

Oštećenje tipične zidane zgrade u Zagrebačkom potresu

Delač, Helena

Undergraduate thesis / Završni 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:237:879791>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-05**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Završni rad

**OŠTEĆENJE TIPIČNE ZIDANE ZGRADE U
ZAGREBAČKOM POTRESU**

Helena Delač

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Završni rad

**OŠTEĆENJE TIPIČNE ZIDANE ZGRADE U
ZAGREBAČKOM POTRESU**

Helena Delač

Mentorica: izv. prof. dr. sc. Petra Gidak

Zagreb, 2023.

Sadržaj

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. SEZIMIČKI HAZARD U GRADU ZGREBU | 1 |
| 3. KARAKTERISTIČNA OŠTEĆENJA ZIDANIH GRAĐEVINA | 1 |
| 4. OCJENJIVANJE OŠTEĆENJA KONSTRUKCIJE | 2 |
| 4.1. Vrste pregleda | 2 |
| 4.2. Obrasci za pregled građevina | 3 |
| 4.3. Kategorije oštećenja i uporabljivosti | 4 |
| 5. TEHNIČKI OPIS GRAĐEVINE | 5 |
| 5.1. Opis konstrukcije | 5 |
| 5.2. Izvorni i stečeni nedostaci | 9 |
| 6. POTRESNO DJELOVANJE NA KONSTRUKCIJU | 14 |
| 6.1. Proračunske sile potresa | 14 |
| 7. UTJECAJ POTRESNOG DJELOVANJA NA PONAŠANJE ZGRADE | 17 |
| 7.1. <i>Pushover</i> analiza | 17 |
| 7.2. Numerički model | 18 |
| 7.3. Rezultati | 19 |
| 8. OŠTEĆENJA NASTALA U POTRESU 2020. | 22 |
| 9. MJERE OBNOVE | 29 |
| 10. ZAKLJUČAK | 32 |
| 11. POPIS SLIKA | 33 |
| 12. POPIS REFERENCI | 34 |

1. UVOD

Tema ovog Završnog rada biti će gruba procjena i ocjenjivanje oštećenja nastalih u potresu koji je pogodio grad Zagreb 22. ožujka 2020. godine. Napravljen je općeniti uvod i prikazani su ključni rizici od potresa kako bi se dobila što potpunija slika djelovanja potresa na građevine općenito, ali s naglaskom na predmetnu građevinu čija će konstruktivna obilježja biti detaljnije opisana u nastavku rada. Također će biti opisana metodologija procjene samih oštećenja i interpretacija istih. Zaključno, na temelju provedenih istraživanja i vizualnog pregleda oštećenja dotične građevine te provedbom analize postupnog guranja (engl. pushover analysis) dana su idejna tehnička rješenja za sanaciju nastalih oštećenja, ali i ona koja su već provedena jer je zgrada u trenutku pregleda bila djelomično obnovljena.

2. SEIZMIČKI HAZARD U GRADU ZGREBU

Seizmički hazard, odnosno potresna opasnost obuhvaća moguće razorne učinke djelovanja potresa za danu lokaciju. Šteta koju obuhvaća statistika odnosi se na ekonomske štete, oštećenja građevina, ljudske žrtve i slično. Izražava se kao vjerojatnost da će promatrani parametar premašiti određene vrijednosti za dani povratni period.

Grad Zagreb je seizmički aktivno područje koje prema procjenama izloženo velikom potresnom riziku koji u obzir uzima gustoću naseljenosti, važnost grada, oštetljivost građevina. Oštetljivost građevina jedan je od najvažnijih podataka za procjenu izloženosti jer otkazivanje nosivih konstrukcija i oštećenje građevina dovodi u pitanje ljudske živote i pridonosi ekonomskom riziku. Iz ovog je razloga bitno poznavati podatke o seizmičkoj aktivnosti, fondu građevina i načinu projektiranja građevina u seizmički aktivnim područjima. [1]

3. KARAKTERISTIČNA OŠTEĆENJA ZIDANIH GRAĐEVINA

Predmetna se građevina nalazi u centru grada Zagreba gdje su uglavnom građevine s kraja 19. stoljeća ili početka 20. stoljeća. Građene su u blokovima koji su više-manje pravilni, raznih dimenzija pa se zgrade koje nisu na rubovima tih blokova za vrijeme potresa ponašaju kao da su međusobno povezane. Građenje u blokovima pokazalo je kako pozitivne utjecaje na

građevine unutar blokova tako i negativne, gdje je negativan utjecaj vidljiv na primjeru predmetne građevine (opisano u poglavlju 6.)

Nosiva konstrukcija zidanih zgrada iz ovog perioda sastoji se uglavnom od neomeđenih zidova od opeke sa, ili češće bez horizontalnih i vertikalnih serklaža, koji nose u dva ortogonalna smjera, uglavnom paralelni i okomiti na smjer ulice. Međukatna konstrukcija je najčešće tradicijska drvena sa drvenim gredama koje se oslanjaju na uzdužne zidove paralelne s ulicom.

Krovne konstrukcije su također tradicijske drvene bez odgovarajuće stabilizacije, a oštećenja na njima su uzrokovana rušenjem dimnjaka ili dijelova zabatnih zidova susjednih građevina koje se u nizu ističu visinom. Do odvajanja zabatnih zidova dolazi zbog neodgovarajućeg povezivanja sa stropnim pločama, odnosno zbog činjenice da se stropne grede pružaju u smjeru paralelnom sa tim zidovima i nemaju dovoljnu konstrukcijsku vezu sa zidom. Kod samih zidova uočena su oštećenja u ravnini i van njihove ravnine. Oštećenja u ravnini karakterizirana su horizontalnim, vertikalnim i dijagonalnim pukotinama koje ukazuju na prekoračenje vlačne i posmične čvrstoće morta.

Osim oštećenja krovišta, nosivih zidova, stropnih konstrukcija i dimnjaka došlo je do oštećenja svodova, nadvoja, stubišta, pregradnih zidova, ukrasnih fasadnih elemenata itd. Karakteristični mehanizmi sloma i njihovo značenje bit će detaljnije obrađeni u poglavlju 6.

4. OCJENJIVANJE OŠTEĆENJA KONSTRUKCIJE

4.1. Vrste pregleda

Postoji više vrsta pregleda oštećenih građevina na temelju kojih se donosi procjena uporabljivosti građevine. To su brzi, spasilački, ubrzani, detaljni i inženjerski pregledi. Brzi odnosno inicijalni pregledi provode se u roku od nekoliko sati nakon potresa i provode ih hitne službe i izvidnički timovi, ova vrsta pregleda ne obuhvaća pregled stanja građevina već se provodi s ciljem prikupljanja informacija o ukupnom broju ruševina. U sljedećih 24 sata provode se spasilački pregledi, a nakon toga, u sljedećih 10 dana potrebno je provesti ubrzane pregleda. Ubrzani su pregledi od velike važnosti za procjenu štete i daljnje postupanje s oštećenim građevina. Njih provode građevinski stručnjaci i građevinski inženjeri koji na temelju vizualnog pregleda građevinu svrstavaju u jednu od 5 kategorija oštećenja. Ubrzani se pregledi provode na temelju standardiziranih obrazaca.

4.2. Obrasci za pregled građevina

Prije svega potrebno je napomenuti kako u Hrvatskoj u danima nakon potresa nije postojala službena metodologija razvijena za kategorizaciju i ocjenjivanje stupnjeva oštećenja građevina već je donesen prijedlog Obrasca za pregled građevina u takvim situacijama. Prijedlog Obrasca prvi je put predložen u [Atalić et al. 2013-2019] na temelju obrazaca koji su se prije toga koristili u Italiji, nažalost nakon 2014. godine rad na prilagodbi i razvijanju daljnjeg pristupa ocjeni uporabljivosti i samoj kategorizaciji oštećenja nije nastavljen.

Obrazac se ispunjava za predmetnu građevinu i sastoji se od 11 tablica. Procjena oštećenja započinje upisom lokacije objekta i odgovorne osobe koja provodi pregled. Potrebno je naznačiti preciznost pregleda, morfologiju terena i skicirati položaj građevine u prostoru ili priložiti tehničku dokumentaciju ukoliko je ona dostupna. Unose se podaci o vremenu izgradnje i općenita obilježja građevine.

Osim što je potrebno procijeniti rizik od urušavanja ili otpadanja dijelova predmetne građevine, treba procijeniti i rizik od urušavanja susjednih građevina na predmetnu jer kod građevina u nizu to može imati bitnu ulogu, ovisno o njihovom međusobnom položaju. Razina opasnosti je u tablicama naznačena bojama, tako možemo vidjeti da žuta boja predstavlja blagu, narančasta umjerenu te crvena značajnu opasnost.

Pregledom se utvrđuje i stanje krovšta koje, ako je povoljno, može imati pozitivan utjecaj na sveukupnu potresnu otpornost građevine. Obraća se pozornost na prisutnost horizontalnih sila potiska koje rogovi prenose na zabatne zidove i s obzirom na to krovna konstrukcija se klasificira kao lagana ili teška te s potiskom ili bez. Najpovoljniji slučaj je lagano krovšte bez potiska.

Kod zidanih je konstrukcija potrebno ocijeniti pravilnost odnosno nepravilnost vertikalnih i horizontalnih elemenata pošto pravilan tlocrtni raspored nosivih, ali i pregradnih zidova te greda značajno utječe na otpornost zgrade za vrijeme djelovanja potresa.

Prije konačnog sažetka i ocjene uporabljivosti građevine potrebno je još ispuniti dijelove koji se odnose na oštećenja konstrukcijskih i nekonstrukcijskih elemenata. Sažetak podrazumijeva ocjenu rizika koji može biti konstrukcijski, nekonstrukcijski, vanjski ili geotehnički. Svaka od navedenih kategorija može se ocijeniti kako visoko, umjereno ili nisko i niskorizična. Kod konstrukcijskih rizika podrazumijeva se oštećenje elemenata koji sudjeluju u potresnoj otpornosti građevine dok se nekonstrukcijski odnosi na elemente koji predstavljaju opasnost za

stanare i prolaznike, npr. Ispadanje crijepa. Vanjski rizik, kao što je već prethodno opisano uzima u obzir mogućnost da elementi susjedne zgrade padnu na predmetnu građevinu ili njen prilaz.

Konačno, pregled završava prijedlogom privremenih mjera hitne intervencije i dodavanjem posebnih opažanja i napomena ukoliko za nešto takvo nije bilo previđeno nigdje u obrascu. Nakon toga građevina može dobiti jednu od 6 mogućih ocjena uporabljivosti.

4.3. Kategorije oštećenja i uporabljivosti

Kategorije oštećenja označene su karakterističnim bojama – zelena, narančasta i crvena. Ukoliko je građevina dobila zelenu oznaku znači da je uporabljiva bez ograničenja ili s preporukom. Ako je uporabljiva bez ograničenja znači da nosivi sustav nije oštećen i da se može koristiti bez opasnosti. Preporuku o postupanju daje građevinski stručnjak, a ona se može odnositi na uklanjanje dimnjaka ili jednostavno ograničenu uporabu određenih dijelova građevine.

Građevine označene " naljepnicom" narančaste boje privremeno su neuporabljive što može značiti da je potreban detaljan pregled ili da su potrebne mjere hitne intervencije. Detaljan pregled potreban je za uklanjanje potencijalne opasnosti jer je u ovom slučaju nosivi sustav djelomično narušen te je boravak u zgradi isključivo na vlastitu odgovornost. Slično je i ukoliko su potrebne mjere hitne intervencije, oštećenja su umjerena, ali postoji mogućnost urušavanja nekih dijelova građevine.

