

# Proračun otkazivanja zidova izvan ravnine uslijed formiranja lokalnih mehanizama

---

**Kolovrat, Magdalena**

**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:237:090583>

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

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

*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Magdalena Kolovrat

**PRORAČUN OTKAZIVANJA ZIDOVA IZVAN  
RAVNINE USLIJED FORMIRANJA LOKALNIH  
MEHANIZAMA**

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Magdalena Kolovrat

**PRORAČUN OTKAZIVANJA ZIDOVA IZVAN  
RAVNINE USLIJED FORMIRANJA LOKALNIH  
MEHANIZAMA**

ZAVRŠNI ISPIT

Mentorica izv. prof. dr. sc. Marija Demšić

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Magdalena Kolovrat

**ANALYSIS OF OUT-OF-PLANE WALL  
FAILURES DUE TO FORMATION OF LOCAL  
MECHANISMS**

FINAL EXAM

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

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Student/ica :

Magdalena Kolovrat (Ime i prezime)	0082066351 (JMBAG)
---------------------------------------	-----------------------

zadovoljio/la je na pisanom dijelu završnog ispita pod naslovom:

Proračun otkazivanja zidova izvan ravnine uslijed formiranja lokalnih mehanizama  
(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

Analysis of out-of-plane wall failures due to formation of local mechanisms  
(Naslov teme završnog ispita na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

Projekt istraživanja na području potresnog inženjerstva (Aktivnost: Razvoj proračunskih metoda i računalnih programa za analizu lokalnih mehanizama kod zidanih zgrada), A679117 - HPC, izv. prof. Josip Atalić  
(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum: 16.9.2024.

Mentor: izv. prof. dr. sc. Marija Demšić

Potpis mentora: *Marija Demšić*

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio završnog ispita pod naslovom:

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

Potpis:



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Ja :

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela završnog ispita i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela završnog ispita pod naslovom:

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom prijediplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio završnog ispita bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

Potpis:

## SAŽETAK

Završni rad bavi se temom otkazivanja zidova izvan ravnine uslijed formiranja lokalnih mehanizma. Ovaj tip otkazivanja često je kritičan kod tradicijskih zidanih zgrada od neomeđenog zida uslijed djelovanja potresnog opterećenja. Završni rad sadrži teorijski pregled kinematike krutog tijela i teorema virtualnog rada, kao i teorijski pregled inkrementalne kvazistatičke analize krutog bloka uz geometrijsku nelinearnost. Prikazani su tipični mehanizmi otkazivanja izvan ravnine kod zidanih zgrada. Za svrhu proračuna, u praktičnom dijelu rada, izrađen je model stvarne zgrade u programu Rhinoceros 3D. Na primjeru odabranih tipičnih lokalnih mehanizama, za postojeću zidanu zgradu, prikazani su proračuni linearnom i nelinearnom metodom, drobljenje na rubu zida, a proračunat je i faktor aktivacije mehanizama. Za svaki od odabranih mehanizama ispitan je uvjet sigurnosti s obzirom na mjerodavno potresno opterećenje obzirom na lokaciju zgrade.

**Ključne riječi:** zidana zgrada; otkazivanje zidova; potresno opterećenje; lokalni mehanizmi; faktor aktivacije; uvjet sigurnosti



## SUMMARY

The bachelor thesis addresses the topic of out-of plane wall failure due to the formation of local mechanisms. This form of failure is particularly unfavourable in traditional unreinforced masonry buildings under seismic loading. This bachelor thesis includes theoretical review of rigid body kinematics and of a rigid block with geometric nonlinearity. Typical out-of plane failure mechanisms in masonry buildings are shown. For calculation purposes, in the practical part of the thesis, a model of an actual building was created in Rhinoceros 3D software. By using selected typical local mechanisms as examples for an existing masonry building, linear and nonlinear calculations were shown, including edge crush of masonry and the calculation for the activation factor for the mechanisms are presented. For each of selected mechanisms, the safety condition was examined considering the relevant seismic load in account with the location of the building.

**Key words:** masonry building; wall failure; seismic loading; local mechanism; activation factor; safety condition.

# SADRŽAJ

SAŽETAK	i
SUMMARY	ii
SADRŽAJ	1
1. UVOD	3
2. KINEMATIKA KRUTOG TIJELA	4
2.1 OBLICI GIBANJA KRUTOG TIJELA U RAVNINI.....	5
2.2 OSNOVNI TEOREM KINEMATIKE KRUTOG TIJELA .....	7
2.3 KINEMATIČKA OGRANIČENJA .....	8
3. KINEMATIKA SUSTAVA KRUTIH TIJELA	10
3.1 MEHANIZMI .....	10
3.2 KENNEDYJEV TEOREM .....	11
3.3 TEOREM VIRTUALNOG RADA .....	13
4. MEHANIZMI OTKAZIVANJA ZIDOVA IZVAN RAVNINE	18
4.1 LINEARNA KINEMATIČKA ANALIZA.....	21
4.2 NELINEARNA KINEMATIČKA ANALIZA .....	23
4.3 POLOŽAJ LINIJSKOG ZGLOBA .....	26
4.4 UTJECAJ SILE TRENJA .....	27
5. PRORAČUN OTKAZIVANJA ZIDOVA IZVAN RAVNINE ZA ODABRANU ZIDANU ZGRADU	29
5.1 OPIS ZGRADE.....	29
5.2 ANALIZA OPTEREĆENJA.....	31
5.2.1 Proračun vertikalnog opterećenja	31
5.2.2 Opterećenje potresom	32
5.3 PRORAČUN MEHANIZAMA.....	35
5.3.1 Mehanizam 1 – Lastavica zabata	36
5.3.2 Mehanizam 2 – Lastavica zabata i 3. etaža	40
5.3.3 Mehanizam 3 – Cijela fasada (3. etaža)	44
5.3.4 Mehanizam 4 – Otkazivanje parapeta 3. etaže	51
5.3.5 Mehanizam 5 – Cijela fasada (2. i 3. etaža)	53
6. ZAKLJUČAK	57
7. LITERATURA	58

8.	POPIS SLIKA	60
9.	POPIS TABLICA	62

## 1. UVOD

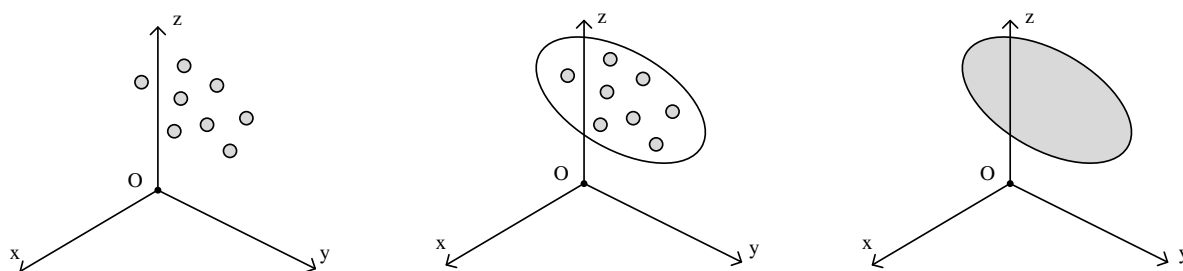
Otkazivanje zidova izvan ravnine, koje nastupa uslijed formiranja lokalnih mehanizama, je tip otkazivanja kojem su posebno podložni zidovi zidanih zgrada od neomeđenog ziđa te razni konzolni elementi ( npr. dimnjaci, parapetni nadozidi, spomenici i sl.). Iako je mnogo uzroka koji dovode do formiranja lokalnih mehanizama kod zidanih zgrada, važno je naglasiti da su bitni čimbenici neravnomjerna raspodjela krutosti, loša povezanost između zidova i drugih konstrukcijskih elemenata, kao što su međukatne ploče i krovne konstrukcije. Kao dodatni razlozi nastajanja spomenute pojave navode se nedostatci serklaža (vertikalnih i horizontalnih) i slaba nosivost u vlastitoj ravnini. Dodatnoj ranjivosti starih zidanih zgrada pridonosi i činjenica da zbog dugovječne upotrebe zgrada, nedostatka fasade i lošeg održavanja dolazi do propadanja materijala, što posljedično dovodi povećanja nehomogenosti ziđa. Pojava otkazivanja zidova izvan ravnine može značajno ugroziti stabilnost konstrukcije i sveukupnu vertikalnu nosivost.

Dijelovi građevine koji najčešće podliježu ovoj pojavi su fasadni i zabatni zidovi koji nisu adekvatno povezani sa poprečnim zidovima i stropovima. Također, značajno su izloženi i zidni elementi u višim etažama, zbog toga što su tijekom potresa izloženi većim amplitudama pomaka te i većim ubrzanjima. Nadalje, problemi se javljaju i kod pregradnih zidova ( zbog neadekvatnih spojeva), fasadne obloge, krovnog vijenca itd.

Mnogi primjeri različitih lokalnih mehanizama otkazivanja zidova izvan ravnine kod zidanih zgrada su nažalost bili vidljivi na brojnim zgradama u Zagrebu i Petrinji uslijed razornih potresa u 2020. godini. Ključni razlozi njihovog urušavanja bili su neusidreni krovovi, nepovezani bočni zidovi, loši materijali te loše održavanje. Aktualnost ove teme na području Republike Hrvatske potakla je izradu brojnih istraživačkih radova, priručnika, ali i numeričkih primjera na tipologiji zgrada koja je karakteristična za centar Zagreba, a toj skupini pripada i ovaj rad. U nastavku ovog rada prikazani su proračuni provedeni su na primjeru zidane zgrade s područja Donjeg grada u Zagrebu. Na modelu zgrade su prikazani proračuni lokalnih mehanizama linearnom i nelinearnom metodom te je ispitan uvjet sigurnosti s obzirom na mjerodavno potresno opterećenje za danu lokaciju zgrade.

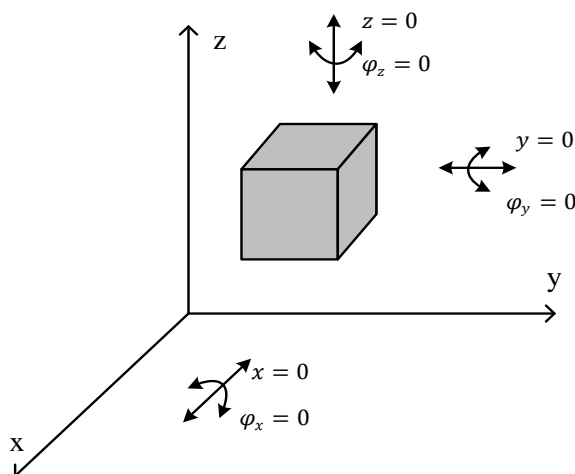
## 2. KINEMATIKA KRUTOG TIJELA

Sustavom materijalnih točaka smatra se konačan skup materijalnih točaka koje su u međusobnoj interakciji. Radi se o prirodnom sustavu više masa koji se može idealizirati pomoću materijalnih točaka kako bi se analiziralo njihovo gibanje. Sustavom materijalnih točaka može se opisati deformabilno ili kruto tijelo, to jest njegovi dijelovi, ali i rastresiti materijal ili tekućine. Odnosno, sustav čija se masa ne mijenja u određenom volumenu prostora [1].



Slika 1: Sustav materijalnih točaka koji povezan u cjelinu tvori kruto tijelo

Kruto tijelo je pojam koji možemo opisati kao skup materijalnih točaka, čija relativna udaljenost, prilikom gibanja, ostaje nepromijenjena. To znači da, prilikom gibanja krutog tijela ne dolazi do deformacija tijela, tj. tijelo ne mijenja oblik ni obujam. Kako bi se mogao opisati položaj krutog tijela u prostoru, potrebno je poznavati položaj tri nekolinearne točke. Kruto tijelo koje se slobodno kreće u prostoru ima 6 stupnjeva slobode, a u ravnini 3 [1].

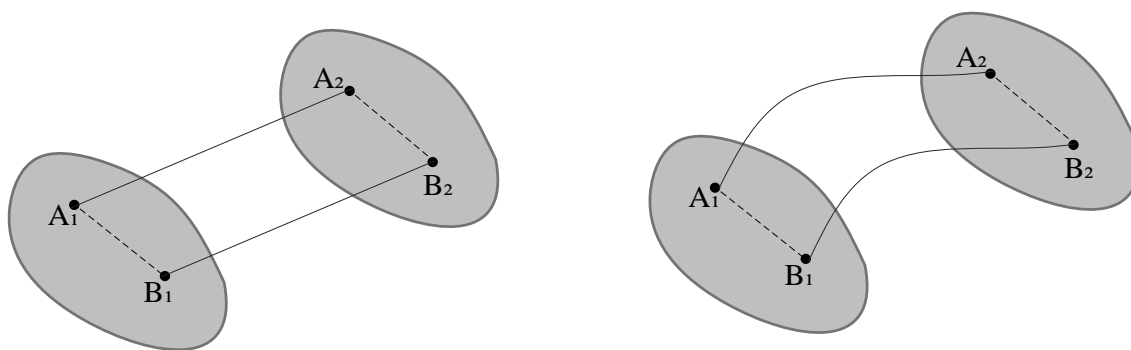


Slika 2: Stupnjevi slobode krutog tijela u prostoru

## 2.1 OBLICI GIBANJA KRUTOG TIJELA U RAVNINI

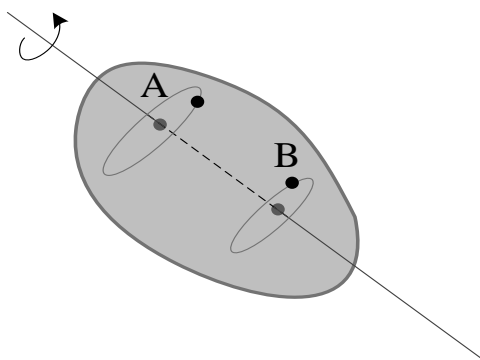
Ako se kruto tijelo giba u jednoj ravnini tada takav način gibanja nazivamo ravninsko gibanje krutog tijela. Vrste gibanja krutog tijela u ravnini su: translacija, rotacija i opće ravninsko gibanje.

Za kruto tijelo kažemo da se giba translacijski ako sve točke tog tijela imaju jednake pomake ( po smjeru i iznosu). Kod translacijskog gibanja sve točke tijela gibaju se po paralelnim putanjama. Razlikuje se pravocrtna i krivolinijska translacija. Kod pravocrtne translacije, putanje po kojima se gibaju materijalne točke krutog tijela su ravne linije (odnosno pravci), dok su kod krivolinijske translacije te putanje, zakrivljene linije [1].



Slika 3: Pravocrtna i krivolinijska translacija [1]

Ako se točke krutog tijela gibaju po kružnicama u paralelnim ravninama govorimo o rotacijskom gibanju oko nepomične osi. Os rotacije predstavlja točka koja se nalazi na nepomičnoj osi, osi rotacije. U slučaju kada os rotacije prolazi kroz kruto tijelo tada sve točke koje se nalaze na osi nemaju brzinu ni ubrzanje, odnosno ostaju u stanju mirovanja [1].



Slika 4: Rotacijsko gibanje krutog tijela [1]

Na posljeticu, oblik gibanja kod kojeg se gibanje točka tijela odvija u paralelnim ravninama, naziva se opće rotacijsko gibanje. Ako se za gibanje ne može jasno odrediti radi li se o čistoj translaciji ili čistoj rotaciji, tada kažemo da se radi o općem ravninskom gibanju.

Jedan od primjera općeg gibanja tijela u ravnini je kotrljanje kružnog diska, gdje dolazi do translacije točke centra tijela i rotacije oko točke centra tijela.

Opće gibanje tijela u ravnini može se objasniti i pomoću koncepta relativnog gibanja. Koncept funkcionira na način da se jedna točka odabere kao ishodište pomičnog koordinatnog sustava, dok relativno gibanje ostalih točaka tijela predstavlja rotaciju oko odabranog pomičnog ishodišta.

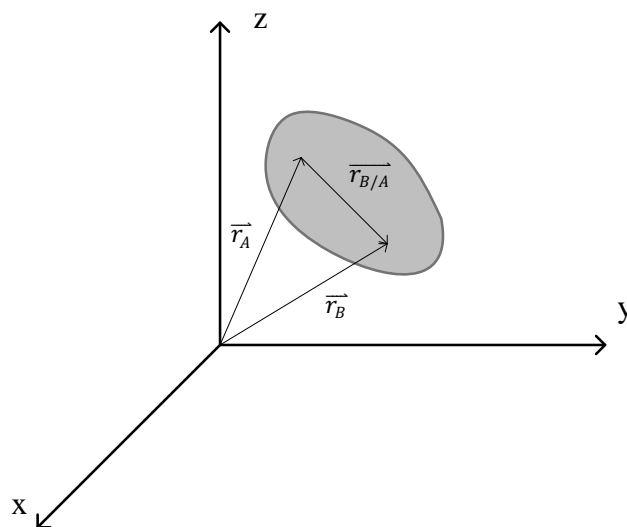
Promatramo dvije proizvoljno odabrane točke tijela A i B. Položaj točke B može se odrediti iz sljedećeg vektorskog izraza:

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

$\vec{r}_A$  – vektor položaja točke A

$\vec{r}_B$  – vektor položaja točke B

$\vec{r}_{B/A}$  – vektor relativnog položaja točke B u odnosu na točku A



Slika 5: Vektori položaja točaka A i B [1]

Primjenom tog istog koncepta (koncepta relativnog gibanja) može se odrediti apsolutna brzina i apsolutno ubrzanje točke B:

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{B/A} \quad (2)$$

$\vec{v}_A$  – vektor apsolutne brzine točke A (brzina translacije pomičnog ishodišta)

$\vec{v}_B$  – vektor apsolutne brzine točke B

$\vec{v}_{B/A}$  – vektor relativne brzine točke B u odnosu na točku A

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_{B/A} \quad (3)$$

$\vec{a}_A$  – vektor apsolutnog ubrzanja točke A (ubrzanje translacije pomičnog ishodišta)

$\vec{a}_B$  – vektor apsolutnog ubrzanja točke B

$\vec{a}_{B/A}$  – vektor relativnog ubrzanja točke B u odnosu na točku A

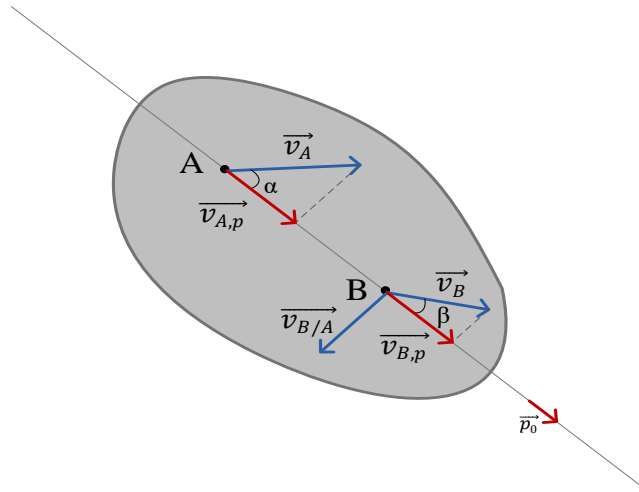
Promatrajući opći položaj tijela može se odrediti točka C u odnosu na koju vektori brzina svih ostalih točaka rotiraju. Takva točka se naziva trenutni centar rotacije, to jest pol brzina tijela. U točki trenutnog centra rotacije brzina je jednaka nuli.

Kao što postoji pol brzina nekog tijela, tako se može odrediti i pol ubrzanja za svako tijelo. Pol ubrzanja je točka u kojoj akceleracija tijela iščezava. Važno je spomenuti da pol ubrzanja i pol brzina općenito nisu u istoj točki.

## 2.2 OSNOVNI TEOREM KINEMATIKE KRUTOG TIJELA

Za bilo koje dvije, po volji odabrane točke A i B, koje se nalaze na istom krutom tijelu vrijedi da su projekcije vektora njihovih brzina na os određenu spojnicom međusobno jednake. Navedenu tvrdnju dokazuje osnovni teorem kinematike krutog tijela. Uz pomoć ovog teorema i pola brzina krutog tijela određuje se plan brzina tijela. Plan brzina tijela koje se giba u ravnini se sastoji od dvije okomite projekcije uz pomoć kojih je moguće potpuno odrediti vektor brzine bilo koje točke na tijelu.





