

Primjena volumnog modela zgrade u proračunu otkazivanja zidova izvan ravnine

Kuhar, Hana

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:789723>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-04**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Hana Kuhar

**PRIMJENA VOLUMNOG MODELA ZGRADE U
PRORAČUNU OTKAZIVANJA ZIDOVA IZVAN
RAVNINE**

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Hana Kuhar

**PRIMJENA VOLUMNOG MODELA ZGRADE U
PRORAČUNU OTKAZIVANJA ZIDOVA IZVAN
RAVNINE**

ZAVRŠNI ISPIT

Mentorica izv. prof. dr. sc. Marija Demšić

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Hana Kuhar

**OUT-OF-PLANE WALL FAILURE ANALYSIS BY
USING BUILDING VOLUME MODEL**

FINAL EXAM

Supervisor Assoc. Prof., Ph.D. Marija Demšić

Zagreb, 2024.

SAŽETAK

Završni rad obrađuje temu otkazivanja zidova izvan ravnine koji su relativno česti oblici otkazivanja uslijed potresnog djelovanja kod zidanih zgrada od neomeđenog ziđa. U svrhu definiranja pretpostavki proračuna napravljen je teorijski pregled kinematike krutih tijela i teorema virtualnog rada. Također je napravljen pregled karakterističnih lokalnih mehanizama za otkazivanje zidova izvan ravnine kod zidanih zgrada. U svrhu provedbe proračuna u drugom dijelu rada opisan je volumni model stvarne zidane zgrade koji je napravljen u programu Rhinoceros 3D. Korištenjem volumne geometrije odabrani su tipični lokalni mehanizmi otkazivanja izvan ravnine za koje je proračunat koeficijent aktivacije mehanizma. Za svaki od mehanizama određeno je i pripadno aktivacijsko ubrzanje koje je uspoređeno za zahtjevom potresnog djelovanja temeljenog na potresnom opterećenju za povratni period od 475 godina.

Ključne riječi: lokalni mehanizmi; zidana zgrada; faktor aktivacije; faktor sigurnosti

SUMMARY

The bachelor thesis covers the topic of out-of-plane wall failure, which is a characteristic form of failure due to seismic actions for unreinforced masonry buildings. In order to define the computational assumptions used in the procedure, a theoretical overview of rigid-body kinematics and the virtual work theorem was given. An overview of the characteristic local mechanisms for out-of-plane wall failure in masonry structures was also provided. To calculate the activation coefficient, the second part of the paper describes a solid model of a real masonry building created with the Rhinoceros 3D program. Using the volume geometry, the most common out-of-plane local failure mechanisms were selected for which the activation coefficient of the mechanism was calculated. For each of the mechanisms, the corresponding activation acceleration was determined, which was compared to the seismic action requirement based on the seismic loading for a return period of 475 years.

Key words: local mechanisms; masonry building; activation factor; safety factor

SADRŽAJ

1	UVOD	6
2	KINEMATIKA KRUTIH TIJELA.....	7
2.1	Osnovni teorem kinematike krutog tijela.....	10
2.2	Svojstva spojeva s podlogom.....	11
2.3	Statički određeni sustavi i mehanizmi	12
2.4	Kennedyjev teorem.....	13
3	TEOREM VIRTUALNOG RADA	15
4	OTKAZIVANJE ZIDOVA IZVAN RAVNINE	18
4.1	Procedura linearnog proračuna za otkazivanje zidova izvan ravnine.....	20
5	PRORAČUN MEHANIZAMA PREVRTANJA ZA ZIDANU ZGRADU.....	24
5.1	Opis konstrukcije	24
5.2	Analiza opterećenja.....	26
5.2.1	Vertikalno opterećenje konstrukcije.....	26
5.2.2	Opterećenje potresom	27
5.3	Proračun aktivacije mehanizama	29
5.4	Mehanizmi krovništa	31
5.5	Mehanizmi mansarde.....	38
5.6	Mehanizmi drugog kata.....	40
6	ZAKLJUČAK	44
7	LITERATURA.....	46
8	POPIS SLIKA	47
9	POPIS TABLICA	49

1 UVOD

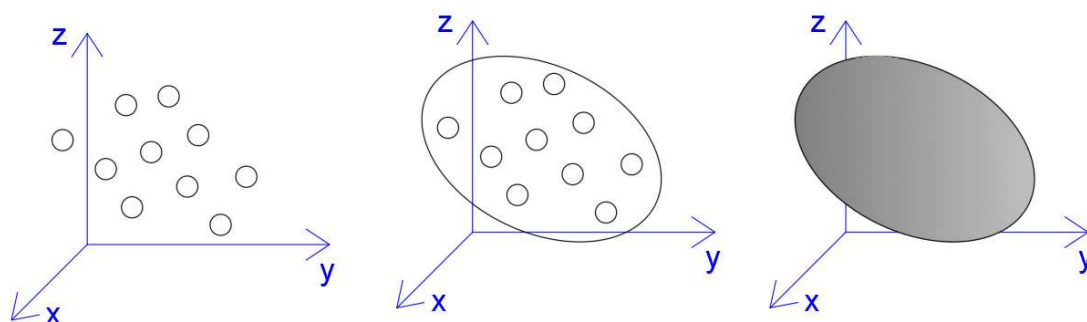
Otkazivanje zidova izvan ravnine, odnosno formiranje lokalnih mehanizama unutar same konstrukcije svojstveno je za tradicijske zidane zgrade od neomeđenog ziđa. Takve su zgrade građene kao sustavi povezanih nosivih zidova s drvenim međukatnim konstrukcijama. Takve zgrade uglavnom su oblikovane da prenose vertikalna opterećenja, a horizontalna opterećenja kao primjerice potres mogu prouzročiti jaka oštećenja konstrukcijskih elemenata u njihovoj ravnini te otkazivanje izvan ravnine, odnosno prevrtanja uslijed formiranja lokalnih mehanizama. Oštećenja uglavnom nastaju zbog neravnomjerno raspoređene krutosti, nedovoljno dobrih međusobnih veza (ako uopće i postoje) te loših spojeva s krovnom i međukatnim konstrukcijama. Takve su zgrade vrlo oštetljive uslijed djelovanja potresa, a zidovi mogu otkazati izvan svoje ravnine pa nije ni rijedak slučaj da u potresu zgrade stradaju na opisani način. Tome smo svjedočili u potresu u Zagrebu 22. ožujka 2020. godine te nakon potresa u Petrinji od 29. prosinca 2020. godine kada je upravo formiranje lokalnih mehanizama bio vrlo čest oblik otkazivanja kod mnogih zidanih zgrada. Razlozi dodatnih oštećenja mogu biti i slaba nosivost u ravnini zida, nedovoljna povezanost sa međukatnom i krovnom konstrukcijom te, najbitnije, nedostatak vertikalnih i horizontalnih serklaža koji adekvatno povezuju konstrukcijske elemente.

Elementi koji su najviše podložni otkazivanju izvan ravnine su dimnjaci, tavanski zabatni zidovi i različiti konzolni dijelovi (razne istake po fasadi) kojima obiluju tradicijske zgrade zbog stila gradnje i vremena u kojem su nastale. Odvajanje zabatnih zidova se uglavnom događa zbog loše veze s okomitim zidovima, jer nisu pridržani niti imaju zadovoljavajuću vezu s krovnom konstrukcijom. Takvi zidovi imaju malo vertikalno opterećenje jer su opterećeni samo vlastitom težinom što im dodatno smanjuje otpornost na horizontalna djelovanja [1].

Jedna od osnovnih motivacija ovog rada su upravo oštećenja zidanih zgrada nakon zagrebačkog i petrinjskog potresa jer je mehanizam otkazivanja zidova izvan ravnine bio vrlo učestao. Za praktičan primjer odabrana je jedna tradicijska zidana zgrada u centru Zagreba na čijem su modelu provedeni proračuni stabilnosti pretpostavljenog mehanizma na horizontalno djelovanje te je ispitan uvjet aktivacije mehanizma s obzirom na povratno razdoblje potresnog opterećenja.

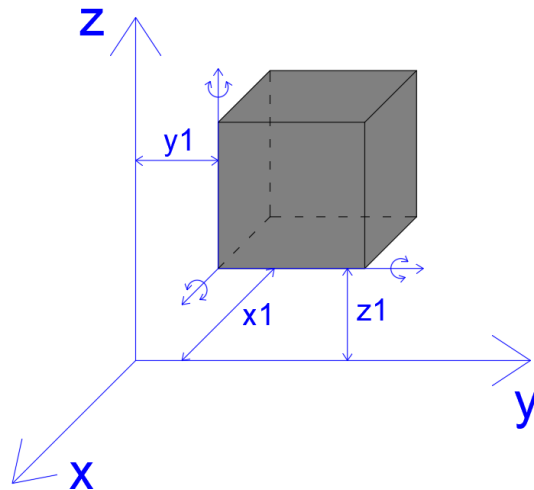
2 KINEMATIKA KRUTIH TIJELA

Sustavom materijalnih točaka smatra se konačan skup materijalnih točaka koje su u međusobnoj interakciji. To je prirodan sustav masa koji se može idealizirati pomoću diskretnih točaka kojima se opisuje gibanje tijela. Sustavom materijalnih točaka može se opisati kruto ili deformabilno tijelo odnosno njegovi dijelovi, ali i rastresiti materijal ili tekućine kod kojih su materijalne točke u međusobnoj interakciji. Odnosno to su sustavi čija se masa ne mijenja te zauzimaju određeni dio volumena u prostoru [2].



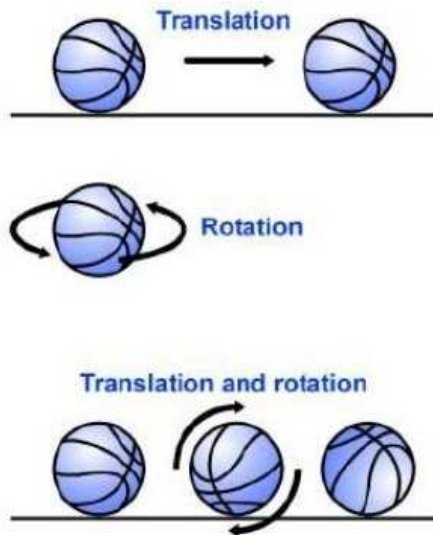
Slika 1: Sustav materijalnih točaka (u sredini) povezan u cjelinu tako da tvori kruto tijelo (desna slika), prilagođeno prema [2].

Kruto tijelo može se definirati kao skup materijalnih točaka koje su međusobno tako povezane da je udaljenost između dviju točaka uvijek ista. Za kruto tijelo može se i reći kako ga čini beskonačan broj čestica mase dm koje su međusobno povezane krutom vezom uz ograničenje da se relativne udaljenosti između čestica ne mijenjaju. Takvo tijelo se ne deformira pri djelovanju opterećenja i tijekom gibanja se ne mijenja oblik odnosno volumen. U prostoru kruto tijelo ima šest stupnjeva slobode, dok u ravnini ima tri stupnja slobode [8].



Slika 2: Stupnjevi slobode gibanja tijela u prostoru, prilagođeno prema [3].

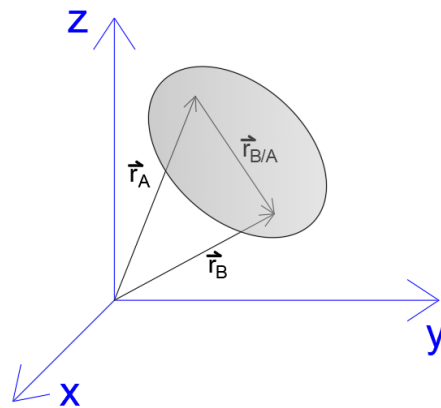
Gibanje krutog tijela opisuje se translacijom i rotacijom, odnosno s tri komponente translacije po sve tri osi koordinatnog sustava (x , y i z) i tri rotacije oko tih osi. Translacija je gibanje tijela kada sve točke tijela imaju jednake pomake, odnosno sve točke imaju jednake vektore brzine i ubrzanja po smjeru i iznosu zbog čega se sve točke tijela gibaju po paralelnim trajektorijama. U slučaju rotacije tijela oko nepomične osi gibanje točaka tijela odvija se po kružnicama u paralelnim ravninama. Opće gibanje tijela može se opisati kao kombinacija translacije i rotacije. Primjer općeg gibanja je primjerice kotrljanje tijela (kružnog diska) koje se sastoji od rotacije oko centra te translacije te iste točke. Ako pri općem gibanju postoji točka za koju brzina iščezava, onda ta točka predstavlja trenutni pol brzina ili centar rotacije tijela budući da se onda brzine svih točaka tijela mogu opisati kao vektori rotacije u odnosu na trenutni pol brzina.



Slika 3: Translacija i rotacija tijela na primjeru kotrljanja lopte, preuzeto s [4].

Kako bi detaljnije definirali koncept općeg gibanja opisujući ga kao 'zbroj' doprinosa translacijskog gibanja pomičnog ishodišta i rotacije ostalih točaka oko tog pomičnog ishodišta promotrit ćemo proizvoljno odabrane točke A i B krutog tijela. Položaj točke B sa slike 4 može se odrediti iz vektorskog izraza:

$$\vec{r}_B = \vec{r}_A + \vec{r}_{B/A} \quad (1)$$



Slika 4: Vektori položaja krutog tijela, prilagođeno prema [2]

Položaji točaka A i B u apsolutnom koordinatnom sustavu su \vec{r}_A i \vec{r}_B , a $\vec{r}_{B/A}$ je vektor relativnog položaja točke B u odnosu na točku A. Kod translacije se vektor relativnog položaja ne mijenja:

$$\frac{d\vec{r}_{B/A}}{dt} = 0. \quad (2)$$

Kod translacije krutog tijela brzina i ubrzanje svih točaka su jednake: $\vec{v}_B = \vec{v}_A$ i $\vec{a}_B = \vec{a}_A$.

