

# Proračun arminanobetonske konstrukcije metodom postupnog guranja

---

**Karlović, Josipa**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:666463>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-15**

*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Josipa Karlović

**PRORAČUN POSTOJEĆE ARMIRANOBETONSKE  
KONSTRUKCIJE METODOM POSTUPNOG  
GURANJA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Josipa Karlović

**PRORAČUN POSTOJEĆE ARMIRANOBETONSKE  
KONSTRUKCIJE METODOM POSTUPNOG  
GURANJA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Mario Uroš

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Josipa Karlović

**SEISMIC ASSESSMENT OF EXISTING REINFORCED  
STRUCTURE WITH PUSHOVER METHOD**

MASTER THESIS

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

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

Josipa Karlović

(Ime i prezime)

0082061105

(JMBAG)

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

Proračun postojeće armiranobetonske konstrukcije metodom postupnog guranja

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

Seismic assessment of existing reinforced concrete structure using pushover method

(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:

18.9.2024.

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Mario Uroš

Potpis mentora:

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

(Ime i prezime, JMBAG)

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

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

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

Datum:

Potpis:

*J. Karlović*



## OBRAZAC 6

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

Ja :

(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:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

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

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

(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:

Potpis:

*J. Karlović*

## SAŽETAK

U radu je proveden proračun metodom postupnog guranja postojeće armiranobetonske konstrukcije. U uvodnom dijelu objašnjene su osnovne seizmičke metode proračuna konstrukcija s naglaskom na metodu postupnog guranja. U drugom poglavlju dani su ulazni podaci o svojstvima materijala i presjecima promatrane konstrukcije, koji su pretpostavljeni prema postojećoj arhivskoj dokumentaciji. Zaključak o stanju građevine, razred važnosti te potrebna razina obnove navedeni su u trećem poglavlju. Četvrto poglavlje prikazuje modeliranje konkretne građevine kao i definicije plastičnih zglobova elemenata. Proračun je proveden nelinearnom statičkom metodom postupnog guranja u programskom paketu ETABS koristeći metodu koncentrirane plastičnosti kako bi se dobila krivulja kapaciteta zgrade. Na temelju analize presjeka, definirane su krivulje kapaciteta plastičnih zglobova na kritičnim elementima. Korišteni su mjerodavni oblici opterećenja te su dobivene krivulje kapaciteta nosivosti i indeks značajnog oštećenja konstrukcije (IZO). Uz to je dobiven i kritični mehanizam otkazivanja konstrukcije koji je prikazan u šestom poglavlju. Konačno je napravljen kritički osvrt na metodu proračuna i izvornu koncepciju konstrukcije zgrade.

**Ključne riječi:** potres, metoda postupnog guranja, plastični zglobovi, IZO faktor, ETABS



## SUMMARY

The paper presents a pushover analysis of an existing reinforced concrete structure. In the introductory section, fundamental seismic design methods for structures are explained, with an emphasis on the pushover analysis method. The second chapter provides input data on material properties and cross-sections of the observed structure, which were assumed based on the existing archival documentation. Conclusions regarding the building's condition, its importance class, and the required level of rehabilitation are outlined in the third chapter. The fourth chapter details the modeling of the specific building, including the definition of plastic hinges for structural elements. The analysis was performed using the nonlinear static pushover method within the ETABS software package, applying the concentrated plasticity approach to generate the building's capacity curve. Based on the cross-section analysis, capacity curves for plastic hinges in critical elements were defined. The relevant loading patterns were applied, and capacity curves for the structure's load-bearing capacity, as well as the Significant Damage Index (SDI), were obtained. Additionally, the critical failure mechanism of the structure was identified and is presented in the sixth chapter. Finally, a critical review of the design method and the original structural concept of the building is provided.

**Key words:** earthquake, pushover method, plastic hinges, IZO factor, ETABS

# Sadržaj

<b>SAŽETAK .....</b>	<b>iv</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>v</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Osnovne seizmičke metode za proračun konstrukcija .....	1
1.1.1. Linearna analiza metodom ekvivalentnog statičkog djelovanja .....	1
1.1.2. Modalna analiza spektrima odziva .....	3
1.1.3. Nelinearna dinamička analiza uporabom zapisa ubrzanja u vremenu.....	4
1.1.4. Metoda postupnog guranja .....	4
<b>2. ANALIZA POSTOJEĆEG STANJA KONSTRUKCIJE .....</b>	<b>7</b>
2.1. Općenito o konstrukciji .....	7
2.2. Karakteristike i prikaz građevine .....	7
2.3. Dilatacija B2 .....	9
2.3.1. Istražni radovi .....	15
2.3.2. Rezultati istražnih radova .....	16
<b>3. OCJENA POSTOJEĆEG STANJA.....</b>	<b>18</b>
3.1. Zaključak o stanju građevine .....	18
3.2. Razred važnosti .....	19
3.3. Razine obnove.....	19
<b>4. MODELIRANJE KONSTRUKCIJE.....</b>	<b>20</b>
4.1. Ulazni podaci.....	20
<b>5. LINEARNI PRORAČUN KONSTRUKCIJE .....</b>	<b>23</b>
5.1. Analiza opterećenja i kombinacija opterećenja konstrukcije.....	23
5.1.1. Dinamičke karakteristike konstrukcije.....	24
5.1.2. Spektralna analiza .....	26
5.1.3. Rezultati linearnog proračuna .....	26
<b>6. PUSHOVER ANALIZA.....</b>	<b>29</b>
6.1. Definiranje nelinearnih svojstava .....	29
6.2. Slučajevi i kombinacije opterećenja za nelinearnu analizu .....	34
6.3. Rezultati nelinearnog proračuna .....	35
6.3.1. X smjer .....	36
6.3.2. Y smjer .....	43
<b>7. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>50</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>51</b>
<b>Popis slika.....</b>	<b>52</b>
<b>Popis tablica .....</b>	<b>54</b>

## 1. UVOD

### 1.1. Osnovne seizmičke metode za proračun konstrukcija

Razvoj suvremenih metoda analize i proračuna omogućio je preciznije predviđanje ponašanja konstrukcija pod različitim opterećenjima, što doprinosi sigurnosti i učinkovitosti građevinskih objekata. Potres je nepravilno dinamičko djelovanje, stoga je i odgovor konstrukcije na njega složen. Kako bi konstrukcija dobro podnijela takvo opterećenje, potrebna je konstrukcijska jednostavnost, simetrija, jednolikost te jasan put za prijenos seizmičkih sila [1]. Kako bismo to mogli postići, potrebno je provesti odgovarajući proračun. Suvremeni propisi i norme za proračun konstrukcija u seizmičkim područjima usmjereni su na osiguranje dovoljnog kapaciteta trošenja energije bez značajnog smanjenja lokalne i globalne nosivosti na horizontalna i vertikalna opterećenja te bez oštećenja koja bi ograničila uporabljivost građevine [2]. Prema Eurocode-u postoje četiri različite metode koje se koriste za postizanje tih ciljeva. Dijele se na statičke i dinamičke te linearne i nelinearne, kao što je prikazano u Tablici 1. U nastavku slijedi kratak opis svake metode, a detaljno će se opisati metoda postupnog guranja, s fokusom na njenu primjenu u proračunu armiranobetonske konstrukcije.

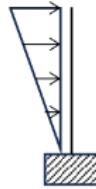
Tablica 1 Metode seizmičkog proračuna

METODE PRORAČUNA		
1.	Linearni statički	Metoda ekvivalentnog statičkog djelovanja
2.	Linearni statički	Modalna analiza spektrima odziva
3.	Nelinearni statički	Metoda postupnog guranja
4.	Nelinearni dinamički ili statički	Proračun uporabom zapisa ubrzanja u vremenu

#### 1.1.1. Linearna analiza metodom ekvivalentnog statičkog djelovanja

Metoda ekvivalentnog statičkog opterećenja, često nazivana i metodom proračuna bočnih sila, jedna je od osnovnih i najčešće korištenih metoda za seizmički proračun konstrukcija. Osnovna ideja ove metode je pretpostavka da se dinamičko seizmičko opterećenje može zamijeniti ekvivalentnim statičkim opterećenjem.

Potres se modelira kao niz horizontalnih sila na razini svake etaže. Trokutasti raspored opterećenja, kao što je prikazano na slici 1, događa se ukoliko je raspored masa po visini zgrade jednolik.



Slika 1. Raspored bočnih sila po visini konstrukcije

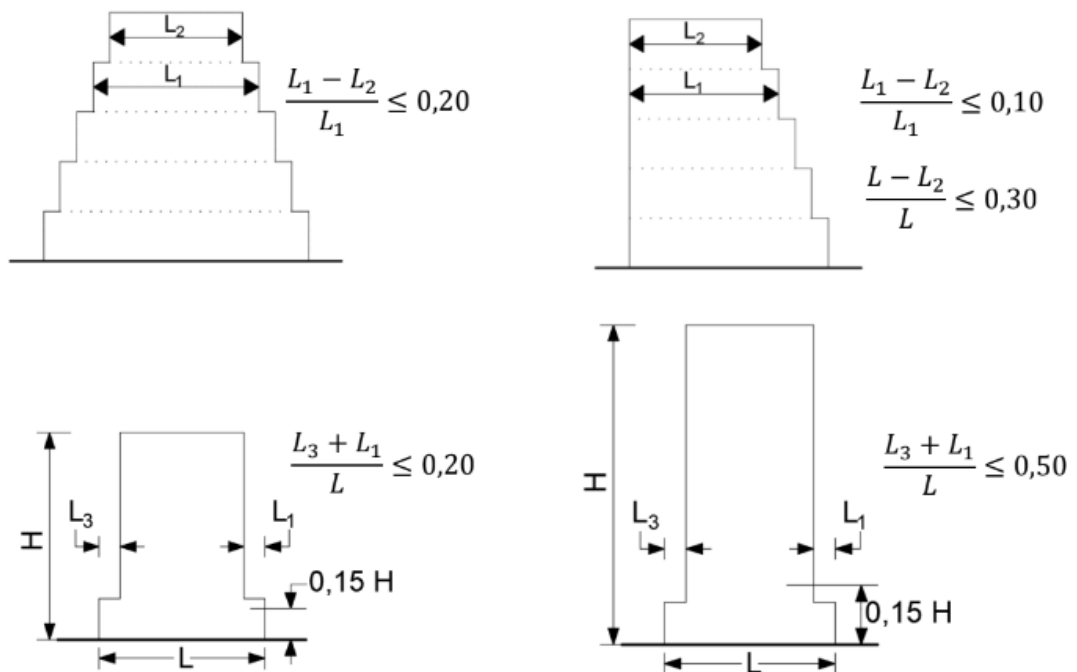
Kako bi ovakav proračun bio izvediv, konstrukcija mora biti pravilna po visini bez znatnog doprinosa viših oblika vibracija od osnovnog oblika u svakom smjeru. U Eurokodu 8 postoje dva ograničenja koja omogućuju korištenje ove metode:

- 1) Prvi period konstrukcije  $T_1$  u dva glavna smjera, mora zadovoljavati uvjet:

$$T_1 \leq \begin{cases} 4 \cdot T_c \\ 2,0 \text{ s} \end{cases}$$

$T_c$  – vrijednost perioda elastičnog spektra odziva ovisno o vrsti tla

- 2) Bočna krutost i masa svake etaže moraju ostati konstantne ili se postupno smanjivati od temelja prema vrhu, bez naglih promjena. Svi sustavi koji pružaju otpornost na bočna djelovanja, kao što su jezgre, nosivi zidovi ili okviri, trebaju se neprekidno protezati od temelja do vrha zgrade ili do relevantne zone zgrade. Prema tome, potrebno je ispuniti sljedeće kriterije prikazane na slici 2.



Slika 2. Kriterij za pravilnost zgrade s nepravilnostima po visini

Ovo pojednostavljenje omogućuje lakšu analizu konstrukcije koristeći standardne statičke proračunske metode [3].

### 1.1.2. Modalna analiza spektrima odziva

Modalna analiza spektrima odziva je također linearna metoda proračuna konstrukcija. Ova metoda koristi modalne oblike odgovora konstrukcije na seizmičke sile, uzimajući u obzir višestruke vibracijske modove te omogućava inženjerima da procijene kako će građevina reagirati na različite frekvencije vibracija, kao što su one uzrokovane potresima.

Osnovni koncept je da se odziv konstrukcije na dinamičko opterećenje može predstaviti kroz spektar odziva, koji prikazuje maksimalni odziv sustava s jednim stupnjem slobode za različite frekvencije. Široko se primjenjuje za linearne sustave s klasičnim prigušenjem, koji imaju klasične prirodne periode i oblike titranja. Jednadžbe gibanja takvih sustava mogu se transformirati u modalne koordinate, što rezultira nizom neovisnih jednadžbi s jednim stupnjem slobode. Svaka od tih jednadžbi uključuje jedan oblik, period i prigušenje titranja. Analitičkim ili numeričkim proračunom jednadžbi dobiva se ukupni odziv sustava kao zbroj odziva svih jednadžbi [4].

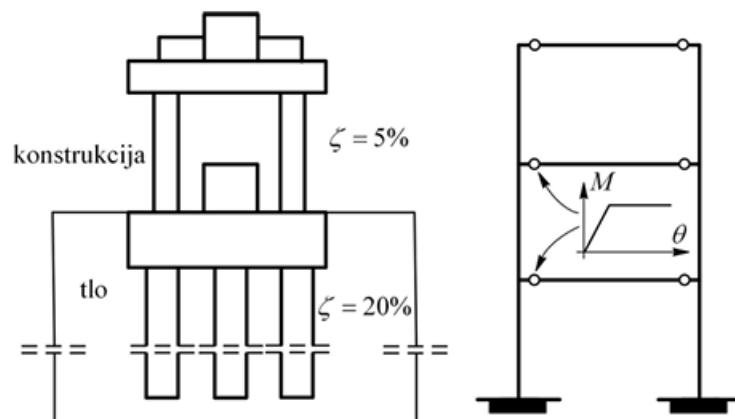
Ova metoda uzima u obzir odziv svih oblika vibracija koji značajno doprinose ukupnom odzivu. To se može postići ako su zadovoljeni sljedeći uvjeti [1]:

- zbroj svih efektivnih modalnih masa razmatranih oblika vibracija iznosi najmanje 90% ukupne mase zgrade
- uključeni su svi oblici vibracija s efektivnim modalnim masama većim od 5% ukupne mase

Klasična modalna analiza nije primjenjiva kada nema mogućnosti razlaganja na niz neovisnih jednadžbi. To se događa u slučajevima kao što su [4]:

- sustavi s izrazito različitim prigušenjima pojedinih dijelova (npr., konstrukcija s prigušenjem od 5% i okolno tlo s prigušenjem od 20%)
- neelastični sustavi, bez obzira na oblik prigušenja (npr., elastoplastična ovisnost sile i pomaka)

Oba primjera su prikazana na Slici 3.



Slika 3 Model konstrukcije i okolnog tla (lijevo) i neelastični sustav (desno) [4]

Za razliku od metode proračuna bočnih sila čiju preciznost možemo opisati kao prihvatljivu, ova metoda ima bolju preciznost dok kompleksnost proračuna nije previše narasla [5].

### **1.1.3. Nelinearna dinamička analiza uporabom zapisa ubrzanja u vremenu**

Najnaprednija metoda danas je nelinearna dinamička analiza u vremenu, tzv. „*time-history*“ analiza. Međutim, zahtijeva jako puno resursa i vremena u odnosu na preostale metode zbog čega je neisplativa za praktičnu uporabu [6].

Njene osnovne prednosti su mogućnost modeliranja nelinearnog ponašanja materijala, geometrijske nelinearnosti, definiranje kontakata, prigušenja i identifikacija neelastičnosti. Ipak, ima značajne nedostatke poput velikog broja pretpostavki u svim fazama projektiranja i dugotrajnog proračuna, što ograničava njenu upotrebu [3].

Odziv konstrukcije u vremenu dobiva se izravnom numeričkom integracijom diferencijalnih jednadžbi gibanja koristeći vremenske zapise ubrzanja, akceleroگرامe [1].

