

# Procjena otpornosti postojeće armiranobetonske okvirne konstrukcije

---

Đukanović, Tihana

Master's thesis / Diplomski rad

2025

*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:237:301067>

*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

Tihana Đukanović

**PROCJENA OTPORNOSTI POSTOJEĆE  
ARMIRANOBETONSKE OKVIRNE  
KONSTRUKCIJE**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Tihana Đukanović

**PROCJENA OTPORNOSTI POSTOJEĆE  
ARMIRANOBETONSKE OKVIRNE  
KONSTRUKCIJE**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Mario Uroš

Zagreb, 2025.



University of Zagreb  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Tihana Đukanović

**SEISMIC ASSESSMENT OF THE EXISTING  
REINFORCED CONCRETE FRAME**

MASTER THESIS

Supervisor: izv. prof. dr. sc. Mario Uroš

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet



**OBRAZAC 3**

**POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA**

Student/ica :

Tihana Đukanović

(Ime i prezime)

0082061841

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

PROCJENA OTPORNOSTI POSTOJEĆE ARMIRANOBETONSKE OKVIRNE KONSTRUKCIJE

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

SEISMIC ASSESSMENT OF THE EXISTING REINFORCED CONCRETE FRAME

(Naslov teme diplomskog rada 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 diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

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

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

19.02.2025.

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Mario Uroš

Potpis mentora:

Komentor:



Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet



OBRAZAC 5

## IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

Tihana Đukanović, 0082061841

(Ime i prezime, JMBAG)

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

Procjena otpornosti postojeće armiranobetonske okvirne konstrukcije

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

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

Datum:

19.02.2025.

Potpis:



**OBRAZAC 6**

**IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA**

Ja :

Tihana Đukanović, 05958171969

(Ime i prezime, OIB)

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

Procjena otpornosti postojeće armiranobetonske okvirne konstrukcije

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

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

izv. prof. dr. sc. Mario Uroš

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

27.02.2025.

(Datum obrane)

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

Datum:

19.02.2025.

Potpis:

## ZAHVALE

Iskreno zahvaljujem prof. Mariju Urošu na predanom mentorstvu tijekom izrade ovog diplomskog rada, na uloženom vremenu, strpljenju i nesebičnom dijeljenju svog znanja, čija mi je podrška bila od neizmjerne pomoći.

Također, od srca zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima koji su svojim neizmjernim razumijevanjem, podrškom i lijepim trenucima obogatili i uljepšali ovo divno studentsko putovanje.



## SAŽETAK

U ovom radu analizirana je otpornost postojeće armiranobetonske okvirne konstrukcije. Odabrana je početna geometrija koja predstavlja tipičnu okvirnu konstrukciju izgrađenu tijekom druge polovice 20. stoljeća. Pri proračunu su uzeti u obzir pretpostavljeni ulazni podaci, uključujući kvalitetu betona i armature te količinu i raspored armature. Za analizu konstrukcije korišten je programski paket Abaqus, pri čemu je beton modeliran volumnim konačnim elementima, dok su za armaturu korišteni štapni elementi. Kako bi se što preciznije simuliralo ponašanje plastifikacije elemenata okvira, primijenjeni su nelinearni materijalni modeli. Ponašanje betona modelirano je korištenjem *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) modela, koji omogućuje precizniju simulaciju nelinearnog ponašanja betona pod opterećenjem, uključujući pojavu pukotina i degradaciju čvrstoće. Na temelju dobivenih rezultata definirane su krivulje kapaciteta plastičnih zglobova na kritičnim dijelovima konstrukcije. Daljnji proračun izveden je primjenom nelinearne statičke metode postupnog guranja s koncentriranom plastičnošću, koristeći programski paket ETABS. Provedene su dvije analize temeljene prema normi HRN EN-1998, i dvije analiza prema američkom standardu za ocjenu i poboljšanje seizmičke otpornosti postojećih građevina ASCE 41. U završnom dijelu rada uspoređeni su rezultati, dan je kritički osvrt te su izneseni zaključci i smjernice za buduća istraživanja.

**Ključne riječi:** armiranobetonska okvirna konstrukcija, procjena otpornosti, metoda postupnog guranja, numerički model, nelinearna analiza, krivulje kapaciteta, plastični zglob

## SUMMARY

In this paper, the structural resistance of an existing reinforced concrete frame structure is analyzed. The initial geometry was selected to represent a typical frame structure built during the second half of the 20th century. The calculations take into account assumed input data, including the quality of concrete and reinforcement, as well as the quantity and arrangement of reinforcement. The structural analysis was performed using the Abaqus software package, where the concrete was modeled with solid finite elements, while the reinforcement was represented using beam elements. To accurately simulate the plasticization behavior of the frame elements, nonlinear material models were applied. The behavior of concrete was modeled using the Concrete Damaged Plasticity (CDP) model, which allows for a more precise simulation of the nonlinear behavior of concrete under loading, including crack formation and strength degradation. Based on the obtained results, capacity curves of plastic hinges were defined at critical sections of the structure. Further calculations were carried out using the nonlinear static pushover method with concentrated plasticity, utilizing the ETABS software package. Two analyses were performed according to the HRN EN-1998 standard, and two analyses were conducted following the American ASCE 41 standard for seismic assessment and retrofitting of existing buildings. In the final part of the study, the results were compared, a critical review was provided, and conclusions and guidelines for future research were presented.

**Key words:** reinforced concrete frame structure, resistance assessment, pushover method, numerical model, nonlinear analysis, capacity curves, plastic hinge.

## SADRŽAJ

<b>ZAHVALE</b> .....	<b>i</b>
<b>SAŽETAK</b> .....	<b>ii</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>iii</b>
<b>SADRŽAJ</b> .....	<b>iv</b>
<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1. Okvirne konstrukcije .....	1
1.2. Pristup seizmičkom projektiranju .....	3
1.2.1. Izbor plastičnog mehanizma .....	4
1.2.2. Granična stanja u projektiranju .....	5
<b>2. METODE SEIZMIČKOG PRORAČUNA</b> .....	<b>6</b>
2.1. Nelinearni statički proračun .....	6
2.1.1. Metoda postupnog guranja .....	7
2.1.1.1. Metoda N2 .....	7
<b>3. TEHNIČKI OPIS POSTOJEĆE AB OKVIRNE KONSTRUKCIJE</b> .....	<b>11</b>
3.1. Početna geometrija i ulazni podatci .....	11
<b>4. NUMERIČKI MODEL U ABAQUSU</b> .....	<b>15</b>
4.1. Opis numeričkog modela .....	15
4.2. Rezultati .....	19
4.2.1. S1-vrh stupa .....	27
4.2.2. S2-vrh stupa .....	29
4.3. Pushover krivulja .....	32
<b>5. NUMERIČKI MODEL U ETABS-u PREMA HRN EN 1998-3</b> .....	<b>33</b>
5.1. Definiranje momentnog plastičnog zgloba .....	37
5.2. Definiranje plastičnog zgloba na poprečnu silu u stupovima .....	38
5.3. U analizi je u obzir uzet utjecaj uzdužne sile u stupovima .....	39
5.4. U analizi nije u obzir uzet utjecaj uzdužne sile u stupovima .....	45
5.5. Pushover analiza .....	48
5.5.1. Faze formiranja plastičnih zglobova .....	49
5.5.1.1. Pushover krivulja modela sa utjecajem uzdužne sile .....	51
5.5.1.2. Pushover krivulja modela bez utjecaja uzdužne sile .....	52
5.5.2. Usporedba pushover krivulja dviju analiza u ETABS-u .....	52
5.5.3. Sa utjecajem uzdužne sile .....	54
5.5.4. Bez utjecaja uzdužne sile .....	55
<b>6. Numerički model u etabsu ASCE 41-13</b> .....	<b>56</b>

---

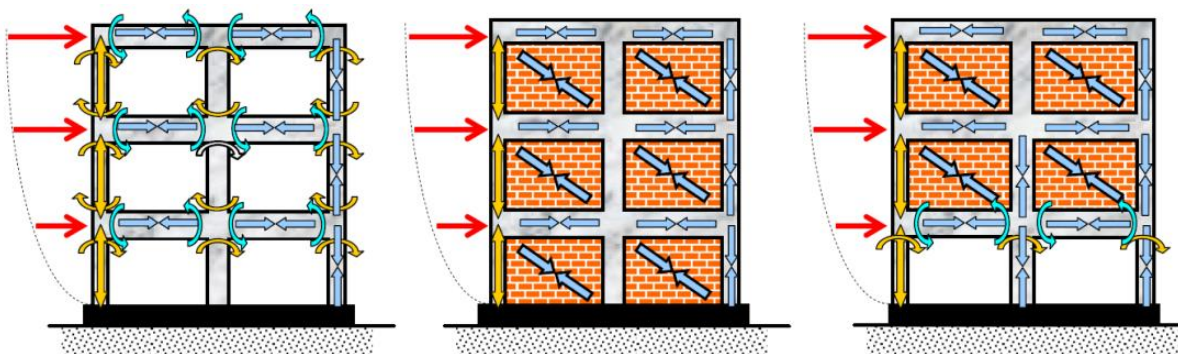
6.1.	Krivulje kapaciteta definirane za <i>Condition 2</i> .....	59
6.1.1.	Pushover krivulja prema ASCE 41-13 za <i>Condition 2</i> .....	61
6.2.	Krivulje kapaciteta definirane za <i>Condition 3</i> .....	62
6.2.1.	Pushover krivulja prema ASCE 41-13 za <i>Condition 3</i> .....	63
<b>7.</b>	<b>USPOREDBA REZULTATA</b> .....	<b>64</b>
<b>8.</b>	<b>ZAKLJUČAK</b> .....	<b>69</b>
8.1.	Neposredni zaključci iz provedenih analiza .....	69
8.2.	Smjernice za daljnja istraživanja .....	70
	<b>POPIS LITERATURE</b> .....	<b>71</b>
	<b>POPIS SLIKA</b> .....	<b>72</b>
	<b>POPIS TABLICA</b> .....	<b>75</b>

## 1. UVOD

Prilikom potresnog djelovanja ponašanje konstrukcije je složeno. Uzimajući u obzir oscilacije, dinamiku, nelinearna svojstva materijala i interakciju elemenata glavna je ideja takvo ponašanje maksimalno kontrolirati sa pravilnim rasporedom i dobrom vezom između elemenata (krutom dijafragmom) te simetrijom konstrukcije uz prikladne temelje. Putovi prijenosa potresnih sila moraju biti jasni i postojani uz jednoliku raspodjelu mase i krutosti po visini i u oba tlocrtna smjera. [1]

### 1.1. Okvirne konstrukcije

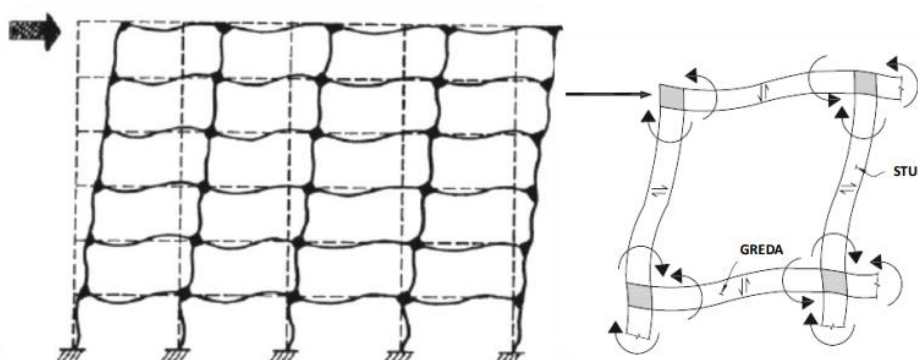
Okvirni sustav ili „*Moment resisting frame*“ se sastoji od stupova i greda u dva okomita pravca i jedan je od klasičnih statičkih sustava u građevinarstvu. U Eurokodu je definiran kao: „konstrukcijski sustav u kojem se vertikalna i horizontalna opterećenja uglavnom preuzimaju prostornim okvirnim konstrukcijama čija posmična otpornost u podnožju zgrade premašuje 65% ukupne posmične otpornosti cijelog konstrukcijskog sustava“ [2]. Na slici 1 su prikazane vrste armiranobetonskih okvira.



Slika 1 Vrste armiranobetonskih okvira [1]

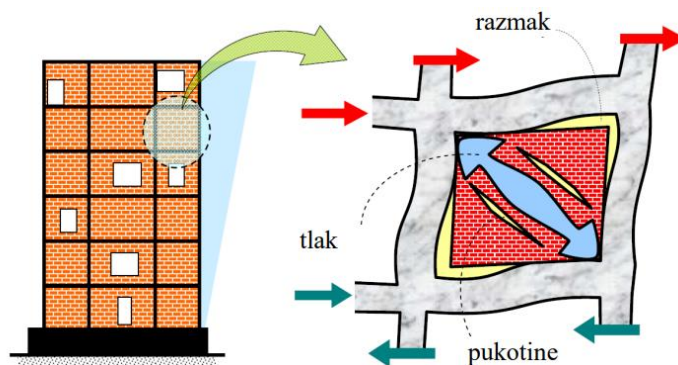
Posmično (horizontalno) opterećenje se u konstrukcijama povećava prema podnožju zgrade što direktno utječe na dimenzije stupova i greda, ali i količinu armature u elementima. [3] Problem nastaje kod postojećih starih okvirnih konstrukcija koje ne sadrže dovoljno poprečne armature te uslijed posmičnog opterećenja dolazi do krkog sloma. S tim se problemom susreće grad Zagreb, ali i ostatak Republike Hrvatske. Uzmemo li u obzir da do 1945. godine nisu postojali propisi koji bi uzimali u obzir potresno opterećenje i da je u Zagrebu samo 5% stambenih jedinica izgrađeno od 2013. do danas te zadovoljavaju 100% mjerodavnog potresnog opterećenja, javlja se pitanje u kakvim mi zgradama živimo i kako procijeniti njihovu potresnu otpornost. [1]

Priključci greda i stupova osiguravaju stabilnost, a horizontalno opterećenje se većinski preuzima njihovim savijanjem. Dok relativni odnos između fleksijske krutosti stupa i fleksijske krutosti greda određuje deformaciju konstrukcijskog sustava po visini, uz pravilno projektiranje ovi sustavi mogu ispuniti zahtjeve visoke duktilnosti konstrukcije. [1] Općenito na krutost okvira pri horizontalnom djelovanju utječu veličine raspona polja koje su uobičajeno 6 – 9 m, prostorni broj ravnina okvira, broj polja u okviru te dimenzije stupova i visine greda. Sukladno tome, može se reći da je krutost okvira većinski definirana sa krutosti pojedinih elemenata okvira na savijanje. Iz toga proizlazi činjenica da prilikom projektiranja povećanjem dimenzija debljine stupa i visine grede, povećavamo ukupnu krutost sustava. Na slici 2 prikazane su deformacije okvira zajedno sa reznim silama u pripadnim elementima stupova i greda. [3]



Slika 2 Deformacija AB okvira [3]

Statički sustav okvirne konstrukcije sa ispunom ima učestalu primjenu u Europi i to za zgrade visoke do trideset katova. Pogrešno bi bilo smatrati da dodavanjem zidne ispune ona ne sudjeluje u prijenosu sila, dapače, djeluje kao tlačna dijagonala i doprinosi krutosti okvira. Izvodi se nakon što beton okvirne konstrukcije očvrstne te se najčešće dodatno zidna ispuna povezuje sponama kako ne bi došlo do ispadanja iz ravnine okvira. Uslijed većih deformacija dolazi do odvajanja zidne ispune od okvira i javljaju se dijagonalne pukotine unutar zidne ispune kao što je prikazano na slici 3.[1], [3]



Slika 3 Odvajanje zidne ispune od okvira uslijed velike deformacije [1]

Problem kod ovih konstrukcija se javlja u praksi, obzirom da vlasnici zgrade često uklanjaju pojedine dijelove ispune čime se proračun i projektirano stanje razlikuju od stvarno izvedenog stanja. Konstrukcija je time svakako oslabljena, ali joj se i bitno mijenja seizmičko ponašanje u vidu prijenosa sile.

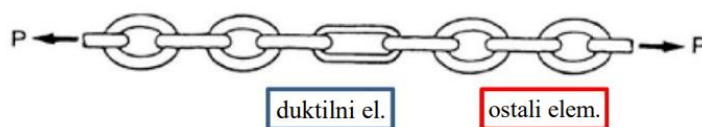
## 1.2. Pristup seizmičkom projektiranju

Prilikom potresnih događaja horizontalne sile mogu biti jako velike ukoliko je zahtijevan elastičan odgovor konstrukcije. Eurokod kaže da u slučaju takvog izvanrednog opterećenja, štetu treba ograničiti, a ne spriječiti.

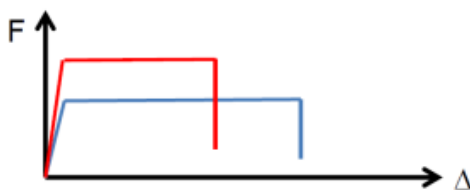
U tradicijskom projektiranju kriteriji su takvi da dozvoljavaju znatna oštećenja jer na taj način konstrukcija troši energiju potresa, a jedini je kriterij da rušenje nije dozvoljeno i da konstrukcija mora ostati stabilna do kraja potresa. Navedeno ne vrijedi za građevine od velike važnosti kojima je oštećenje ograničeno kako bi ostale funkcionalne (nuklearne elektrane, bolnice, važni mostovi, brane,...). [1]

Novi pristup projektiranju uvodi pojam kapacitivnog dimenzioniranja. Ideja je da se prilikom projektiranja izabere povoljan mehanizam koji bi u slučaju potresa omogućio konstrukciji da razvije duktilnost i dosegne velike pomake. To bi značilo da se definiraju kapaciteti deformacije u plastičnom zglobu. Kvalitetnim projektiranjem detalja bi se tako izbjegli kruti slomovi, a kapacitet deformacije bi bio dovoljno velik, dok bi ostala područja bila dimenzionirana tako da ostanu u elastičnom području.[1]

Primjenom kapacitivnog dimenzioniranja osigurava se da najduktilniji element ujedino ima i najmanju nosivost, odnosno da u njemu prvom dolazi do plastifikacije. Ovaj pristup osigurava da se elementi ponašaju na željeni način pod opterećenjem, s naglaskom na duktilnost, odnosno sposobnost elemenata da apsorbiraju deformacije prije loma. Ostali elementi ostaju u elastičnom području. Na slici 4 vidimo lanac koji simbolizira konstrukcijski sustav, gdje su različiti elementi označeni kao duktilni elementi (plavo) i ostali elementi (crveno).



**Slika 4** Shematski prikaz ideje kapacitivnog projektiranja [1]

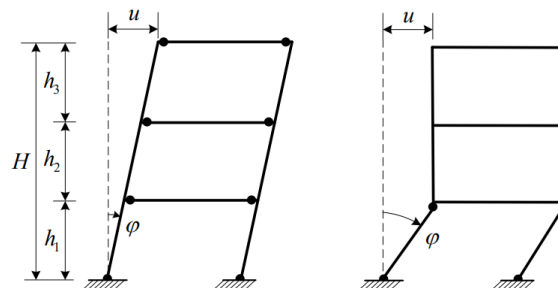


**Slika 5** Dijagram sila-pomak kod kapacitivnog projektiranja [1]

Dijagram sa slike 5 prikazuje silu  $F$  u odnosu na pomak  $\Delta$ . Duktilni elementi (plavi) omogućavaju veću deformaciju prije loma, dok ostali elementi (crveni) mogu biti kruti ili manje duktilni. Povećanje nosivosti elastičnih elemenata ne mijenja ukupni kapacitet sile i pomaka jer elastični elementi mogu nositi veće sile, ali ako duktilni elementi ograničavaju pomake, tada ukupni deformacijski kapacitet ostaje nepromijenjen. Dakle, ako je sustav serijski povezan, najslabija karika određuje ponašanje cijelog sustava. Duktilni elementi kontroliraju ukupni deformacijski kapacitet sustava i povećanje njihove duktilnosti doprinosi većoj otpornosti sustava na deformacije prije konačnog loma.

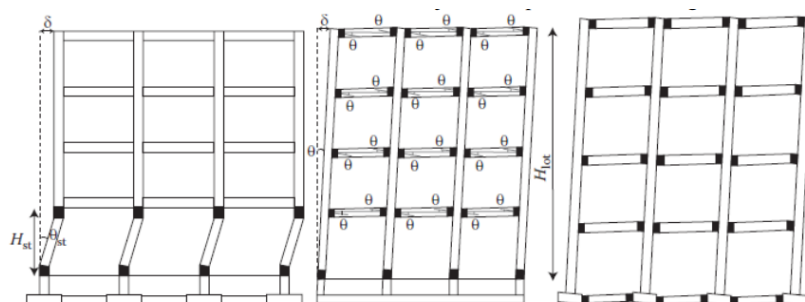
### 1.2.1. Izbor plastičnog mehanizma

Prilikom projektiranja cilj je izabrati mehanizam koji izaziva minimalne lokalne deformacije, odnosno minimalnu rotaciju i zakrivljenost za jednak ukupni pomak konstrukcije. Na slici 6 je prikazano kako različitim odabirom mehanizma za jednak globalni pomak konstrukcija ima različitu vrstu otkazivanja.



Slika 6 Plastični mehanizmi na okvirnoj konstrukciji [1]

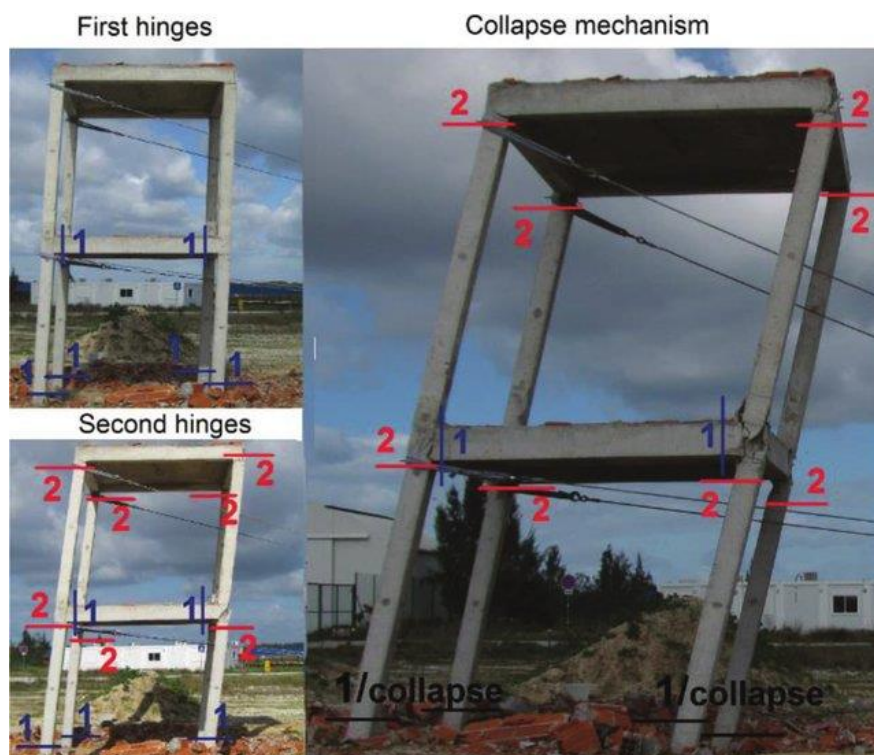
Na slici 7 su prikazana tri osnovna načina otkazivanja okvirne konstrukcije. S lijeva na desno, prikazan je mehanizam „mekanog kata“ u kojem stupovi u razini jedne etaže konstrukcije otkazuju. Rezultat je to više parametara, a čvrstoća i armatura imaju presudnu ulogu. Razlog mogu biti i veliki otvori na nižim katovima, nejednolika raspodjela krutosti i masa po visini zgrade, promjena materijala ili tipa konstrukcije. Slijedi mehanizam sa „jakim“ stupovima i u konačnici mehanizam sa „slabim“ gredama. Iz priloženog se može zaključiti da je za okvirnu konstrukciju najpovoljnije izabrati mehanizam sa jakim stupovima i slabim gredama jer izaziva minimalne lokalne deformacije sustava.



Slika 7 Plastični mehanizmi na okvirnoj konstrukciji [1]



Na slici 8 prikazana je pojava prvih plastičnih zglobova na rubovima greda stvarne okvirne konstrukcije (označeno brojem 1) i totalni kolaps konstrukcije sa pojavom plastičnih zglobova na vrhovima stupova (pod oznakom broja 2).



Slika 8 Mehanizam sloma okvira [4]

### 1.2.2. Granična stanja u projektiranju

U slučaju potresa cilj je zaštititi ljudske živote, ograničiti oštećenja konstrukcije, osigurati njezinu funkcionalnost (posebno kod važnih građevina) i spriječiti urušavanje građevine. U propisima su definirana granična stanja koje osiguravaju prethodno navedene ciljeve. Za projektiranje novih konstrukcija razlikujemo Granično stanje nosivosti (GSN) i Granično stanje uporabljivosti (GSU). Navedena granična stanja nisu primjenjiva za već postojeće konstrukcije pa za njih razlikujemo:

- 1) Granično stanje ograničenog oštećenja (OO)
- 2) Granično stanje značajnog oštećenja (ZO)
- 3) Granično stanje blizu rušenja (BR)

Konstrukcija ne bi smjela otkazati naglo čak i za djelovanje potresa za velike povratne periode ni kod jako rijetkih potresa sa povratnim periodom od 1500 do 2000 godina. Navedeno granično stanje je od iznimne važnosti kod postojećih zgrada jer nisu građene prema standardima današnjih propisa. Zbog toga je bitno znati procijeniti otpornosti postojeće zgrade o čemu će biti riječ u nastavku rada.

## 2. METODE SEIZMIČKOG PRORAČUNA

Prilikom proračuna potresne unutarnje sile potrebno je kombinirati druge unutarnje sile uzrokovane stalnim i promjenjivim opterećenjem. Europska norma EN 1998-3: 2011 navodi pet metoda prikazanih u Tablici 1:

**Tablica 1** Metode proračuna potresne unutarnje sile prema EN 1998-3 [5]

METODE PRORAČUNA	
Proračun bočnih sila	Linearno-elastični i statički proračun
Modalni proračun primjenom spektra odziva	Linearno-elastični i statički proračun
Metoda postupnog guranja	Nelinearni statički proračun
Proračun primjenom vremenskog zapisa (eng. <i>Time history</i> )	Nelinearni dinamički proračun
Pristup s faktorom $q$	

U nastavku ovog rada naglasak će biti na primjeni metode postupnog guranja.

### 2.1. Nelinearni statički proračun

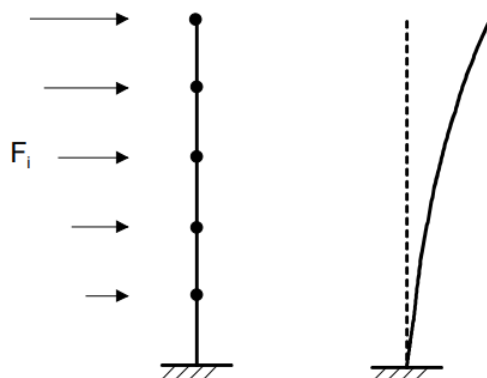
Brojnim istraživanjima se utvrdilo da treba posvetiti pažnju kontroli oštećenja konstrukcije, a to se postiže uvođenjem nelinearnosti u proračun. Matematički model koji se koristi u elastičnom proračunu podrazumijeva elastično ponašanje elemenata u kojem materijal konstrukcije ostaje u linearno-elastičnom području što odnos između deformacije i nosivosti čini jednostavnim, ali ne i točnim pri seizmičkom djelovanju koje je složeno. Kada pojedini elementi konstrukcije premaše pripadnu granicu linearno-elastičnog ponašanja i dođe do pojave oštećenja, važno je poznavati materijalnu nelinearnost i znati provesti nelinearni proračun. [1]

Trebao bi biti definiran bilinearni odnos sile i deformacije na razini elementa. Dozvoljeno je pretpostaviti da je krutost jednaka nuli nakon popuštanja materijala kao i pretpostavka o trilinearnoj ovisnosti sile i deformacije koja u obzir uzima različitu krutost nakon raspucavanja. Obzirom da se odavno javila potreba za proračunom koji uzima u obzir nelinearni odgovor konstrukcije na seizmičko djelovanje, u novoj generaciji propisa za projektiranje novih i sanaciju oštećenih građevina implementirani su koncepti osnovani na ponašanju konstrukcije

(eng. *performance based engineering*). Jedna od takvih metoda je i metoda postupnog guranja (eng. *Pushover Analysis*).[6], [7]

### 2.1.1. Metoda postupnog guranja

Metoda postupnog guranja je nelinearni proračun sa konstantnim gravitacijskim opterećenjem i monotono rastućim horizontalnim opterećenjem koje se nanosi kontrolom pomaka. Horizontalne sile je potrebno rasporediti i nanijeti po visini konstrukcije u razini kata, na takav način da približno odgovaraju prvoj vlastitoj frekvenciji konstrukcije kao što je prikazano na slici 9.



Slika 9 Raspodjela sila po visini konstrukcije[6]

Sile se povećavaju u inkrementima uz simultano praćenje odgovora konstrukcije, a mjerodavno je praćenje pomaka čvora na najvišem katu u odnosu na ukupno apliciranu horizontalnu silu. Ideja je da se u konačnici, navedenim proračunom, dobije „krivulja kapaciteta nosivosti“ (dalje u tekstu: eng. *Pushover curve*) koja određuje odnos promatranog pomaka i poprečne sile podnožja te služi za procjenu otpornosti konstrukcije na seizmičko djelovanje. Postupak se može vršiti do gubitka stabilnosti, potpune degradacije statičkog sustava ili do dosezanja zahtijevanog pomaka. [6]

Primjena navedenog proračuna je dozvoljena u provjeri odgovora konstrukcija novih zgrada, ali i već postojećih gdje najčešće pronalazi svoju primjenu. [2], [5] Eurokod navodi da je metoda primjenjiva u:

- procjeni očekivanih plastičnih mehanizama
- za raspodjelu oštećenja pod potresnim opterećenjem
- u ocjeni ponašanja postojeće ili obnovljene zgrade prema normi EN 1998-3

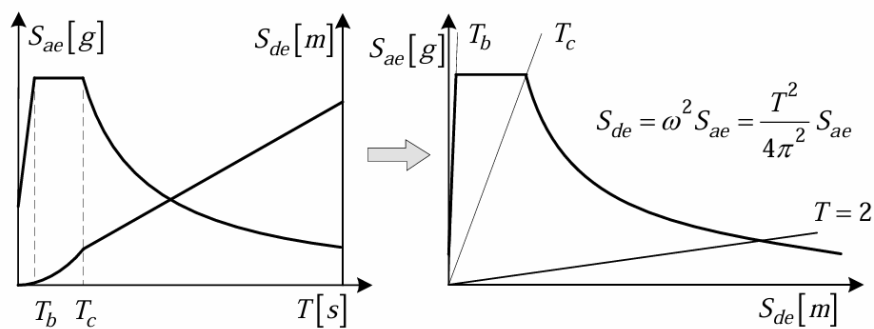
#### 2.1.1.1. Metoda N2

U Europskoj normi EN 1998-1: 2004 je definiran 'Proračun ciljanog pomaka' (eng. *target displacement*) za nelinearnu statičku analizu postupnim guranjem. Proračun je opisan

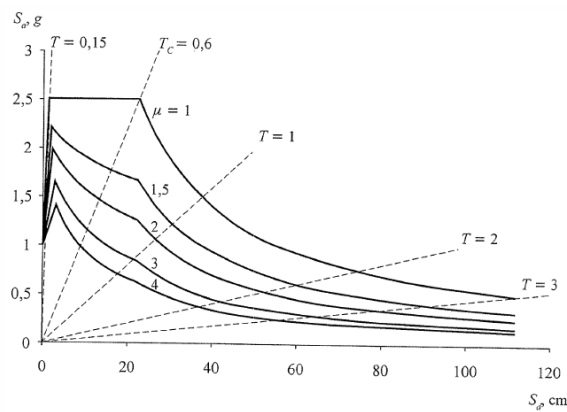
metodom N2 gdje slovo N označava da je riječ o nelinearnoj analizi, a broj 2 znači da su primijenjena 2 matematička modela. [7]

Za provođenje analize potrebno je prvo definirati ulazne podatke kao što su geometrija, materijali, nosivost elemenata, nelinearni parametri koji podrazumijevaju plastične zglobove i dijagrame kapaciteta nosivosti te je potrebno pripremiti model za nelinearni proračun te provjeriti dobru uvjetovanost modela zajedno sa konvergencijom modela. [1]

U drugom koraku je potrebno pripremiti spektar u zapisu ubrzanje – pomak, *AD* (eng. *Acceleration - Displacement*) koji je rezultat eliminacije vremenske dimenzije iz elastičnog spektra pseudoubrzanja, slika 10. Nelinearni spektar u AD formatu je dobiven iz elastičnog spektra korištenjem niza jednažbi i ima konstantne faktore duktilnosti  $\mu$ , kao što je prikazano na slici 11.



Slika 10 Pretvorba elastičnog spektra odziva u AD format [1]



Slika 11 Nelinearni spektar u AD formatu sa konstantnim  $\mu$  [1]

Sljedeći je korak metoda postupnog guranja za koju je potrebno odrediti krivulju kapaciteta za konstrukcije s više stupnjeva slobode. Potrebno je izabrati prikladnu raspodjelu bočnog opterećenja za što je nekad potrebno više pokušaja, ovisno o jednostavnosti konstrukcije. Definira se ukupna poprečna sila i odabere karakterističan pomak. Vektor bočnog opterećenja je definiran izrazom:

$$\mathbf{P} = p\Psi = p\mathbf{m}\Phi$$

gdje je:

- $p$  - intenzitet bočnog opterećenja
- $\Psi$  – raspodjela bočnog opterećenja
- $\mathbf{m}$  – dijagonalna matrica masa
- $\Phi$  – pretpostavljeni oblik pomaka

Bočna sila na  $i$ -tom katu je definirana sa izrazom:  $P_i = pm_i\Phi_i$ , dakle proporcionalna je komponenti  $\Phi_i$  pretpostavljenog oblika  $\Phi$  i umnošku mase  $i$ -tog kata. U slučaju nepromjenjivog i točno pretpostavljenog oblika pomaka, raspodjela bočnih sila trebala bi odgovarati raspodjeli efektivnih potresnih sila.