U slučaju da je građevina neuporabljiva, što zbog vanjskih utjecaja, što zbog oštećenja nosivog sustava dobit će crvenu oznaku i boravak u takvim objektima nikako nije preporučen.

| UPORABLJIVO | | PRIVREMENO NEUPORABLJIVO | | NEUPORABLJIVO | |
|-----------------------|----|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| <input type="radio"/> | U1 | bez OGRANIČENJA | <input type="radio"/> | PN1 | potreban DETALJAN PREGLED |
| <input type="radio"/> | U2 | UPORABLJIVO s preporukom | <input type="radio"/> | PN2 | potrebne mjere HITNE INTERVENCIJE |
| PROVEDEN BRZI PREGLED | | PROVEDEN BRZI PREGLED | | PROVEDEN BRZI PREGLED | |

Slika 1 Kategorije uporabljivosti [2]

5. TEHNIČKI OPIS GRAĐEVINE

5.1. Opis konstrukcije

Predmetna se građevina nalazi u Donjem Gradu u Zagrebu. Izvorni nacrti su s početka dvadesetog stoljeća i prikupljeni su u Arhivu grada Zagreba.

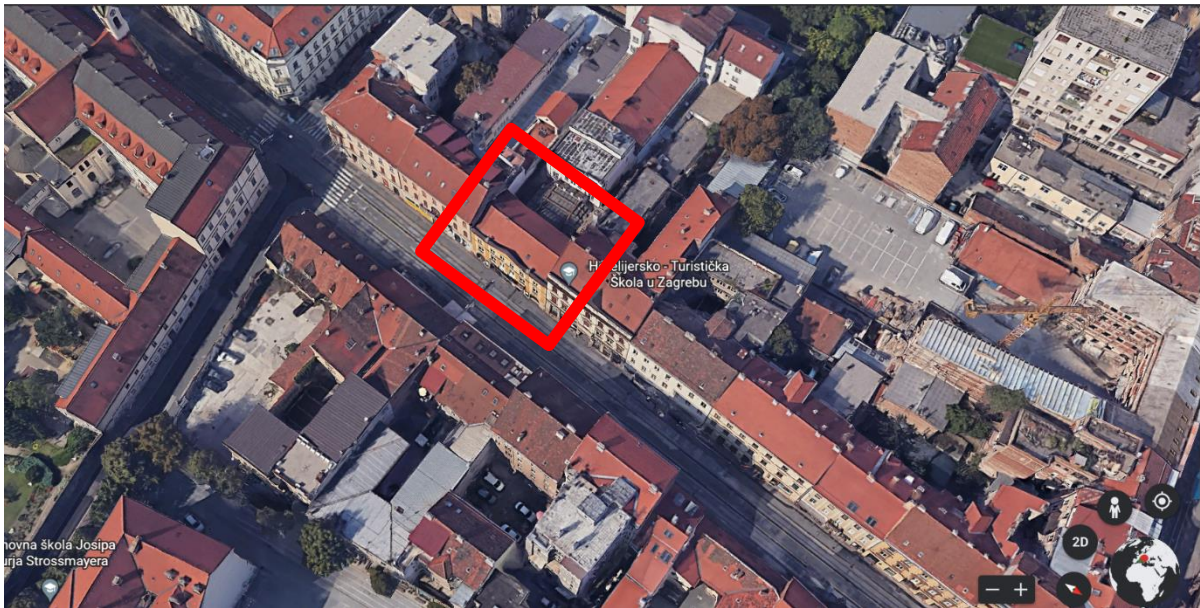
Građevina je nepravilnih tlocrtnih dimenzija, kako je prikazano na slici 5. Vanjski zidovi paralelni sa smjerom pružanja ulice su dimenzija 20 m (ulični zid), 20,45 m i vanjski zidovi okomiti na ulicu 11,90 i 11,92 m. Površina pojedine etaže iznosi približno 244 m².

Tlocrt prizemlja se sastoji od vanjskih nosivih zidova debljine 70 cm i unutarnjih također 70 cm u smjeru okomitom na smjer ulice te jedan u smjeru paralelnom s ulicom koji je debljine 85 cm. Visina stropa prizemlja iznosi 3,90 m (od kote gotovog poda prizemlja do kote gotovog poda prvog kata). U zidu debljine 85 cm vidljivi su pravili otvori koji se nastavaju na sve 3 etaže, a upućuju na postojanje dimnjaka koji više nisu u uporabi.

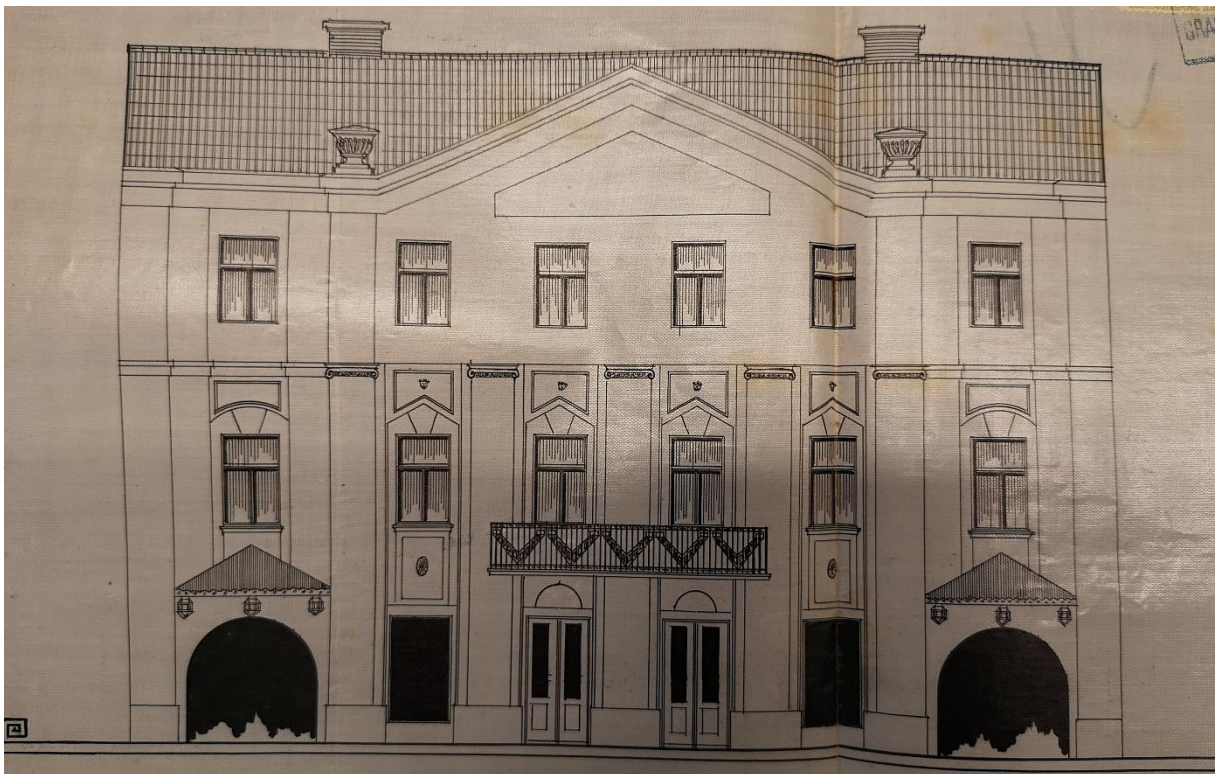
Tlocrt prvog kata čine vanjski nosivi zidovi debljine 70 i 65 cm, unutarnji 35, 65 i 80 cm. Visina ove etaže iznosi 3,60 m. Svi zidovi su međusobno paralelni i okomiti osim lijevog zabatnog zida koji je pod blagim kutom (otprilike 3°).

Na drugom katu nosivi su zidovi manjih dimenzija u odnosu na zidove prizemlja. Vanjski zidovi su debljine 45 cm, a unutarnji 35 cm. Visina drugog kata iznosi 3,0 m (svijetla visina kata). Visina građevine s etažama, bez krovišta iznosi 11 m.

Krovište se razlikuje od onog koje je dano nacrtima jer je tavanski prostor, odnosno potkrovlje pretvoreno u garderobu kazališta. Krovna se konstrukcija sastoji od pajante (16 x 28 cm) povezane dvostrukim kosim stolicama (16x18 cm) s rukama (12 x 14 cm) i dva središnja drvena stupa (20 x 20 cm) povezana gredom istih dimenzija. Detalji spojeva krovnih elemenata nisu poznati već su dimenzije izmjerene prilikom pregleda predmetne građevine. Stubište je izmijenjeno, dvokrako s međupodestima i nema više centralnog zida debljine 60 cm koji se protezao po čitavoj vertikali građevine.



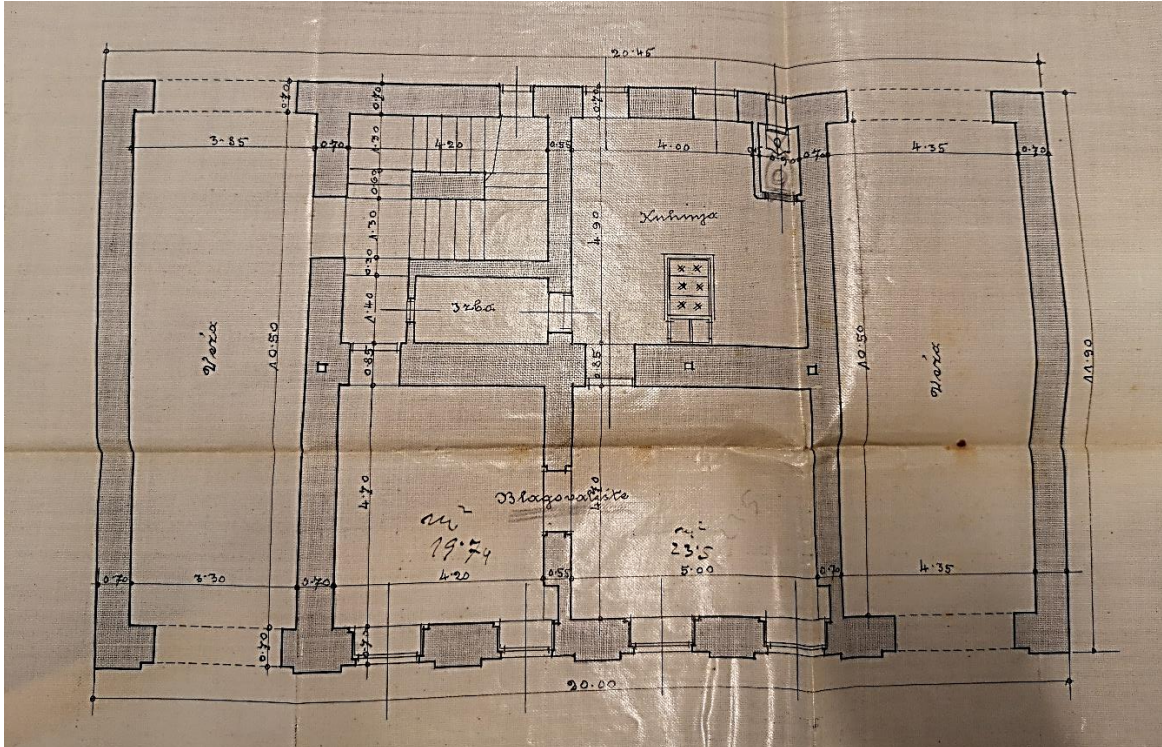
Slika 2 Položaj građevine u bloku [3]