Iako bi metoda koja uključuje dinamiku, neelastičnost i nasumičnost bila idealna, trenutno je prekomplikirana za inženjersku praksu. Ipak, znanstveni napredak ide prema prilagodbi složenih probabilističkih proračuna za inženjerske potrebe. Iako je ovo dugoročno ispravan smjer razvoja i krajnji cilj, složenost i zahtjevnost ove metode još uvijek onemogućuju praktičnu primjenu [3].

### **1.1.4. Metoda postupnog guranja**

Metoda postupnog guranja, poznata kao „*Pushover* analiza“, nelinearna je statička metoda koja se koristi za procjenu seizmičke otpornosti konstrukcija. Provodi se tako da se konstrukcija podvrgne monotono rastućem bočnom opterećenju kojim se opisuju inercijske sile koje nastaju kao posljedica ubrzanja tla [5].

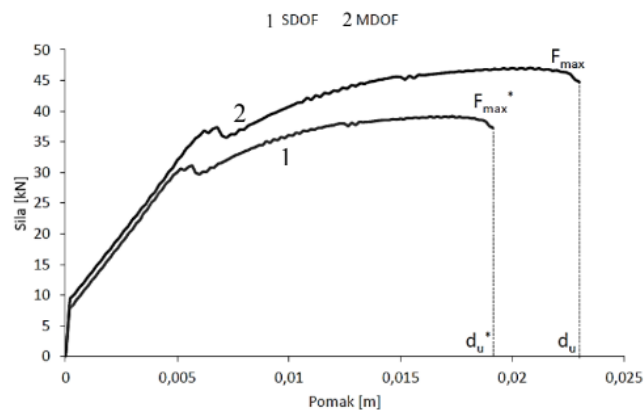
Nelinearnom statičkom analizom određuje se krivulja kapaciteta, koja je poznata i kao pushover krivulja. Ovo se postiže kombiniranjem statičkog gravitacijskog opterećenja s bočnim silama izazvanim potresom, koje su također statičkog karaktera. Potrebno je ostvariti ravnotežu krivulja poprečne sile i pomaka karakteristične točke. Kontrolna točka treba biti smještena u centru mase najviše etaže konstrukcije [7].

Konstrukcije se tijekom potresa automatski prilagođavaju, što dovodi do prijenosa dinamičkih sila s jednog dijela konstrukcije na drugi u slučaju da neki dio otkaže. Ovaj se fenomen simulira postupnim povećanjem opterećenja sve dok se ne otkrije slaba točka u konstrukciji. Nakon toga se model ažurira kako bi uključili promjene nastale zbog te slabe točke. U daljnjoj iteraciji konstrukcija se ponovno opterećuje, odnosno „gura“ sve dok se ne otkrije nova slaba točka. Ovaj se postupak ponavlja sve dok se ne otkrije cjelokupan uzorak popuštanja konstrukcije pod seizmičkim opterećenjem [8].

Metodom postupnog guranja dobiva se karakteristična nelinearna krivulja odnosa sile i pomaka koja se najčešće prikazuje kao odnos ukupne poprečne sile u razini temelja i pomaka vrha zgrade. Iz takvog prikaza istodobno dobivamo podatke o nosivosti, duktilnosti i krutosti konstrukcije [5]. Ciljani pomak određuje se pomoću elastičnog spektra odziva te njegova vrijednost ovisi o periodu linearnog sustava s jednim stupnjem slobode te o periodima koji ovise o vrsti tla ( $T_B$ ,  $T_C$  i  $T_D$ ) [1].

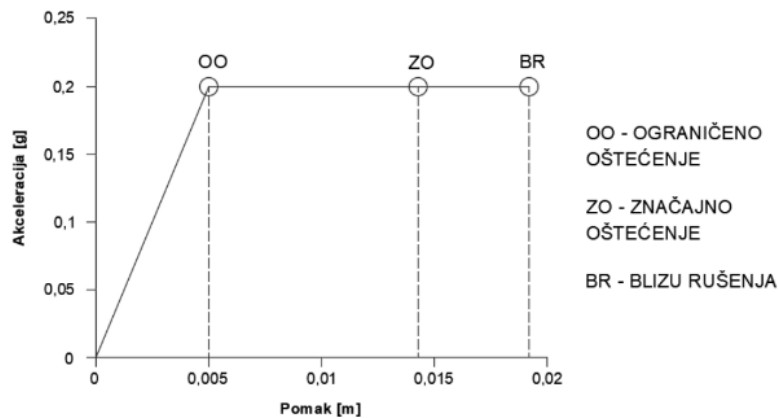
Najprije odredimo krivulju kapaciteta sustava s više stupnjeva slobode (MDOF) pa ga svedemo na ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode (SDOF) kao što je prikazano na Slici 4. Transformacija se provodi pomoću sljedećih izraza [1]:

- Masa zamjenskog SDOF sustava:  $m^* = \sum m_i \varphi_i^2$   $\varphi$  – modalni oblik
- Transformacijski faktor:  $\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \varphi_i^2}$
- Sila i pomak zamjenskog SDOF sustava:  $F^* = \frac{F}{\Gamma}$   $d^* = \frac{d}{\Gamma}$



Slika 4 Krivulja kapaciteta SDOF i MDOF [9]

Sljedeći korak je bilinearizacija navedene krivulje tako da površine ispod obje krivulje budu jednake, a dijagrami se sijeku na 70% maksimalne sile. Potom, koristeći omjer  $g = \frac{F}{m^*}$ , krivulju pretvaramo u oblik akceleracija – pomak te definiramo granična stanja, kao što je prikazano na slici 5.



Slika 5 Definiranje graničnih stanja

Nakon toga se definira elastični spektar odziva koji prikazuje odnos između spektralne akceleracije i spektralnog pomaka te se uspoređuje krivulja kapaciteta s elastičnim spektrom odziva. Na taj se način dobiva odgovor na pitanje ispunjava li konstrukcija granična stanja te je li konstrukcija kruta, mekana ili ostaje u elastičnom području ponašanja. Na kraju, nakon što je definiran pomak sustava s jednim stupnjem slobode, izračunava se pomak sustava s više stupnjeva slobode pomoću izraza  $d = \Gamma \cdot d^*$  te se za taj pomak provjerava stanje konstrukcije [9].

Metoda postupnog guranja najčešće se primjenjuje na postojećim konstrukcijama. Ova metoda pruža dodatne informacije o predviđenom odzivu konstrukcije te omogućuje uvid u ključne konstrukcijske aspekte koji utječu na njezino ponašanje tijekom snažnih potresa. [3].



## 2. ANALIZA POSTOJEĆEG STANJA KONSTRUKCIJE

### 2.1. Općenito o konstrukciji

Ovo istraživanje, u svrhu diplomskog rada, nastalo je na temelju projekta obnove koji se provodio na zgradi fakulteta. Tvrtka Capital ing. ustupila je dosta materijala na čemu im zahvaljujemo. Radi se o istraživanju koje ne predstavlja nužno realno stanje konstrukcije već je prilagođeno diplomskom radu i izučavanju problema kratkog stupa.

Građevina koju promatramo smještena je u ulici Ivana Lučića 5 u Zagrebu te je oštećena u potresu 22. ožujka 2020. godine. Projektna dokumentacija, koja je pohranjena u arhivu, potječe iz 1958. godine. Zgrada je izvorno izgrađena kao Visoka tehnička škola u Zagrebu, a kasnije je pripojena Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Površina od 3824 m<sup>2</sup> prilično pravilnog oblika orijentirana je u smjeru sjever – jug, kao što je vidljivo na slici 6. Promatrana građevina, sjeverna zgrada Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, nije upisana u Registar nepokretnih kulturnih dobara RH, Listu zaštićenih kulturnih dobara.



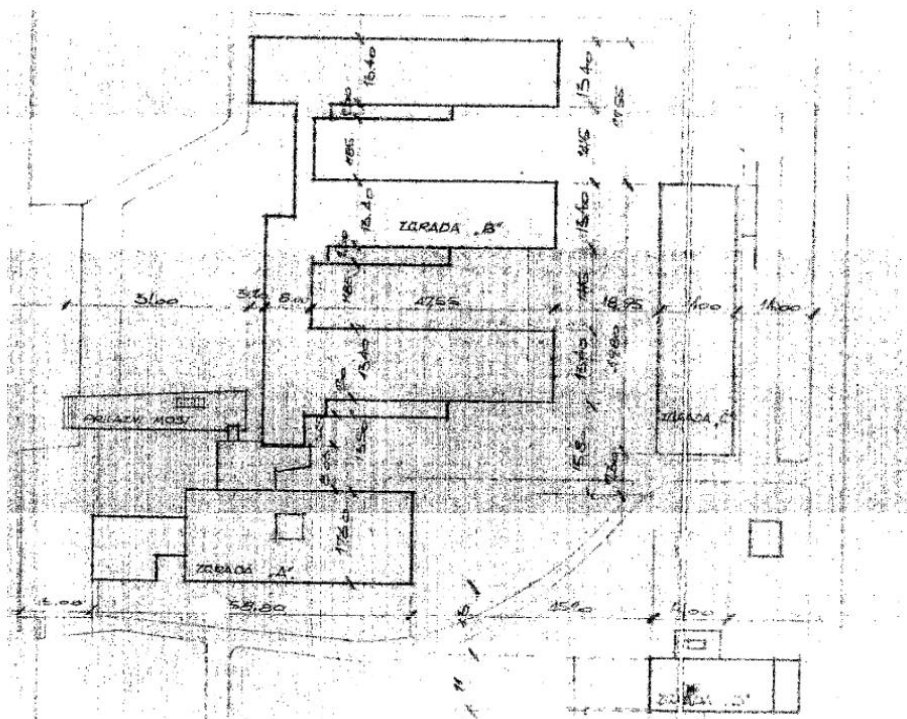
Slika 6 Položaj građevine u prostoru

### 2.2. Karakteristike i prikaz građevine

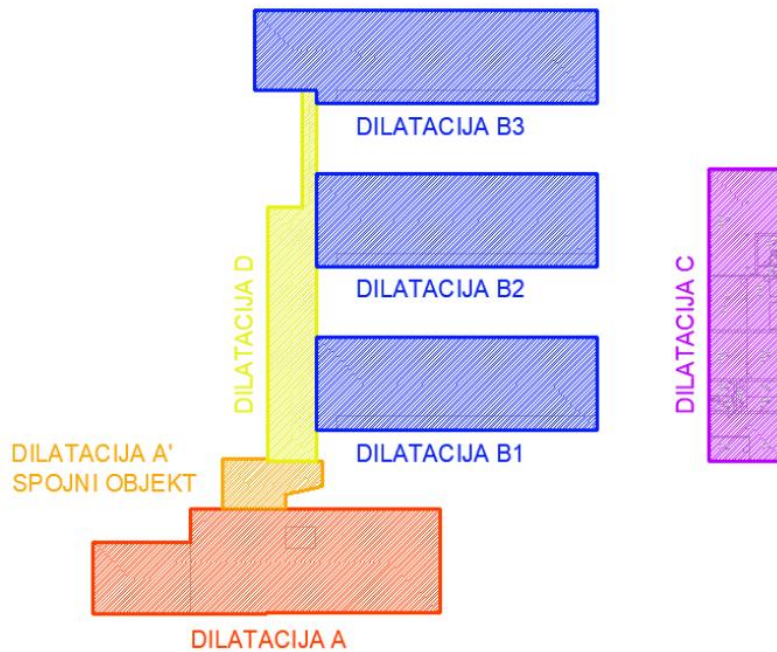
Sjeverna zgrada Fakulteta strojarstva i brodogradnje sastoji se od više konstrukcijskih dilatacija, koje su detaljno opisane u nastavku. Konstrukcijske dilatacije numerirane su od juga prema sjeveru, kao što je vidljivo na slici 8.

Dilatacija A je najveća zgrada u kompleksu i nalazi se na južnom dijelu, prema Filozofskom fakultetu. Na ulazu u dilataciju A izveden je spojni trakt, odnosno ulazni dio koji omogućava pristup dilataciji s razine Ulice Ivana Lučića. Dilatacije B1 do B3 čine tri konstrukcijski identične zgrade, postavljene u smjeru istok-zapad. Dilatacija B1 je najbliža dilataciji A (najjužnija), dok dilatacije B2 i B3 slijede prema sjeveru. Dilatacija A i dilatacije B funkcionalno su povezane zgradom dilatacije D, koja je izdužena u smjeru sjever-jug i služi kao spojni objekt između ostalih dilatacija. Unutar sjevernog kompleksa FSB-a nalazi se i zgrada dilatacije C, koja je potpuno odvojena od ostalih dilatacija.

Dilatacije B1, B2 i B3 konstrukcijski su gotovo identične, s iznimkom da je dilatacija B3 izvedena s dva dodatna polja okvira smještenih zapadno od stubišne jezgre. Dilatacije B1 i B2 imaju maksimalne tlocrtne dimenzije od 47,60 x 15,70 m, dok dilatacija B3 ima dimenzije 58,05 x 15,70 m. Ukupna visina svih triju dilatacija iznosi približno 9,30 m, mjereno od razine okolnog terena. Sve tri dilatacije imaju prizemlje i kat (ukupno dvije etaže). Visine etaža su sljedeće: prizemlje – 4,90 m, kat – 4,20 m. U nastavku rada, detaljno će se obraditi nosiva konstrukcija dilatacije B2.



Slika 7 Sjeverna zgrada FSB-a (arhivska dokumentacija)



Slika 8 Sjeverna zgrada FSB-a – shema dilatacija (preuzeto iz projekta Capital ing.)