Međutim ako je prisutna i rotacija tada je promjena relativnog položaja točke B u odnosu na točku A jednaka relativnoj brzini rotacije točke, odnosno:

$$\frac{d\vec{r}_{B/A}}{dt} = \vec{v}_{B/A}. \quad (3)$$

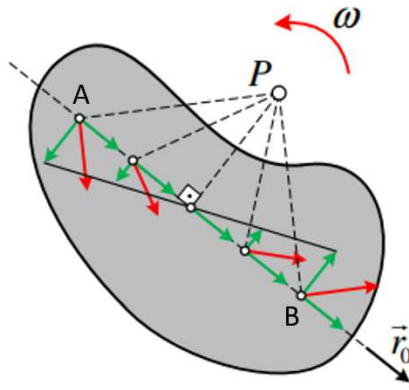
Prema tome, pri opisu općeg gibanja jedna točka tijela se odabire kao ishodište pomičnog koordinatnog sustava te se relativno gibanje ostalih točaka tada može prikazati kao rotacija oko pomičnog ishodišta. Primjenom takvog koncepta određuje se i apsolutna brzina točke B:

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{B/A}. \quad (4)$$

Za opći položaj tijela se može odrediti točka C koja ima svojstvo da je njena brzina nula (brzina iščezava) što znači da sve točke tijela rotiraju oko nje. Takva točka naziva se trenutni centar rotacije ili pol brzina tijela. Trenutni pol brzina ni ne mora biti na tijelu koje se giba i njen položaj se u općem slučaju mijenja tijekom gibanja.

2.1 Osnovni teorem kinematike krutog tijela

Osnovni teorem kinematike apsolutno krutog tijela glasi da za bilo koje dvije točke A i B koje se nalaze na istom krutom tijelu vrijedi da su projekcije vektora brzina na os određenu spojnicom točaka jednake i u istom smjeru. Kada projekcije brzina na spojnicu točaka ne bi bile jednake to bi značilo da se tijelo deformira, prema tome navedeno svojstvo predstavlja temeljni princip gibanja apsolutno krutog tijela. Koristeći navedeni teorem i svojstvo pola brzina kod kojeg brzina iščezava moguće je definirati polje brzina tijela na način da se odrede međusobno okomite projekcije brzina za promatrano tijelo koje nazivamo plan brzina.



Slika 5: Projekcije vektora brzina na os određenu spojnicom su jednake [2].

Plan brzina je grafička metoda za prikaz vektora brzina pojedinih točaka mehanizama [9]. Da bi se napravio plan brzina tijela koje se giba u ravnini potrebne su dvije okomite projekcije koje u potpunosti određuju bilo koji vektor brzine za bilo koju točku na tijelu.

Brzina točke B apsolutno krutog tijela određuje se pomoću izraza:

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{B/A} . \quad (5)$$

Jedinični vektor pravca koji sadrži točke A i B je

$$\vec{p}_0 = \frac{\vec{r}_{B/A}}{|\vec{r}_{B/A}|} . \quad (6)$$

Projekcije brzina na pravac p će se odrediti preko skalarnog produkta:

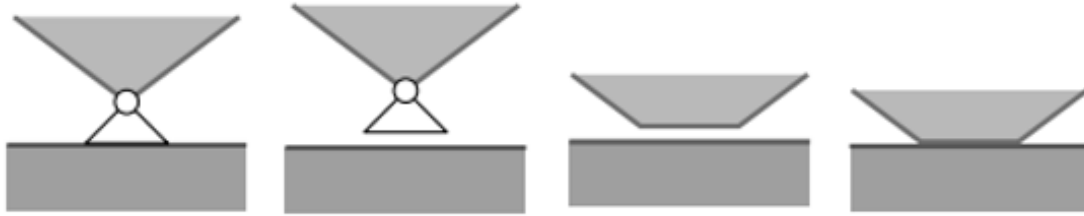
$$\begin{aligned} \vec{v}_B \cdot \vec{p}_0 &= \vec{v}_A \cdot \vec{p}_0 + \vec{v}_{B/A} \cdot \vec{p}_0 \\ v_B \cdot \cos \beta &= v_A \cdot \cos \alpha \\ v_{B,p} &= v_{A,p} . \end{aligned} \quad (7)$$

Iz čega proizlazi da su projekcije brzina na spojnici točaka su jednake budući da su vektori $\vec{v}_{B/A}$ i \vec{p}_0 međusobno okomiti.

2.2 Svojstva spojeva s podlogom

Spojevi su elementi spojenih sustava koji međusobno povezuju dijelove sustava ili ga spajaju s podlogom koja može biti tlo ili neki drugi sustav. Veza ili kinematičko ograničenje sprječava relativne ili apsolutne pomake po pravcima, te relativne ili apsolutne zaokrete oko

osi. U ravnini postoji nekoliko uobičajenih veza: nepomični i pomični zglobni spoj, klizni spoj te upeti ili kruti spoj krutog tijela s podlogom.



Slika 6: Uobičajene veze, redom: nepomični zglob, pomični zglob, klizni spoj i upeti spoj [5]

Nepomični zglob sprječava pomake odnosno translaciju u oba smjera ali dopušta rotaciju oko zgloba. Pomični zglob dopušta pomak samo u jednom smjeru (pravcu klizanja) i dopušta rotaciju. Klizni spoj dopušta pomak u jednom smjeru ali sprječava relativnu rotaciju između tijela, dok upeti spoj sprječava sve relativne pomake između dvaju tijela.

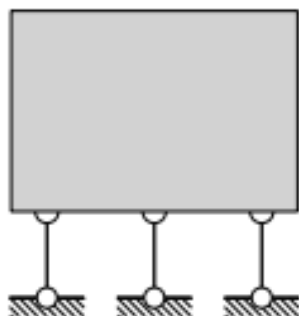
2.3 Statički određeni sustavi i mehanizmi

Statički određeni sustav je sustav koji ostaje u ravnoteži za bilo koje opterećenje. Uklanjanjem samo jedne veze, statički određen sustav postaje mehanizam. Mehanizmi su geometrijski promjenjivi sustavi više tijela koji dodavanjem veza postaju statički određeni i geometrijski nepromjenjivi odnosno sustavi koji nastaju raskidanjem veza iz statički određenih sustava.



Slika 7: Prosta greda – najjednostavniji primjer statički određenog sustava

Određeni tipovi mehanizama ipak mogu ostati u ravnoteži za određena opterećenja. Primjerice ako je mehanizam prikazan na slici 8 opterećen samo vertikalnom silom ostat će u ravnoteži, no kada ga se optereti horizontalnom silom postaje nestabilan odnosno počeo će se gibati.



Slika 8: Primjer mehanizma stabilnog samo za vertikalna opterećenja [5]

Broj stupnjeva slobode mehanizma u ravnini određuje se po jednostavnoj formuli:

$$S = 3T - U - L \quad (8)$$

gdje je S – broj stupnjeva slobode, T – broj tijela u sustavu, U – broj unutarnjih veza (zglobova) i L – broj vanjskih veza s podlogom.

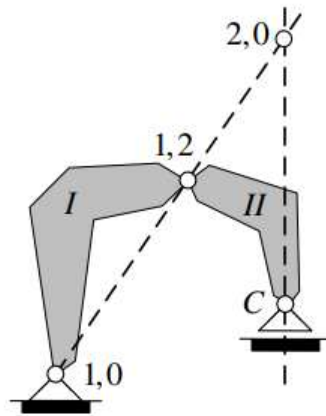
2.4 Kennedyjev teorem

Kako je već ranije navedeno, za jedno tijelo koje se giba može se odrediti položaj pola brzina. Apsolutni pol tijela je točka u kojoj brzina iščezava. Može biti stalni ili trenutni.

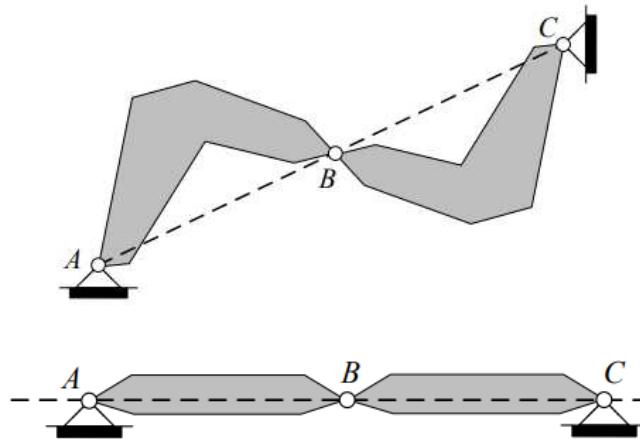
Za više tijela koji se gibaju u istoj ravnini može se definirati relativni pol (centar) brzina a to je točka u kojoj su apsolutne brzine i pomaci oba tijela jednaki. Pol se može nalaziti i izvan tijela. U odnosu na relativni pol je moguća relativna rotacija između dva tijela.

Relativni polovi brzina se, za sustav tijela koja se gibaju u istoj ravnini, mogu odrediti primjenom Kennedyjevog teorema za koji vrijedi: relativni polovi brzina triju nedeformabilnih tijela koja se gibaju paralelno u istoj ravnini se nalaze na istom pravcu te relativni pol dvaju tijela koja se gibaju u ravnini se nalazi na spojnici njihovih apsolutnih polova.

Slika 9 prikazuje primjenu Kennedyjevog teorema kako bi se odredio položaj nepoznatih polova sustava koji je mehanizam, dok slika 10 prikazuje statički određene sustave (zadovoljavaju minimalan broj veza s podlogom) koji se zbog zadovoljenja uvjeta Kennedyjevog teorema definiraju kao trenutni mehanizmi, odnosno pomični sustavi.



Slika 9: Mehanizam [2]



Slika 10: Trenutni mehanizmi sa tri zgloba na pravcu: A i C su apsolutni polovi, a B je relativni pol brzina [2].

3 TEOREM VIRTUALNOG RADA

Virtualni rad je rad koji stvarna sila \vec{F} izvrši na virtualnom pomaku $d\vec{r}$, a definira se skalarnim produktom:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{r} \quad (9)$$

Virtualni pomak je bilo koji zamišljeni beskonačno mali pomak kojeg dopuštaju veze unutar nekog sustava tijela. Ako su tijela sustava krutih tijela, na koja djeluju sile i momenti, u ravnoteži, onda je zbroj radova tih sila i momenata na bilo kojim dopustivim virtualnim pomacima i zaokretima tijela jednak nuli:

$$\sum \vec{F}_i = \vec{0} \text{ i } \sum \vec{M}_j = \vec{0} \rightarrow \delta W = 0 \quad (10)$$

Odnosno ako je zbroj radova sila i momenata na bilo kojim dopustivim virtualnim pomacima i zaokretima sustava krutih tijela na koja djeluju jednak nuli, onda je sustav tijela u ravnoteži:

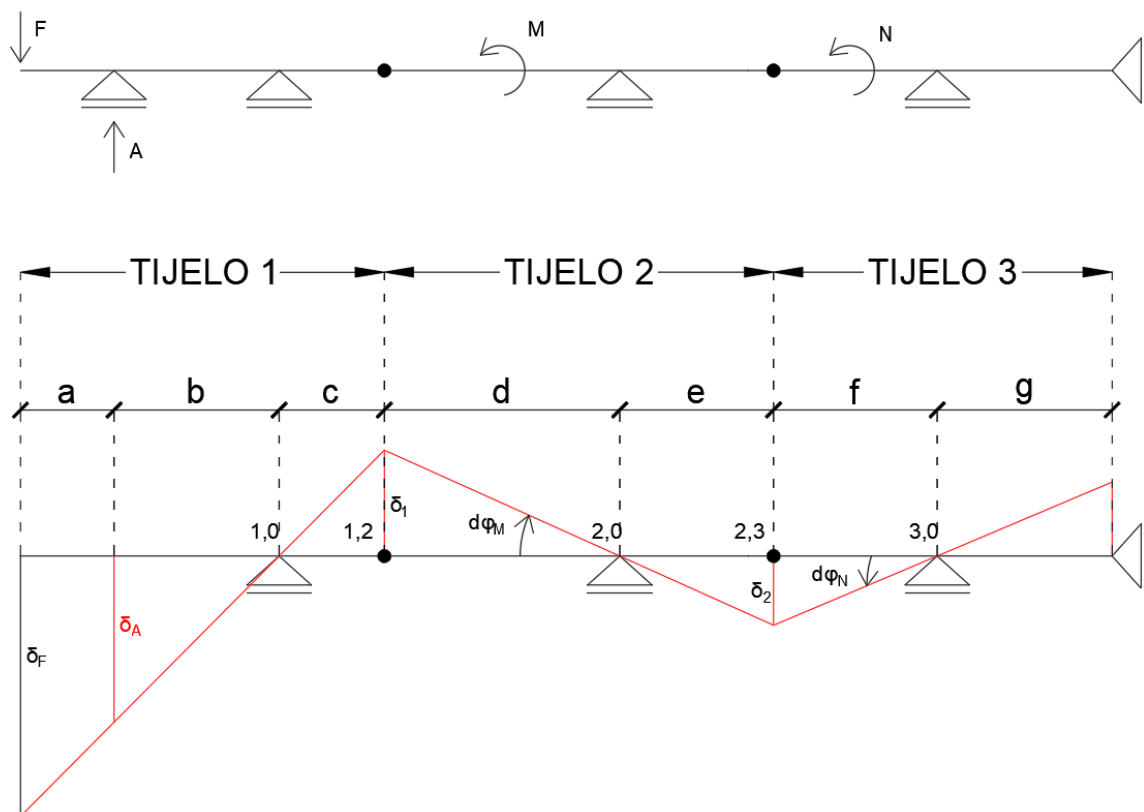
$$\delta W = 0 \rightarrow \sum \vec{F}_i = \vec{0} \text{ i } \sum \vec{M}_j = \vec{0} \quad (11)$$

Dakle princip virtualnog rada može se promatrati na dva načina: ako su djelovanja na tijelo u ravnoteži, onda je u virtualni rad jednak nuli i ako je virtualni rad jednak nuli onda su tijela u ravnoteži.