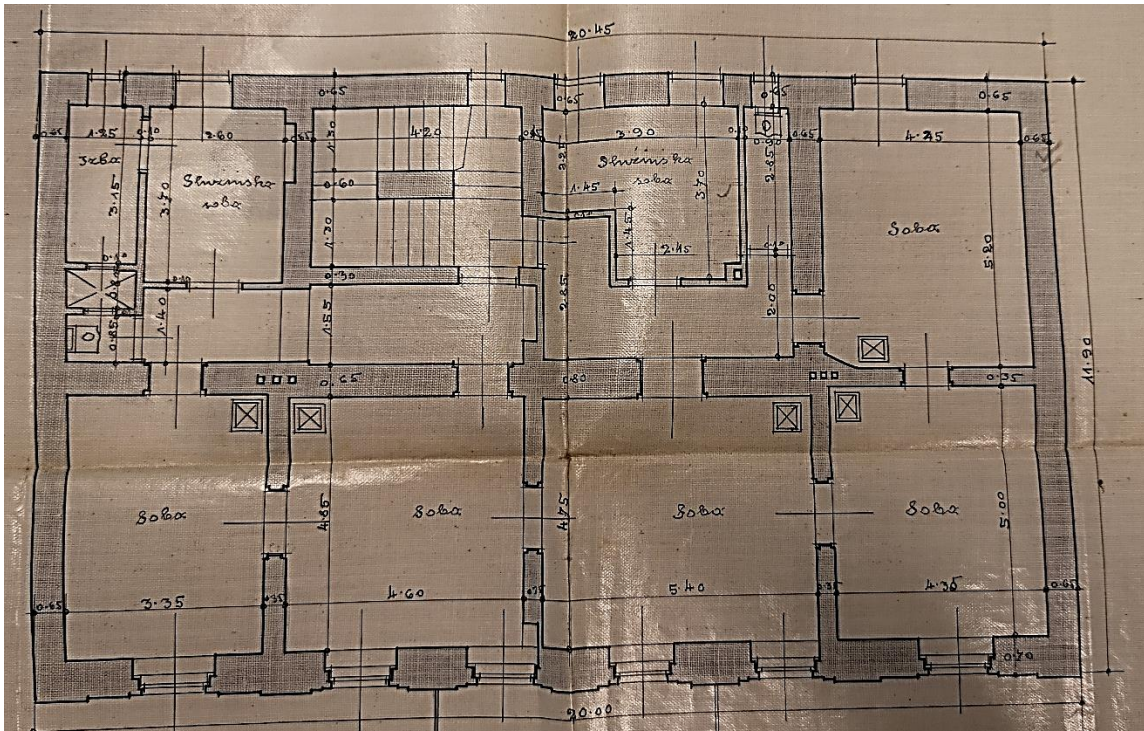
Slika 3 Pročelje građevine prema nacrtima [4]



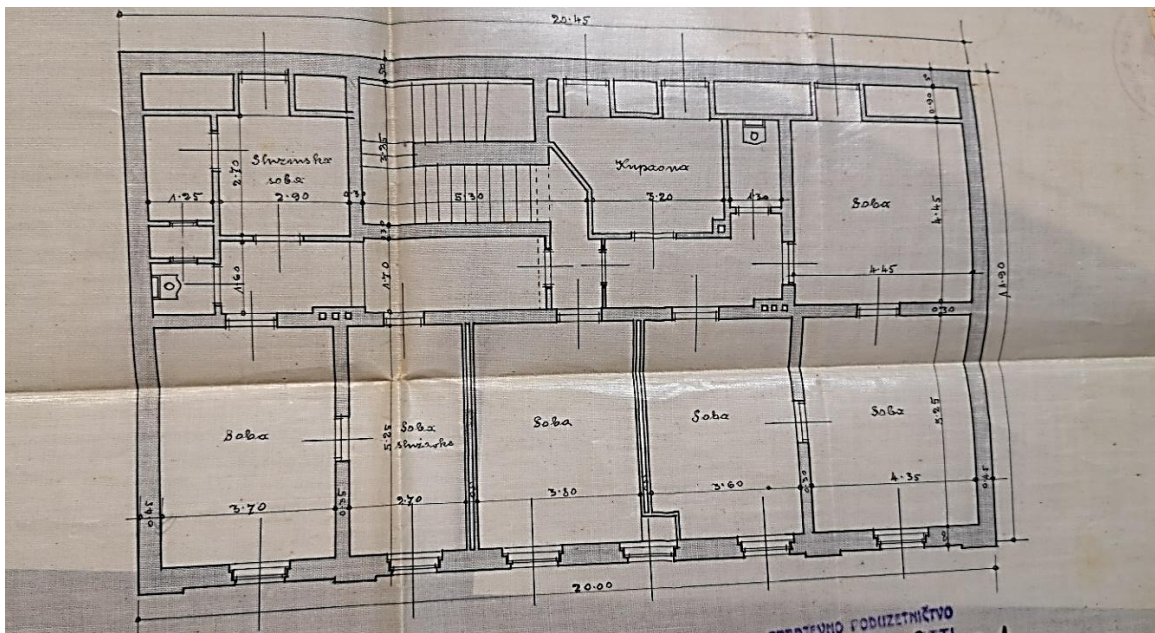
Slika 4 Pročelje prije potresa



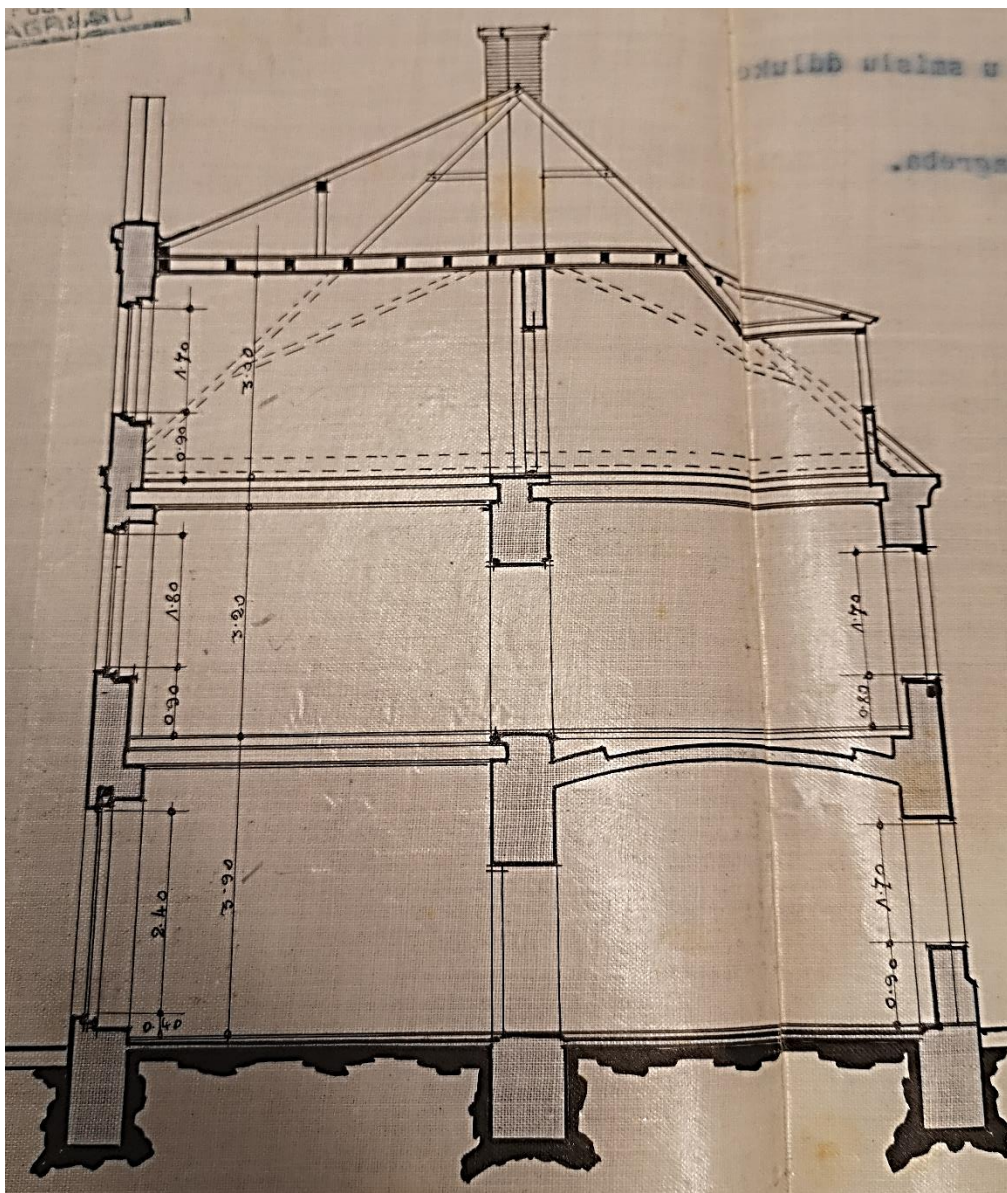
Slika 5 Tlocrt prizemlja [4]



Slika 6 Tlocrt prvog kata [4]



Slika 7 Tlocrt tavana [4]



Slika 8 Presjek [4]

5.2. Izvorni i stečeni nedostaci

Termini izvorni i stečeni nedostaci odnose se na nedostatke građevina s obzirom na potresno djelovanje. Izvorni nedostaci karakteristični su za pojedina graditeljska razdoblja, odnosno odgovaraju nedostacima u tehničkim propisima koji su bili važeći u danim razdobljima. Ti se nedostaci odnose na nepravilnosti u tlocrtima po visini zgrade, nosivo zide bez horizontalnih i vertikalnih serklaža, nedostatak ukrućujućih zidova, klasične drvene stropne konstrukcije, način oslanjanja krovne konstrukcije, itd. Nepravilno održavanje ili neodržavanje građevine uopće, uklanjanje zidova, izvedba otvora u zidovima i starenje građevine samo su neki od stečenih nedostataka.

Građevine se mogu podijeliti u četiri karakteristična razdoblja gradnje, RG1 (19. stoljeće), RG2 (1900. – 1948.), RG3 (1948. – 1964.) i RG4 (1964 -2020.). Predmetna građevina pripada razdoblju gradnje RG2. U ovom periodu još nije bilo važećih tehničkih propisa za projektiranje otpornosti građevine na potres (prvi seizmički propisi doneseni su 1964. godine.), pa se vrlo jednostavno mogu uočiti neki od izvornih nedostataka:

IN1) Nosivi su zidovi izvedeni od neomeđenog ziđa, odnosno bez armiranobetonskih vertikalnih i horizontalnih serklaža. [5] Neomeđeno ziđe može preuzeti samo tlačna naprezanja i kao takvo je izloženo vlačnom i posmičnom slomu prilikom zajedničkog djelovanja horizontalnih (potres) i vertikalnih (vlastita težina, dodatno stalno opterećenje...) sila.