### 2.3. Dilatacija B2

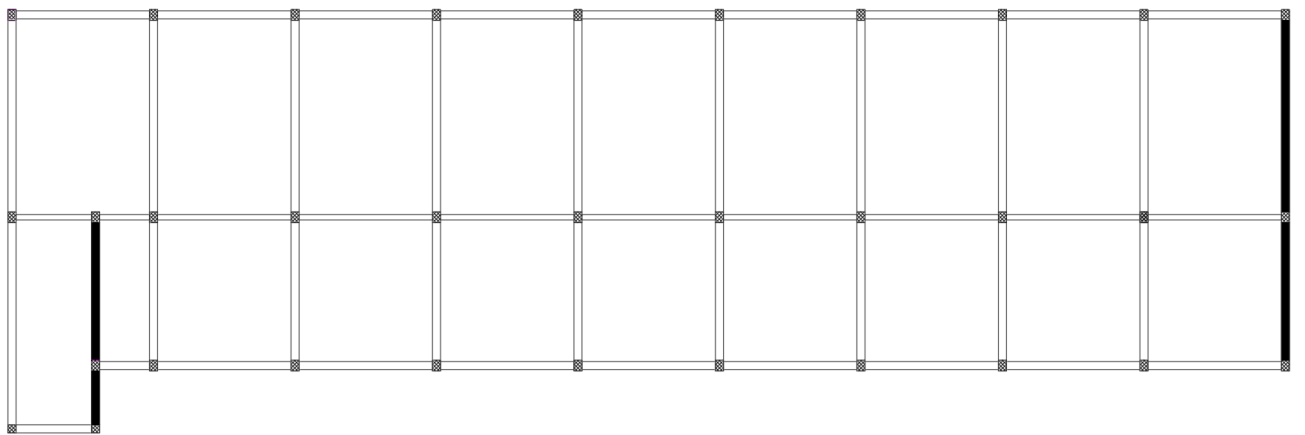
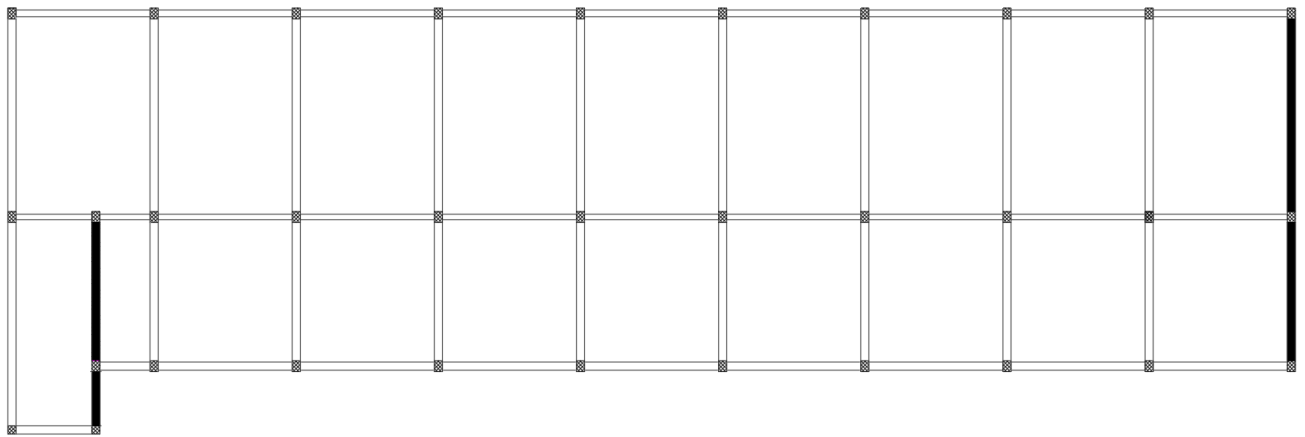
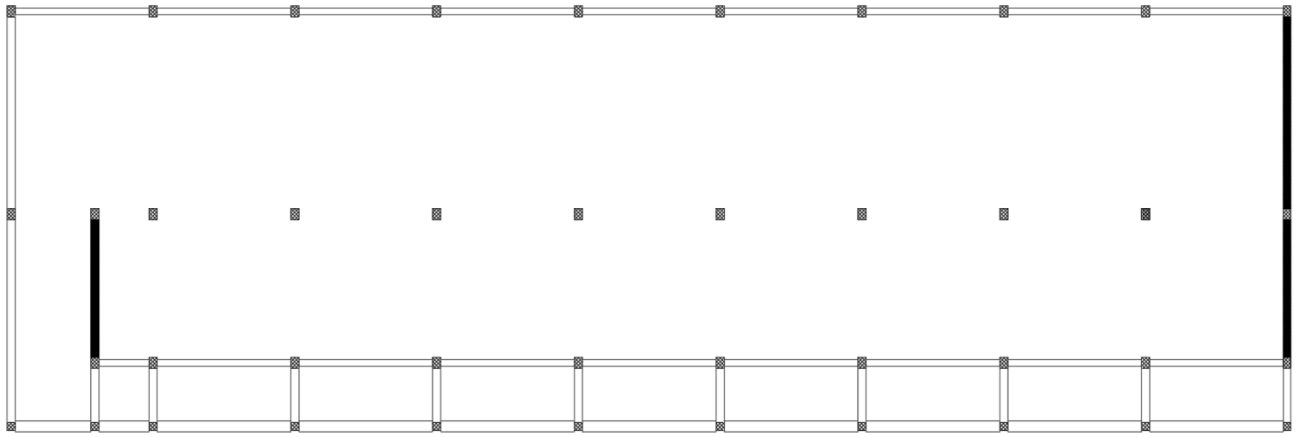
Konstrukcija građevine izvedena je kao armiranobetonski okvirni sustav (stup-greda) u jednom smjeru, poprečno na smjer pružanja građevine, dok je uzdužno povezana samo s ukrotnim rebrima i rubnim gredama. Stropne konstrukcije sastoje se od betonske ploče oslonjene na uzdužna rebra.

Vertikalna komunikacija unutar građevine osigurana je stubišt看 smještenim na zapadnoj strani zgrade, izvedenim kao armiranobetonsko konzolno stubište oslonjeno na bočne betonske zidove. Na južnoj strani svake dilatacije izvedena je nadstrešnica od pune armiranobetonske ploče, oslonjene na uzdužne grede. Temelji građevine izvedeni su kao armiranobetonske temeljne stope (temelji samci).

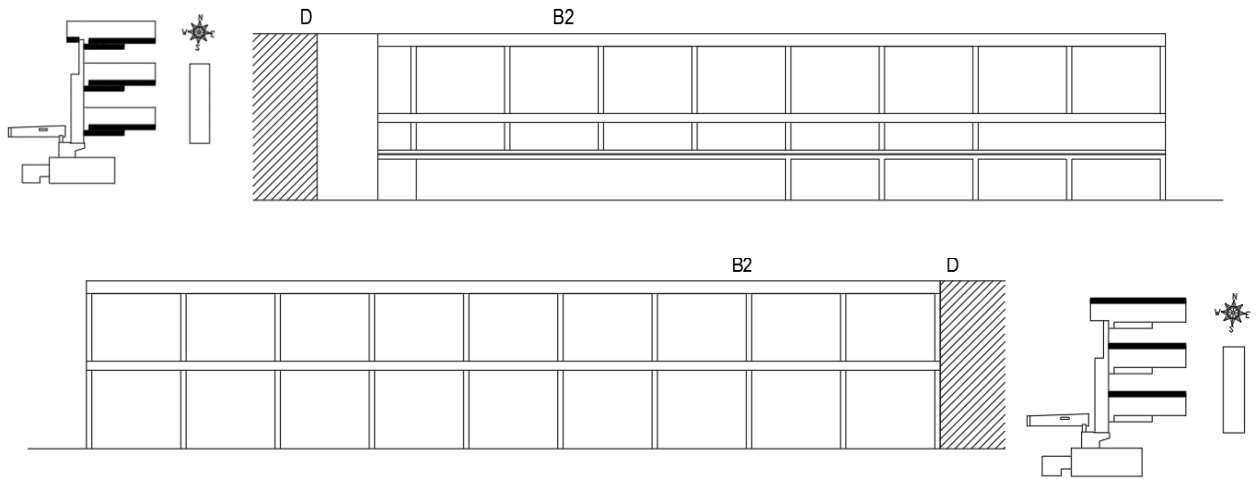
Ova dilatacija, čije fotografije u stanju obnove možemo vidjeti na slici 9, sastoji se od visokog prizemlja i kata, te hodnika (nisko prizemlje) smještenog s južne strane. Građevina ima tlocrtno pravilan pravokutni oblik. Tlocrt građevine je prikazan na slici 10, a pročelja na slici 11.



Slika 9 Prikaz dilatacije B2 u stanju obnove



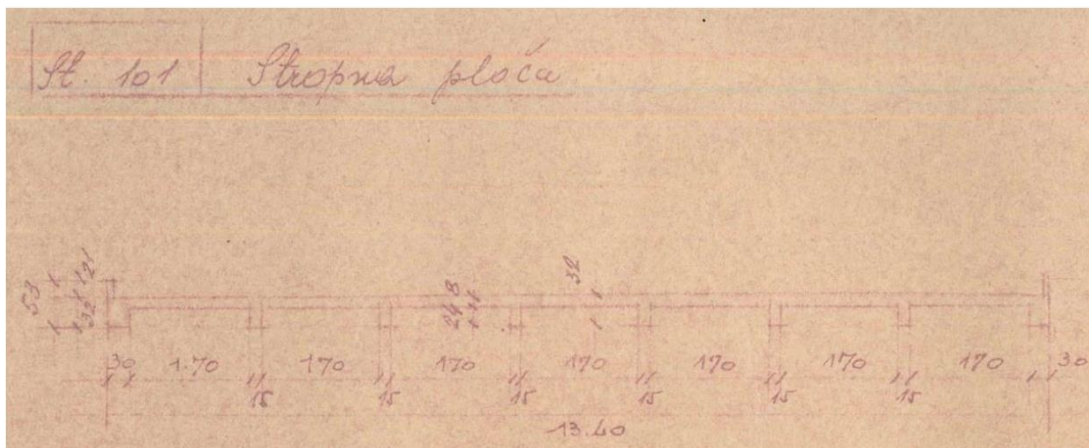
*Slika 10 Tlocrt niskog i visokog prizemlja te prvog kata dilatacije B2*



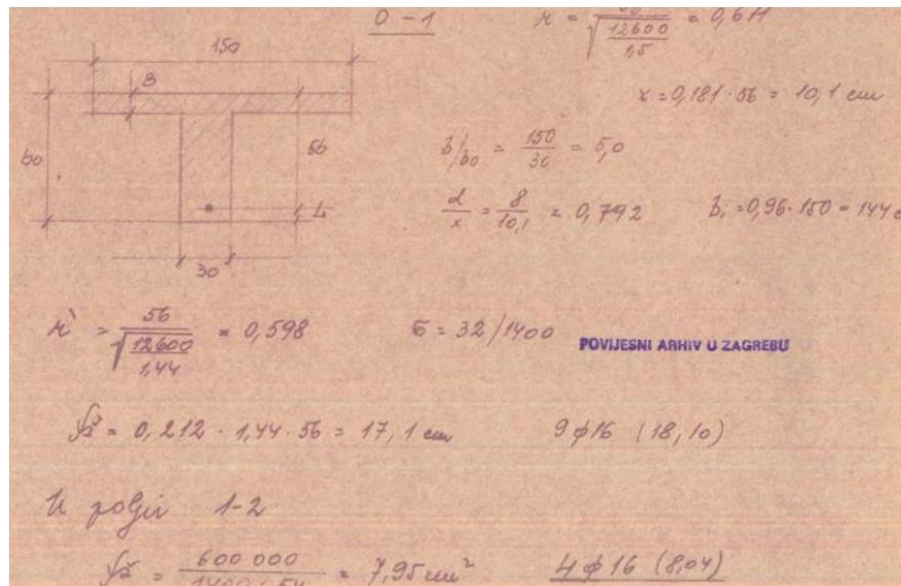
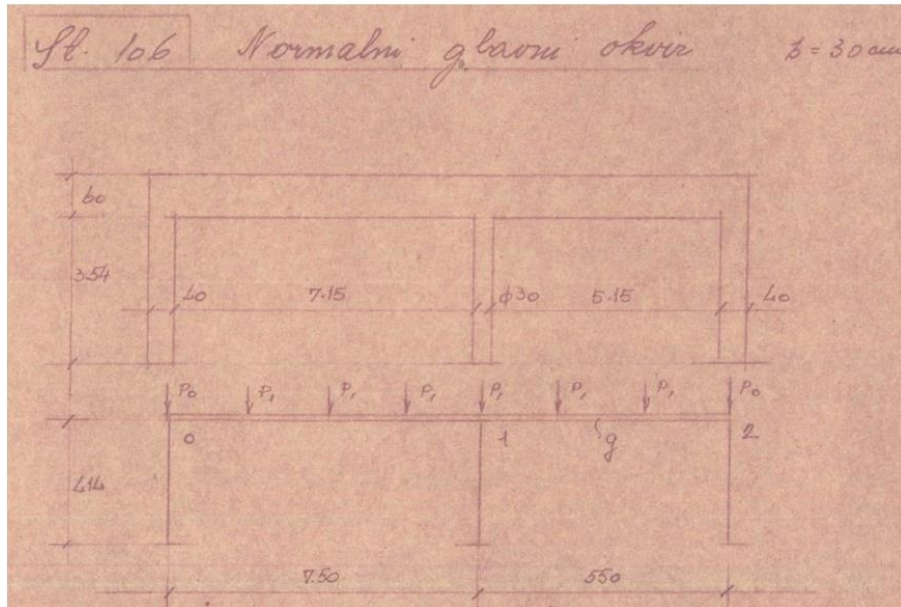
Slika 11 Prikaz južnog i sjevernog pročelja Dilatacije B2

Stropna konstrukcija prvog kata izvedena je kao armiranobetonska ploča debljine 8 cm, oslonjena na rebra presjeka 20/32 cm (rebra 24 cm + tlačna ploča 8 cm). Rebra su postavljena u uzdužnom smjeru s osnim razmakom od približno 1,80 m i oslanjaju se na poprečne okvire, koji se sastoje od greda dimenzija 30/60 cm te stupova presjeka 30/40 cm i elipsastih stupova dimenzija približno 40/20 cm. Na pročeljima, između stupova u uzdužnom smjeru, izvedena su ukrutna rebra dimenzija 30/32 cm (rebra 24 cm + tlačna ploča 8 cm). Prikaz stropnih rebara nalazi se na slici 12.

Proračun okvira proveden je za vertikalna opterećenja u skladu s pripadajućim rasponima i rasterom. Rasponi okvira iznose 5,50 m + 7,50 m. Svi armiranobetonski elementi su armirani glatkom armaturom GA240/360, a betonirani su betonom razreda tlačne čvrstoće C25/30, u skladu s važećim propisima.



Slika 12 Prikaz stropnih rebara (iz arhivske dokumentacije)



na križanju

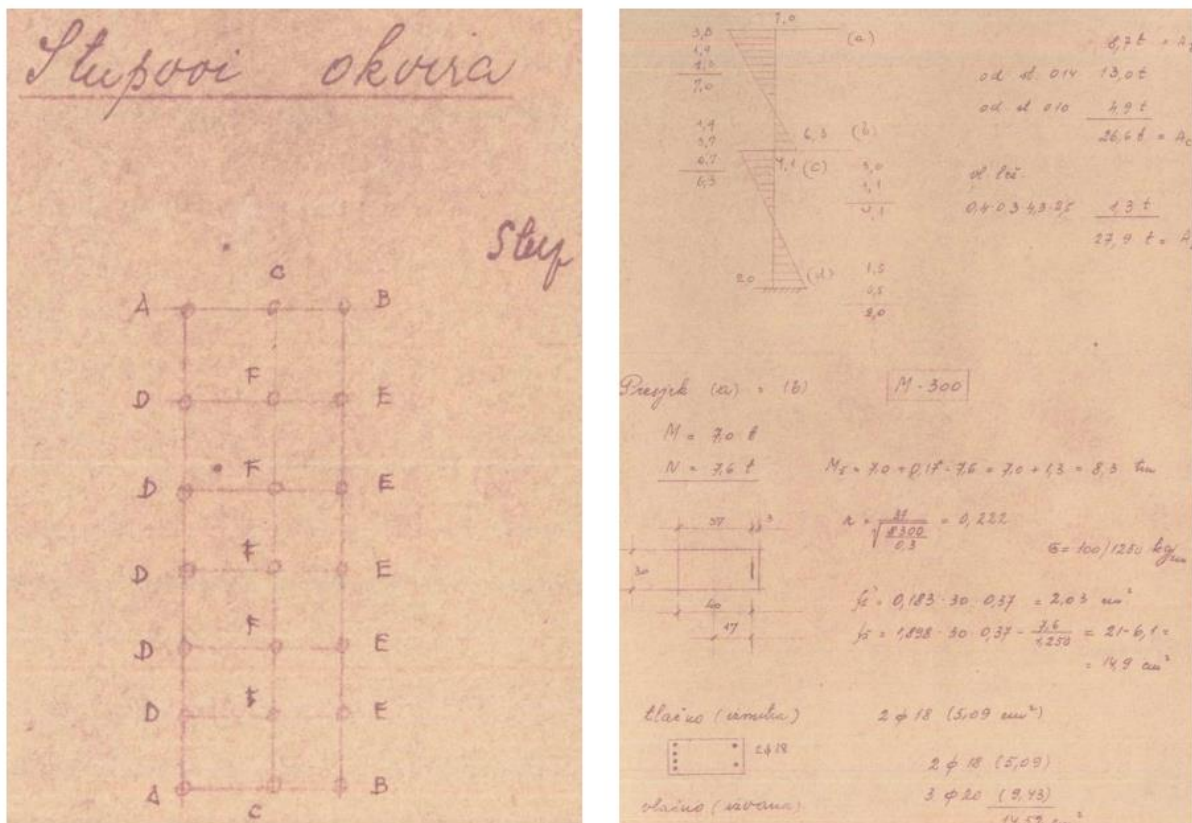
	$M_0$	$M_1$	$M_2$	
$m$	-5,9	-16,0	-1,4	x) zona ...
$\mu$	0,399	0,242	0,820	unutarnji
$\sigma_b$	52	96	23	leđj od
$\mu \%$	0,503	1,395	0,3	M-300
$\beta_2$	8,46	23,45	5,03	ostalo
$\phi$	2 $\phi 18$ 2 $\phi 16$	4 $\phi 16$ 5 $\phi 20$	2 $\phi 18$ 2 $\phi 16$	M-220
$\text{cm}^2$	9,11	23,75	9,11	

Slika 13 Statički proračun grede okvira (iz arhivske dokumentacije)

U arhivskoj dokumentaciji, koja uključuje izvorni statički proračun (izradio: "Arhitektonski biro Haberle" u rujnu 1958. godine, projektanti: ing. M. Haberle i ing. M. Jurković), proveden je proračun svih nosivih stupova građevine. Stupovi su proračunati na vertikalno opterećenje. Ova činjenica ukazuje na to da je prilikom proračuna zanemarena nosivost i stabilnost okvira izvan ravnine, te okviri nisu proračunati na bočna opterećenja poput potresa ili vjetrova, što je u skladu s praksom tog vremena.