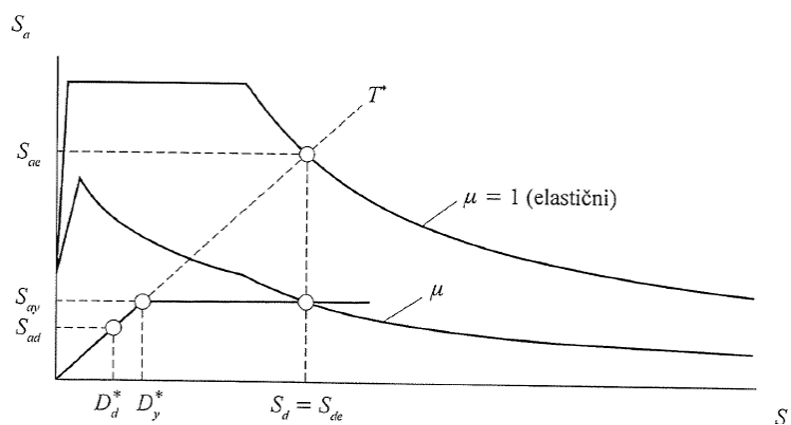
Obzirom da je spektar odziva definiran za 1 stupanj slobode prema seizmičkom zahtjevu na konstrukciju, u četvrtom je koraku dinamičkom jednadžbom (bez prigušenja) potrebno i konstrukciju svesti na ekvivalentni model s jednim stupnjem slobode. Dinamička jednadžba bez prigušenja glasi:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{R} = -\mathbf{m}\mathbf{1}a$$

gdje je:

- $\mathbf{m}$  – dijagonalna matrica masa
- $\mathbf{u}$  – vektor pomaka
- $\mathbf{R}$  – vektor unutarnjih sila
- $\mathbf{1}$  – jedinični vektor
- $a$  – ubrzanje podloge

Nadalje, u petom koraku se grafičkim ili analitičkim postupkom odredi potresni zahtjev za ekvivalentni sustav s 1 SS, na način koji je prikazan za period konstrukcije (kratki, srednji ili dugi). Na istoj se slici nacrtaju zahtijevani spektar i dijagram kapaciteta, pravac koji odgovara periodu  $T^*$  idealiziranog bilinearnog sustava. Presjecište s elastičnim spektrom definira zahtijevano ubrzanje  $S_{ae}$  (za područje u kojem konstrukcija ima elastično ponašanje) i pripadni zahtijevani elastični pomak  $S_{de}$ . Na slici 12 je prikazan grafički postupak određivanja potresnog zahtjeva.  $S_{ay}$  je ubrzanje na granici popuštanja i predstavlja kapacitet neelastičnog sustava i zahtijevano ubrzanje.



**Slika 12** Određivanje potresnog zahtjeva za ekvivalentni sustav s 1 SS [1]

Šesti korak je za definiranje potresnog zahtjeva za konstrukciju s više stupnjeva slobode. U ovom se koraku zahtijevani pomak sustava s jednim stupnjem slobode transformira u globalni zahtijevani pomak  $D_t$  sustava s više stupnjeva slobode. Ciljani pomak do kojeg se konstrukcija gura je definiran izrazom:

$$D^* = \frac{D_t}{\Gamma}$$

Guranje konstrukcije do ciljanog pomaka se radi za svaki smjer i za različite oblike opterećenja što uključuje one sa i bez ekscentricitetom.

Konačno, u posljednjem (sedmom) je koraku preostalo usporediti lokalne i globalne potresne zahtjeve s kapacitetom odgovarajućih razina ponašanja.

### 3. TEHNIČKI OPIS POSTOJEĆE AB OKVIRNE KONSTRUKCIJE

Za potrebe ovog rada promatra se armiranobetonski okvir s dvije etaže. Odabrana je početna geometrija koja predstavlja tipičnu okvirnu konstrukciju izgrađenu tijekom druge polovice 20. stoljeća. Pri proračunu su uzeti u obzir pretpostavljeni ulazni podaci, uključujući kvalitetu betona i armature te količinu i raspored armature.

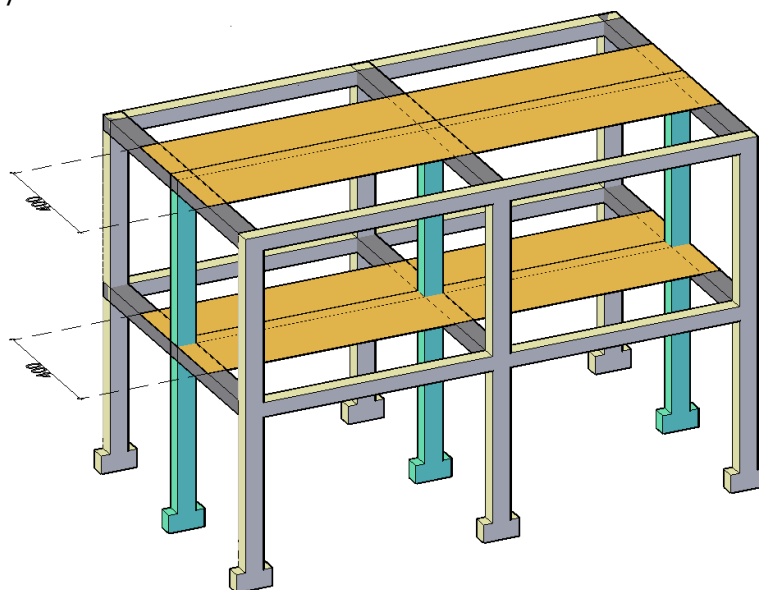
#### 3.1. Početna geometrija i ulazni podaci

Pretpostavljena kvaliteta betona je C20/25 i granica tečenja armature je GA240. Zaštitni sloj je 3 centimetra. Razmak okvira u prostoru je 4 metra kao što je prikazano na slici 13, zajedno sa pripadnom površinom ploče koja prenosi opterećenje na njega (oboјano žutom boјom). Opterećenje koje djeluje na konstrukciju je sljedeće:

$$V.T_{ploče} = 3 \text{ kN/m}^2$$

$$G = 3,5 \text{ kN/m}^2$$

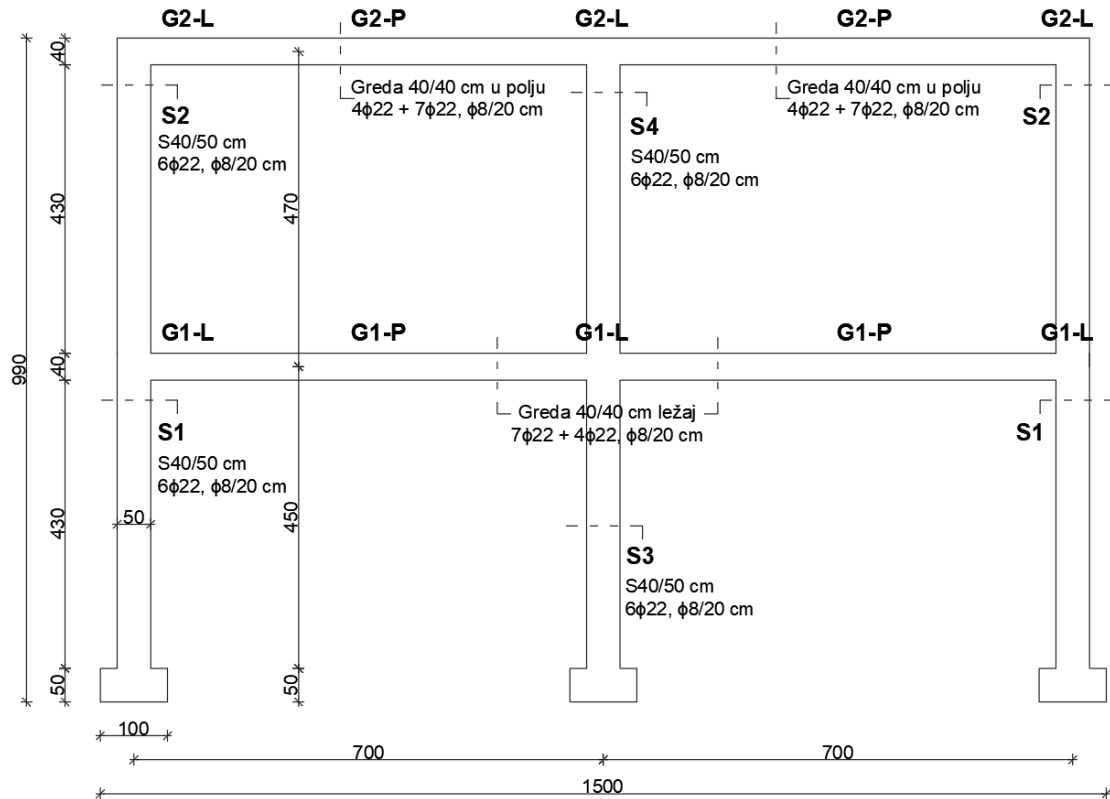
$$Q = 3 \text{ kN/m}^2$$



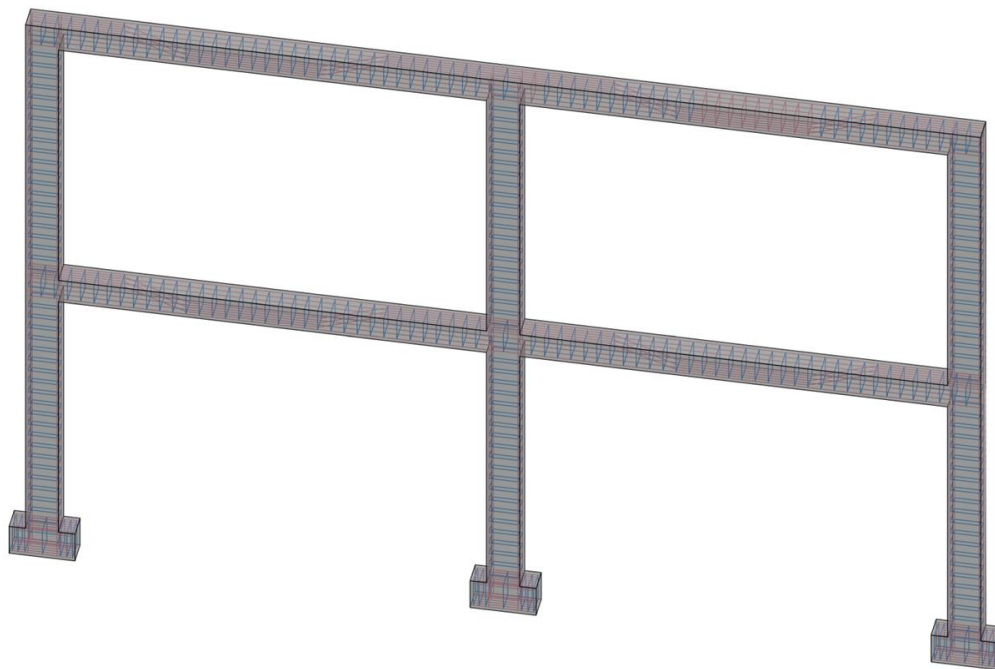
Slika 13 Prostorni prikaz AB okvira

Na slici 14 su prikazane dimenzije okvira sa pripadnim oznakama elemenata. Osni razmak stupova u ravnini okvira je 7 metara, dok su svijetle visine etaža jednake 4,2 metra. To čini 4,5 metara osne visine prve etaže i 4,7m osne visine druge etaže. Temelji su visine 0,5 m i širine 1 m. Ukupna visina promatrane konstrukcije je 9,9 metara zajedno sa temeljima. Stupovi su dimenzija 40/50 cm sa pripadnom uzdužnom armaturom 6 $\phi$ 22 i poprečnom  $\phi$ 8/20 cm. Greda je dimenzija 40/40 cm sa pripadnom uzdužnom armaturom 6 $\phi$ 22 i poprečnom  $\phi$ 8/20 cm.

Armatura se savija iz gornje u donju zonu. Na slikama 15 i 16 je prikaz 3D okvira modeliranog u AutoCad-u dok su u tablici 2 prikazani poprečni presjeci stupova i greda sa odgovarajućim rasporedom armature.

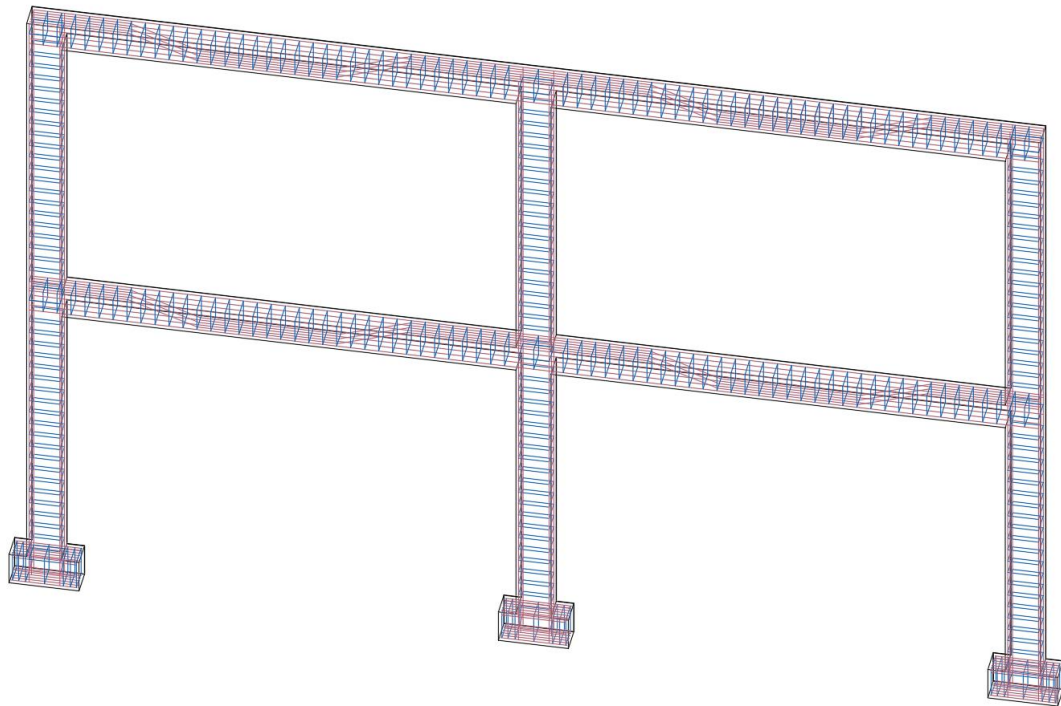


Slika 14 Dimenzije promatranog AB okvira i oznake elemenata

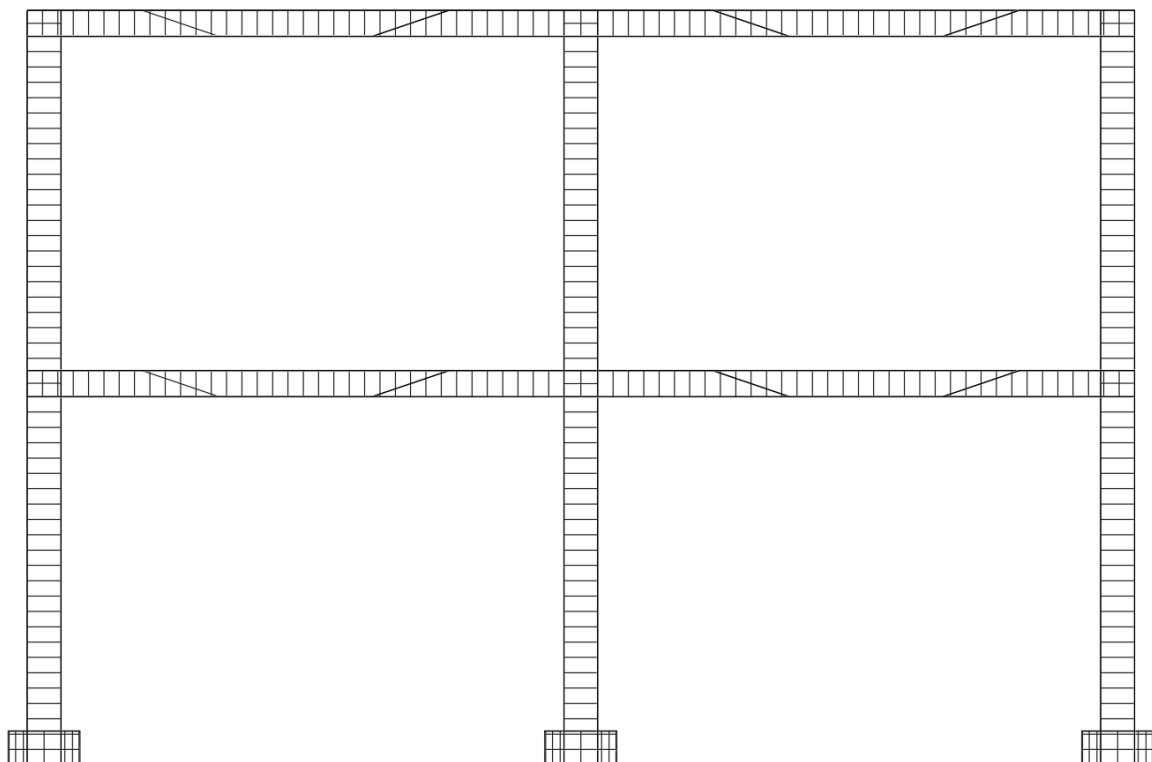


Slika 15 3D model okvira



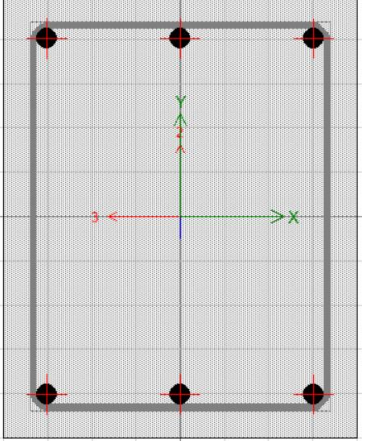
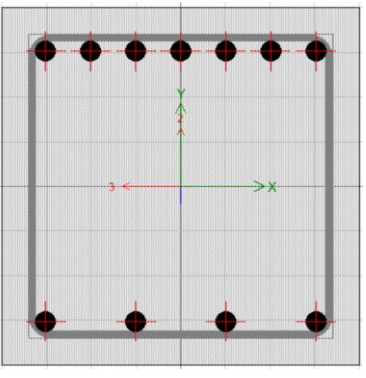
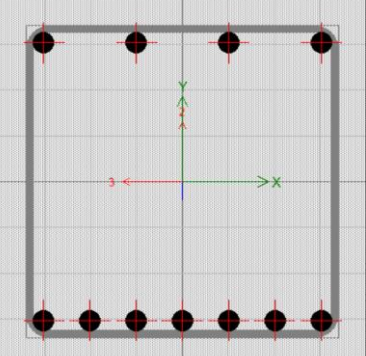


**Slika 16** 3D model okvira i prikaz armature



**Slika 17** Raspored armature okvira u pogledu

Tablica 2 Poprečni presjeci elemenata

ELEMENT	Uzdužna armatura	Poprečna armatura	
STUP 40/50 cm	6 $\phi$ 22	$\phi$ 8/20 cm	
GREDA nad ležajem 40/40 cm	7 $\phi$ 22 + 4 $\phi$ 22	$\phi$ 8/20 cm	
GREDA u polju 40/40 cm	4 $\phi$ 22 + 7 $\phi$ 22	$\phi$ 8/20 cm	

## 4. NUMERIČKI MODEL U ABAQUSU

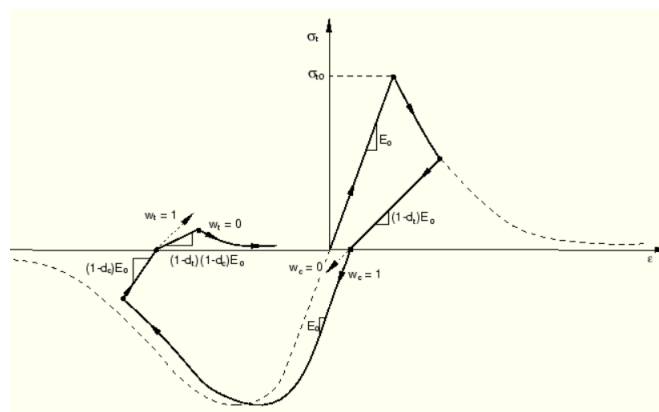
Numerička analiza armiranobetonske okvirne konstrukcije provedena je u računalnom paketu ABAQUS.

### 4.1. Opis numeričkog modela

Geometrija 3D modela prikazanog na slici 15 je importirana u vidu dijelova (eng. *parts*) u Abaqus te su joj pridruženi odgovarajući materijali. Betonski dio okvira je importiran kao volumni element. Za numeričko modeliranje ponašanja betona korišten je model oštećenja betona s plastičnošću (CDP – eng. “Concrete Damaged Plasticity”) kako bi se što vjerodostojnije opisali uvjeti složenih naprezanja. CDP model je vrlo dobro implementiran je u računalnom paketu Abaqus, a temelji se na teorijskom radu Lubliner et al. (1989.) [8] i proširenju koje su napravili Lee i Fenves (1998.). Ovaj model omogućuje istovremeno modeliranje plastičnih deformacija i oštećenja u betonskim konstrukcijama, uključujući i procjenu degradacije nosivosti uslijed pojave pukotina i plastičnih deformacija. [9] Na slici 18 je prikaz radnog dijagrama CDP modela betona opisanog u Abaqus dokumentaciji [10].

Kako bi se definirao CDP model potrebno je odrediti sljedeće parametre [11]:

- **Koeficijent dilatacije ( $\psi$ )** – opisuje kut razaranja tlačnog materijala
- **Ekscentričnost ( $e$ )** – povezana je s oblikom površine tečenja
- **Omjer inicijalne tlačne i vlačne čvrstoće ( $f_{b0}/f_{c0}$ )** – definira omjer vlačnih i tlačnih naprezanja
- **Omjer naprezanja u plastičnom području ( $Kc$ )** – opisuje promjenu oblika tečne površine tijekom plastifikacije
- **Viskoplastična regularizacija (vremenski parametar relaksacije)** – koristi se za stabilizaciju konvergencije u nelinearnim analizama



Slika 18 Primjer radnog dijagrama CDP betona [10]

Beton je pridružen volumnom elementu C3D8R dimenzija navedenih u tehničkom opisu konstrukcije (poglavlje 3.1.). Za navedene elemente je specifična reducirana integracija (postoji 1 točka integracije) zbog čega element često ne daje dovoljnu krutost pri savijanju. Naprezanje i deformacija su najtočnije definirane u točkama integracije, a one se nalaze u sredini elementa. Zbog toga je potrebno imati veću diskretizaciju, odnosno manji *mesh*. [12] U ovom modelu je zadan *mesh* od 50 mm na betonskom okviru kao što je prikazano na slici 19. CDP materijal je zadan sa sljedećim parametrima:

$$\begin{aligned}\rho &= 2,5E - 09 \text{ ton/mm}^3 \\ E &= 16714,20158 \text{ N/mm}^2 \\ \nu &= 0,2 \\ \psi &= 45 \\ e &= 0,1 \\ f_{bo}/f_{co} &= 1,16 \\ K &= 0,6667 \\ \text{Vremenski parametar relaksacije} &= 0,0015\end{aligned}$$

Ostali definirani parametri ovog CDP modela betona su prikazani u tablici 3.

Uvezena armatura je definirana linijski. Pridruženi su odgovarajući poprečni presjeci  $\phi 8$  za poprečnu i  $\phi 22$  za uzdužnu armaturu. Materijal je definiran elasto-plastičnim ponašanjem i pridružen B31 štapnim konačnim elementima. Element B31 ima dva čvora integracije i proširuje se u C3D8I element. U kombinaciji je moguće uhvatiti efekte savijanja, a zadan je *mesh* od 50 mm. [12] Parametri kojima je opisano elastično ponašanje u numeričkom modelu su prikazane u nastavku, a deformacije nastale u tom području su povratne.

$$\begin{aligned}\rho &= 7,85E - 09 \text{ ton/mm}^3 \\ E &= 182300,00 \text{ N/mm}^2 \\ \nu &= 0,3\end{aligned}$$

Plastično ponašanje dano je u tablici 4 i definirane su trajne deformacije nakon dosezanja granice tečenja od 240 MPa.

**Tablica 3** Parametri CDP materijala definiranog u Abaqusu

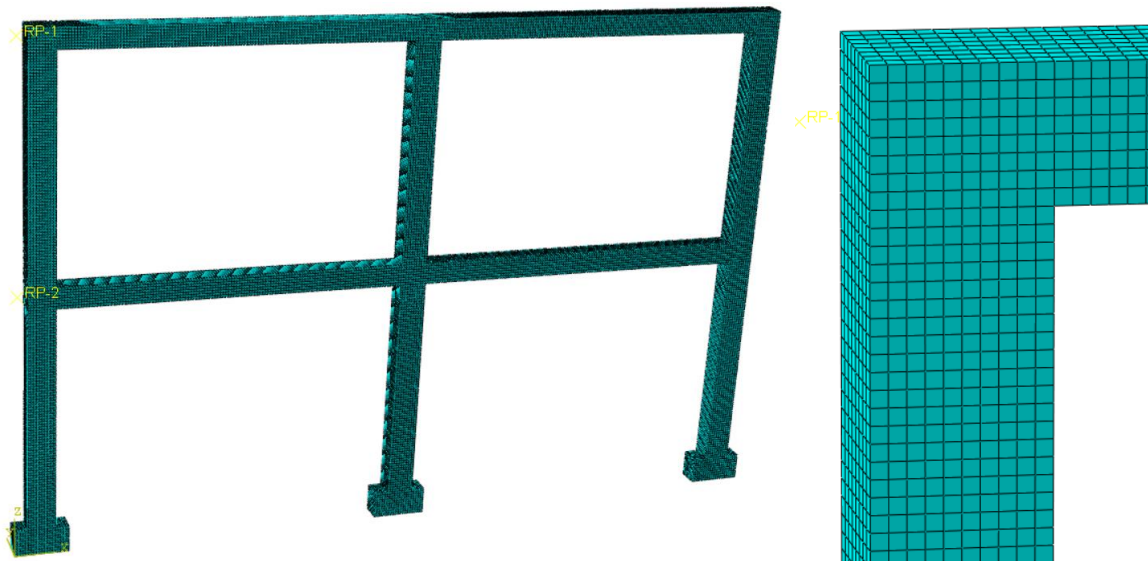
Concret Damaged Plasticity C20/25					
Compressive Behaviour		Concrete Compression Damage		Tensile Behaviour	
Yield Stress	Inelastic Strain	Damage Parameter	Inelastic Strain	Yield Stress	Cracking strain
4,31334	0	0	0	2,07	0
7,86818	0,0002581	0	0,00025806	1,69	0,00018627
10,7884	0,0005161	0	0,00051613	1,29	0,00040794
13,1722	0,0007742	0	0,00077419	1,11	0,00051781
15,0987	0,0010323	0	0,00103226	0,93	0,00062768
16,632	0,0012903	0	0,00129032	0,62	0,00094431
17,8248	0,0015484	0	0,00154839	0,42	0,0011554
18,7209	0,0018065	0	0,00180645		
19,3568	0,0020645	0	0,00206452		
19,7632	0,0023226	0	0,00232258		
19,9663	0,0025806	0	0,00258065		
19,9883	0,0028387	0	0,00283871		
19,8484	0,0030968	0,00699952	0,00309677		
19,5631	0,0033548	0,02127228	0,00335484		
19,1468	0,0036129	0,04209986	0,0036129		
18,612	0,003871	0,06885545	0,00387097		
17,9697	0,004129	0,10098967	0,00412903		
17,2295	0,0043871	0,13801901	0,0043871		
16,4001	0,0046452	0,17951623	0,00464516		
15,4889	0,0049032	0,22510238	0,00490323		
14,5027	0,0051613	0,27444021	0,00516129		
13,4476	0,0054194	0,32722855	0,00541935		
12,3288	0,0056774	0,38319764	0,00567742		
11,1514	0,0059355	0,44210511	0,00593548		
9,91955	0,0061935	0,50373262	0,00619355		
8,63729	0,0064516	0,56788292	0,00645161		
7,30818	0,0067097	0,6343774	0,00670968		
5,93545	0,0069677	0,70305391	0,00696774		
4,52206	0,0072258	0,77376494	0,00722581		
3,07069	0,0074839	0,84637594	0,00748387		
1,58379	0,0077419	0,92076401	0,00774194		
1	0,1	0,95	0,1		

Concrete Tension Damage	
Damage Parameter	Displacement
0	0
0,18	0,01321073
0,38	0,02266102
0,46	0,02735209
0,55	0,03202135
0,7	0,04588737
0,81	0,05502602
0,86	0,22200093

**Tablica 4** Parametri plastičnog ponašanja armature definirane u Abaqusu

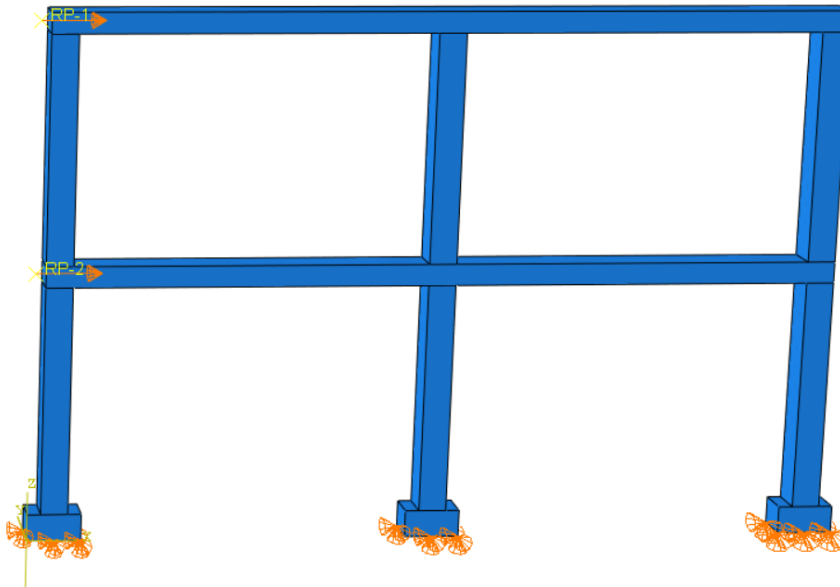
Plastic	
Yield Stress	Plastic Strain
240	0
240,76	0,0012
241,34	0,0119
261,07	0,0277
281,37	0,0696
174,04	0,075
58,014	0,0806



Slika 19 Prikaz diskretizacije okvira (*mesh*)

Na slici 20 su prikazani definirani rubni uvjeti modela. Kontaktu donje plohe temelja su ograničena sva tri kinematska stupnja slobode  $u_1$ ,  $u_2$  i  $u_3$  (obzirom da je riječ o volumnom elementu) te je definiran kao upet. Na čvorovima lijeve strane okvira zadano je ograničenje preko naredbe *coupling* gdje su zadane i referentne točke RP1 i RP2. Toj površini poprečnog presjeka je zadano kinematsko ograničenje (eng. *constraint*) kojim je ponašanje površina jednako ponašanju pripadnih referentnih točaka. Veza između armature i betona je zadana preko naredbe *embedded region*. To je ograničenje za 'ugrađene' dijelove u 'domaćina' modela čime se ograničavaju translacijski stupnjevi slobode čvorova ugrađenih elemenata i moguća je njegova primjena u nelinearnoj analizi. Element 'domaćin' ne može imati rotacijske stupnjeve slobode, a volumni elementi zadovoljavaju taj uvjet. Ova tehnika je često u uporabi kod modeliranja armiranobetonskih elemenata. Prema ovoj formulaciji nema proklizavanja armature i betona te ugrađenoj armaturi (*beam* elementima) nisu ograničeni rotacijski stupnjevi slobode. [10]

Analiza se provodi u 3 definirana koraka (eng. *step*). Prvi je *Initial step* kojeg nije moguće uređivati ni obrisati. On osigurava mogućnost definiranja rubnih uvjeta, interakcija i unaprijed definiranih polja koja se primjenjuju na početku analize i vrijedi za cijelu analizu. [10] U drugom koraku analize je zadano opterećenje gravitacijom (kako bi se definirala vlastita težina konstrukcije) i kombinacijom zadanog opterećenja na konstrukciju okvira u obliku pritiska po gornjoj površini greda. Kombinacija koja se koristila je  $1 \times VT + 1 \times G + 0,3 \times Q = 0,069 \text{ N/mm}^2$ . Treći korak je definiran kao *Push* u kojem se konstrukcija gura linearno rastućim pomakom zadanim u referentnim točkama. U referentnu točku RP1 je zadan horizontalni pomak (u smjeru osi 1) od 800 mm i u RP2 horizontalni pomak  $u_1$  od 400 mm. Maksimalno definiran broj koraka za drugi i treći *step* je 1000000, dok je inicijalna veličina inkrementa jednaka 0,01, minimalna 1E-09, a maksimalna 0,1.