Ako se hvatište sile \vec{F} pomakne za infinitezimalni pomak $d\vec{r}$, elementarni rad sile je $dW = \vec{F} \cdot d\vec{r}$. Ako se pak tijelo na koje djeluje koncentrirani moment M zarotira za infinitezimalni kut zaokreta $d\varphi$, elementarni rad će vršiti moment M : $dW = \vec{M} \cdot d\vec{\varphi}$. Prema tome, svaka sila vrši rad isključivo u smjeru pomaka na mjestu djelovanja sile, odnosno u slučaju djelovanja momenta na kut zaokreta krutog tijela. Rad će biti pozitivan ako je vektor sile ili momenta u istom smjeru kao vektor pomaka ili kuta zaokreta.

Metoda virtualnog rada se primjenjuje za određivanje statičkih veličina kod sustava koji su u ravnoteži odnosno kad se želi postaviti jedna jednadžba iz koje će se odrediti samo jedna statička veličina koja se i traži na način da se definira polje dopustivih virtualnih pomaka te primjeni teorem virtualnog rada [2].

Može se uzeti primjer Gerberovog nosača kao statički određenog nosača kojem će se omogućiti definiranje plana pomaka uklanjanjem jedne veze. Na taj način formirat će se kinematički lanac odnosno mehanizam kojem polovi leže na istom pravcu. Za izračunavanje reakcije A u prvom ležaju, uklonit će se veza na mjestu i u smjeru te reakcije A zbog toga što je ideja da virtualni pomaci omoguće rad sile A . Uklanjanjem ležaja A sustav se transformira u mehanizam s jednim stupnjem slobode.

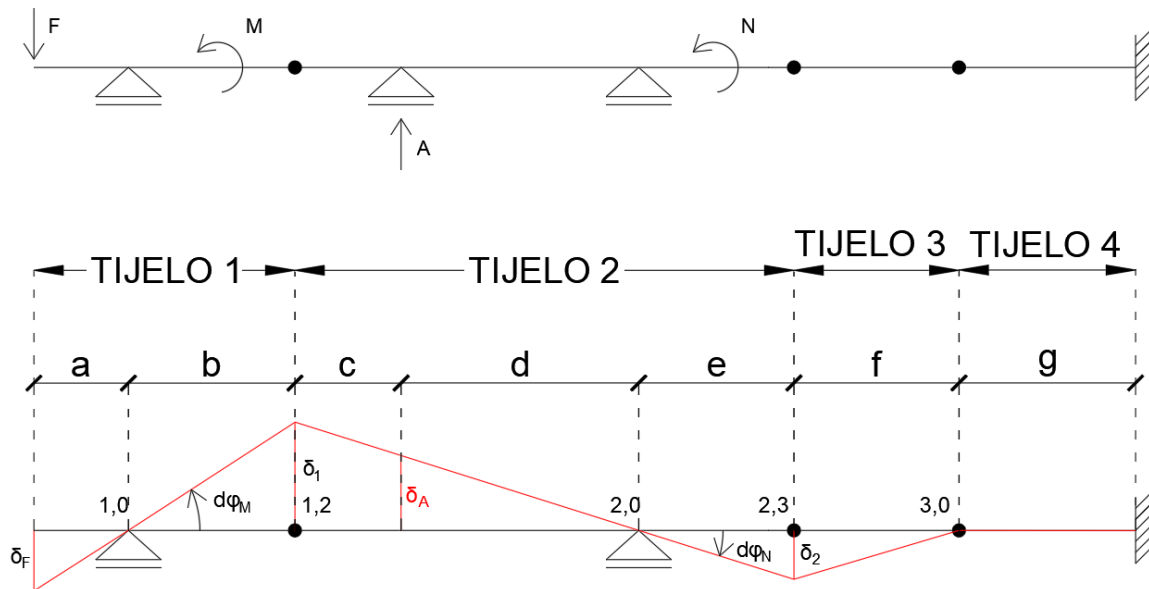


Slika 11: Gerberov nosač i formiranje mehanizma (plana pomaka) za određivanje reakcije A.

$$\begin{aligned}
 +F \cdot \delta_F - A \cdot \delta_A - M \cdot d\varphi_M + N \cdot d\varphi_N &= 0 \\
 \frac{\delta_F}{a+b} = \frac{\delta_A}{b} \rightarrow \delta_F &= \frac{\delta_A(a+b)}{b} \\
 \frac{\delta_1}{c} = \frac{\delta_A}{b} \rightarrow \delta_1 = \frac{c \cdot \delta_A}{b}, \quad \frac{\delta_1}{d} = d\varphi_M \rightarrow d\varphi_M &= \frac{c \cdot \delta_A}{bd} \\
 \frac{\delta_1}{d} = \frac{\delta_2}{e} \rightarrow \delta_2 = \frac{e \cdot \delta_1}{d}, \quad \frac{\delta_2}{f} = d\varphi_N \rightarrow d\varphi_N &= \frac{e \cdot c \cdot \delta_A}{fbd} \\
 +F \cdot \frac{\delta_A(a+b)}{b} - A \cdot \delta_A - M \cdot \frac{c \cdot \delta_A}{bd} + N \cdot \frac{e \cdot c \cdot \delta_A}{fbd} &= 0
 \end{aligned}$$

Na slici 11 su apsolutni polovi označeni sa brojem tijela te nulom (1,0), a relativni polovi su označeni sa dva broja (1,2) u točkama zglobnih spojeva dva tijela. Dobiveni su tako da se povuče pravac okomito na smjer klizača kliznog ležaja i na sjecištu dva pravca se nalazi apsolutni pol tog krutog tijela. Relativni polovi su na zglobovima odnosno na spoju dva tijela uz primjenu Kennedyjevog teorema slijedi i da relativni pol leži na spojnici apsolutnih polova. Pomak δ_A te kutovi zaokreta $d\varphi_M$ i $d\varphi_N$ se određuju iz plana pomaka, odnosno iz sličnosti

trokuta te svojstva tangensa malih kutova $tg\varphi \approx \varphi$. Dana je jednadžba virtualnog rada gdje su svi pomaci izraženi preko nepoznatog pomaka δ_A odnosno reakcije A.



Slika 12: Gerberov nosač

$$+F \cdot \delta_F + M \cdot d\varphi_M + A \cdot \delta_A + N \cdot d\varphi_N = 0$$

$$\frac{\delta_1}{c+d} = \frac{\delta_A}{d} \rightarrow \delta_1 = \frac{\delta_A(c+d)}{d}$$

$$\frac{\delta_F}{a} = \frac{\delta_1}{b} \rightarrow \delta_F = \frac{a \cdot \delta_1}{b} = \frac{a \cdot \delta_A(c+d)}{bd}$$

$$d\varphi_M = \frac{\delta_1}{b} = \frac{\delta_A(c+d)}{bd}$$

$$d\varphi_N = \frac{\delta_A}{d} = \frac{\delta_2}{e}$$

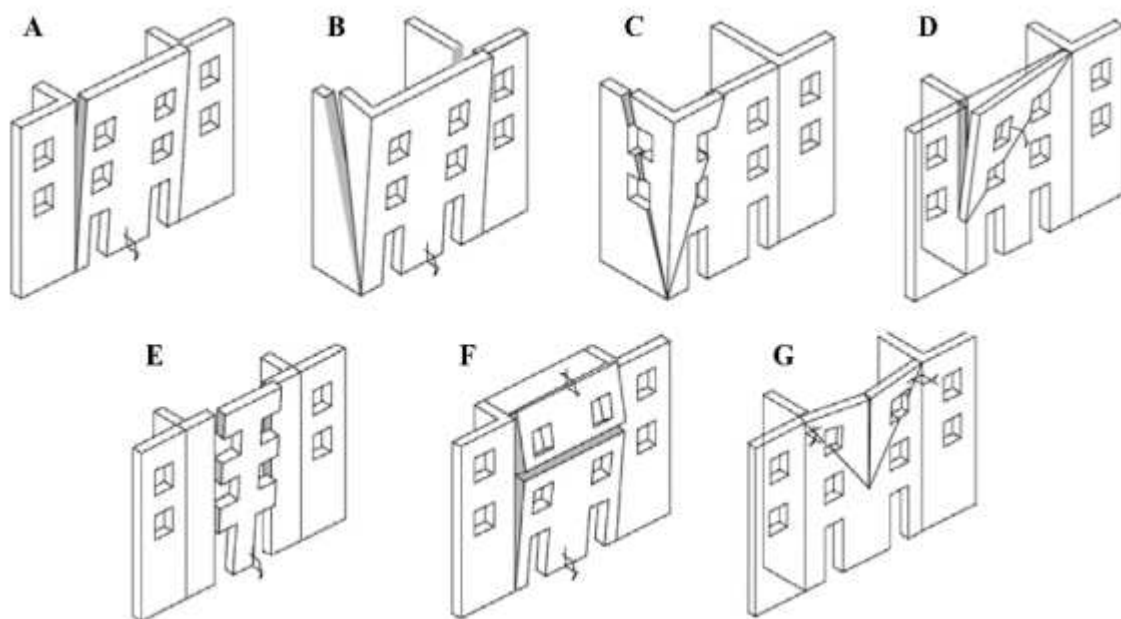
$$+F \cdot \frac{a \cdot \delta_A(c+d)}{bd} + M \cdot \frac{\delta_A(c+d)}{bd} + A \cdot \delta_A + N \cdot \frac{\delta_A}{d} = 0$$

Primjer na slici 12 se razlikuje od slike 11 po tome što sadrži tijelo četiri, povezano upetim ležajem, koje se ne miče tj. ne vrši translaciju niti rotaciju. Dana je jednadžba rada za određivanje reakcije A, a svi su pomaci izraženi preko virtualnog pomaka δ_A .

4 OTKAZIVANJE ZIDOVA IZVAN RAVNINE

Tradicijske zidane zgrade u odnosu na suvremene zidane zgrade su građene bez vertikalnih i horizontalnih serklaža te nisu projektirane da izdrže seizmička opterećenja. Iz tog su razloga veoma podložne otkazivanju zidova u svojoj ravnini i izvan ravnine što može značajno ugroziti njihovu vertikalnu nosivost i stabilnost čitave konstrukcije. Otkazivanje izvan ravnine je karakteristično za fasadne i zabatne zidove koji nisu dovoljno dobro povezani sa poprečnim zidovima i stropovima. Osobito su osjetljivi zidni elementi na višim etažama jer su tijekom potresa izloženi većim amplitudama pomaka i većim ubrzanjima. Na zidove u prizemlju djeluje veće vertikalno opterećenje, težina svega što se nalazi iznad njih, koje stabilizira horizontalnu komponentu potresne sile te zbog toga zidovi u prizemlju su manje podložni otkazivanju izvan ravnine. S druge strane, zidovi na višim etažama su često i vitkiji od zidova prizemlja te, s obzirom na to da se nalaze na vrhu konstrukcije, nisu toliko vertikalno opterećeni pa često otkazuju izvan ravnine. Osim vanjskih zidova, često na taj način otkazuju pregradni zidovi zbog svoje vitkosti i neadekvatnih spojeva te fasadne obloge od opeke, atike, parapeti i krovni vijenci [7].

Najčešći oblici formiranja lokalnih mehanizama za otkazivanje zidova izvan ravnine prikazani su na slici 13.



Slika 13: Klasični tipovi formiranja lokalnih mehanizama kod zidanih zgrada [10]

Mehanizam A: javit će se kod zidova gdje ne postoji adekvatna veza sa poprečnim zidovima pa dolazi do potpunog odvajanja zidova uz formiranje vertikalne pukotine na spoju s poprečnim zidovima, odnosno do odvajanja u slučajevima kad takva veza ne postoji. To je relativno čest slučaj kod pregradnih zidova ili zidane ispune u slučaju armiranobetonskih okvirnih konstrukcija.

Mehanizam B: pojavljuje se umjesto mehanizma A ako su zidovi dovoljno povezani pa u prevrtanju osim fasadnog sudjeluje i jedan ili oba poprečna zida. Ovaj mehanizam se razvija pojavom dijagonalne pukotine na poprečnim zidovima ili ako postoje veliki otvori na njima.