Slika 6: Projektije brzina točkaka A i B na njihovu spojnicu [1]

Vektor brzine točke B apsolutno krutog tijela određuje se pomoću izraza:

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

Dok jedinični vektor pravca na kojem se nalaze obje točke (A i B) dobivamo iz izraza:

$$\vec{p}_0 = \frac{\vec{r}_{B/A}}{|\vec{r}_{B/A}|} \quad (5)$$

Projekciju brzina točkaka A i B na pravac p određuje se preko skalarnog produkta slijedećim izrazom:

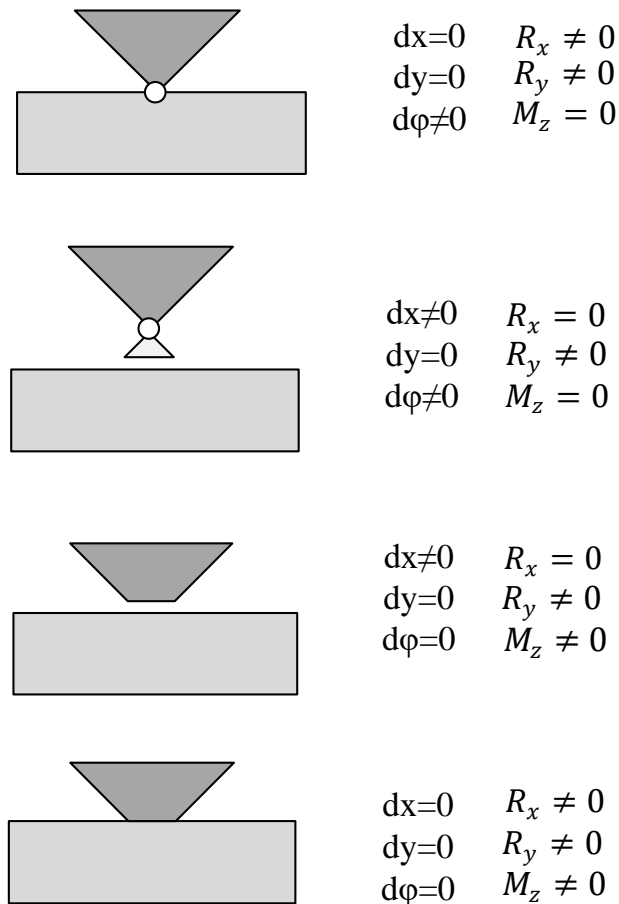
$$\begin{aligned} \vec{v}_B \cdot \vec{p}_0 &= \vec{v}_A \cdot \vec{p}_0 + \vec{v}_{B/A} \cdot \vec{p}_0 \\ \vec{v}_B \cdot \cos \beta &= \vec{v}_A \cdot \cos \alpha \\ v_{B,p} &= v_{A,p} \end{aligned} \quad (6)$$

Iz izraza je vidljivo da su projekcije brzina navedenih točkaka na njihovu spojnicu međusobno jednake.

## 2.3 KINEMATIČKA OGRANIČENJA

Kako bi se definirali stupnjevi slobode gibanja potrebno je prvo odrediti koja su kinematička ograničenja koje tijelo ostvaruje sa podlogom odnosno na spojevima s drugim tijelima. Takva ograničenja sprječavaju relativne ili apsolutne zaokrete oko osi i relativne ili apsolutne pomake po pravcu. Kinematička ograničenja mogu se ostvariti na način da se kruto tijelo spoji s podlogom ili s nekim drugim krutim tijelom. Kinematičko ograničenje gibanja pojedine

točke tijela, na mjestu spoja, ovisi o karakteristikama samog spoja. Primjeri kinematičkog ograničenja su: nepomični zglob, pomični zglob, klizni spoj i upeti/kruti spoj [1].



Slika 7: Kinematička ograničenja za tijelo u ravnini: nepomični zglob, pomični zglob, klizni spoj i upeti/klizni spoj (shematsko označavanje, pomaci i sile koje prenose, prilagođeno prema [1])

Ako promatramo tijelo čije je gibanje ograničeno na ravninu, nepomični zglob sprječava translacijske pomake u smjeru x i y osi, a dozvoljava rotaciju oko z osi (koja je okomita na ravninu gibanja). Pomični zglob dozvoljava translacijske pomake u smjeru x osi i rotaciju oko z osi, a sprječava translacijske pomake oko y osi. Pomični zglob se može definirati za bilo koji drugi pravac gibanja u ravnini. Klizni spoj dozvoljava translacijski pomak u smjeru x osi (ili nekog drugog pravca gibanja), a sprječava translacijski pomak u smjeru y osi (odnosno okomito na pravac gibanja) i rotaciju oko z osi. Upeti/kruti spoj sprječava translacijske pomake u smjeru x i y osi te rotaciju oko z osi.

### 3. KINEMATIKA SUSTAVA KRUTIH TIJELA

#### 3.1 MEHANIZMI

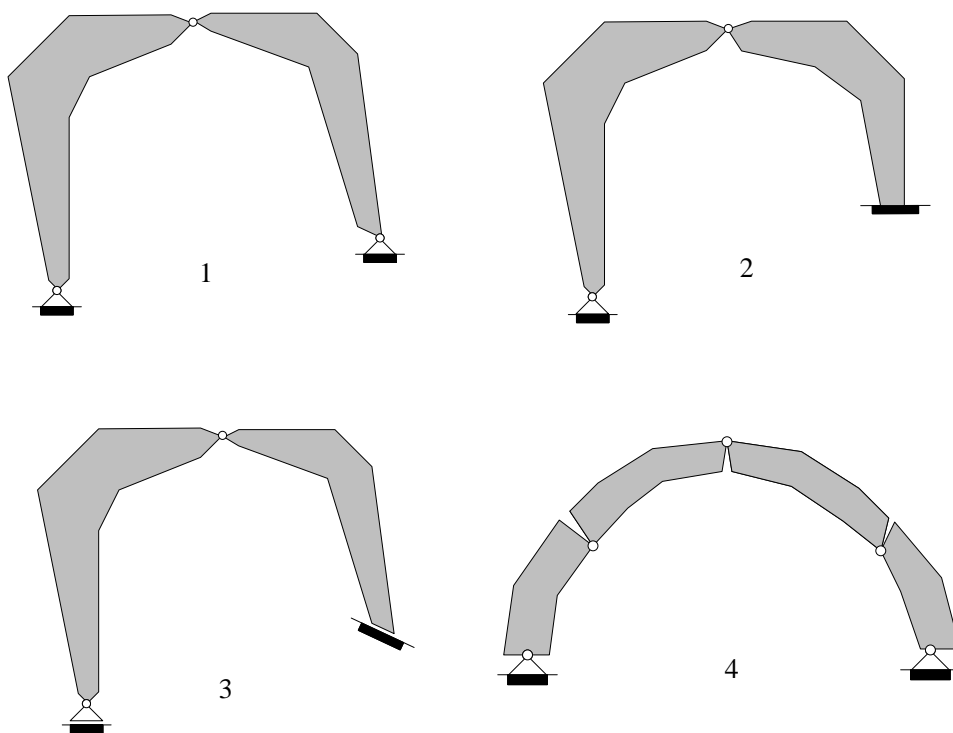
Mehanizmi predstavljaju geometrijski promjenjive sustave više tijela. Za mehanizme moguće je odrediti i stupnjeve slobode gibanja u ravnini i to prema izrazu:

$$S = 3T - U - L \quad (7)$$

$T$  – broj tijela

$U$  – unutarnje veze

$L$  – vanjske veze



Slika 8: Statički određen sustav (1), jedan put statički neodređen sustav (2), mehanizma s jednim stupnjem slobode (3) i mehanizam s dva stupnja slobode (4)

Veličina  $S$  iz prethodnog izraza ukazuje na to radi li se o mehanizmu, statički određenom ili statički neodređenom sustavu. U slučaju kada je  $S$  jednak nula radi se o statički određenom sustavu, kada je  $S$  manje od nula radi se o statički neodređenom sustavu, a kada je  $S$  veće od nula radi se o mehanizmu.

Statički određeni sustavi su oni sustavi koji će ostati u stanju ravnoteže pod proizvoljnim opterećenje, a sva djelovanja u njegovim spojevima mogu se odrediti iz uvjeta ravnoteže. Logičkim slijedom, statički neodređen sustav biti će onaj kod kojeg broj nepoznanica premašuje broj jednadžbi ravnoteže.

Dakle, u slučaju otkazivanje jedne veze kod statički određenog sustava (to se može dogoditi zbog klizanja ili propadanja temelja, stvaranja plastičnog zgloba, izvijanje nosivog elementa...) on se pretvara u mehanizam sa jednim stupnjem slobode.

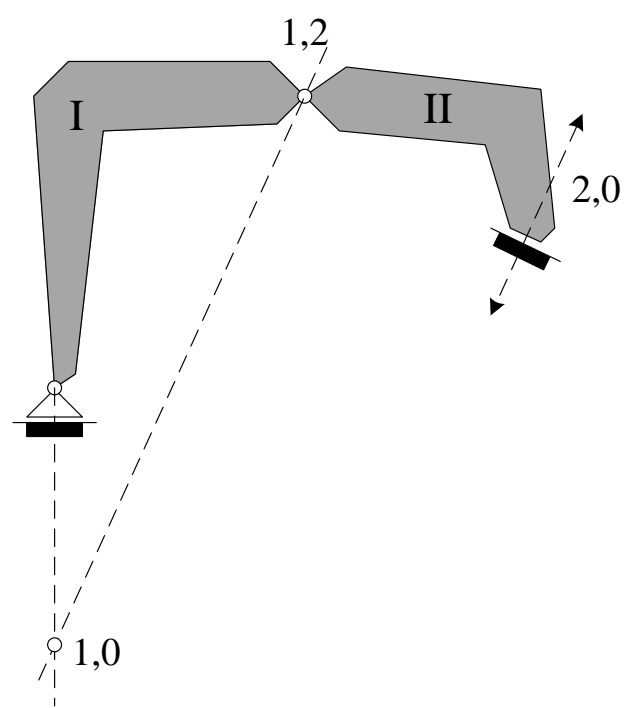
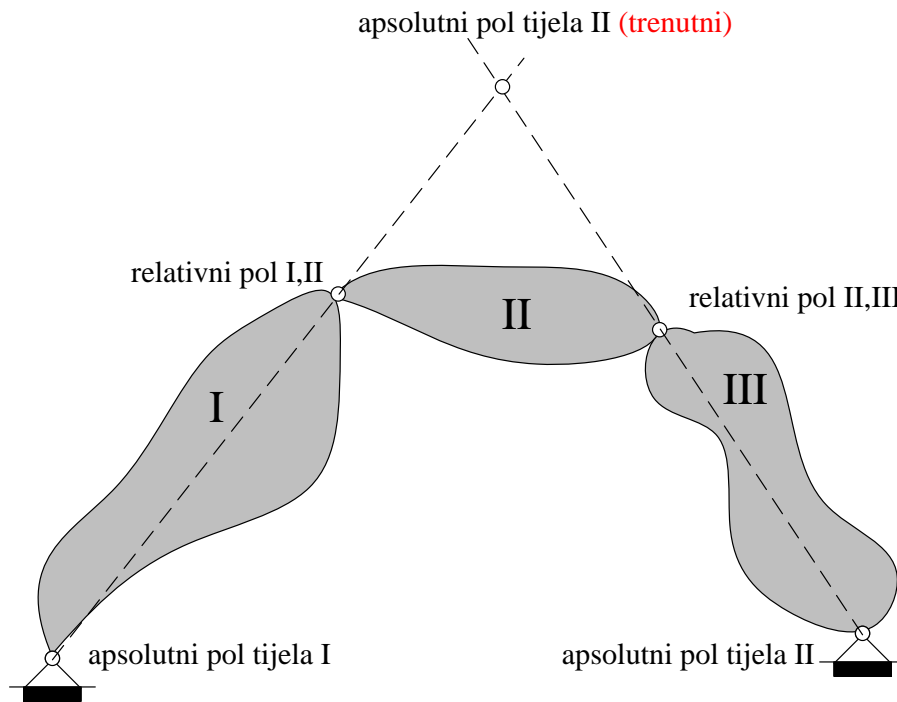
### 3.2 KENNEDYJEV TEOREM

Kennedyjev teorem (teorem triju polova) dokazuje da se tri relativna pola za tri nedeformabilna tijela, koja se gibaju u istoj ravnini, nalaze na istom pravcu.

Relativni pol predstavlja stvarnu ili imaginarnu točku u ravnini u kojoj oba tijela imaju jednake pomake. Relativni pol se ne mora nalaziti na tijelu. Relativna rotacija između dva tijela omogućena je u relativnom polu, a apsolutne brzine tijela jednaka je za oba tijela. [1]

U slučaju kada se kutne brzine tijela razlikuju, tada je relativni pol brzina u konačnosti, dok s druge strane kada su brzine dvaju tijela različite, pol je tada u beskonačnosti (npr. klizno upeti spoj) [1].

Ako promatramo situaciju s dva kruta tijela (tada podlogu promatramo kao treće nepomično tijelo), relativni pol oba tijela koji se gibaju u ravnini nalazit će se na spojnici njihovih apsolutnih polova. Apsolutni polovi tijela predstavljaju točke u kojima brzina iščezava (stalni ili trenutni).

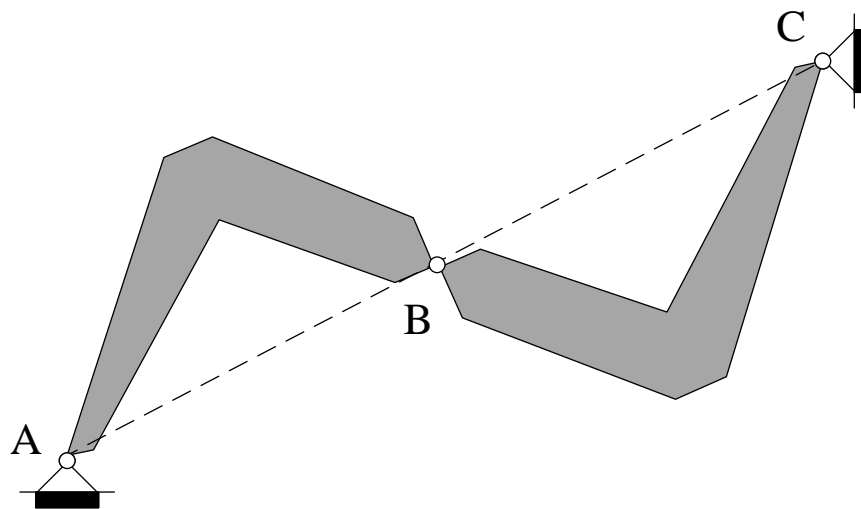


Slika 9: Primjer mehanizama [1]

Posebna vrsta mehanizma je trenutni mehanizma. Trenutni mehanizma karakterističan je po tome što je pomičan samo za infinitezimalne pomake. Najčešći način nastanka jest

situacija gdje dolazi do otvaranja zgloba ili ako se više njih nađe na pravcu nepomičnih ležajeva. To su mehanizmi koji sadrže predodređenost.

Pojam predodređenosti ukazuje na višak podataka koji određuju svojstvo sustava. Mehanizmi koji sadrže predodređenost su oni mehanizmi koji sadrže više veza nego što je najmanje potrebno kako bi se osigurala njihova pomičnost. U slučaju dodavanja jedne veze kako bi se spriječilo gibanje, taj sustav postaje statički neodređen, kao što je ranije objašnjeno, takav sustav se onda ne bi mogao riješiti iz jednadžbi ravnoteže [1].



Slika 10: Primjer trenutnog mehanizma (tri zgloba na pravcu) [1]

### 3.3 TEOREM VIRTUALNOG RADA

U mehanici krutih tijela virtualni pomaci definiraju se kao zamišljeni dovoljno mali pomaci nekog tijela. Virtualni pomaci se nazivaju i varijacijom pomaka. Prema tome, virtualni rad definira se kao rad stvarnih sila na virtualnim pomacima [8].

Ako su tijela u sustavu krutih tijela, na koja djeluju sile i momenti, u ravnoteži, onda je zbroj radova tih sila i momenata na bilo kojim virtualnim pomacima i zaokretima tijela jednak nuli.

$$\sum \vec{F}_i = \vec{0} \text{ i } \sum \vec{M}_j = \vec{0} \rightarrow \delta W = 0 \quad (8)$$

Isto tako, ako je zbroj svih sila i momenata na bilo kojim virtualnim pomacima i zaokretima krutog tijela sustava krutih tijela na koja djeluju jednak nuli, onda su tijela u ravnoteži.

$$\delta W = 0 \rightarrow \sum \vec{F}_i = \vec{0} \text{ i } \sum \vec{M}_j = \vec{0} \quad (9)$$

Ako se hvatište sile  $\vec{F}$  pomakne za infitezimalni pomak  $d\vec{r}$  tada će rad sile iznositi:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{r} \quad (10)$$

Slijedeći isti princip, ako se infinitezimalno područje tijela zarotira za iznos  $d\varphi$ , a da nja njega pri tome djeluje koncentritani moment  $K$ , tada će rad momenta iznositi:

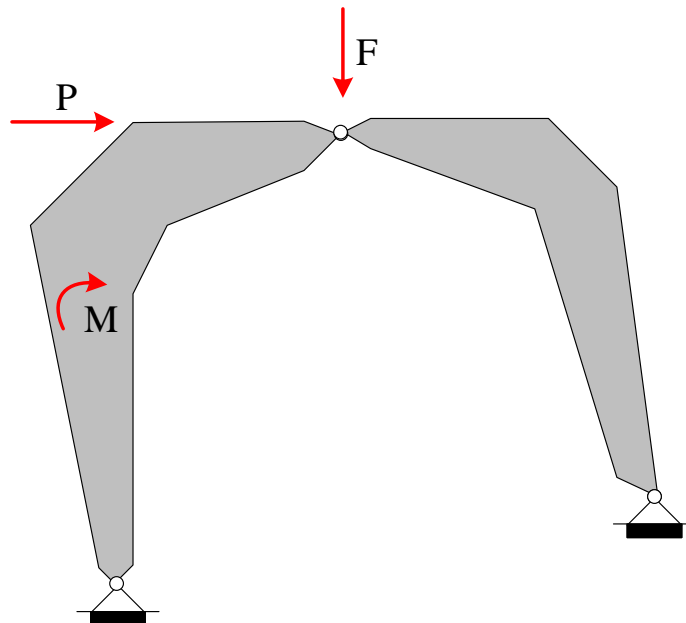
$$dW = \vec{K} \cdot d\varphi \quad (11)$$

Rad će biti pozitivan ako je vektor sile/momenta usmjeren u istom smjeru kao i infinitezimalni pomak/kut zaokreta.

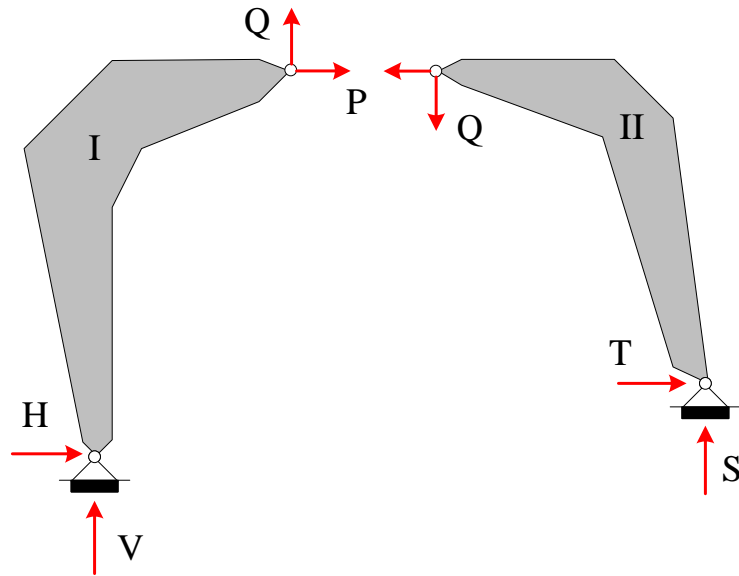
Kada se za odgovarajući mehanički sustav koji se nalazi u ravnoteži zamisli polje infinitezimalnih pomaka koji ne remete ravnotežu sustava, rad sila sustava će iščezavati na tim pomacima. Takvi pomaci se nazivaju virtualnim pomacima.

Za potrebe određivanja samo jedne veličina u nekom sustavu, može postojati mogućnost relativno jednostavnog formiranja odgovarajućeg polja virtualnih pomaka, stoga se tražena veličina određuje primjenom metode virtualnog rada.

Kao primjer na kojem će se prikazati provedba teorema virtualnog rada i određivanje projekcije plana pomaka može se uzeti statički određen sustav-trozglobni nosač.



Slika 11: Trozglobni nosač sa proizvoljno zadanim vanjskim opterećenjima

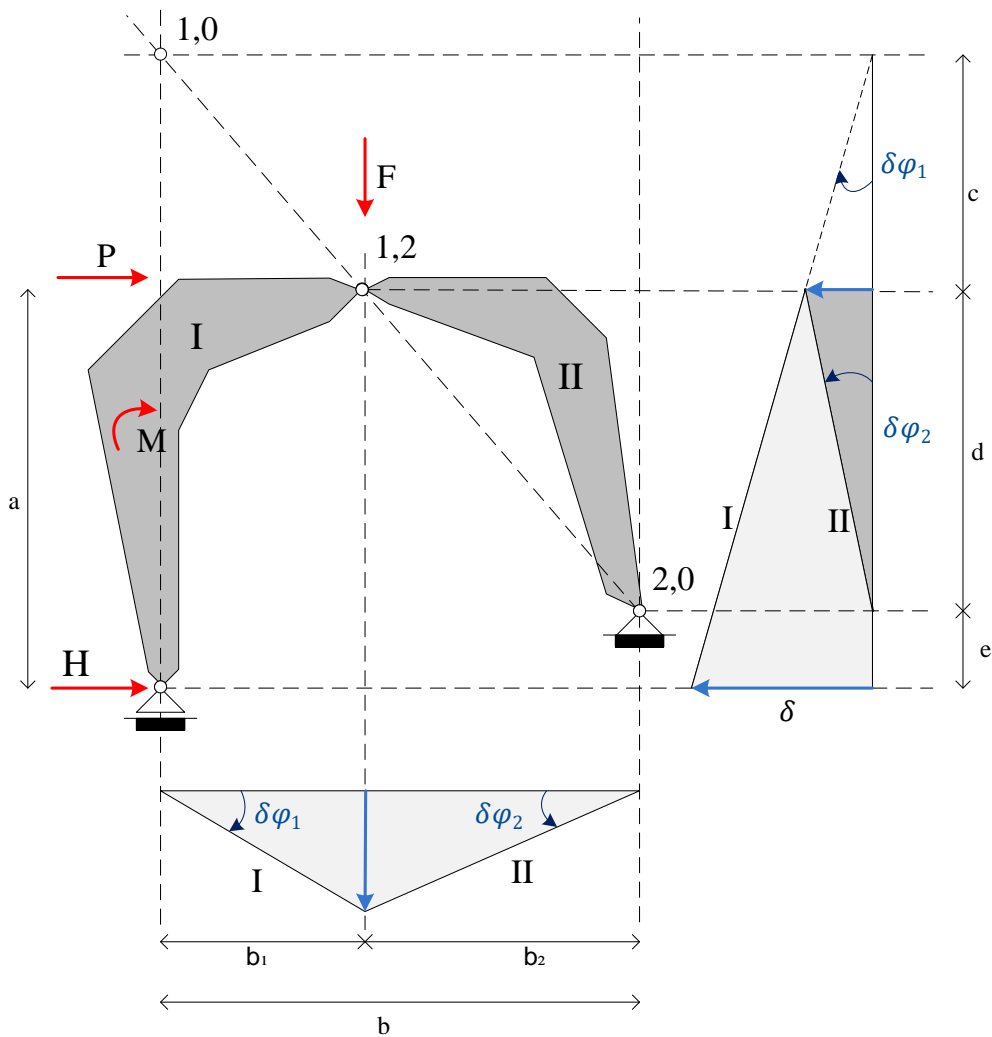


Slika 12: Unutarnje sile odabranog trozglobnog nosača [1]

Sile koje djeluju u spojevima na slici prikazanog trozglobnog nosača rastavljene su u  $x$  i  $y$  smjeru. U smjeru tih osi određivat će se plan pomaka. Za potrebe određivanja svake od nepoznanica potrebno je definirati različiti mehanizam s jednim stupnjem slobode.