Stupovi su armirani samo za savijanje u ravnini okvira, a poprečna armatura (vilice) nije zasebno proračunata u statičkom proračunu. Zbog toga se pretpostavlja da građevina ne zadovoljava suvremene propise o potresnoj otpornosti. Potresna otpornost unutar ravnine okvira nije detaljno analizirana, ali se dijelom osigurava armaturom stupova i greda koja je proračunata za vertikalna opterećenja. Izvan ravnine okvira, potresna otpornost se oslanja isključivo na krutost elemenata, budući da stupovi nisu proračunati za savijanje izvan ravnine i povezani su samo ukрутnim rebrima, bez upetosti u čvoru stup-greda.

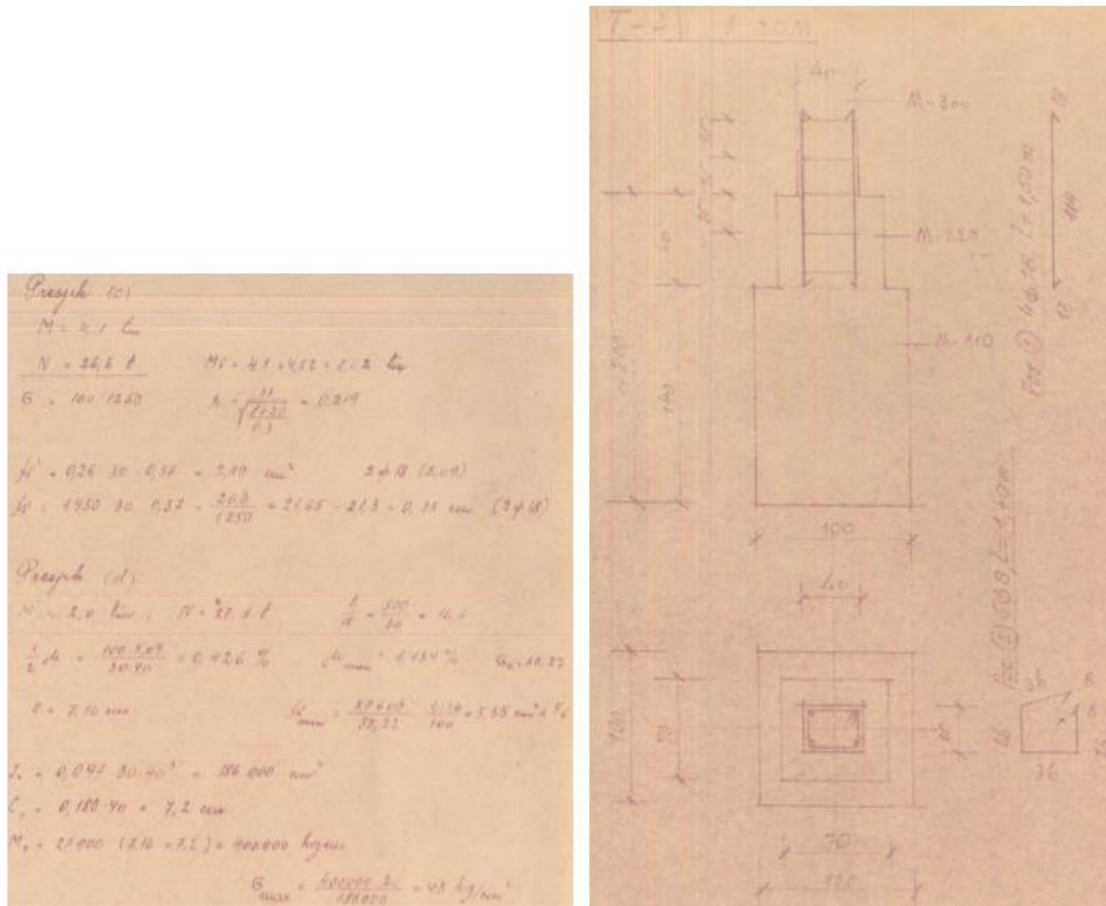
Visoki stupovi, s relativno malim dimenzijama za sustav "čistih" konzola, dodatno smanjuju potresnu otpornost u skladu s normom HRN EN 1998-1-1. Detaljan prikaz proračuna stupova vidljiv je na sljedećim slikama iz arhivske dokumentacije, a na isti način proveden je proračun svih ostalih stupova okvira građevine prema njihovim pozicijama.



Slika 14 Prikaz proračuna i dimenzioniranja stupova po presjecima (iz arhivske dokumentacije)



Temeljenje građevine izvedeno je pomoću temelja samaca. Prema arhivskoj dokumentaciji, u statičkom proračunu je za svaku poziciju stupa zasebno određena potrebna tlocrtna dimenzija temeljne stope, kao što je prikazano na slici 16. Temeljne stope nisu jednake tlocrtna dimenzije po cijeloj visini, već se postupno šire prema dolje. Dubina temeljenja svih stopa iznosi 2,0 metra. Ovisno o pozicijama, temeljne stope su izvedene u dva ili tri presjeka po visini, pri čemu se svaki presjek širi od gornjeg prema donjem dijelu.



Slika 15 Prikaz proračuna i dimenzioniranja stupova i temelja po presjecima (iz arhivske dokumentacije)

### 2.3.1. Istražni radovi

Iz dostupne dokumentacije, vidljivo je da su na konstrukciji izvedeni istražni radovi kako bi se utvrdila vrsta i kvaliteta materijala te potvrdio nosivi sustav. Ti radovi obuhvaćaju otvaranje istražnih sondi na stupovima i gredama s ciljem procjene vrste i kvalitete ugrađenih materijala. Rezultati istražnih radova bit će predstavljeni u nastavku.

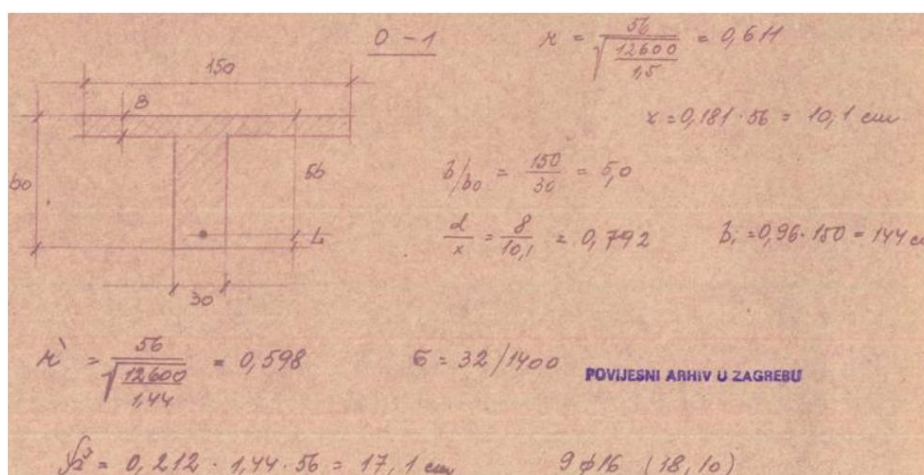
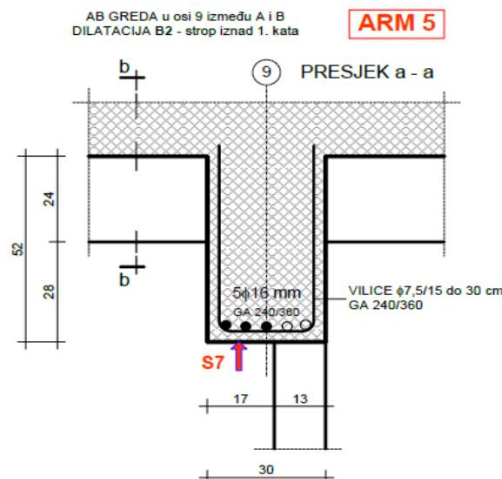
- Sonda B1 – S1– Utvrđivanje količine i kvalitete armature uklanjanjem zaštitnog sloja betona (greda okvira)

- Sonda B2 – S2, B2 – S4, B2 – S6– Procjena količine armature i zaštitnog sloja betona primjenom radara (stup okvira)
- Sonda B2 – S3, B2 – S5 – Procjena količine armature i zaštitnog sloja betona primjenom radara (greda okvira)
- Sonda B2 – S2 i B2 – S5 – Procjena tlačne čvrstoće betona sklerometrom

### 2.3.2. Rezultati istražnih radova

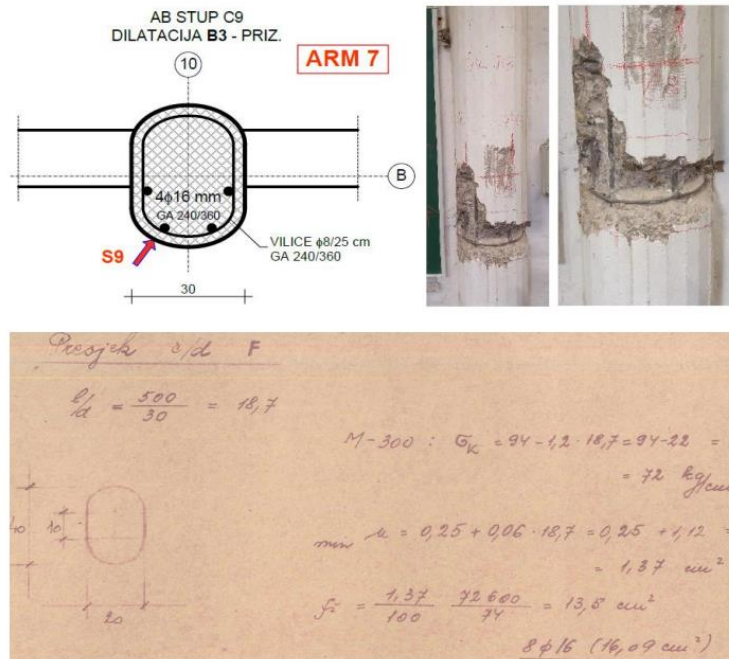
U cijeloj sjevernog zgradi otvoreno je osam mjesta na kojima se istražnim radovima utvrđivala ugrađena armatura. U dilataciji B2 ispitivala se armiranobetonska greda na stropu iznad 1. kata u osi 9 (sonda B2 – S6).

Istražnim radovima potvrđeno je da je ugrađena armatura u skladu s izvornim statičkim proračunom, što je jasno prikazano na slici 18. Pri provjeri armature grede vidljive su samo šipke donjeg reda armature ( $5\phi 16$ ), dok se pretpostavlja da su u drugi, nedostupni red ugrađene dodatne 4 šipke  $\phi 16$ , što je u skladu s proračunom.



Slika 16 Usporedba ugrađene armature i armature iz statičkog proračuna u gredi (izvor: projekt Capital ing.)

Armatura u ovalnim stupovima utvrđivala se u dilataciji B3. Isti stupovi rađeni su u dilataciji B2, stoga su rezultati ispitivanja uporabljivi. Otvarao se stup u prizemlju dilatacije. Istražnim radovima potvrđeno je da je ugrađena armatura u skladu s izvornim statičkim proračunom, što je jasno prikazano na slici 19.



Slika 17 Usporedba ugrađene armature i armature iz statičkog proračuna u ovalnim stupu (izvor: projekt Capital ing.)

Kvaliteta betona utvrđivala se sklerometrom na 4 mjesta, a rezultati su prikazani u tablici niže.

Tablica 1 Rezultati ispitivanja kvalitete betona ugrađenog u stupove i grede (sklerometrom)

DILATACIJA	Oznaka mjernog mjesta	Mjesto ispitivanja	Srednja vrijednost odskoka sklerometra R	Standardno odstupanje R	Procijenjena čvrstoća betona (MPa)
B2	S5	AB STUP C8 – 1. kat	34,60	2,14	31,14
	S6	AB STUP C5 – 1. kat	34,80	1,65	21,48
	S7	AB GREDA u osi 9 iznad 1. kata	36,20	1,23	33,86
	S8	AB GREDA sekundarna uzdužna greda iznad 1. kata	39,80	1,18	40,20





Istražni radovi pokazali su da kvaliteta betona kod većine elemenata zadovoljava današnji razred tlačne čvrstoće C25/30, što se poklapa s izvornim statičkim proračunom. Sva ugrađena armatura je glatka, oznake GA 240/360.

### 3. OCJENA POSTOJEĆEG STANJA

#### 3.1. Zaključak o stanju građevine

Iz projekta tvrtke Capital ing. dobiveni su podaci o provedenim istraživanjima na konstrukciji. Nakon provedenog brzog pregleda, zgrada je ocijenjena žutom naljepnicom, što znači da je svrstana u kategoriju Privremeno neuporabljivo – Potrebne mjere hitne sanacije (PN2). Uz brzi pregled, u travnju 2021. godine obavljen je detaljan pregled građevine i izrađen pripadajući elaborat. U elaboratu je utvrđena klasifikacija oštećenja prema EMS 98 standardu (prikazano u tablici 2), pri čemu je građevina klasificirana kao razina II, što potvrđuje ocjenu uporabljivosti iz brzih pregleda, te se procjenjuje kao pogodna za obnovu.

Tablica 2 Razine oštećenja utvrđivanih brzim pregledima

Kategorija	Korištenje	Opis	Primjeri
I	bez ograničenja	NEZNATNA NEKONSTRUKTIVNA OŠTEĆENJA nema vidljivih oštećenja, manje pukotine na sekundarnim elementima	
II	ograničeno korištenje	NEZNATNA KONSTRUKTIVNA OŠTEĆENJA pukotine na zidu, oštećenja nekonstruktivnih dijelova građevine, lasaste pukotine na nosivim AB elementima, nosivost konstrukcije nije ugrožena	
III	privremeno ne koristiti	UMJERENA KONSTRUKTIVNA OŠTEĆENJA Velike i duboke pukotine na zidovima, pukotine i oštećenja stupova, nosivost djelomično smanjena, privremeno iseljenje, konstruktivna sanacija	
IV	ne koristiti	ZNAČAJNA KONSTRUKTIVNA OŠTEĆENJA otvaraju se rupe i urušavaju se zidovi, slom oko 40% konstruktivnih komponenti, građevina je u opasnom stanju, zahtjeva iseljenje, detaljna sanacija ili rušenje	
V	ne koristiti	SLOM CJELOKUPNE GRAĐEVINE Veliki dio ili cijela građevina se urušila, rušenje i rekonstrukcija	

### 3.2. Razred važnosti

Građevine se razvrstavaju u četiri razreda važnosti koja se u proračun uvode kroz faktor važnosti  $\gamma_I$  kojim množimo akceleraciju tla [1]. Vrijednosti ovog faktora kreću se od 0,8 do 1,4, ovisno o razredu, s najnižim za najmanje važnu građevinu i najvišim za najvažniju. Razvrstavanje po razredima se temelji na potencijalnim posljedicama kolapsa za ljudske živote, utjecaju na javnu sigurnost i zaštitu civila nakon potresa, te na društvene i gospodarske posljedice kolapsa. Detaljan opis razreda važnosti dan je u tablici 3. Budući da promatrana građevina služi kao edukacijski prostor u kojem se često okuplja veći broj ljudi, svrstava se u razred važnosti III.