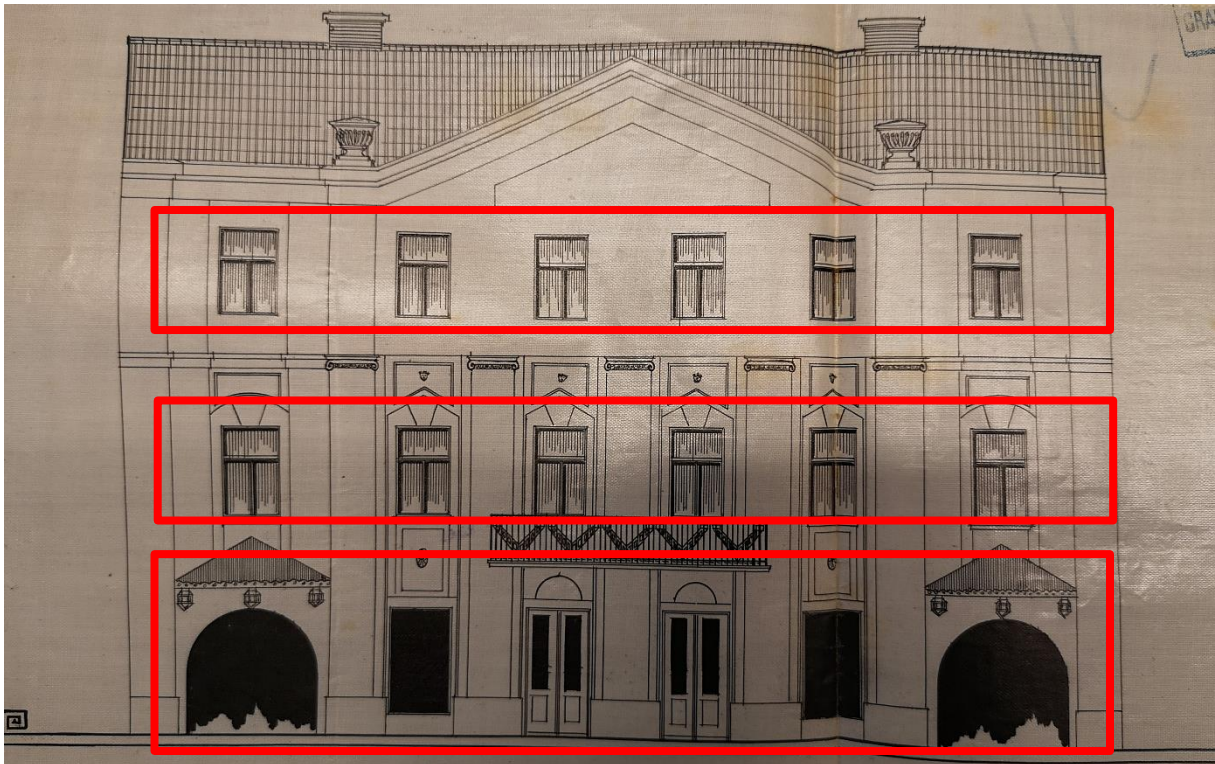
Nakon pregleda građevina oštećenih u zagrebačkom potresu mogli su se ustanoviti prevladavajući oblici slomova: slom po horizontalnoj sljubnici morta i dijagonalni slom duž tlačne dijagonale. Upravo je slom po horizontalnoj sljubnici bio najčešći oblik posmičnog sloma, a javljao se kod dimnjaka. Za vrijeme djelovanja potresa na dimnjak djeluje potresna horizontalna sila i vertikalna sila, odnosno vlastita težina. Kako je vlastita težina mala u ovom slučaju već pri malom iznosu momenta savijanja nastaje horizontalna pukotina kroz sljubnicu morta i materijal gubi koheziju.

Pukotina duž tlačne dijagonale uobičajena je pri većem vertikalnom opterećenju i potresnom djelovanju. Ovakav oblik sloma javlja se češće na nižim etažama i moguća su dva slučaja, stepenasti slom po vertikalnim i horizontalnim sljubnicama morta te ravni slom duž tlačne dijagonale. Kod ravnoga sloma dolazi do sloma opeke i morta, dok kod stepenastog puca samo mort.

IN2) Nedovoljna otpornost ukupne strukture zidova za potresna djelovanja [3]. U Zagrebu se nakon potresa pokazalo kako većina zgrada ne zadovoljava potresnu otpornost za jedan ili čak oba glavna smjera. Glavni smjerovi zidova su obično međusobno okomiti. U slučaju predmetne građevine ploštine nosivih zidova prizemlja za smjer X su manje za 36% od onih za smjer Y, ovome ne pridonosi ni činjenica da je stropna konstrukcija nosiva u kraćem smjeru objekta, odnosno da opterećenja od horizontalnih djelovanja preuzimaju upravo zidovi koji se protežu u X smjeru i kojih ima manje.

IN4) Nepravilnosti u tlocrtnom rasporedu i strukturi vidi se na zidovima pročelja gdje nepovoljan raspored i brojnost otvora imaju negativan utjecaj na otpornost djelovanju silama potresa. Zabatni zidovi i s njima paralelni zidovi čije obilježje je velika krutost(IN6), ali ne

sudjeluju aktivno u preuzimanju sila od stropne konstrukcije. Takva su 3 zida u prizemlju objekta.

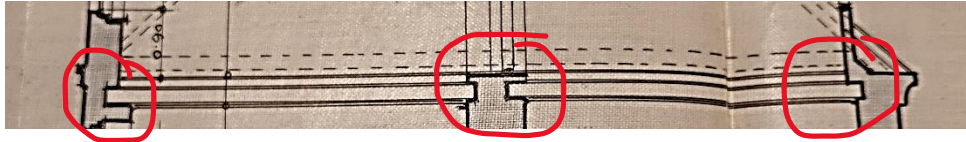


Slika 9 Pročelje zgrade

IN5) Postupno smanjenje debljine zidova s visinom – vidljivo na tlocrtima, vanjski zidovi prizemlja su 70 cm, na prvom katu 65, a na drugom 45 cm. [5]

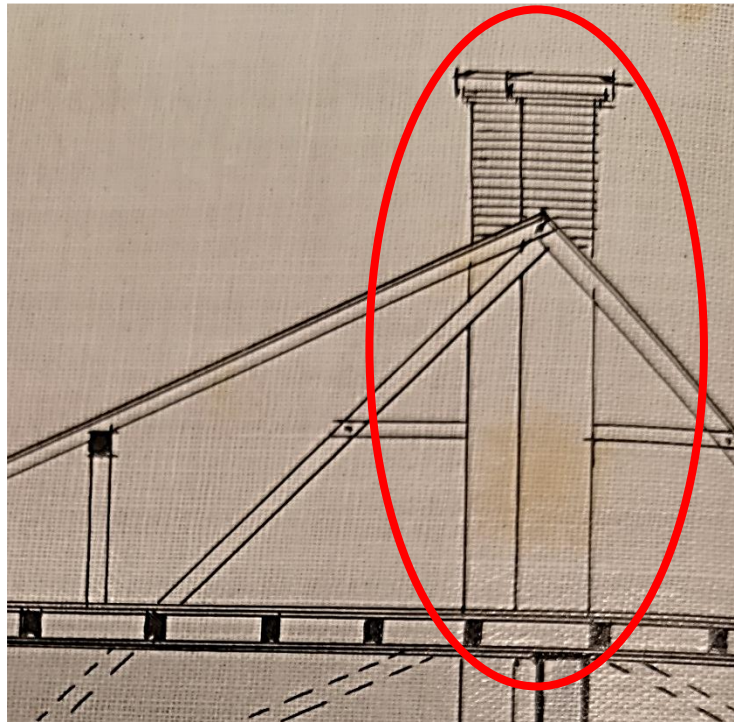
IN8) Klasične drvene stropne konstrukcije – iz poprečnog presjeka građevine vidi se smjer drvenih greda koje se pružaju okomito na ulicu, odnosno pročelje građevine. Kao što je već spomenuto ovakve tradicijske stropne konstrukcije su nosive u jednom, kraćem smjeru. Konstrukcija se sastoji od nosivih drvenih greda, slojeva šute, trstike i reda drvenih dasaka. Zadatak stropne konstrukcije je da djeluje kao horizontalna dijafragma i opterećenja prenese na nosive zidove. Glavni nedostatak ovakvog stropa je što zidove paralelne s gredama (zablatni zidovi) ne uključuje u prijenos opterećenja. [5]

IN9) Veze drvenih greda i zidova – oslanjanje uzidavanjem [5]



Slika 10 Veza drvenih gređa i zida

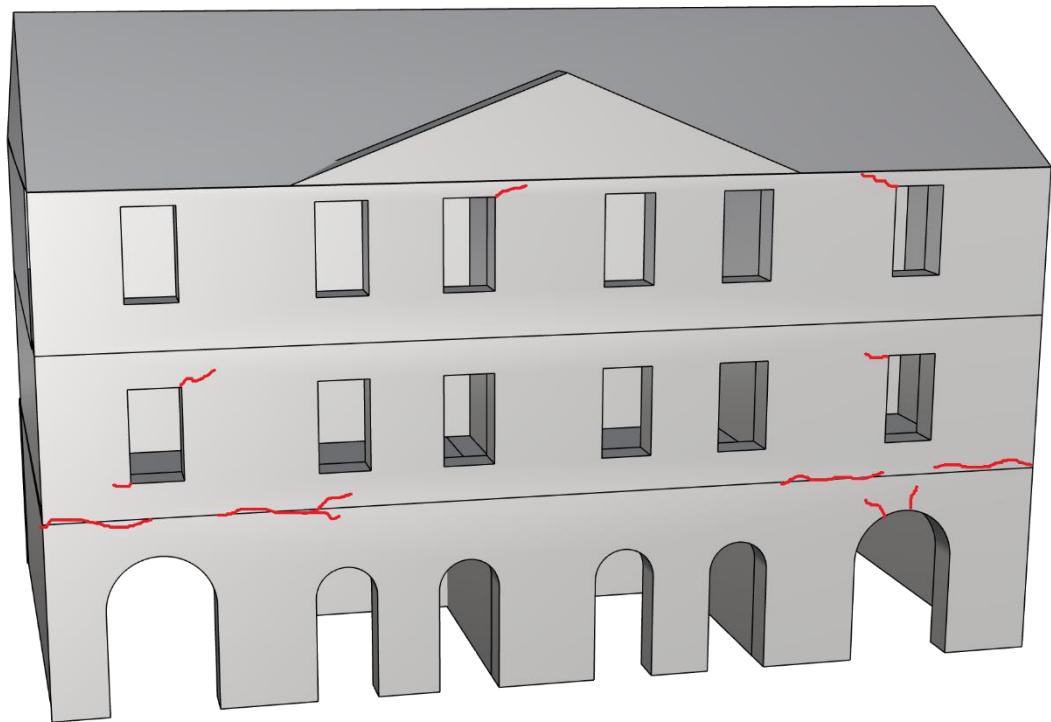
IN11) Nedostaci ukupne konstrukcije tavanskoga bloka zgrade – tavanski dimnjaci koji su djelomično pridrđani na krovnoj konstrukciji [5]



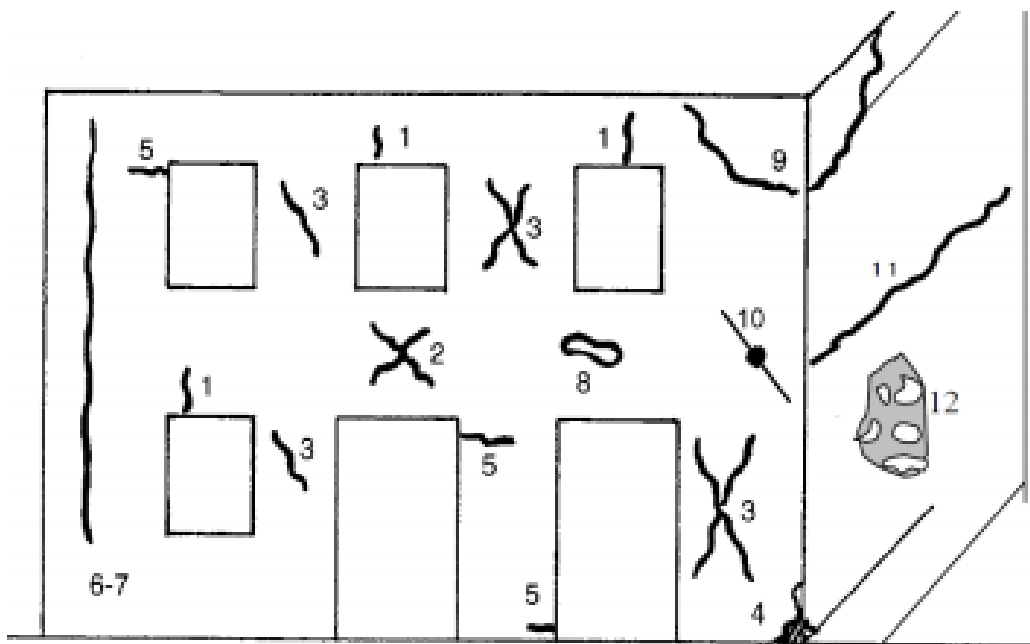
Slika 11 Dimnjak

Stećeni nedostaci vidljivi su uglavnom na uličnom pročelju građevine gdje se može uočiti dotrajalost fasade, ali više od nekih stećenih nedostataka nije uočeno pošto je zgrada uredno održavana.