Dalje će se promatrati plan pomaka za reakciju  $H$ . Stoga će se postojeći nepomični ležaj zamijeniti s horizontalno pomičnim kliznim ležajem. Dakle, pri određivanju mehanizma, kako bismo na koncu izračunali određenu reakciju, potrebno je osloboditi vezu u smjeru djelovanja te željene reakcije, kao što je prikazano na ovom primjeru.





Slika 13: Plan pomaka za reakciju H [1]

Trozglobni nosač se sastoji od dva tijela, tijela I i tijela II. Kao što je već rečeno, oslobođena je reakcija u smjeru djelovanja sile H. Za svako tijelo određen je njegov apsolutni pol (1,0 i 2,0) te relativni pol oba tijela (1,2). Apsolutni pol 1,0 dobiven je sjecištem pravca koji prolazi kroz apsolutni pol 2,0 i relativnim polom 1,2 (točkom gdje se spajaju tijela I i II), te pravcem okomitim na smjer klizanja pomičnog ležaja.

Primjenom teorema virtualnog rada izračunava se vrijednost pomaka  $\delta$  što predstavlja vrijednost reakcije H.

Stoga će se na zadanom primjeru opterećenog trozglobnog nosača (slika 11) sljedećim jednadžbama prikazati da je virtualni rad ekvivalentan uvjetima ravnoteže. Dakle, reakcija H će biti proračunata metodom virtualnog rada i uvjetima ravnoteže, koji je će u konačnici dati jednak rezultat.

Metoda virtualnog rada:

$$\begin{aligned}\sum \delta W &= 0 \\ -H(a+c)\delta\varphi_1 - Pc\delta\varphi_1 + Fb_2\delta\varphi_2 + M\delta\varphi_1 &= 0 \\ \left[ \delta\varphi_2 = \frac{b_1}{b_2}\delta\varphi_1 \right] \\ -H(a+c)\delta\varphi_1 - Pc\delta\varphi_1 + Fb_2\frac{b_1}{b_2}\delta\varphi_1 + M\delta\varphi_1 &= 0 \quad / \cdot \delta\varphi_1 \\ -H(a+c) - Pc + Fb_1 + M &= 0 \\ -H(a+c) &= Pc - Fb_1 - M \\ H &= \frac{-Pc + Fb_1 + M}{a+c}\end{aligned}$$

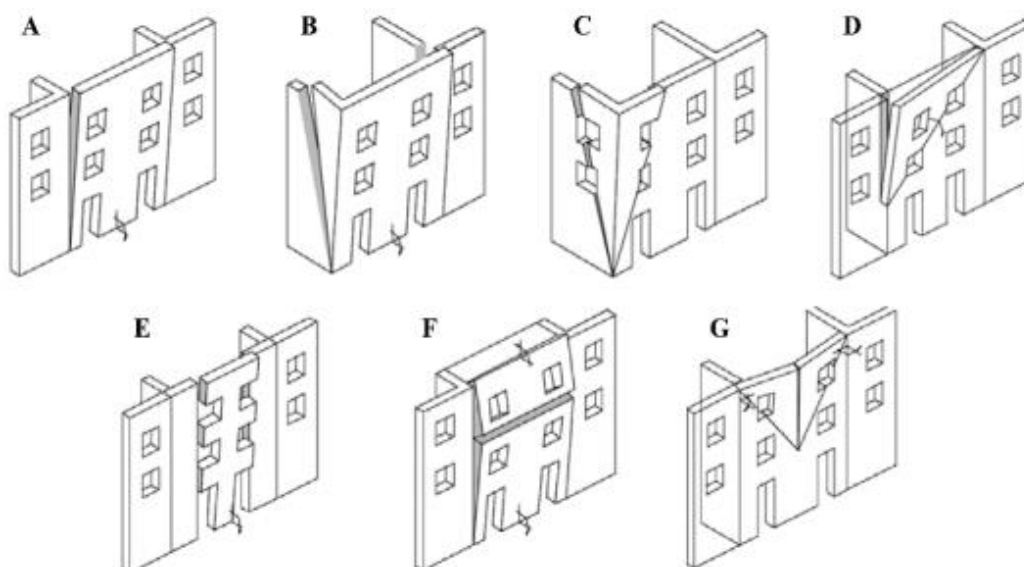
Jednadžbe ravnoteže:

$$\begin{aligned}\sum M_{1,0} &= 0 \\ H(a+c) + Pc - Fb_1 - M &= 0 \\ H(a+c) &= -Pc + Fb_1 + M \\ H &= \frac{-Pc + Fb_1 + M}{a+c}\end{aligned}$$

#### 4. MEHANIZMI OTKAZIVANJA ZIDOVA IZVAN RAVNINE

Zidane zgrade od ne-armiranog ziđa nisu projektirane na seizmička opterećenja, te su shodno tome podložne formiranju lokalnih mehanizama što dovodi do otkazivanja zidova izvan ravnine uslijed potresnog djelovanja. Dijelovi zidanih zgrada koji su posebno podložni otkazivanju su zabatni i fasadni zidovi, zbog svoje loše povezanosti sa poprečnim zidovima i stropovima. Nadalje, valja spomenuti kako su značajno izloženiji opasnosti od otkazivanja zidovi u višem etažama nego li oni u nižim. Razlog tomu je što su oni u višim etažama izloženi većim amplitudama pomaka te i većim ubrzanjima. Uz to, zidovi u nižim etažama masivniji su i pritisnuti težinom etaža iznad njih, što u slučaju ovakvog opterećenja djeluje stabilizirajuće. Problem otkazivanja izvan ravnine može se pojaviti i kod vitkih pregradnih zidova, fasadnih obloga, parapeta i krovnih vijenaca [4].

Kako bi se odredili tipovi mehanizma potrebna je inženjerska procjena na temelju iskustva koje je stečeno iz situacija prijašnjih potresa. Potrebno je uzeti u obzir spojeve zidova s poprečnim zidovima, oslabljena mjesta, zastupljenost pojačanja i slično. Tako postoji 7 uobičajenih tipova mehanizama (A-G) i dva osnovna modela krutih tijela (s jednim ili s dva kruta tijela).



Slika 14: Uobičajeni tipovi mehanizama kod zidanih zgrada [4]

Mehanizam A - kod ovog tipa mehanizma vidljivo je da dolazi do potpunog odvajanja fasadnog zida i njegovog prevrtanja. U prevrtanje ne sudjeluju poprečni zidovi. To se događa zbog njegove neadekvatne ili nepostojeće veze s poprečnim zidovima.

Mehanizam B - javlja se umjesto mehanizma A u slučaju kada su fasadni zidovi dovoljno povezani, zato kod ovog tipa u prevrtanju sudjeluju i jedan ili oba poprečna zida. Ovaj tip mehanizma razvija se otvaranjem dijagonalne pukotine u bočnim zidovima.

Mehanizam C - ovaj tip mehanizma nastaje u uglovima u slučaju dobre veze zidova u dva smjera, ali slabe kvalitete materijala u ravninama zidova. Pri slomu dolazi do rotacije oko kuta pri čemu nastaju pukotine na bočnim zidovima. Ovaj mehanizam je moguć ako je barem jedan kut zgrade slobodan.

Mehanizam D - ovaj se mehanizam razvija u slučaju dobre povezanosti, pa zato zahvaća samo dio fasadnog zida. Ovakvo prevrtanje dijela fasadnog zida često je uzrokovano slomom u ravnini, a događa se kod zidova gdje ojačanja nisu ravnomjerno zastupljena duž fasade.

Mehanizam E - kod ovog mehanizma otkazuje dio zida koji je uvjetovan širinom parapeta. Mehanizam može biti uzrokovan pravilnom raspodjelom otvora po vertikali ili slabom vezom nadvoja što dovodi do stvaranja kontinuirane pukotine.

Slijedeća dva tipa mehanizama su karakteristična po tome što dolazi do formiranja unutarnjeg linijskog zgloba, tako da kinematički lanac tvore dva bloka s određenim rubnim uvjetima. Takvi mehanizmi nastaju u slučaju kada postoji određeno pojačanje zidova.

Mehanizam F - ovaj tip mehanizma nastaje u slučaju slabe veze s jednom međukatnom konstrukcijom, a dobrim vezama s drugim međukatnim konstrukcijama. Nastaje u slučaju kada postoji armiranobetonska greda ili neka druga adekvatna veza fasadnog zida sa stropnom konstrukcijom.

Mehanizam G - ovakav mehanizam karakterističan je za zidane zgrade koje imaju dugačke fasadne zidove kod kojih je slaba povezanost s unutarnjim poprečnim zidovima, uz istovremenu malu nosivost na savijanje oko osi okomite na horizontalne sljubnice.

Proračun otkazivanja zidova izvan ravnine provodi se primjenom kinematičke analize mehanizama s jednim stupnjem slobode. Pri tom se zidovi modeliraju kao kruti ili djelomično kruti blokovi. Potrebno je definirati geometriju i rubne uvjete za odabrane zidove, promatrajući stvarna ili moguća mjesta nastanka pukotina. Shodno tome, prvi korak u proračunu otkazivanja zidova izvan ravnine jest odabrati tipove mehanizama s mogućom rotacijom i/ili klizanjem, te uključiti sve sile koje na njega djeluju (vlastita težina bloka, sila iz zatege, sila trenja, težina stropa, težina krovišta). Obzirom da je potrebno odrediti mjerodavan mehanizam, za svaki dio konstrukcije tako je potrebno definirati veći broj mogućih mehanizama kako bi se odabrao onaj kritični. Mjerodavni mehanizam biti će onaj koji ima najmanju vrijednost aktivacijskog ubrzanja (tj. s najmanjim kapacitetom pomaka). Za potrebe takvog proračuna definira se ekvivalentni linearno elastičan sustav s jednim

stupnjem slobode, s kojim će se u provjerama graničnih stanja zamijeniti pojedini stvarni mehanizam. Navedena kinematička analiza provodi se na dva različita načina: linearnom i nelinearnom kinematičkom analizom. Ovaj rad obrađivat će nekoliko primjera otkazivanja zidova izvan ravnine proračunatih putem linearne analize i jedan primjer proračunat nelinearnom analizom.



Slika 15. Primjer otkazivanja zidova izvan ravnine na realnim zgradama [4] [9]

## 4.1 LINEARNA KINEMATIČKA ANALIZA

Postupkom linearne kinematičke analize određuje se faktor aktivacije mehanizma, a provjera traženog zahtjeva se temelji na usporedbi vrijednosti spektralne akceleracije ili poprečne sile za odgovarajuće granično stanje. Proračun je linearnog tipa jer se temelji na vrijednostima sila [9].

Dakle, faktor aktivacije koji se određuje putem ovog proračuna predstavlja koeficijent kojim se množe vertikalne sile s inercijalnim učinkom koje pokreću prevrtanje. Faktor aktivacije najčešće se proračunava metodom virtualnog rada, iako to nije jedina opcija proračuna. Zaključno, koeficijent aktivacije može se definirati kao omjer stabilizirajućih momenata i momenata prevrtanja koji su vezani za učinke inercijalnih sila težine koje zid preuzima. [9]

Linearni kinematički postupak može se pojasniti kroz nekoliko koraka:

1. Odabir tipa mehanizma, odrediti odgovarajuće volumene zidnih elemenata te određivanje zglobova i ležajeva
2. Odrediti položaje, hvatišta i veličine svih sila koje promatrani zid preuzima
3. Zadati horizontalno ekvivalentno statičko opterećenje za sve vertikalne sile inercijalnog učinka
4. Odrediti plan dopuštenih virtualnih pomaka
5. Izračun faktora aktivacije formulom:

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

$n$  – broj svih inercijalnih sila koje djeluju na blok

$m$  – broj svih sila koje djeluju na blokove, ali njihova masa stvara horizontalne inercijalne sile na mehanizam

$o$  – broj vanjskih sila koje djeluju na blok, ali nisu povezane s masama

$P_i$  – opća sila težine koja izravno djeluje na blok

$P_j$  – opća sila težine koja ne djeluje izravno na blok, ali njena masa stvara horizontalne inercijalne sile koje djeluju na mehanizam

$F_h$  – opća vanjska sila koja djeluje na blok

$L_{fi}$  – virtualni rad unutarnjih sila

6. Izračun proračunske modalne mase  $M^*$  i faktor udjela proračunske mase  $e^*$  prema formulama:

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

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

$P_i$  – inercijalne sile težine

$\delta_{P_{x,i}}$  – odgovarajući horizontalni virtualni pomaci

7. Izračun spektralnog ubrzanja  $a_0^*$  ekvivalentnog sustava formulom:

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

$F_c$  – iznosi 1,35 (u slučaju uzimanja u obzir tlačne čvrstoće krutih blokova preporuča se korištenje faktora pouzdanosti koji se odnosi na razinu znanja LC1)

8. Provjera aktivacije mehanizma za određenu proračunsku potresnu situaciju s vršnim ubrzanjem na razini tla, tj. s vršnim ubrzanjem na visini etaže za zidove na višim etažama.

Provjera sigurnosti na granična stanja kod ovog proračuna temelji se na talijanskom propisu NTC2008. Prema tom propisu promatraju se dva kriterija: "granično stanje oštećenja" (tal. *stato limite di sanno, SLD*) i "granično stanje zaštite života" (tal. *stato limite di salvaguardia della vita, SLV*).

SLV kriterij predstavlja granično stanje nosivosti. Prema tom kriteriju, iznos  $a_0^*$  (koji je dobiven iz koraka 7) uspoređuje se s iznosom  $a_{0,min}^*$  (koji se proračunava prema slijedećoj formuli):

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

$q$  – koeficijent konstrukcije (odnosi se samo na promatrani element), prema NTC2008 preporučena vrijednost je 2

$S_e(T_1)$  – vrijednost elastičnog spektra

$\psi(z)$  – utjecajni koeficijent oblika titranja

$\Gamma_1$  – koeficijent modalne participacije

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

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

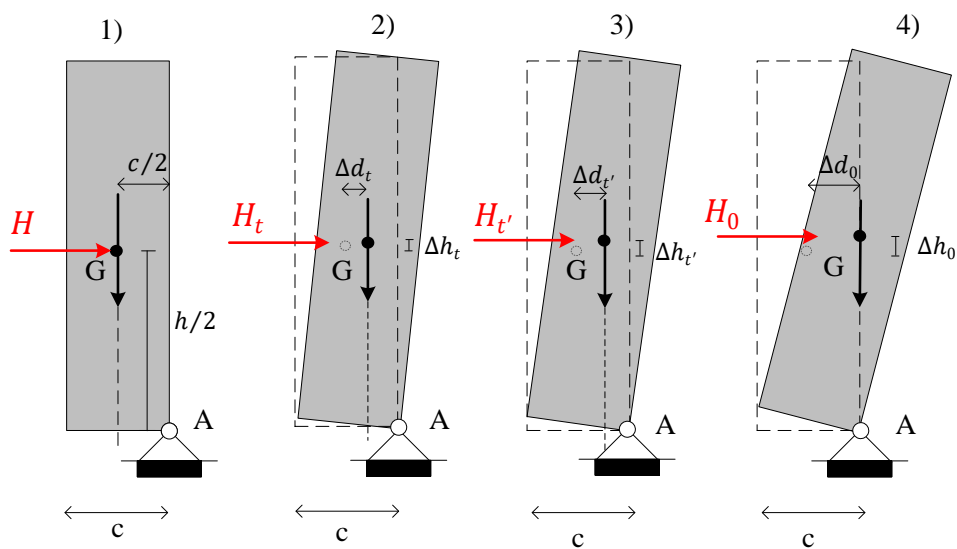
$H$  – ukupna visina zgrade

$z$  – visinska kota

$n$  – broj etaža zgrade

## 4.2 NELINEARNA KINEMATIČKA ANALIZA

Nakon što smo linearnim postupkom odredili potreban faktor aktivacije za mehanizam, ovim ćemo postupkom uzeti u obzir kapacitet pomaka mehanizma nakon njegove aktivacije. Dakle, nakon aktivacije mehanizma izazvane djelovanjem potresnog opterećenja, mijenja se položaj tijela te samim time dolazi do promjene ravnoteže sila. Važno je znati, da prilikom postupnog guranja krak stabilizirajućeg momenta se smanjuje, a potrebna je sve manja i manja sila koja bi ga u potpunosti prevrnula, sve dok blok ne dosegne jednu kritičnu točku, nakon čega više i nije potrebno djelovanje opterećenja da bi se blok prevrnuo. Stoga se u analizi promatra promjena faktora aktivacije (ili poprečne sile) uzevši u obzir kontrolni pomak sve do spomenutog potpunog gubitka stabilnosti mehanizma.



Slika 16: Primjer postupnog smanjenja kraka stabilizirajućeg momenta



$$\begin{array}{llll}
 H = \alpha \cdot G & G = 27 \text{ kN} & \Delta d_t = 7 \text{ cm} & \Delta h_t = 1 \text{ cm} \\
 c = 40 \text{ cm} & h = 150 \text{ cm} & \Delta d_{t'} = 13 \text{ cm} & \Delta h_{t'} = 3 \text{ cm} \\
 c/2 = 20 \text{ cm} & h/2 = 75 \text{ cm} & \Delta d_0 = 20 \text{ cm} & \Delta h_0 = 4 \text{ cm}
 \end{array}$$

$$1) \quad \sum M_A = 0$$

$$G \cdot c/2 - H \cdot h/2 = 0 \rightarrow H = 7,2 \text{ kN}$$

$$3) \quad \sum M_A = 0$$

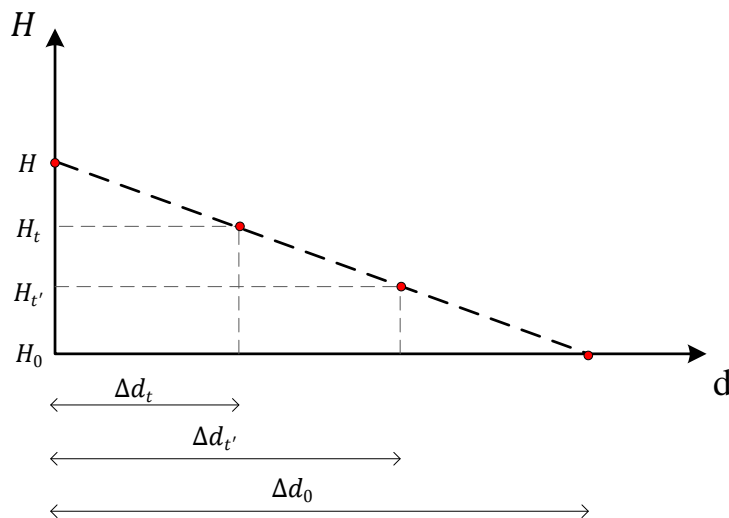
$$G \cdot \Delta d_{t'} - H \cdot \Delta h_{t'} = 0 \rightarrow H_{t'} = 2,4 \text{ kN}$$

$$2) \quad \sum M_A = 0$$

$$G \cdot \Delta d_t - H \cdot \Delta h_t = 0 \rightarrow H_t = 4,6 \text{ kN}$$

$$4) \quad \sum M_A = 0$$

$$G \cdot \Delta d_0 - H \cdot \Delta h_0 = 0 \rightarrow H_0 = 0 \text{ kN}$$

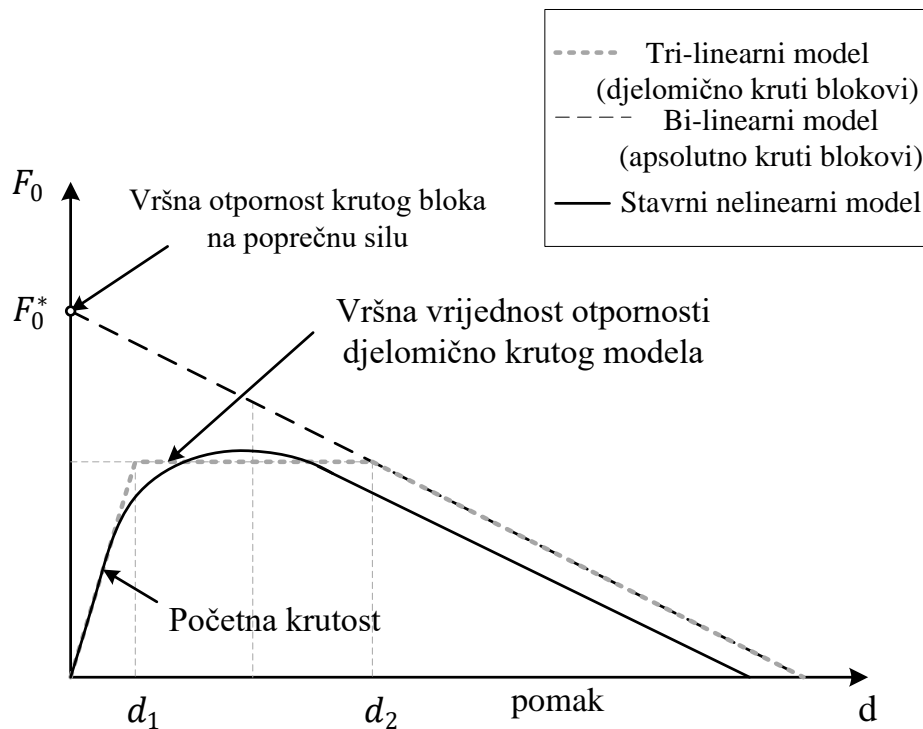


Slika 17: Proračun primjera sa slike 16 uz dijagram odnosa sila-pomak

U nelinearnoj analizi prvi je korak odabrati neku kontrolnu točku  $d_k$  kako bi dalje u pratili pomak te točke (time uzimamo u obzir gibanje čitavog mehanizma). Kapacitet pomaka mehanizma određuje se tako što se za različite konfiguracije kinematičkog lanca odredi kapacitet pomaka  $\alpha$ , a pri tom ekstremnoj vrijednosti pomaka  $d_{k,0}$  odgovara konfiguracija u kojoj je on jednak nuli (slika 18). Vrijednost koeficijenta  $\alpha$  može se odrediti jednadžbom virtualnog rada. Ako sva djelovanja na blok ostaju konstantna tijekom razvoja kinematike, konačna krivulja je gotovo linearna i može se odrediti temeljem izraza:

$$\alpha = \alpha_0 \left( 1 - \frac{d_k}{d_{k,0}} \right) \quad (19)$$

U suprotnom, potrebna je inkrementalna analiza [9].