Tablica 3 Razredi važnosti građevina

Razred važnosti	Zgrade
I	Zgrade manje važnosti za javnu sigurnost, npr. poljoprivredne zgrade itd.
II	Obične zgrade koje ne pripadaju drugim kategorijama
III	zgrade čija je potresna otpornost važna s obzirom na posljedice vezane s rušenjem, npr. škole, dvorane za skupove, kulturne institucije itd.
IV	Zgrade čija je cjelovitost tijekom potresa od životne važnosti za civilnu zaštitu, npr. bolnice, vatrogasne postaje, energane itd.

### 3.3. Razine obnove

Tehnički propis o izmjenama i dopunama Tehničkog propisa za građevinske konstrukcije uvodi nova pravila za obnovu zgrada oštećenih potresom. Ovaj dokument uključuje stručne smjernice koje su izradili stručnjaci za obnovu zgrada oštećenih u potresima u Zagrebu i okolici. U njemu su definirane četiri razine obnove konstrukcija zgrada s obzirom na njihovu mehaničku otpornost i stabilnost.

Budući da je promatrana građevina fakultet, odnosno javna zgrada u kojoj se okuplja velik broj ljudi, možemo je smatrati građevinom kod koje je potresna otpornost od iznimne važnosti zbog potencijalnih posljedica u slučaju rušenja. Stoga je zaključeno da je potrebno provesti obnovu na razini 3. Razinom obnove 3 u ovom slučaju, postiže se indeks znatnog oštećenja konstrukcije (IZO) od 1,00. Ovo se provodi iz razloga kako eventualne buduće rekonstrukcije građevine ne bi zahtijevale daljnje intervencije na građevinskoj konstrukciji.

## 4. MODELIRANJE KONSTRUKCIJE

Modeliranje i proračun postojeće konstrukcije proveden je u računalnom programu ETABS 20. U nastavku će se objasniti način modeliranja i rezultati koji su dobiveni.

### 4.1. Ulazni podaci

Proračun postojeće konstrukcije provodi se za povratni period od 475 godina. Stoga referentno ubrzanje tla, prikazano na slici 19, iznosi  $a_{gR} = 0,247g$  dok je odabran tip temeljnog tla C.



Slika 18 Ubrzanja tla za mjerodavne povratne periode

Kao materijal korišten je beton čvrstoće C20/25. Promatrana zgrada svrstava se u građevine razreda važnosti III prema HRN EN 1998-1 zbog čega je korišten faktor važnosti  $\gamma_I = 1,2$ .

U Tablici 5 nalaze se podaci o dimenzijama i armaturi armiranobetonskih konstruktivnih elemenata prizemlja i prvog kata, a na slici 20 vidljive su tlocrtne pozicije pojedinih elemenata.

Ploča je u modelu definirana kao *membrane*, a ne uobičajeno kao *shell*. Membrana prenosi opterećenje trapezno i trokutasto na okolne grede, ravnomjerno raspodjeljujući opterećenje bez savijanja, što znači da ne dolazi do stvaranja momenata savijanja u samoj ploči. S druge strane, shell elementi su složeniji jer uzimaju u obzir i savijanje ploče. To znači

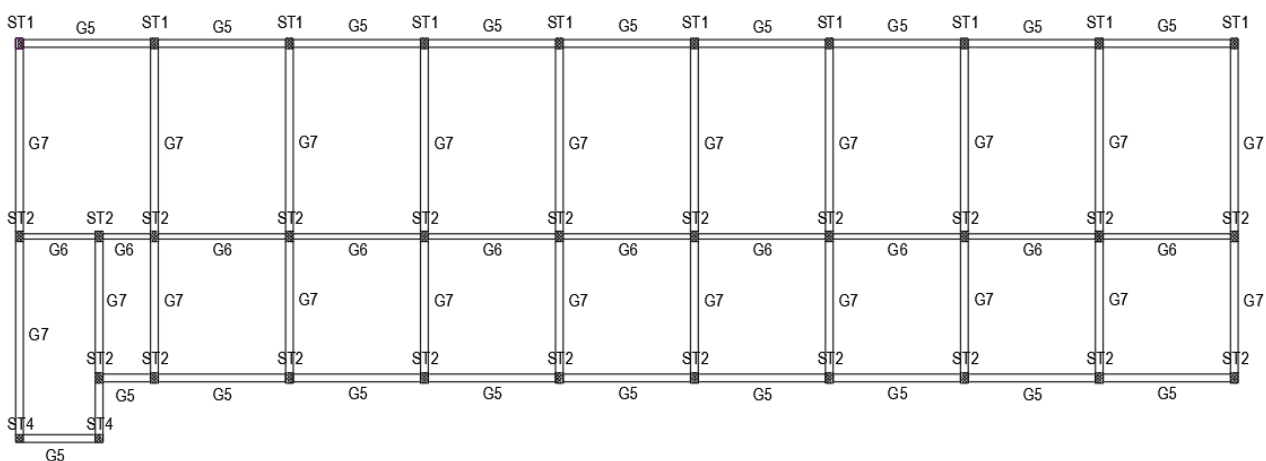
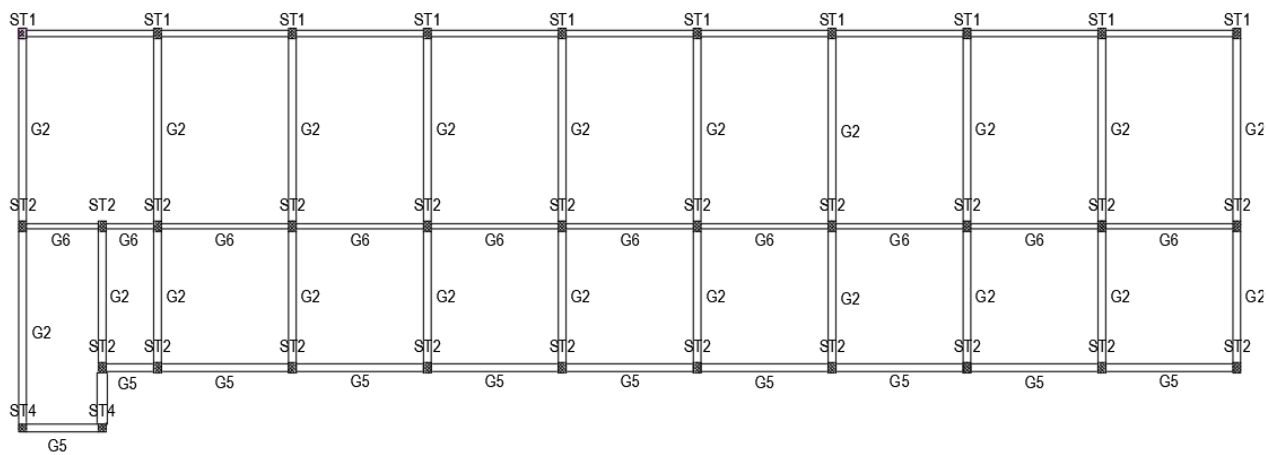
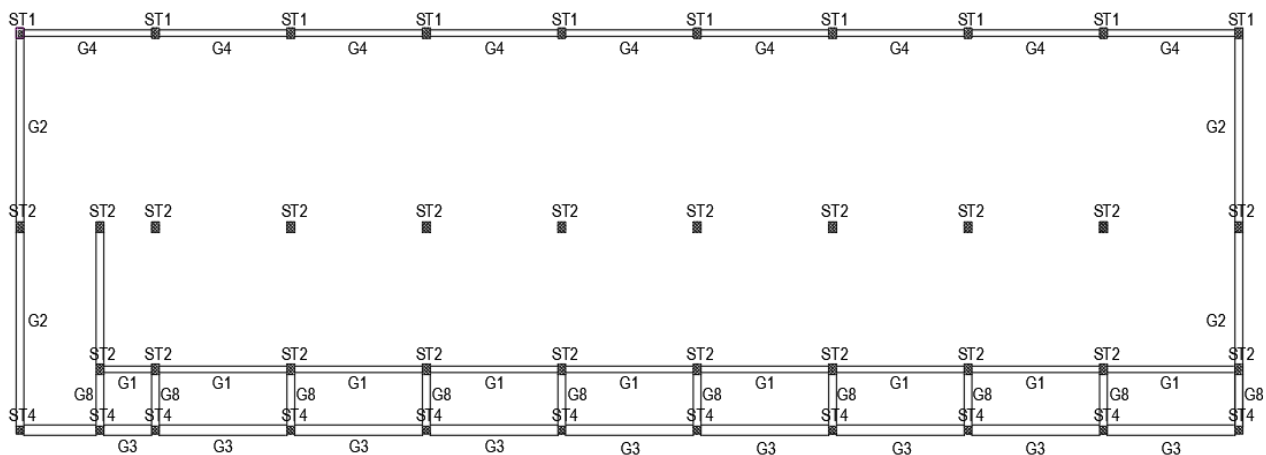
da shell elementi mogu preuzeti dio savojnih momenata, što u nekim slučajevima može dovesti do nepravilne raspodjele sila.

Rubni uvjeti su definirani kao upeti ležajevi jer su zglobni ležajevi davali prevelike momente i rotacije u konstrukciji. Kako bi se postigla preciznija raspodjela sila i smanjenje momenata, zglobovi su modelirani samo na mjestima gdje je to bilo potrebno.

Krutost uzdužnih gredica, između zida i stupa, namjerno je povećana kako bi se pojednostavio proračun i eliminirala potreba za analizom svakog pojedinog zida. Sile u gredicama su uvijek veće od sila u stupovima, što opravdava povećanu krutost. Ključno je da se osigura stabilnost spoja između zida i stupa kako bi se spriječilo eventualno popuštanje tog spoja.

Tablica 4 Podaci o AB konstruktivnim elementima

OZNAKA	AB ELEMENT	ARMATURA
ST1	Stup 30/40	4 $\phi$ 18
ST2	Stup 30/40	4 $\phi$ 16
ST3	Stup 30/40	3 $\phi$ 20 + 2 $\phi$ 18
ST4	Stup 30/30	4 $\phi$ 16
G1	Greda 25/45	7 $\phi$ 16, vilice $\phi$ 6/20
G2	Greda 30/70	11 $\phi$ 20, vilice $\phi$ 8/25
G3	Greda 40/22	6 $\phi$ 12, vilice $\phi$ 6/20
G4	Greda 25/45	6 $\phi$ 16, vilice $\phi$ 6/20
G5	Greda 30/32	2 $\phi$ 14 + 2 $\phi$ 12, vilice $\phi$ 6/25
G6	Greda 20/32	5 $\phi$ 14, vilice $\phi$ 6/25
G7	Greda 30/60	4 $\phi$ 16 + 5 $\phi$ 20, vilice $\phi$ 8/25
G8	Greda 30/30	5 $\phi$ 12, vilice 6 $\phi$ 25



Slika 19 Prikaz pozicija AB elemenata



## 5. LINEARNI PRORAČUN KONSTRUKCIJE

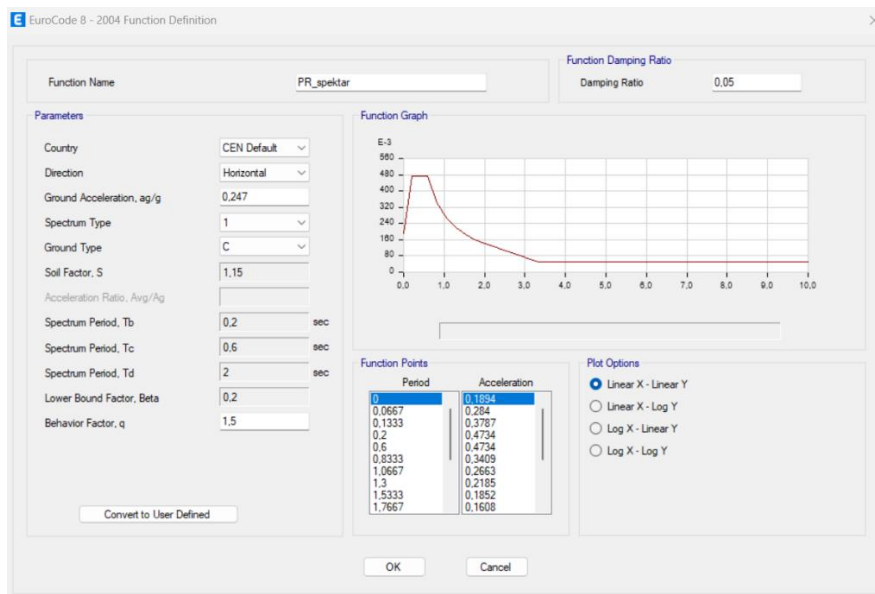
### 5.1. Analiza opterećenja i kombinacija opterećenja konstrukcije

Vlastitu težinu nosivih dijelova konstrukcije programski paket uzima automatski u proračun, uzimajući u obzir zadane dimenzije nosivih elemenata konstrukcije i specifične težine materijala od kojih su elementi izrađeni. U ovom proračunu, vlastita težina konstrukcije je opterećenje DEAD.

Svi slojevi stropnih konstrukcija uneseni su u model kao dodatno stalno opterećenje. Dodatno stalno opterećenje na stropnoj konstrukciji prizemlja zadano je  $6,75 \text{ kN/m}^2$ , dok je na stropnoj konstrukciji prvog kata zadano sa  $6,25 \text{ kN/m}^2$ .

Uporabno opterećenje zadano je u skladu sa Eurokodom 1 i pripadajućim nacionalnim dodatkom, ovisno o namjeni prostora. Na krovnoj ploči je zadano sa  $0,6 \text{ kN/m}^2$  (za krovove s nagibom manjim od  $20^\circ$ ). Na javnim prostorima, odnosno prostorima na kojima se mogu okupljati ljudi zadano je sa  $3,0 \text{ kN/m}^2$ .

Opterećenje potresom zadano je preko projektnog spektra za povratni period od 475 godina ( $a_{gR} = 0,247g$ ) i kategoriju tla C.



Slika 20 Zadani projektni spektar

Grafično stanje nosivosti zadano je kombinacijom: Vlastita težina  $\cdot 1,35$  + Stalno opterećenje  $\cdot 1,35$  + Uporabno opterećenje  $\cdot 1,5$ . Za proračun masa, vlastita težina i stalno opterećenje su uzeti sa koeficijentom 1, dok je uporabno opterećenje množeno koeficijentom 0,3.

Kako bi se bolje odrazilo stvarno ponašanje konstrukcije, u linearnoj analizi smanjena je krutost stupova i greda.

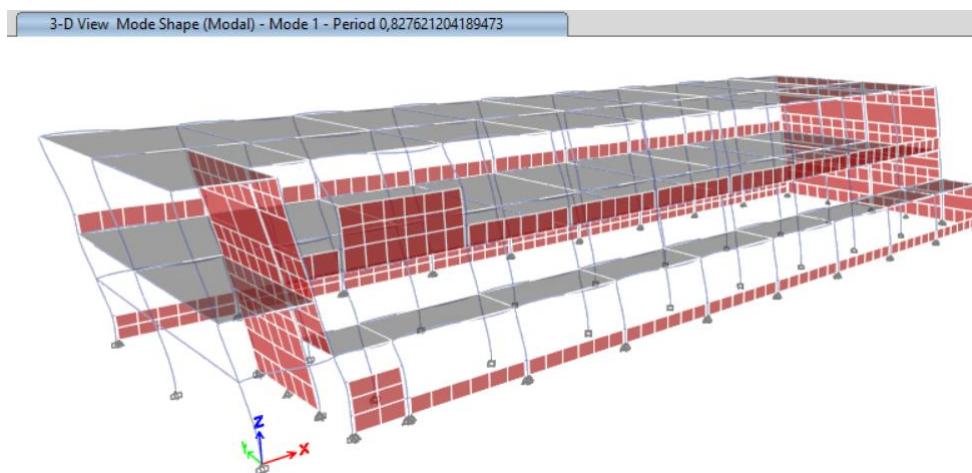
### 5.1.1. Dinamičke karakteristike konstrukcije

Dinamičke karakteristike, kao što su period, frekvencije i oblici titranja, ključni su faktori u analizi ponašanja konstrukcije pod dinamičkim opterećenjem. Ove karakteristike omogućuju procjenu kako će se konstrukcija ponašati pod utjecajem različitih vrsta vanjskih sila te pomažu u identifikaciji potencijalnih kritičnih točaka koje mogu utjecati na stabilnost i sigurnost građevine [10].