Mehanizam C: prevrtanje kuta oko horizontalnog zgloba, koji može biti na razini bilo koje etaže, okomito na ravninu simetrale kuta. Ovaj je slučaj moguć za samostojeće zgrade ili uglovnice odnosno kad je barem jedan kut zgrade slobodan.

Mehanizam D: ako postoji dobra povezanost zidova, prevrnut će se samo dio fasadnog zida u ravnini koje je često dodatno inducirano oštećenjem u toj ravnini. Moguć je i kada ojačanja nisu zastupljena jednakomjerno duž cijele fasade.

Mehanizam E: dio fasade koji otkazuje je uvjetovan širinom parapeta ili zidova na njihovom spoju; vertikalna pukotina može nastati unutar samog fasadnog zida.

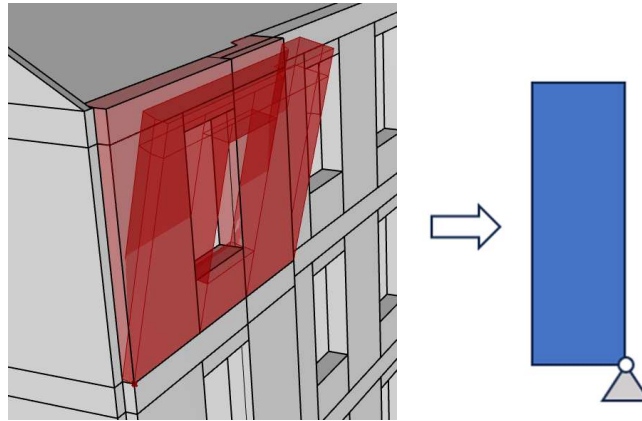
Mehanizmi A do E su sastavljeni od jednog tijela i jednog linijskog ili točkastog zgloba. Za razliku od njih, mehanizmi F i G čine kinematički lanac od dva tijela odnosno bloka koje dijeli unutarnji linijski zglob. Takav slučaj može se dogoditi ukoliko postoji određeno pojačanje zidova, odnosno spojeva na rubnim dijelovima mehanizma.

Mehanizam F: mehanizam vertikalnog luka dogodit će se ako se zategama ili drugim adekvatnim spojevima poveže fasadni zid sa stropnom konstrukcijom, odnosno ako postoji armiranobetonska obodna greda koja služi ako gornji oslonac, odnosno veza za horizontalnom konstrukcijom.

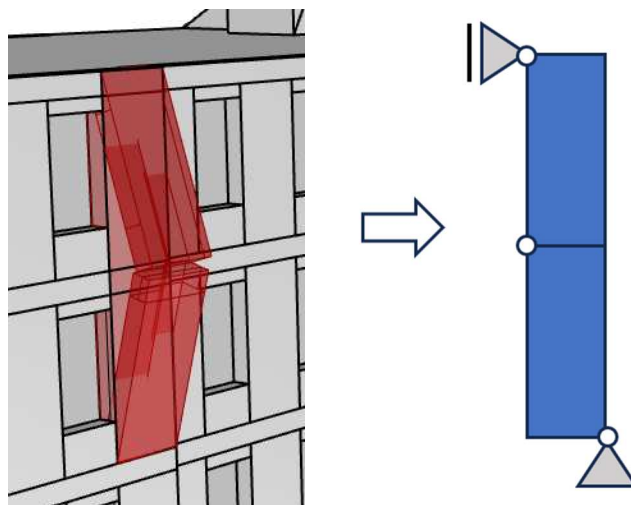
Mehanizam G: mehanizam horizontalnog luka je čest kod zidanih zgrada koje imaju vrlo dugačke fasadne zidove koji su slabo povezani s unutarnjim poprečnim zidovima.

Proračun otkazivanja izvan ravnine zidova se provodi primjenom kinematičke analize mehanizama koji imaju jedan stupanj slobode. Zidovi se modeliraju kao kruti ili djelomično kruti blokovi, a geometrija blokova i rubni uvjeti se definiraju na temelju stvarnih ili mogućih mjesta nastanka pukotine. Proračun se započinje odabirom tipa mehanizma koji ima mogućnost relativne rotacije i/ili klizanja te se uključe i sve sile koje na njega mogu djelovati. Za svaki dio konstrukcije se odabire više mogućih mehanizama te se kao mjerodavan odabire onaj koji ima najmanju vrijednost aktivacijskog ubrzanja odnosno onaj koji ima

najmanji kapacitet pomaka. Kinematička se analiza može provesti linearnim ili nelinearnim proračunom [7]. Kod linearnog proračuna provjerava se uvjet aktivacije mehanizma, dok se u slučaju nelinearnog proračuna ispituje kapacitet pomaka. U ovom radu korištena je prva metoda koja u pravilu daje konzervativnu procjenu uvjeta stabilnosti lokalnog mehanizma.



Slika 14: Mehanizam s jednim tijelom



Slika 15: Mehanizam s dva tijela

4.1 Procedura linearnog proračuna za otkazivanje zidova izvan ravnine

Procedura proračuna opisana u ovom poglavlju temelji se na talijanskom propisu NTC 2008 za „granično stanje zaštite života“ (tal. stato limite di salvaguardia della vita – SLV) odnosno

granično stanje znatnog oštećenja zato što u Europskim normama (HRN EN 1998-3) još nisu sadržane preporuke za ovakvu provjeru sigurnosti [7].

Linearni proračun se odvija tako što se prvo odrede volumeni elemenata, njihova težišta te položaji kinematičkih ograničenja (ležajeva i zglobova) pa se onda odrede i opterećenja zajedno sa položajima hvatišta sila.

Na temelju geometrije i položaja linijskog zgloba odredi se shema virtualnih pomaka koji opisuju moguće pomake mehanizma. Uvjet ravnoteže odnosno uvjet za graničnu vrijednost sile koja aktivira mehanizam u prevrtanje se postavlja jednadžbom virtualnog rada sila na virtualnim dopustivim pomacima mehanizma [7]:

$$\alpha_0 \left(\sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \delta_{x,j} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \delta_{y,i} - \sum_{h=1}^o F_h \delta_h = L_{fi} \quad (12)$$

gdje su:

n – broj svih sila težine koje djeluju na blokove kinematičkoga lanca (mehanizma),

m – broj sila koje ne djeluju izravno na blokove, ali njihova masa zbog seizmičkoga djelovanja stvara horizontalne inercijalne sile na mehanizam jer se one ne mogu učinkovito prenijeti na druge nosive elemente,

o – broj vanjskih sila koje nisu povezane s masama, a djeluju na blokove kinematičkoga lanca,

P_i – opća sila težine koja djeluje izravno na blok,

P_j – opća sila težine koja ne djeluje izravno na blokove, ali čija masa zbog seizmičkoga djelovanja stvara horizontalne inercijalne sile na mehanizam jer se one ne mogu učinkovito prenijeti na druge nosive elemente zgrade,

F_h – opća vanjska sila koja djeluje na blok,

L_{fi} – virtualni rad unutarnjih sila.

Faktor aktivacije mehanizma α_0 je koeficijent s kojim se množe vertikalne sile s inercijalnim učinkom (težine) koje pokreću prevrtanje zida odnosno njegovo otkazivanje. Za izračunavanje α_0 se uglavnom primjenjuje princip virtualnog rada iako se može odrediti i iz uvjeta ravnoteže sila. Koeficijent α_0 predstavlja omjer stabilizirajućeg momenta i momenta prevrtanja koji se vezuje za inercijalne učinke sila težina koje preuzima promatrani zid.

Kako bi se odredilo pripadno spektralno ubrzanje koje uzrokuje aktivaciju mehanizma za sustav s jednim stupnjem slobode izračunava se proračunska modalna masa M^* i faktor udjela proračunske modalne mase e^* prema sljedećim izrazima:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{Px,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{Px,i}^2} \quad (13)$$

$$e^* = \frac{gM^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} \quad (14)$$

gdje su P_i sve sile težine koje se prenose na blok i koje imaju inercijalni faktor, a $\delta_{Px,i}$ pripadni horizontalni virtualni pomaci s kojima se definira plan pomaka pripadnog mehanizma.

Nakon toga se izračunava a_0^* - pripadno spektralno ubrzanje uzimajući u obzir koeficijent $F_c = 1,35$ kao faktor pouzdanosti odnosno razinu znanja.

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* F_c} \quad (15)$$

Nakon što se odredi geometrija i pretpostavi tip mogućeg lokalnog mehanizma, odredi se koeficijent aktivacije i pripadno spektralno ubrzanje odgovarajućeg ekvivalentnog sustava što se usporedi sa zahtjevom s obzirom na potresnu situaciju. Provjera aktivacije mehanizma može se ispitati s obzirom na vršno ubrzanje u razini tla za zidove prizemlja odnosno sa vršnim ubrzanjem u razini etaže za zidove na višim etažama.

SLV kriterij može se korelirati sa graničnim stanjem znatnog oštećenja te se dobivene vrijednosti a_0^* uspoređuju sa $a_{0,min}^*$:

$$a_0^* \geq a_{0,min}^* = \max \left(\frac{a_g S}{q} ; \frac{S_e(T_1) \psi(z) \Gamma_1}{q} \right) \quad (16)$$

gdje je q – koeficijent konstrukcije za koji se uzima da je jednak 2,

$S_e(T_1)$ – vrijednost elastičnog spektra određena na temelju vjerojatnosti prekoračenja graničnog stanja, referentnog razdoblja VR i osnovnog perioda titranja konstrukcije T_1 , a

$\psi(z)$ – utjecajni koeficijent oblika titranja koji se računa prema izrazu:

$$\psi(z) = \frac{z}{H} \quad (17)$$

gdje je z visinska kota različita za svaki mehanizam i H ukupna visina zgrade,

Γ_1 – koeficijent modalne participacije (jednak za cijelu zgradu) koji se može procijeniti na temelju izraza:

$$\Gamma_1 = \frac{3n}{2n+1} \quad (18)$$

gdje je n – broj etaža zgrade.

Zahtjev sigurnosti može se povezati s intenzitetom ubrzanja koje uzrokuje granično stanje znatnog oštećenja pri globalnom proračunu konstrukcije [7].

5 PRORAČUN MEHANIZAMA PREVRTANJA ZA ZIDANU ZGRADU

5.1 Opis konstrukcije

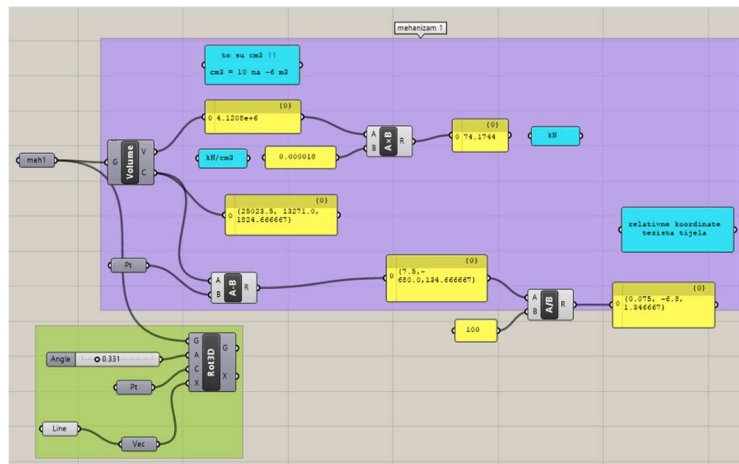
Zidana zgrada koja će biti prikazana i analizirana u ovome radu postojeća je ugrađena zgrada koja se nalazi u centru grada Zagreba, odnosno u Donjem gradu. Sastoji se od podruma, prizemlja, prvog, drugog i trećeg kata, mansarde i tavana te je pravokutnog tlocrtnog oblika s istakama na unutarnjem i vanjskom pročelju zgrade. Prizemlje i prvi kat su visine 4,1 m, drugi kat 3,7 m, mansarda 3,35 m te tavan 4,04 m. Zgrada ima kolni prilaz, dvokrako stubište te dva svjetlarnika koja su se u razini tavana urušila u potresu 2020. godine.



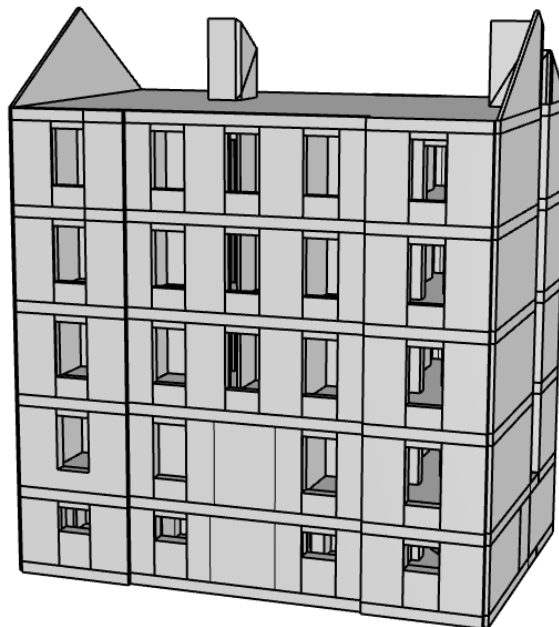
Slika 16: Vanjsko (ulično) pročelje zgrade

U svrhu jednostavnijeg definiranja volumena pretpostavljenih mehanizama izrađen je trodimenzionalni model zgrade u programu Rhinoceros i korišten je njegov dodatak

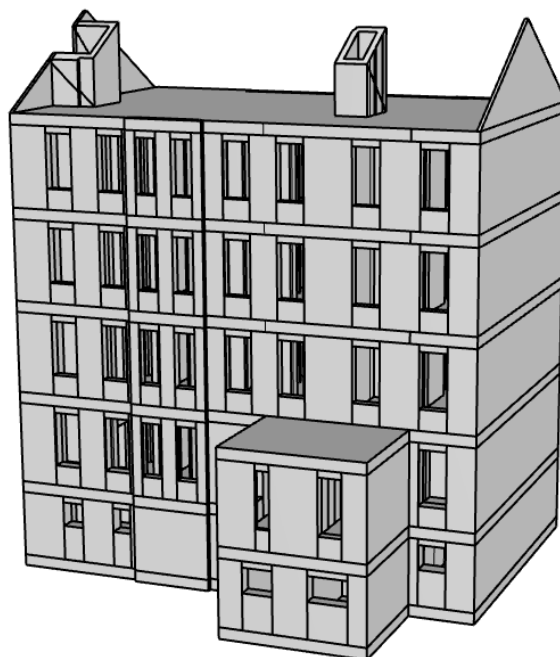
Grasshopper pomoću kojeg se za odabrane volumene zidova određuje pripadna težina i položaj težišta pojedinog mehanizma.