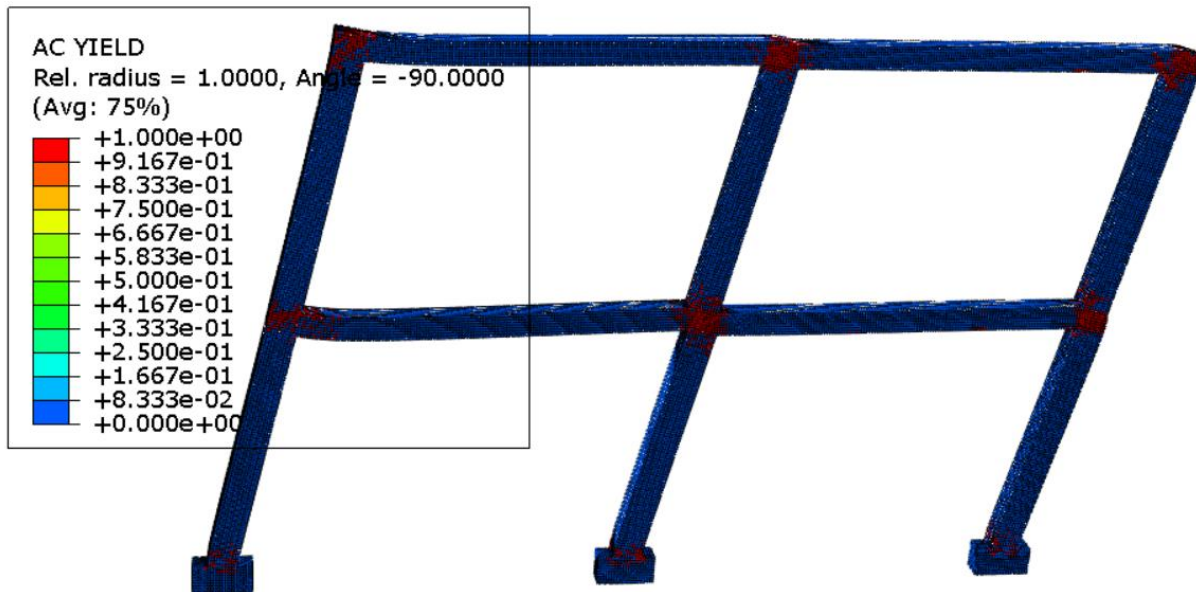
Slika 20 Prikaz zadanih rubnih uvjeta

## 4.2. Rezultati

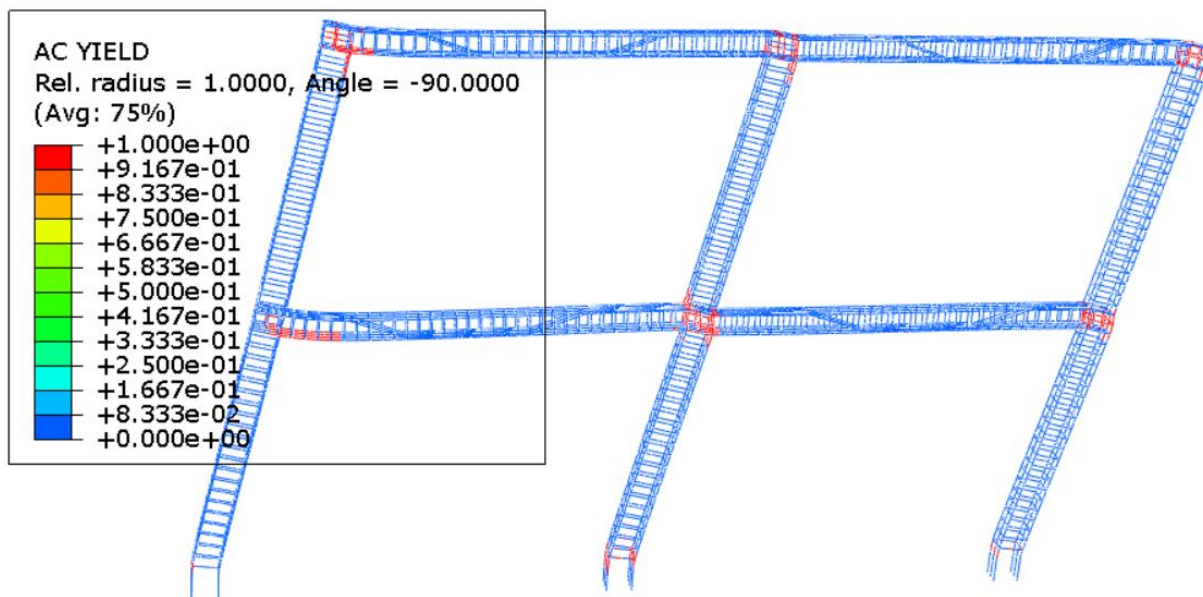
U nastavku će grafički biti prikazani rezultati dobiveni FE analizom AB okvira. Rezultati koji će biti prikazani su izračunati sa postavkom: „Avg: 75%“. Navedeno se odnosi na način prema kojem se izračunavaju naprezanja tijekom simulacije. Svaki FEA (*Finite Element Analysis*) program pa tako i Abaqus, naprezanja izračunava u integracijskim točkama koje se nalaze unutar svakog elementa. Međutim, u slučaju kada se želi prikazati raspodjela naprezanja po cijelom modelu, vrijednosti se iz integracijskih točaka ekstrapoliraju na čvorove. Većina je čvorova zajednička za više od jednog elementa, odnosno dva ili više pa time jedan čvor ima više vrijednosti iz ekstrapolacije. Abaqus prvo u analizi izračuna skalarne vrijednosti, a nakon toga koristi prosjek kako bi se dobile pojedinačne vrijednosti za svaki čvor. U slučaju „Avg: 75%“ uprosječe se sve vrijednosti čvora čija je relativna razlika u rezultatima manja od 75%, ako je razlika veća, doprinosi se ne prosječe i tih 25% rezultata bi mogle biti iznimke. Također, svi su rezultati prikazani za zadnji korak *push* stepa, pri pomaku RP1 od 800mm u x smjeru.

Na slikama 21 i 22 prikazana su područja plastifikacije, odnosno područje tečenja materijala okvira. Vrijednosti su između 0 i 1, što označava kriterij tečenja. Tamo gdje su vrijednosti jednake 1 (označene crvenom bojom) znači da se materija plastificira. Do plastifikacije je došlo u svim čvorovima okvira. Vidljivo je da se tečenje armature događa na mjestima maksimalnog iznosa momenta.





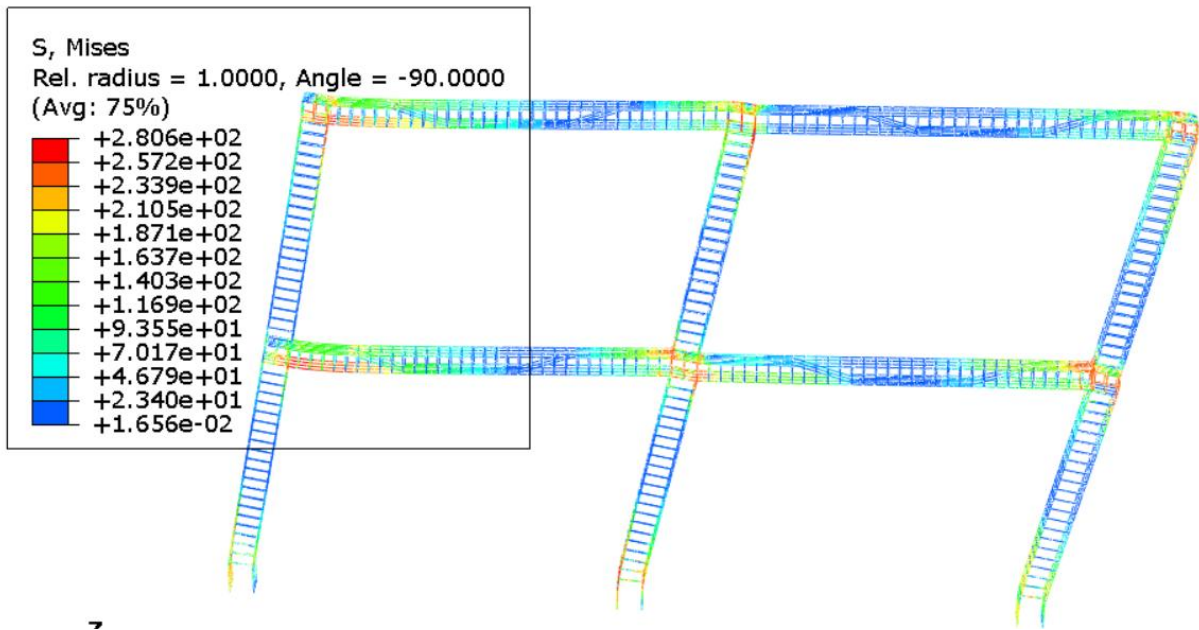
Slika 21 Rezultati- područje plastifikacije okvira



Slika 22 Rezultati- područje plastifikacije armature

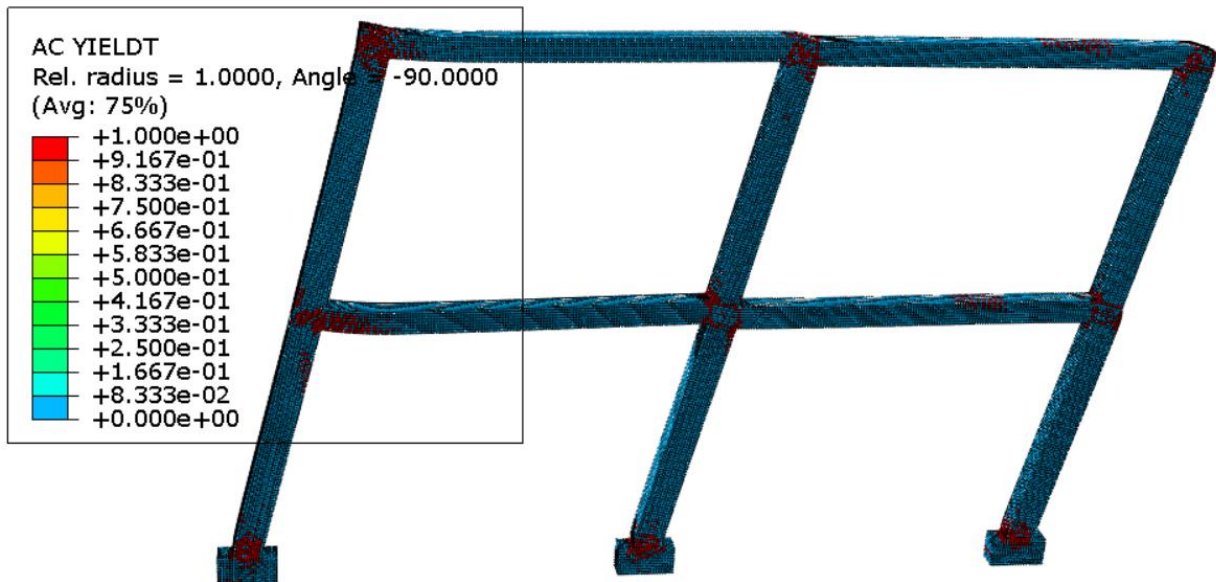
Na slici 23 su prikazana Von Misesova ekvivalentna naprezanja ( $S, Misses$ ) i koristi se za procjenu plastičnog tečenja materijala u analizi deformabilnog tijela i pomaže u identifikaciji kritičnih zona konstrukcije. Dakle, na slici su prikazana mjesta najvećih naprezanja armature. Bitno je prisjetiti se da je granica tečenja armature 240 MPa. Na pomaku RP1 od 800 mm, dijelovi armature prelaze tu granicu i došlo je do plastifikacije. Na slici su to područja označena crvenom bojom, a podudaraju se s rezultatima plastifikacije armature prikazanim na prethodnoj slici 22 pod *AC YIELD*.



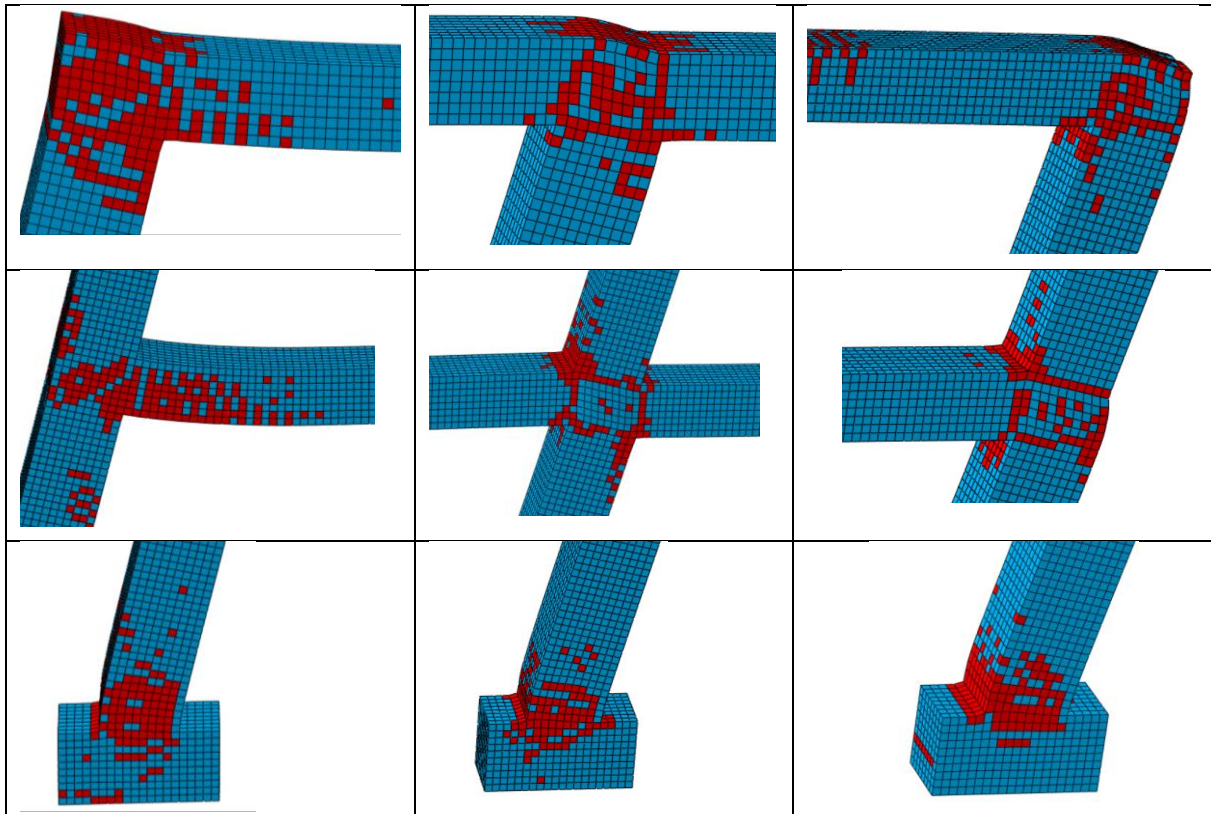


Slika 23 S,Mises naprezanja u armaturi

AC YIELDT u izlaznoj bazi podataka ima vrijednosti 0-1 i koristi se za praćenje da li se u nekom trenutku element ili materijalni čvor nalazi u stanju plastifikacije (1 = da, 0 = ne; AC YIELDT: “aktivno tečenje”). Na slikama 24 i 25 su prikazana navedena područja.

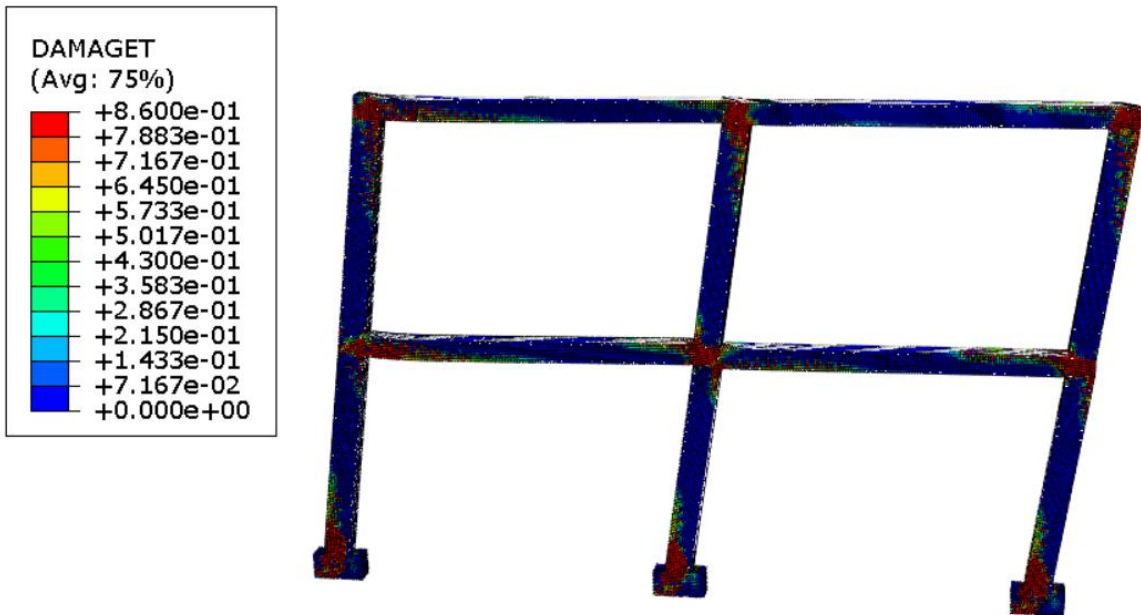


Slika 24 Vlačna naprezanja okvira

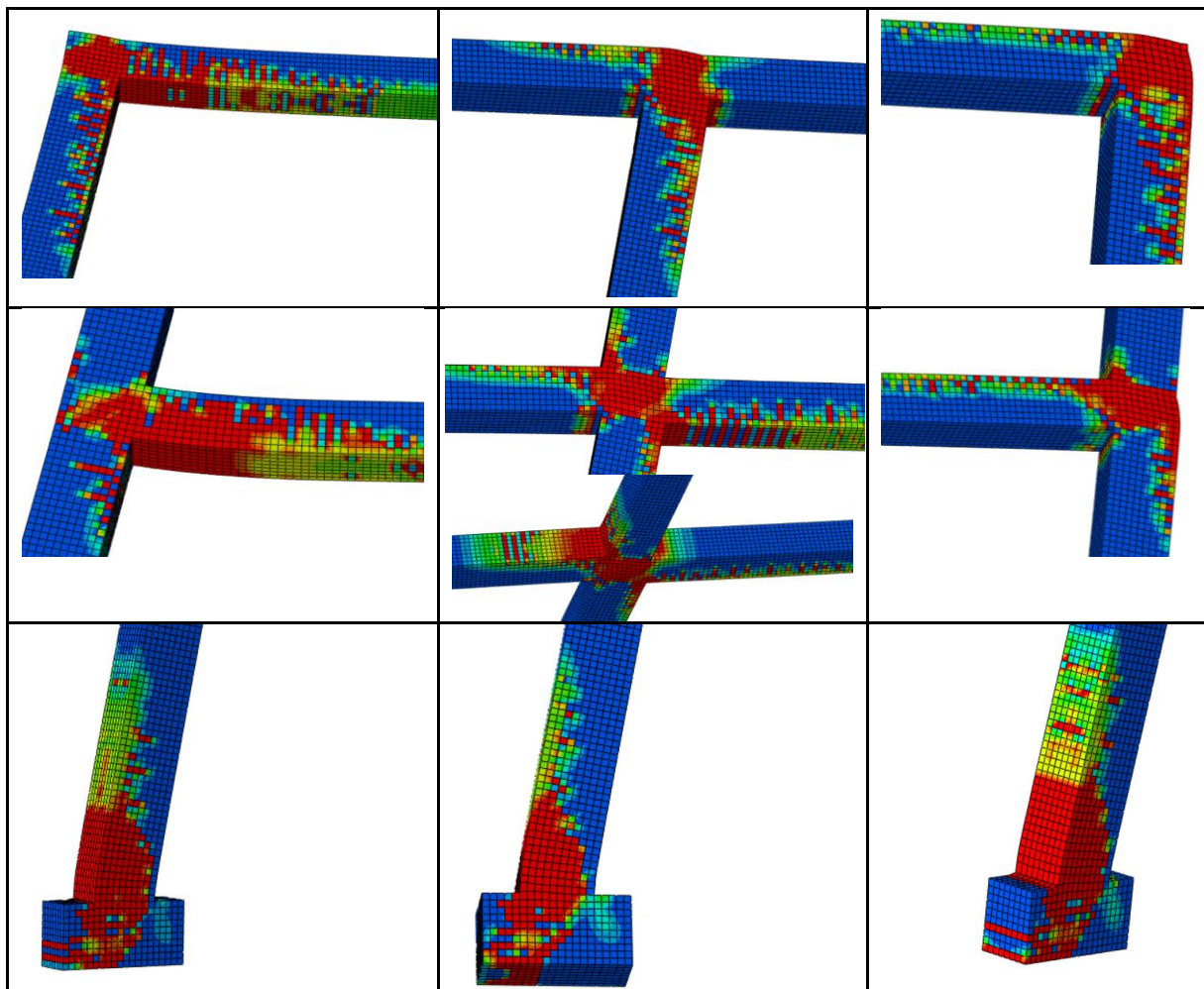


Slika 25 Zone tečenja u čvorovima okvira

Na slikama 26 i 27 su prikazana *DAMAGE* oštećenja betona uslijed vlačnog naprezanja, a kriterij oštećenja je definiran u CDP modelu betona, pod varijablom *Concrete Tension Damage* prikazanom u tablici 3. Kada je izlazna varijabla jednaka 0, materijal nije oštećen. Za vrijednost *DAMAGE*=1 materijal je potpuno oštećen, dok za vrijednosti između 0 i 1, materijal gubi nosivost, ali i dalje prenosi dio opterećenja. Oštećenja u Abaqusu ovise o ekvivalentnoj plastičnoj deformaciji i faktorima degradacije krutosti. Nakon što naprezanja prijeđu granicu tečenja, Abaqus smanjuje efektivni modul elastičnosti sa  $E_0$  na  $E_{eff}$ . Na slici je vidljivo da se beton oštećuje u vlačnoj zoni i da se armatura temelja na strani djelovanja opterećenja 'čupa'. Posebno su zanimljivi sami čvorovi u kojima nije čisto vlačno naprezanje, već troosno stanje naprezanja.

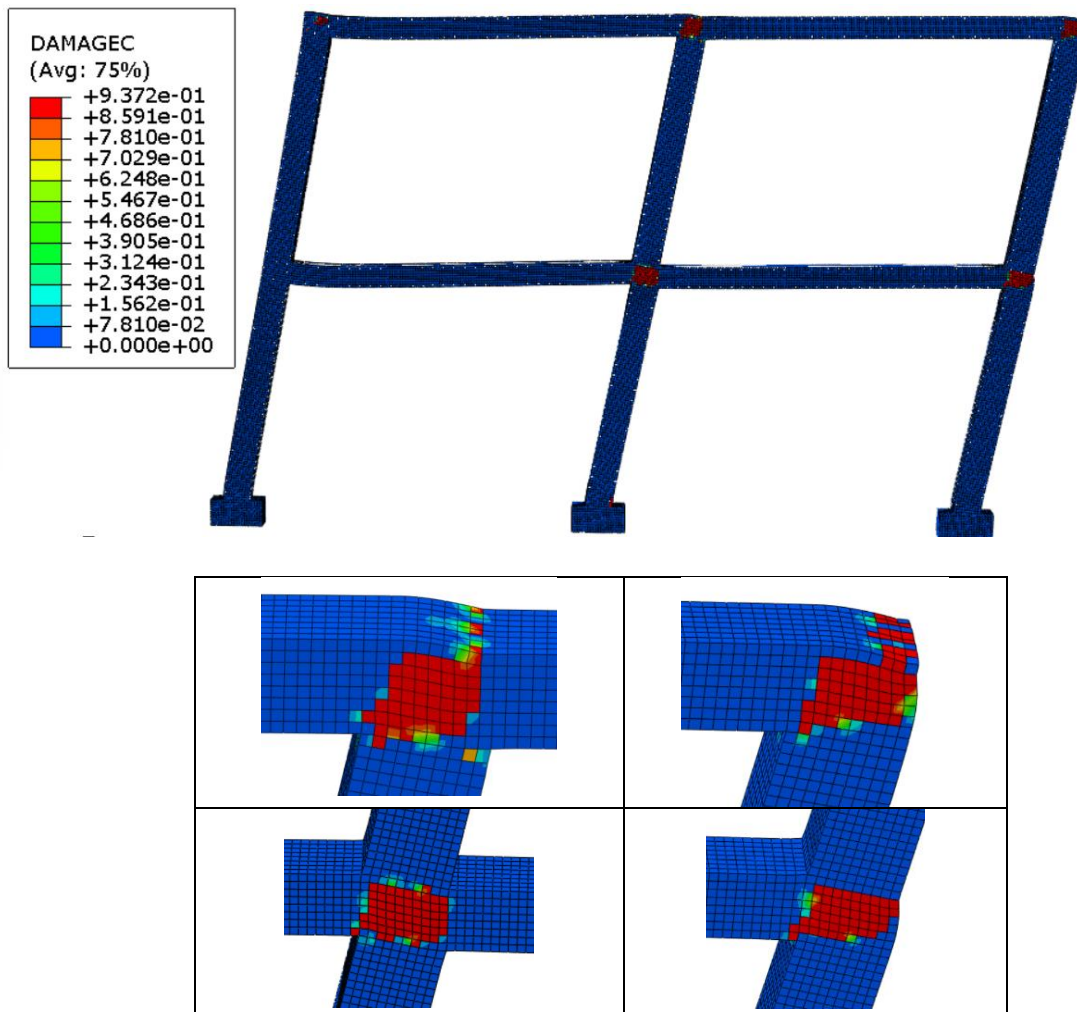


Slika 26 Oštećenja betona uslijed vlačnog naprezanja



Slika 27 Oštećenja betona uslijed vlačnog naprezanja u čvorovima

Na slici 28 je prikazan parametar oštećenja za tlačni lom (eng. *Damage Parameter for Compressive Failure, DAMAGEC*). Ovaj parametar se koristi za modeliranje degradacije zbog tlačnih naprezanja. Kriterij oštećenja je definiran u CDP modelu betona, pod varijablom *Concrete Compression Damage* (tablica 3). Takvih oštećenja nema puno, a nalaze se u središnjim čvorovima i čvorovima na strani suprotnoj od unosa pomaka (desno). Za tumačenje izlaznih vrijednosti je jednaka analogija kao za parametar oštećenja *DAMAGET*. U tablici 5 je dana usporedba dvaju parametara.



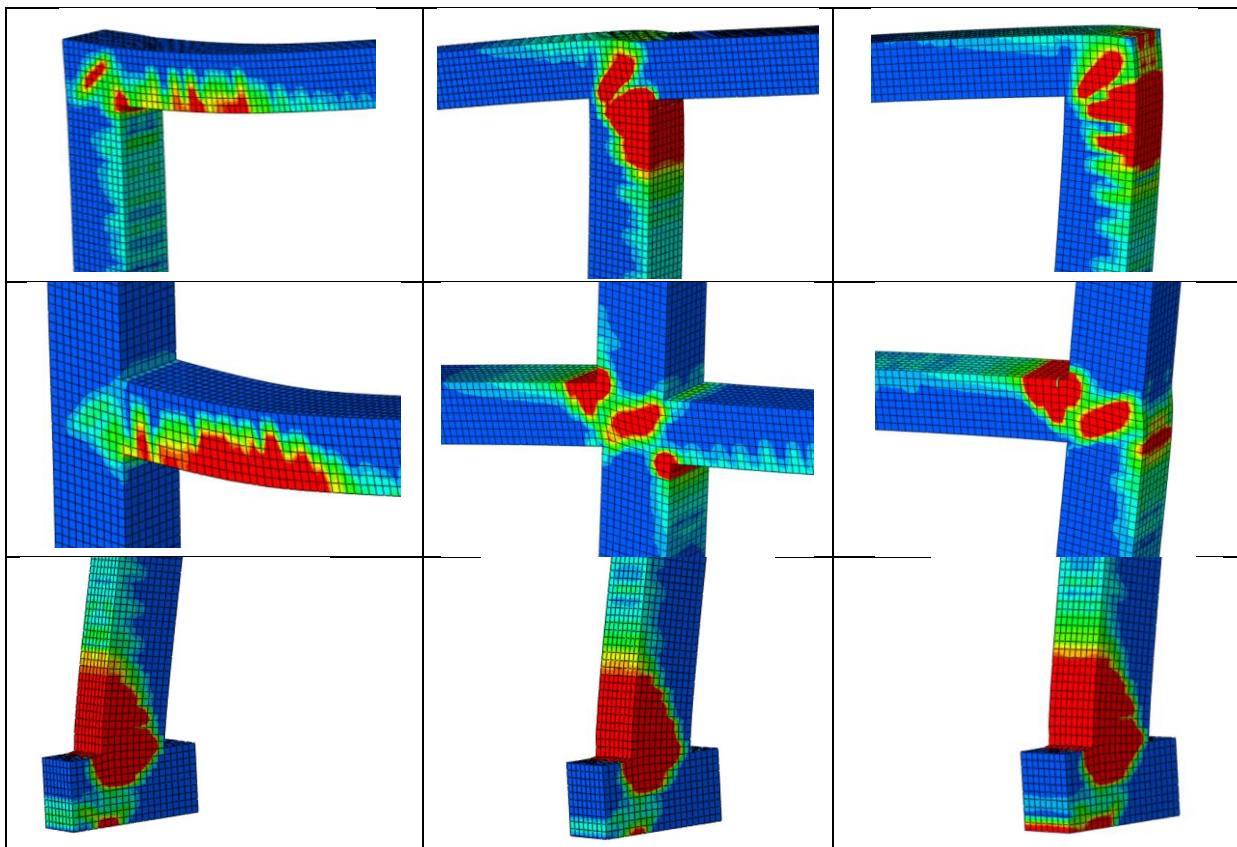
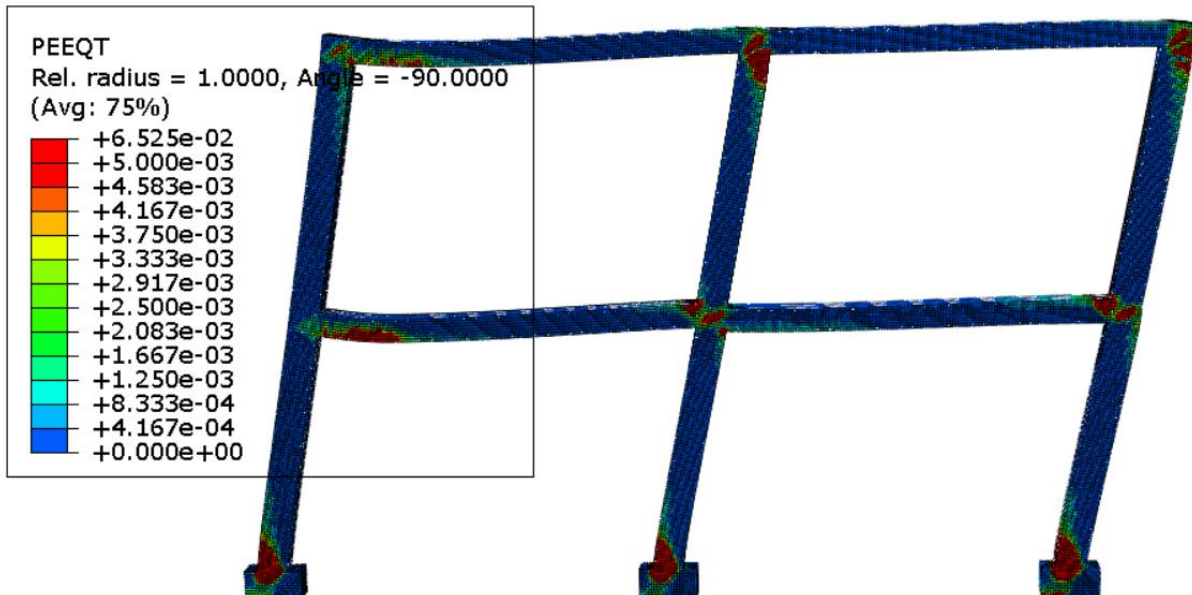
Slika 28 Oštećenja uslijed tlačnog naprezanja

Tablica 5 Usporedba parametara *DAMAGEC* i *DAMAGET*

Parametar	Opis	Kada se koristi?
<b><i>DAMAGET</i></b>	Oštećenje zbog vlaka	Kada materijal puca ili se razdvaja pod vlačnim naprezanjima.
<b><i>DAMAGEC</i></b>	Oštećenje zbog tlaka	Kada materijal zgnječi ili izgubi krutost zbog tlačnog opterećenja.

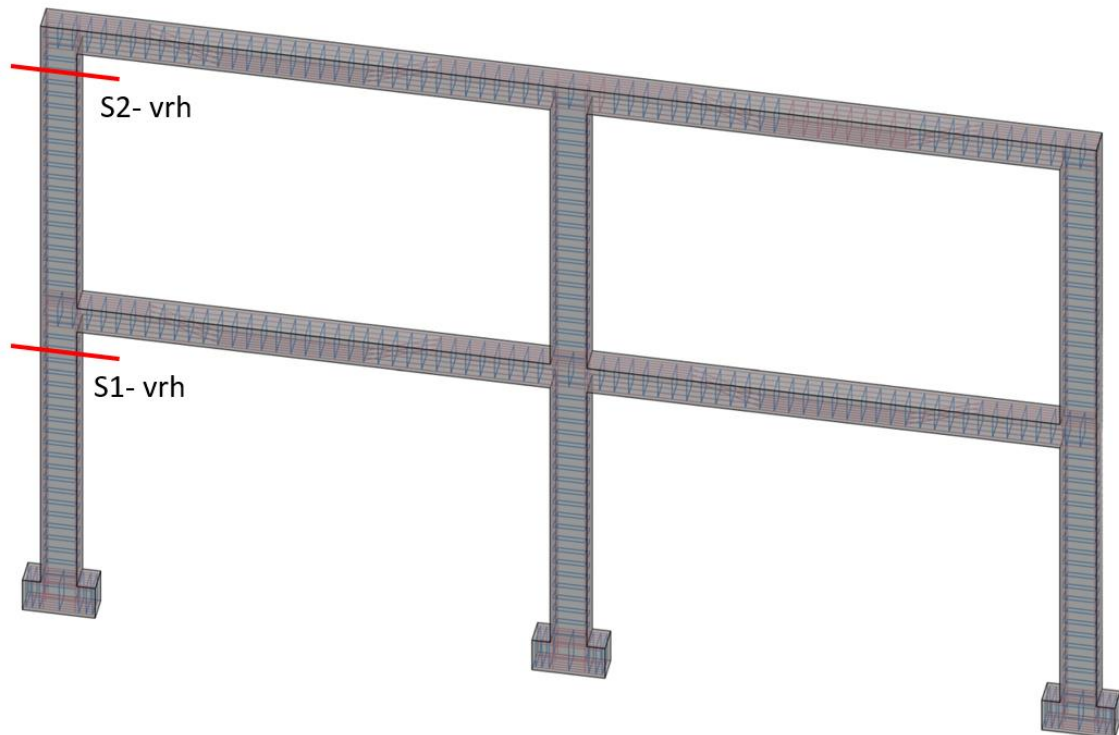


Na slici 29 je prikazana ekvivalentna plastična deformacija (eng. *Equivalent Plastic Strain, PEQT*), odnosno pukotine na okviru. PEQT prikazuje skalarne veličine koje mjere ukupnu akumuliranu plastičnu deformaciju u materijalu tijekom opterećenja. PEQT se često koristi za analizu plastičnih zona, formiranje pukotina i predviđanje sloma materijala. Na detaljnom prikazu čvorova uočava se da su pukotine akumulirane na mjestima okvira gdje se javljaju vlačna naprezanja.



