećene zgrade obnavljaju se u skladu s projektom obnove konstrukcije zgrade odnosno projektom obnove zgrade za cjelovitu obnovu zgrade. Projektom obnove konstrukcije zgrade projektira se popravak konstrukcije, pojačanje konstrukcije i/ili cjelovita obnova konstrukcije te, po potrebi, popravak nekonstrukcijskih elemenata. Projektom obnove konstrukcije zgrade projektira se popravak konstrukcije, pojačanje konstrukcije i/ili cjelovita obnova konstrukcije te, po potrebi, popravak nekonstrukcijskih elemenata. Projekt obnove konstrukcije zgrade, ovisno o načinu obnavljanja oštećene zgrade i stanju zgrade, izrađuju ovlašteni inženjer građevinarstva koji ima najmanje pet godina radnog iskustva u projektiranju konstrukcija i ovlašteni arhitekt koji ima najmanje pet godina radnog iskustva, ako ovim Zakonom nije propisano drukčije, te ovlašteni inženjer strojarstva i ovlašteni inženjer elektrotehnike, ako za to postoji potreba. U slučaju projekta obnove konstrukcije zgrade kojom se projektira samo popravak konstrukcije, projekt može izraditi i samo ovlašteni inženjer građevinarstva koji ima najmanje pet godina radnog iskustva u projektiranju

konstrukcija. Elaborat ocjene postojećeg stanja građevinske konstrukcije i projekt obnove iz stavka 1. ovoga članka za višestambene zgrade, stambeno-poslovne zgrade, poslovne zgrade i zgrade javne namjene smatraju se cjelinom koja se naručuje u jednom postupku nabave i povjerava istoj osobi (39).

U ovom radu prikazana je procjena stanja i obnova zgrade Građevinskog fakulteta-odsjeka za Hidrotehniku koji se nalazi u Savskoj ulici. Provedena je metoda postupnog guranja (eng. *pushover analysis*) analiza postojećeg stanja u dva softvera: 3Muri i 3Dmacro. Model se ne ponaša kao jedna cjelina jer nema krutu dijafragmu te je nemoguće ostvariti tzv. efekt kutije (eng. *box effect*), a zbog nepravilnog oblika ponašanje je još nepovoljnije. Javlja se torzija središnjeg dijela koji je za cca 80 cm viši od ostalih te otkazivanja i oštećenja na samim nadozidima po cijeloj konstrukciji. U suradnji sa tvrtkom Studio Arhing za navedenu građevinu donesena je odluka o određenim pojačanjima koje je bilo potrebno izvesti na građevini. Modelirana je građevina u jednom softveru, 3DMacru. Modelirani su samo zidovi koji su nosivi te za koje su usvojene debljine i položaji otvora prema nacrtima. Također su u modelu ucrtane nove armiranobetonske ploče te horizontalni serklaži. Ostala pojačanja simulirana su povećanjem karakteristika mreže, promjena površine armature i samog popuštanja čelika, kako bismo dobili svojstva koja su približna onima od torkreta, zbog nemogućnosti nanošenja preciznijeg pojačanja. Stavljena je tlačna ploča debljine 10 cm iznad drvenih grednika. Pojačana građevina sada se ponašala kao jedna cjelina, a ne svaki dio za sebe. Tlačne ploče povezale su sve zidove te omogućile efekt kutije (eng. *box effect*) te su prva tri moda u modalnoj analizi pokazala translacije u dva smjera te rotaciju u trećem modu. Prikazana je i usporedba potresnih zahtjeva, u smislu pomaka, s raspoloživim kapacitetom konstrukcije, u korespondenciji s postizanjem razmatranih graničnih stanja.. Za svako od graničnih stanja grafički se prikazana je i usporedba u smislu pomaka između kapaciteta i zahtjeva. Procjenom seizmičke ranjivosti građevine za povratni period od 225 godina kapacitet u X smjeru iznosi 135,5 %, dok u Y smjeru kapacitet iznosi 160,3 %, čime je prosječni kapacitet 147,9 %. Potrebno je napomenuti kako nisu svi zahvati pojačanja konstrukcije uzeti u obzir prilikom modeliranja pa je kapacitet konstrukcije nešto veći od prikazanog.