Slika 17: Skripta u programu Grasshopper za izračun parametara odabranog mehanizma



Slika 18: Prikaz volumnog modela zgrade izrađenog u programu Rhinoceros (pogled na ulično pročelje).



Slika 19: Prikaz volumnog modela zgrade izrađenog u programu Rhinoceros (pogled na dvorišno pročelje)

5.2 Analiza opterećenja

5.2.1 Vertikalno opterećenje konstrukcije

Odabrano je nekoliko tipičnih mehanizama otkazivanja zidova izvan ravnine. Za svaki mehanizam je bilo potrebno odrediti volumene zidnih elemenata te definirati položaje ležajeva i zglobova odnosno kinematičkih ograničenja i položaje hvatišta sila. Volumna težina zidanog зида je $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ te kada se volumen pomnoži sa volumnom težinom dobije se težina elementa G u kN koja se koristi u proračunu. Za svaki blok, ova je težina prikazana zasebno kod svakog odabranog mehanizma

Analiza opterećenja za dodatno stalno i uporabno opterećenje koje se sa stropnih i krovne konstrukcije prenosi na zidove analiziranih mehanizama prikazana je u nastavku.

Drveni grednici:

Slojevi poda s gredama i šutom	2,5	kN/m ²
Dodatno stalno	1	kN/m ²
Uporabno	2	kN/m ²
Ukupno stalno	$1 \cdot (2,5 + 1) = 3,5$	kN/m ²

Ukupno uporabno	$0,3 \cdot 2 = 0,6$	kN/m ²
Ukupno	$3,5 + 0,6 = 4,1$	kN/m ²

Oсни razmak drvenog grednika je 7,3 i 6,4 m. Linijsko opterećenje na zidove:

ulično pročelje $4,1 \cdot 7,3 / 2 = 14,97$ kN/m

dvorišno pročelje $4,1 \cdot 6,4 / 2 = 13,12$ kN/m

Tavan – grednici:

Konstrukcija krovišta s pokrovom		2	kN/m ²
Ukupno		2	kN/m ²

Oсни razmak tavanaskog grednika je 7,3 i 6,4 m. Linijsko opterećenje na zidove:

ulično pročelje $2 \cdot 7,3 / 2 = 7,3$ kN/m

dvorišno pročelje $2 \cdot 6,4 / 2 = 6,4$ kN/m

Tavan – grednici:

Slojevi poda s gredama i šutom		2,5	kN/m ²
Dodatno stalno		0,5	kN/m ²
Uporabno		1	kN/m ²
Ukupno stalno	$1 \cdot (2,5 + 0,5) =$	3	kN/m ²
Ukupno uporabno	$0,3 \cdot 1 =$	0,3	kN/m ²
Ukupno	$3 + 0,3 =$	3,3	kN/m ²

Oсни razmak tavanaskog grednika je 7,3 i 6,4 m. Linijsko opterećenje na zidove:

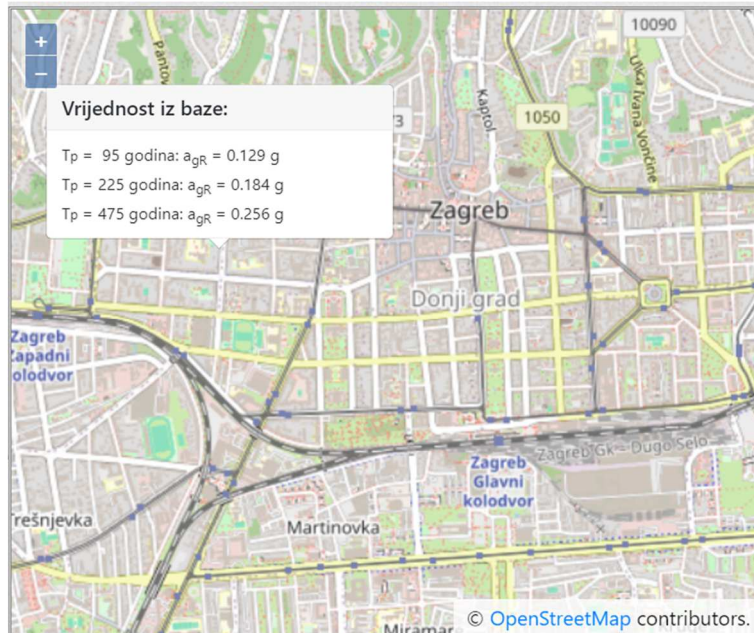
ulično pročelje $3,3 \cdot 7,3 / 2 = 12,05$ kN/m

dvorišno pročelje $3,3 \cdot 6,4 / 2 = 10,56$ kN/m

5.2.2 Opterećenje potresom

Identifikaciju uvjeta tla prema kategorizaciji u HRN EN 1998–1 [11] nije moguće sa sigurnošću odrediti, jer ispitivanja tla nisu provedena, ali se mogu pretpostaviti vrijednosti koje su uobičajene za to područje, te je odabrana kategorija tla C. Horizontalno vršno

ubrzanje tla tipa A na lokaciji za povratni period od 475 godina iznosi $a_{gR} = 0,26 \text{ g} = 2,55 \text{ m/s}^2$ gdje je g ubrzanje sile teže koje iznosi $9,81 \text{ m/s}^2$. [6]



Slika 20: Prikaz vrijednosti ubrzanja tla iz Karte potresnih područja Hrvatske [6]

Vrijednost prvog perioda za zgradu procijenjena je prema formuli HRN EN [11]:

$$T = 0,016 H = 0,016 \cdot 24,36 = 0,39 \text{ s}$$

gdje je H visina zgrade u metrima od temelja.

Tablica 1: Vrijednosti perioda T_B , T_C i T_D te faktora tla S u ovisnosti o tipu tla [11]

Tip tla	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

Iz tablice su očitane sljedeće vrijednosti za tip tla C:

$$S=1,15; T_B(s)=0,20; T_C(s)=0,6, \text{ i } T_D(s)=2,0$$

gdje je S – faktor tla, a T_B , T_C i T_D su periodi oscilacija.

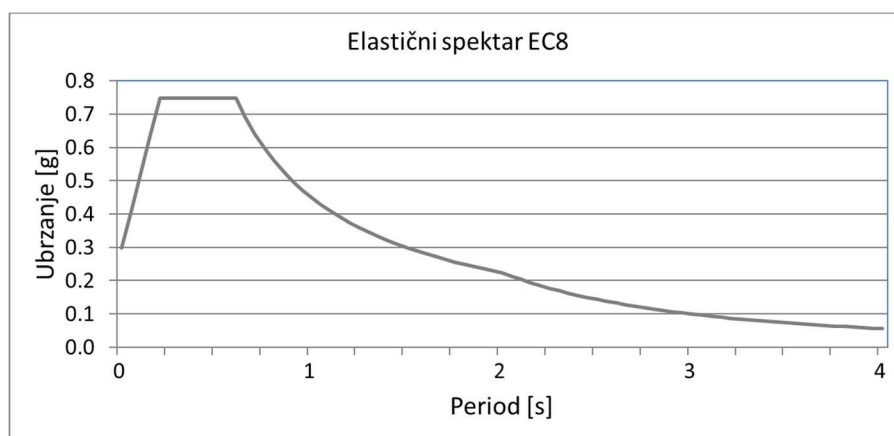
Izračunati period zgrade $T=0,39$ s se nalazi između vrijednosti T_B i T_C pa se za računanje elastičnog spektra odziva $S_e(T)$ za horizontalnu komponentu potresnog djelovanja koristi izraz naveden u EN HRN 1998-1: [11]

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 = 2,55 \cdot 1,15 \cdot 1 \cdot 2,5 = 7,33$$

gdje je a_g – proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu

η – faktor korekcije prigušenja = 1 za viskozno prigušenje 5%.

Za kategoriju tla C te vrijednost ubrzanja podloge 0,25g spektar je prikazan na grafu.



Slika 21: Elastični spektar odziva za vršno ubrzanje tla $a_g = 0.26$ g i kategoriju tla C.

5.3 Proračun aktivacije mehanizama

Osnovne vrijednosti parametara koji su potrebni za izračun faktora aktivacije odabranih tipova lokalnih mehanizama dani su u tablici 2. Osnovna pretpostavka svih odabranih lokalnih mehanizama je da su svi blokovi apsolutno kruti te se stoga koristi faktor razine znanja $F_c=1,35$. Provodi se isključivo linearni proračun kojim se određuje faktor aktivacije mehanizma, što znači da ako se ostvare pretpostavljeni uvjeti proračuna (popuštanje spojeva, formiranje pukotina uzrokovanih globalnim odzivom i slično) mehanizam će uslijed određene razine ubrzanja biti aktiviran, ali nije nužno da se dogodi prevrtanje. Za određivanje kapaciteta pomaka potrebno je provesti nelinearnu metodu proračuna, primjerice metodu postupnog guranja kako bi se utvrdio krajnji kapacitet pomaka pri kojem mehanizam gubi stabilnost. Za svaki mehanizam određena je i vrijednost pripadnog spektralnog ubrzanja

koja je uspoređena sa zahtjevom, odnosno minimalnom vrijednosti ubrzanja koju propisuje talijanski NCT2008 propis.

Tablica 2: Rekapitulacija svih navedenih početnih parametara zgrade

Specifična težina zidanog зида	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
Vršna vrijednost ubrzanja tla ($T_p = 475$ god)	$a_g = 2,55 \text{ m/s}^2$
Vrijednost prvog perioda građevine	$T_1 = 0,39 \text{ s}$
Visina građevine	$H = 24,36 \text{ m}$
Koeficijent modalne participacije	$\Gamma_1 = 1,385$
Koeficijent konstrukcije	$q = 2$
Faktor razine znanja LC1	$F_c = 1,35$
Vrijednost amplitude elastičnog spektara odziva	$S_e(T) = 7,33$

U nastavku će se prikazati rezultati proračuna za odabrane mehanizme. Detaljni izračun prikazan je kod prvog mehanizma kojim se analizira prevrtanje jednog krutog bloka i prvog mehanizma za kinematički lanac dok su rezultati proračuna svih drugih prikazani u tablicama.

5.4 Mehanizmi krovišta

MEHANIZAM 1 – JUŽNA LASTAVICA

Tablica 3: Proračun južne lastavice

Ulazne vrijednosti:	
Debljina bloka	b = 15 cm
Težina bloka	G = 74,17 kN
Virtualni pomak	$\delta x = 1,35$ $\delta y = 0,075$
Visinska kota zida	z = 20,32
Utjecajni koeficijent titranja	$\Psi(z) = 0,83$
Proračun mehanizma:	
Koeficijent aktivacije	$\alpha = 0,056$
Modalna masa	M* = 7,56 t
Faktor modalne mase	e* = 1
Spektralno ubrzanje	a ₀ * = 0,40 m/s ²
Zahtijevano spektralno ubrzanje	a _{0,min} * = max (1,47 m/s ² ; 4,23 m/s ²)
Uvjet a ₀ * ≥ a _{0,min} *	0,4 < 4,23 → ne zadovoljava

Jednadžba virtualnog rada:

$$G \cdot 0,075 - G \cdot \alpha \cdot 1,35 = 0 \rightarrow \alpha = 0,056$$

Proračunska modalna masa i faktor proračunske modalne mase:

$$M^* = \frac{(G \cdot \delta_x)^2}{9,81 \cdot G \cdot \delta_x^2} = \frac{(74,17 \cdot 1,35)^2}{9,81 \cdot 74,17 \cdot 1,35^2} = 7,56 \text{ t}$$

$$e^* = \frac{M^* \cdot g}{G} = \frac{7,56 \cdot 9,81}{74,17} = 0,99991 \approx 1$$

Pripadno spektralno ubrzanje koje aktivira mehanizam:

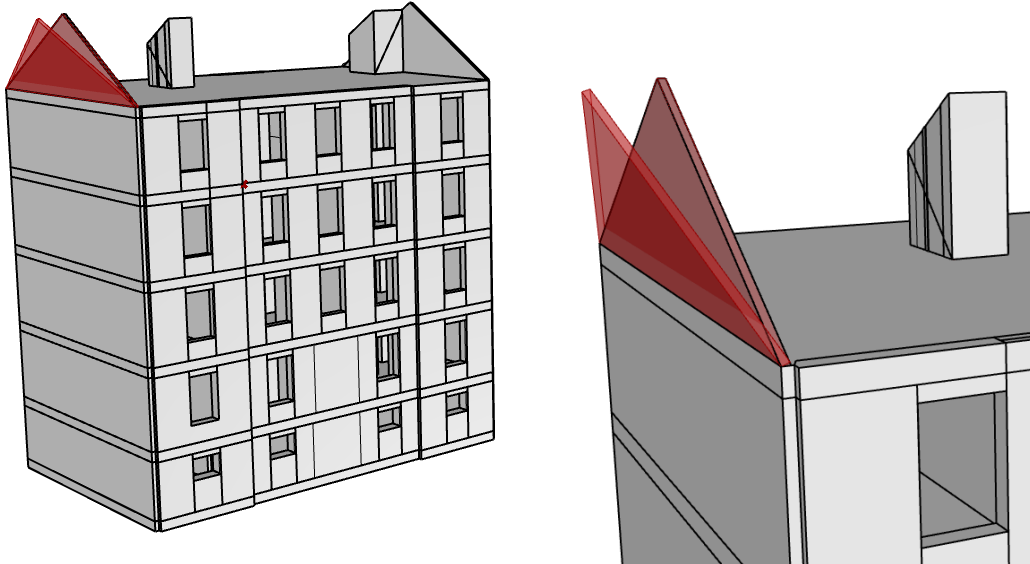
$$a_0^* = \frac{\alpha \cdot g}{e^* \cdot F_c} = \frac{0,056 \cdot 9,81}{1 \cdot 1,35} = 0,4$$

Proračun seizmičkog zahtjeva za mehanizam:

$$\frac{a_g \cdot S}{q} = \frac{2,55 \cdot 1,15}{2} = 1,47$$

$$\psi(z) = \frac{z}{H} = \frac{20,32}{24,36} = 0,83$$

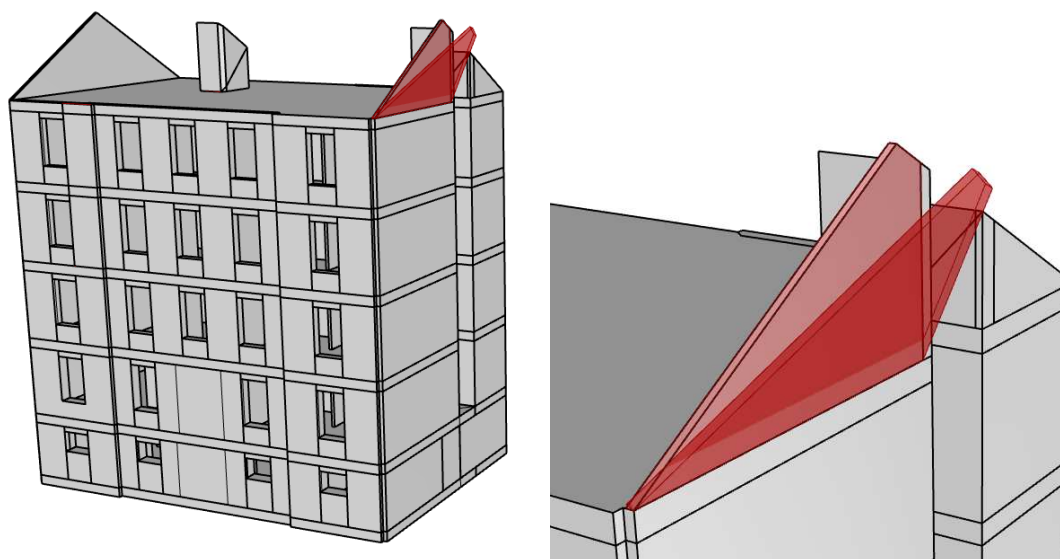
$$\frac{S_e(T_1) \psi(z) \Gamma_1}{q} = \frac{7,3 \cdot 0,83 \cdot 1,38}{2} = 4,23$$



Slika 22: Mehanizam 1 - lastavica jug

Tablica 4: Proračun sjeverne lastavice

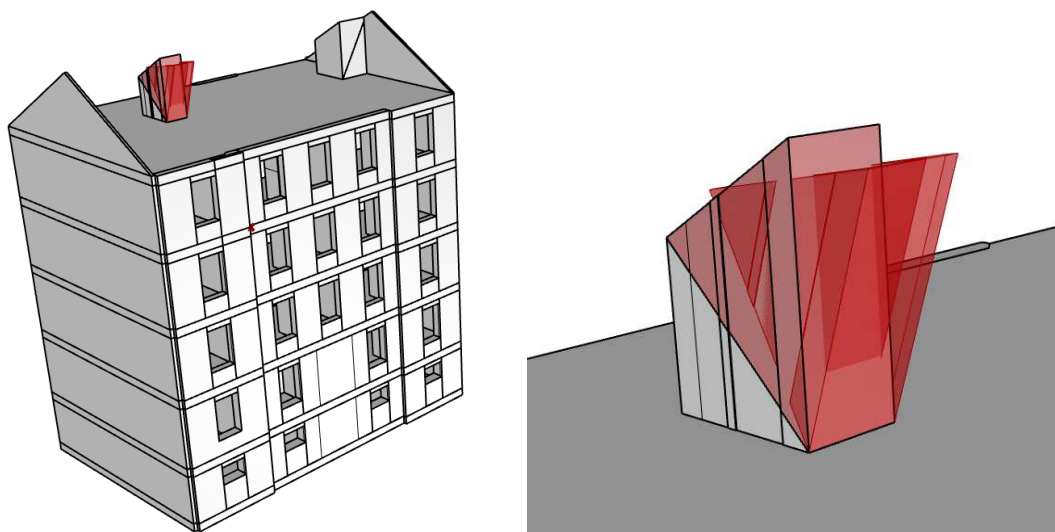
Ulazne vrijednosti:	
Debljina bloka	$b = 15 \text{ cm}$
Težina bloka	$G = 44,82 \text{ kN}$
Virtualni pomak	$\delta x = 1,44$ $\delta y = 0,075$
Visinska kota zida	$z = 20,32$
Utjecajni koeficijent titranja	$\Psi(z) = 0,83$
Proračun mehanizma:	
Koeficijent aktivacije	$\alpha = 0,052$
Modalna masa	$M^* = 4,57 \text{ t}$
Faktor modalne mase	$e^* = 1$
Spektralno ubrzanje	$a_0^* = 0,38 \text{ m/s}^2$
Zahtijevano spektralno ubrzanje	$a_{0,\min}^* = \max(1,47 \text{ m/s}^2; 4,23 \text{ m/s}^2)$
Uvjet $a_0^* \geq a_{0,\min}^*$	$0,38 < 4,23 \rightarrow$ ne zadovoljava



Slika 23: Mehanizam 2 - lastavica sjever

Tablica 5: Proračun južnog svjetlarnika

Ulazne vrijednosti:	
Debljina bloka	$b = 30 \text{ cm}$
Težina bloka	$G = 61,11 \text{ kN}$
Virtualni pomak	$\delta x = 1,91$ $\delta y = 0,66$
Visinska kota zida	$z = 20,32$
Utjecajni koeficijent titranja	$\Psi(z) = 0,83$
Proračun mehanizma:	
Koeficijent aktivacije	$\alpha = 0,346$
Modalna masa	$M^* = 6,23 \text{ t}$
Faktor modalne mase	$e^* = 1$
Spektralno ubrzanje	$a_0^* = 2,51 \text{ m/s}^2$
Zahtijevano spektralno ubrzanje	$a_{0,\min}^* = \max(1,47 \text{ m/s}^2; 4,23 \text{ m/s}^2)$
Uvjet $a_0^* \geq a_{0,\min}^*$	$2,51 < 4,23 \rightarrow \text{ne zadovoljava}$



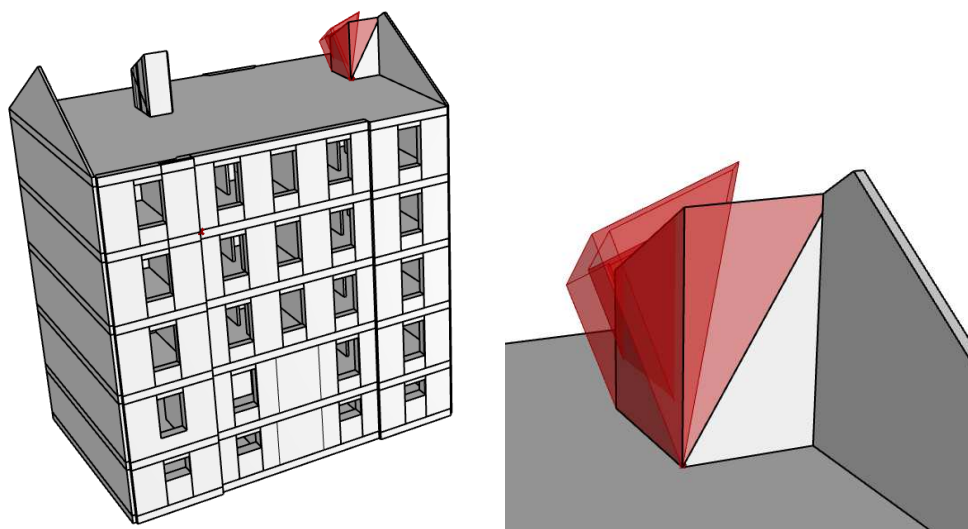
Slika 24: Mehanizam 3 – južni svjetlarnik



Slika 25: Južni svjetlarnik stradao u potresu 2020.

Tablica 6: Proračun sjevernog svjetlarnika

Ulazne vrijednosti:	
Debljina bloka	$b = 30 \text{ cm}$
Težina bloka	$G = 63,92 \text{ kN}$
Virtualni pomak	$\delta x = 1,79$ $\delta y = 0,497$
Visinska kota zida	$z = 20,32$
Utjecajni koeficijent titranja	$\Psi(z) = 0,83$
Proračun mehanizma:	
Koeficijent aktivacije	$\alpha = 0,278$
Modalna masa	$M^* = 6,52 \text{ t}$
Faktor modalne mase	$e^* = 1$
Spektralno ubrzanje	$a_0^* = 2,02 \text{ m/s}^2$
Zahtijevano spektralno ubrzanje	$a_{0,\min}^* = \max(1,47 \text{ m/s}^2; 4,23 \text{ m/s}^2)$
Uvjet $a_0^* \geq a_{0,\min}^*$	$2,02 < 4,23 \rightarrow \text{ne zadovoljava}$



Slika 26: Mehanizam 4 - sjeverni svjetlarnik



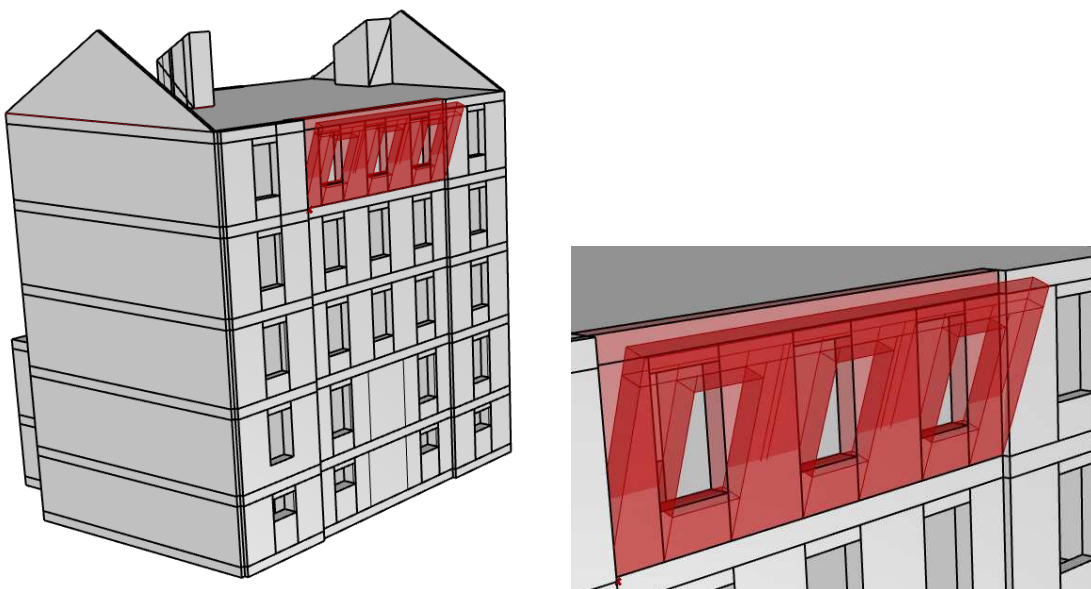
Slika 27: Sjeverni svjetlarnik sa vidjivim pukotinama nakon potresa 2020.