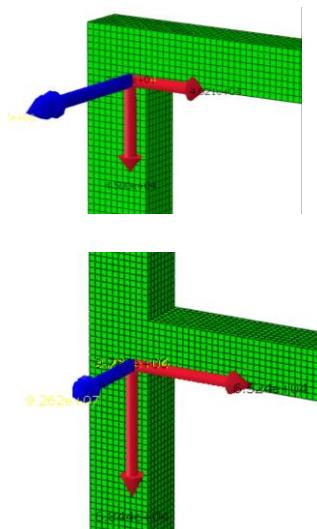
Slika 29 Pukotine na betonu okvira

Za detaljniju analizu i prikaz rezultata su odabrani vrhovi stupova S1 i S2 prikazani na slici 30. U nastavku rada će za odabrane presjeke biti korištene oznake S1 i S2.



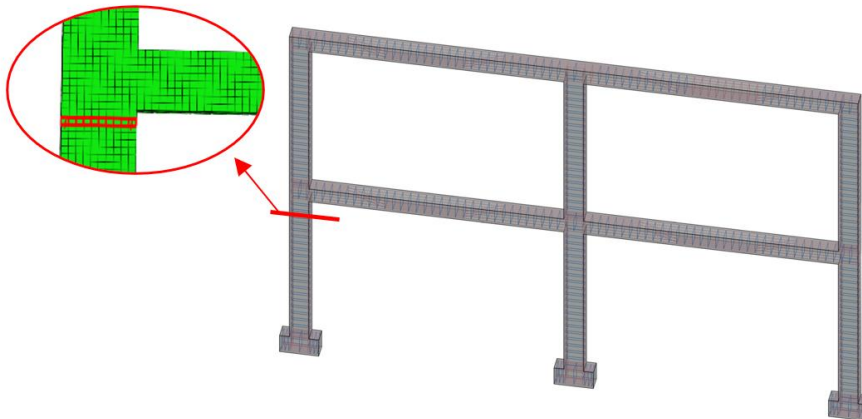
**Slika 30** Označeni promatrani presjeci stupova S1 i S2

Na slici 31 je prikaz presjeka S1 i S2 gdje će se analizirati rezultante (komponente) sila i momenta preko funkcije *Free body cut*. S tom funkcijom se integriraju naprezanja u čvorovima i dobivaju skalarni vrijednosti sila i momenta.



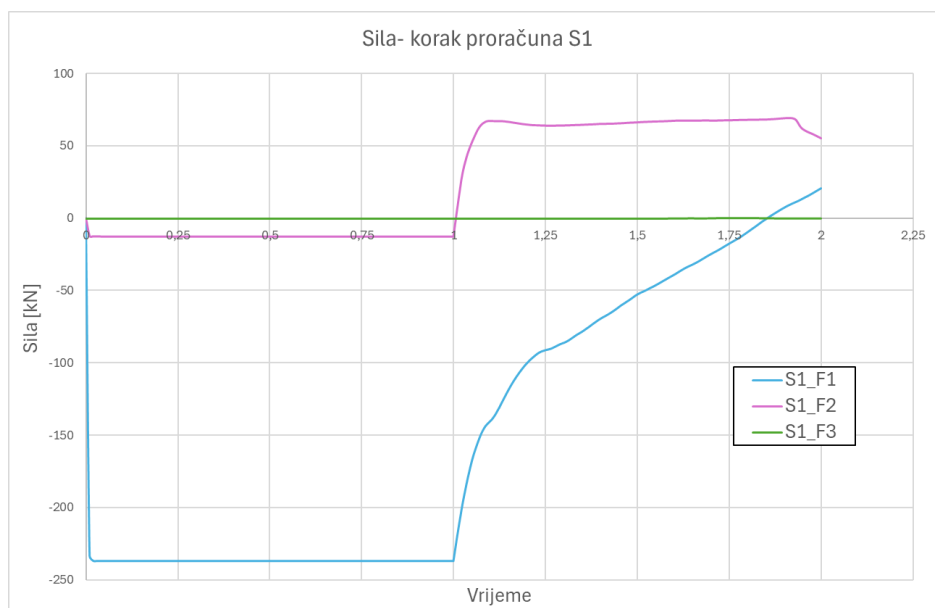
**Slika 31** Rezultante sila i momenta na vrhu S1 i S2

#### 4.2.1. S1-vrh stupa

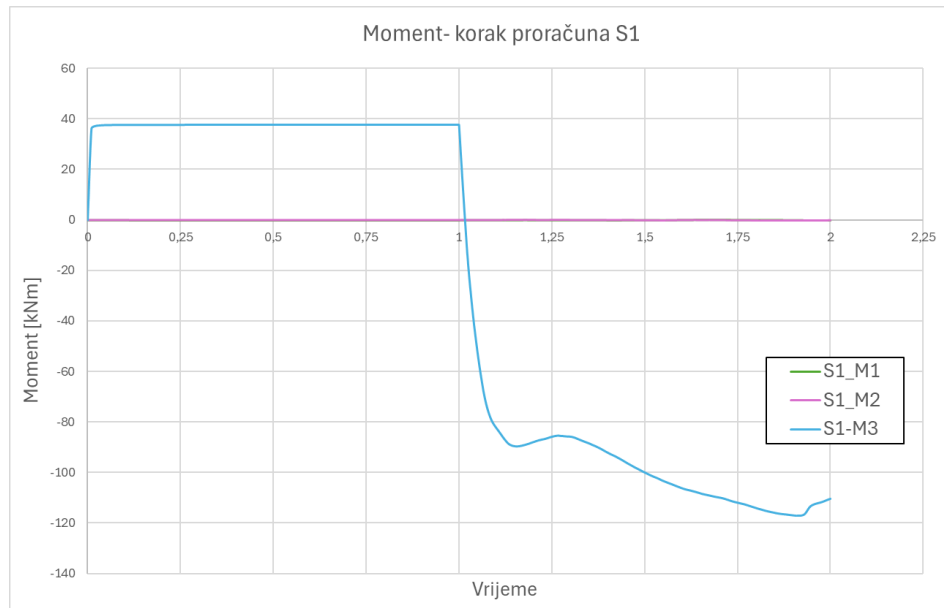


Slika 32 Prikaz integriranog presjeka vrha stupa S1

Na slici 33 su prikazane sile u poprečnom presjeku vrha stupa S1 u ovisnosti o kvazi vremenu, odnosno koraku u analizi. Plavom bojom je označena uzdužna sila F1. Od vertikalnog opterećenja i gravitacije ona u prvim koracima analize skoči na vrijednost  $-237,06$  kN (tlačna sila). Prelaskom u drugi korak analize i guranjem okvira u desno, stup se rasterećuje, odnosno smanjuje se tlačna sila te krivulja raste prema gore. Pri samom kraju analize uzdužna sila u stupu je vlačna u iznosu od  $20,60$  kN. Rozom bojom je prikazana poprečna sila F2. Uslijed vertikalnog opterećenja javlja se mala poprečna sila u vrijednosti od  $12,80$  kN te je konstantna do ulaska u sljedeći korak analize. Guranjem konstrukcije posmična sila doseže svoju maksimalnu vrijednost u iznosu od  $69,29$  kN. Zelenom bojom je označena sila koja je van ravnine - F3, njezina vrijednost je  $0$  kroz cijelu analizu i u nastavku neće biti bitna.

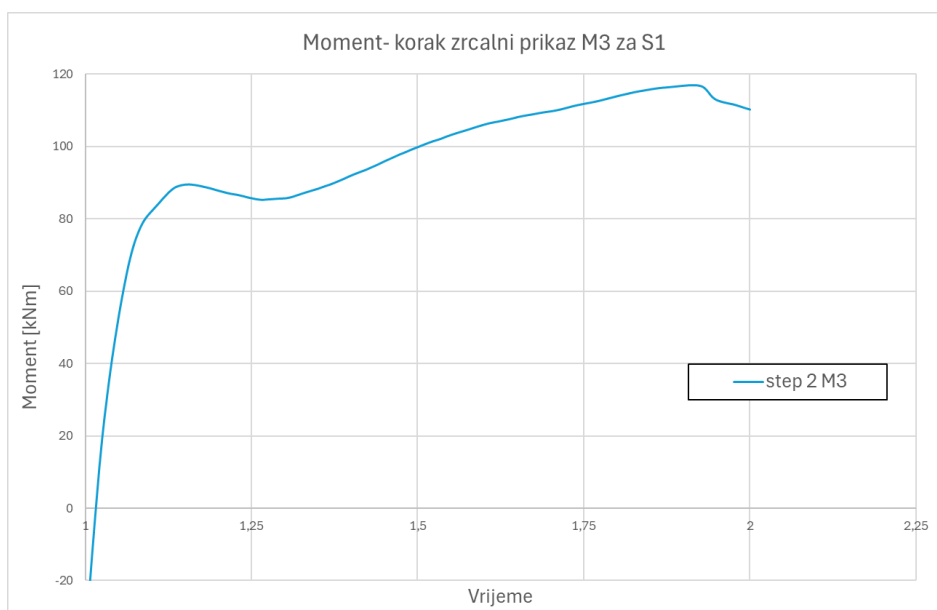


Slika 33 Odnos komponenti sile i koraka proračuna stupa S1



**Slika 34** Odnos komponenti momenta i koraka proračuna stupa S1

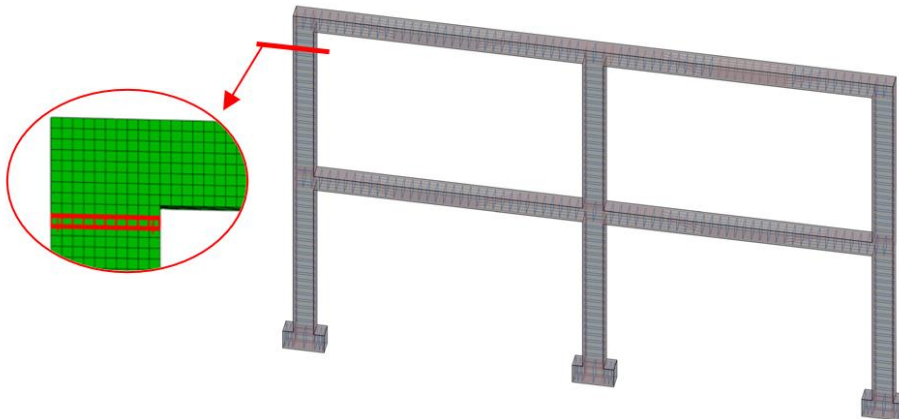
Na slici 34 prikaz je momenta u presjeku vrha stupa S1 u odnosu na kvazi vrijeme. Bitno je promotriti krivulju koja prikazuje M3 dijagram (označena je plavom bojom). Na samom početku krivulja raste iz nule na vrijednost od pozitivnih 37,69 kNm. To je moment od vlastite težine i vertikalnog opterećenja zadanog u drugom koraku i konstantno je sve do kraja tog koraka, a na dijagramu je to prikazano brojem 1 na x-osi. Prelaskom u *push* korak analize vrijednost momenta prelazi u negativnu vrijednost gdje se linearno mijenja do vrijednosti od približno 82 kNm te nastavlja rasti pod drugim nagibom. Na slici 35 je zrcalni prikaz momentnog dijagrama uzrokovanog postupnim guranjem u stepu *push*.



**Slika 35** Zrcalni prikaz M3 dijagrama koraka *push* za S1



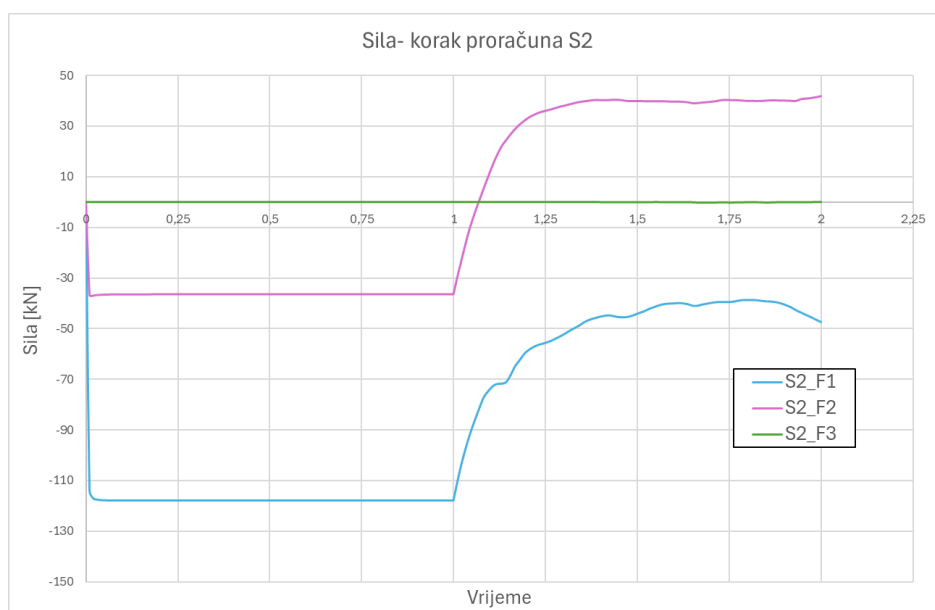
#### 4.2.2. S2-vrh stupa



**Slika 36** Prikaz integriranog presjeka vrha stupa S2

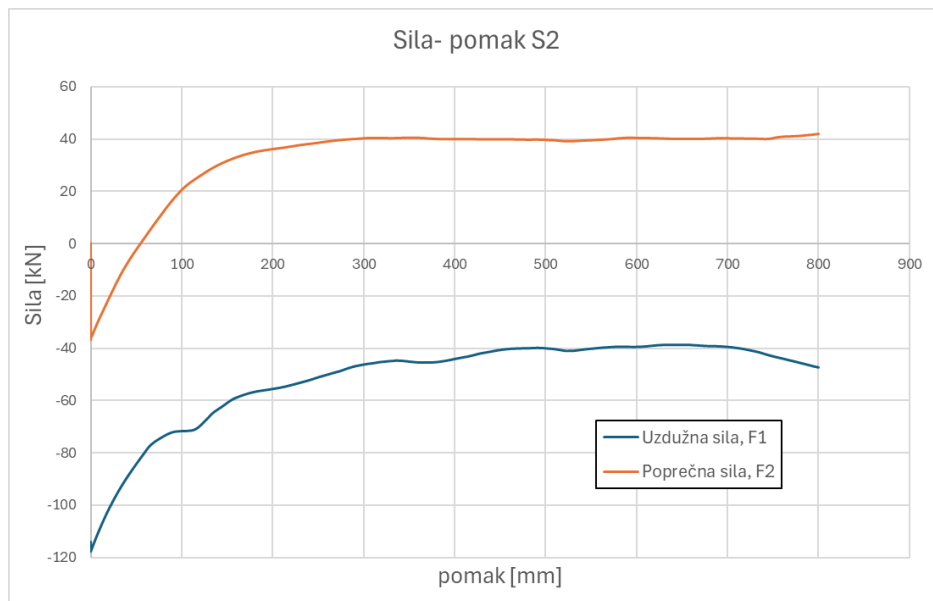
Na slikama 37 i 38 prikazane su krivulje sile i momenta u odnosu na kvazi vrijeme, odnosno korak analize. Ponašanje krivulja sile i momenta na vrhu stupa S2 je istovjetno stupu S1 uz druge vrijednosti sile i momenta.

Uzdužna sila F1 doseže vrijednost od -117,82 kN uslijed djelovanja gravitacije i vertikalnog opterećenja, a onda se stup rasterećuje sukladno guranju okvira i smanjuje se iznos uzdužne sile prema grafu. Stup S2 ne ulazi u vlačno područje, za razliku od stupa S1. Tijekom poprečne sile u S2 je potpuno analogan stupu S1. Uslijed vertikalnog opterećenja javlja se poprečna sila u vrijednosti od 36,41 kN te je konstantna do ulaska u sljedeći korak analize. Guranjem konstrukcije posmična sila doseže svoju maksimalnu vrijednost u iznosu od 41,83 kN. Sila koja djeluje van ravnine, F3 je jednaka nuli kroz cijelu analizu.



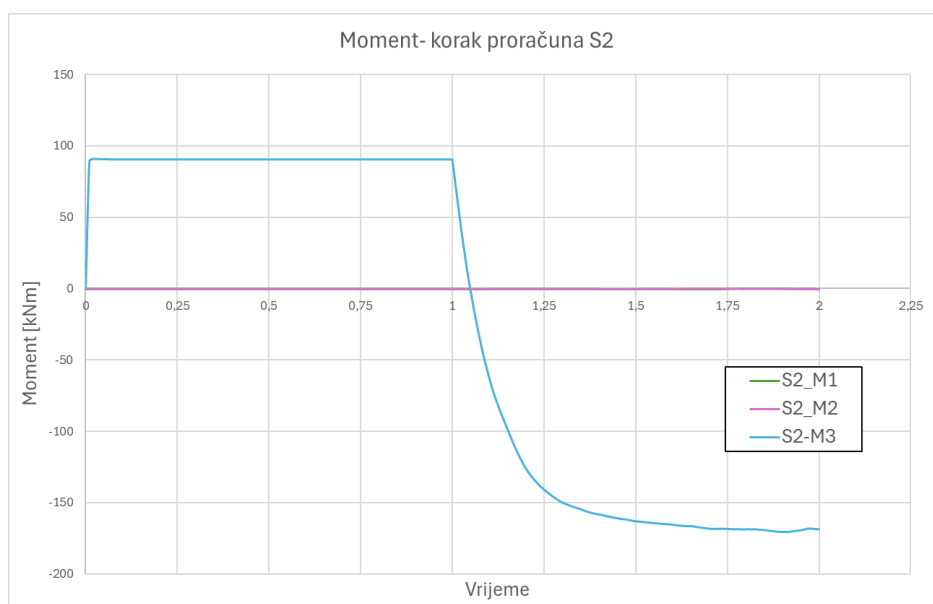
**Slika 37** Odnos komponenti sile i koraka proračuna stupa S2

Na slici 38 prikazan je odnos poprečne i uzdužne sile vrha stupa S2 u odnosu na pomak.

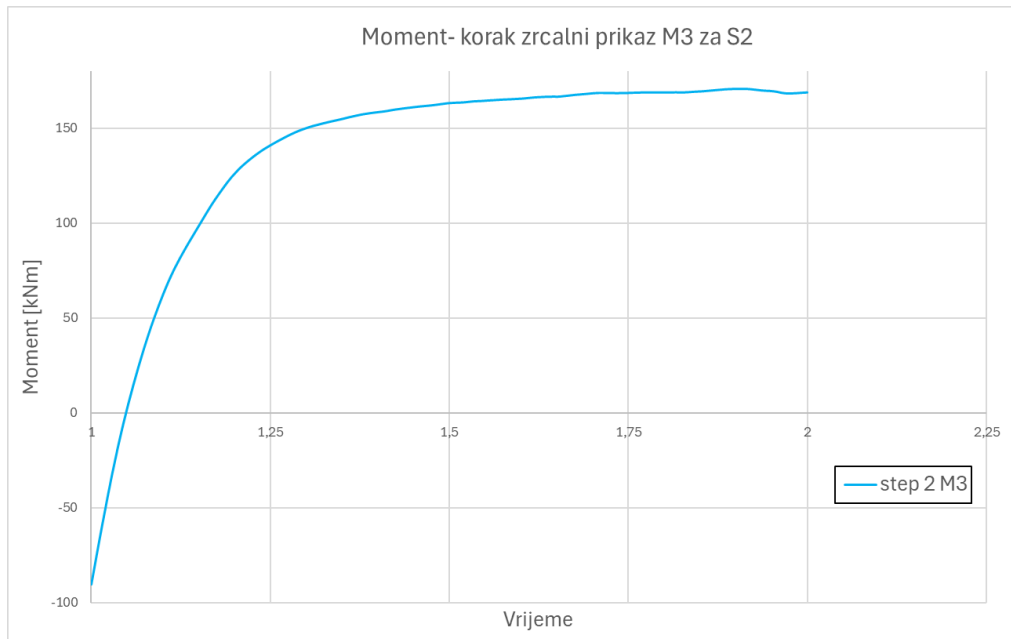


**Slika 38** Odnos sile i pomaka na vrhu stupa S2

Na slici 39 prikaz je dijagrama momenta u presjeku vrha stupa S2 u odnosu na kvazi vrijeme. Ovdje je također bitno promotriti krivulju koja prikazuje M3 dijagram (označena je plavom bojom). Na samom početku krivulja raste iz nule na vrijednost od pozitivnih 90,37 kNm. To je moment od vlastite težine i vertikalnog opterećenja zadanog u drugom koraku i konstantno je sve do kraja tog koraka. Prelaskom u *push* korak analize vrijednost momenta prelazi u negativnu vrijednost gdje se linearno mijenja do vrijednosti od približno 115 kNm te nastavlja rasti pod drugim nagibom. Na slici 40 je zrcalni prikaz momentnog dijagrama uzrokovanog postupnim guranjem u stepu *push*.

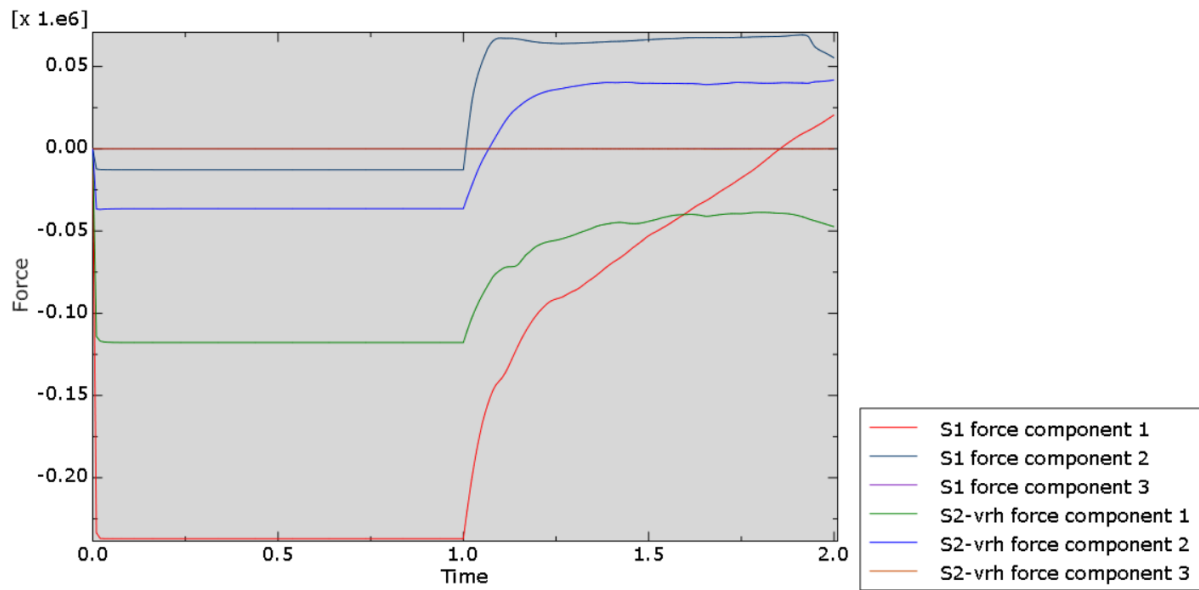


**Slika 39** Odnos komponenti momenta i koraka proračuna stupa S2



**Slika 40** Zrcalni prikaz M3 dijagrama koraka *push* za S2

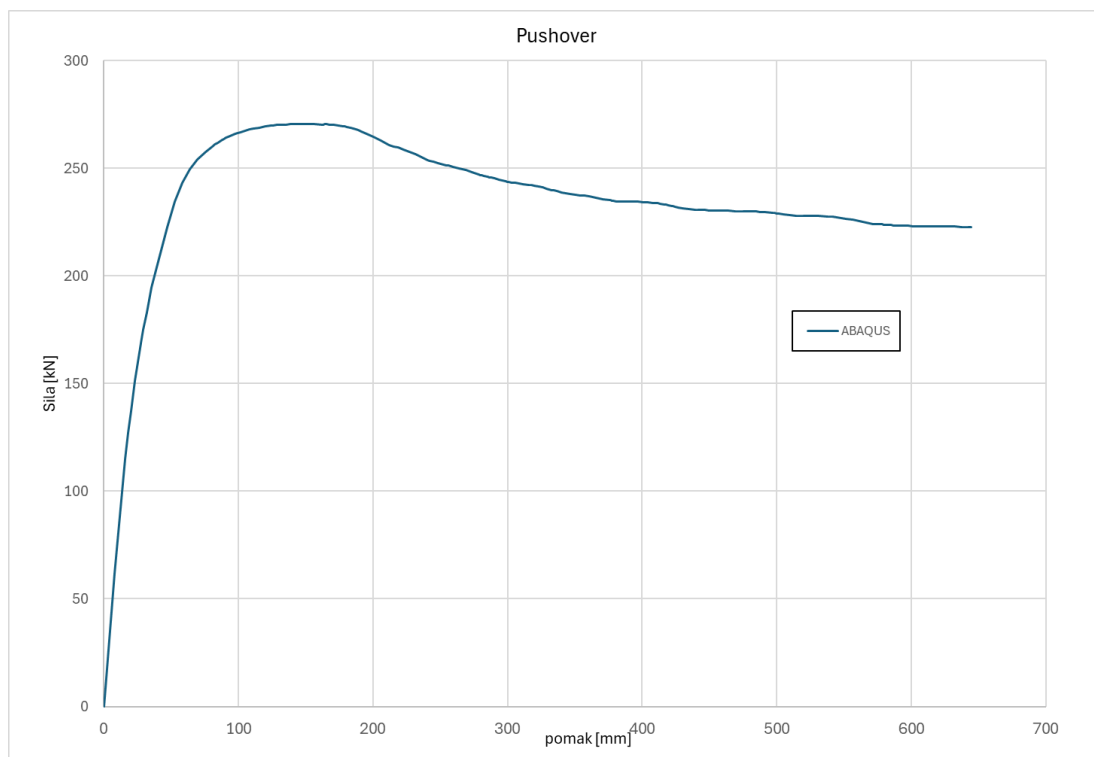
Na slici 41 je sumiran prikaz komponenti sila u presjecima stupova S1 i S2.



**Slika 41** komponente sila za S1 i S2

### 4.3. Pushover krivulja

U nastavku je prikaz *pushover* krivulje u RP1 uslijed zadanog linearno rastućeg opterećenja od 800 mm u RP1 i 400 mm u RP2. Krivulja je linearna do horizontalnog pomaka od približno 70 mm i ukupno zadane horizontalne sile u vrijednosti od približno 240 kN. Tu se okvir nalazi u elastičnoj fazi, a deformacije su prvenstveno elastične u betonu i armaturi. Vrhunac krivulje je na pomaku od 151,07 mm i sili od 270,55 kN, armatura tu već popušta i razvijaju se plastične deformacije. Nakon toga, pomak se povećava uz smanjenje sile. Tu u analizi dolazi do izražaja definicija CDP modela betona, prepoznaju se pojave mikropukotina, a sukladno se smanjuje krutost. Dosezanjem maksimalne sile je označen početak značajnih nelinearnih efekata i otvaraju se plastični zglobovi na kritičnim mjestima, a beton u tlačnoj zoni počinje gubiti nosivost zbog drobljenja betona. U nastavku krivulje dolazi do smanjenja kapaciteta nosivosti, ali nema naglog urušavanja konstrukcije što znači da se okvir ponaša duktilno. Zaključno, nelinearni CDP model omogućava simulaciju smanjenja nosivosti betona pri velikim deformacijama, ali ne dovodi do trenutnog sloma. Nakon inicijalne degradacije nosivosti, konstrukcija je i dalje sposobna prenositi opterećenje. Jedan od razloga tome može biti i redistribucija sila, gdje armatura preuzima značajniji dio opterećenja dok beton progresivno gubi kapacitet nosivosti.



Slika 42 Pushover krivulja u RP1

## 5. NUMERIČKI MODEL U ETABS-U PREMA HRN EN 1998-3

ETABS je programski paket namijenjen za analizu jednostavnijih ili složenijih sustava u statičkim ili dinamičkim uvjetima. U programskom paketu ETABS analizirana je okvirna konstrukcija i opterećenje na nju opisano u poglavlju 3.1. Analiza se provela u XZ ravnini, a kao rubni uvjet su zadani upeti ležajevi.

U prvom je koraku proveden statički proračun kako bi se odredile razine unutarnjih sila za stalnu kombinaciju:  $MASS = VT + G + 0,3 \times Q$ . Vlastita težina stupova i grede je izračunata automatski na temelju zadanih dimenzija i specifične težine pridruženog materijala. Dobiveni su rezultati korišteni kao ulazni podatci nelinearnog statičkog proračuna metodom postupnog guranja.

Beton je definiran kao C20/25 te su mu dodijeljena nelinearna materijalna svojstva i pripadni radni dijagram, redom na slikama 43 i 44:

$$\rho = 2500 - 09 \text{ kg/m}^3$$

$$E = 16714,20158 \text{ N/mm}^2$$

$$\nu = 0,2$$

Nonlinear Material Data

Material Name and Type  
 Material Name: C20/25  
 Material Type: Concrete, Isotropic

Miscellaneous Parameters  
 Hysteresis Type: Concrete  
 Modify/Show Hysteresis Parameters...  
 Drucker-Prager Parameters  
 Friction Angle: 0 deg  
 Dilatational Angle: 0 deg

Acceptance Criteria Strains  

	Tension	Compression	
IO	0,01	-0,003	mm/mm
LS	0,02	-0,006	mm/mm
CP	0,05	-0,015	mm/mm

 Ignore Tension Acceptance Criteria

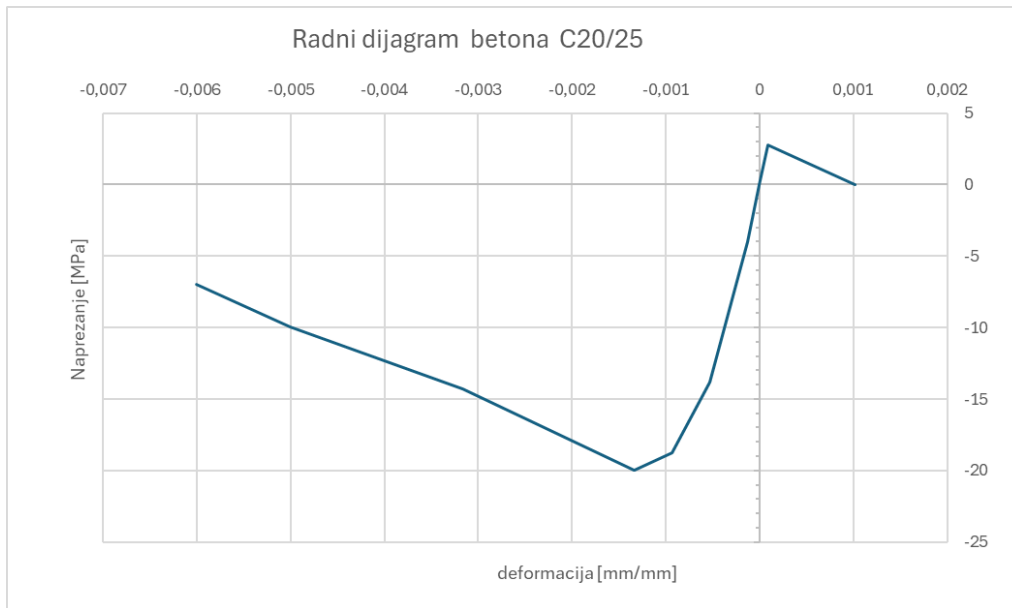
Stress-Strain Curve Definition Options  
 Parametric  
 User Defined  
 Convert to User Defined

User Stress-Strain Curve Data  
 Number of Points in Stress-Strain Curve: 10

Point Number	Strain	Stress (N/mm2)	Point ID
1	-0.010769	-6.96	
2	-0.008974	-9.96	-E
3	-0.005684	-14.31	
4	-0.002393	-20	-B
5	-0.001675	-18.79	
6	-0.000957	-13.79	
7	-0.000239	-4	
8	0	0	A
9	0.000167	2.79	

OK Cancel

Slika 43 Nelinearna materijalna svojstva betona C20/25

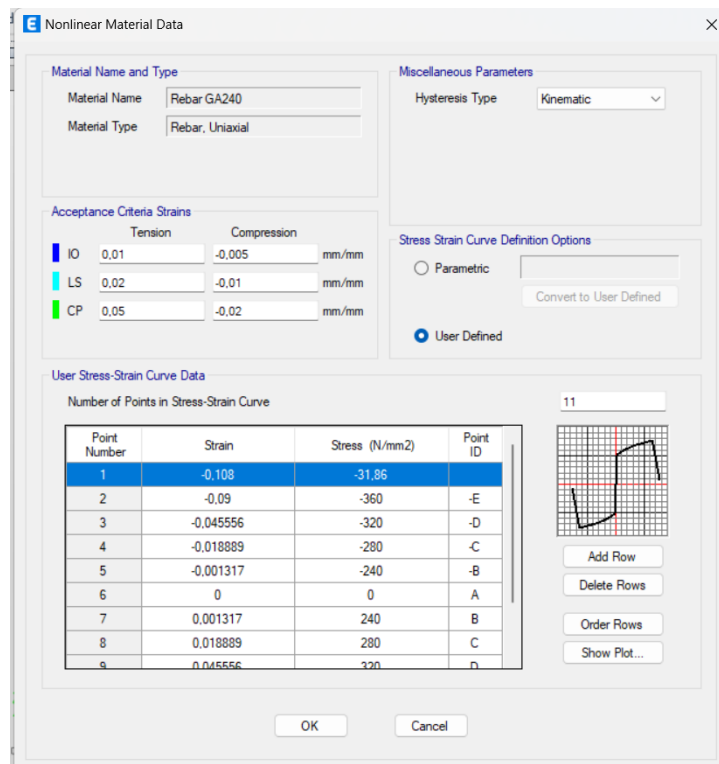


Slika 44 Radni dijagram betona C20/25

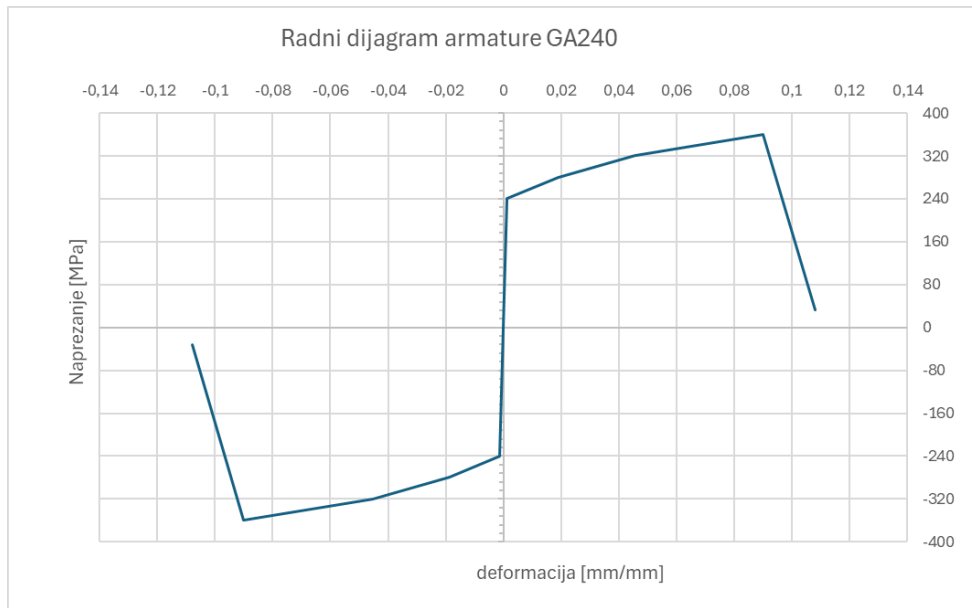
Zadana armatura je klase GA240. Pripadaju joj u nastavku navedene veličine za elastična svojstva . Na slici 45 su prikazana pripadna nelinearna svojstva materijala i radni dijagram je prikazan na slici 46.