Slika 18: Odnos sila-pomak za krute i deformabilne blokove pri prevrtanju [9]

Slijedeće je potrebno odrediti vrijednost za ekvivalentan sustav s jednim stupnjem slobode. Izračunom spektralnog pomaka i spektralnog ubrzanja ekvivalentnog linearnoelastičnog sustava (prema slijedećim formulama) određuje se krivulja kapaciteta tog sustava s jednim stupnjem slobode. U nelinearnoj analizi određuje se ekvivalentni spektralni pomak  $d^*$ , dok su veličine pripadajućeg spektralnog ubrzanja i proračunske mase odrede na isti način kao i kod linearnog proračuna.

Prvo je potrebno odrediti pomak kontrolne točke  $d_k$ , kako bi se formulom mogao odrediti i ekvivalentni spektralni pomak.

$$d^* = d_k \frac{\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta^2 P_{x,j}}{\delta_{x,k} \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta P_{x,i}} \quad (20)$$

$\delta_{x,k}$  – virtualni pomak odabrane kontrolne točke

Ako je krivulja dobivena izrazom (20) linearna, što će se dogoditi ako su djelovanje uglavnom konstantna, krivulja kapaciteta ekvivalentnog sustava proračunava se izrazom:

$$a^* = a_0^* \left(1 - \frac{d^*}{d_0^*}\right) \quad (21)$$

$d^*$  – ekvivalentni spektralni pomak

U slučaju djelovanja vanjskih promjenjivih veličina, krivulja će se pretpostaviti linearnom po intervalima.

U nelinearnoj analizi provjera sigurnosti provodi se za krajnje granično stanje SLV. S tim da će se za vrijednost kapaciteta spektralnog pomaka  $d_u^*$  odabrati niža vrijednost od slijedećih kriterija:

- 40% pomaka kod kojeg se vrijednost spektralnog ubrzanja poništava
- Pomak koji odgovara situacijama koje su lokalno nespojive sa stabilnošću građevinskih elemenata

Nakon odabira konačne vrijednosti kapaciteta spektralnog pomaka  $d_u^*$  lokalnog mehanizma, odabrana vrijednost uspoređuje se sa zahtjevom pomaka koji je dobiven iz spektra pomaka za sekantni period  $T_s$ :

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{d_s^*}{a_s^*}} \quad (22)$$

$$d_s^* = 0,4 \cdot d_u^* \quad (23)$$

$$a_s^* = a_0^* \left(1 - \frac{d_s^*}{d_0^*}\right) \quad (24)$$

Potrebna vrijednost spektralnog pomaka određuje se na temelju slijedećih kriterija:

- U situaciji kada se provjera odnosi na dio zgrade koji je većim dijelom oslonjen na tlo ili na izolirani element:

$$d_u^* \geq S_{De}(T_s) \quad (25)$$

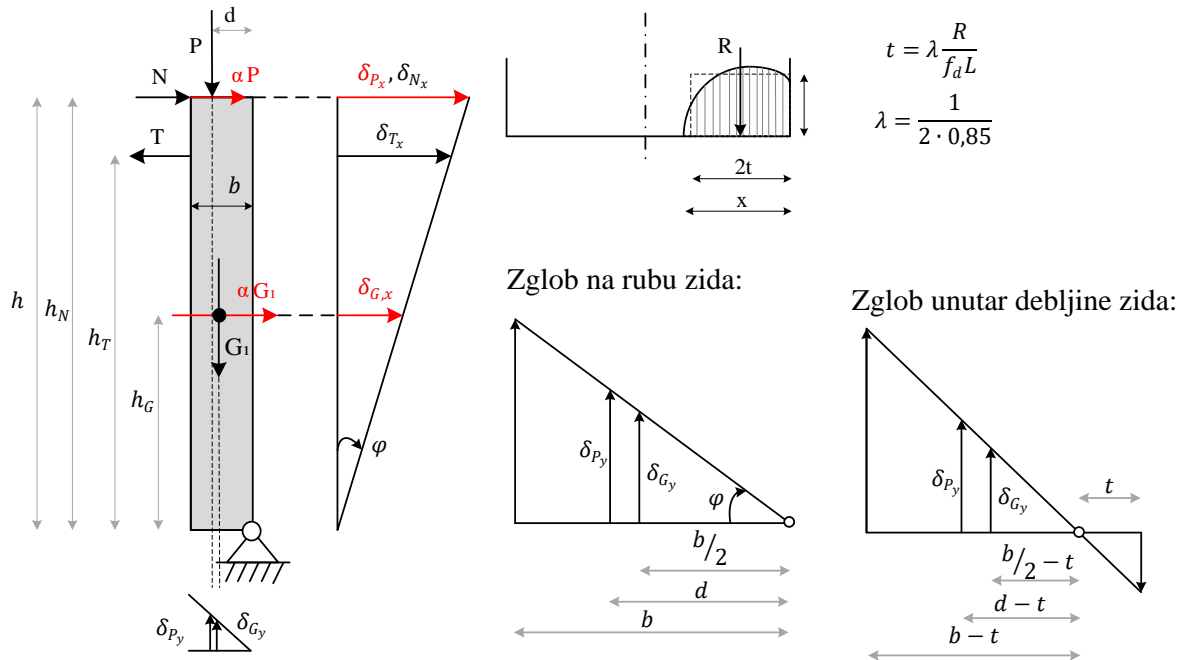
- U slučaju da lokalni mehanizam uključuje dio zgrade koji se nalazi na visini, u obzir će se uzeti interakcija u dinamičkom odazivu od lokalnog i globalnog sustava. Zahtijevani maksimalni pomak tada će se računati prema izrazu:

$$d_u^* \geq S_{De}(T_1) \cdot \psi(z) \cdot \Gamma_1 \cdot \frac{\left(\frac{T_s}{T_1}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{T_s}{T_1}\right)^2 + 0,02 \frac{T_s}{T_1}}} \quad (26)$$

#### 4.3 POLOŽAJ LINIJSKOG ZGLOBA

Prilikom pojave otkazivanja zida izvan ravnine popraćene pojavom drobljenja materijala dolazi do promjene u položaju linijskog zgloba. Položaj linijskog zgloba ovisi o tlačnoj čvrstoći zida. Njegov položaj se pretpostavlja na samom rubu zida, a do promjene položaja linijskog zgloba dolazi zbog drobljenja zida na njegovom rubu, što ima za posljedicu

povlačenje centra rotacije (linijskog zgloba) prema unutrašnjosti debljine zida. U ovom radu prikazat će se i primjer proračuna s navedenom situacijom drobljenja зида.



Slika 19: Promjena položaja linijskog zgloba [4]

#### 4.4 UTJECAJ SILE TRENJA

Utjecaj sile trenja pojavljuje se na spoju s poprečnim zidovima. Sila trenja promjenjiva je po visini zida, a utječe na visinski položaj formiranja linijskog zgloba. Nakon aktivacije mehanizma vrijednost sile trenja više neće biti konstantna. Hvatište sile trenja nalazi se na 1/3 visine  $h$  mjereno od linijskog zgloba [4].

Obzirom da vrijednost sile trenja raste s visinom (od gore prema dolje), što je rezultat isključivo težine naslaga blokova зида, silu trenja možemo izračunati preko jednog od slijedećih izraza:

$$F_T = \gamma s \frac{o}{2} \mu (r + 2r + \dots + h) \approx \gamma s \frac{o}{2} \mu \frac{h^2}{2r} = \frac{1}{2} \gamma \frac{sh^2}{\rho} \mu \quad (27)$$

$r, o$  – dimenzije opeke ( $\rho = 2r/o$ )

$s$  – debljina poprečnog zida na spoju

$h$  – visina nakojoj se razmatra utjecaj trenja

$\mu$  – koeficijent trenja

$\gamma$  – volumna težina bloka

$$F_T = 0,4n(n + 1)\phi\mu l_b^2 t_s w \quad (28)$$

$n$  – broj blokova opeke ( $n = \frac{h}{h_b}$ )

$l_b$  – duljina preklapanja na spoju

$h_b$  – visina jednog bloka opeke

$$\phi = \frac{h_b}{l_b} \quad (29)$$

$t_s$  – debljina poprečnog zida

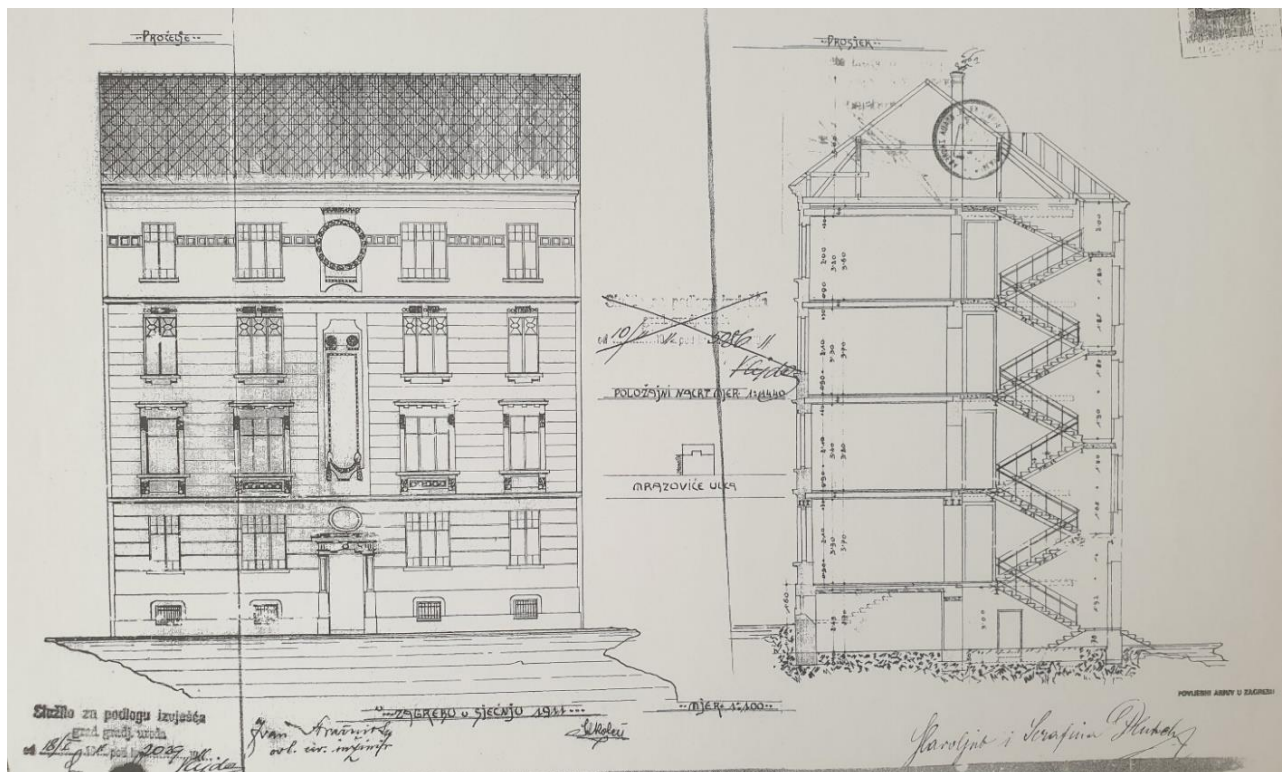
$w$  – specifična težina zida

Nakon što proračunamo vrijednost sile trenja preko obje formule, za daljnji proračun (bilo linearnom bilo nelinearnom analizom) uzimamo manju vrijednost sile  $F_T$ , kao što je prikazano u proračunima u nastavku rada.

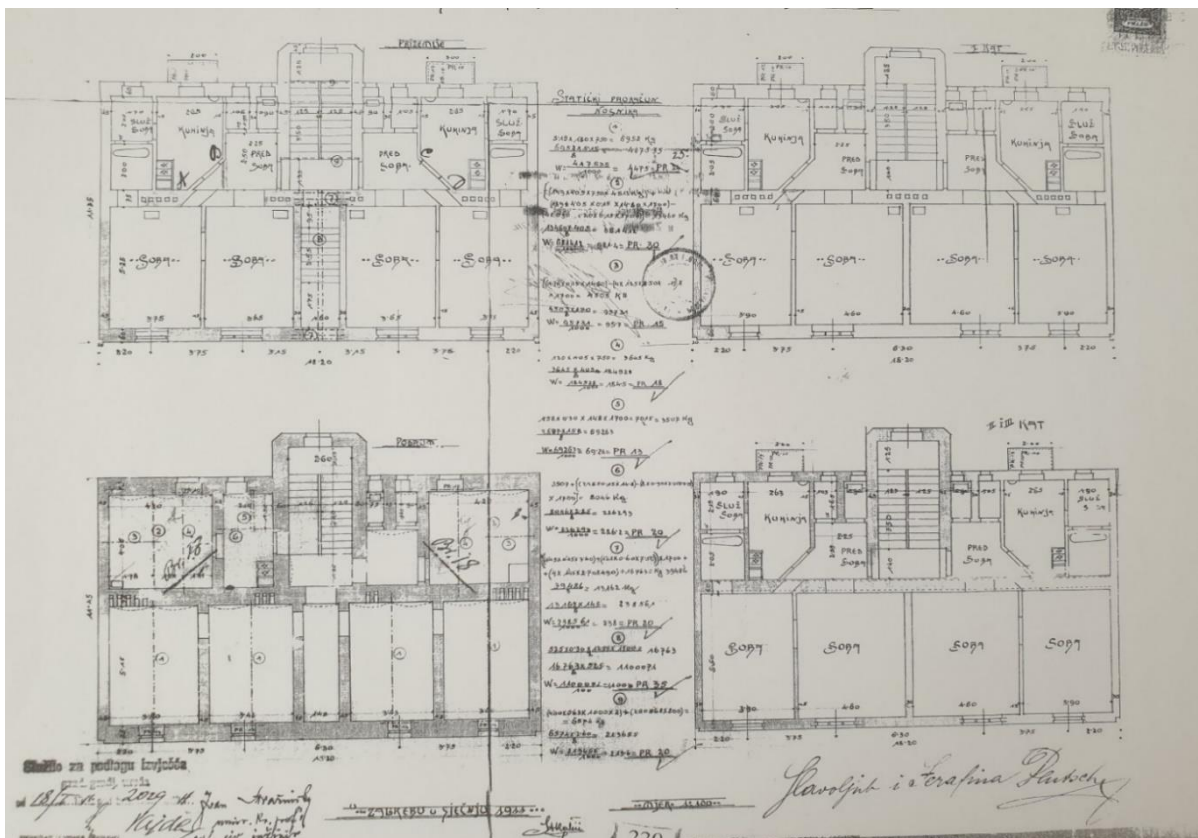
## 5. PRORAČUN OTKAZIVANJA ZIDOVA IZVAN RAVNINE ZA ODABRANU ZIDANU ZGRADU

### 5.1 OPIS ZGRADE

Za ovaj proračun odabrana zidana zgrada smještena je u Donjem gradu u Zagrebu. Radi se o zgradi s podrumom, prizemljem i 3 kata. Kao što je vidljivo na dolje priloženoj slici (slika 20) tlocrt zgrade je pravokutnog oblika s istaknutim dvokrakim stubištem. Visina podruma je 2.45 m, a visina prizemlja, prvog, drugog i trećeg kata je 3.40 m. Visina krova je 5 m.

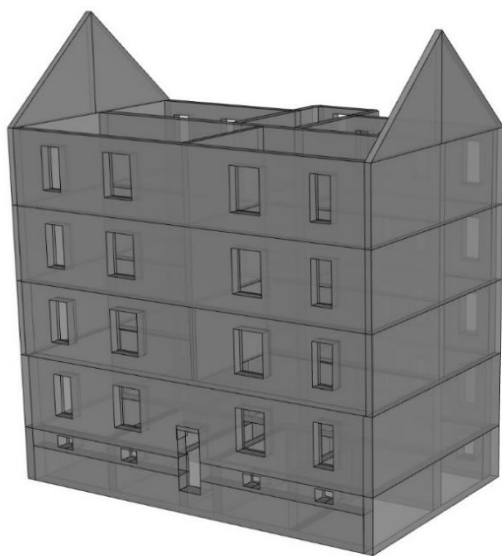


Slika 20: Pogled i presjek zgrade

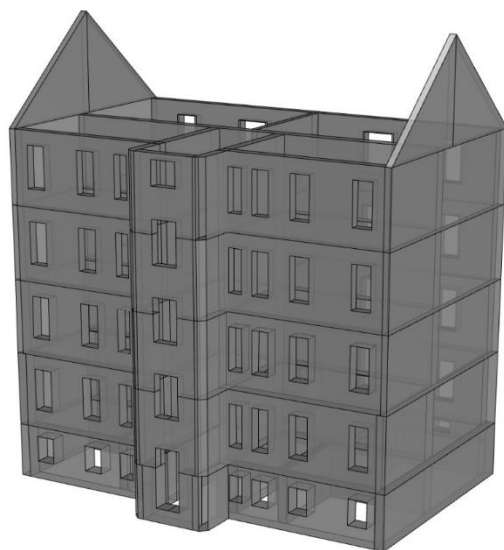


Slika 21: Tlocrti etaža zgrade

Za prikaz trodimenzionalnog modela zgrade u ovom radu korišten je program Rhinoceros, a svi proračuni mehanizama izrađeni su u program Microsoft Excel. Crteži koji prikazuju raspodjelu naprezanja za pojedini mehanizam izrađeni su u programu Microsoft Visio.



Slika 22. Volumni model zgrade (pogled na ulično pročelje)



Slika 23. Volumni model zgrade (pogled na stražnje pročelje)

## 5.2 ANALIZA OPTEREĆENJA

### 5.2.1 Proračun vertikalnog opterećenja

U ovom radu bit će obrađeno nekoliko primjera tipičnih mehanizama. Za svaki mehanizam bit će prikazan isječak modela, raspodjela naprezanja i tablica s proračunom. Isječak modela vizualno prikazuje otkazivanje odabranog zida izvan ravnine, raspodjela naprezanja prikazuje broj i vrste opterećenja, položaj hvatišta sila i kinematička ograničenja, dok su u tablicama s proračunom prikazani iznosi svih spomenutih veličina (sila, opterećenje, težišta, konstanti...) i rezultati jednadžbi proračuna.

U narednim tablicama bit će prikazan izračun dodatnog i stalnog opterećenja za stropne i krovne konstrukcije koje također djeluje na zidove odabranih mehanizama. Izračunate su i konačne vrijednosti linijskog i koncentriranog opterećenja. Za potrebe ovog proračuna zanemareno je opterećenje od grednika koje djeluje na zabatni zid.