## Literatura

1. Stepinac Mislav, Lourenco Paulo, Atalić Josip, Kišiček Tomislav, Uroš Mario, Baniček Maja, et al. Damage classification of residential buildings in historical downtown after the ML5.5 earthquake in Zagreb, Croatia in 2020. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212420921001060?via%3Dihub>
2. Hafner Ivan, Lazarević Damir. Post-Earthquake Assessment of a Historical Masonry Building after the Zagreb Earthquake—Case Study.
3. Salaman Aida, Stepinac Mislav, Matorić Ivan, Klasić Mia. Post-Earthquake Condition Assessment and Seismic Upgrading Strategies for a Heritage-Protected School in Petrinja, Croatia.
4. Vlada Republike Hrvatske. CROATIA EARTHQUAKE. Rapid Damage and Needs Assessment. 2020.
5. CROATIA EARTHQUAKE Rapid Damage and Needs Assessment. 2020.
6. CROATIA DECEMBER 2020 EARTHQUAKE Rapid Damage and Needs Assessment.
7. Markušić S, Stanko D, Penava D, Ivančić I, Oršulić OB, Korbar T, et al. Destructive m6.2 petrinja earthquake (croatia) in 2020—preliminary multidisciplinary research. *Remote Sens (Basel)*. 2021 Mar 2;13(6).
8. Perković Nikola, Stepinac Mislav, Rajčić Vlatka, Barbalić Jure. Assessment of Timber Roof Structures before and after Earthquakes. Available from: <https://repositorij.rgn.unizg.hr/en/islandora/object/rgn%3A1452/datastream/FILE0/view>
9. <https://www.hgi-cgs.hr/priopcenje-za-medije-izvjesce-hrvatskog-geoloskog-instituta-o-potresima/>.
10. Vlada Republike Hrvatske. CROATIA DECEMBER 2020 EARTHQUAKE Rapid Damage and Needs Assessment. 2021.
11. Hrvatski centar za Potresno Inženjerstvo (2022). [Internet] Dostupno na: [www.hcpi.hr](http://www.hcpi.hr) (pristupljeno: 20.5.2022.).

12. <https://www.mdpi.com/2075-5309-11-11-528>.
13. Radnić J, Grgić N, Buzov A, Banović I, Zulim MS, Baloević G, et al. Mw 6.4 Petrinja earthquake in Croatia: Main earthquake parameters, impact on buildings and recommendation for their structural strengthening. Vol. 73, Gradjevinar. Croatian Association of Civil Engineers; 2021. p. 1109–28.
14. STEER-EERI: PETRINJA, CROATIA DECEMBER 29, 2020, MW 6.4 EARTHQUAKE JOINT RECONNAISSANCE REPORT (JRR) Terms of Use CC BY-SA 4.0. Available from: <https://doi.org/10.17603/ds2-1w0y-5080>. CitableLink <https://hdl.handle.net/2346/86723>
15. Stepinac Mislav, Kišiček Tomislav, Renić Tvrtko, Hafner Ivan, Bedon Chiara. Methods for the Assessment of Critical Properties in Existing Masonry Structures under Seismic Loads—The ARES Project. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/5/1576>
16. Banjad Pečur Ivana. PRIMJENA NERAZORNIH ISPITIVANJA U GRAĐEVINARSTVU.
17. Stepinac Mislav, Gašparović Mateo. A Review of Emerging Technologies for an Assessment of Safety and Seismic Vulnerability and Damage Detection of Existing Masonry Structures. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/15/5060>
18. Hafner Ivan, Kišiček Tomislav. Procjena stanja postojećih zidanih konstrukcija: Pregled metoda.
19. Krolo Joško, Damjanović Domagoj, Duvnjak Ivan, Frančić Smrkić Marina, Bartolac Marko, Koščak Janko. Metode određivanja mehaničkih svojstava zida. Available from: <https://hrcak.srce.hr/file/369533>
20. Moretić Antonela, Stepinac Mislav, Chieffo Nicola, B. Lourenco Paulo. Vulnerability assessment of historical building aggregates in Zagreb: implementation of a macroseismic approach.
21. Mitrović Saša, Čaušević Mehmed. Osnove laserskog skeniranja iz zraka.