5.5 Mehanizmi mansarde

MEHANIZAM 5

Tablica 7: Proračun mehanizma 5

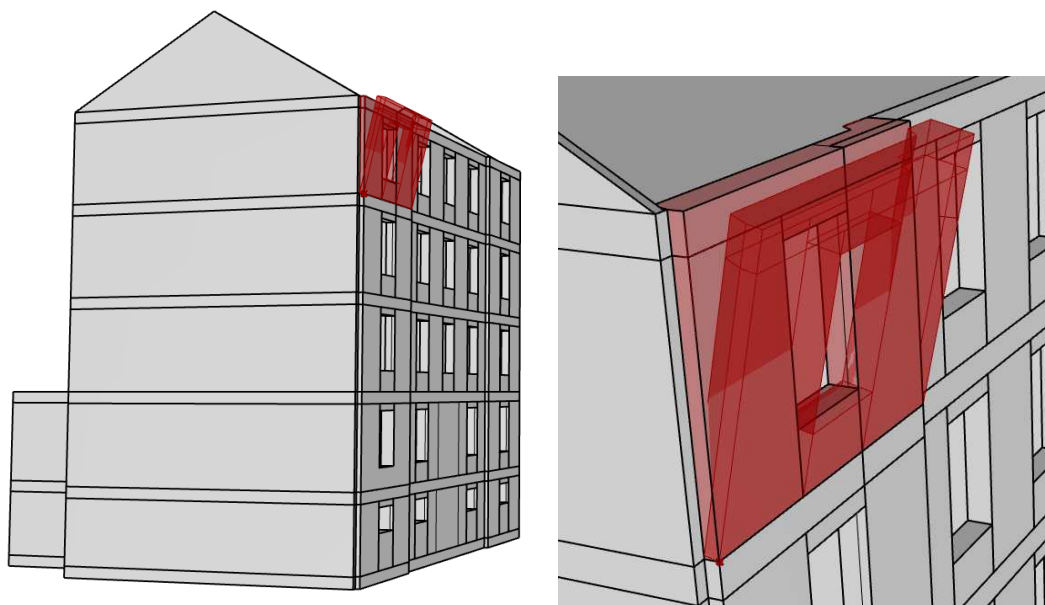
Ulazne vrijednosti:		
Debljina bloka	$b = 45 \text{ cm}$	
Težina bloka	$G = 257,90 \text{ kN}$	
Opterećenje od stropa zadnje etaže	$P_{sk} = 125,32 \text{ kN}$	
Opterećenje od krova	$P_k = 75,92 \text{ kN}$	
Virtualni pomak	$\delta x_{P_s} = \delta x_{P_k} = 4,1$ $\delta x_G = 2,04$	$\delta y_{P_s} = 0,35$ $\delta y_G = \delta y_{P_k} = 0,225$
Visinska kota zida	$z = 20,32$	
Utjecajni koeficijent titranja	$\Psi(z) = 0,83$	
Proračun mehanizma:		
Koeficijent aktivacije	$\alpha = 0,088$	
Modalna masa	$M^* = 41,7 \text{ t}$	
Faktor modalne mase	$e^* = 0,89$	
Spektralno ubrzanje	$a_0^* = 0,72 \text{ m/s}^2$	
Zahtijevano spektralno ubrzanje	$a_{0,\min}^* = \max(1,47 \text{ m/s}^2; 3,38 \text{ m/s}^2)$	
Uvjet $a_0^* \geq a_{0,\min}^*$	$0,72 < 3,39 \rightarrow \text{ne zadovoljava}$	



Slika 28: Mehanizam 5

Tablica 8: Proračun mehanizma 6

Ulazne vrijednosti:		
Debljina bloka	$b = 45 \text{ cm}$	
Težina bloka	$G = 149,99 \text{ kN}$	
Opterećenje od stropa zadnje etaže	$P_{sk} = 61,46 \text{ kN}$	
Opterećenje od krova	$P_k = 37,23 \text{ kN}$	
Virtualni pomak	$\delta x_{P_s} = \delta x_{P_k} = 4,1$ $\delta x_G = 2,04$	$\delta y_{P_s} = 0,35$ $\delta y_G = 0,247$ $\delta y_{P_k} = 0,225$
Visinska kota zida	$z = 16,22$	
Utjecajni koeficijent titranja	$\Psi(z) = 0,67$	
Proračun mehanizma:		
Koeficijent aktivacije	$\alpha = 0,094$	
Modalna masa	$M^* = 22,54 \text{ t}$	
Faktor modalne mase	$e^* = 0,89$	
Spektralno ubrzanje	$a_0^* = 0,77 \text{ m/s}^2$	
Zahtijevano spektralno ubrzanje	$a_{0,\min}^* = \max(1,47 \text{ m/s}^2; 3,39 \text{ m/s}^2)$	
Uvjet $a_0^* \geq a_{0,\min}^*$	$0,77 < 3,39 \rightarrow$ ne zadovoljava	



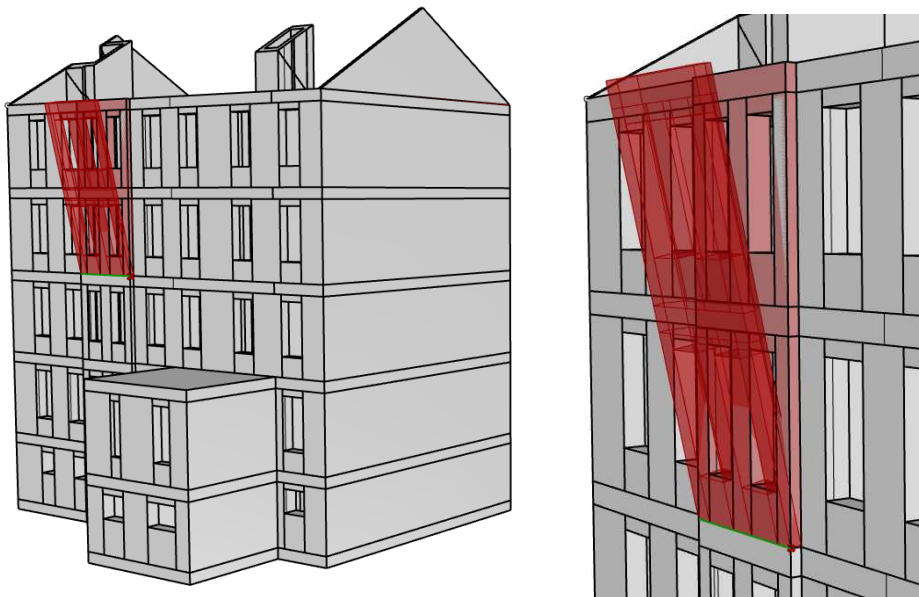
Slika 29: Mehanizam 6

5.6 Mehanizmi drugog kata

MEHANIZAM 7

Tablica 9: Proračun mehanizma 7

Ulazne vrijednosti:		
Debljina bloka	$b = 45 \text{ cm}$	
Težina bloka	$G = 148,87 \text{ kN}$	
Opterećenje od stropa	$P_s = 46,18 \text{ kN}$	
Opterećenje od stropa zadnje etaže	$P_{sk} = 37,17 \text{ kN}$	
Opterećenje od krova	$P_k = 22,53 \text{ kN}$	
Virtualni pomak	$\delta x_{P_{sk}} = \delta x_{P_k} = 8,2$ $\delta x_G = \delta x_{P_s} = 4,07$	$\delta y_{P_s} = \delta y_{P_{sk}} = 0,35$ $\delta y_G = 0,214$ $\delta y_{P_k} = 0,225$
Visinska kota zida	$z = 12,12$	
Utjecajni koeficijent titranja	$\Psi(z) = 0,5$	
Proračun mehanizma:		
Koeficijent aktivacije	$\alpha = 0,051$	
Modalna masa	$M^* = 23,17 \text{ t}$	
Faktor modalne mase	$e^* = 0,89$	
Spektralno ubrzanje	$a_0^* = 0,42 \text{ m/s}^2$	
Zahtijevano spektralno ubrzanje	$a_{0,\min}^* = \max(1,47 \text{ m/s}^2; 2,52 \text{ m/s}^2)$	
Uvjet $a_0^* \geq a_{0,\min}^*$	$0,42 < 2,52 \rightarrow \text{ne zadovoljava}$	



Slika 30: Mehanizam 7

Tablica 10: Proračun mehanizma 8

Ulazne vrijednosti:		
Debljina bloka	$b = 45 \text{ cm}$	
Težina bloka	$G1 = 74,73 \text{ kN}$ $G2 = 74,73 \text{ kN}$	
Opterećenje od stropa	$P_s = 46,18 \text{ kN}$	
Opterećenje od stropa zadnje etaže	$P_{sk} = 37,17 \text{ kN}$	
Opterećenje od krova	$P_k = 22,53 \text{ kN}$	
Virtualni pomak	$\delta x_{G1} = 2,03$ $\delta x_{P_s} = 4,1$ $\delta x_{G2} = 2,07$	$\delta y_{P_k} = 0,675$ $\delta y_{G1} = 0,22$ $\delta y_{G2} = 0,68$ $\delta y_{P_s} = 0,35$ $\delta y_{P_{sk}} = 0,55$
Visinska kota zida	$z = 12,12$	
Utjecajni koeficijent titranja	$\Psi(z) = 0,5$	
Proračun mehanizma:		
Koeficijent aktivacije	$\alpha = 0,24$	
Modalna masa	$M^* = 17,78 \text{ t}$	
Faktor modalne mase	$e^* = 0,68$	
Spektralno ubrzanje	$a_0^* = 2,55 \text{ m/s}^2$	
Zahtijevano spektralno ubrzanje	$a_{0,\min}^* = \max(1,47 \text{ m/s}^2; 2,52 \text{ m/s}^2)$	
Uvjet $a_0^* \geq a_{0,\min}^*$	$2,55 > 2,52 \rightarrow \text{zadovoljava}$	

Detaljan prikaz izračuna parametara mehanizma dan je u nastavku.

Jednadžba virtualnog rada:

$$-P_{sk} \cdot 0,55 d\varphi_2 - P_k \cdot 0,675 d\varphi_2 - G_2 \cdot 0,68 d\varphi_2 - P_s \cdot 0,35 d\varphi_1 - G_1 \cdot 0,22 d\varphi_1 + \alpha \cdot G_2 \cdot 2,07 d\varphi_2 + \alpha \cdot P_s \cdot 4,1 d\varphi_1 + \alpha \cdot G_1 \cdot 2,03 d\varphi_1 = 0 \rightarrow \alpha = 0,24$$

Proračunska modalna masa i faktor proračunske modalne mase:

$$M^* = \frac{(G_2 \cdot \delta_{xG2} + P_s \cdot \delta_{xPs} + G_1 \cdot \delta_{xG1})^2}{9,81 \cdot (G_2 \cdot \delta_{xG2}^2 + P_s \cdot \delta_{xPs}^2 + G_1 \cdot \delta_{xG1}^2)} = \frac{(74,43 \cdot 2,07 + 46,18 \cdot 4,1 + 74,43 \cdot 2,03)^2}{9,81 \cdot (74,43 \cdot 2,07^2 + 46,18 \cdot 4,1^2 + 74,43 \cdot 2,03^2)} = 17,78 t$$

$$e^* = \frac{M^* \cdot g}{G_2 + P_s + G_1 + P_{sk} + P_k} = \frac{17,76 \cdot 9,81}{74,43 + 46,18 + 74,43 + 37,13 + 22,53} = 0,69$$

Pripadno spektralno ubrzanje koje aktivira mehanizam:

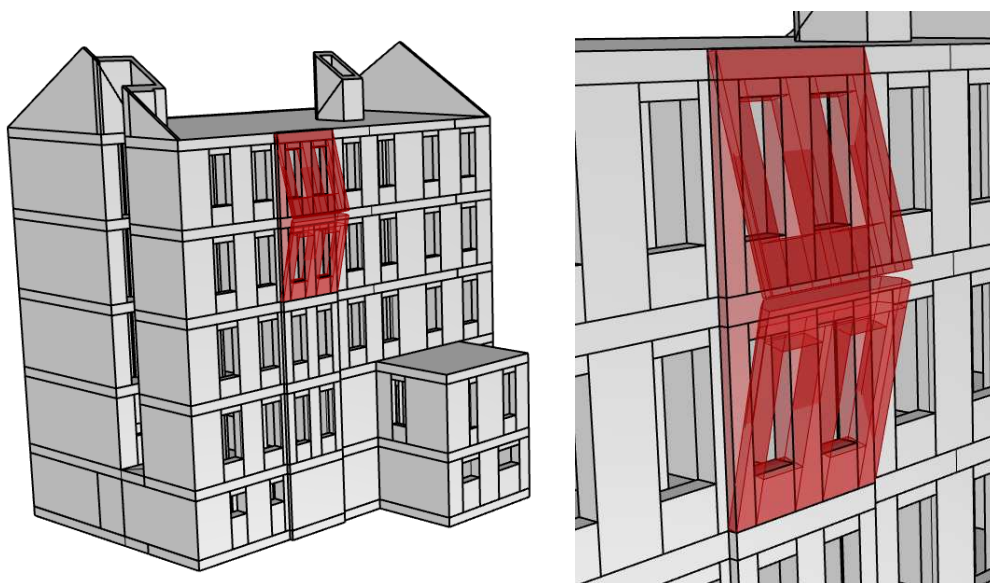
$$a_0^* = \frac{\alpha \cdot g}{e^* \cdot F_c} = \frac{0,24 \cdot 9,81}{0,69 \cdot 1,35} = 2,55 m/s^2$$