Tablica 1. Drveni grednik

Drveni grednik		
završna podna obloga	0.3	kN/m <sup>2</sup>
daščana oplata (2.4 cm)	0.15	kN/m <sup>2</sup>
nasuti materijal	1.5	kN/m <sup>2</sup>
drveni grednici	0.5	kN/m <sup>2</sup>
daščana oplata (2.4 cm)	0.15	kN/m <sup>2</sup>
<b>Ukupna težina</b>	<b>2.6</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>

Tablica 2. Stropovi stambene etaže

Stropovi stambene etaže		
odavno stalno	1	kN/m <sup>2</sup>
uporabno (množi se s faktorom 0.3)	2	kN/m <sup>2</sup>
<b>Ukupno</b>	<b>4,2</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>
osni razmak grednika	6,05	m
duljina djelovanja opterećenja (L)	19,1	m
<b>g<sub>strop, etaža</sub></b>	<b>12,705</b>	<b>kN/m'</b>



Tablica 3. Strop tavana

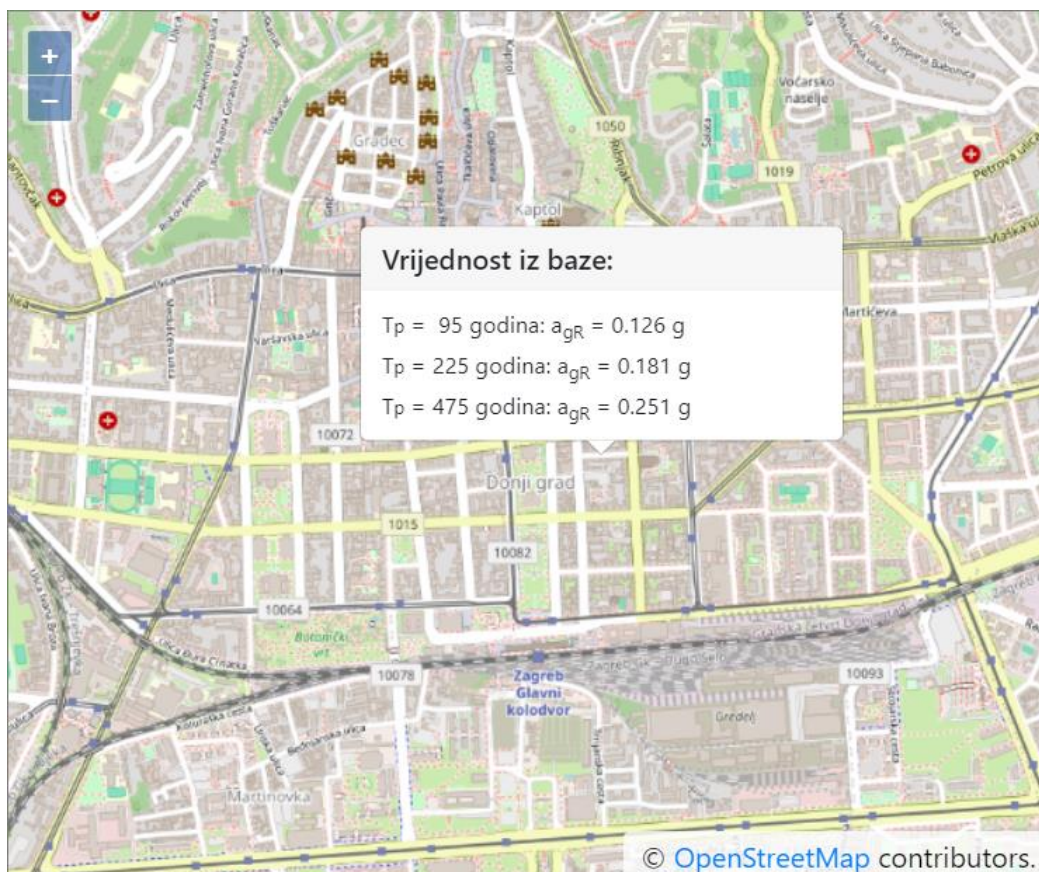
Strop tavana		
dotatno stalno	0,5	kN/m <sup>2</sup>
uporabno (množi se s faktorom 0.3)	1	kN/m <sup>2</sup>
<b>Ukupno</b>	<b>3,4</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>
osni razmak grednika	6,05	m
duljina djelovanja opterećenja (L)	19,1	m
<b>g<sub>strop, tavan</sub></b>	<b>10,285</b>	<b>kN/m'</b>

Tablica 4. Konstrukcija krovišta

Konstrukcija krovišta		
Konstrukcija krovišta	2	kN/m <sup>2</sup>
<b>Ukupno</b>	<b>2</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>
osni razmak grednika	6,05	m
duljina djelovanja opterećenja (L)	19,1	m
<b>g<sub>strop, tavan</sub></b>	<b>6,05</b>	<b>kN/m'</b>

### 5.2.2 Opterećenje potresom

Trenutno važeći propis HRN EN 1998-1 ne sadrži potrebne preporuke prema kojima bi se provela provjera sigurnosti ovog tipa, stoga su sve vrijednosti koeficijenata u ovom proračunu preuzeti iz talijanskog propisa NTC 2008. Pretpostavit će se kategorija tla C, a horizontalno vršno ubrzanje tla tipa A na odabranoj lokaciji za povratni period od 475 godina iznosi  $a_{gR} = 0,251g = 2,462 \text{ m/s}^2$ , gdje g predstavlja ubrzanje sile teže koje iznosi  $9,81 \text{ m/s}^2$ .



Slika 24. Vrijednosti ubrzanja tla za odabrano područje [10]

Prema izrazu koji je dan u normi HRN EN [10] prvi period za zgradu može se procijeniti na slijedeći način:

$$T=0,016 \cdot H=0,016 \cdot 22,9 = 0,37 \text{ s}$$

$H$  – visina zgrade mjerena od dna temelja

Tablica 5. Vrijednost parametara koje opisuje preporučeni elastični spektar

Tip tla	S	$T_B(S)$	$T_c(S)$	$T_D(S)$
A	1	0.15	0.4	2
B	1.2	0.15	0.5	2
C	1.15	0.2	0.6	2
D	1.35	0.2	0.8	2
E	1.4	0.15	0.5	2

Za tlo tipa C tada vrijedi:

$$S = 1,15; T_B(S) = 0,2; T_C(S) = 0,6; T_D(S) = 2$$

$S$  – faktor tla

$T_B(S), T_C(S), T_D(S)$  – periodi oscilacija

Prateći uvjete zadane normom HRN EN [9], vrijedi:

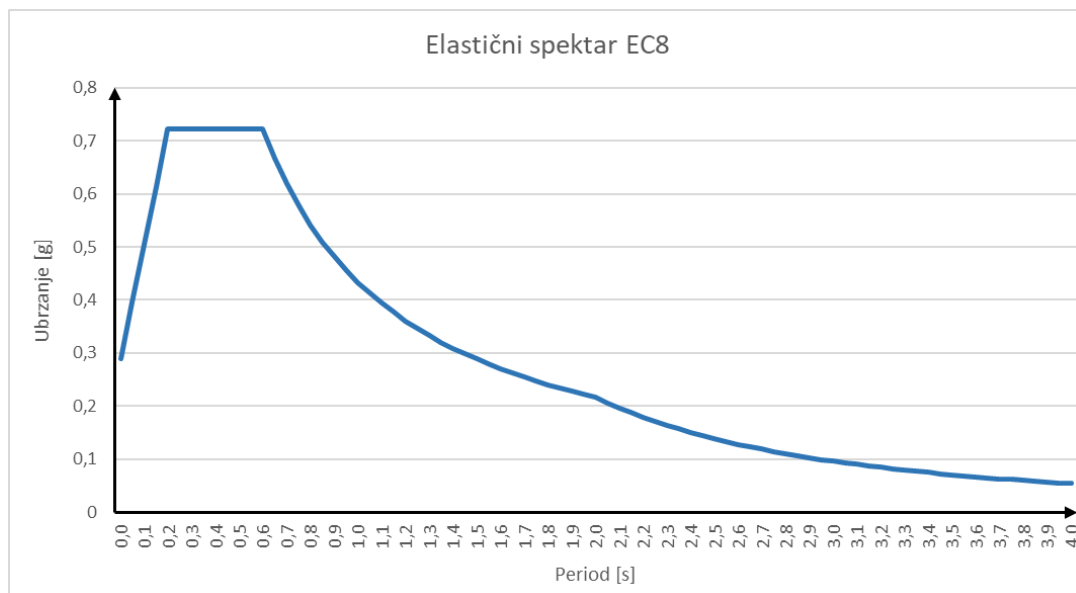
$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5$$

$$S_e(T) = 2,462 \cdot 1,15 \cdot 1 \cdot 2,5 = 7,08$$

$a_g$  – proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu tipa C

$\eta$  – faktor korekcije prigušenja = 1,0 za viskozno prigušenje 5%

Spektar odziva predstavlja grafički prikaz maksimalnih vrijednosti pomaka, brzina i ubrzanja relativnog odziva prigušenih linearnih sustava s jednim stupnjem slobode, na podrhtavanje tla uslijed djelovanja potresa. Sukladno tome spektar odziva ima veliku ulogu u okviru potresnog inženjerstva. Većina današnjih normi predlaže prikaz spektra odziva do perioda od 4s čime se u obzir uzima velik broj konstrukcija. Elastični spektar odziva za ubrzanje podloge  $a_g = 0,251$  i kategoriju tla tipa C bit će prikazan na slici 20. [11]



Slika 25. Elastični spektar odziva za  $a_g = 0,251$  i tip tla C

## 5.3 PRORAČUN MEHANIZAMA

U ovom poglavlju rada bit će prikazan proračun nekoliko tipičnih mehanizama. U navedenim primjerima bit će prikazani linearni i nelinearni proračun, situacija drobljenja zida što rezultira uvlačenjem zgloba unutar zida, kao i utjecaj sile trenja.

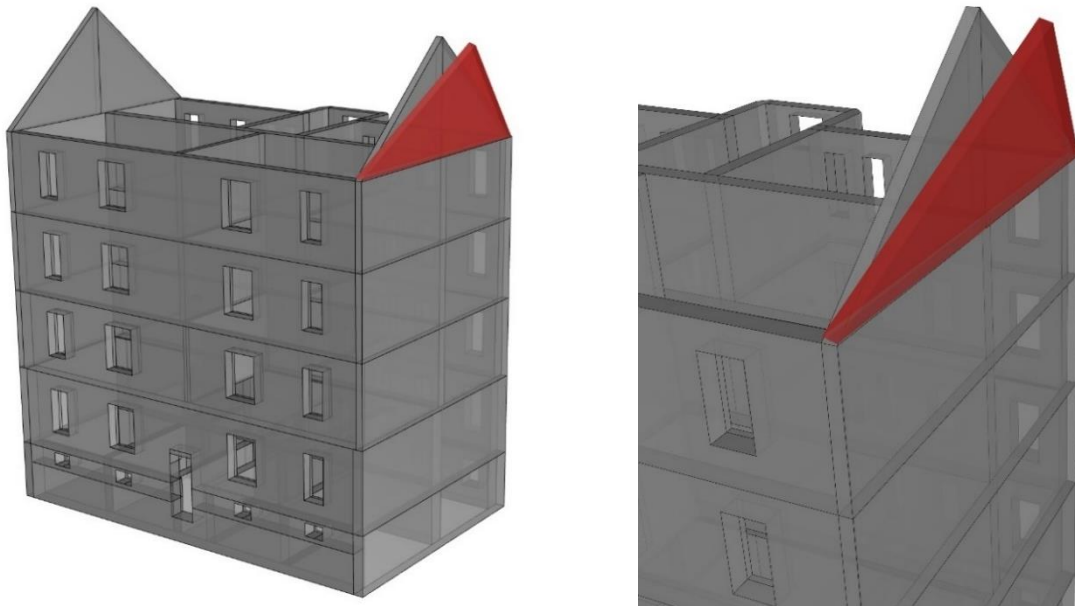
Za svaki primjer bit će priložena tablica sa svim iznosima ulaznih vrijednosti i rezultatima proračunatih vrijednosti. Dakle za svaki mehanizam određen je faktor aktivacije i vrijednost pripadnog spektralnog ubrzanja koja je uspoređena s minimalnom vrijednosti ubrzanja. U tablici 6 nalaze se objašnjena oznaka svih korištenih parametara.

Tablica 6. Prikaz konstanti i oznaka korištenih u proračunu

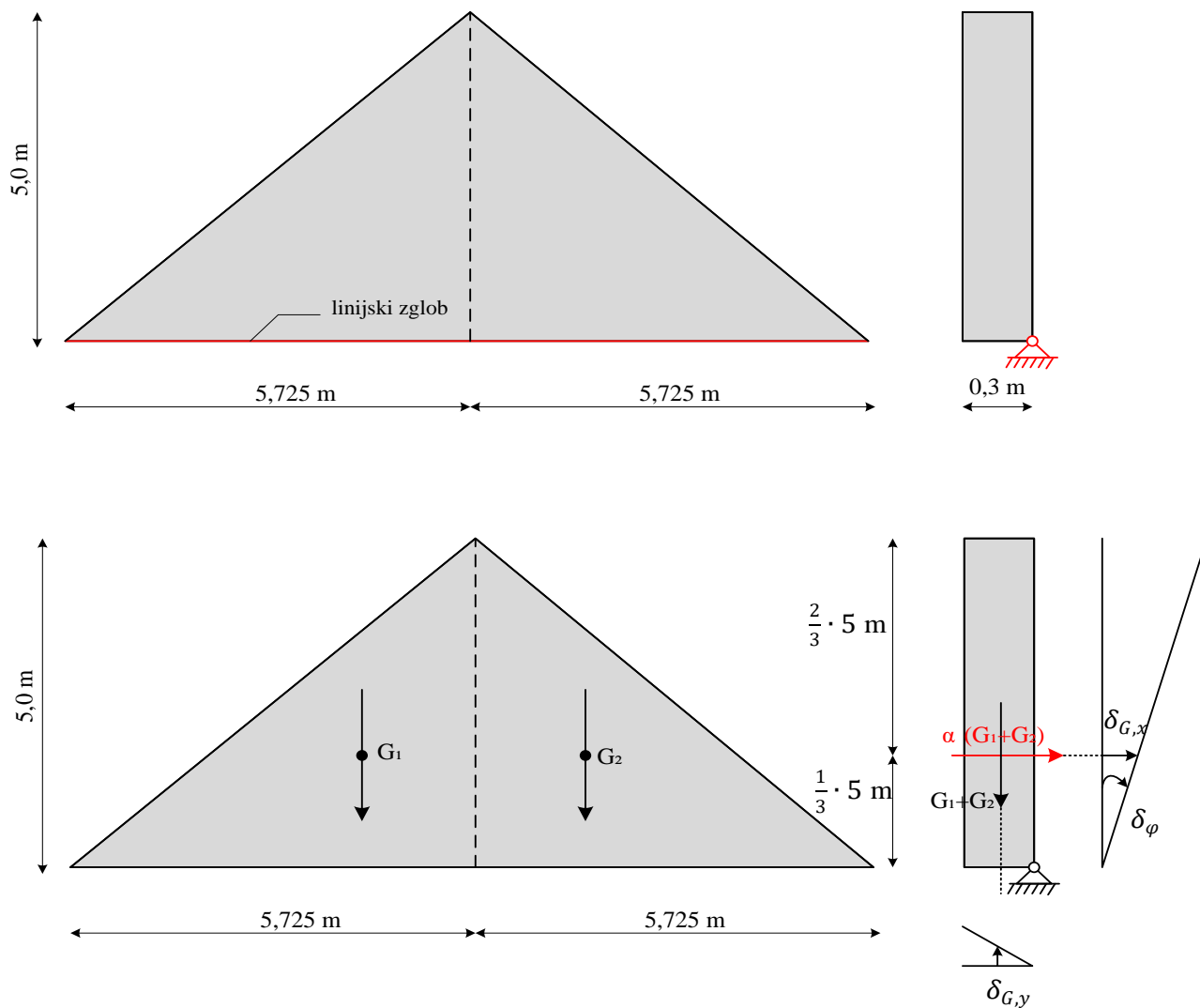
Naziv	Oznaka / Konstanta / Mj. jedinica
specifična težina zidanog zida	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
visina građevine	$H=22,9 \text{ m}$
faktor tla	$S=1,15$
horizontalno vršno ubrzanje tla	$a_g = 2,462 \text{ m/s}^2$
koeficijent konstrukcije	$q=2$
kota formiranja linijskog zgloba	$z$
elastični spektar odziva	$S_e(T)$
elastični spektar odziva za pomak	$S_{De}(T)$
faktor aktivacije	$\alpha_0[\text{kN/m}]$
faktor razine znanja LC1	$F_C = 1,35$
koeficijent modelne participacije	$\Gamma_1 = 1,286$
utjecajni koeficijent oblika titranja	$\psi(z)$
proračunska modalna masa	$M^*[\text{t}]$
koeficijent proračunske modalne mase	$e^*$
spektralno ubrzanje	$a_0^*[\text{m/s}^2]$
zahtjevano spektralno ubrzanje	$a_{0,\min}^*[\text{m/s}^2]$
spektralni pomak ekvivalentnog sustava	$d_0^*[\text{m}]$
krajnja vrijednost kapaciteta spektralnog pomaka	$d_u^*[\text{m}]$
sekantni period	$T_s = 2,928 \text{ s}$
prvi period	$T_1 = 0,37 \text{ s}$
zahtjevani spektralni pomak	$d_{u,\min}^*[\text{m}]$

### 5.3.1 Mehanizam 1 – Lastavica zabata

Za mehanizam 1 odabrana je lastavica zabata. Ona je nepridržana, odnosno nije povezana sa krovnom konstrukcijom te predstavlja konzolni element. U ovom proračunu uzima se otkazivanje lastavice u punom volumenu uz formiranje linijskog zgloba uz vanjsko lice zida na spoju s 3. etažom. Uzima se u obzir samo djelovanje vlastite težine, dakle nikakva druga djelovanja se ne prenose na lastavicu te se s navedenim pretpostavkama promatra njezina aktivacija.



Slika 26. Prikaz modela - otkazivanja zabata

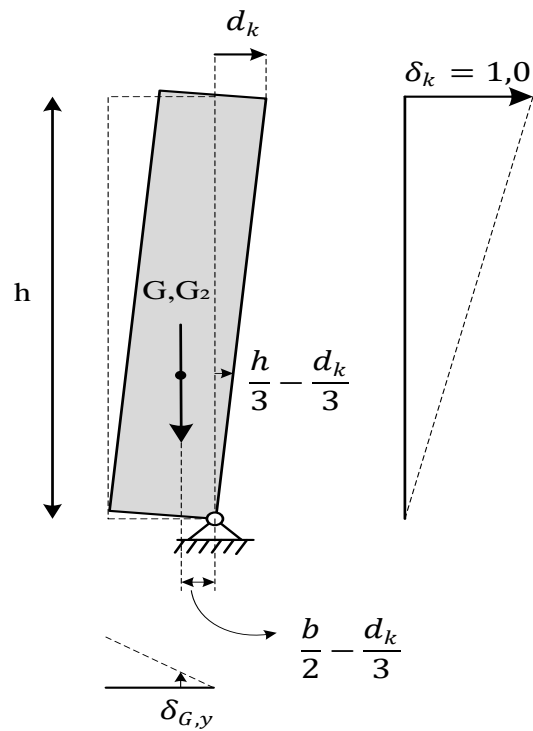


Slika 27. Raspodjela napreznaja za lastavicu zabata - linearni proračun, primjer 1.1

Tablica 7. Proračun lastavice zabata linearnim proračunom, primjer 1.1

Primjer 1.1. Lastavica zabata			Primjer 1.1. Lastavica zabata - nastavak		
geometrija mehanizma:			uvjet ravnoteže:		
$l$	5.725	m	$M_{stab}$	23.186	kN/m
$h$	5	m	$M_{nestab}$	257.625	kN/m
$h/3$	1.667	m	$\alpha_0$	0.090	
$b$	0.3	m	jednažba virtualnog rada:		
$b/2$	0.15	m	$\delta_{G,x}$	1.667	
ulazne vrijednosti:			$\delta_{G,y}$	0.15	
$\gamma$	18	kN/m <sup>3</sup>	$\alpha_0$	0.090	
$G_1$	77.288	kN	$F_c$	1.35	
$G_2$	77.288	kN	$M^*$	15.757	t
$S$	1.15		$e^*$	1	
$a_g$	2.462	m/s <sup>2</sup>	$a_0^*$	0.654	m/s <sup>2</sup>
$q$	2		uvjet sigurnosti:		
$S_e(T_1)$	7.08		$\psi_1(z)$	0.782	
$H$	22.9	m	$\Gamma_1$	1.286	
$z$	17.9	m	$a_{0,min}^*(max)$	1.416	m/s <sup>2</sup>
				3.558	m/s <sup>2</sup>
			$a_0^*/a_{0,min}^*$	0.184 < 1 → ne zadovoljava	

Isti mehanizam se u nastavku (primjer 1.2) analizira za kapacitet pomaka, tj. provodi se nelinearni statički proračun. Dakle, uzima se jedna kontrolna točka, što je kod ovog primjera točka na visini  $h$  na vanjskom licu zida te se promatra njen kapacitet pomaka, a uzima se u obzir gibanje cijelog mehanizma. Čitav postupak proračuna koji slijedi detaljno je opisan u poglavlju 5.2 Nelinearna kinematička analiza.