22. Fajfar P. Analysis in seismic provisions for buildings: past, present and future: The fifth Prof. Nicholas Ambraseys lecture. Vol. 16, Bulletin of Earthquake Engineering. Springer Netherlands; 2018. p. 2567–608.
23. Mitrović S, Čaušević M. Nelinearni statički seizmički proračuni konstrukcija. Građevinar. 2009;61(6):521–31.
24. Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC:2009).
25. Lazarević D., Šavor Novak M., Uroš M. Dinamika konstrukcija s uvodom u potresno inženjerstvo - Skripta. Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu. Zagreb, 2018. 204 p.
26. Fajfar P, Fischinger M, Isaković T. Metoda procjene seizmičkog ponašanja zgrada i mostova. Vol. 52, GRAĐEVINAR. 2000.
27. Čaušević M, Zehentner E. Nelinearni seizmički proračun konstrukcija prema normi EN 1998-1:2004. Građevinar [Internet]. 2007;59(9):767–77. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/27202166>
28. URGENTNI PROGRAM POTRESNE OBNOVE UPPO Građevinska tehnička rješenja GRAĐEVINSKI FAKULTET.
29. S.T.A. Data, 3Muri.
30. Eiseco coputers, 3DMacro.
31. Karte potresnih područja Republike Hrvatske.
32. Galić J., Vukić H., Andrić D., Stepinac L. Tehnike pojačanja i popravke zidanih zgrada.
33. Mario Todorčić. Analize i pristupi obnove karakteristične donjogradske građevine u Zagrebu.
34. Reza Amiraslanzadeh, Toshikazu Ikemoto, Masakatsu Miyajima. A Comparative Study on Seismic Retrofitting Methods for Unreinforced Masonry Brick Walls.

35. Kišiček Tomislav, Stepinac Mislav, Renić Tvrtko, Hafner Ivan, Lulić Luka. Strengthening of masonry walls with FRP or TRM.
36. Tarek Alkhrdaji. Strengthening of Concrete Structures Using FRP Composites.
37. Adriana Bjelanović. Tradicijski drveni stropni sustavi i ojačanja – doprinos potresnoj otpornosti postojećih zidanih zgrada.
38. Program mjera obnove zgrada Oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-moslavačke županije i Karlovačke županije.
39. Zakon o obnovi zgrada ostecenih potresom na podrucju Grada Zagreba 2023.

## Popis slika

Slika 1. Prikaz oštećenja tipične donjogradske zgrade u Zagrebu.....	1
Slika 2. Karta procijenjenog intenziteta (prema EMS-98) petrinjskog potresa s obzirom na prijave građana(7) .....	2
Slika 3. Tektonske granice i gibanja tektonskih ploča na području istočnog Sredozemlja (8) .....	4
Slika 4. Sklerometar tipa Digi Schmidt (16).....	13
Slika 5. Prikaz ultrazvučne metode za niske frekvencije.....	14
Slika 6. Različiti oblici plosnatih preša (19).....	15
Slika 7. Model gradske jezgre dobiven laserskim snimanjem iz zraka .....	16
Slika 8. Elastični spektar ubrzanja i pomaka u tradicionalnom formatu (a) i formatu AD (b) (26) .....	21
Slika 9. Elastični spektar i reducirani spektri za različite vrijednosti $\mu$ (26) .....	22
Slika 10. Idealizacija nelinearne krivulje sila-pomak bilinearnom krivuljom.....	23
Slika 11. Grafički postupak za određivanje zahtjeva elastičnog i neelastičnog pomaka (26) .....	24
Slika 12. Geografski smještaj u prostoru .....	26
Slika 13. Izvadak građevinske dozvole iz 1960. godine.....	27
Slika 14. Tlocrt građevine iz građevinske dozvole iz 1960. godine .....	27
Slika 15. Prikaz sjeverozapadnog pročelja građevine.....	29
Slika 16. Prikaz jugoistočnog pročelja građevine.....	29
Slika 17. Tlocrt građevine.....	30
Slika 18. Uzdužni presjek građevine .....	30
Slika 19. Poprečni presjek građevine.....	30
Slika 20. Oznake za kategorije uporabljivosti korištene prilikom brzih pregleda.....	31
Slika 21. Vrste graničnih stanja .....	33
Slika 22. Prikaz oštećenja na 3D modelu.....	39
Slika 23. Prikaz jednostruke visulje nad sjevernim krilom zgrade .....	41
Slika 24. Dvostruka visulja nad središnjim dijelom građevine.....	41
Slika 25. Prikaz ravnog krova nad kupolom na zapadnom pročelju.....	42
Slika 26. Uzdužno oštećenje na jednoj veznoj gredi .....	43
Slika 27. Prikaz sondaže poda velikog laboratorija .....	43