Na Slici 12 prikazane su vidljive pukotine na pročelju zgrade koje se mogu usporediti s pukotinama koje se javljaju kod tipičnih zidanih zgrada od potresnog djelovanja prikazanih na Slici 12. [5]



Slika 12 Prikaz pročelja graevine s ucrtanim pukotinama



Slika 13 Karakteristične pukotine zidanih zgrada [5]

6. POTRESNO DJELOVANJE NA KONSTRUKCIJU

Grubi proračun potresnih sila i prosječnih posmičnih naprezanja u zidovima napravljen je na temelju dostupnih podataka o konstrukciji, debljini zidova, stropnih konstrukcije itd. Za karakteristike za koje nema dostupnih podataka uzete su prosječne vrijednosti koje su dobivene eksperimentalnim istraživanjima i koje odgovaraju razdoblju u kojem je građevina nastala.

6.1. Proračunske sile potresa

Ukupna proračunska potresna sila u podnožju građevine F_b (engl. base shear) određuje se za dva okomita smjera prema normi HRN EN 1998-1 [8.H1] izrazom: [6]

$$F_{bx} = S_d(T_{1x}) \cdot m \cdot \lambda$$

$$F_{by} = S_d(T_{1y}) \cdot m \cdot \lambda$$

Gdje su $S_d(T_{1x})$ i $S_d(T_{1y})$ ordinate proračunskog spektra za period T_{1x} odnosno T_{1y} . Osnovni period vibracija prema Hrvatskom nacionalnom dodatku iznosi : [6]

$$T_1 = 0,016 H \text{ (s)}$$

H – visina građevine u metrima

m – masa građevine

λ – korekcijski faktor, prema HRN EN 1998-1 $\lambda=0,85$ za $T_1 \leq 2T_C$ ako zgrada ima više od dvije etaže, ili $\lambda = 1,0$ u svim ostalim slučajevima.

$$m = \frac{W}{g}$$

Težina građevine : [6]

$$W = \Sigma G_{k,j} + \Sigma \varphi \cdot \psi_{2i} \cdot Q_{k,i}$$

$$W = 12\,145,81 + 0,3 \cdot 1098$$

$$W = 12\,475,21 \text{ kN} \approx 12\,480 \text{ kN}$$

U Hrvatskom nacionalnom dodatku određeno je da se primjenjuje samo prvi period titranja:

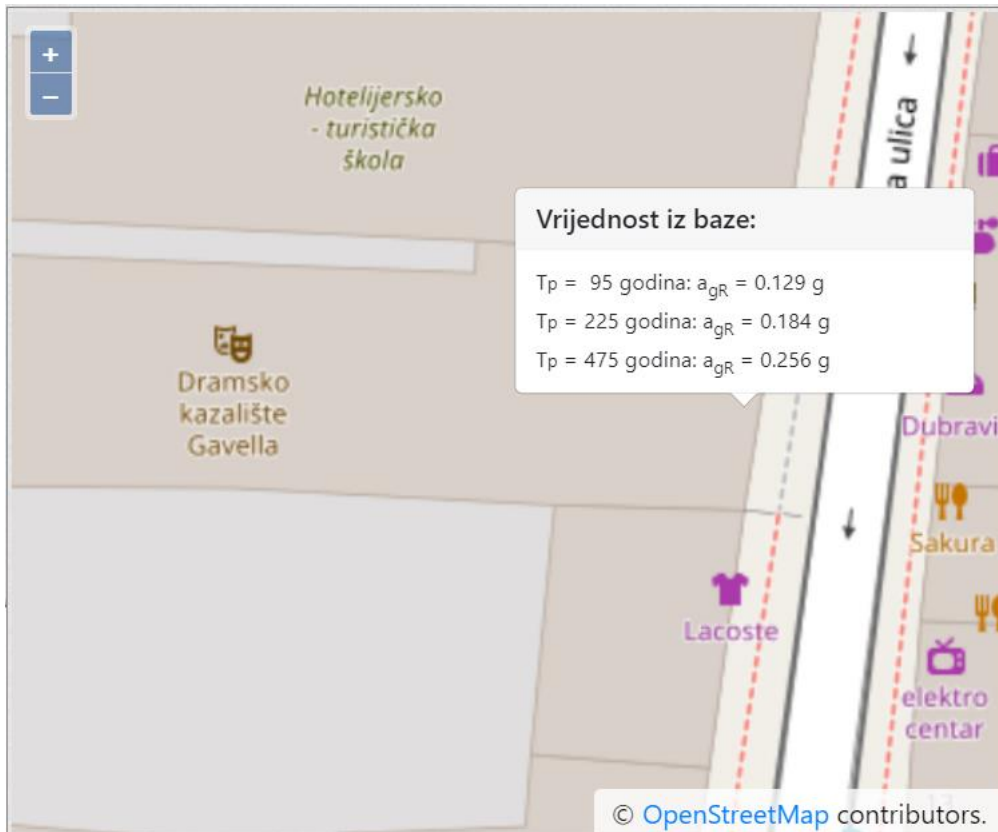
$$T_1 = 0,176 \text{ s}$$

Faktor ponašanja prema Nacionalnom dodatku = 1,5

Proračunsko horizontalno ubrzanje tla tipa A $a_g = \gamma_1 \cdot a_{gR}$

$\gamma_1 = 1,2$, razred važnosti III

a_{gR} – referentno vršno ubrzanje tla tipa A za određeni period



Slika 14 Vršno ubrzanje tla za lokaciju građevine [7]

Pretpostavljena kategorija tla $C \rightarrow S = 1,15$

Slijedi da je horizontalna komponenta proračunskog spektra odaziva :

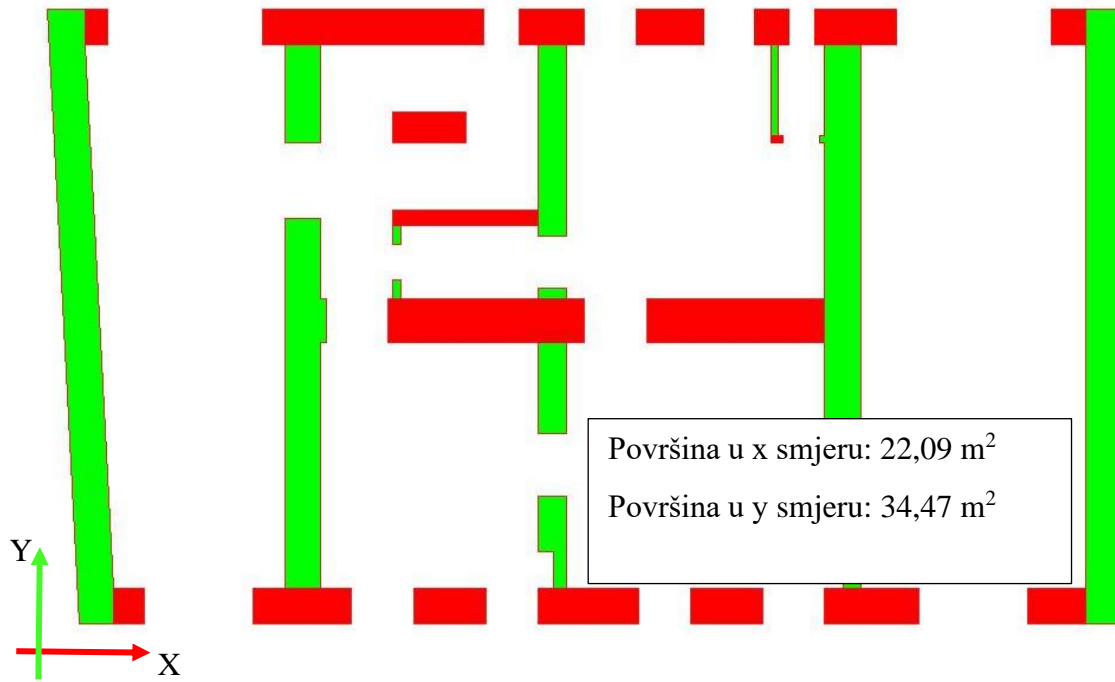
$$S_a(T) = 0,589 \text{ g}$$

Ukupna potresna sila :

$$F_{bd} = 0,589 \cdot W \cdot \lambda = 7345,40 \text{ kN}$$

Udio ukupne težine koji se aktivira djelovanjem potresa:

$$Base\ shear = \frac{F_{bd}}{W} = \frac{7345,40}{12475,21} = 0,59$$



Slika 15 Sudjelujuće površine zidova prizemlja

$$\tau_x = \frac{7345,40}{22,03} = 333,43 \frac{kN}{m^2} = 0,33 MPa$$

$$\tau_y = \frac{7345,40}{34,47} = 213,10 \frac{kN}{m^2} = 0,21 MPa$$

7. UTJECAJ POTRESNOG DJELOVANJA NA PONAŠANJE ZGRADE

Kako bi se uspješno postigla zadovoljavajuća razina otpornosti na seizmičko djelovanje bitno je poznavati kako će se zgrada ponašati za vrijeme potresa i što možemo očekivati. Već samo vizualnim pregledom i uočljivim nepravilnostima u tlocrtnom rasporedu i geometriji mogu se naslutiti neka od tipičnih oštećenja koja se javljaju kod zidanih građevina. Uporabom računalnih programa moguće je procijeniti kako će se naša građevina ponašati za vrijeme potresa različite jačine. Odabran je proračun inženjerskim programskim paketom 3Muri [8] koji koristi nelinearnu proračunsku metodu postupnog guranja.