Slika 28. Kapacitet pomaka lastavice zabata - nelinearni proračun, primjer 1.2

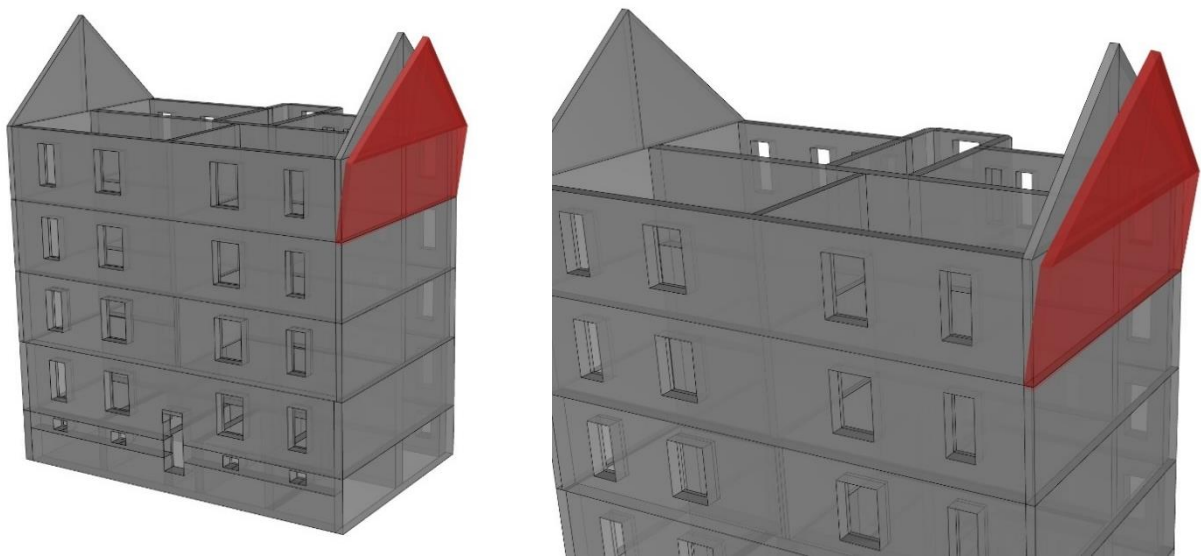


Tablica 8. Proračun lastavice zabata nelinearnim proračunom, primjer 1.2

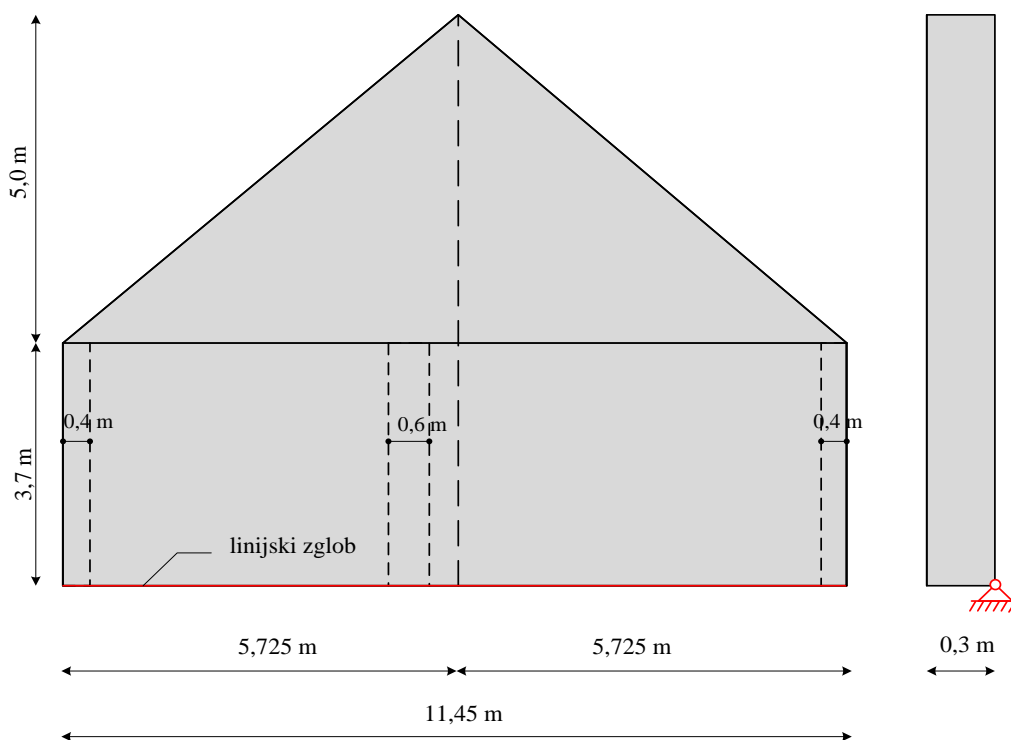
Primer 1.2. Lastavica zabata			Primer 1.2. Lastavica zabata - nastavak		
geometrija mehanizma:			jednažba virtualnog rada:		
$l$	5,725	m	$d_{k0}$	0,450	m
$h$	5	m	$d_0^*$	0,150	m
$h/3$	1,667	m	$F_c$	1,35	
$b$	0,3	m	$M^*$	15,757	t
$b/2$	0,15	m	$e^*$	1,000	
ulazne vrijednosti:			$a_0^*$	0,654	m/s <sup>2</sup>
$\gamma$	18	kN/m <sup>3</sup>	uvjet sigurnosti:		
$G_1$	77,288	kN	$\psi_1(z)$	0,782	
$G_2$	77,288	kN	$\Gamma_1$	1,286	
$S$	1,15		$a_{0,min}^*(max)$	1,416	m/s <sup>2</sup>
$a_g$	2,462			3,558	m/s <sup>2</sup>
$q$	2		$d_u^*$	0,060	m
$S_e(T_1)$	7,08		$d_s^*$	0,024	m
$T_1$	0,37	s	$a_s^*$	0,549	m/s <sup>2</sup>
$H$	22,9	m	$T_s$	1,313	s
$z$	17,9	m	$S_e(T_s)$	3,235	
virtualni pomaci:			$S_{De}(T_s)$	0,141	
$d_k$	1,0		$S_{De}(T_1)$	0,025	
$\varphi$	0,200		$d_{u,min}^*(max)$	0,141	m
$\delta_{G,x}$	0,333			0,223	m
$\delta_{G,y}$	$0,03 - 0,067d_k$		$d_u^*/d_{u,min}^*$	0,269	$< 1 \rightarrow$ ne zadovoljava
$d_{k0} \rightarrow$	$\alpha = 0$				

### 5.3.2 Mehanizam 2 – Lastavica zabata i 3. etaža

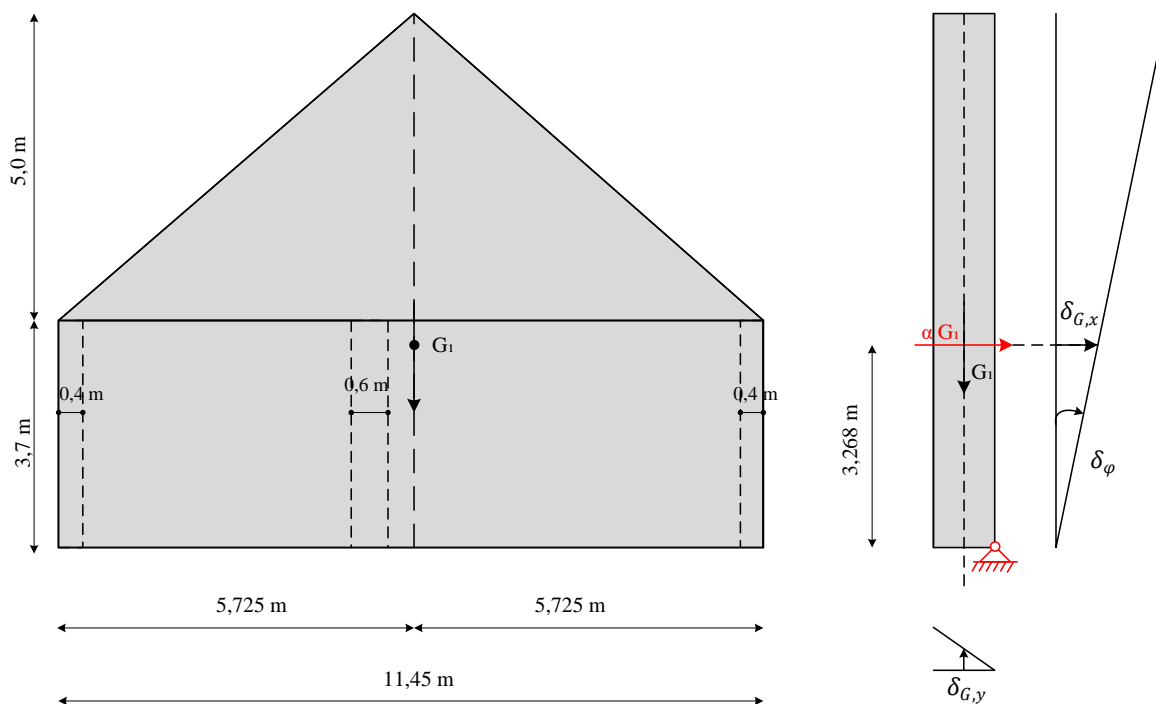
U slijedećem primjeru promatrat će se mehanizam sastavljen od zabatnog zida i lastavice. Na zabatni zid i lastavicu se ne prenose nikakva dodatna opterećenja jer se na njih ne oslanjaju stropne konstrukcije već, kao i u prethodnim primjerima, djeluje samo vlastita težina promatranog bloka. Dakle, u ovom primjeru lastavica i zabatni zid promatraju se kao jedan blok. Za ovaj primjer 2.1. promatrat će se mehanizam bez utjecaja sila trenja.



Slika 29. Prikaz modela – otkazivanje zabata i 3. etaže



Slika 30a. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 2 bez utjecaja trenja, primjer 2.1

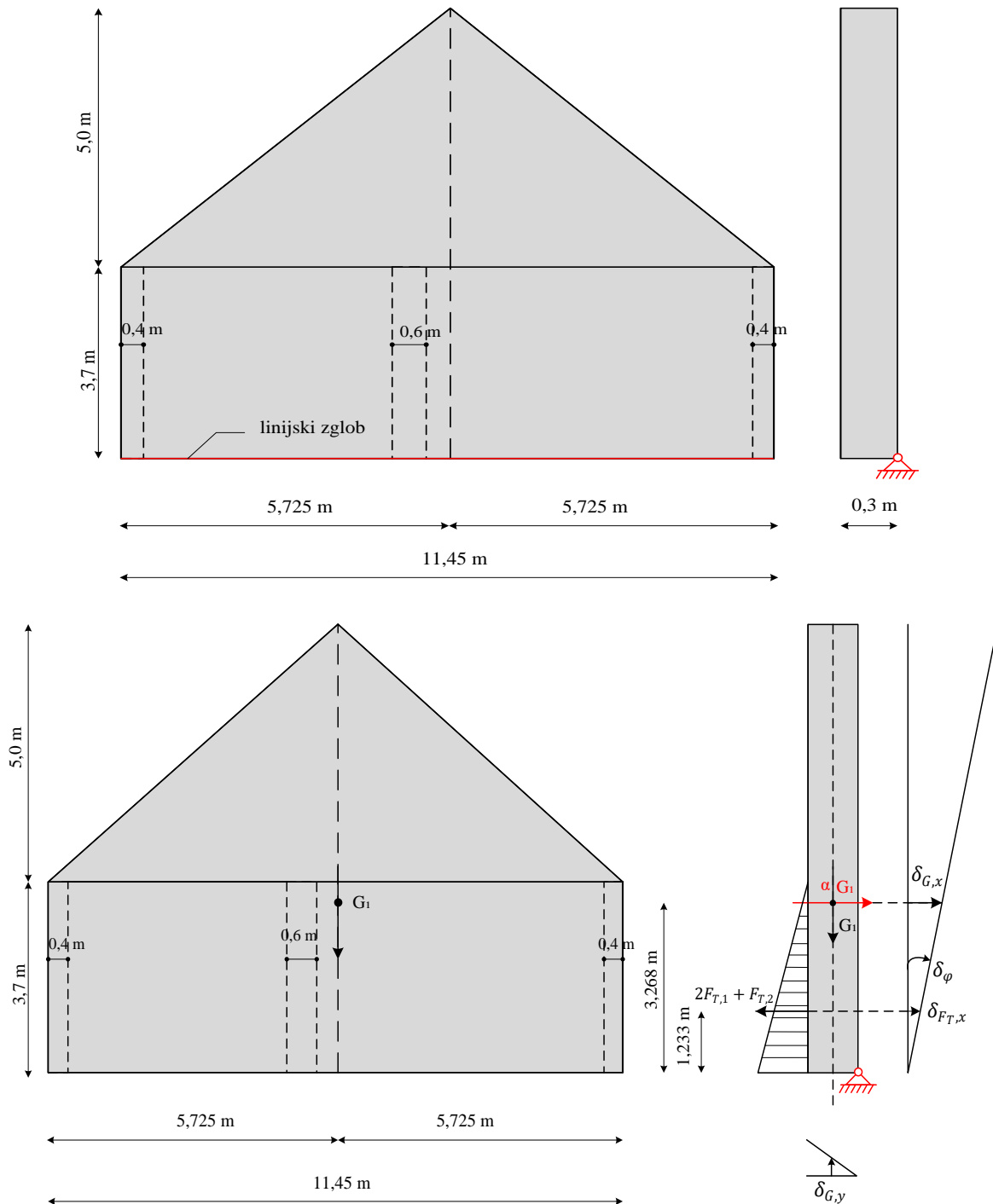


Slika 30b. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 2 bez utjecaja trenja, primjer 2.1

Tablica 9. Proračun mehanizma 2 bez utjecaja trenja, primjer 2.1

Primjer 2.1. Lastavica zabata i 3.etaža (bez utjecanja trenja)			Primjer 2.1. Lastavica zabata i 3.etaža (bez utjecanja trenja) - nastavak		
geometrija mehanizma:			uvjet ravnoteže:		
$l$	11.45	m	$M_{stab}$	57.502	kN/m <sup>3</sup>
$h_1$	3.7	m	$M_{nestab}$	1252.77885	kN/m
$h_1/2$	1.85	m	$\alpha_0$	0.046	kN/m
$h_2$	5	m	jednadžba virualnog rada:		
$h_2/3$	1.667	m	$\delta_{G,x}$	3.268	
$b$	0.3	m	$\delta_{G,y}$	0.15	
$b/2$	0.15	m	$\alpha_0$	0.046	
ulazne vrijednosti:			$F_c$	1.35	
$\gamma$	18	kN/m <sup>3</sup>	$M^*$	39.077	t
$z_T$	3.268	m	$e^*$	1	
$G_1$	383.346	kN	$a_0^*$	0.334	m/s <sup>2</sup>
$S$	1.15		uvjet sigurnosti:		
$a_g$	2.462	m/s <sup>2</sup>	$\Psi_1(z)$	0.620	
$q$	2		$\Gamma_1$	1.286	
$S_e(T_1)$	7.08		$a_{0,min}^*(max)$	1.416	m/s <sup>2</sup>
$H$	22.9	m		2.823	m/s <sup>2</sup>
$z$	14.2	m	$a_0^*/a_{0,min}^*$	0.118 < 1	→ ne zadovoljava

U primjeru 2.2 promatra se isti mehanizam kao i u primjeru 2.1 s tim da je u ovom primjeru uzet u obzir utjecaj sile trenja na sam faktor aktivacije. Utjecaj sile trenja analiziran je na tri bočna zida širine 40 cm (vanjski) i 60 cm (unutarnji). Kao što je objašnjeno u poglavlju 5.4 Utjecaj sile trenja, sam iznos sile trenja može se izračunati preko dvije formule te se za daljnji proračun koristi manji od ta dva iznosa. Tako se u ovom primjeru upotrebljavao iznos dobiven izrazom (28). Radi se o tipu mehanizma prevrtanja s jednim blokom.



Slika 31. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 2 uz utjecaj trenja, primjer 2.2

Tablica 10. Proračun mehanizma 2 uz utjecaj trenja, primjer 2.2

Primjer 2.2. Lastavica zabata i 3. etaža (uz utjecaj trenja)		
<b>geometrija mehanizma:</b>		
$l$	11,45	m
$h_1$	3,7	m
$h_1/2$	1,85	m
$h_2$	5	m
$h_2/3$	1,667	m
$b$	0,3	m
$b/2$	0,15	m
<b>ulazne vrijednosti:</b>		
$s_1$	0,4	m
$s_2$	0,6	m
$n$	56,923	
$\varphi$	0,448	
$\gamma$	18	kN/m <sup>3</sup>
$\rho$	0,448	
$z_T$	3,268	m
$G_1$	383,346	kN
$F_{T,1}$	46,539	kN
$F_{T,2}$	69,809	kN
$S$	1,15	
$a_g$	2,462	m/s <sup>2</sup>
$q$	2	
$S_e(T_1)$	7,08	
$H$	22,9	m
$z$	14,2	m

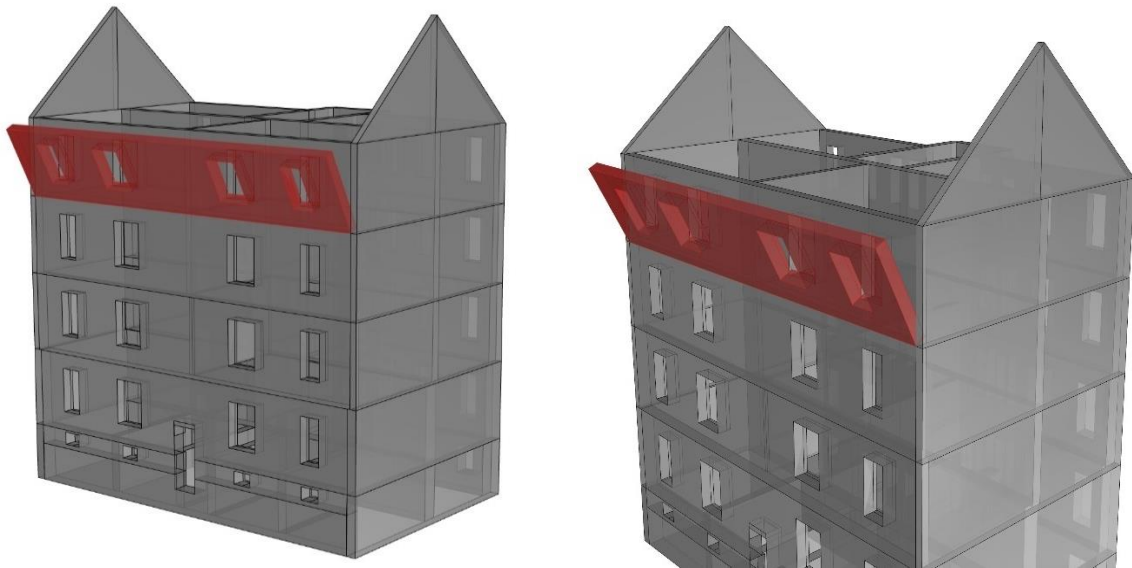
  

Primjer 2.2. Lastavica zabata i 3. etaža (uz utjecaj trenja) - nastavak		
<b>uvjet ravnoteže:</b>		
$M_{stab}$	258,341	kN/m
$M_{nestab}$	1252,779	kN/m
$\alpha_0$	0,206	
<b>jednadžba viruialnog rada:</b>		
$\delta_{G,x}$	3,268	
$\delta_{G,y}$	0,15	
$\delta_{F_T,x}$	1,233	
$\alpha_0$	0,206	
$F_c$	1,35	
$M^*$	39,077	t
$e^*$	1,000	
$a_0^*$	1,498	m/s <sup>2</sup>
<b>uvjet sigurnosti:</b>		
$\psi_1(z)$	0,620	
$\Gamma_1$	1,286	
$a_{0,min}^*(max)$	1,416	m/s <sup>2</sup>
	2,823	m/s <sup>2</sup>
$a_0^*/a_{0,min}^*$	0,531 < 1 → <b>ne zadovoljava</b>	

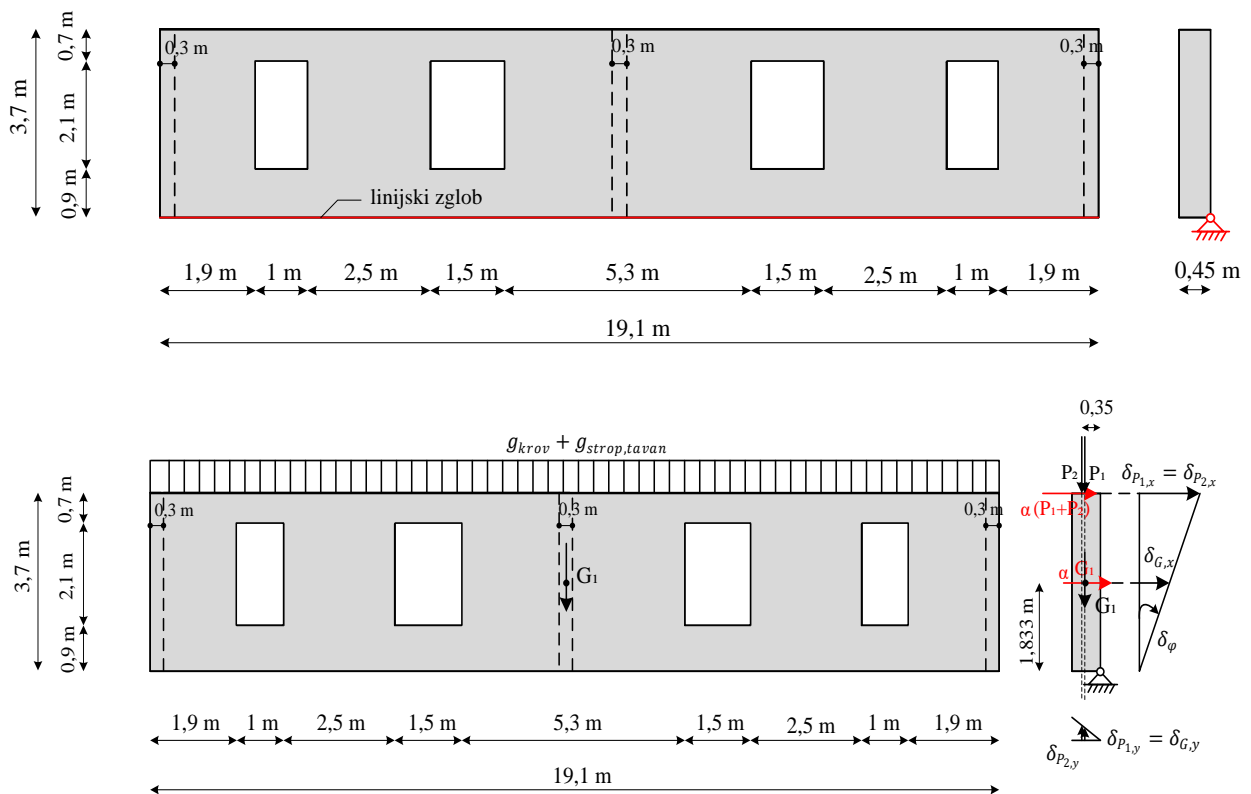
### 5.3.3 Mehanizam 3 – Cijela fasada (3. etaža)

Naredni primjer obrađuje otkazivanje čitave fasade 3. etaže. Fasadni zidovi preuzimaju opterećenja od stropnih konstrukcija, a obzirom da je ovaj fasadni zid, zid 3. etaže (zadnje etaže) on preuzima i vertikalno opterećenje od krovišta. Kod ovog mehanizma dolazi do formiranja linijskog zgloba na vanjskom licu zida, na spoju 2. i 3. etaže. Promatrani primjer

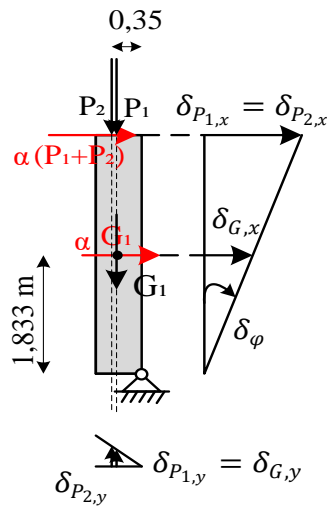
proračunava se bez utjecaja sile trenja. Te se i ovdje također radi o prevrtanju s jednim blokom.