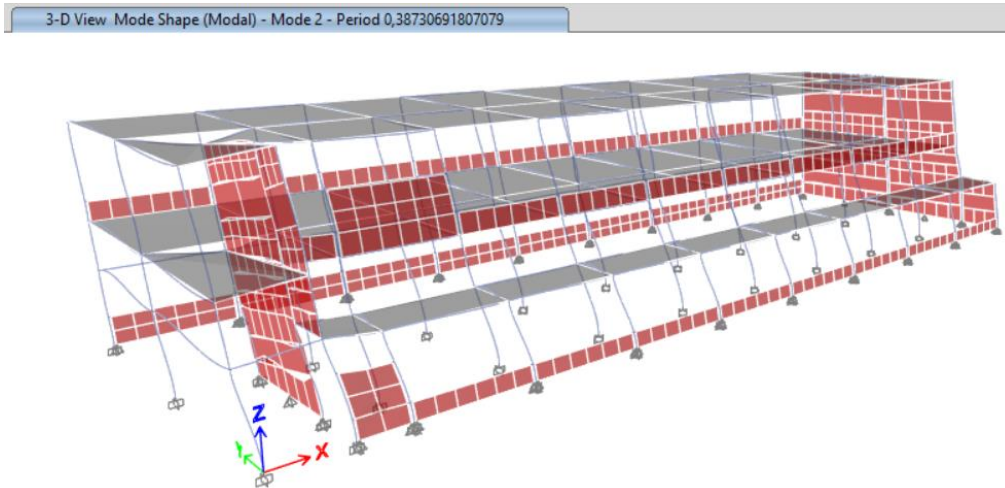
U tablici u nastavku prikazani su periodi i frekvencije promatrane građevine, a na slikama niže prikazana su prva tri oblika titranja konstrukcije.

Case	Mode	Period sec	Frequency cyc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup>
Modal	1	0,828	1,208	7,5919	57,6364
Modal	2	0,387	2,582	16,2228	263,1778
Modal	3	0,345	2,903	18,2377	332,6146
Modal	4	0,224	4,458	28,0126	784,7055
Modal	5	0,193	5,178	32,5347	1058,504
Modal	6	0,112	8,914	56,0092	3137,031
Modal	7	0,109	9,173	57,6359	3321,8976
Modal	8	0,098	10,254	64,4261	4150,7185
Modal	9	0,093	10,711	67,2979	4529,0075
Modal	10	0,093	10,803	67,8775	4607,3517
Modal	11	0,086	11,64	73,1385	5349,2441
Modal	12	0,081	12,344	77,56	6015,5544

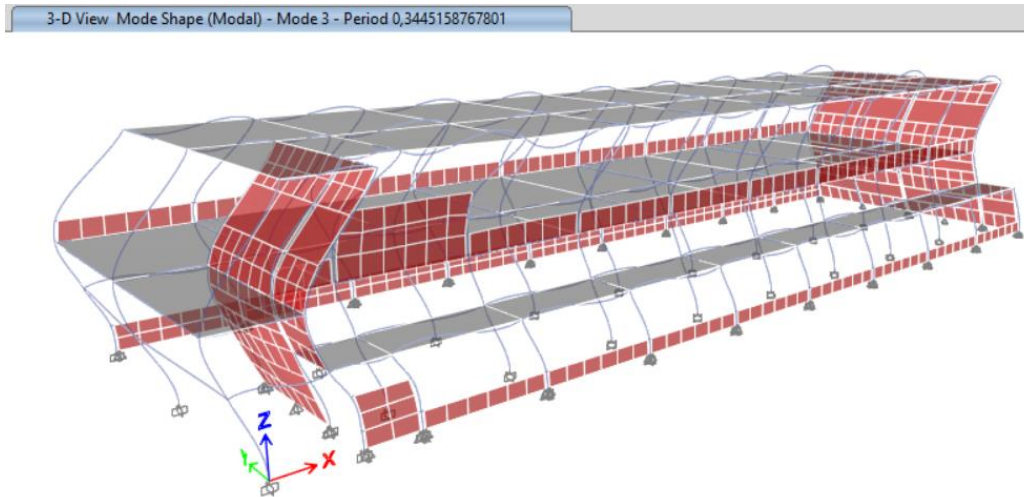
Slika 21 Prikaz perioda i frekvencija



Slika 22 Prvi oblik titranja



Slika 23 Drugi oblik titranja



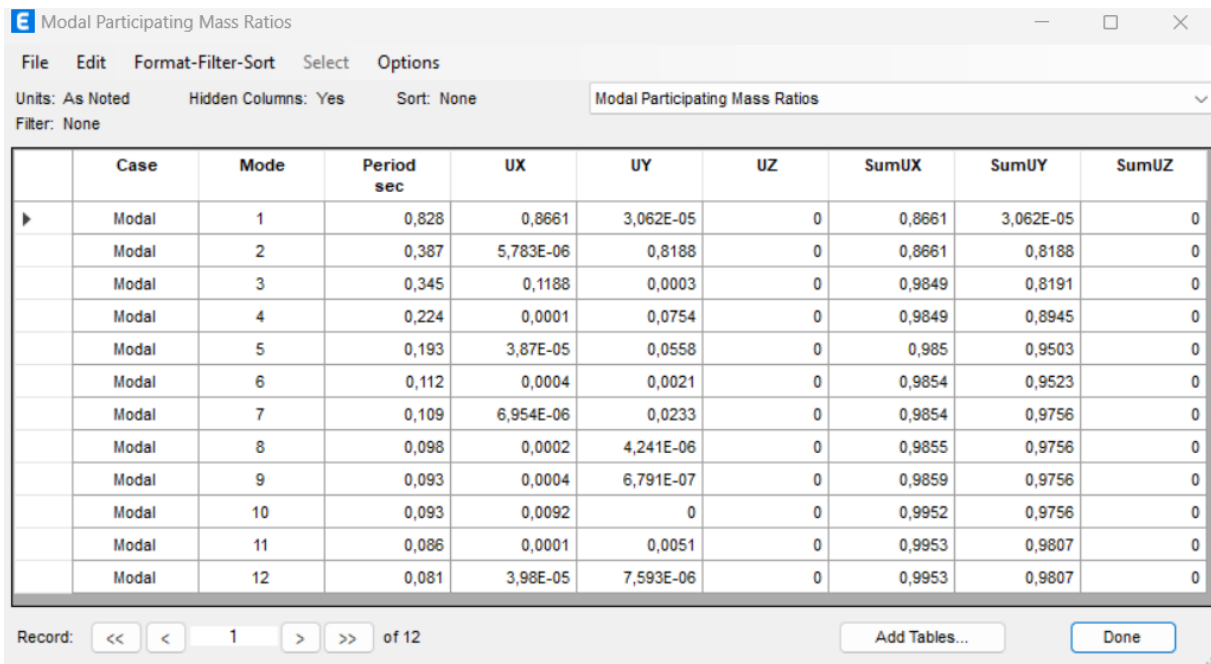
Slika 24 Treći oblik titranja

Na temelju analiziranih perioda i prikazanih oblika titranja za modove 1, 2 i 3, može se potvrditi da konstrukcija pokazuje pravilno dinamičko ponašanje. U prvom obliku titranja, period iznosi 0,82 sekunde, što rezultira dominantnim horizontalnim pomakom duž x-osi. Očekivano je da gornji katovi pokazuju najveće pomake, što je u skladu s većom fleksibilnošću na višim razinama konstrukcije. U drugom obliku titranja, s periodom od 0,38 sekundi, konstrukcija ima dominantan horizontalni pomak duž y – osi, dok treći oblik titranja, s periodom od 0,34 sekunde, ima jednu točku presjeka između nedeformiranog (uspravnog) položaja i deformacijske linije po visini.

Iz kombinacije perioda, frekvencija i oblika titranja jasno je da konstrukcija pokazuje odgovarajuće dinamičko ponašanje s horizontalnim pomacima u oba glavna smjera (x i y).

### 5.1.2. Spektralna analiza

Za provjeru graničnog stanja nosivosti, korištena je linearna analiza sa proračunskim spektrom odziva, uz pretpostavku niske razine duktilnosti konstrukcije (faktor ponašanja  $q = 1,5$ ). Prilikom provođenja spektralne analize, uzeti su u obzir svi oblici titranja koji zajedno aktiviraju ukupno 90% mase konstrukcije [11]. U ovom slučaju, dovoljna su prva dva oblika titranja, jer aktiviraju najviše mase i mogu se koristiti za provođenje spektralnog proračuna. U tablici niže može se vidjeti doprinos mase u smjeru određenih dinamičkih stupnjeva slobode za svaki određeni oblik titranja.



Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Modal	1	0,828	0,8661	3,062E-05	0	0,8661	3,062E-05	0
Modal	2	0,387	5,783E-06	0,8188	0	0,8661	0,8188	0
Modal	3	0,345	0,1188	0,0003	0	0,9849	0,8191	0
Modal	4	0,224	0,0001	0,0754	0	0,9849	0,8945	0
Modal	5	0,193	3,87E-05	0,0558	0	0,985	0,9503	0
Modal	6	0,112	0,0004	0,0021	0	0,9854	0,9523	0
Modal	7	0,109	6,954E-06	0,0233	0	0,9854	0,9756	0
Modal	8	0,098	0,0002	4,241E-06	0	0,9855	0,9756	0
Modal	9	0,093	0,0004	6,791E-07	0	0,9859	0,9756	0
Modal	10	0,093	0,0092	0	0	0,9952	0,9756	0
Modal	11	0,086	0,0001	0,0051	0	0,9953	0,9807	0
Modal	12	0,081	3,98E-05	7,593E-06	0	0,9953	0,9807	0

Slika 25 Tablični prikaz aktivirane mase

U ovom slučaju, prvi oblik, u kojem je sudjelovanje mase 87% , najznačajniji je oblik titranja. Doprinos trećeg oblika titranja je vrlo mali, što je vidljivo iz niskih vrijednosti u tablici.

### 5.1.3. Rezultati linearnog proračuna

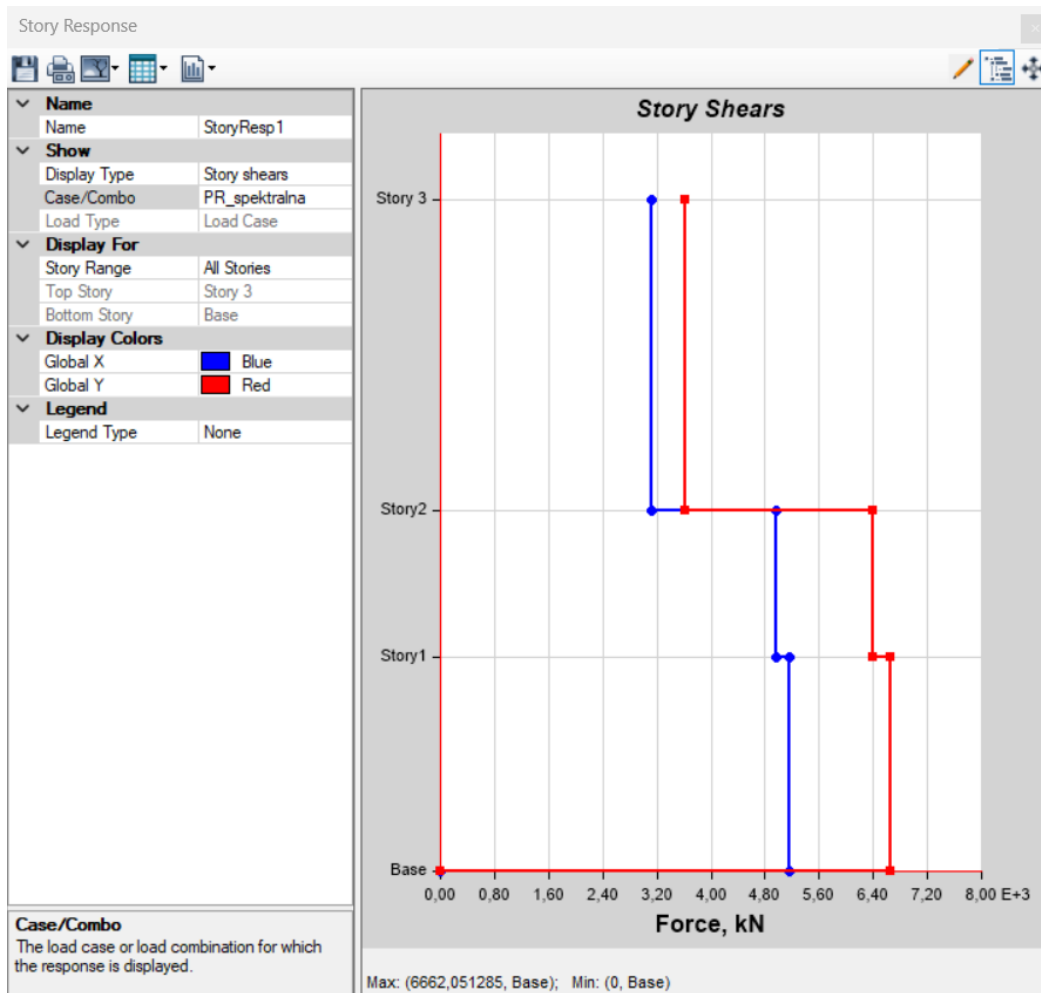
U tablici niže prikazani su rezultati, odnosno ukupne reakcije dobivene spektralnom analizom. Poprečna sila dobivena pomoću projektnog spektra stavlja se u omjer sa ukupnom vertikalnom silom dobivenom pomoću kombinacije opterećenja MASS. Na taj način dobiva se koeficijent poprečne sile (Base shear). On predstavlja razinu poprečne sile u odnosu na težinu konstrukcije.

$$B.S. = \frac{5156,94}{17552,4} = 0,29 \quad B.S. = \frac{6662,05}{17552,4} = 0,38$$