Proračun seizmičkog zahtjeva za mehanizam:

$$\frac{a_g \cdot S}{q} = \frac{2,55 \cdot 1,15}{2} = 1,47 m/s^2$$

$$\psi(z) = \frac{z}{H} = \frac{12,12}{24,36} = 0,497$$

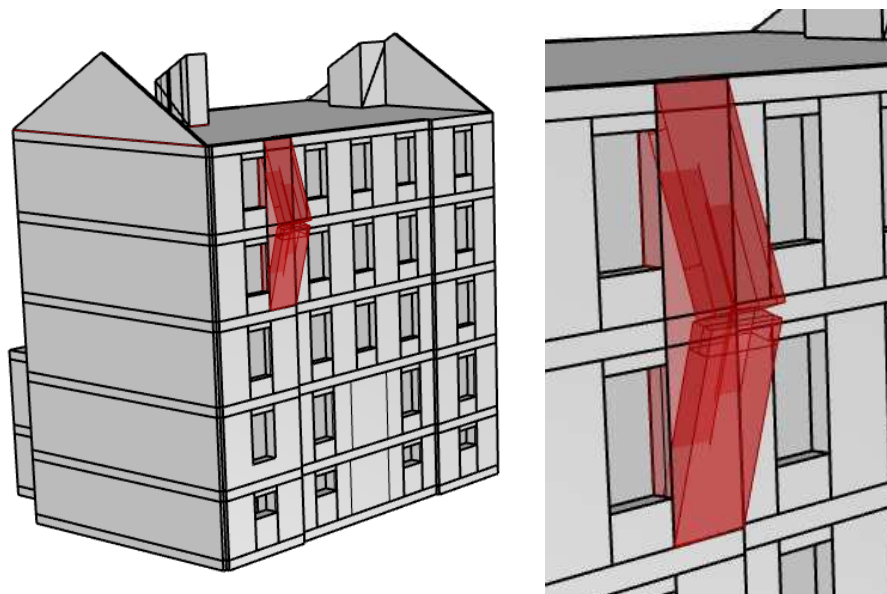
$$\frac{S_e(T_1) \psi(z) \Gamma_1}{q} = \frac{7,3 \cdot 0,497 \cdot 1,38}{2} = 2,5 m/s^2$$



Slika 31: Mehanizam 8

Tablica 11: Proračun mehanizma 9

Ulazne vrijednosti:		
Debljina bloka	$b = 45 \text{ cm}$	
Težina bloka	$G1 = 69,81 \text{ kN}$ $G2 = 69,81 \text{ kN}$	
Opterećenje od stropa	$P_s = 26,65 \text{ kN}$	
Opterećenje od stropa zadnje etaže	$P_{sk} = 21,45 \text{ kN}$	
Opterećenje od krova	$P_k = 34,43 \text{ kN}$	
Virtualni pomak	$\delta x_{G1} = 2,05$ $\delta x_{P_s} = 4,1$ $\delta x_{G2} = 2,05$	$\delta y_{P_k} = 0,675$ $\delta y_{G1} = 0,63$ $\delta y_{G2} = 0,27$ $\delta y_{P_{sk}} = 0,55$ $\delta y_{P_s} = 0,35$
Visinska kota zida	$z = 12,12$	
Utjecajni koeficijent titranja	$\Psi(z) = 0,5$	
Proračun mehanizma:		
Koeficijent aktivacije	$\alpha = 0,271$	
Modalna masa	$M^* = 15,41 \text{ t}$	
Faktor modalne mase	$e^* = 0,68$	
Spektralno ubrzanje	$a_0^* = 2,89 \text{ m/s}^2$	
Zahtijevano spektralno ubrzanje	$a_{0,\min}^* = \max(1,47 \text{ m/s}^2; 2,52 \text{ m/s}^2)$	
Uvjet $a_0^* \geq a_{0,\min}^*$	$2,89 > 2,52 \rightarrow \text{zadovoljava}$	



Slika 32: Mehanizam 9

6 ZAKLJUČAK

Otkazivanje zidova uslijed potresnog opterećenja može biti u ravnini ili izvan ravnine. Otkazivanje izvan ravnine će inducirati horizontalne sile koje djeluju u smjeru okomitom na ravninu zida. O tome koliko će građevina u potresu biti podložna formiranju lokalnih mehanizama izvan ravnine ovisi o tome koliko su dobre veze između zidova odnosno jesu li omeđeni serklažima. Serklaži doprinose povezivanju građevine u oba smjera te povezuju zidove s ostatkom konstrukcije što generalno doprinosi kompaktnosti.

U ovom je radu dan pregled osnovnih teorema potrebnih za proračun mehanizama odnosno osnovni teorem kinematike krutih tijela, Kennedyjev teorem i teorem virtualnog rada. Objasnjeni su i najčešći tipovi lokalnih mehanizama za otkazivanje zidova izvan ravnine kod tradicionalnih zidanih zgrada te postupak linearnog proračuna kojim se izračunava faktor aktivacije mehanizma.

Napravljeni su proračuni devet različitih mehanizama na otkazivanje izvan ravnine od kojih se prvih sedam sastoji od jednog tijela, a preostala dva se sastoje od dva tijela zgloбно povezana koja čine kinematički lanac. Kod mehanizama 1-7 od jednog tijela su najkritičnija prva dva sa najmanjim koeficijentom aktivacije iznosa 0,056 te 0,052. To su mehanizmi južne i sjeverne lastavice koji su najmanje povezani sa ostatkom zgrade. Budući da se radi o slobodno stojećim elementima, na njih ne djeluje dodatno vertikalno opterećenje. Često su u potresu upravo lastavice zabatnih zidova bile oni dijelovi zgrade koji su otkazivali jer su uglavnom rađeni bez stabilizacije kojom bi se spriječilo prevrtanje. Mehanizmi 3 i 4 odnosno južni i sjeverni svjetlarnik imaju nešto veće koeficijente aktivacije iznosa 0,346 i 0,278. Na građevini koja je odabrana za proračun je južni svjetlarnik (mehanizam 3) znatno oštećen u razini potkrovlja, odnosno potpuno je urušen. Bitno je naglasiti da su inače svi konzolni elementi, a prvenstveno dimnjaci, vrlo podložni prevrtanju pri djelovanju potresa. Pretpostavka za mehanizme 8 i 9 je da su sastavljeni od dva tijela koja tvore kinematički lanac. U usporedbi sa mehanizmima s jednim tijelom, mehanizmi sastavljeni od dva tijela su povoljniji jer će imati veći koeficijent aktivacije. Kod ovih mehanizma je nužno da gore postoji vezna greda, odnosno nekakva druga veza koja će omogućiti formiranje oslonca na gornjem rubu.

Prema kriteriju SLV odnosno graničnom stanju zaštite života (tal. stato limite di salvaguardia della vita, SLV) prema talijanskom NTC2008, koje se može povezati sa stanjem znatnog oštećenja prema Eurocode 8, izračunato je da samo mehanizmi 8 i 9 zadovoljavaju uvjet sigurnosti s obzirom na zadano potresno djelovanje. Iako je provedeni linearni proračun prilično konzervativan jer pretpostavlja da su bočne veze neučinkovite, rezultati upućuju da

je njihova aktivacija moguća već kod relativno niskih razina ubrzanja tla. S obzirom na to da je zgrada već pretrpjela potres treba uzeti u obzir da su mnoge veze oslabile te je time aktivacija mehanizma u nekom budućem snažnom potresu vjerojatnija. Otpornost zgrade je i prije potresa vjerojatno bila mala te bi bilo potrebno dosta ulaganja kako bi se podiglo otpornost zgrade na onu razinu koju današnji propisi zahtijevaju. Adekvatna sigurnost bila bi postignuta uz veće intervencije što bi možda i promijenilo izgled zgrade te njen značaj kao zaštićeno kulturno dobro oko čega se također mora voditi računa.

7 LITERATURA

- [1] Šavor Novak, M., Uroš, M., Atalić, J., Herak, M., Demšić, M., Baniček, M., Lazarević, D., Bijelić, N., Crnogorac, M., Todorić, M.: Potres u Zagrebu od 22. ožujka 2020. - preliminarni izvještaj o seizmološkim istraživanjima i oštećenjima zgrada, GRAĐEVINAR, 72 (2020) 10, pp. 843-867, <https://doi.org/10.14256/JCE.2966.2020>
- [2] Demšić, M. i Uroš, M. : Bilješke s predavanja Mehanike 2, nastavni materijali objavljeni na platformi Merlin, (pristupljeno 5.8.2023.)
- [3] What is Degree of Freedom (DOF) in Mechanics, <https://www.smlease.com/entries/mechanism/what-is-degree-of-freedom-dof-in-mechanics/> (pristupljeno 19.9.2023.)
- [4] What is an example of where both translatory and rotational motion occur?, <https://www.quora.com/What-is-an-example-of-where-both-translatory-and-rotational-motion-occur> (pristupljeno 20.9.2023.)
- [5] Fresl, K.: Bilješke predavanja Mehanike 1 i Građevne statike 1, nastavni materijali objavljeni na internet stranici <http://master.grad.hr/nastava/gs/meh1/ssr.pdf> (pristupljeno 19.8.2023.) <http://www.grad.hr/nastava/gs/bilj1/vp.pdf> (pristupljeno 19.8.2023.)
- [6] Karte potresnih područja Republike Hrvatske, <http://seizkarta.gfz.hr/karta.php> (pristupljeno 19.9.2023.)
- [7] Potresno inženjerstvo – Obnova zidanih zgrada, Uroš M., Todorić M., Crnogorac M., Atalić J., Šavor Novak M., Lakušić S. (ur.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2021.
- [8] Kruto tijelo. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013 – 2024. <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=70273> (pristupljeno 11.8.2023.)
- [9] Plan brzina. Tehnički leksikon (2007), (mrežno izdanje). Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2024. <https://tl.lzmk.hr/Clanak/5063> (pristupljeno 13.8.2023.)
- [10] D'Ayala, D., Speranza, E.: Definition of Collapse Mechanisms and Seismic Vulnerability of Historic Masonry Buildings, *Earthquake Spectra*, 19 (2003) 3, pp. 479-509, <https://doi.org/10.1193/1.1599896>
- [11] HRN EN 1998-1:2011. Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC:2009) HRN EN 1998-1, <https://repositorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+1998-1%3A2011>

8 POPIS SLIKA

Slika 1: Sustav materijalnih točaka (u sredini) povezan u cjelinu tako da tvori kruto tijelo (desna slika), prilagođeno prema [2].....	7
Slika 2: Stupnjevi slobode gibanja tijela u prostoru, prilagođeno prema [3].	8
Slika 3: Translacija i rotacija tijela na primjeru kotrljanja lopte, preuzeto sa [4].	9
Slika 4: Vektori položaja krutog tijela, prilagođeno prema [2].....	9
Slika 5: Projekcije vektora brzina na os određenu spojnicom su jednake [2].....	11
Slika 6: Uobičajene veze, redom: nepomični zglob, pomični zglob, klizni spoj i upeti spoj [5]	12
Slika 7: Prosta greda – najjednostavniji primjer statički određenog sustava	12
Slika 8: Primjer mehanizma stabilnog samo za vertikalna opterećenja [5]	13
Slika 9: Mehanizam [2]	14
Slika 10: Trenutni mehanizmi sa tri zgloba na pravcu: A i C su apsolutni polovi, a B je relativni pol brzina [2].....	14
Slika 11: Gerberov nosač i formiranje mehanizma (plana pomaka) za određivanje reakcije A.	16
Slika 12: Gerberov nosač	17
Slika 13: Klasični tipovi formiranja lokalnih mehanizma kod zidanih zgrada [10]	18
Slika 14: Mehanizam s jednim tijelom	20
Slika 15: Mehanizam s dva tijela	20
Slika 16: Vanjsko (ulično) pročelje zgrade	24
Slika 17: Skripta u programu Grasshopper za izračun parametara odabranog mehanizma	25
Slika 18: Prikaz volumnog modela zgrade izrađenog u programu Rhinoceros (pogled na ulično pročelje).	25
Slika 19: Prikaz volumnog modela zgrade izrađenog u programu Rhinoceros (pogled na dvorišno pročelje).....	26
Slika 20: Prikaz vrijednosti ubrzanja tla iz Karte potresnih područja Hrvatske [6].....	28
Slika 21: Elastični spektar odziva za vršno ubrzanje tla $a_g = 0.26$ g i kategoriju tla C.....	29
Slika 22: Mehanizam 1 - lastavica jug	32
Slika 23: Mehanizam 2 - lastavica sjever.....	33
Slika 24: Mehanizam 3 – južni svjetlarnik	34
Slika 25: Južni svjetlarnik stradao u potresu 2020.....	35
Slika 26: Mehanizam 4 - sjeverni svjetlarnik	36
Slika 27: Sjeverni svjetlarnik sa vidljivim pukotinama nakon potresa 2020.....	37

Slika 28: Mehanizam 5	38
Slika 29: Mehanizam 6	39
Slika 30: Mehanizam 7	40
Slika 31: Mehanizam 8	42
Slika 32: Mehanizam 9	43

9 POPIS TABLICA

Tablica 1: Vrijednosti perioda TB, TC i TD te faktora tla S u ovisnosti o tipu tla [11].....	28
Tablica 2: Rekapitulacija svih navedenih početnih parametara zgrade.....	30
Tablica 3: Proračun južne lastavice	31
Tablica 4: Proračun sjeverne lastavice	33
Tablica 5: Proračun južnog svjetlarnika	34
Tablica 6: Proračun sjevernog svjetlarnika	36
Tablica 7: Proračun mehanizma 5	38
Tablica 8: Proračun mehanizma 6	39
Tablica 9: Proračun mehanizma 7	40
Tablica 10: Proračun mehanizma 8	41
Tablica 11: Proračun mehanizma 9	43