Slika 32. Prikaz modela- otkazivanje cijele fasade 3. etaže



Slika 33a. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 3 – bez utjecaja trenja, primjer 3.1

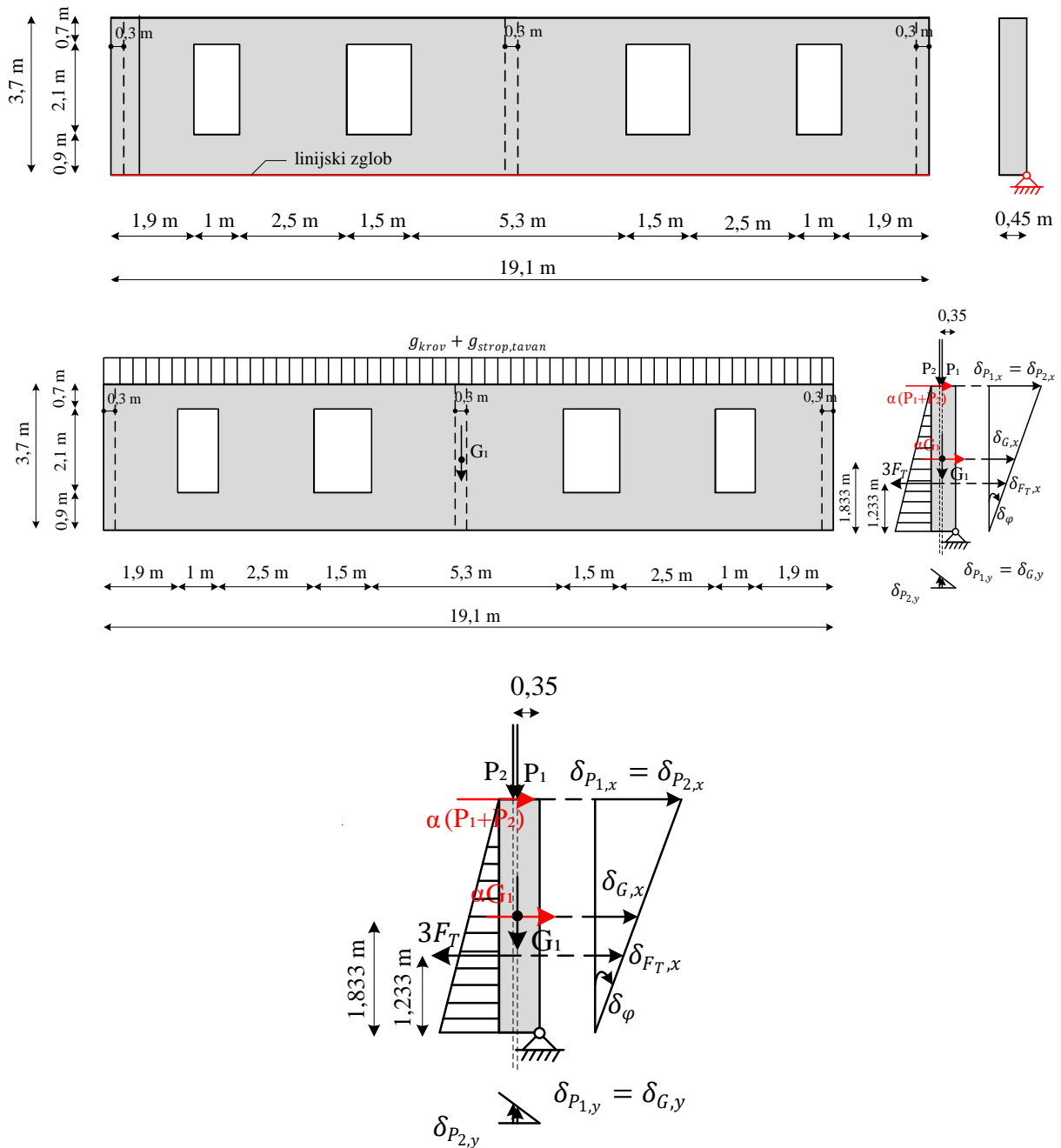


Slika 33b. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 3 – bez utjecaja trenja, primjer 3.1

Tablica 11. Proračun mehanizma 3 bez utjecaja trenja, primjer 3.1

Primjer 3.1. Cijela fasada - 3. etaža (bez utjecaja trenja)			Primjer 3.1. Cijela fasada - 3. etaža (bez utjecaja trenja) - nastavak		
geometrija mehanizma:			uvjet ravnoteže:		
$l$	19.1	m	$M_{stab}$	205,782	$kN/m^3$
$l_1$	1	m	$M_{nestab}$	2058,670	$kN/m$
$l_2$	1.5	m	$\alpha_0$	0,100	$kN/m$
$h$	3.7	m	jednadžba viruialnog rada:		
$h/2$	1.85	m	$\delta_{G,x}$	1,833	
$h_1$	2.1	m	$\delta_{G,y}$	0,225	
$h_1/2$	1.05	m	$\delta_{P1,x}$	3,7	
$b$	0.45	m	$\delta_{P2,x}$	3,7	
$b/2$	0.225	m	$\delta_{P1,y}$	0,225	
ulazne vrijednosti:			$\delta_{P2,y}$	0,35	
$\gamma$	18	$kN/m^3$	$\alpha_0$	0,100	
$z_T$	1.833	m	$F_c$	1,35	
$G_1$	493.452	$kN$	$M^*$	72,873	t
$g_{krov}$	6.05	$kN/m'$	$e^*$	0,888	
$g_{strop,tavan}$	10.285	$kN/m'$	$a_0^*$	0,818	$m/s^2$
$P_1(krov)$	115.555	$kN$	uvjet sigurnosti:		
$P_2(strop,tavan)$	196.444	$kN$	$\psi_1(z)$	0,620	
$S$	1.15		$\Gamma_1$	1,286	
$a_g$	2.462	$m/s^2$	$a_{0,min}^*(max)$	1,416	$m/s^2$
$q$	2			2,823	$m/s^2$
$S_e(T_1)$	7.08		$a_0^*/a_{0,min}^*$	0,290 < 1 → ne zadovoljava	
$H$	22.9	m			
$z$	14.2	m			

U primjeru 3.2 proračunava se mehanizam iz prethodnog primjera 3.1 uz dodatak utjecaja sile trenja. Sila trenja djeluje na spojevima s 3 bočna zida. Širina zidova je 30 cm (vanjski i unutarnji). Kao što je već spomenuto, iznos sile trenja proračunavan je preko dva izraza, a odabran je onaj iznosom manji tj. onaj proračunat izrazom (28). Uz djelovanje sile trenja također se, kao i u prethodnom primjeru, uzima u obzir djelovanje stropnog opterećenja tavana i vertikalno opterećenje krovišta.



Slika 34. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 3 - uz utjecaj trenja, primjer 3.2



Tablica 12. Proračun mehanizma 3 uz utjecaj trenja, primjer 3.2

Primjer 3.2. Cijela fasada - 3.etaža (uz utjecaja trenja)		
geometrija mehanizma:		
$l$	19,1	m
$l_1$	1	m
$l_2$	1,5	m
$h$	3,7	m
$h/2$	1,85	m
$h_1$	2,1	m
$h_1/2$	1,05	m
$b$	0,45	m
$b/2$	0,225	m
ulazne vrijednosti:		
$s$	0,3	m
$n$	56,923	
$\varphi$	0,448	
$\rho$	0,448	
$\gamma$	18	kN/m <sup>3</sup>
$z_T$	1,833	m
$G_1$	493,452	kN
$F_{T,1}$	34,904	kN
$g_{krov}$	6,05	kN/m'
$g_{strop,tavan}$	10,285	kN/m'
$P_1(krov)$	115,555	kN
$P_2(strop,tavan)$	196,444	kN
$S$	1,15	
$a_g$	2,462	m/s <sup>2</sup>
$q$	2	
$S_e(T_1)$	7,08	
$H$	22,9	m
$z$	14,2	m

Primjer 3.2. Cijela fasada - 3.etaža (uz utjecaja trenja) - nastavak		
uvjet ravnoteže:		
$M_{stab}$	334,893	kN/m <sup>3</sup>
$M_{nestab}$	2058,670	kN/m
$\alpha_0$	0,163	kN/m
jednadžba viruialnog rada:		
$\delta_{G,x}$	1,833	
$\delta_{G,y}$	0,225	
$\delta_{P1,x}$	3,7	
$\delta_{P2,x}$	3,7	
$\delta_{F_T,x}$	1,233	
$\delta_{P1,y}$	0,225	
$\delta_{P2,y}$	0,35	
$\alpha_0$	0,163	
$F_c$	1,35	
$M^*$	72,873	t
$e^*$	0,888	
$a_0^*$	1,332	m/s <sup>2</sup>
uvjet sigurnosti:		
$\Psi_1(z)$	0,620	
$\Gamma_1$	1,286	
$a_{0,min}^*(max)$	1,416	m/s <sup>2</sup>
	2,823	m/s <sup>2</sup>
$a_0^*/a_{0,min}^*$	0,472 < 1 → ne zadovoljava	

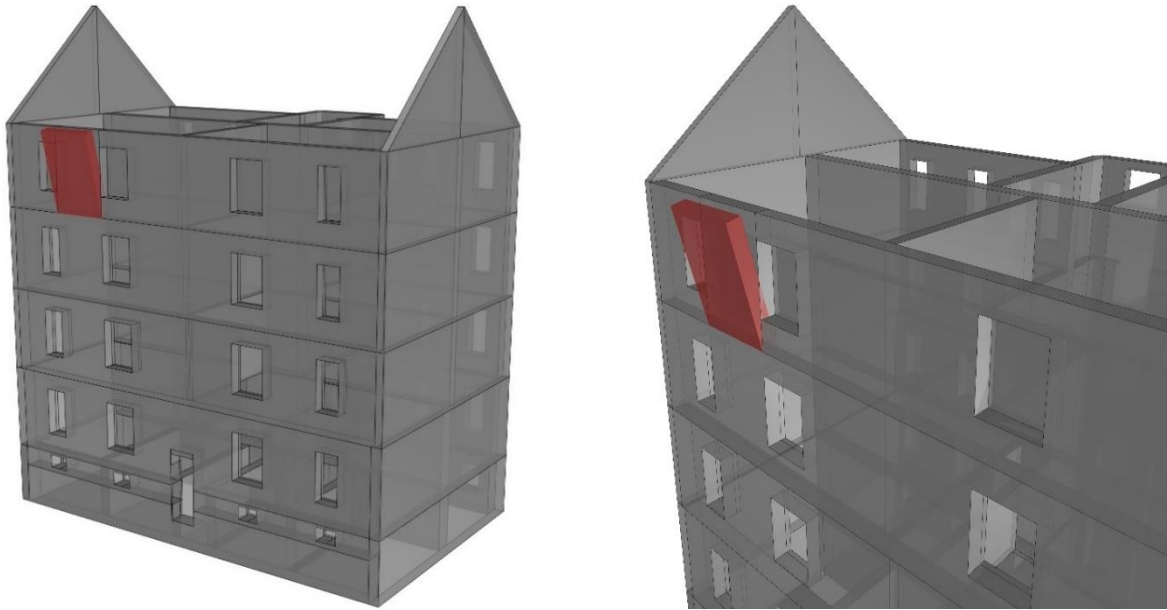


Tablica 13. Proračun mehanizma 3 – uvlačenje linijskog zgloba (drobljenje), primjer 3.3

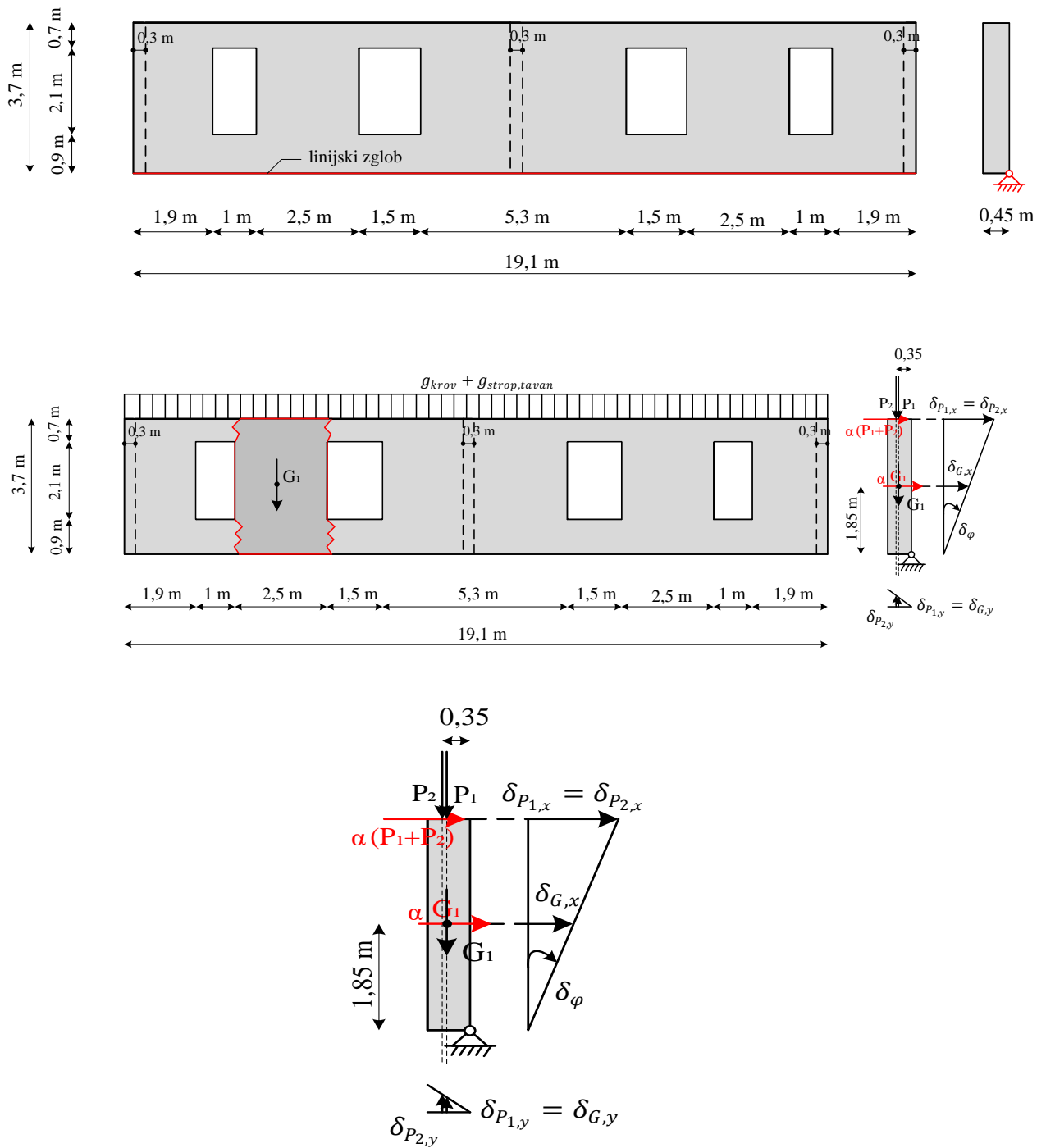
Primjer 3.3. Cijela fasada - 3. etaža (bez utjecaja trenja) - drobljenje			Primjer 3.3. Cijela fasada - 3. etaža (bez utjecaja trenja) - drobljenje - nastavak		
<b>geometrija mehanizma:</b>			<b>uvjet ravnoteže:</b>		
L	19,1	m	<b>Mstab</b>	199,727	kN/m <sup>3</sup>
l <sub>1</sub>	1	m	<b>Mnestab</b>	2058,670	kN/m
l <sub>2</sub>	1,5	m	<b>α<sub>0</sub></b>	0,097	kN/m
h	3,7	m	<b>jednadžba viruialnog rada:</b>		
h/2	1,85	m	<b>δ<sub>G,x</sub></b>	1,833	
h <sub>1</sub>	2,1	m	<b>δ<sub>G,y</sub></b>	0,217	
h <sub>1</sub> /2	1,05	m	<b>δ<sub>P1,x</sub></b>	3,7	
b	0,45	m	<b>δ<sub>P2,x</sub></b>	3,7	
b/2	0,225	m	<b>δ<sub>P1,y</sub></b>	0,217	
<b>ulazne vrijednosti:</b>			<b>δ<sub>P2,y</sub></b>	0,342	
γ	18	kN/m <sup>3</sup>	<b>α<sub>0</sub></b>	0,097	
z <sub>T</sub>	1,833	m	<b>F<sub>C</sub></b>	1,35	
λ	0,588		<b>M*</b>	72,873	t
R	805,451	kN	<b>e*</b>	0,888	
f <sub>d</sub>	3,3 MPa=N/mm <sup>2</sup>		<b>a<sub>0</sub>*</b>	0,794	m/s <sup>2</sup>
t	7,517	mm	<b>uvjet sigurnosti:</b>		
b/2-t	0,217	m	<b>ψ<sub>1</sub>(z)</b>	0,620	
d-t	0,342	m	<b>Γ<sub>1</sub></b>	1,286	
b-t	0,442	m	<b>a<sub>0,min</sub><sup>*</sup>(max)</b>	1,416	m/s <sup>2</sup>
G <sub>1</sub>	493,452	kN		2,823	m/s <sup>2</sup>
g <sub>krov</sub>	6,05	kN/m'	<b>a<sub>0</sub><sup>*</sup>/a<sub>0,min</sub><sup>*</sup></b>	0,281 < 1 →	<b>ne zadovoljava</b>
g <sub>strop,tavan</sub>	10,285	kN/m'			
P <sub>1(krov)</sub>	115,555	kN			
P <sub>2(strop,tavan)</sub>	196,444	kN			
S	1,15				
a <sub>g</sub>	2,462				
q	2				
S <sub>e</sub> (T <sub>1</sub> )	7,08				
H	22,9	m			
z	14,2	m			

### 5.3.4 Mehanizam 4 – Otkazivanje parapeta 3. etaže

Kod primjera 4 proračunava se otkazivanje parapeta 3. etaže. Kao što je ranije u ovom radu spominjano otkazivanje parapeta predstavlja jedan od najčešćih tipova otkazivanja zidova izvan ravnine kod zidanih zgrada. Radi se o prevrtanju s jednim blokom, te se za ovaj konkretni primjer promatra utjecaj vlastite težine bloka, opterećenje stropne konstrukcije tavana kao i vertikalno opterećenje krovišta.