7.1. *Pushover* analiza

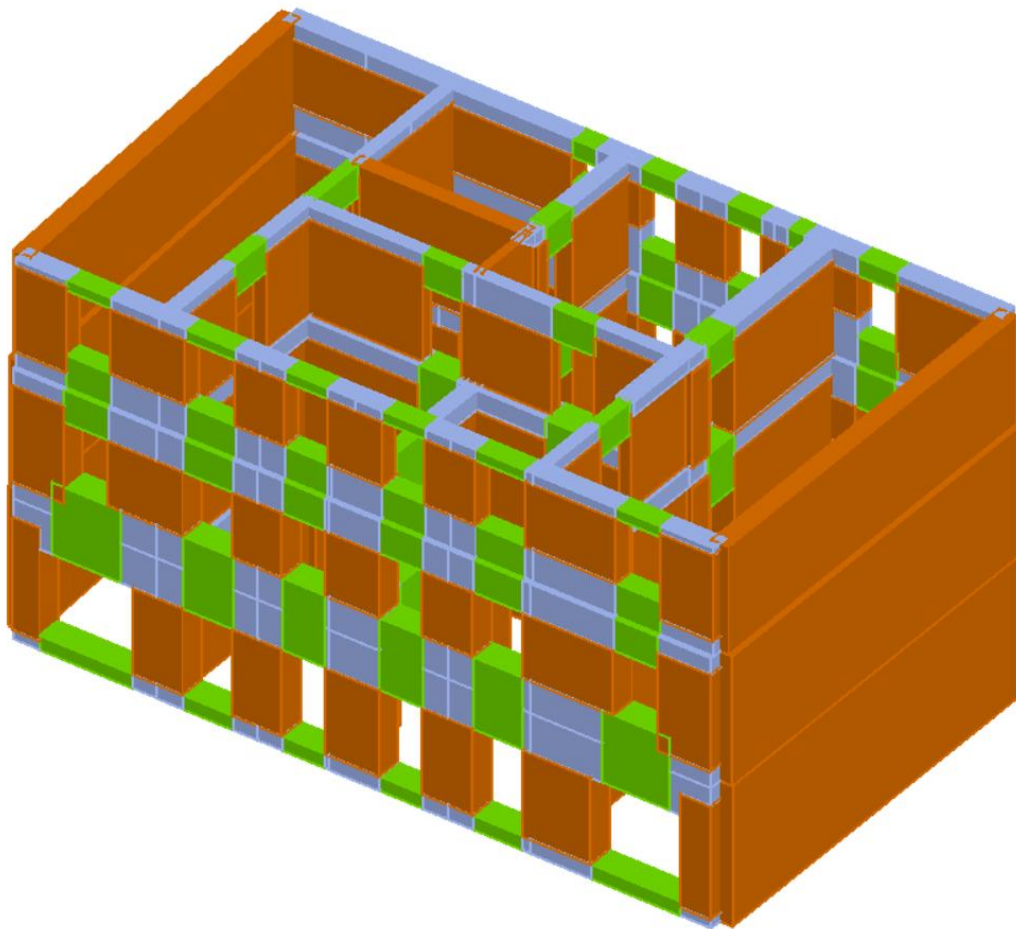
Pushover ili metoda postupnog guranja je nelinearna statička metoda proračuna koja se temelji na pomacima konstrukcije. Ova metoda je prikladna za materijale kod kojih pod djelovanjem sile dolazi do degradacije početne krutosti i ponašanje materijala nije linearno. Zide je takav materijal i upravo zato je ova metoda pogodna za proračun postojećih zidanih građevina. Proračun se provodi na način da se konstrukcija opterećuje horizontalnim silama koje po visini građevine imaju modalnu i uniformnu raspodjelu. Grafički zapis rezultata proračuna je *pushover* krivulja. Krivulja na y-osi prikazuje poprečnu silu, a na x-osi pripadajući pomak kontrolnog čvora. U ovom slučaju dokaz nosivosti se ne provodi preko sila, već preko pomaka. Potrebno je zadovoljiti uvjet da je pomak odabranog kontrolnog čvora manji od zahtijevanog pomaka za konstrukciju. Zahtijevani pomak ovisi o tome na koju razinu otpornosti projektiramo konstrukciju. Te razine odgovaraju vršnim vrijednostima akceleracije za povratne periode 95, 225 i 475 godina.

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

Granična stanja prema tome su granično stanje ograničenog oštećenja (OO), znatnog oštećenja (ZO) i blizu rušenja (BR). Prema hrvatskom nacionalnom dodatku HRN EN 1998-3 pri obnovi oštećenih zgrada potrebno je kontrolirati ZO i OO [5]. Dokaz je zadovoljen kada je omjer kontrolnog i zahtijevanog pomaka veći od 1.

7.2. Numerički model

Numerička analiza postupnim guranjem provedena je u programu 3Muri. Svi podaci i materijalne karakteristike uzete su prema arhivskoj dokumentaciji i eksperimentalno dobivenim podacima koji odgovaraju razdoblju gradnje. Parametri materijala uzeti su s minimalnim vrijednostima jer je poznavanje tih obilježja ograničeno. Prema izvornoj dokumentaciji zidovi neomeđeni od opeke klasičnog formata. U obzir je uzeta raspucana krutost. Osim opeke od materijala imamo drvene grede u stropu. Stropna konstrukcija je modelirana kao drvena konstrukcija sačinjena od greda, sloja šute i trstike te sloja dasaka. Ovakvo modeliran strop nosi samo u jednom smjeru. Opterećenje na strop se sastoji od vlastite težine, dodatnog stalnog opterećenja od slojeva poda i pregradnih zidova i uporabnog opterećenja.



Slika 16 3D model

Modelirani su nosivi zidovi i svi oni zidovi koji se kontinuirano nastavljaju po etažama, odnosno doprinose krutosti objekta. Svi ostali zidovi su zadani kao dodatno opterećenje. Krovšte nije modelirano s obzirom da detalji spojeva krovne konstrukcije i zidova nisu poznati. Opterećenje od krova proračunato je i zadano na stropu zadnjeg kata.

Podaci o potresnom djelovanju uzeti su potresne karte za Donji grad te se proračunom kontrolira granično stanje znatnog oštećenja za ubrzanje $1,28 \text{ m/s}^2$ što odgovara povratnom periodu od 95 godina. Kategorija tla je C.

Provode se analize s modalnom raspodjelom opterećenja za dva okomita smjera x i y, s ekscentricitetom i bez. Kao kontrolni čvor uzima se čvor na zadnjoj etaži za kojeg se očekuje najveći pomak. Taj čvor bi trebao biti što bliže centru mase građevine.

| Active in pushover | | Mode / | T [s] | mx [kg] | Mx [%] | my [kg] | My [%] | mz [kg] | Mz [%] |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| X dir. | Y dir. | | | | | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 1 | 0,28823 | 863.668 | 75,72 | 4.493 | 0,39 | 43 | 0,00 |
| <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | 2 | 0,26928 | 4.178 | 0,37 | 940.125 | 82,42 | 0 | 0,00 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 3 | 0,23757 | 149.831 | 13,14 | 462 | 0,04 | 101 | 0,01 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 4 | 0,16245 | 3.124 | 0,27 | 242 | 0,02 | 7 | 0,00 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 5 | 0,13725 | 584 | 0,05 | 149 | 0,01 | 24 | 0,00 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 6 | 0,12572 | 2.048 | 0,18 | 123.365 | 10,82 | 2 | 0,00 |

Slika 17 Rezultati modalne analize

Za aktivne smjerove u analizi odabrani su prva dva moda u kojima se aktivira najveći postotak mase. Za X smjer 75,72%, a za Y 82,42% mase.

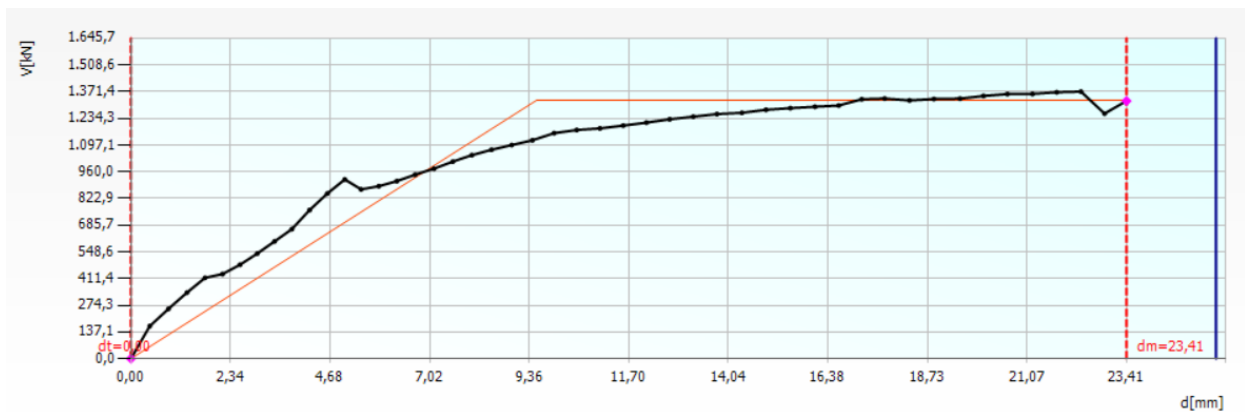
7.3. Rezultati

Nakon provedenih analiza dobiveni su rezultati prikazani na slici 18.

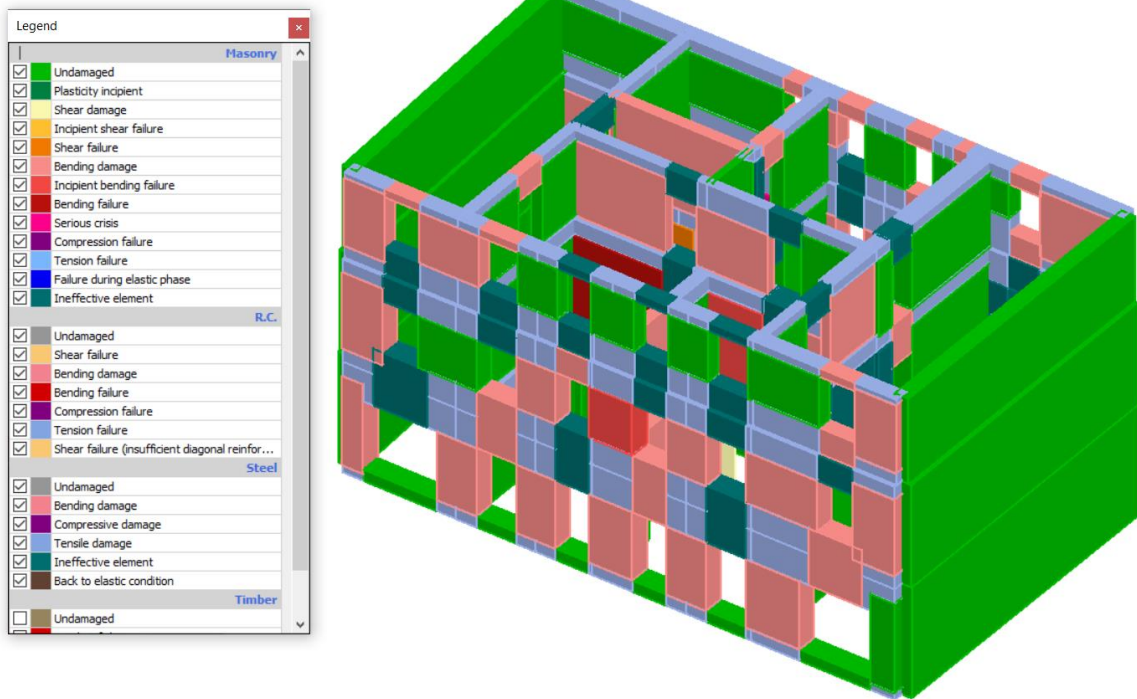
| No. | Insert in report | Seism dir. | Seismic load | Eccentricity [mm] | dt SD [mm] | dm SD [mm] | a SD |
|-----|-------------------------------------|------------|--------------------|-------------------|------------|------------|-------|
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> | +X | Modal distribution | 0,00 | 35,33 | 40,35 | 1,133 |
| 4 | <input checked="" type="checkbox"/> | -X | Modal distribution | 0,00 | 32,04 | 17,91 | 0,594 |
| 6 | <input checked="" type="checkbox"/> | +Y | Modal distribution | 0,00 | 15,43 | 15,97 | 1,021 |
| 8 | <input checked="" type="checkbox"/> | -Y | Modal distribution | 0,00 | 13,18 | 38,65 | 2,101 |
| 11 | <input checked="" type="checkbox"/> | +X | Modal distribution | 560,00 | 34,93 | 39,40 | 1,119 |
| 12 | <input checked="" type="checkbox"/> | +X | Modal distribution | -560,00 | 35,32 | 36,51 | 1,031 |
| 15 | <input checked="" type="checkbox"/> | -X | Modal distribution | 560,00 | 31,87 | 17,56 | 0,587 |
| 16 | <input checked="" type="checkbox"/> | -X | Modal distribution | -560,00 | 32,30 | 17,95 | 0,591 |
| 19 | <input checked="" type="checkbox"/> | +Y | Modal distribution | 1.002,50 | 15,44 | 16,33 | 1,036 |
| 20 | <input checked="" type="checkbox"/> | +Y | Modal distribution | -1.002,50 | 16,08 | 15,12 | 0,962 |
| 23 | <input checked="" type="checkbox"/> | -Y | Modal distribution | 1.002,50 | 13,45 | 11,22 | 0,903 |
| 24 | <input checked="" type="checkbox"/> | -Y | Modal distribution | -1.002,50 | 12,93 | 19,33 | 1,275 |

Slika 18 Rezultati proračuna postupnim guranjem modalnom distribucijom

Analize kod kojih α SD iznosi više od 1,0 nosivost je zadovoljena, a kod ovih gdje je ta vrijednost ispod potrebno je mjere popravaka i ojačanja konstrukcije kako bi se postigla zahtijevana razina nosivosti. Od 12 provedenih analiza, najmanja nosivost za smjer X je 58,7%, a za smjer Y 90,3%. Ovakav rezultat posljedica je toga da u smjeru Y imamo više zidova, većeg poprečnog presjeka s manje otvora. U smjeru X zapravo samo 3 zida koji aktivno sudjeluju u preuzimanju opterećenja od stropne konstrukcije. To su zidovi uličnog pročelja i stražnjeg te jedan središnji zid koji se ne proteže po čitavoj dužini građevine.