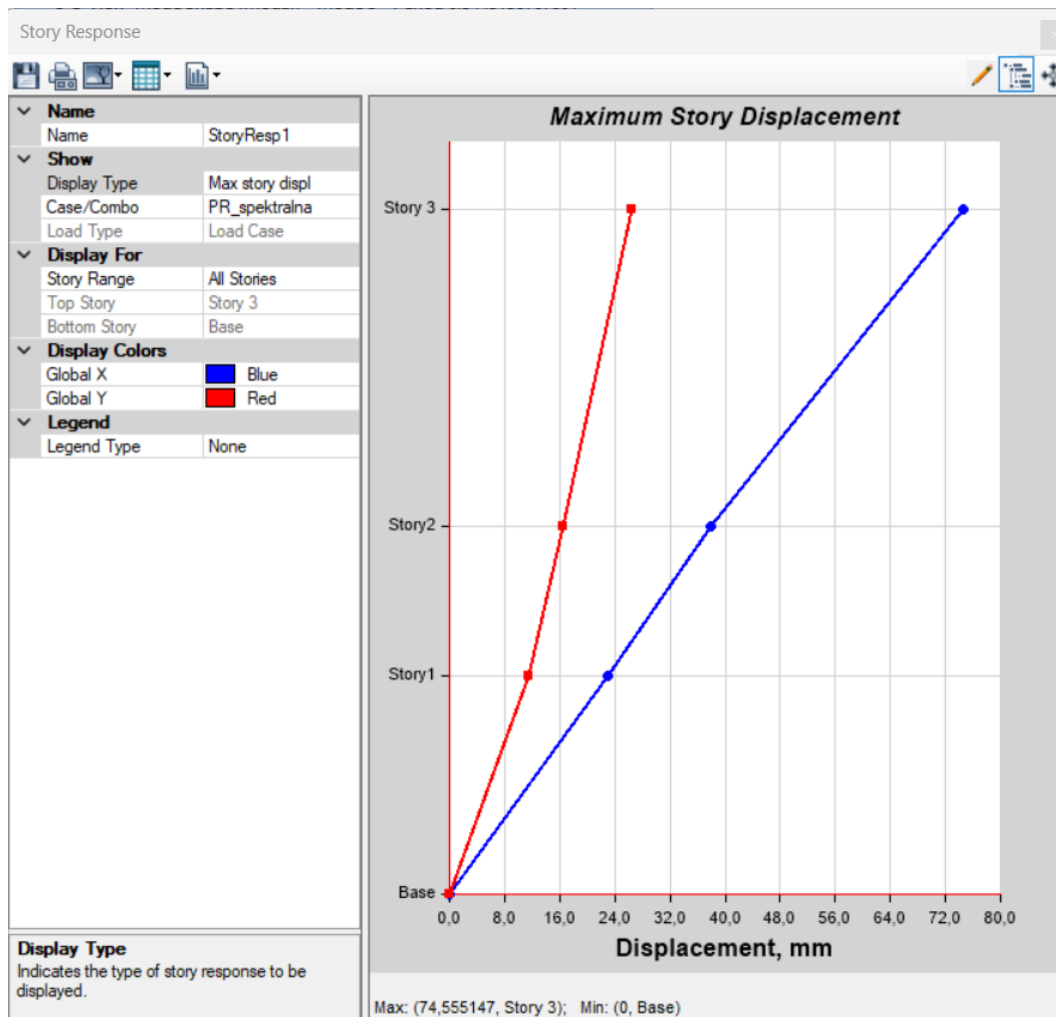
X smjer y smjer

Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	FX kN	FY kN	FZ kN	MX kN-m	MY kN-m
Dead	LinStatic			0	-5,32E-07	8778,6536	70598,8859	-210920,7036
Stalno	LinStatic			0	1,962E-06	8082,9775	71386,8508	-188803,0089
Live	LinStatic			0	-8,593E-07	2302,6013	19846,5553	-53901,1081
Ptr_X	LinStatic			-8837,8356	4,775E-05	0	-0,0002	-63997,5485
Ptr_Y	LinStatic			1,192E-05	-12190,6317	0	88276,2033	0,0002
PR_spektralna	LinRespSpec	Max		5156,9385	6662,0513	0	47011,7295	37096,9472
mass	Combination			0	1,172E-06	17552,4115	147939,7034	-415894,0449
GSN	Combination			0	6,416E-07	26217,1039	221450,5776	-620478,674

Slika 26 Ukupne reakcije



Slika 27 Prikaz poprečne sile po etažama konstrukcije



Slika 28 Prikaz maksimalnih pomaka u razini etaža

Pri ovim pomacima u razini etaža, uz  $q$  faktor koji iznosi 1,5, može se izračunati da će za granično stanje uporabljivosti za povratni period od 95 godina taj pomak iznositi:

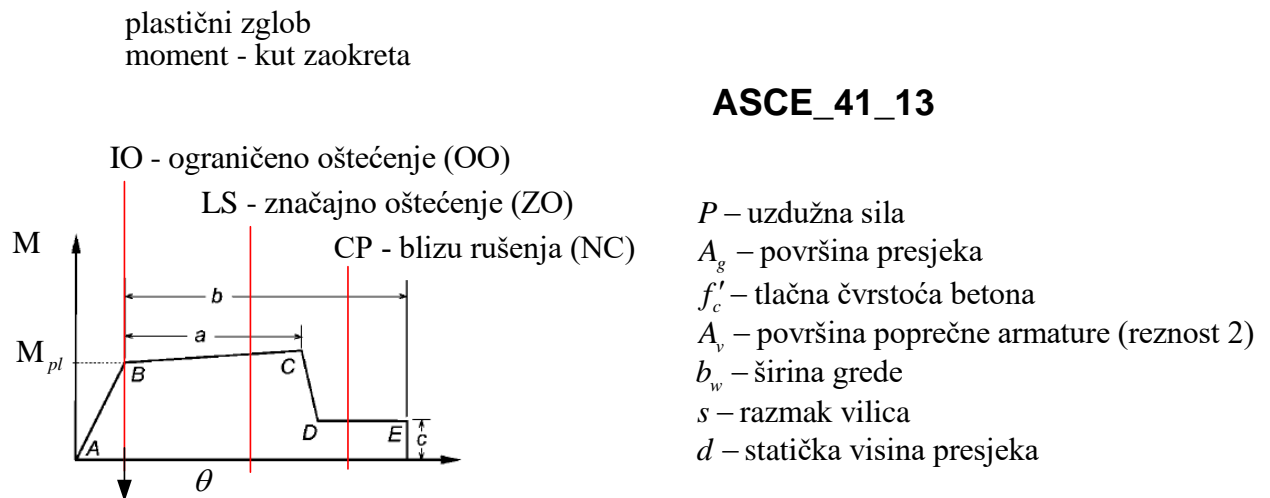
- $\frac{74 \cdot 1,5}{2} = 55,5 \text{ mm}$  za x smjer
- $\frac{26 \cdot 1,5}{2} = 19,5 \text{ mm}$  za y smjer

## 6. PUSHOVER ANALIZA

### 6.1. Definiranje nelinearnih svojstava

Iteracijskim postupkom i pomoću dostupnih jednadžbi prema ASCE 41-13 dobivene su vrijednosti za definiranje plastičnih zglobova na gredama i stupovima. Na skici su dane shematske oznake za pojedine točke krivulje kapaciteta i pojedina granična stanja, a na tablicama niže vrijednosti za definiranje plastičnih zglobova greda i stupova.

Definirano je šest različitih plastičnih zglobova za stupove, iako su geometrijski identični, iz razloga što se krivulje kapaciteta stupova razlikuju zbog promjenljive uzdužne sile za pojedine pozicije stupova. Tako su za svaku etažu definirana po dva plastična zgloba, jedan za vanjske, a drugi za unutarnje stupove.



Slika 29 Prikaz definicije plastičnog zgloba i značenje oznaka u tablici

Za razliku od linearne analize, u nelinearnoj analizi modifikacija krutosti stupova i greda nije potrebna jer ova analiza već u osnovi uključuje složenije faktore poput velikih deformacija, materijalnih nelinearnosti i mogućih promjena u geometriji sustava. Nelinearna analiza omogućuje detaljnije modeliranje stvarnog ponašanja konstrukcije, pa bi dodatno smanjivanje krutosti bilo suvišno i moglo bi narušiti točnost modela.

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)		
			a	b		IO	LS	CP
Condition i. Beams controlled by flexure <sup>b</sup>								
$\rho - \rho'$	Transverse reinforcement <sup>c</sup>	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$ <sup>d</sup>						
$\rho_{bal}$								
$\leq 0.0$	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>								
Stirrup spacing $\leq d/2$			0.0030	0.02	0.2	0.0015	0.01	0.02
Stirrup spacing $> d/2$			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>								
Stirrup spacing $\leq d/2$			0.0030	0.02	0.0	0.0015	0.01	0.02
Stirrup spacing $> d/2$			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:  $f'_c$  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>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.

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
Condition i. <sup>b</sup>								
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$							
$\leq 0.1$	$\geq 0.006$		0.035	0.060	0.2	0.005	0.045	0.060
$\geq 0.6$	$\geq 0.006$		0.010	0.010	0.0	0.003	0.009	0.010
$\leq 0.1$	$\leq 0.002$		0.027	0.034	0.2	0.005	0.027	0.034
$\geq 0.6$	$\leq 0.002$		0.005	0.005	0.0	0.002	0.004	0.005
Condition ii. <sup>b</sup>								
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$ <sup>d</sup>						
$\leq 0.1$	$\geq 0.006$	$\leq 3$ (0.25)	0.032	0.060	0.2	0.005	0.045	0.060
$\leq 0.1$	$\geq 0.006$	$\geq 6$ (0.5)	0.025	0.060	0.2	0.005	0.045	0.060
$\geq 0.6$	$\geq 0.006$	$\leq 3$ (0.25)	0.010	0.010	0.0	0.003	0.009	0.010
$\geq 0.6$	$\geq 0.006$	$\geq 6$ (0.5)	0.008	0.008	0.0	0.003	0.007	0.008
$\leq 0.1$	$\leq 0.0005$	$\leq 3$ (0.25)	0.012	0.012	0.2	0.005	0.010	0.012
$\leq 0.1$	$\leq 0.0005$	$\geq 6$ (0.5)	0.006	0.006	0.2	0.004	0.005	0.006
$\geq 0.6$	$\leq 0.0005$	$\leq 3$ (0.25)	0.004	0.004	0.0	0.002	0.003	0.004
$\geq 0.6$	$\leq 0.0005$	$\geq 6$ (0.5)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Condition iii. <sup>b</sup>								
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$							
$\leq 0.1$	$\geq 0.006$		0.0	0.060	0.0	0.0	0.045	0.060
$\geq 0.6$	$\geq 0.006$		0.0	0.008	0.0	0.0	0.007	0.008
$\leq 0.1$	$\leq 0.0005$		0.0	0.006	0.0	0.0	0.005	0.006
$\geq 0.6$	$\leq 0.0005$		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Condition iv. Columns controlled by inadequate development or splicing along the clear height <sup>b</sup>								
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$							
$\leq 0.1$	$\geq 0.006$		0.0	0.060	0.4	0.0	0.045	0.060
$\geq 0.6$	$\geq 0.006$		0.0	0.008	0.4	0.0	0.007	0.008
$\leq 0.1$	$\leq 0.0005$		0.0	0.006	0.2	0.0	0.005	0.006
$\geq 0.6$	$\leq 0.0005$		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 30 Podaci za definiranje krivulja kapaciteta greda (gore) i stupova (dolje) (izvor: ASCE 41-13)



U nastavku su prikazane vrijednosti kojima su definirani plastični zglobovi elemenata podijeljenih po svojim pozicijama na etažama.

- **Plastični zglobovi u prizemlju**

Tablica 6 Vrijednosti za definiranje krivulja kapaciteta elemenata prizemlja

Element	$\frac{P}{A_g f_c'}$	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f_c'}}$	a [rad]	b [rad]	C	IO [rad]	LS [rad]	CP [rad]	Moment [kNm]
Vanjski stup 30/30	0,08	0,001	0,6	0,025	0,06	0,2	0,005	0,045	0,06	57
Unutarnji stup 30/30	0,086	0,001	0,24	0,032	0,06	0,2	0,005	0,045	0,06	71
Greda 40/22	200 > 100			0,003	0,01	0,2	0,0015	0,005	0,01	50
Greda 25/45	200 > 140			0,003	0,01	0,2	0,0015	0,005	0,01	100
Greda 30/30	200 > 140			0,003	0,01	0,2	0,0015	0,005	0,01	70

a i b – kutovi plastične rotacije

c – omjer čvrstoće

IO – stanje ograničenog oštećenja

LS – stanje značajnog oštećenja

CP – stanje blizu rušenja

Moment – vrijednost momenta otpora

- **Plastični zglobovi na drugoj etaži**

Tablica 7 Vrijednosti za definiranje krivulja kapaciteta elemenata prve etaže

Element	$\frac{P}{A_g f_c'}$	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f_c'}}$	a [rad]	b [rad]	C	IO [rad]	LS [rad]	CP [rad]	Moment [kNm]
Vanjski stup 30/40	0,09	0,001	0,68	0,025	0,06	0,2	0,0015	0,045	0,01	57

Unutarnji stup 30/40	0,1	0,001	0,097	0,025	0,06	0,2	0,0015	0,045	0,01	57
Greda 30/70	200 < 320			0,003	0,02	0,2	0,0015	0,01	0,02	200
Greda 25/45	200 > 197			0,003	0,01	0,2	0,0015	0,005	0,01	100
Greda 30/32	200 > 140			0,003	0,01	0,2	0,0015	0,005	0,01	90
Greda 20/32	200 > 140			0,003	0,01	0,2	0,0015	0,005	0,01	70

a i b – kutovi plastične rotacije

c – omjer čvrstoće

IO – stanje ograničenog oštećenja

LS – stanje značajnog oštećenja

CP – stanje blizu rušenja

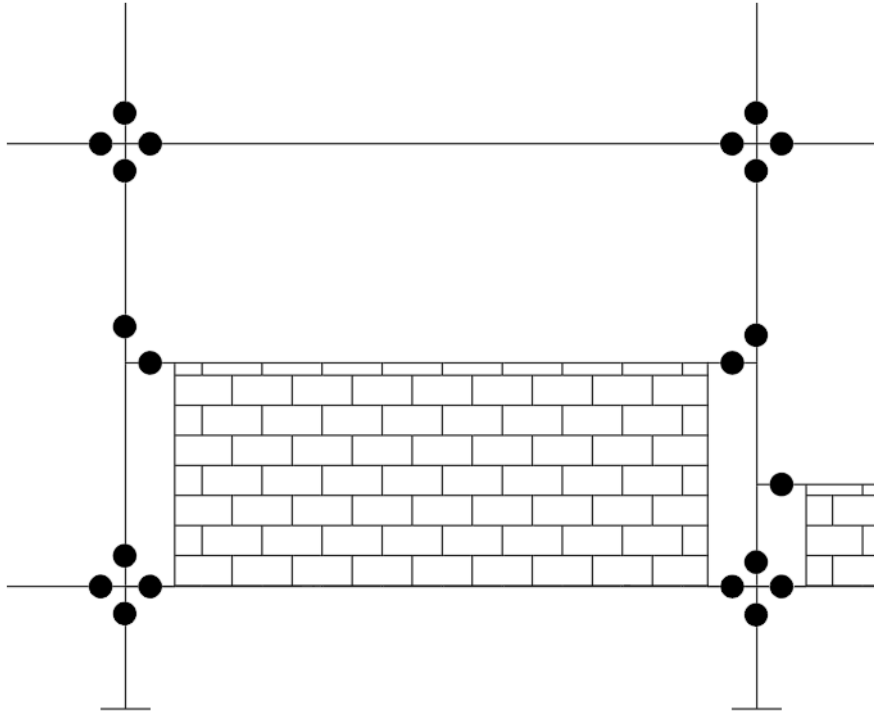
Moment – vrijednost momenta otpora

- **Plastični zglobovi na drugoj etaži**

Tablica 8 Vrijednosti za definiranje krivulja kapaciteta elemenata druge etaže

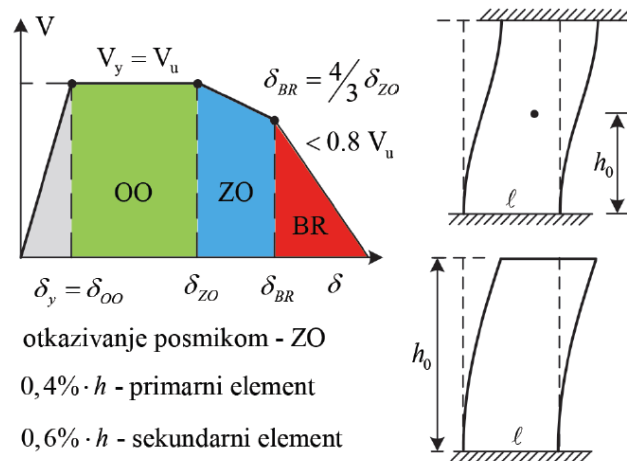
Element	$\frac{P}{A_g f_c'}$	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f_c'}}$	a [rad]	b [rad]	c	IO [rad]	LS [rad]	CP [rad]	Moment [kNm]
Vanjski stup 30/40	0,04	0,001	0,89	0,025	0,06	0,2	0,005	0,045	0,06	57
Unutarnji stup 30/40	0,1	0,001	0,11	0,032	0,06	0,2	0,005	0,045	0,06	97
Greda 30/60	200 < 275			0,003	0,02	0,2	0,0015	0,01	0,02	180
Greda 25/45	200 > 165			0,003	0,01	0,2	0,0015	0,005	0,01	100
Greda 30/32	200 > 140			0,003	0,01	0,20	0,0015	0,005	0,01	90
Greda 20/32	200 > 140			0,003	0,01	0,20	0,0015	0,005	0,01	70

Na sljedećoj slici prikazana je shema rasporeda plastičnih zglobova na gredama i stupovima, kao i na uzdužnim gredicama koji spajaju zid sa stupom. Na gredama su plastični zglobovi smješteni na oba ruba, udaljeni otprilike 30 cm od čvorova. Na stupovima su zglobovi također pozicionirani uz čvorove kao i na gredama, ali i na specifičnim točkama, kao što su točke na visini parapeta. Na uzdužnim gredicama, plastični zglobovi su smješteni u sredini, te su zadani kao uzdužni zglobovi.