$$\rho = 7,800 \text{ kg/m}^3$$

$$E = 182300,00 \text{ N/mm}^2$$

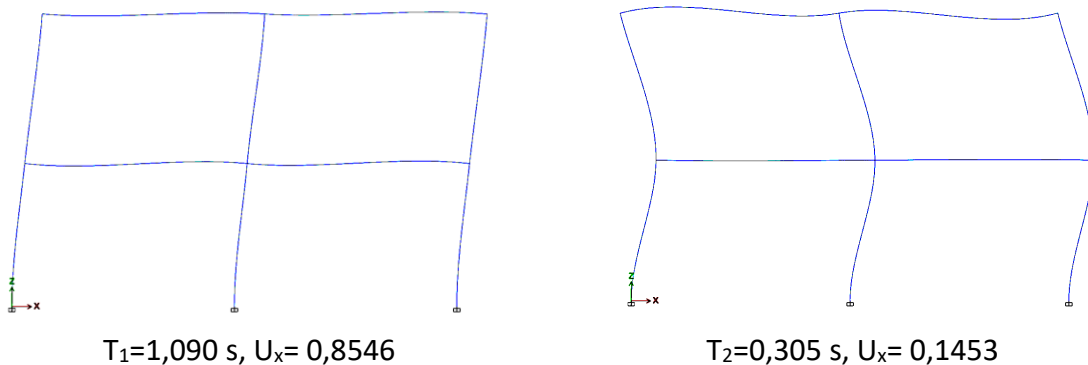


Slika 45 Nelinearna materijalna svojstva armature GA240

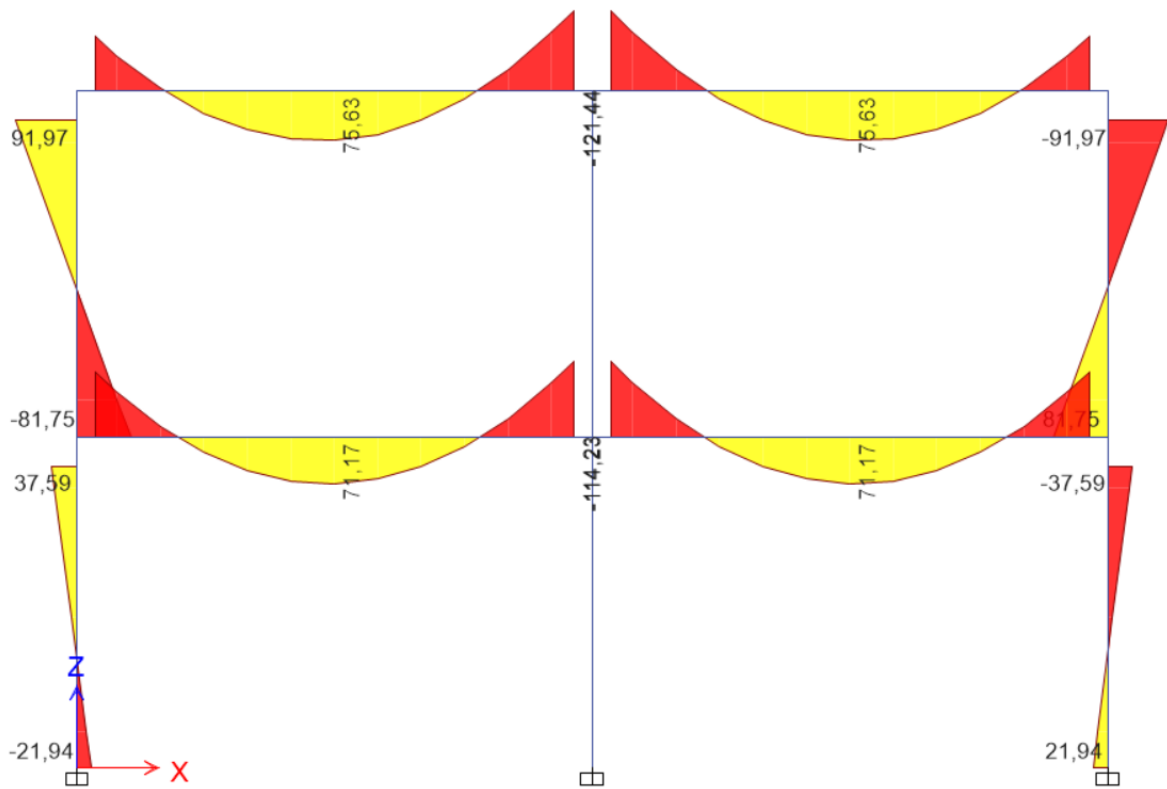


**Slika 46** Radni dijagram armature GA240

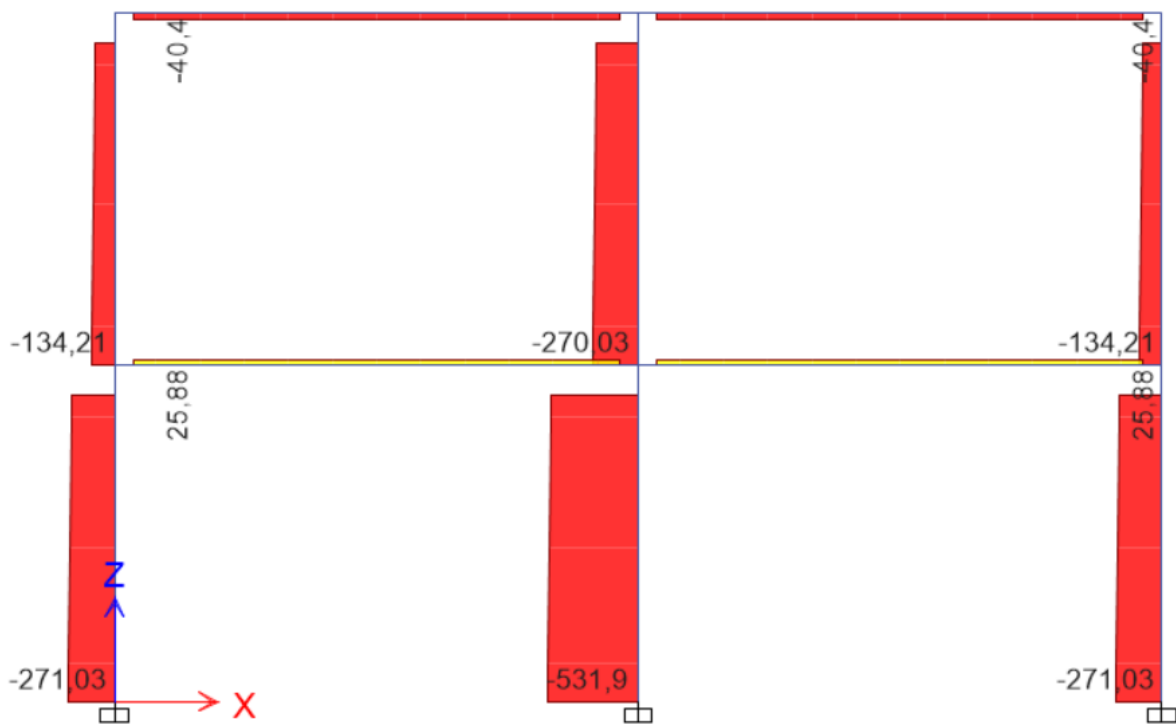
Definirani su poprečni presjeci za grede i stupove prema tablici 2. Obzirom da se provodi analiza postojeće konstrukcije svim je elementima smanjena krutost na savijanje za 50%. Prva dva modalna oblika prikazana su na slici 47 i jasno je da konstrukcija ima pravilno dinamičko ponašanje. Dominantan je horizontalni pomak 1. modalnog oblika u smjeru x, koji linearno raste s visinom okvira i aktivira 85,46% ukupne mase okvira. Prva dva modalna oblika aktiviraju 99,99% ukupne mase sustava. Dijagrami unutarnjih sila za kombinaciju opterećenja MASS redom su prikazani u nastavku na slikama 48 i 49.



**Slika 47** Modalni oblici i periodi okvira



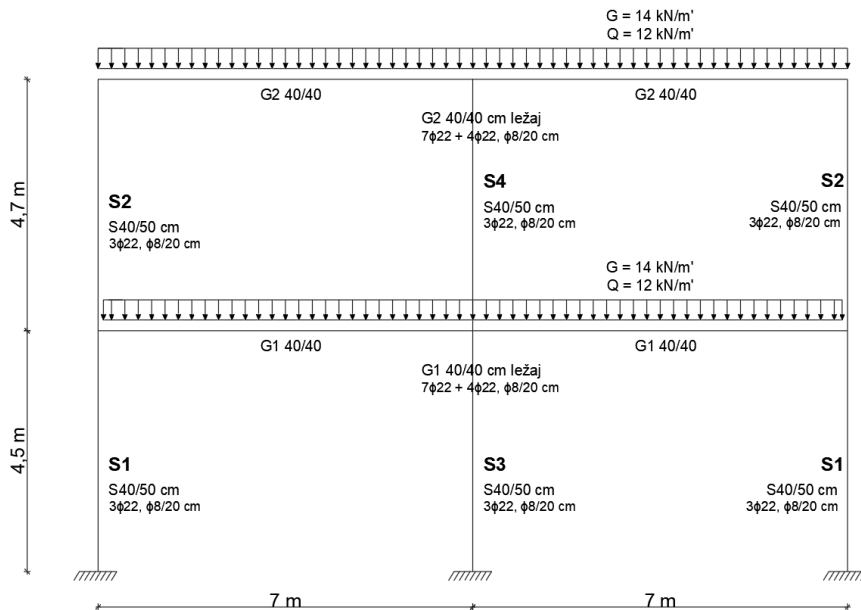
Slika 48 Momentni dijagram M3-3



Slika 49 Dijagram uzdužne sile



Za lakše razumijevanje su na slici 50 prikazane oznake pojedinih stupova i greda, ovisno o njihovom rasporedu po visini i širini okvira. Nazivi sa slike će se u nastavku rada koristiti prema navedenim oznakama radi jednostavnosti opisa.



Slika 50 Oznake za stupove i grede okvira

Dobivene vrijednosti unutarnjih sila su iskorištene za detaljnu analizu poprečnog presjeka (u nastavku: P.P.) i definiranje krivulje kapaciteta P.P. u programskom paketu SAP2000. Na slikama 52-57 su prikazane dobivene krivulje momenta-rotacije P.P. prema oznakama sa slike 50. Prijelaz iz linearnog dijela dijagrama označava granično stanje ograničenog oštećenja. Od te će se točke dalje definirati plastični zglob.

### 5.1. Definiranje momentnog plastičnog zgloba

U nastavku će biti analizirani poprečni presjeci elemenata, ali prije toga je potrebno objasniti koje nam vrijednosti trebaju te gdje se i kako koriste. „*Phi-Conc*“ predstavlja zakrivljenost pri otkazivanju  $\theta_u$ , „*Phi-~~yield~~ (idealized)*“ je zakrivljenost pri tečenju  $\theta_y$ , dok  $M_p$  predstavlja idealizirani moment plastičnosti.

Izrazi korišteni za proračun plastičnih zglobova su:

$$L_{pl} = 0,1L_v + 0,17h + 0,24 \frac{d_{bl}f_y (MPa)}{\sqrt{f_c} (MPa)} \quad (\text{HRN EN 1998-3, A.3.2.2., A.5})$$

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} (\theta_y + (\Phi_u - \Phi_y)L_{pl} \left(1 - \frac{0,5L_{pl}}{L_v}\right)) \quad (\text{HRN EN 1998-3, A.3.2.2.})$$

$$\theta_{sd} = \frac{3}{4}\theta_u \quad (\text{HRN EN 1998-3, A.3.2.3.})$$

$$\theta_y = \Phi_y \frac{L_v + a_v z}{3} + 0,0014 \left(1 + 1,5 \frac{h}{L_v}\right) + \Phi_y \frac{d_{bl}f_y}{8\sqrt{f_c}} \quad (\text{HRN EN 1998-3, A.3.2.4.})$$

Gdje je:

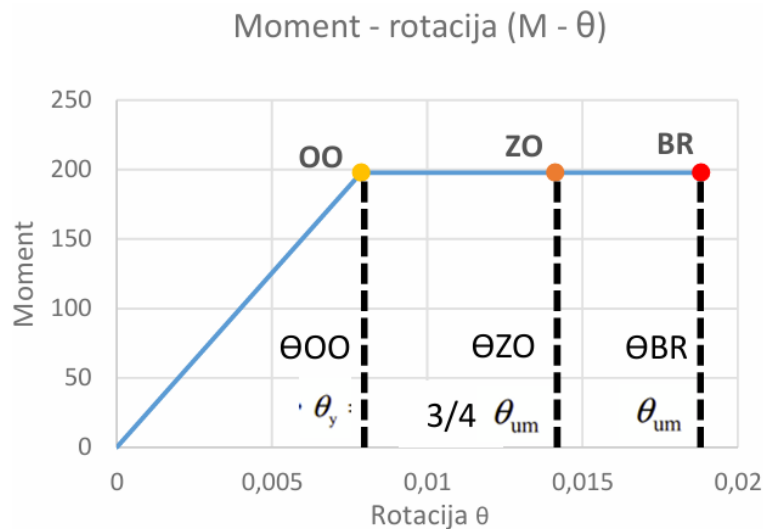
$\theta_y$  - zaokretanje vlakana u trenutku popuštanja za granično stanje ograničenog oštećenja (OO)

$\theta_{sd}$  – sposobnost zaokretanja vlakna za kriterij znatnog oštećenja (ZO)

$\theta_{um}$ - najveća sposobnost zaokretanja vlakna za granično stanje blizu rušenja (BR)

$L_{pl}$ - duljina plastičnog zgloba

Na slici 51 je prikazan M- $\theta$  dijagram (krivulja kapaciteta) sa shematskim oznakama prethodno definiranih graničnih stanja. Plastični dio dijagrama se zadaje kao „hinge“ u ETABS-u.



Slika 51 M- $\theta$  dijagram sa oznakom graničnih stanja

## 5.2. Definiranje plastičnog zgloba na poprečnu silu u stupovima

Za određivanje otpornosti postojećih AB okvira često je mjerodavna otpornost elemenata na poprečnu silu obzirom da uglavnom imaju manjka poprečne armature. U nastavku je prikazan proračun otpornosti stupova okvira na poprečnu silu sukladno HRN EN 1998-3 [5]. Posmična čvrstoća za cikličko opterećenje armiranobetonskih elemenata prema HRN EN 1998-3 iznosi:

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{\{el\}}} \left[ \frac{h-x}{2L_v} \cdot \min(N; 0,55A_c f_c) + (1 - 0,05 \cdot \min(5; \mu_{pl}^{pl})) \right] \times \left[ 0,16 \cdot \max(0,5; 100\rho_{tot}) \cdot \left( 1 - 0,16 \cdot \min\left(5; \frac{L_v}{h}\right) \right) \sqrt{f_c} A_c + V_w \right]$$

(mjerne jedinice su MN i m)

gdje je:

$\gamma_{\{el\}}$  -sigurnosni faktor (u proračunu 1,15)

$h$  -ukupna visina preseka elemenata (0,5 m)

$N$  – aksijalna sila (iz Etabsa)

$A_c$  – površina poprečnog presjeka (0,2)

$f_c$  – karakteristična tlačna čvrstoća betona (20 MPa)

$L_v$  – omjer M/V na rubu elementa

$\rho_{tot}$  – ukupna količina armature presjeka izražena u postotku (1,14%)

$V_w$  je doprinos poprečne armature posmičnoj otpornosti, a računa se kao:

$$V_w = \rho_w \cdot b_w \cdot z \cdot f_{yw} = 21,22 \text{ kN}$$

gdje je:

$\rho_w$  – omjer armiranja poprečnom armaturom (0,10048%)

$b_w$  - širina hrpta grede (0,4 m)

$z$  – krak unutarnjih sila (0,22 m)

$f_{yw}$  – proračunska granica popuštanja poprečne armature (240 MPa)

Izračunom za promatrani okvir dobivene su vrijednosti iz tablice 6:

**Tablica 6** Vrijednosti  $V_{Rd}$  stupova prema HRN EN 1998-3

$V_{Rd, S1} =$	46,85	kN
$V_{Rd, S2} =$	47,87	kN
$V_{Rd, S3} =$	42,72	kN
$V_{Rd, S4} =$	43,23	kN

Odlučeno je da plastični zglobovi na poprečnu silu neće biti definirani u nastavku analize jer bi se izgubile sve informacije o duktilnom ponašanju okvira. Ovaj model sloma je krt, odnosno čim poprečna sila u stupu dosegne izračunatu vrijednost, proračun je gotov i staje, a to krivulju čini gotovo linearnom.

### 5.3. U analizi je u obzir uzet utjecaj uzdužne sile u stupovima

Programski paket SAP2000 omogućava analizu poprečnog presjeka korištenjem *Section Designer* (SD). Alat omogućuje modeliranje poprečnog presjeka sa stvarnim rasporedom i količinom armature. Odabere se vrsta presjeka i materijal nakon čega se generira krivulja moment-zakrivljenost (*Moment-Curvature Curve*). Krivulja prikazuje nelinearni odnos između momenata savijanja i zakrivljenosti u presjeku elementa, a koristi se za analizu duktilnosti i plastičnog ponašanja u nelinearnoj analizi. Na krivulji se mogu očitati tri ključne točke koje se

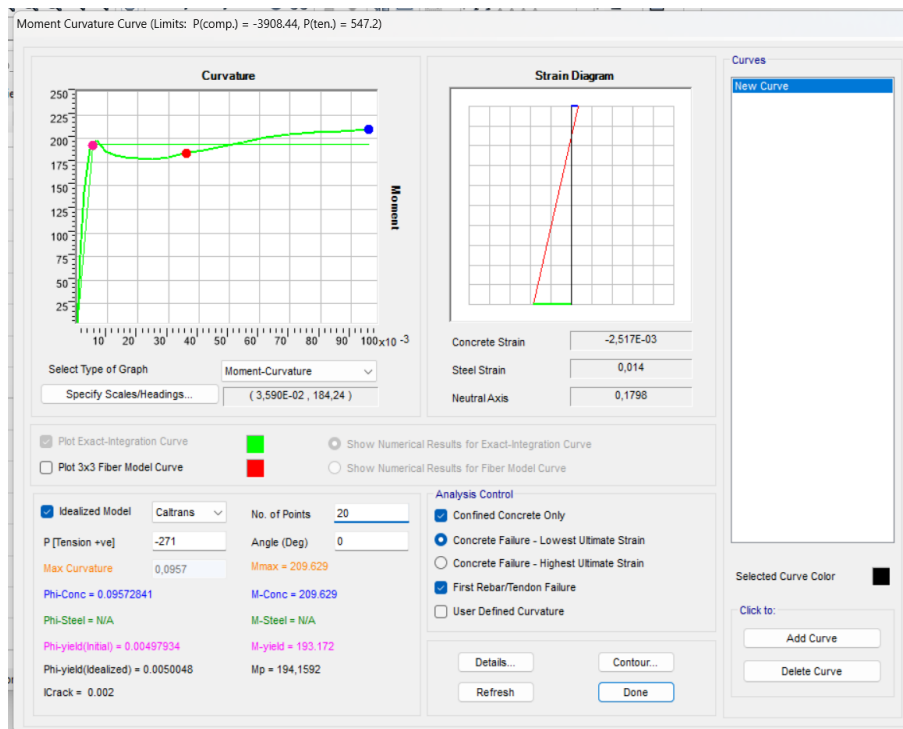
koriste za proračun plastičnih zglobova prema formulama iz HRN EN 1998-3 danim u poglavlju 5.1. ovoga rada, a to su:

'Phi-Conc' → zakrivljenost pri otkazivanju ( $\theta_u$ )

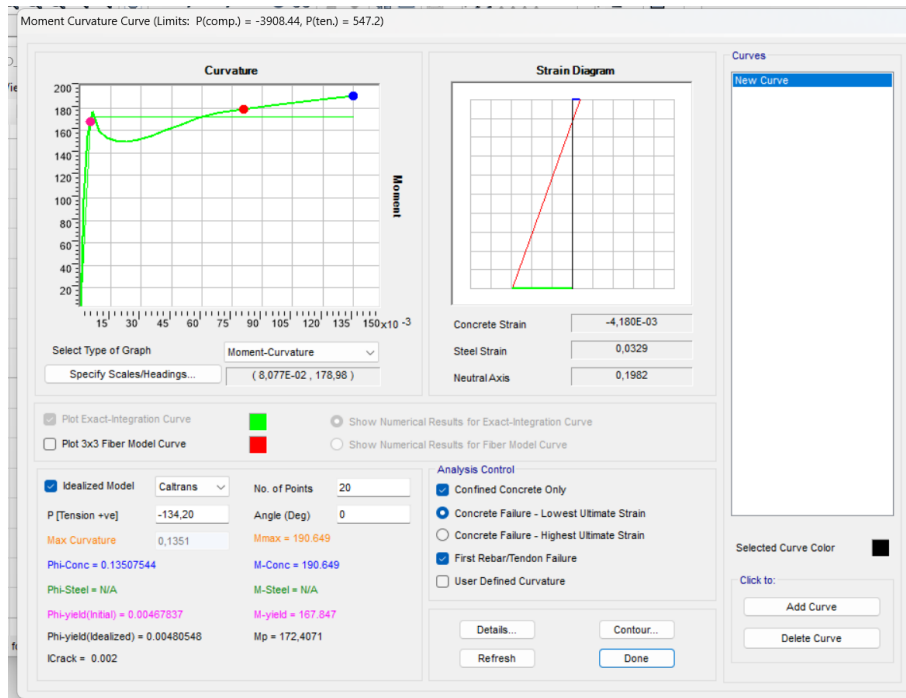
'Phi-yield (Idealized)' → zakrivljenost pri tečenju ( $\theta_y$ )

'Mp' → moment plastičnosti ( $M_{pl}$ )

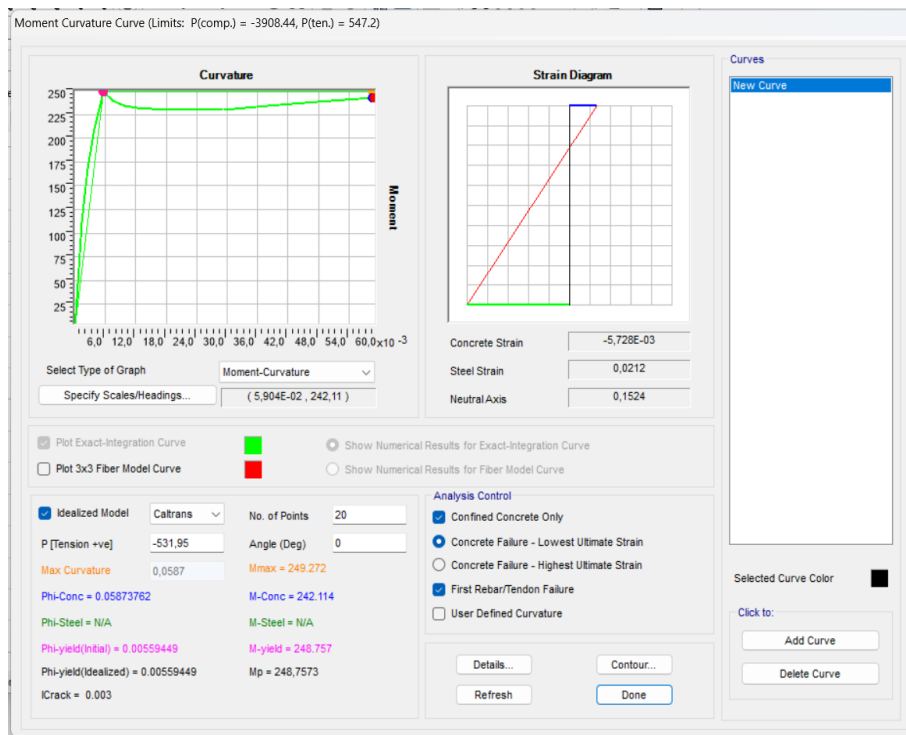
Pri analizi poprečnog presjeka u Section Designeru postoji opcija 'P [Tension +ve]'. Ta opcija omogućava uzimanje u obzir uzdužne sile u analizi te određuje predznak uzdužne sile. U ovoj definiciji vlačna sila ima pozitivan (+) predznak, dok tlačna sila ima negativan predznak (-) kao što je i uobičajeno u praksi. Obzirom da utjecaj uzdužne sile u stupovima ima važan utjecaj na kapacitet i ponašanje poprečnog presjeka, provest će se dvije analize. Jedna koja uzima u obzir utjecaj uzdužne tlačne sile od kombinacije opterećenja *mass* i jedna bez utjecaja uzdužne sile. U nastavku slijedi analiza poprečnih presjeka sa utjecajem uzdužne sile.



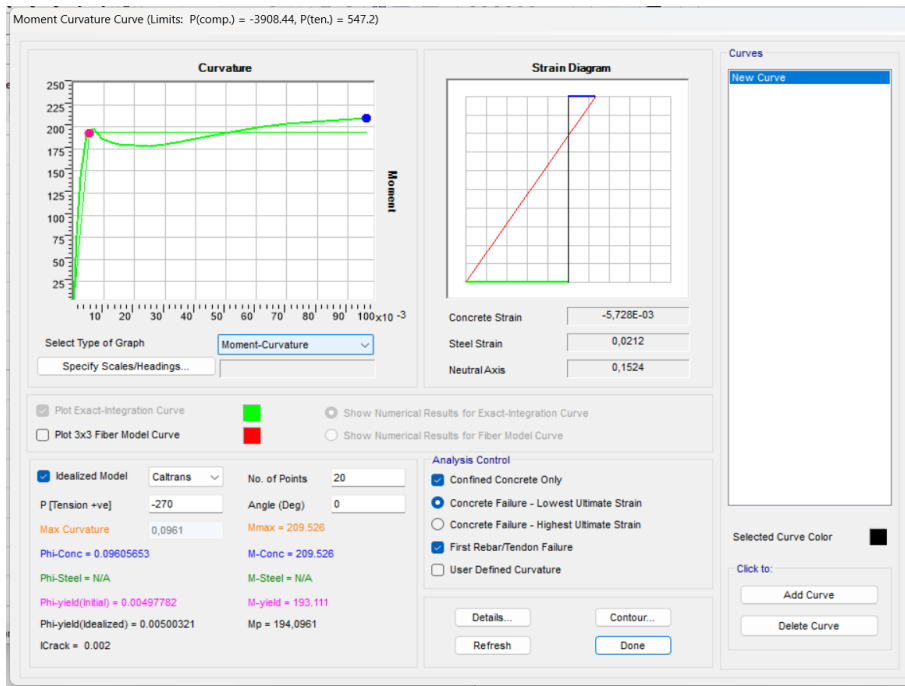
Slika 52 Analiza presjeka S1



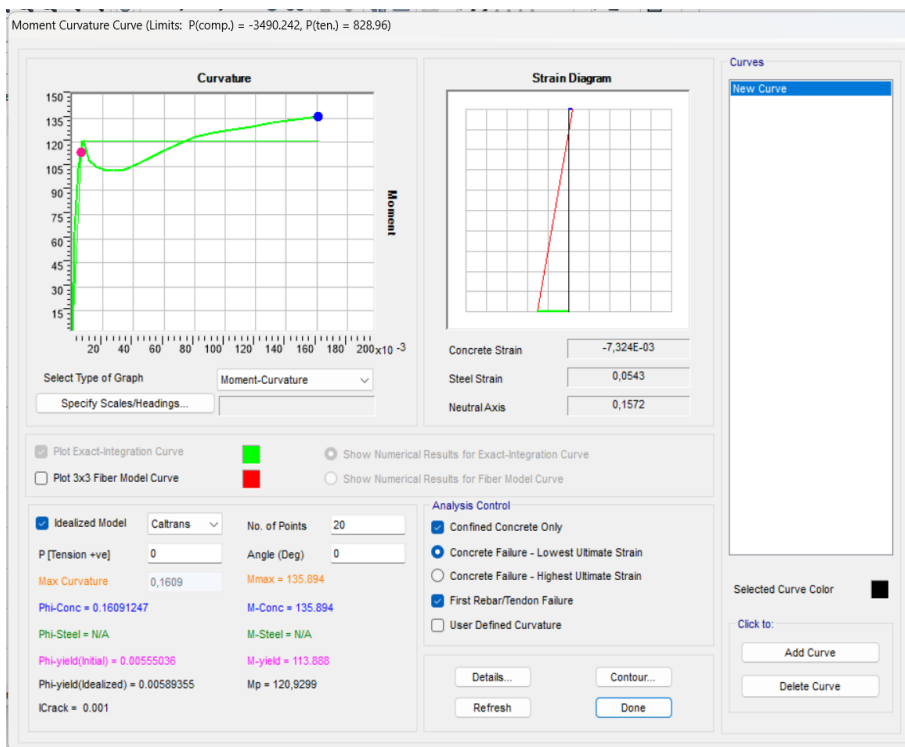
Slika 53 Analiza presjeka S2



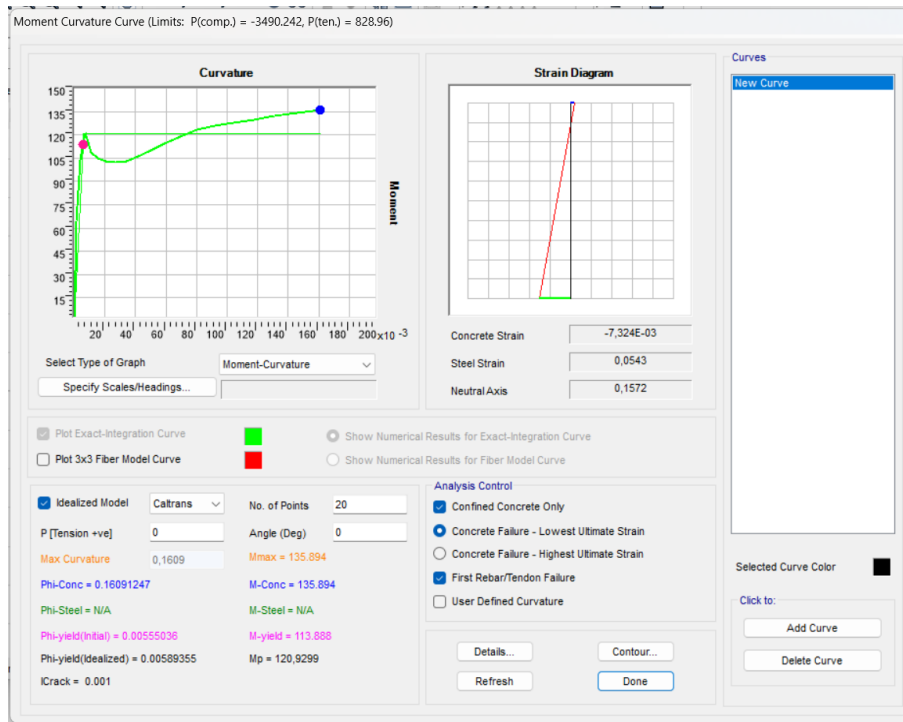
Slika 54 Analiza presjeka S3



Slika 55 Analiza presjeka S4



Slika 56 Analiza presjeka greda G1

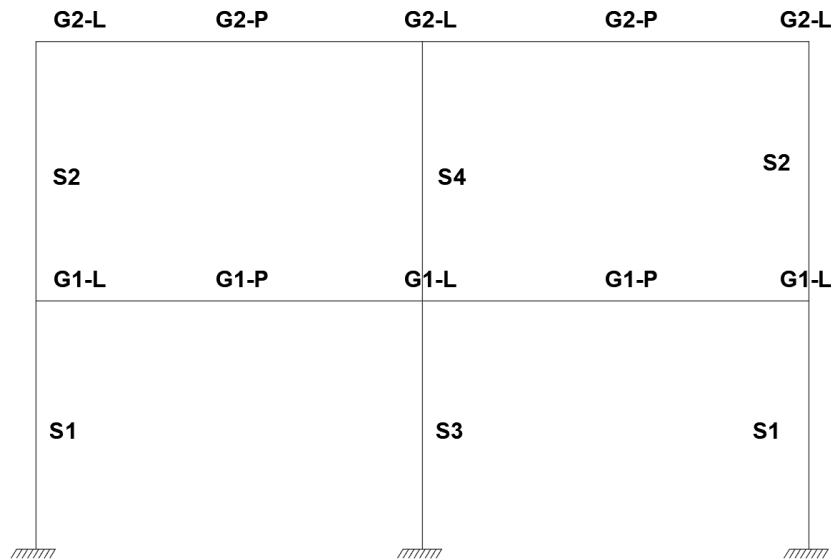


Slika 57 Analiza presjeka grede G2

Vrijednosti dobivene analizom poprečnih presjeka u SAP-u služe za ulaz u proračun definiranja plastičnih zglobova koji će se koristiti u *Pushover* analizi u ETABS-u. Konačne vrijednosti za definiranje plastičnih zglobova ove analize prikazane su u Tablici 7, a oznake odgovaraju onima na slici 58.