Slika 28. Prikaz sondaže poda malog laboratorija .....	44
Slika 29. Presjek stropa velikog laboratorija uz jugoistočno pročelje .....	45
Slika 30. Presjek stropa velikog laboratorija u 3D-u .....	45
Slika 31. Presjek stropa velikog laboratorija uz jugoistočno pročelje, otprilike ispod sljemena krovišta.....	46
Slika 32. 3D prikaz stropa uz jugoistočno pročelje ispod sljemena .....	46
Slika 33. Presjek zida između laboratorija i hodnika na južnoj strani .....	47
Slika 34. 3D prikaz zida.....	47
Slika 35. Prikaz makroelemenata u 3DMacru .....	50
Slika 36. Prikaz povratnih perioda i ubrzanja tla (29) .....	50
Slika 37. Prikaz kategorija mogućih oštećenja građevine .....	51
Slika 38. Jugoistočno pročelje .....	52
Slika 39. Karakteristike zida korištene za model.....	52
Slika 40. Pozicija zida za y smjer u tlocrtu.....	53
Slika 41. Otkazivanje zida u y smjeru van ravnine; shema otvaranja zgloba.....	53
Slika 42. Prikaz kapaciteta nosivosti zida u y smjeru u odnosu na ubrzanje tla za granično stanje( PP 475 godina).....	54
Slika 43. Pozicija zida za x smjer u tlocrtu.....	54
Slika 44. Otkazivanje zida u x smjeru van ravnine; shema otvaranja zgloba.....	55
Slika 45. Prikaz kapaciteta nosivosti zida u x smjeru u odnosu na ubrzanje tla za granično stanje (PP 475 godina).....	55
Slika 46. Kontrolni čvor.....	56
Slika 47. Krivulje kapaciteta nosivosti za X smjer (plavo) i Y smjer (crveno).....	58
Slika 48. Krivulja kapaciteta nosivosti za mjerodavnu analizu u X smjeru (analiza br. 1) .....	58
Slika 49. Krivulja kapaciteta nosivosti za mjerodavnu analizu u Y smjeru (analiza br. 19) .....	58
Slika 50. 3D prikaz oštećenja za mjerodavnu analizu u X smjeru (analiza br. 1) .....	59
Slika 51. Tlocrtni prikaz pomaka za mjerodavnu analizu u X smjeru (analiza br.1) .....	59
Slika 52. 3D prikaz oštećenja za mjerodavnu analizu u Y smjeru (analiza br. 19) .....	60
Slika 53. Tlocrtni prikaz pomaka za mjerodavnu analizu u Y smjeru (analiza br. 19) .....	60
Slika 54. Čišćenje i ispiranje te zapunjavanje sljubnica (31).....	62
Slika 55. Umetanje čeličnih šipki (30).....	62



Slika 56. Tipično pojačanje moždanicima (31) .....	63
Slika 57. Postupak preslagivanja zida (32) .....	64
Slika 58. Prikaz izvedbe serklaža od ideje do izvedbe .....	65
Slika 59. FRCM mreža (32).....	66
Slika 60. Ojačanje greda u jednoj garaži (35).....	67
Slika 61. Moguće povezivanje zida i obloge, čeličnom žicom(lijevo) i "koševima"(desno) (31) .....	68
Slika 62. Armiranje obloge(lijevo), torkretiranje(desno) (31).....	69
Slika 63. Betonska tlačna ploča spregnuta s drvenim grednicima, tzv:"kruta dijafragma" .....	70
Slika 64. Tlocrtni prikaz pojačanja .....	71
Slika 65. Prikaz pojačanja u presjeku .....	71
Slika 66. Prikaz 3D modela sa horizontalnim serklažima, pojačanjem i tlačnim pločama .....	73
Slika 67. Karakteristike horizontalnih serklaža .....	74
Slika 68. Karakteristike pojačanja .....	74
Slika 69. Prikaz krivulje kapaciteta za X smjer .....	75
Slika 70. Prikaz krivulje kapaciteta za Y smjer .....	75
Slika 71. Pushover X, procjena seizmičke ranjivosti.....	76
Slika 72. Pushover Y, procjena seizmičke ranjivosti.....	76
Slika 73. Prvi mod ( translacija u X smjeru).....	77
Slika 74. Drugi mod (translacija u Y smjeru).....	77
Slika 75. Treći mod (rotacija) .....	78

## Popis tablica

Tablica 1. Najčešće nerazorne metode za procjenu stanja postojećih zidanih konstrukcija (15) ..11	
Tablica 2. Prikaz oštećenja na zidovima.....35	35
Tablica 3. Oštećenja na spojevima zidova .....36	36
Tablica 4. Prikaz oštećenja na stropnim konstrukcijama.....37	37
Tablica 5. Ostala oštećenja .....38	38
Tablica 6. Karakteristike ziđa dobivene istražnim radovima.....48	48
Tablica 7. Rezultati analiza.....57	57
Tablica 8. Grafički prikaz pojačanja.....72	72
Tablica 9. Modovi u modalnoj analizi .....77	77