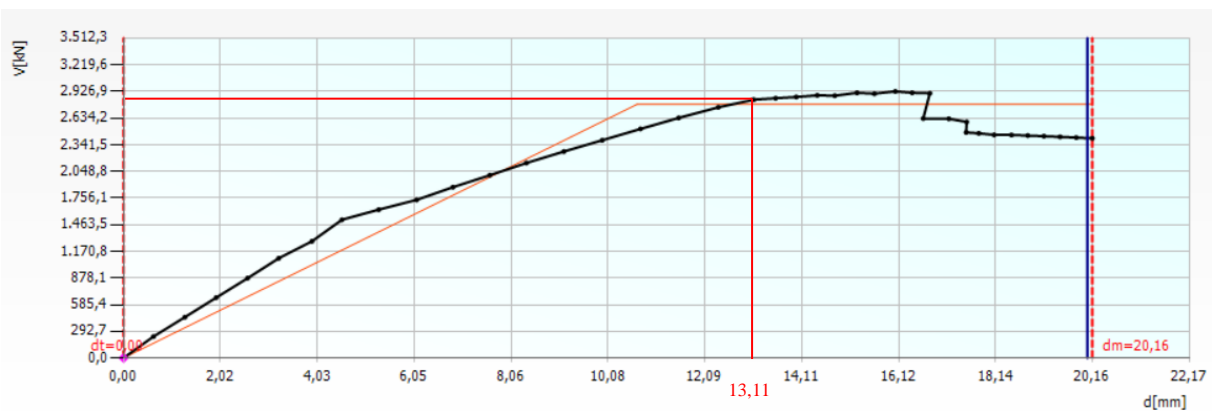


Slika 19 Krivulja kapaciteta nosivosti za smjer X

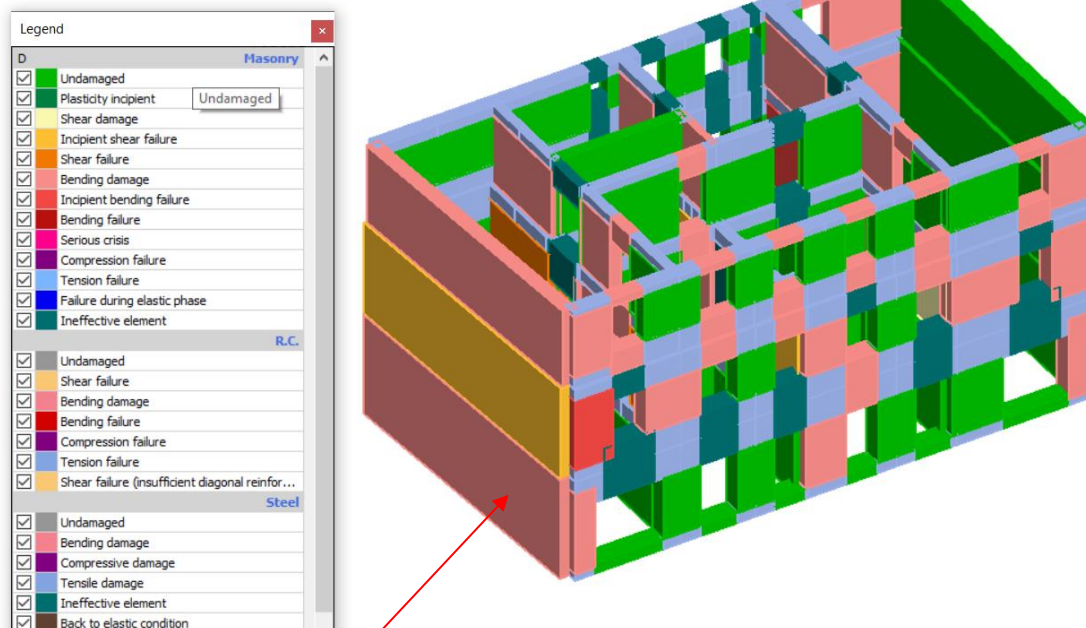


Slika 20 Oštećenja na modelu za proračun u smjeru X

Slika 19 prikazuje mjerodavnu krivulju kapaciteta nosivosti za smjer X, a slika 20 prikaz 3D modela s oštećenjima. Vidljivo je da je najčešći tip oštećenja od savijanja u nadvojima i dijelovima zidova između otvora.



Slika 21 Krivulja kapaciteta za smjer Y



Slika 21 Oštećenja na modelu za proračun u smjeru Y

Oštećenje od savijanja pri sili od 2800 kN
I pomaku od 13,11 mm

8. OŠTEĆENJA NASTALA U POTRESU 2020.

Nakon potresa magnitude $M= 5,5$ po Richteru i provedenog brzog pregleda građevina je označena kao neuporabljiva zbog vanjskih utjecaja što znači da nisu bila uočena oštećenja na horizontalnim i vertikalnim nosivim elementima konstrukcije.



Slika 22 Kategorija upotrebljivosti predmetne građevine

Na sljedećim slikama prikazana su oštećenja od urušavanja zabatnog zida susjedne zgrade na krovšte premetne građevine.



Slika 23 Zabatni zid susjedne građevine



Slika 24 Pogled s unutarnje strane krovišta

Krovište je sanirano kao i zabatni zid susjedne građevine te su radi dodatnih mjera sigurnosti uklonjeni postojeći dimnjaci na građevini jer postoji mogućnost od ponovnog potresa i urušavanja dimnjaka na konstrukciju krovišta.



Slika 25 Sanacija krovišta i dimnjaka

Osim opasnosti od urušavanja susjedne građevine na predmetnu postoji mogućnost pada ukrasnih elemenata, odnosno štukatura s pročelja građevine na ulicu ispred objekta.



Slika 26 Oštećenje na štukaturama pročelja

Na uličnom pročelju su vidljive horizontalne pukotine u visini međukatne konstrukcije koje ako nisu samo na žbuci već na zidu, upućuju na klizanje između zidova i stropne konstrukcije. Na slici 20 se vidi da je uklonjena žbuka kako bi se ustanovilo je li došlo do pucanja žbuke ili zida.