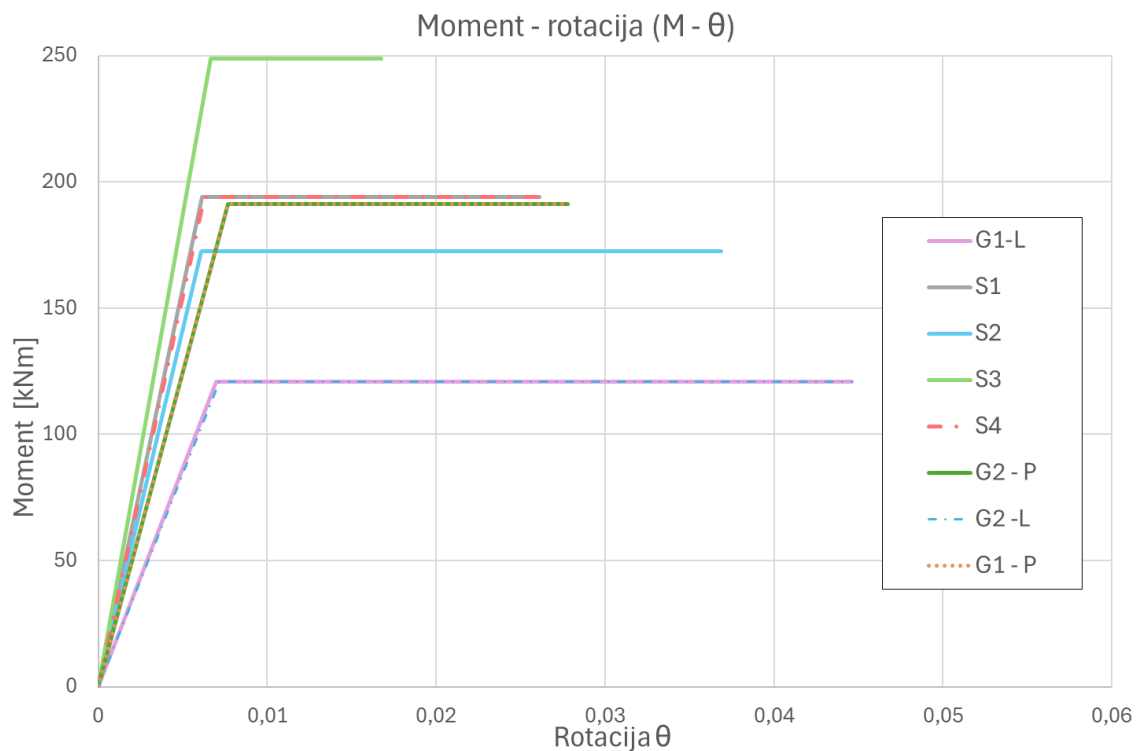
Tablica 7 Vrijednosti za definiranje plastičnih zglobova prema HRN EN 1998-3

	Moment - rotacija (M - $\theta$ )			Moment - rotacija (M - $\theta$ )		
	Rotacija $\theta$ [1/mm]	Moment [kNm]		Rotacija $\theta$ [1/mm]	Moment [kNm]	
G1 - P		0	0		0	
	$\theta_y$	0,007694296	191	$\theta_y$	0,007694296	191
	$\theta_{SD}$	0,020854485	191	$\theta_{SD}$	0,020854485	191
	$\theta_u$	0,02780598	191	$\theta_u$	0,028331409	191
G1-L		0	0		0	
	$\theta_y$	0,006971444	121	$\theta_y$	0,00715201	121
	$\theta_{SD}$	0,033464932	121	$\theta_{SD}$	0,034141658	121
	$\theta_u$	0,044619909	121	$\theta_u$	0,044619909	121
S1		0	0		0	
	$\theta_y$	0,006127509	194	$\theta_y$	0,00664054	249
	$\theta_{SD}$	0,01956939	194	$\theta_{SD}$	0,012572666	249
	$\theta_u$	0,026092519	194	$\theta_u$	0,016763554	249
S2		0	0		0	
	$\theta_y$	0,006098397	172	$\theta_y$	0,006277013	194
	$\theta_{SD}$	0,027668981	172	$\theta_{SD}$	0,020024632	194
	$\theta_u$	0,036891975	172	$\theta_u$	0,02669951	194



Slika 58 Odgovarajuće oznake plastičnih zglobova

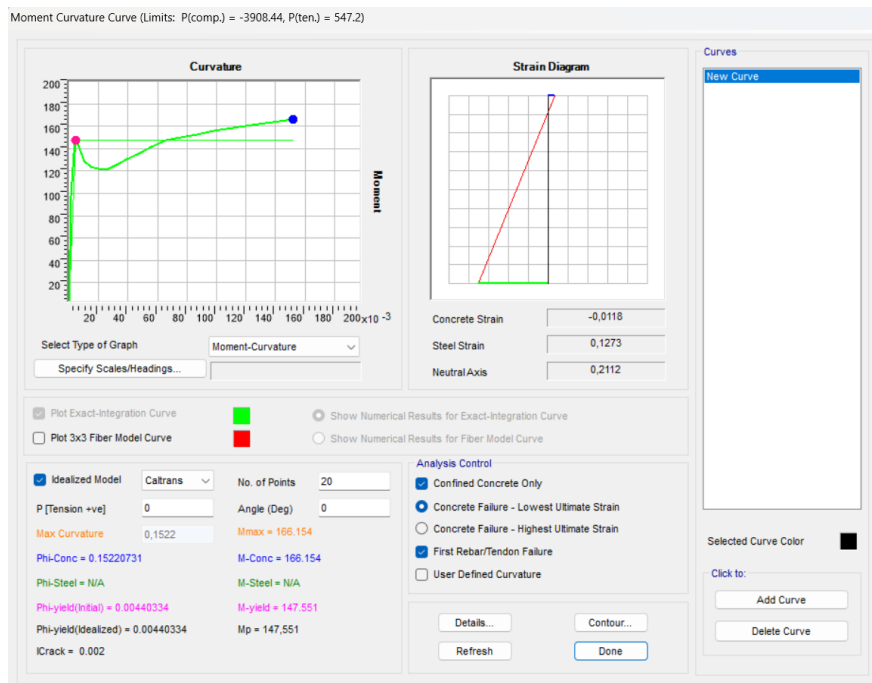
Na slici 59 je prikaz dijagrama Moment-rotacija ( $M-\theta$ ) za različite pozicije i elemente prema oznakama sa slike 58. S3 ima najveći momentni kapacitet od približno 250 kNm, što znači da ima najveću nosivost, ali i najmanju plastičnu rotaciju (duktilnost). Slijede ga plastični zglobovi S1, S4, G1-P, G2-P i S2 sa srednjim rotacijskim kapacitetom i duktilnosti. Najmanji momentni kapacitet sa najvećom pripadnom duktilnosti imaju zglobovi greda nad ležajem prve i druge etaže, G1-L i G2-L.

Slika 59 Dijagram  $M-\theta$  za vrijednosti iz tablice 7

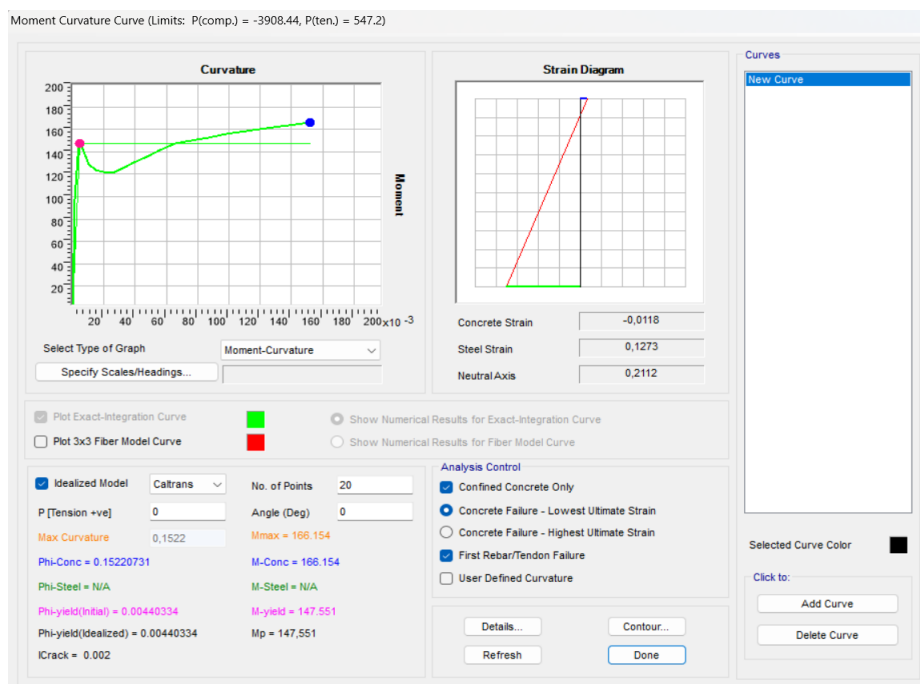


### 5.4. U analizi nije u obzir uzet utjecaj uzdužne sile u stupovima

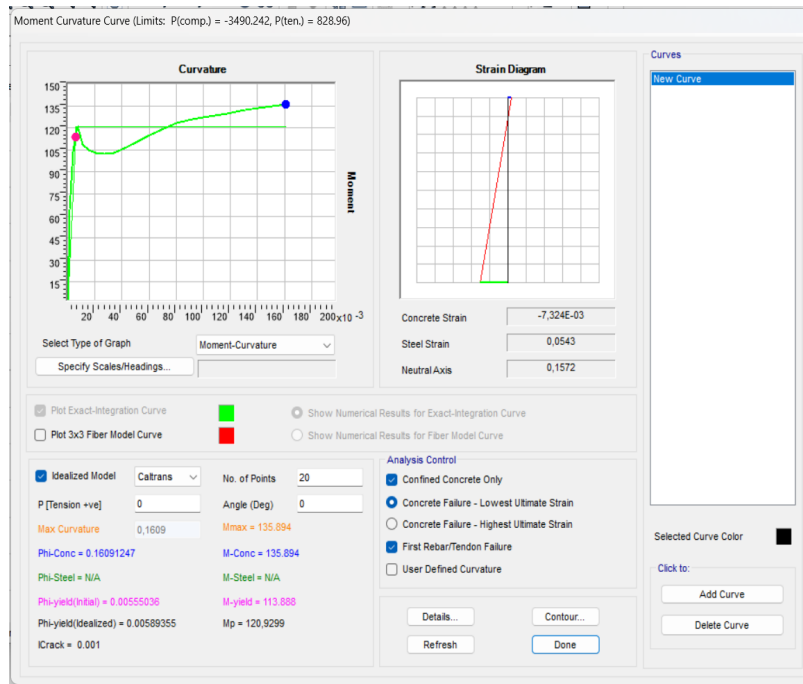
U nastavku slijedi analiza poprečnih presjeka u programskom paketu SAP2000 bez utjecaja uzdužne sile u stupovima.



Slika 60 Analiza presjeka S1 i S3



Slika 61 Analiza presjeka S2 i S4

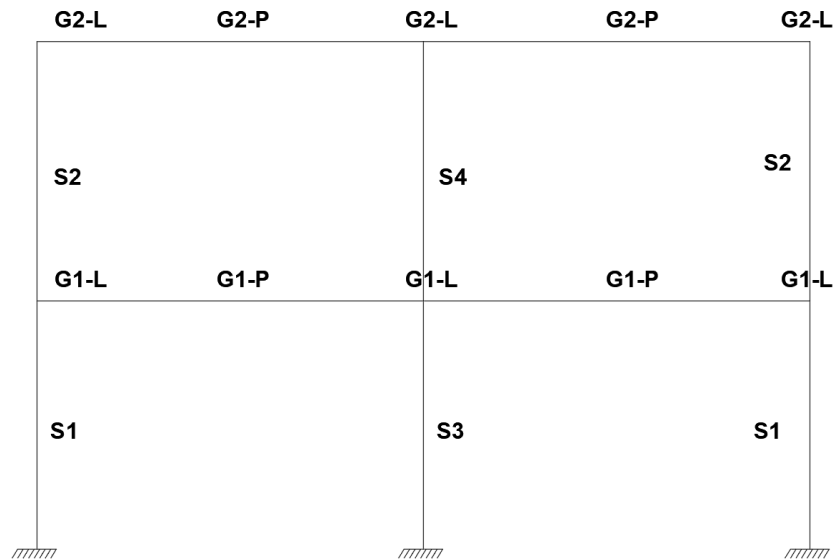


Slika 62 Analiza presjeka greda G1 i G2

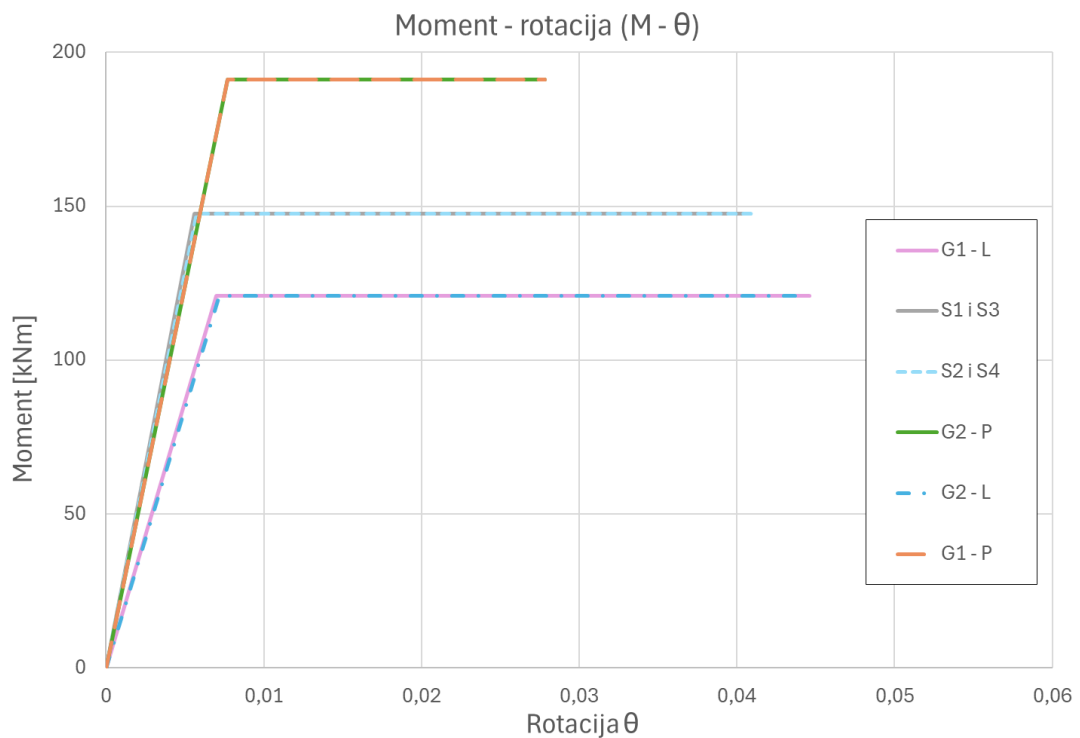
Vrijednosti dobivene analizom poprečnih presjeka u SAP-u služile su za ulaz u proračun veličina definiranih u HRN EN 1998-3 za definiranje plastičnih zglobova koji će se koristiti u *Pushover* analizi, a konačne vrijednosti za definiranje plastičnih zglobova su u Tablici 8. Analizom je također određena vrijednost momenta plastičnosti.

Tablica 8 Vrijednosti za definiranje plastičnih zglobova prema HRN EN 1998-3

	Moment - rotacija (M - $\theta$ )			Moment - rotacija (M - $\theta$ )		
	Rotacija $\theta$ [1/mm]	Moment [kNm]		Rotacija $\theta$ [1/mm]	Moment [kNm]	
G1 - P		0	0		0	
	$\theta_y$	0,007694296	191	$\theta_y$	0,007694296	191
	$\theta_{SD}$	0,020854485	191	$\theta_{SD}$	0,020854485	191
	$\theta_u$	0,02780598	191	$\theta_u$	0,028331409	191
G1 - L		0	0		0	
	$\theta_y$	0,006971444	121	$\theta_y$	0,00715201	121
	$\theta_{SD}$	0,033464932	121	$\theta_{SD}$	0,034141658	121
	$\theta_u$	0,044619909	121	$\theta_u$	0,044619909	121
S1 i S3		0	0		0	
	$\theta_y$	0,005604239	148			
	$\theta_{SD}$	0,030319184	148			
	$\theta_u$	0,040425578	148			
S2 i S4		0	0			
	$\theta_y$	0,005735131	148			
	$\theta_{SD}$	0,030956096	148			
	$\theta_u$	0,041274795	148			



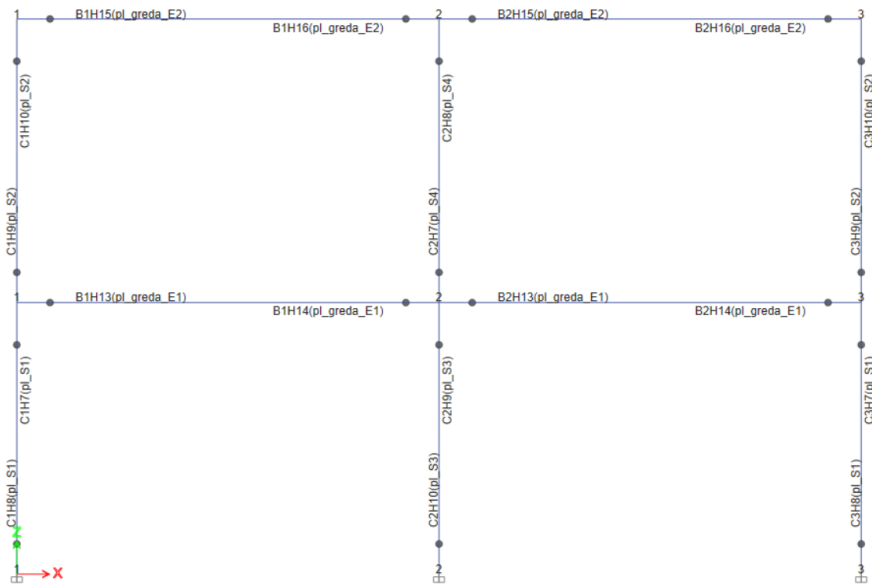
Slika 63 Odgovarajuće oznake plastičnih zglobova

Slika 64 Dijagram M-  $\theta$  za vrijednosti iz tablice 8

Na slici 64 je prikaz dijagrama Moment-rotacija ( $M-\theta$ ) za različite pozicije i elemente prema oznakama sa slike 63. Plastični zglobovi G1-P i G2-P imaju najveći momentni kapacitet od 191 kNm, što znači da imaju najveću nosivost, ali i najmanju plastičnu rotaciju (duktilnost). Slijede ga plastični zglobovi S1, S2, S3 i S4 sa srednjim rotacijskim kapacitetom i duktilnosti. Najmanji momentni kapacitet sa najvećom pripadnom duktilnosti imaju zglobovi greda nad ležajem prve i druge etaže, G1-L i G2-L.

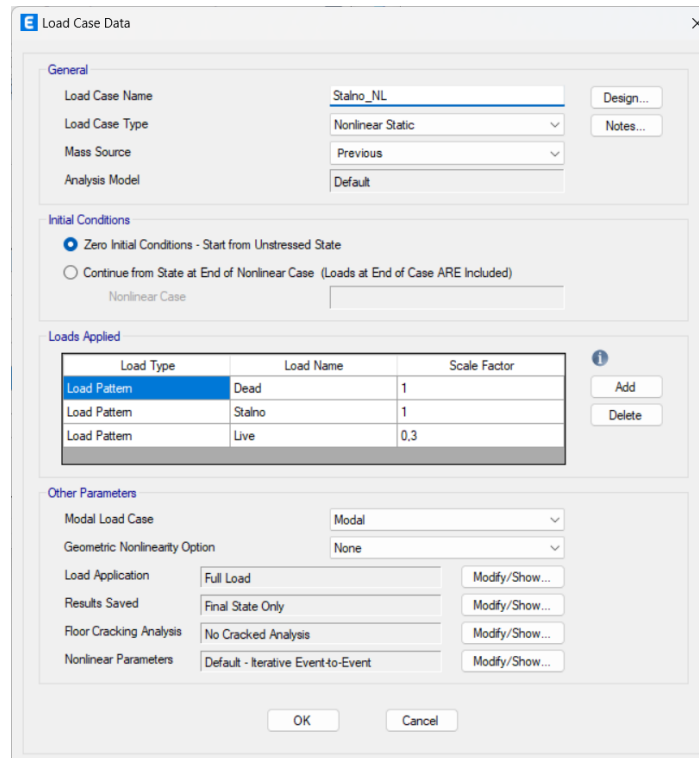
## 5.5. Pushover analiza

Prema izračunatim vrijednostima za definiranje plastičnih zglobova su definirani „hinge“ elementi na gredama i stupovima, slika 65. Plastični zglobovi su udaljeni za približno 50 cm od čvora.



**Slika 65** Shema pridruženih plastični zglobovi (eng. *hinge*)

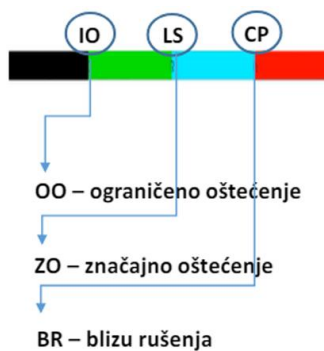
Također je definiran novi slučaj kombinacije opterećenja (eng. *Load Case*) pod nazivom 'Stalno\_NL'. Kombinacija je definirana tako da vlastitu težinu okvira i stalno opterećenje množi s faktorom 1, dok je uporabno opterećenje (eng. *live*) faktorizirano sa 0,3.



Slika 66 Kombinacija opterećenja Stalno\_NL

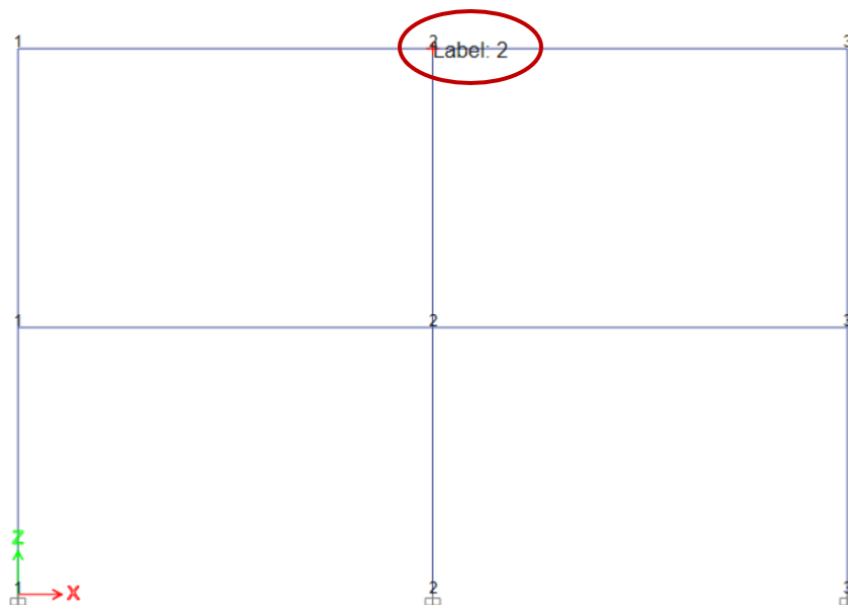
### 5.5.1. Faze formiranja plastičnih zglobova

U nastavku je prikaz tijeka 'otvaranja' plastičnih zglobova na okviru. Boje na mjestima plastičnih zglobova označavaju granična stanja određena pri definiranju plastičnih zglobova, slika 67. Pushover analizom dobiveni su oblici otkazivanja okvira.



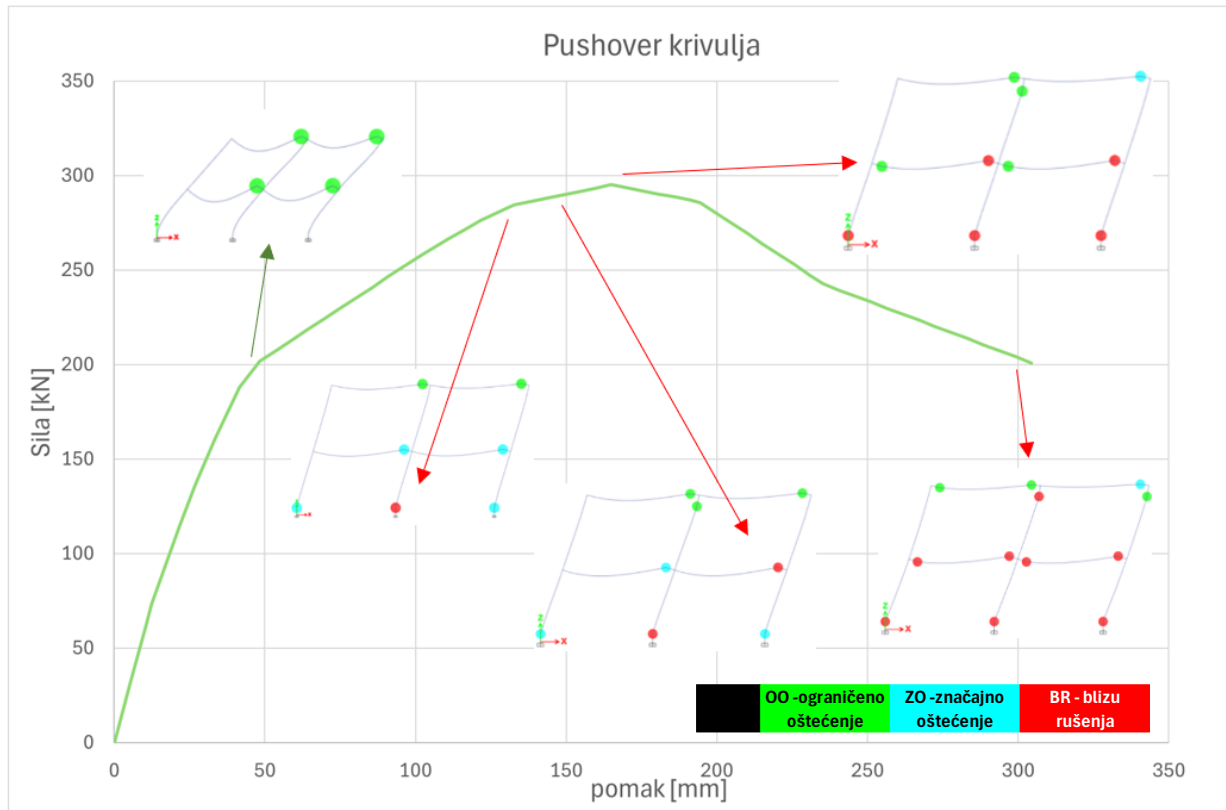
Slika 67 Boje plastičnih zglobova u ETABS-u prema graničnim stanjima

Za kontrolnu točku izabran je čvor broj 2 na drugoj etaži. Odgovara kriterijima da se nalazi na vrhu konstrukcije i blizu/u centru mase etaže.



**Slika 68** Promatrani čvor analize

## 5.5.1.1. Pushover krivulja modela sa utjecajem uzdužne sile

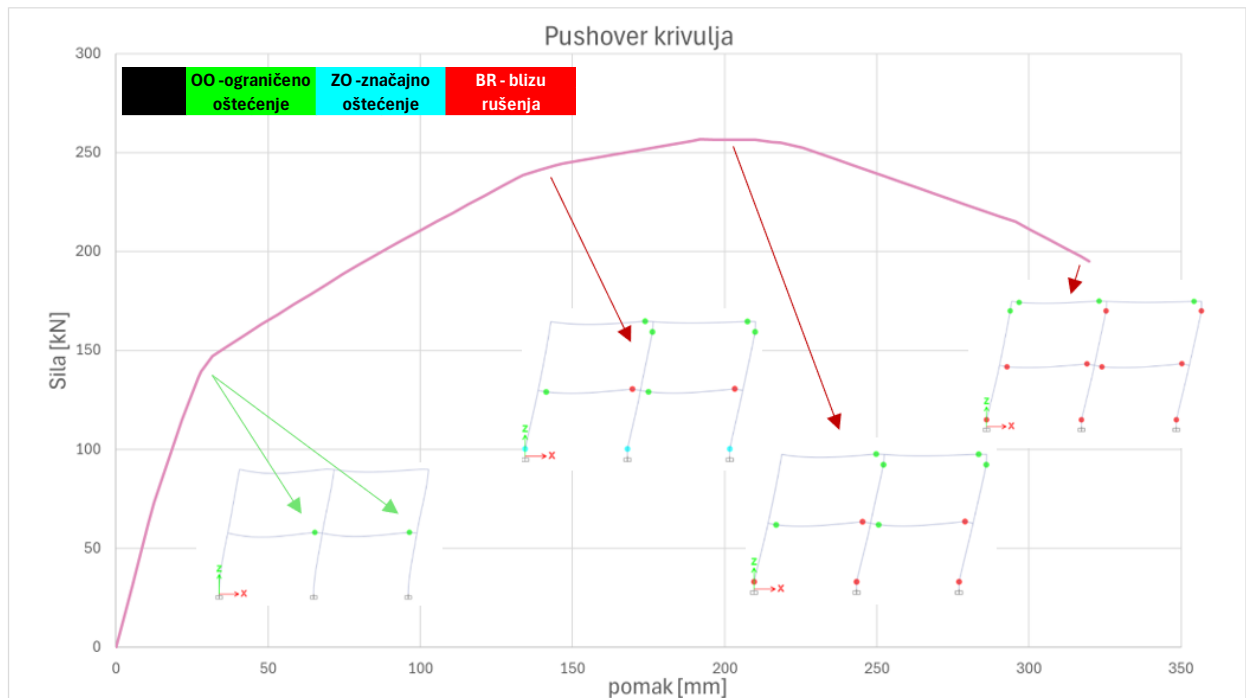


**Slika 69** Pushover krivulja sa pripadnim mehanizmima otkazivanja u modelu sa utjecajem uzdužne sile u stupovima

Na krivulji kapaciteta prikazani su mehanizmi otkazivanja okvira u pojedinim fazama analize. Boje plastičnih zglobova označavaju granična stanja (OO, ZO i BR). Pri pomaku od 41 mm javljaju se prvi plastični zglobovi ograničenog oštećenja u gredama prve etaže, a prate ih i dva plastična zgloba (OO) greda druge etaže. Daljnjim opterećenjem se javljaju plastični zglobovi u podnožju stupova S3 i S4 (desno), a u granično stanje blizu rušenja prvi ulazi stup S3 pri pomaku od 116,37 mm i sili od 271 kN. Prate ga plastični zglob na desnom dijelu grede prve etaže, a potom i ostali plastični zglobovi prikazani na slici 69.

Mehanizam sloma armiranobetonskog okvira sa plastičnim zglobovima definiranim prema HRN EN 1998-3 i uzetim utjecajem uzdužne sile u stupovima pri definiranju kapaciteta poprečnog presjeka je mehanizam sa jakim stupovima i slabim gredama. Mehanizam se ostvario tako da su se otvorili zglobovi na gredama i na dnu temelju stupova.

## 5.5.1.2. Pushover krivulja modela bez utjecaja uzdužne sile



**Slika 70** Pushover krivulja sa pripadnim mehanizmima otkazivanja u modelu bez utjecaja uzdužne sile u stupovima

Na krivulji kapaciteta prikazani su mehanizmi otkazivanja okvira u pojedinim fazama analize. Boje plastičnih zglobova označavaju granična stanja (OO, ZO i BR). Pri pomaku od 27,92 mm i sili od 139,53 kN javljaju se prvi plastični zglobovi označen zelenom bojom (OO) na desnim stranama greda na prvoj etaži (prvo se javlja na desnoj gredi, a u sljedećem koraku i na lijevoj). Daljnjim opterećenjem ti isti plastični zglobovi ulaze u granično stanje ZO pri 115mm pomaka i 224 kN. U stanje blizu rušenja ulaze na približno 157,25 mm i silom od 247,40 kN. Ostali se zglobovi otvaraju prema prikazu na slici 70.

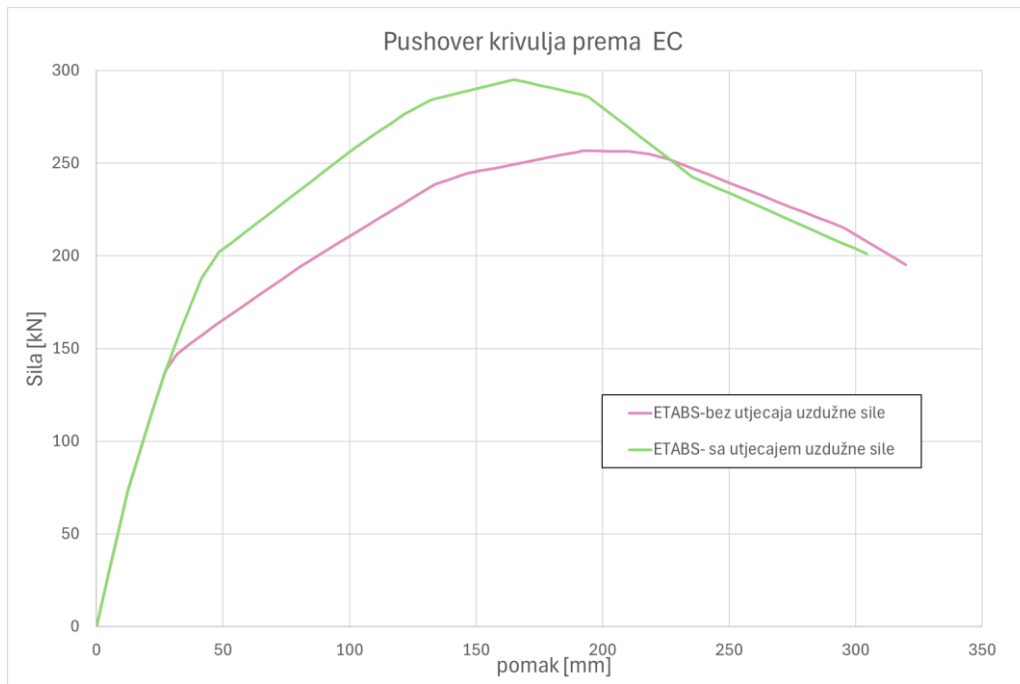
Mehanizam sloma armiranobetonskog okvira sa plastičnim zglobovima definiranim prema HRN EN 1998-3 i bez utjecaja uzdužne sile u stupovima pri definiranju kapaciteta poprečnog presjeka je mehanizam sa slabim gredama i jakim stupovima i sličan je mehanizmu sa utjecajem uzdužne sile.