Slika 36. Prikaz modela – otkazivanje parapeta 3. etaže



Slika 37. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 4 – otkazivanje parapeta, primjer 4

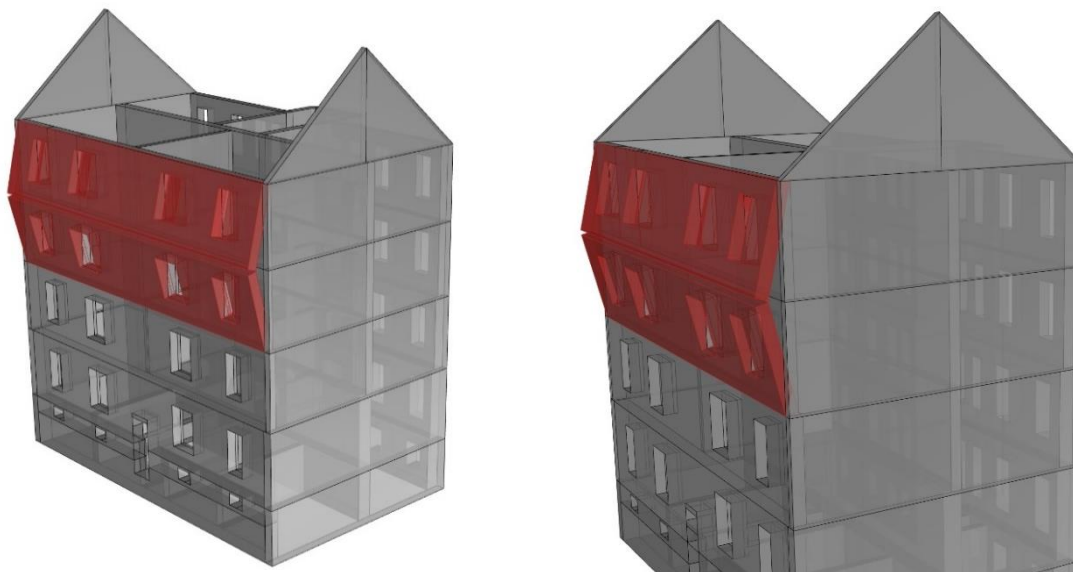
Tablica 14. Proračun mehanizma 4 – otkazivanje parapeta, primjer 4

Primjer 4. Parapet - 3.etaža			Primjer 4. Parapet - 3.etaža - nastavak		
geometrija mehanizma:			uvjet ravnoteže:		
$l$	2.5	m	$M_{stab}$	29.261	kN/m <sup>3</sup>
$h$	3.7	m	$M_{nstab}$	289.710	kN/m
$h/2$	1.85	m	$\alpha_0$	0.101	kN/m
$b$	0.45	m	jednadžba viruialnog rada:		
$b/2$	0.225	m	$\delta_{G,x}$	1.850	
ulazne vrijednosti:			$\delta_{G,y}$	0.225	
$\gamma$	18	kN/m <sup>3</sup>	$\delta_{P1,x}$	3.7	
$z_T$	1.850	m	$\delta_{P2,x}$	3.7	
$G_1$	74.925	kN	$\delta_{P1,y}$	0.225	
$g_{krov}$	6.05	kN/m'	$\delta_{P2,y}$	0.35	
$g_{strop,tavan}$	10.285	kN/m'	$\alpha_0$	0.101	
$P_1(krov)$	15.125	kN	$F_c$	1.35	
$P_2(strop,tavan)$	25.7125	kN	$M^*$	10.491	t
$S$	1.15		$e^*$	0.889	
$a_g$	2.462	m/s <sup>2</sup>	$a_0^*$	0.83	m/s <sup>2</sup>
$q$	2		uvjet sigurnosti:		
$S_e(T_1)$	7.08		$\psi_1(z)$	0.620	
$H$	22.9	m	$\Gamma_1$	1.286	
$z$	14.2	m	$a_{0,min}^*(max)$	1.416	m/s <sup>2</sup>
				2.823	m/s <sup>2</sup>
			$a_0^*/a_{0,min}^*$	0.292 < 1 → ne zadovoljava	

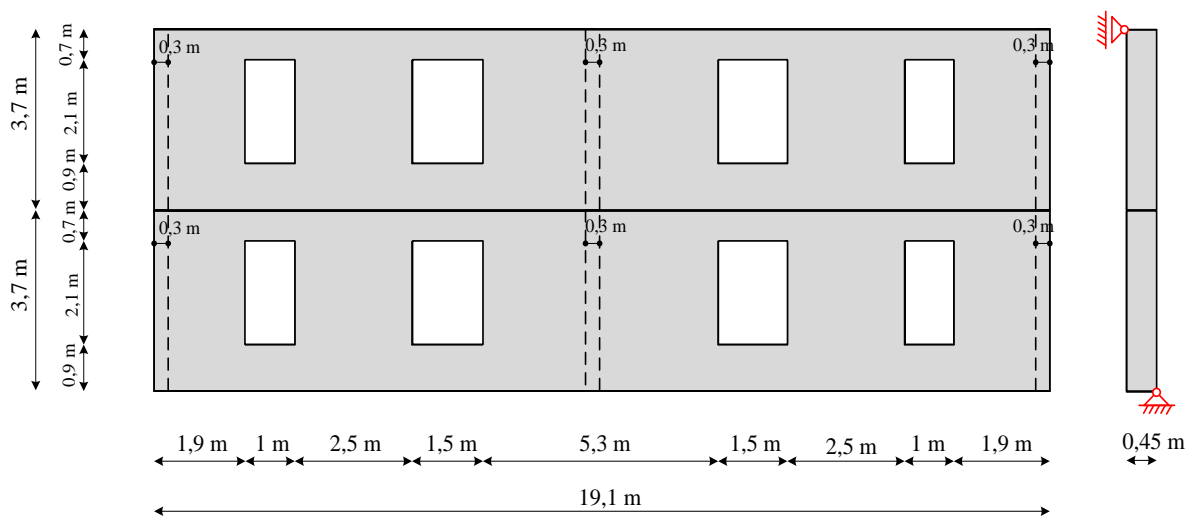
### 5.3.5 Mehanizam 5 – Cijela fasada (2. i 3. etaža)

Kao posljednji primjer proračunava se mehanizam sastavljen od dva tijela, što čini kinematički lanac. Ovaj kinematički lanac sastoji se od fasadnih zidova 2. i 3. etaže. Na mjestu sastava ta dva zida dolazi do formiranja unutarnjeg zgloba, dok se linijski zglob formira na visini od 10,5 m. Za mogućnost formiranja ovakvog mehanizma na konstrukciji moraju biti osigurani adekvatni spojevi na gornjem rubu (npr. armiranobetonska obodna greda). Pri proračunu ovog primjera nije uzet u obzir utjecaj sile trenja. Opterećenja koja su uzeta u obzir i djeluju na blok 3. etaže su njezina vlastita težine, opterećenje stropne

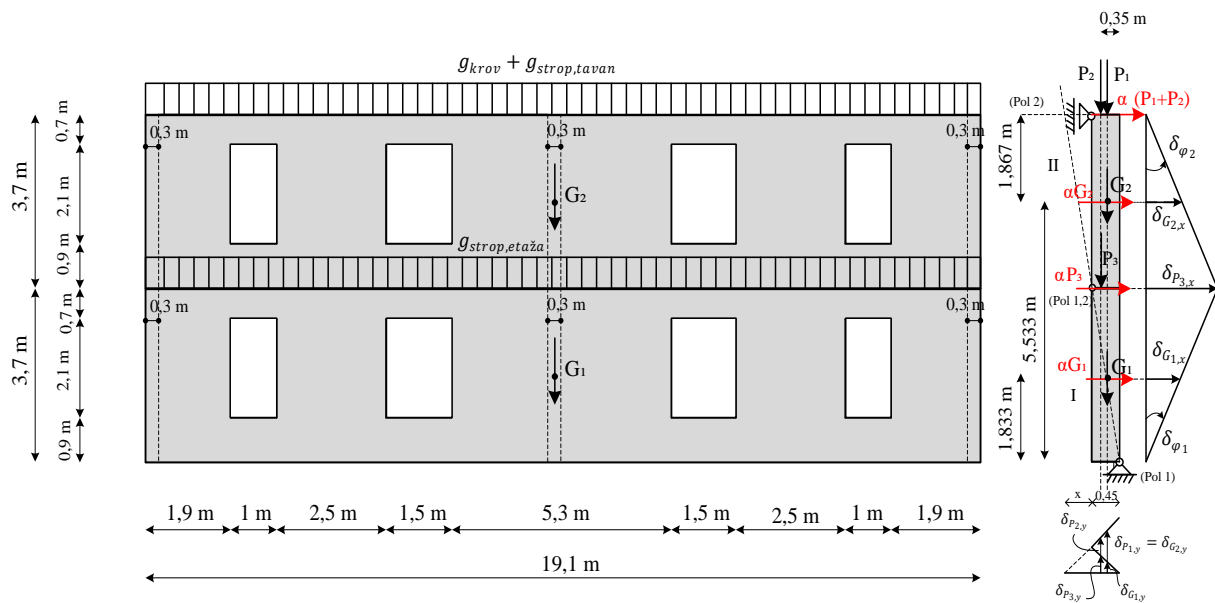
konstrukcije tavana te vertikalno opterećenja krovišta, dok na blok 2. etaže djeluje njezina vlastita težina i opterećenje stropne konstrukcije od 2. etaže.



Slika 38. Prikaz modela - otkazivanje cijele fasade (2. i 3. etaža)



Slika 39a. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 5 bez utjecaja trenja, primjer 5



Slika 39b. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 5 bez utjecaja trenja, primjer 5



Tablica 15. Proračun mehanizma 5 - bez utjecaja trenja, primjer 5

Primjer 5. Cijela fasada - 2. i 3. etaža (bez utjecaja trenja)			Primjer 5. Cijela fasada - 2. i 3. etaža (bez utjecaja trenja) - nastavak		
geometrija mehanizma:			uvjet ravnoteže:		
$l$	19.1	m	$M_{stab}$	715.083	$\text{kN/m}^3$
$l_1$	1	m	$M_{nestab}$	2723.412	$\text{kN/m}$
$l_2$	1.5	m	$\alpha_0$	0.263	$\text{kN/m}$
$h$	3.7	m	jednadžba virtualnog rada:		
$h/2$	1.85	m	$\delta_{\varphi_1} = \delta_{\varphi_2}$		
$h_1$	2.1	m	$x$	0.45	m
$h_1/2$	1.05	m	$\delta_{G1,x}$	1.833	
$b$	0.45	m	$\delta_{G1,y}$	0.225	
$b/2$	0.225	m	$\delta_{G2,x}$	1.867	
ulazne vrijednosti:			$\delta_{G2,y}$	0.675	
$\gamma$	18	$\text{kN/m}^3$	$\delta_{P1,x}$	0	
$z_{T1}$	1.833	m	$\delta_{P2,x}$	0	
$z_{T2}$	5.533	m	$\delta_{P3,x}$	3.7	
$G_1$	493.452	kN	$\delta_{P1,y}$	0.675	
$G_2$	493.452	kN	$\delta_{P2,y}$	0.55	
$g_{krov}$	6.05	$\text{kN/m}'$	$\delta_{P3,y}$	0.35	
$g_{strop,tavan}$	10.285	$\text{kN/m}'$	$\alpha_0$	0.263	
$g_{strop,etaža}$	12.705		$F_C$	1.35	
$P_1$ (krov)	115.555	kN	$M^*$	112.858	t
$P_2$ (strop,tavan)	196.444	kN	$e^*$	0.718	
$P_3$ (strop,etaža)	242.666	kN	$a_0^*$	2.657	$\text{m/s}^2$
$S$	1.15		uvjet sigurnosti:		
$a_g$	2.462		$\psi_1(z)$	0.459	
$q$	2		$\Gamma_1$	1.286	
$S_e(T_1)$	7.08		$a_{0,min}^*(max)$	1.416	$\text{m/s}^2$
$H$	22.9	m		2.087	$\text{m/s}^2$
$z$	10.5	m	$a_0^*/a_{0,min}^*$	1.273	$> 1 \rightarrow$ zadovoljava

## 6. ZAKLJUČAK

Završni rad obrađivao je temu otkazivanja zidova izvan ravnine, a osim takvog otkazivanja postoji i ono u ravnini. Kod otkazivanja izvan ravnine krucijalni trenutak jest kada moment destabilizirajućih sila premaši moment stabilizirajućih sila. Stabilizirajuće sile su one koje djeluju u smjeru promatranog zida, dok su destabilizirajuće one koje djeluju okomito na taj zid. Zaključujemo da će stabilnosti ziđa pridonijeti adekvatna povezanost sa pregradnim zidovima, međukatnim konstrukcijama, krovnim konstrukcijama kao i postojanje serklaža (vertikalnih i horizontalnih).

Prije samog proračuna navedene pojave, objašnjeni su teorem kinematike krutog tijela, teorem virtualnog rada i Kenndeyjev teorem. Također, objašnjeni su i postupci linearne i nelinearne kinematičke analize. Postupkom linearne kinematičke analize određujemo faktor aktivacije pojedinog mehanizma, dok nelinearnim postupkom uzimamo u obzir kapacitet pomaka nakon same aktivacije. Objasnjena je i situacija drobljenja ziđa što ima za posljedicu uvlačenje linijskog zgloba unutar debljine ziđa, a prikazan je i učinak sile trenja na mehanizam.

U radu je proračunato 5 vrsta mehanizama. Prva 4 se sastoje od jednog tijela dok je posljednji sastavljen od dva tijela. Vidljivo je da samo mehanizam 5 zadovoljava uvjet sigurnosti, s faktorom aktivacije od 0,263. Promatrajući ostale primjere uočava se da je mehanizam 2 (primjer 2.1-lastavica zabata i zid 3. etaže) onaj s najmanjim faktorom aktivacije koji iznosi 0,046. Provedena analiza za drobljenja ziđa ukazuje na to da navedena pojava uzrokuje smanjenje faktora aktivacije odnosno povećava rizik od otkazivanja izvan ravnine. Također, proračuni su pokazali da utjecaj sile trenja povećava faktor aktivacije što rezultira smanjenjem opasnosti od otkazivanja, npr. kod mehanizma 3 primjer 3.1 bez utjecaja trenja faktor aktivacije iznosi 0,100 dok u primjeru 3.2 sa utjecajem trenja faktor aktivacije iznosi 0,163. Nelinearnim postupkom dokazano je da mehanizam 1 ne zadovoljava zahtjev sigurnosti ispitan preko kapaciteta spektralnog pomaka. Jednak rezultat za isti mehanizam dao je i proračun linearnim postupkom.

Provedene provjere na graničnog stanja u ovom radu temelje se na talijanskom propisu NTC2008, prema kriteriju SLV (tal. *stato limite di salvaguardia della vita*, granično stanje zaštite života).

Sve navedeno dovodi do zaključka da je odabrana zidana zgrada male otpornosti na potresno djelovanje te da su potrebne brojne promjene i dorade kako bi zadovoljila potrebnu sigurnost.

## 7. LITERATURA

- [1] Demšić, M. i Uroš, M.: Nastavni materijali objavljeni na platformi Merlin, bilješke s predavanja Mehanike 2
- [2] 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, <http://www.casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-72-2020-10-1-2966.pdf>
- [3] Uroš, M., Šavor Novak, M., Atalić, J., Sigmund, Z., Baniček, M., Demšić, M., Hak, S.: Procjena oštećenja građevina nakon potresa-postupak provođenja pregleda zgrada, GRAĐEVINAR, 72 (2020) 12, <http://www.casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-72-2020-12-1-2969.pdf>
- [3] Wienerberger: Miha Tomažević: Svjetski ekspert govori o potresnoj otpornosti zidanih zgrada i sigurnosti opeke,  
<https://www.wienerberger.hr/wienerberger-blog/porotherm/svjetski-ekspert-govori-o-potresnoj-otpornosti-zidanih-zgrada.html>
- [4] Demšić, M., Uroš, M., Šavor Novak, M., Atalić, J., Baniček, M.: Proračun postojećih konstrukcija u seizmički aktivnim područjima, bilješke s predavanja Dinamika konstrukcija
- [5] Demšić, M., Sruk, M.: Proračun zidova na otkazivanje izvan ravnine,  
[https://www.hkig.hr/docs/Opatija\\_2021/prezentacije/01-web\\_prezentacije/Potresno%20in%C5%BEenjerstvo/Prora%C4%8Dun%20zidova%20na%20otkazivanje%20izvan%20ravnine.pdf](https://www.hkig.hr/docs/Opatija_2021/prezentacije/01-web_prezentacije/Potresno%20in%C5%BEenjerstvo/Prora%C4%8Dun%20zidova%20na%20otkazivanje%20izvan%20ravnine.pdf)
- [6] Demšić, M., Šavor Novak, M.: Spektar odziva, nastavni materijali kolegija Dinamika konstrukcija i potresno inženjerstvo
- [7] Fresl, K. : Bilješke s predavanja Građevne statike 1,  
<http://grad.hr/nastava/g1/g1/g1.pdf>
- [8] Fresl, K.: Nastavni materijali Građevne statike 1 objavljeni na stranici,  
<https://www.grad.hr/nastava/g1/g1/g1.pdf>
- [9] Uroš, M., Todorić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lakušić, S.(ur.): Potresno inženjerstvo-Obnova zidanih zgrada, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2021.

[10] Karte potresnih područja Republike Hrvatske,

<http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/karta.php>

[11] Kraus, I.: Spektri potresnog odziva plitko temeljenih konstrukcija na mekim tlima, Doktorski rad, <https://core.ac.uk/download/pdf/197869382.pdf>

## 8. POPIS SLIKA

Slika 1: Sustav materijalnih točaka koji povezan u cjelinu tvori kruto tijelo

Slika 2: Stupnjevi slobode krutog tijela u prostoru

Slika 3: Pravocrtna i krivolinijska translacija [1]

Slika 4: Rotacijsko gibanje krutog tijela [1]

Slika 5: Vektori položaja točaka A i B [1]

Slika 6: Projekcije brzina točaka A i B na njihovu spojnicu [1]

Slika 7: Kinematička ograničenja za tijelo u ravnini: nepomični zglob, pomični zglob, klizni spoj i upeti/klizni spoj (shematsko označavanje, pomaci i sile koje prenose, prilagođeno prema [1])

Slika 8: Statički određen sustav (1), jedan put statički neodređen sustav (2), mehanizma s jednim stupnjem slobode (3) i mehanizam s dva stupnja slobode (4)

Slika 9: Primjer mehanizama [1]

Slika 10: Primjer trenutnog mehanizma (tri zgloba na pravcu) [1]

Slika 11: Trozglobni nosač sa proizvoljno zadanim vanjskim opterećenjima

Slika 12: Unutarnje sile odabranog trozglobnog nosača [1] Slika 11: Plan pomaka za reakciju H [1]

Slika 13: Plan pomaka za reakciju H [1]

Slika 14: Uobičajeni tipovi mehanizama kod zidanih zgrada [4]

Slika 15: Primjer otkazivanja zidova izvan ravnine na realnim zgradama [4] [9]

Slika 16: Primjer postupnog smanjenja kraka stabilizirajućeg momenta

Slika 17: Proračun primjera sa slike 16 uz dijagram odnosa sila-pomak

Slika 18: Odnos sila-pomak za krute i deformabilne blokove kod otkazivanja izvan ravnine [9]

Slika 19: Promjena položaja linijskog zgloba [4]

Slika 20: Pogled i presjek zgrade

Slika 21: Tlocrti etaža zgrade

Slika 22: Volumni model zgrade (pogled na ulično pročelje)

Slika 23. Volumni model zgrade (pogled na stražnje pročelje)

Slika 24. Vrijednosti ubrzanja tla za odabrano područje [10]

Slika 25. Elastični spektar odziva za  $a_g = 0,251$  i tip tla C

Slika 26. Prikaz modela - otkazivanja zabata

Slika 27. Raspodjela naprezanja za lastavicu zabata - linearni proračun, primjer 1.1

Slika 28. Kapacitet pomaka lastavice zabata - nelinearni proračun, primjer 1.2

Slika 29. Prikaz modela – otkazivanje zabata i 3. etaže

Slika 30a. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 2 bez utjecaja trenja, primjer 2.1

Slika 30b. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 2 bez utjecaja trenja, primjer 2.1

Slika 31. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 2 uz utjecaj trenja, primjer 2.2

Slika 32. Prikaz modela- otkazivanje cijele fasade 3. etaže

Slika 33a. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 3 – bez utjecaja trenja, primjer 3.1

Slika 33b. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 3 – bez utjecaja trenja, primjer 3.1

Slika 34. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 3 - uz utjecaj trenja, primjer 3.2

Slika 35. Prikaz uvlačenja linijskog zgloba – drobljenje, primjer 3.3

Slika 36. Prikaz modela – otkazivanje parapeta 3. etaže

Slika 37a. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 4 – otkazivanje parapeta, primjer 4

Slika 37b. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 4 – otkazivanje parapeta, primjer 4

Slika 38. Prikaz modela - otkazivanje cijele fasade (2. i 3. etaža)

Slika 39a. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 5 bez utjecaja trenja, primjer 5

Slika 39b. Prikaz raspodjele naprezanja za mehanizam 5 bez utjecaja trenja, primjer 5

## 9. POPIS TABLICA

Tablica 1. Drveni grednik

Tablica 2. Stropovi stambene etaže

Tablica 3. Strop tavana

Tablica 4. Konstrukcija krovišta

Tablica 5. Vrijednost parametara koje opisuju preporučeni elastični spektar

Tablica 6. Prikaz konstanti i oznaka korištenih u proračunu

Tablica 7. Proračun lastavice zabata linearnim proračunom, primjer 1.1

Tablica 8. Proračun lastavice zabata nelinearnim proračunom, primjer 1.2

Tablica 9. Proračun mehanizma 2 bez utjecaja trenja, primjer 2.1

Tablica 10. Proračun mehanizma 2 uz utjecaj trenja, primjer 2.2

Tablica 11. Proračun mehanizma 3 bez utjecaja trenja, primjer 3.1

Tablica 12. Proračun mehanizma 3 uz utjecaj trenja, primjer 3.2

Tablica 13. Proračun mehanizma 3 – uvlačenje linijskog zgloba (drobljenje), primjer 3.3

Tablica 14. Proračun mehanizma 4 – otkazivanje parapeta, primjer 4

Tablica 15. Proračun mehanizma 5 - bez utjecaja trenja, primjer 5