Slika 27 Horizontalna pukotina



Slika 28 Horizontalna pukotina s druge strane balkona



Slika 29 Horizontalna pukotina

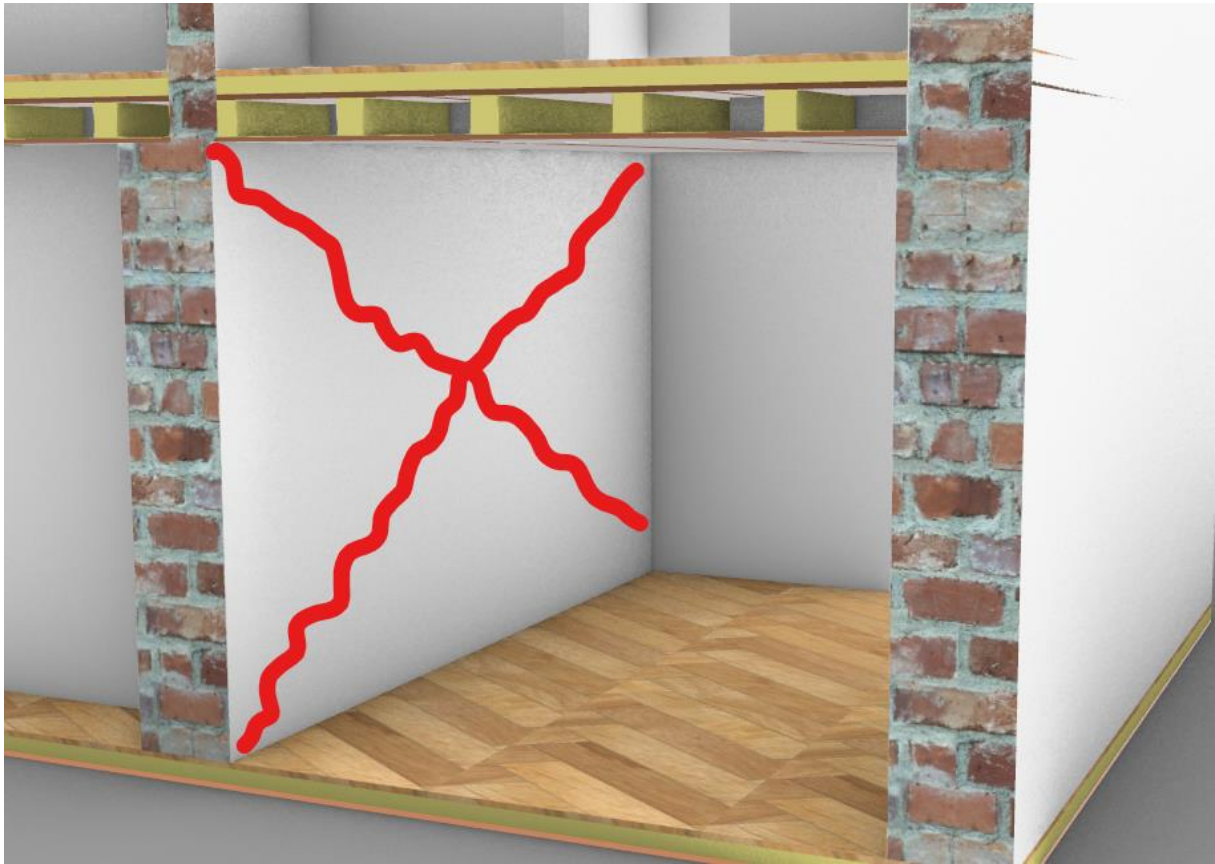


Slika 30 Dijagonalna pukotina na uglu otvora

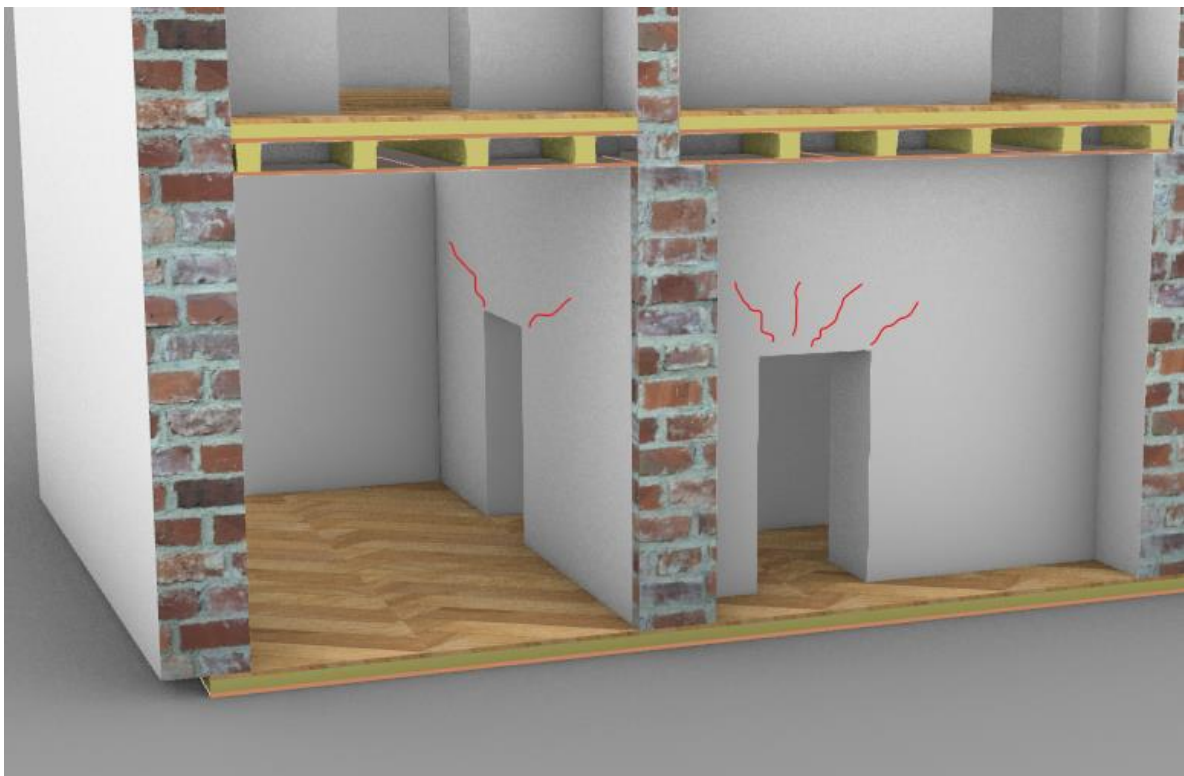
Dijagonalne pukotine u uglovima otvora mogu ukazivati na prekoračenje vlačnih naprezanja, širine do 3 mm upućuju na blaga oštećenja, ali svakako treba provjeriti jesu li ovakve pukotine na zidu ili žbuci.



Slika 31 Pukotine na luku



Slika 32 Pukotine od posmika na žbuci zida u prizemlju

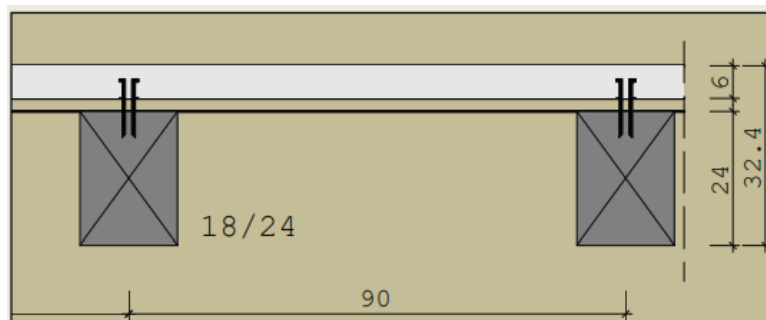


Slika 33 Pukotine u nadvojima unutarnjih zidova

9. MJERE OBNOVE

Sanacija oštećenja nastalih kompleksan je postupak koji je potrebno uskladiti s više parametara različite prirode. Problemi na koja ovdje nailazimo uključuju financijsku, administrativnu, pravnu, organizacijsku i tehničku složenost.

Kako zgrada nema značajnijih oštećenja mjere koje bi se mogle primijeniti orijentirane su više u smjeru prevencije novih oštećenja u budućim potresima. To može biti izvedba armiranobetonske tlačne ploče ili polukrutih horizontalnih dijafragma postavljenih s donje strane greda. U slučaju postavljanja tlačnih ploča potrebno je ukloniti već postojeće slojeve poda dok kod postavljanja dijafragma s donje strane greda nije slučaj pa je zahtjev manjeg opsega jer nije potrebno iseljavati namještaj. Djelomično kruta dijafragma se izvodi postavljanjem daščane obloge s donje strane stropa koja se može dodatno ukrutiti dijagonalama od perforiranih čeličnih traka. Tlačne su ploče jedno od rješenja koje se najčešće primjenjuje kod pojačanja drvenih greda u građevinama s drvenim stropovima. Izvode se sprezanjem betona i već postojećih drvenih greda koje se spajaju vijcima za drvo. Kako bi ovakav način ojačanja konstrukcije imao učinka, potrebno je konstruktivnom vezom između zidova i tlačne ploče osigurati pravilan prijenos opterećenja s ploče na zidove. Rezultat je spregnuta ploča drvo-beton koja može preuzeti dodatna opterećenja okomita na svoju ravninu, a u potresu se ponaša kao kruta dijafragma što doprinosi otpornosti čitave građevine na potresno djelovanje. Nedostatak ovakvog tipa pojačanja je što može doći do truljenja drvenih greda.



Slika 34 Tlačna AB ploča [9]

Pojačanje pojedinih zidova ili nadvoja može se izvesti FRP tehnologijom. FRP (eng. Fiber Reinforced Polymer) je polimer armiran vlaknima koja se kao armatura ugrađuju u polimernu matricu. Vlakna mogu biti staklena, ugljična, aramidna, bazaltna dok je polimerna matrica na bazi, najčešće, epoksidne smole. Pojačanje zidova npr. primjenom tkanine od staklenih vlakana i epoksidnim ljepilom dobar je izbor jer je staklena tkanina jeftinija od drugih proizvoda,

ugrađuje se brzo i jednostavno te ju može izvoditi svaki izvođač, ne povećava se težina zgrade, a povećava se nosivost i duktilnost zidova. Ovom tehnologijom pojačani su zidovi kazališne dvorane koja se nalazi iza predmetne građevine.



Slika 35 FRP staklena vlakna [10]

Potkrovlje je nakon pada zabatnog zida sanirano i prenamijenjeno u garderobu kazališta. Adaptacija potkrovlja u korisni prostor jedno je od mogućih konceptualnih rješenja obnove krovne konstrukcije nakon potresa. [5]



Slika 36 Adaptacija potkrovlja



Slika 37 Dio krovišta koji je saniran

10. ZAKLJUČAK

Na primjeru predmetne građevine vidljivo je kako oštećenja koja su nastala u potresu ne moraju nastati nužno zbog izvornih nedostataka na samoj građevini već veliku ulogu igra okoliš u kojem se građevina nalazi i njena interakcija s njim. Usporedivši oštećenja na danoj građevini i ostalim građevinama iz istog razdoblja gradnje te sa sličnim karakteristikama možemo reći da oštećenja nastala zbog izvornih nedostataka nisu velikog razmjera te da na vanjske utjecaje kao što je ovdje bio slučaj (rušenje zabatnog zida susjedne zgrade) ne možemo utjecati promatrajući samo predmetnu građevinu. Potrebno je sustavno i kontinuirano raditi na problemu pojačanja potresne otpornosti kako već postojećih građevina, tako i onih koje će tek biti izgrađene.

11. POPIS SLIKA

Slika 10 Kategorije uporabljivosti [2]

Slika 11 Položaj građevine u bloku

Slika 12 Pročelje građevine prema nacrtima

Slika 13 Pročelje prije potresa

Slika 14 Tlocrt prizemlja

Slika 15 Tlocrt prvog kata

Slika 16 Tlocrt tavana

Slika 17 Presjek

Slika 18 Pročelje zgrade

Slika 10 Veza drvenih greda i zida

Slika 11 Dimnjak

Slika 12 Prikaz pročelja građevine s ucrtanim pukotinama

Slika 13 Karakteristične pukotine zidanih zgrada [5]

Slika 14 Vršno ubrzanje tla za lokaciju građevine [7]

Slika 15 Sudjelujuće površine zidova prizemlja

Slika 16 3D model

Slika 17 Rezultati modalne analize

Slika 18 Rezultati proračuna postupnim guranjem modalnom distribucijom

Slika 19 Krivulja kapaciteta nosivosti za smjer X

Slika 20 Oštećenja na modelu za proračun u smjeru X

Slika 21 Krivulja kapaciteta za smjer Y

Slika 21 Oštećenja na modelu za proračun u smjeru Y

Slika 22 Kategorija upotrebljivosti predmetne građevine

Slika 23 Zabatni zid susjedne građevine

Slika 24 Pogled s unutarne strane krovišta

Slika 25 Sanacija krovišta i dimnjaka

Slika 26 Oštećenje na štukaturama pročelja

Slika 27 Horizontalna pukotina

Slika 28 Horizontalna pukotina s druge strane balkona

Slika 29 Horizontalna pukotina

Slika 30 Dijagonalna pukotina na uglu otvora

Slika 31 Pukotine na luku

Slika 32 Pukotine od posmika na žbuci zida u prizemlju

Slika 33 Pukotine u nadvojima unutarnjih zidova

Slika 34 Tlačna AB ploča [9]

Slika 35 FRP staklena vlakna [10]

Slika 36 Adaptacija potkrovlja

Slika 37 Dio krovišta koji je saniran

12. POPIS REFERENCI

- [1] J. Atalić, M. Š. Novak, and M. Uroš, “Seismic risk for Croatia: overview of research activities and present assessments with guidelines for the future Überblick über die Erdbebenrisikoforschung und-Bewertung für Kroatien mit Leitlinien für die Zukunft”, doi: 10.14256/JCE.2732.2019.
- [2] M. Uroš *et al.*, “Procjena oštećenja građevina nakon potresa-postupak provođenja pregleda zgrada Pregledni rad Procjena oštećenja građevina nakon potresa-postupak provođenja pregleda zgrada Post-earthquake damage assessment of buildings-procedure for conducting building inspections Key words: post-earthquake building inspections, damage, usability, masonry and reinforced concrete buildings Übersichtsarbeit Bewertung von Bauschäden nach Erdbeben-Verfahren zur Durchführung von Gebäudeinspektionen”, doi: 10.14256/JCE.2969.2020.
- [3] “Kazalište Gavella – Google karte.”
<https://www.google.com/maps/@45.8121092,15.9693078,21z?entry=ttu> (accessed Sep. 18, 2023).
- [4] “Državni arhiv u Zagrebu – Hrvatska.” <https://daz.hr/> (accessed Sep. 18, 2023).
- [5] S. Monografija, G. Fakulteta, and Z. Bibliografija, “Potresno inženjerstvo-Obnova zidanih zgrada”, Accessed: Sep. 13, 2022. [Online]. Available: <http://www.casopis-gradjevinar.hr/izdavastvo/>
- [6] Z. SORIĆ, *Zidane konstrukcije*, vol. 1. Zagreb: Nacionalna i sveučilišna knjižnica, 2016.
- [7] “Karte potresnih područja Republike Hrvatske.” <http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/> (accessed Sep. 13, 2022).
- [8] S.T.A. DATA SRL, “3Muri Project X4 (13.9.0.1).”
- [9] “HKIG-Opatija 2021”.
- [10] M. Todorić, T. doo Zagreb, M. Duvnjak, I. Dragičević, and P. Todorić, “Analize i pristupi obnove karakteristične donjogradske građevine u Zagrebu HRVATSKA KOMORA INŽENJERA GRAĐEVINARSTVA Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva 2020”.