## 5.5.2. Usporedba pushover krivulja dviju analiza u ETABS-u

Na slici 71 je dan prikaz dviju pushover krivulja sa zglobovima definiranim prema Eurokodu. Zelena krivulja predstavlja pushover krivulju dobivenu u proračunu sa utjecajem uzdužne sile, dok roza predstavlja onu bez utjecaja uzdužne sile. Nagibi obje krivulje su slični u početku, iako zelena krivulja pokazuje blago veću krutost. Zelena krivulja dostiže maksimalnu silu od 295,26 kN za pomak od 164,86 mm, dok je kod roze maksimalan iznos sile 256,7082 kN, a pripadni



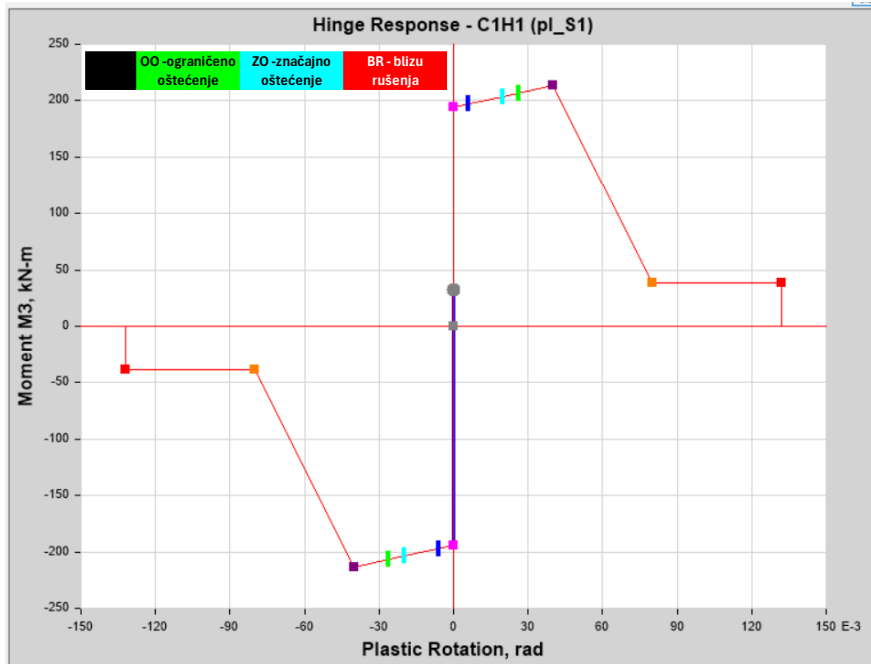
pomak je 192,03 mm. Nakon maksimalne sile, kod zelene se krivulje uočava brži pad otpornosti, dok je kod roze krivulje ta degradacija postepenija i krivulja pokazuje veću duktilnost, obzirom da ima veću sposobnost deformacije prije konačnog sloma. Zelena krivulja pokazuje veći nagib nakon dosezanja vršne vrijednosti što je tipično za negativni P- $\Delta$  efekt, gdje veće aksijalne sile doprinose gubitku stabilnosti okvira.



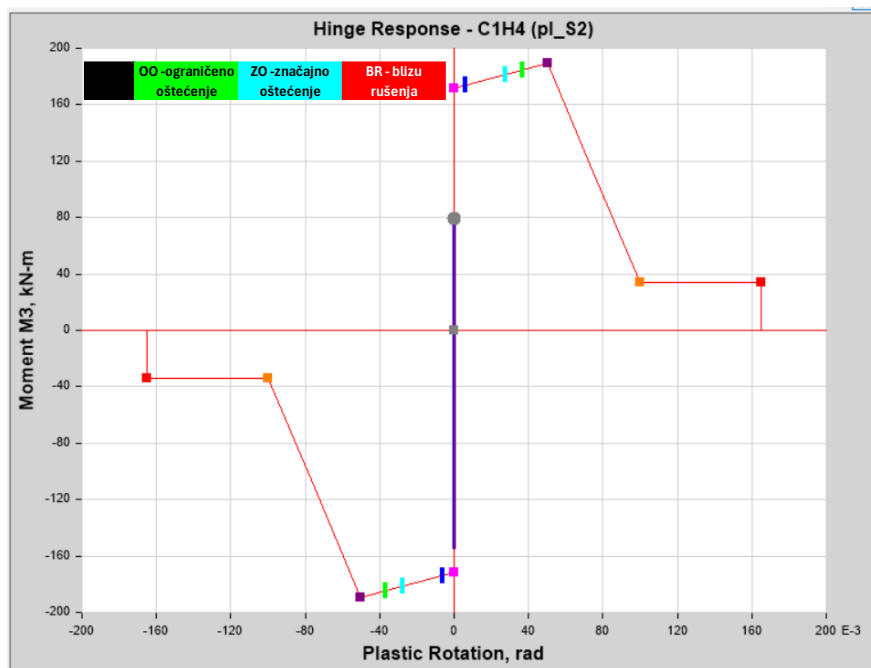
**Slika 71** Usporedba pushover krivulja

Na slikama 72 - 75 je prikaz rezultata u plastičnim zglobovima vrha stupova S1 i S2.

### 5.5.3. Sa utjecajem uzdužne sile

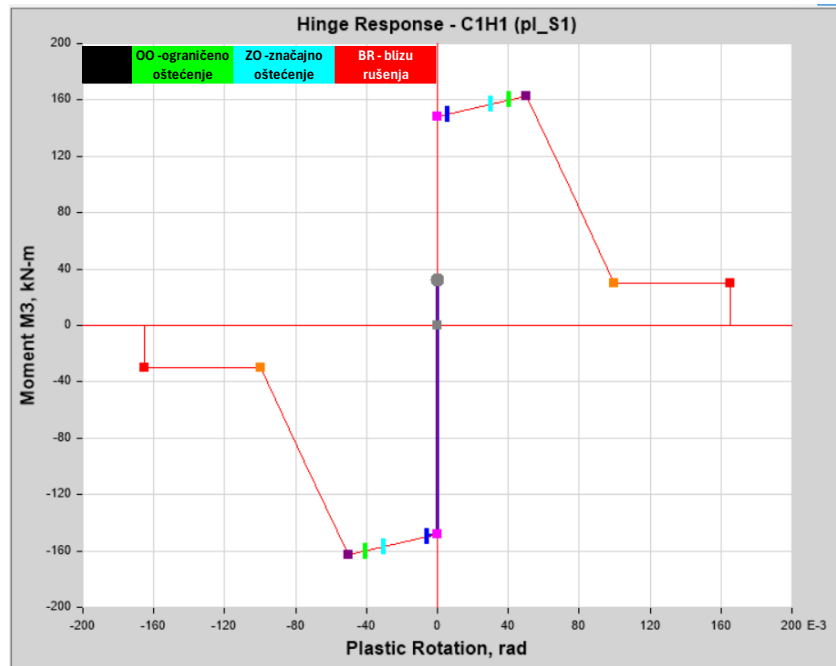


Slika 72 Vrh stupa S1

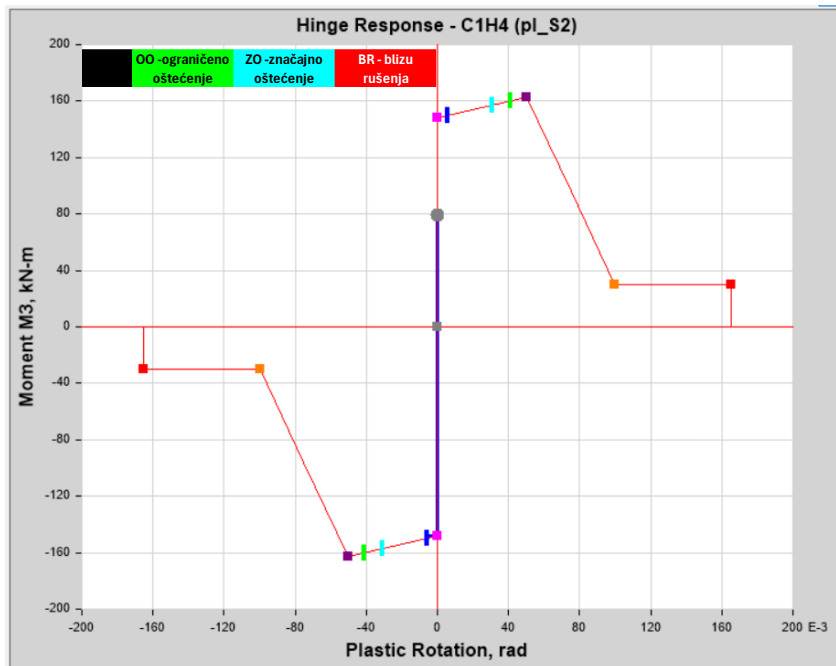


Slika 73 Vrh stupa S2

### 5.5.4. Bez utjecaja uzdužne sile



Slika 74 Vrh stupa S1



Slika 75 Vrh stupa S2

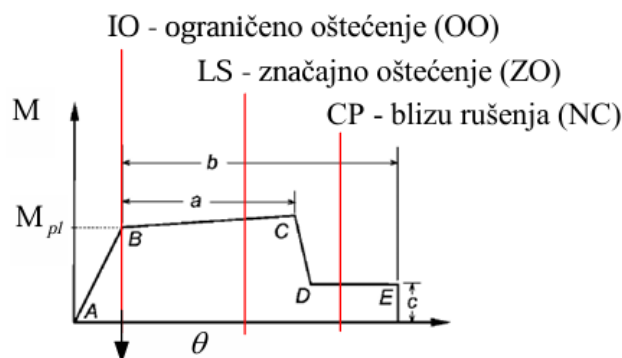
## 6. NUMERIČKI MODEL U ETABSU ASCE 41-13

ASCE 41-13 (*Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*) američki je nacionalni standard koji je izdao American Society of Civil Engineers (ASCE) 2014. godine, a odnosi se na procjenu seizmičke sigurnosti te sanaciju građevina. ASCE 41 daje smjernice za definiranje razina prihvatljivog ponašanja konstrukcija tijekom potresa pa tako i definira granična stanja za već postojeće konstrukcije [13]:

- IO (eng. *Immediate Occupancy*) – zgrada ostaje odmah uporabljiva
- LS (eng. *Life Safety*) – osigurava zaštitu života, iako može doći do značajnijih oštećenja
- CP (eng. *Collapse Prevention*) – sprječavanje potpunog kolapsa zgrade, uz vrlo velika oštećenja

Prema ASCE 41-13 omogućene su nelinearna statička analiza (*Pushover* analiza) i nelinearna dinamička analiza (*time-history* analiza). Metodologija analize se temelji na pomacima (*Displacement-based analysis*) gdje se naglasak stavlja na realnu procjenu deformacije elemenata konstrukcije tijekom potresa. [13]

U ovom je poglavlju opisana analiza okvira, u kojoj se od prethodne, jedino razlikuje propis prema kojem su plastični zglobovi definirani. Propis razlikuje tri uvjeta (*Conditions 1, 2 i 3*) koji se koriste za definiranje graničnih vrijednosti plastičnih zglobova. Provedene su dvije analize prema standardu ASCE 41-13, za *Condition 2* i *Condition 3*. U Tablici 9 su definirani uvjeti za odredbu stanja postojeće konstrukcije prema kojemu se odabire skupina podataka za definiranje krivulje kapaciteta greda i stupova, slike 77 i 78. Na slici 76 je shematski prikaz graničnih stanja plastičnog zgloba. Također valja napomenuti da prema ASCE 41-13 nije potrebno definirati plastične zglobove na poprečnu silu, već je utjecaj uzet u definiranju plastičnih zglobova. Za kontrolu poprečne sile ASCE 41-13 koristi krivulje kapaciteta i smanjenu krutost na smicanje elemenata. U slučaju da element ne može prenijeti poprečnu silu, ne razvija punu duktilnost i dolazi do naglog pada.



**Slika 76** Shematska oznaka definicije plastičnog zgloba prema ASCE 41-13

**Tablica 9** Uvjeti za odredbu stanja (izvor: ASCE-41 [13])

**Table 10-11. Transverse Reinforcement Details: Condition to Be Used for Columns in Table 10-8**

Shear Capacity Ratio	ACI 318 Conforming Seismic Details with 135-Degree Hooks	Closed Hoops with 90-Degree Hooks	Other (Including Lap-Spliced Transverse Reinforcement)
$V_p/V_o \leq 0.6$	i <sup>a</sup>	ii	ii
$1.0 \geq V_p/V_o > 0.6$	ii	ii	iii
$V_p/V_o > 1.0$	iii	iii	iii

<sup>a</sup>To qualify for condition i, a column should have  $A_v/b_w s \geq 0.002$  and  $s/d \leq 0.5$  within flexural plastic hinge region. Otherwise, the column is assigned to condition ii.

**Table 10-7. Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Beams**

Conditions	Modeling Parameters <sup>a</sup>			Acceptance Criteria <sup>a</sup>				
	Plastic Rotations Angle (radians)	Residual Strength Ratio	Plastic Rotations Angle (radians)					
			Performance Level					
	a	b	c	IO	LS	CP		
Condition i. Beams controlled by flexure <sup>b</sup>								
$\rho - \rho'$	Transverse reinforcement <sup>c</sup>	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$						
$\rho_{bal}$								
$\leq 0.0$	C	$\leq 3$ (0.25)	0.025	0.05	0.2	0.010	0.025	0.05
$\leq 0.0$	C	$\geq 6$ (0.5)	0.02	0.04	0.2	0.005	0.02	0.04
$\geq 0.5$	C	$\leq 3$ (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005	0.02	0.03
$\geq 0.5$	C	$\geq 6$ (0.5)	0.015	0.02	0.2	0.005	0.015	0.02
$\leq 0.0$	NC	$\leq 3$ (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005	0.02	0.03
$\leq 0.0$	NC	$\geq 6$ (0.5)	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.01	0.015
$\geq 0.5$	NC	$\leq 3$ (0.25)	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.015
$\geq 0.5$	NC	$\geq 6$ (0.5)	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.01
Condition ii. Beams controlled by shear <sup>b</sup>								
			0.0030	0.02	0.2	0.0015	0.01	0.02
			0.0030	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.01
Condition iii. Beams controlled by inadequate development or splicing along the span <sup>b</sup>								
			0.0030	0.02	0.0	0.0015	0.01	0.02
			0.0030	0.01	0.0	0.0015	0.005	0.01
Condition iv. Beams controlled by inadequate embedment into beam-column joint <sup>b</sup>								
			0.015	0.03	0.2	0.01	0.02	0.03

NOTE:  $f'_c$  in lb/in.<sup>2</sup> (MPa) units.

<sup>a</sup>Values between those listed in the table should be determined by linear interpolation.

<sup>b</sup>Where more than one of conditions i, ii, iii, and iv occur for a given component, use the minimum appropriate numerical value from the table.

<sup>c</sup>“C” and “NC” are abbreviations for conforming and nonconforming transverse reinforcement, respectively. Transverse reinforcement is conforming if, within the flexural plastic hinge region, hoops are spaced at  $\leq d/3$ , and if, for components of moderate and high ductility demand, the strength provided by the hoops ( $V_s$ ) is at least 3/4 of the design shear. Otherwise, the transverse reinforcement is considered nonconforming.

<sup>d</sup> $V$  is the design shear force from NSP or NDP.

**Slika 77** Podaci za definiranje krivulje kapaciteta greda (izvor: ASCE-41 [13])

Table 10-8. Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Columns

Conditions	Modeling Parameters <sup>a</sup>			Acceptance Criteria <sup>a</sup>				
	Plastic Rotations Angle (radians)		Residual Strength Ratio	Plastic Rotations Angle (radians)				
	a	b		IO	LS	CP		
<b>Condition i.<sup>b</sup></b>								
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$							
≤0.1	≥0.006		0.035	0.060	0.2	0.005	0.045	0.060
≥0.6	≥0.006		0.010	0.010	0.0	0.003	0.009	0.010
≤0.1	≤0.002		0.027	0.034	0.2	0.005	0.027	0.034
≥0.6	=0.002		0.005	0.005	0.0	0.002	0.004	0.005
<b>Condition ii.<sup>b</sup></b>								
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$						
≤0.1	≥0.006	≤3 (0.25)	0.032	0.060	0.2	0.005	0.045	0.060
≤0.1	≥0.006	≥6 (0.5)	0.025	0.060	0.2	0.005	0.045	0.060
≥0.6	≥0.006	≤3 (0.25)	0.010	0.010	0.0	0.003	0.009	0.010
≥0.6	≥0.006	≥6 (0.5)	0.008	0.008	0.0	0.003	0.007	0.008
≤0.1	≤0.0005	≤3 (0.25)	0.012	0.012	0.2	0.005	0.010	0.012
≤0.1	≤0.0005	≥6 (0.5)	0.006	0.006	0.2	0.004	0.005	0.006
≥0.6	≤0.0005	≤3 (0.25)	0.004	0.004	0.0	0.002	0.003	0.004
≥0.6	≤0.0005	≥6 (0.5)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Condition iii.<sup>b</sup></b>								
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$							
≤0.1	≥0.006		0.0	0.060	0.0	0.0	0.045	0.060
≥0.6	≥0.006		0.0	0.008	0.0	0.0	0.007	0.008
≤0.1	≤0.0005		0.0	0.006	0.0	0.0	0.005	0.006
≥0.6	≤0.0005		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Condition iv. Columns controlled by inadequate development or splicing along the clear height<sup>b</sup></b>								
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$							
≤0.1	≥0.006		0.0	0.060	0.4	0.0	0.045	0.060
≥0.6	≥0.006		0.0	0.008	0.4	0.0	0.007	0.008
≤0.1	≤0.0005		0.0	0.006	0.2	0.0	0.005	0.006
≥0.6	≤0.0005		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

NOTE:  $f'_c$  is in lb/in.<sup>2</sup> (MPa) units.

<sup>a</sup>Values between those listed in the table should be determined by linear interpolation.

<sup>b</sup>Refer to Section 10.4.2.2.2 for definition of conditions i, ii, and iii. Columns are considered to be controlled by inadequate development or splices where the calculated steel stress at the splice exceeds the steel stress specified by Eq. (10-2). Where more than one of conditions i, ii, iii, and iv occurs for a given component, use the minimum appropriate numerical value from the table.

<sup>c</sup>Where  $P > 0.7A_g f'_c$ , the plastic rotation angles should be taken as zero for all performance levels unless the column has transverse reinforcement consisting of hoops with 135-degree hooks spaced at  $\leq d/3$  and the strength provided by the hoops ( $V_s$ ) is at least 3/4 of the design shear. Axial load  $P$  should be based on the maximum expected axial loads caused by gravity and earthquake loads.

<sup>d</sup> $V$  is the design shear force from NSP or NDP.

**Slika 78** Podaci za definiranje krivulje kapaciteta stupova (izvor: ASCE-41 [13])

Prije ulaska u proračun za definiranje plastičnih zglobova prema ASCE 41-13 analizirani su poprečni presjeci svih stupova i greda. U analizi poprečnih presjeka je uzet u obzir utjecaj uzdužne sile u stupovima. Iz krivulja kapaciteta presjeka dobivene su vrijednosti momenta plastičnosti čija nam je vrijednost potrebna za daljnji proračun.

### 6.1. Krivulje kapaciteta definirane za *Condition 2*

*Condition 2* se koristi za elemente koji su umjereno armirani i definirani prema kriterijima koji pretpostavljaju umjereno duktilno ponašanje. Uobičajeno imaju umjeren kapacitet deformacija i ograničenu mogućnost redistribucije sila. Primjenu nalazi kod elemenata djelomično armiranih za seizmičke sile ili kada nismo sigurni kakvi su detalji armiranja. U Tablici 10 su prikazani ulazni podatci i sve vrijednosti dobivene analizom i proračunom prema kojima će se definirati *hinge* u ETABS-u.

**Tablica 10** Ulazni podatci proračuna i vrijednosti za plastične zglobove stupova, *Condition 2*

	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>
$P[N] =$	271000	134200	531950	270000
$A_g[mm^2] =$	200000	200000	200000	200000
$f'_c[MPa] =$	20	20	20	20
$A_v[mm^2] =$	100,53	100,53	100,53	100,53
$b_w[mm] =$	400	400	400	400
$s[mm] =$	200	200	200	200
$d[mm] =$	351	351	351	351
$d/2[mm] =$	175,5	175,5	175,5	175,5
$V[N]$	268530	268530	268530	268530

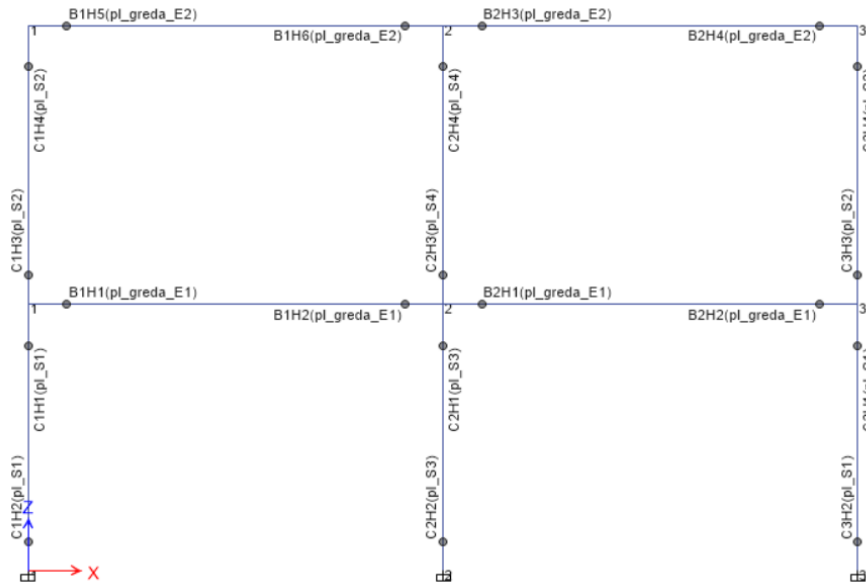
$\frac{P}{A_g f'_c} =$	0,068	0,034	0,133	0,068
$\rho = \frac{A_v}{b_w s} =$	0,001	0,001	0,001	0,001
$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}} =$	0,42767189	0,42767189	0,42767189	0,42767189

<b>Mpl</b> (etabs) [kNm]	205	182	234	205
-----------------------------	-----	-----	-----	-----

<b>a</b> [rad]	0,01084	0,01084	0,003947	0,01084
<b>b</b>	0,01364	0,013456	0,003947	0,01364
<b>c</b> [rad]	0,16447	0,16447	0,16447	0,16447
<b>IO</b> [rad]	0,004112	0,004112	0,00197	0,004112
<b>LS</b> [rad]	0,01084	0,01084	0,0029604	0,01084
<b>CP</b> [rad]	0,01346	0,01346	0,003947	0,01346

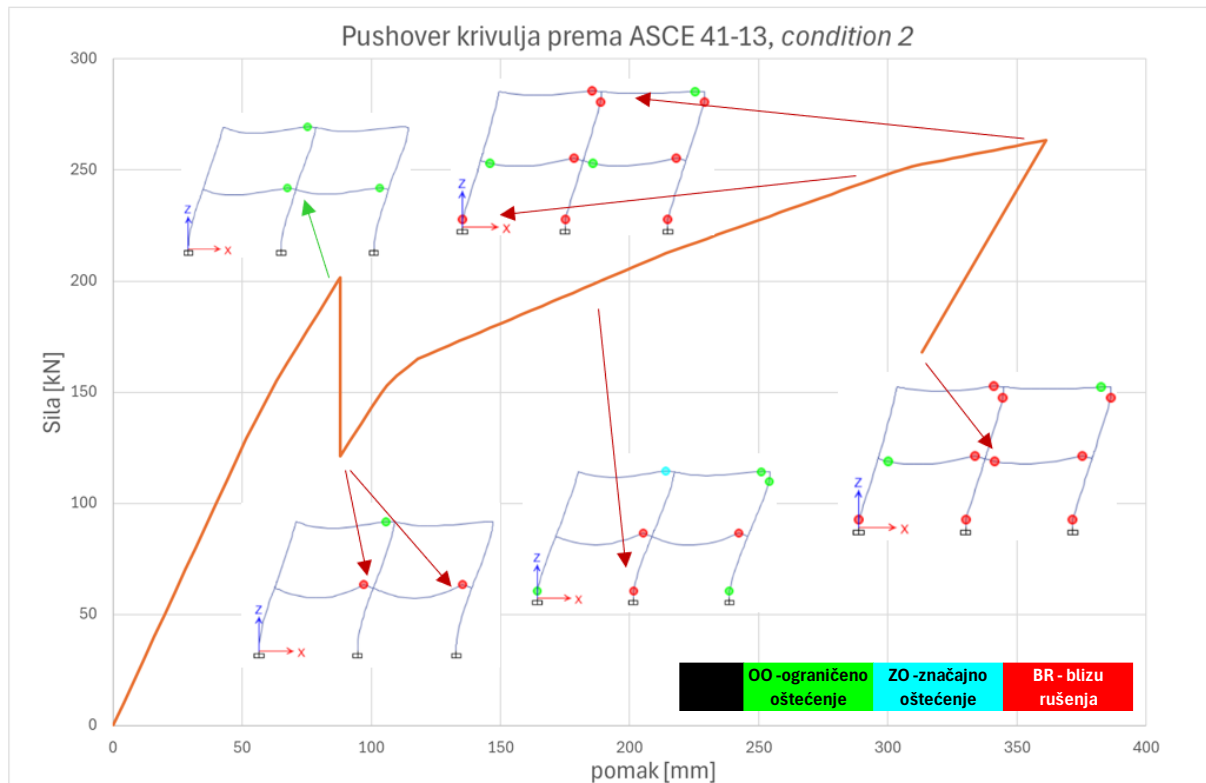
**Tablica 11** Vrijednosti za plastične zglobove greda, *Condition 2*

GREDA							
a [rad]	b	c [rad]	IO [rad]	LS [rad]	CP [rad]	Mpl-ležaj [kNm]	Mpl - polje [kNm]
0,003	0,01	0,2	0,0015	0,005	0,01	138	211



**Slika 79** Hinge zadan prema ASCE 41-13, *Condition 2*



6.1.1. Pushover krivulja prema ASCE 41-13 za *Condition 2*Slika 80 Pushover krivulja prema ASCE 41-13 za *Condition 2*

Na krivulji kapaciteta, slika 80, prikazani su mehanizmi otkazivanja okvira u pojedinim fazama analize. Boje plastičnih zglobova označavaju granična stanja. Prvi plastični zglobovi se otvaraju na gredama prve etaže i to na pomaku od 87,33 mm i sili od 200,42 kN, nakon čega ubrzo dolazi do naglog pada krivulje na pomaku od 87,98 mm i sili od 200,42 kN i sila pada na vrijednost od 121,39 kN, to je razlika od 79,03 kN. Pad u krivulji je uzrokovan ulaskom plastičnih zglobova greda prve etaže u granično stanje blizu rušenja pri čemu je pad na krivulji znatno izražen. Nakon toga krutost krivulje raste do zaustavljanja analize pri pomaku od 361,25 mm i sili od 263,54 kN.

Mehanizam sloma armiranobetonskog okvira sa plastičnim zglobovima definiranim prema ASCE 41-13 *Condition 2* i sa utjecajem uzdužne sile u stupovima pri definiranju kapaciteta poprečnog presjeka je mehanizam sa slabim gredama i jakim stupovima. Za razliku od prethodnih analiza i modela, ovaj je model kritičan zbog naglog gubitka nosivosti elemenata.

## 6.2. Krivulje kapaciteta definirane za *Condition 3*

Krivulje kapaciteta su u ovom proračunu definirane prema podacima za *Condition 3*. To stanje predstavlja najnepovoljniji slučaj za element zbog najvećeg smanjenja krutosti koje dolazi radi progresivnog opterećenja, ima bržu degradaciju nosivosti i najmanju duktilnost. Ovaj slučaj se koristi za procjenu otpornosti oslabljenih elemenata, starijih konstrukcija i elemenata s lošim detaljima armiranja. U Tablici 12 su prikazani ulazni podatci i sve vrijednosti dobivene analizom i proračunom prema kojima će se definirati *hinge* u ETABS-u. Na okvir su zadani *hinge* elementi na isti način kao što je prikazano na slici 79.

**Tablica 12** Ulazni podatci proračuna i vrijednosti za plastične zglobove stupova, *Condition 3*

	S1	S2	S3	S4
$P[N] =$	271000	134200	531950	270000
$A_g [mm^2] =$	200000	200000	200000	200000
$f_c' [MPa] =$	20	20	20	20
$A_v [mm^2] =$	100,53	100,53	100,53	100,53
$b_w [mm] =$	400	400	400	400
$s [mm] =$	200	200	200	200
$d [mm] =$	351	351	351	351
$d/2 [mm] =$	175,5	175,5	175,5	175,5

$\frac{P}{A_g f_c'} =$	0,068	0,034	0,133	0,068
$\rho = \frac{A_v}{b_w s} =$	0,001	0,001	0,001	0,001

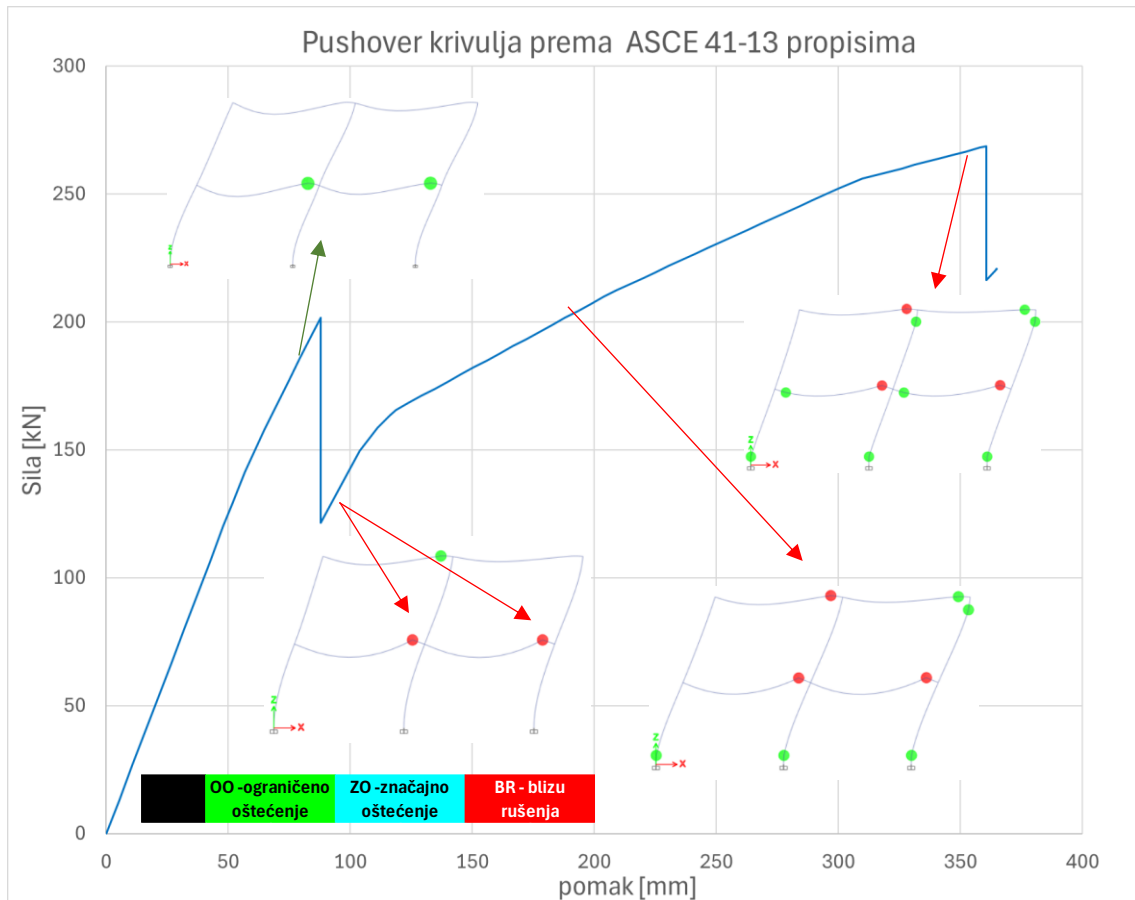
<b>Mpl (etabs)</b> [kNm]	205	182	234	205
-----------------------------	-----	-----	-----	-----

<b>a</b> [rad]	0	0	0	0
<b>b</b>	0,0567	0,0669	0,05636	0,0567
<b>c</b> [rad]	0	0	0	0
<b>IO</b> [rad]	0	0	0	0
<b>LS</b> [rad]	0,042	0,050	0,04234	0,042
<b>CP</b> [rad]	0,0567	0,0669	0,05636	0,0567

**Tablica 13** Vrijednosti za plastične zglobove greda, *Condition 3*

GREDA							
a [rad]	b	c [rad]	IO [rad]	LS [rad]	CP [rad]	Mpl-ležaj [kNm]	Mpl - potje [kNm]
0,003	0,01	0	0,0015	0,005	0,01	138	211

### 6.2.1. Pushover krivulja prema ASCE 41-13 za *Condition 3*



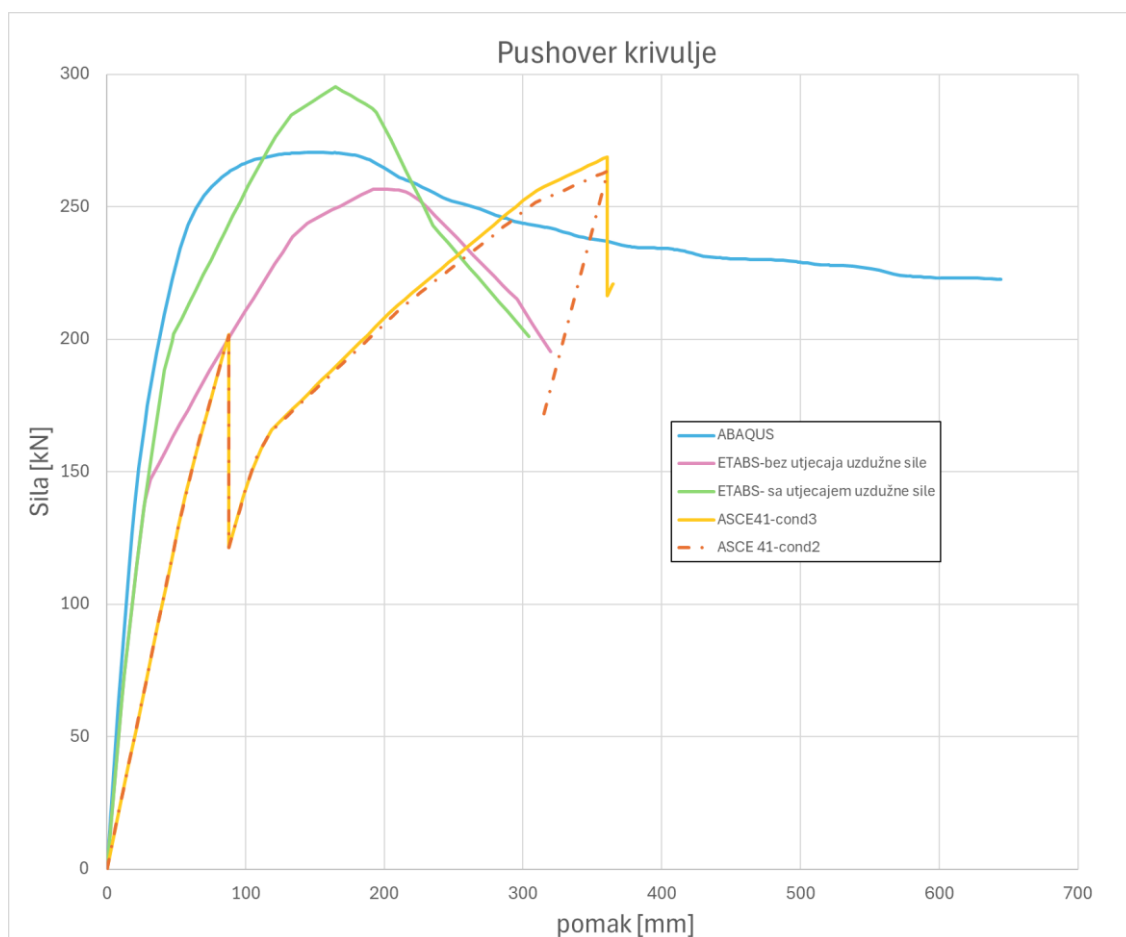
**Slika 81** Pushover krivulja prema ASCE 41-13 za *Condition 3*

Na krivulji kapaciteta prikazani su mehanizmi otkazivanja okvira u pojedinim fazama analize. Boje plastičnih zglobova označavaju granična stanja. Prvi plastični zglobovi se otvaraju na gredama prve etaže i to na pomaku od 87,32 mm i sili od 200,42 kN, nakon čega ubrzo dolazi do naglog pada krivulje na pomaku od 87,98 mm i sili od 200,42 kN nakon čega sila pada na vrijednost od 121,39 kN, to je razlika od 79,03 kN. Pad u krivulji je uzrokovan ulaskom plastičnih zglobova greda prve etaže u granično stanje blizu rušenja, kao u prethodnom slučaju. Nakon toga krutost krivulje raste do zaustavljanja analize pri pomaku od 366,65 mm i sili od 268,53 kN.

Mehanizam sloma armiranobetonskog okvira sa plastičnim zglobovima definiranim prema ASCE 41-13 *Condition 3* i sa utjecajem uzdužne sile u stupovima pri definiranju kapaciteta poprečnog presjeka je mehanizam sa slabim gredama i jakim stupovima. Ovaj je model kritičan zbog naglog gubitka nosivosti elemenata i gotovo je identičan analizi prema ASCE 41-13, *Condition 2*.

## 7. USPOREDBA REZULTATA

Na slici 82 je prikazano pet *pushover* krivulja dobivene iz svih prethodno spomenutih analiza okvira. Plavom bojom je označena *pushover* krivulja dobivena u Abaqusu pomoću CDP modela betona i nelinearne armature. Zelena krivulja je prikaz analize iz ETABS-a u kojoj je prilikom analize poprečnog presjeka za dobivanje krivulje kapaciteta uzet u obzir utjecaj uzdužne sile u stupovima od kombinacije *mass*, dok je rožom bojom prikazana ista takva analiza, ali bez utjecaja uzdužne sile. Žutom bojom je označena procjena prema standardu ASCE 41 za parametre određene prema *Condition 3* tablicama, dok je narančasta za rezultate parametara određenih prema *Condition 2* tablicama.



Slika 82 Usporedba pushover krivulja pet analiza

U tablici 14 je prikaz usporedbe pet *pushover* krivulja sa navedenom maksimalnom otpornošću sa pripadnim pomakom i opisanim mehanizmom sloma.

Abaqus (plava krivulja) ima najveću početnu krutost i najstabilniju degradaciju krutosti. Postepeni pad nosivosti ukazuje na duktilno ponašanje konstrukcije i mogućnost disipacije

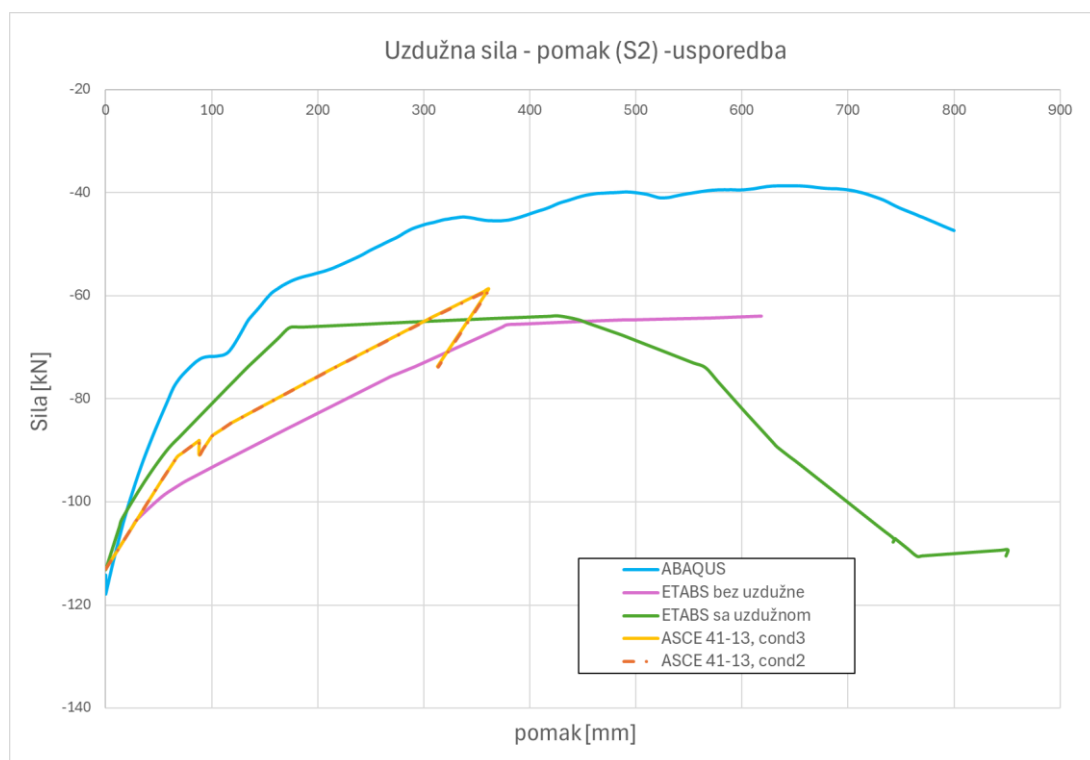
energije. Ova krivulja vjerojatno predstavlja najrealističniji prikaz ponašanja konstrukcije jer uključuje detaljno definiranu nelinearnu armaturu i beton. Maksimalna otpornost je 270,55 kN sa pripadnim pomakom od 151,07 mm. Analiza iz ETABS-a prema HRN EN 1998-3 sa utjecajem uzdužne sile (zelena krivulja) također ima visoku početnu krutost, gdje se može uočiti doprinos uzdužne sile na povećanje otpora konstrukcije. Također, krivulja ima i najveću otpornost od 295,26 kN pri pomaku od 192,03 mm. Nakon dosezanja vršne otpornosti prikazuje brzu degradaciju nosivosti. Najslabija je ABAQUS modelu, ali ima znatno veću osjetljivost na nestabilnost. Roza krivulja također predstavlja analizu iz ETABS-a prema HRN EN 1998-3 u kojoj nije uzet u obzir utjecaj uzdužne sile pri analizi kapaciteta poprečnog presjeka. Ima blago slabiju krutost od zelene krivulje što znači da joj je podcijenjen početni otpor iako prikazuje sporiju degradaciju nosivosti te ukazuje na duktilno ponašanje. Pripadni maksimalna otpornost i pomak su 256,71 kN i 192,03 mm. Žuta krivulja je dobivena u ETABS-u prema ASCE 41-13 propisima za *Condition 3*, a prilikom analize poprečnog presjeka je uzet u obzir utjecaj uzdužne sile. Krivulja je najkonzervativnija, propis smanjuje efektivnu krutost i nosivost. Također prikazuje najnižu maksimalnu otpornost od 201,63 kN kada nosivost naglo pada na 121,45 kN pri pomaku od 87,92 mm te nastavlja rasti do maksimalnog iznosa od 268,53 kN i pomaka od 360,65 mm. Narančasta krivulja je gotovo identična i ona predstavlja pushover krivulju prema ASCE 41-13, *Condition 2*. U Tablici 14 je prikazana rekapitulacija rezultata provedenih analiza.

**Tablica 14** Analiza rezultata pushover krivulja

METODA PRORAČUNA	F <sub>max</sub> [kN]	u <sub>F,max</sub> [mm]	MEHANIZAM SLOMA
ABAQUS	270,55	151,07	/
HRN EN 1998-3, sa utjecajem uzdužne sile	295,2586	164,856	mehanizam sa jakim stupovima i slabim gredama
HRN EN 1998-3, bez utjecajem uzdužne sile	256,7082	192,027	mehanizam sa jakim stupovima i slabim gredama
ASCE 41-13, <i>Condition 2</i>	201,63	87,97	mehanizam sa jakim stupovima i slabim gredama
	263,54	361,25	
ASCE 41-13, <i>Condition 3</i>	201,63	87,97	mehanizam sa jakim stupovima i slabim gredama
	268,53	360,65	

Na slici 83 je prikaz odnosa uzdužne sile u funkciji horizontalnog pomaka za vrh stupa S2 u različitim analizama. U Abaqus analizi početna aksijalna sila je -117,82 kN (tlačna sila). Povećanjem pomaka, stup se rasterećuje i aksijalna sila raste prema -40 kN nakon čega dolazi do stabilizacije gdje se sila održava na gotovo konstantnoj razini. U presjeku stupa dolazi do redistribucije sila zbog plastičnih mehanizama i interakcije između smicanja i aksijalnih sila. Na kraju analize dolazi do laganog opadanja, odnosno porasta tlačne sile. Analiza bez utjecaja

uzdužne sile prati sličan trend, ali doseže niži maksimum. Nakon dosezanja maksimuma rasterećenja sila ostaje gotovo konstanta. Zelena krivulja pokazuje rezultate analize sa utjecajem uzdužne sile. U početku analize prati sličan trend kao i Abaqus model, ali nakon vršne vrijednosti dolazi do naglog smanjenja kapaciteta. Krivulje prema ASCE 41-13 imaju nestabilno rasterećenje sa nekoliko oscilacija. U početku je ponašanje slično krivulji ETABS-a sa uzdužnom silom, ali pri većim pomacima dolazi do jasno izražene degradacije. U Tablici 15 je dana analiza uzdužnih sila u funkciji horizontalnog pomaka na S2.

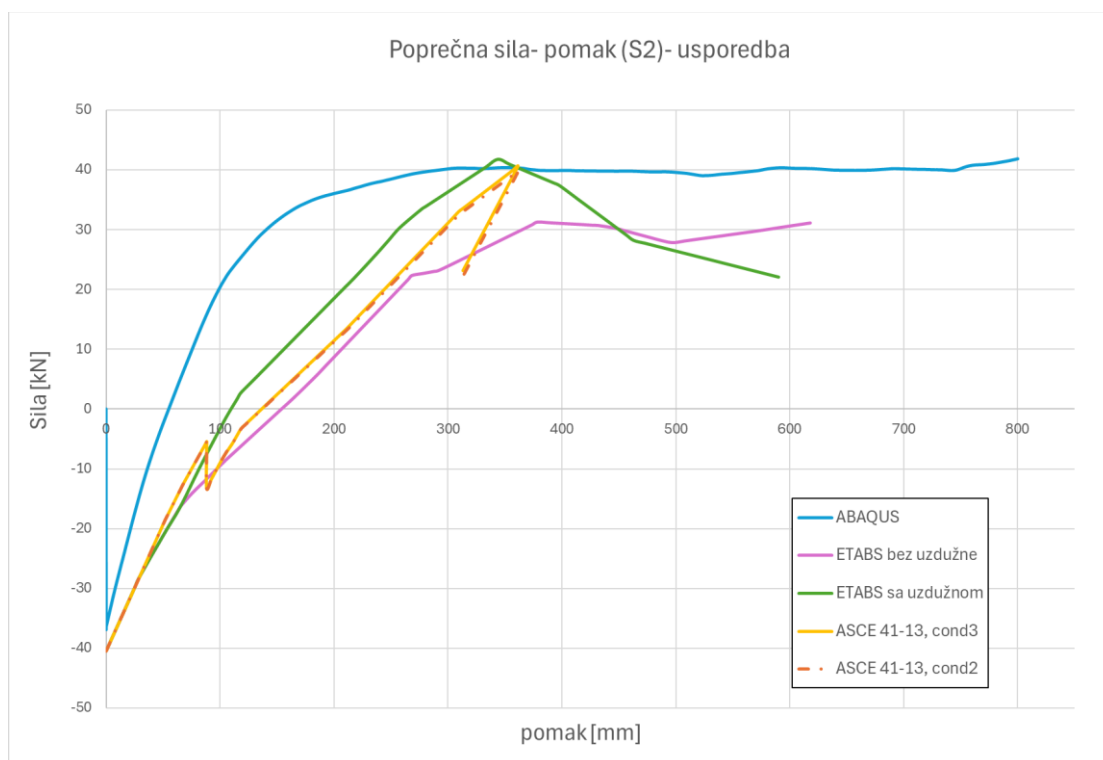


Slika 83 Usporedba uzdužne sile u funkciji horizontalnog pomaka na S2

Tablica 15 Analiza uzdužnih sila u funkciji horizontalnog pomaka

METODA PRORAČUNA	Početna aksijalna sila [kN] (tlak)	Trend promjene nakon vršne vrijednosti
ABAQUS	-117,82	Stabilizacija pa blagi pad
HRN EN 1998-3, sa utjecajem uzdužne sile	-113,13	Konstantna vrijednost sile
HRN EN 1998-3, bez utjecajem uzdužne sile	-112,98	Stabilno ponašanje, bez degradacije
ASCE 41-13, Condition 2	-112,96	Brza i jasno izražena degradacija
ASCE 41-13, Condition 3	-112,96	Brza i jasno izražena degradacija

Na slici 84 je prikaz odnosa poprečne sile u funkciji horizontalnog pomaka za vrh stupa S2 u različitim analizama dok je u Tablici 16 analizirano ponašanje poprečne sile u odnosu na pomak.



Slika 84 Usporedba poprečne sile u funkciji horizontalnog pomaka na S2

Tablica 16 Analiza poprečnih sila u funkciji horizontalnog pomaka za S2

METODA PRORAČUNA	Početna poprečna sila [kN] (tlak)	Trend promjene poprečne sile
ABAQUS	-36,68	Nakon vršne vrijednosti stabilizacija bez značajne degradacije
HRN EN 1998-3, sa utjecajem uzdužne sile	-40,48	Linearan i brz rast do najveće vrijednosti, naglo smanjenje nosivosti nakon vrha
HRN EN 1998-3, bez utjecajem uzdužne sile	-40,49	Linearan porast bez većih varijacija, stabilno nakon vršne vrijednosti
ASCE 41-13, Condition 2	-40,52	Nagli skok u prvim fazama- nestabilnije ponašanje, brz gubitak nosivosti nakon vrha
ASCE 41-13, Condition 3	-40,52	Nagli skok u prvim fazama- nestabilnije ponašanje, brz gubitak nosivosti nakon vrha

U Tablici 17 je prikazana rekapitulacija rezultata komponenti uzdužne i poprečne sile te momenta na presjecima vrhova stupova S1 i S2.

**Tablica 17** Rekapitulacija rezultata komponenti sila i momenta na S1 i S2

METODA PRORAČUNA	UZDUŽNA SILA (F1)			
	Opterećenje od: <i>mass</i>		Minimalna vrijednost u analizi	
	S1 [kN]	S2 [kN]	S1 [kN]	S2 [kN]
Abaqus	-237,06	-117,82	20,60	-40,34
Etabs (sa uzdužnom)	-250,93	-113,13	-146,68	-63,95
Etabs (bez uzdužne)	-250,62	-112,98	-149,32	-63,90
Etabs (ASCE 41-13, cond2)	-250,60	-112,96	-159,19	-58,84
Etabs (ASCE 41-13, cond3)	-250,60	-112,96	-159,05	-58,69

METODA PRORAČUNA	POSMIČNA SILA (F2)			
	Opterećenje od: <i>mass</i>		Maksimalna vrijednost u analizi	
	S1 [kN]	S2 [kN]	S1 [kN]	S2 [kN]
Abaqus	-12,8	-36,68	69,29	41,83
Etabs (sa uzdužnom)	-14,13	-40,48	102,39	41,82
Etabs (bez uzdužne)	-14,41	-40,49	88,41	31,23
Etabs (ASCE 41-13, cond2)	-14,14	-40,52	94,91	39,87
Etabs (ASCE 41-13, cond3)	-14,14	-40,52	96,37	40,58

IZRAČUN PREMA:	POSMIČNA ČVRSTOĆA za cikličko opterećenje armiranobetonskih elemenata, VRd	
	S1 [kN]	S2 [kN]
HRN EN 1998-3	46,85	47,87

METODA PRORAČUNA	MOMENT SAVIJANJA (M3)			
	Opterećenje od: <i>mass</i>		Maksimalna vrijednost u analizi	
	S1 [kNm]	S2 [kNm]	S1 [kNm]	S2 [kNm]
Abaqus	37,69	90,37	-116,28	-170,24
Etabs (sa uzdužnom)	37,59	91,97	-203,66	-171,06
Etabs (bez uzdužne)	36,60	91,66	-173,71	-158,35
Etabs (ASCE 41-13, cond2)	36,63	91,72	-132,81	-157,20
Etabs (ASCE 41-13, cond3)	36,63	91,72	-129,71	-157,83



## 8. ZAKLJUČAK

### 8.1. Neposredni zaključci iz provedenih analiza

Cilj ovog rada je procijeniti otpornost i ponašanje postojećeg armiranobetonskog okvira pri potresnom djelovanju. Analizirani okvir predstavlja tipičan primjer konstrukcija građenih tijekom druge polovice 20. stoljeća. Kako bi se dobio uvid u seizmičku otpornost okvira, provedeno je pet numeričkih analiza, koje obuhvaćaju jedan model izrađen u Abaqusu te četiri modela u ETABS-u. Razlika između ETABS modela odnosi se na različite propise korištene za definiranje plastičnih zglobova:

- HRN EN 1998-3 (Eurokod 8, Dio 3) – analiza u kojoj je pri određivanju kapaciteta poprečnog presjeka uzet u obzir utjecaj uzdužne sile definirane kombinacijom MASS ( $VT+G+0,3 \times Q$ ).
- HRN EN 1998-3 bez utjecaja uzdužne sile – varijanta modela u kojoj nije razmatran utjecaj aksijalnog opterećenja na kapacitet poprečnog presjeka.
- ASCE 41-13, *Condition 2* – američki standard za procjenu i poboljšanje seizmičke otpornosti konstrukcija.
- ASCE 41-13, *Condition 3* – američki standard za procjenu i poboljšanje seizmičke otpornosti konstrukcija.

Analizom pushover krivulja, promjene aksijalnih sila te poprečnih sila u funkciji horizontalnog pomaka u stupu (S2), uočene su značajne razlike među modelima korištenima u proračunu. Usporedba ovih modela pokazala je kako različite metode i pretpostavke mogu značajno utjecati na procjenu otpornosti konstrukcije, što je ključno pri donošenju zaključaka o njezinoj seizmičkoj sigurnosti i mogućnostima sanacije.

Pushover krivulja prikazuje globalnu otpornost konstrukcije pri horizontalnim pomacima. Abaqus model daje najstabilniji i najrealniji prikaz ponašanja, s postepenim padom nosivosti i izraženom duktilnošću. ETABS model bez utjecaja uzdužne sile u stupovima pokazuje slično ponašanje, ali s manjom maksimalnom otpornosti i duktilnosti. ETABS sa utjecajem uzdužne sile ima veću početnu nosivost, ali brže gubi otpornost, što potvrđuje da utjecaj uzdužne sile ubrzava degradaciju nosivosti konstrukcije. ASCE 41-13 modeli daju konzervativniju procjenu nosivosti, s naglim padovima otpornosti, što može precijeniti opasnost od sloma.

Analiza aksijalnih sila u odnosu na pomak pokazala je kako različiti modeli redistribuiraju opterećenje tijekom deformacija. ABAQUS model najbolje prikazuje kako se aksijalne sile mijenjaju pod utjecajem horizontalnog pomaka, s jasnim efektima redistribucije i najduktilnijim ponašanjem. ASCE 41-13 modeli daju konzervativne procjene, s naglim

skokovima u početnoj fazi deformacija i najbržim gubitkom nosivosti nakon dostizanja vršne vrijednosti. Analiza prema HRN EN 1998-3 sa utjecajem uzdužne sile pokazuje značajno smanjenje kapaciteta pri većim pomacima, a u analizi bez utjecaja uzdužne sile ponašanje je stabilnije. U svim se slučajevima stupovi rasterećuju sukladno pomaku okvira, ali ostaju u tlačnoj zoni.

U analizi poprečnih sila u odnosu na pomak, ABAQUS model daje najstabilniji porast posmične sile, dok se ETABS bez utjecaja uzdužne sile ponaša slično, ali s nešto manjom maksimalnom poprečnom silom. ASCE 41-13 modeli ponovno daju konzervativne procjene, s naglim varijacijama sile u početnim fazama deformacija.

Ukupno gledano, ABAQUS model pruža najrealističniji prikaz ponašanja konstrukcije, dok ETABS modeli daju korisne, ali nešto pojednostavljene rezultate. Utjecaj uzdužne sile u stupovima je značajan, povećava početnu nosivost, ali smanjuje duktilnost i ubrzava degradaciju nosivosti. ASCE 41-13 metodologija osigurava sigurnost, ali može podcijeniti stvarnu nosivost konstrukcije za oba slučaja, *Condition 2* i *Condition 3*.

Za optimalno projektiranje i procjenu seizmičke otpornosti konstrukcije, preporučuje se korištenje ABAQUS modela ili poboljšanog ETABS modela uz dodatnu pažnju na optimizaciju posmične armature i uzdužnih sila. Ako se koristi ASCE 41-13, potrebno je uzeti u obzir konzervativne procjene koje mogu rezultirati precijenjenim sigurnosnim zahtjevima.

## 8.2. Smjernice za daljnja istraživanja

Na temelju provedenih analiza mogu se preporučiti smjernice za buduća istraživanja:

- Provođenje laboratorijskih ispitivanja modela armiranobetonskih okvira sa sličnom ili istom konfiguracijom, obzirom da je ispitivanje u stvarnoj veličini teško izvedivo zbog ograničenih dimenzija prostora, opreme i troškova.
- Provođenje opsežnijih i kompleksnijih parametarskih numeričkih analiza okvira kojim bi se obuhvatila: količina i raspored armature, utjecaj uzdužne sile u stupovima radi P- $\Delta$  utjecaja pri velikim pomacima i dimenzije raspona okvirne konstrukcije.
- Provesti analizu IZO faktora konstrukcije (indeks znatnog oštećenja) kojim bi se dobio omjer proračunske otpornosti na potres i zahtjeva za granično stanje ZO i time omogućila procjena sigurnosti AB okvira nakon potresnog djelovanja

## POPIS LITERATURE

- [1] M. Uroš, J. Atalić, M. Šavor Novak, M. Demšić, and M. Baniček, "Bilješke s predavanja-Proračun postojećih konstrukcija u seizmički aktivnim područjima."
- [2] Hrvatski zavod za norme (HZN), "HRN EN 1998-1 : Projektiranje potresne otpornosti , 1.dio–Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade ," 2011.
- [3] A. Vlašić, G. Puž, and D. Skokandić, "SKRIPTA IZ KOLEGIJA VISOKE GRAĐEVINE."
- [4] S. Tesfamariam, K. Goda, and G. Mondal, "Seismic Vulnerability of Reinforced Concrete Frame with Unreinforced Masonry Infill Due to Main Shock–Aftershock Earthquake Sequences," *Earthquake Spectra*, vol. 31, no. 3, pp. 1427–1449, Aug. 2015, doi: 10.1193/042313EQS111M.
- [5] Hrvatski zavod za norme (HZN), "HRN EN 1998-3 : Projektiranje potresne otpornosti , 3.dio–Ocjenjivanje i obnova zgrada," 2011.
- [6] M. Hrasnica, "Spektri odgovora za seizmičku procjenu zgrada ," *Građevinar*, vol. 54, no. 11, 2002.
- [7] M. Čaušević and E. Zehentner, "Nelinearni seizmički proračun konstrukcija prema normi EN 1998-1:2004," *Građevinar*, 2007, Accessed: Jan. 19, 2025. [Online]. Available: <http://casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-59-2007-09-02.pdf>
- [8] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller, and E. Oñate, "A plastic-damage model for concrete, Int. J. Solids and Structures ," *Int. Journal of Solids and Structures* , vol. 25, no. 3, pp. 299–326, 1989, doi: [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4).
- [9] H. Risan, I. S. Harba, and A. Abdulridha, "Numerical analysis of RC wall with opening strengthened by CFRP subjected to eccentric loads," *GRAĐEVINAR*, vol. 69, no. 07, pp. 573–580, Aug. 2017, doi: 10.14256/JCE.1707.2016.
- [10] "ABAQUS Analysis User's Manual." Accessed: Jan. 05, 2025. [Online]. Available: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt05ch18s05abm36.html>
- [11] "Abaqus Analysis User's Manual." Accessed: Jan. 05, 2025. [Online]. Available: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt05ch18s05abm36.html>
- [12] "Element Types." Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: [https://web.mit.edu/calculix\\_v2.7/CalculiX/ccx\\_2.7/doc/ccx/node25.html](https://web.mit.edu/calculix_v2.7/CalculiX/ccx_2.7/doc/ccx/node25.html)
- [13] American Society of Civil Engineers, *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*, vol. ASCE/SEI 41-13. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2014.

## POPIS SLIKA

Slika 1 Vrste armiranobetonskih okvira [1] .....	1
Slika 2 Deformacija AB okvira [3].....	2
Slika 3 Odvajanje zidne ispune od okvira uslijed velike deformacije [1] .....	2
Slika 4 Shematski prikaz ideje kapacitivnog projektiranja [1] .....	3
Slika 5 Dijagram sila-pomak kod kapacitivnog projektiranja [1] .....	3
Slika 6 Plastični mehanizmi na okvirnoj konstrukciji [1].....	4
Slika 7 Plastični mehanizmi na okvirnoj konstrukciji [1].....	4
Slika 8 Mehanizam sloma okvira [4] .....	5
Slika 9 Raspodjela sila po visini konstrukcije[6].....	7
Slika 10 Pretvorba elastičnog spektra odziva u AD format [1] .....	8
Slika 11 Nelinearni spektar u AD formatu sa konstantnim $\mu$ [1] .....	8
Slika 12 Određivanje potresnog zahtjeva za ekvivalentni sustav s 1 SS [1] .....	9
Slika 13 Prostorni prikaz AB okvira .....	11
Slika 14 Dimenzije promatranog AB okvira i oznake elemenata .....	12
Slika 15 3D model okvira .....	12
Slika 16 3D model okvira i prikaz armature.....	13
Slika 17 Raspored armature okvira u pogledu .....	13
Slika 18 Primjer radnog dijagrama CDP betona [10] .....	15
Slika 19 Prikaz diskretizacije okvira ( <i>mesh</i> ) .....	18
Slika 20 Prikaz zadanih rubnih uvjeta .....	19
Slika 21 Rezultati- područje plastifikacije okvira .....	20
Slika 22 Rezultati- područje plastifikacije armature .....	20
Slika 23 S, Misses naprezanja u armaturi .....	21
Slika 24 Vlačna naprezanja okvira .....	21
Slika 25 Zone tečenja u čvorovima okvira .....	22
Slika 26 Oštećenja betona uslijed vlačnog naprezanja.....	23
Slika 27 Oštećenja betona uslijed vlačnog naprezanja u čvorovima .....	23
Slika 28 Oštećenja uslijed tlačnog naprezanja.....	24
Slika 29 Pukotine na betonu okvira .....	25
Slika 30 Označeni promatrani presjeci stupova S1 i S2 .....	26
Slika 31 Rezultante sila i momenta na vrhu S1 i S2 .....	26
Slika 32 Prikaz integriranog presjeka vrha stupa S1 .....	27
Slika 33 Odnos komponenti sile i koraka proračuna stupa S1.....	27
Slika 34 Odnos komponenti momenta i koraka proračuna stupa S1 .....	28
Slika 35 Zrcalni prikaz M3 dijagrama koraka <i>push</i> za S1.....	28
Slika 36 Prikaz integriranog presjeka vrha stupa S2 .....	29
Slika 37 Odnos komponenti sile i koraka proračuna stupa S2 .....	29
Slika 38 Odnos sile i pomaka na vrhu stupa S2 .....	30

Slika 39 Odnos komponenti momenta i koraka proračuna stupa S2 .....	30
Slika 40 Zrcalni prikaz M3 dijagrama koraka <i>push</i> za S2 .....	31
Slika 41 komponente sila za S1 i S2 .....	31
Slika 42 Pushover krivulja u RP1 .....	32
Slika 43 Nelinearna materijalna svojstva betona C20/25 .....	33
Slika 44 Radni dijagram betona C20/25 .....	34
Slika 45 Nelinearna materijalna svojstva armature GA240 .....	34
Slika 46 Radni dijagram armature GA240 .....	35
Slika 47 Modalni oblici i periodi okvira .....	35
Slika 48 Momentni dijagram M3-3 .....	36
Slika 49 Dijagram uzdužne sile .....	36
Slika 50 Oznake za stupove i grede okvira .....	37
Slika 51 M- $\theta$ dijagram sa oznakom graničnih stanja .....	38
Slika 52 Analiza presjeka S1 .....	40
Slika 53 Analiza presjeka S2 .....	41
Slika 54 Analiza presjeka S3 .....	41
Slika 55 Analiza presjeka S4 .....	42
Slika 56 Analiza presjeka greda G1 .....	42
Slika 57 Analiza presjeka grede G2 .....	43
Slika 58 Odgovarajuće oznake plastičnih zglobova .....	44
Slika 59 Dijagram M- $\theta$ za vrijednosti iz tablice 7 .....	44
Slika 60 Analiza presjeka S1 i S3 .....	45
Slika 61 Analiza presjeka S2 i S4 .....	45
Slika 62 Analiza presjeka greda G1 i G2 .....	46
Slika 63 Odgovarajuće oznake plastičnih zglobova .....	47
Slika 64 Dijagram M- $\theta$ za vrijednosti iz tablice 8 .....	47
Slika 65 Shema pridruženih plastični zglobovi (eng. <i>hinge</i> ) .....	48
Slika 66 Kombinacija opterećenja Stalno_NL .....	49
Slika 67 Boje plastičnih zglobova u ETABS-u prema graničnim stanjima .....	49
Slika 68 Promatrani čvor analize .....	50
Slika 69 Pushover krivulja sa pripadnim mehanizmima otkazivanja u modelu sa utjecajem uzdužne sile u stupovima .....	51
Slika 70 Pushover krivulja sa pripadnim mehanizmima otkazivanja u modelu bez utjecaja uzdužne sile u stupovima .....	52
Slika 71 Usporedba pushover krivulja .....	53
Slika 72 Vrh stupa S1 .....	54
Slika 73 Vrh stupa S2 .....	54
Slika 74 Vrh stupa S1 .....	55
Slika 75 Vrh stupa S2 .....	55
Slika 76 Shematska oznaka definicije plastičnog zgloba prema ASCE 41-13 .....	56
Slika 77 Podaci za definiranje krivulje kapaciteta greda (izvor: ASCE-41 [13]) .....	57

---

Slika 78 Podaci za definiranje krivulje kapaciteta stupova (izvor: ASCE-41 [13]) .....	58
Slika 79 Hinge zadan prema ASCE 41-13, <i>Condition 2</i> .....	60
Slika 80 Pushover krivulja prema ASCE 41-13 za <i>Condition 2</i> .....	61
Slika 81 Pushover krivulja prema ASCE 41-13 za <i>Condition 3</i> .....	63
Slika 82 Usporedba pushover krivulja pet analiza.....	64
Slika 83 Usporedba uzdužne sile u funkciji horizontalnog pomaka na S2 .....	66
Slika 84 Usporedba poprečne sile u funkciji horizontalnog pomaka na S2.....	67

---

## POPIS TABLICA

Tablica 1 Metode proračuna potresne unutarnje sile prema EN 1998-3 [5].....	6
Tablica 2 Poprečni presjeci elemenata .....	14
Tablica 3 Parametri CDP materijala definiranog u Abaqusu .....	17
Tablica 4 Parametri plastičnog ponašanja armature definirane u Abaqusu.....	17
Tablica 5 Usporedba parametara <i>DAMAGEC</i> i <i>DAMAGET</i> .....	24
Tablica 6 Vrijednosti $V_{Rd}$ stupova prema HRN EN 1998-3.....	39
Tablica 7 Vrijednosti za definiranje plastičnih zglobova prema HRN EN 1998-3 .....	43
Tablica 8 Vrijednosti za definiranje plastičnih zglobova prema HRN EN 1998-3 .....	46
Tablica 9 Uvjeti za odredbu stanja (izvor: <i>ASCE-41</i> [13]) .....	57
Tablica 10 Ulazni podatci proračuna i vrijednosti za plastične zglobove stupova, <i>Condition 2</i> .....	59
Tablica 11 Vrijednosti za plastične zglobove greda, <i>Condition 2</i> .....	60
Tablica 12 Ulazni podatci proračuna i vrijednosti za plastične zglobove stupova, <i>Condition 3</i> .....	62
Tablica 13 Vrijednosti za plastične zglobove greda, <i>Condition 3</i> .....	62
Tablica 14 Analiza rezultata pushover krivulja.....	65
Tablica 15 Analiza uzdužnih sila u funkciji horizontalnog pomaka .....	66
Tablica 16 Analiza poprečnih sila u funkciji horizontalnog pomaka za S2 .....	67
Tablica 17 Rekapitulacija rezultata komponenti sila i momenta na S1 i S2 .....	68