Slika 31 Shema rasporeda plastičnih zglobova u modelu

Za plastične zglobove u zidu, izračunata je nosivost po metru duljine zida od opeke, koja je 100 kN. Krivulja sila - pomak je definirana shemom u nastavku.



Slika 32 Prikaz definicije plastičnog zgloba za ispunsko zide

## 6.2. Slučajevi i kombinacije opterećenja za nelinearnu analizu

Za provođenje nelinearne analize konstrukcije, ključno je ispravno definirati slučajeve i kombinacije opterećenja kako bi se obuhvatila sva relevantna djelovanja na konstrukciju. U ovom modelu, Stalno\_NL predstavlja početno stanje sustava u kojem se vlastita težina konstrukcije uzima s faktorom 1, odnosno u punom iznosu, stalno opterećenje se također uzima s faktorom 1, dok se live opterećenje (uporabno opterećenje) uzima s faktorom 0,3. Na slici niže vidljiv je način zadavanja ovog nelinearnog opterećenja.

**Load Case Data**

**General**

Load Case Name: Stalno\_NL [Design...]

Load Case Type: Nonlinear Static [Notes...]

Mass Source: Previous

Analysis Model: Default

**Initial Conditions**

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Nonlinear Case (Loads at End of Case ARE Included)

Nonlinear Case: [ ]

**Loads Applied**

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	Dead	1
Load Pattern	Stalno	1
Load Pattern	Live	0,3

[Add] [Delete]

**Other Parameters**

Modal Load Case: Modal

Geometric Nonlinearity Option: None

Load Application: Full Load [Modify/Show...]

Results Saved: Multiple States [Modify/Show...]

Floor Cracking Analysis: No Cracked Analysis [Modify/Show...]

Nonlinear Parameters: Default - Iterative Event-to-Event [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Slika 33 Početno stanje sustava u nelinearnoj analizi

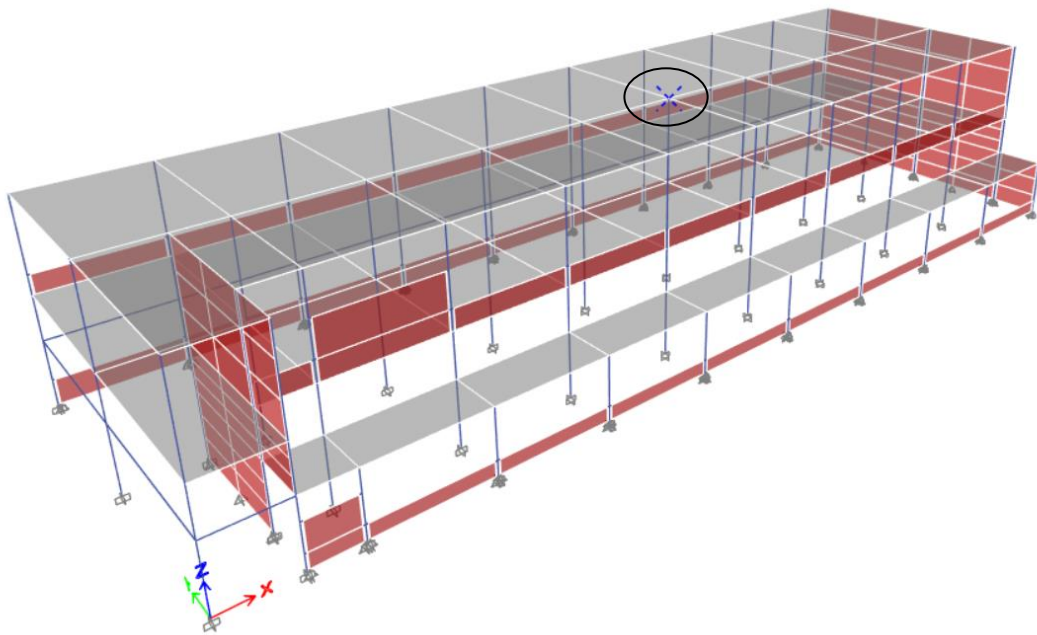
Osim početnog stanja, definirani su i ostali nelinearni slučajevi opterećenja u smjerovima X i Y, s ukupno tri slučaja opterećenja u svakom smjeru. Prvi set slučajeva opterećenja, označen kao Push\_X\_accel i Push\_Y\_accel, temelji se na jednolikom ubrzanju tla tijekom potresa kao ulaznog podatka za nelinearnu seizmičku analizu. Ovaj pristup omogućava statičku nelinearnu analizu odgovora konstrukcije na vremensku promjenu potresnih ubrzanja. Drugi set slučajeva, Push\_X\_mode i Push\_Y\_mode, uključuje postupno guranje konstrukcije pri čemu se koristi modalna raspodjela sila, koja odgovara dominantnom obliku titranja konstrukcije u svakom smjeru. Treći set slučajeva, Push\_X\_ptr i Push\_Y\_ptr, koristi statičku raspodjelu potresnih sila iz Eurocode-a, gdje su definirani slučajevi Potres\_X za x smjer i Potres\_Y za y smjer.

Name	Mass Source	Initial Condition	Nonlinear Case	Load Type	Load Name	Load SF	Modal Case	Load App Type	Displ Translational mm
Push_X_accel	Previous	Nonlinear Case	Stalno_NL	Accel	Accel UX		Modal	Displacement ...	50
Push_X_mode	Previous	Nonlinear Case	Stalno_NL	Mode	1	1	Modal	Displacement ...	50
Push_X_ptr	Previous	Nonlinear Case	Stalno_NL	Load	Ptr_X	1	Modal	Displacement ...	50
Push_Y_accel	Previous	Nonlinear Case	Stalno_NL	Accel	Accel UY		Modal	Displacement ...	20
Push_Y_mode	Previous	Nonlinear Case	Stalno_NL	Mode	2	1	Modal	Displacement ...	20
Push_Y_ptr	Previous	Nonlinear Case	Stalno_NL	Load	Ptr_Y	1	Modal	Displacement ...	20

Slika 34 Nelinearni slučajevi opterećenja

### 6.3. Rezultati nelinearnog proračuna

Za kontrolnu točku uzet je čvor 18 na najvišoj etaži konstrukcije koji se nalazi relativno blizu centra mase etaže.

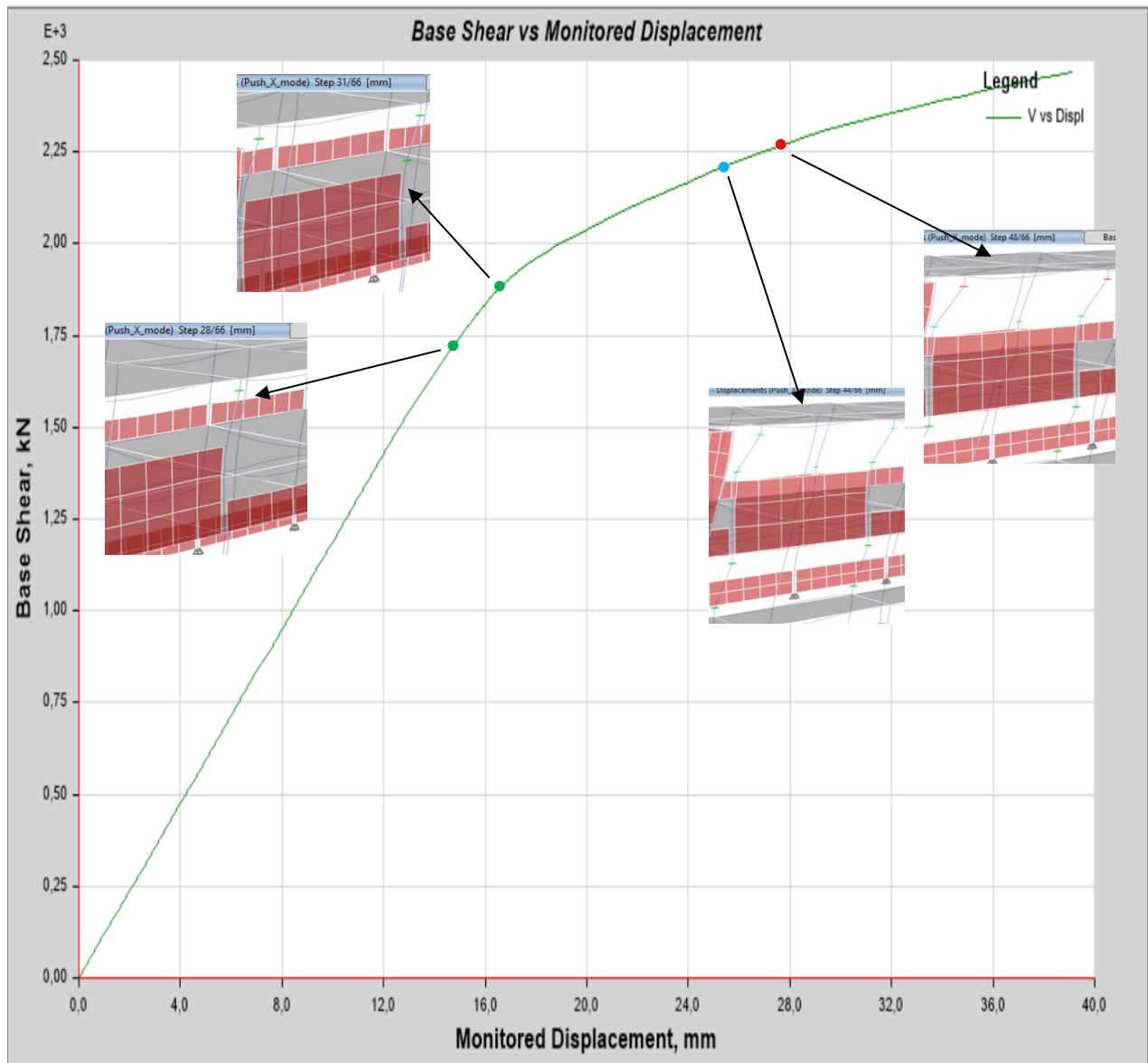


Slika 35 Kontrolna točka – čvor 18 na zadnjoj etaži

Ovom nelinearnom statičkom analizom kao rezultat dobivamo krivulje kapaciteta koje predstavljaju odnos između pomaka kontrolne točke i sile na dnu zgrade vidljive u idućim odlomcima. Prikazani su rezultati za svaku od šest provedenih analiza.

### 6.3.1. X smjer

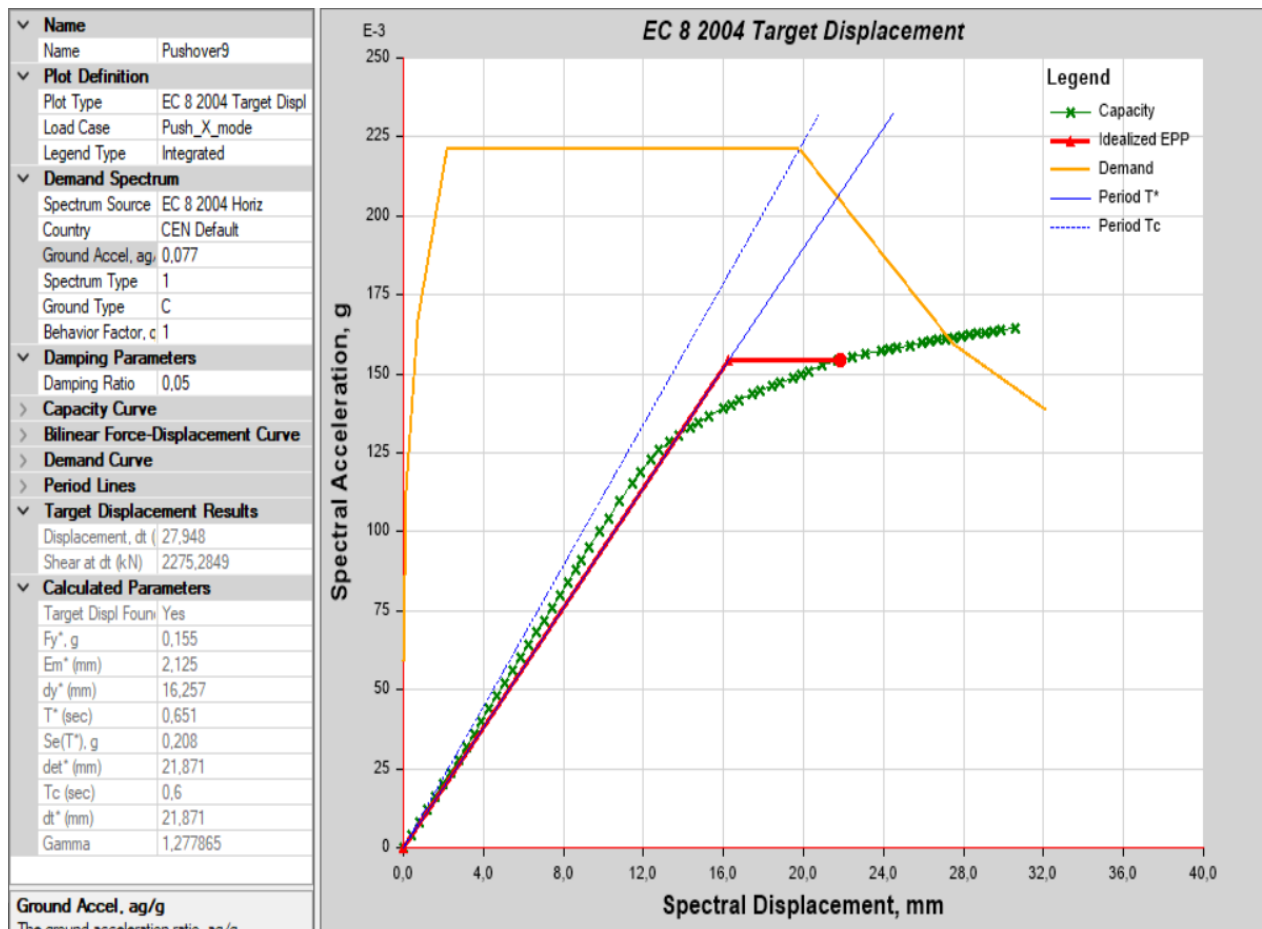
- Push\_X\_mode



Slika 36 Prikaz krivulje kapaciteta za opterećenje Push\_X\_mode sa pripadnim mehanizmom otkazivanja

Krivulja započinje rastom posmične sile s povećanjem pomaka, što ukazuje na elastično ponašanje konstrukcije. Zelenom bojom na krivulji označeno je granično stanje ograničenog oštećenja, plavom bojom granično stanje značajnog oštećenja, a crvenom granično stanje blizu rušenja. Na stepu 28, javlja se prva plastifikacija na vrhu kratkog stupa kraj najvišeg parapeta druge etaže. Kako pomaci nastavljaju rasti, krivulja postaje zakrivljena, što predstavlja ulazak u nelinearnu fazu ponašanja konstrukcije. U stepu 44 na istom tom stupu, postiže se granično stanje značajnog oštećenja. Konstrukcija se još malo deformira prije nego što dođe do otkazivanja elementa u stepu 48. Pri ovom opterećenju najviše otkazuju kratku stupovi na mjestima parapeta.

- IZO faktor

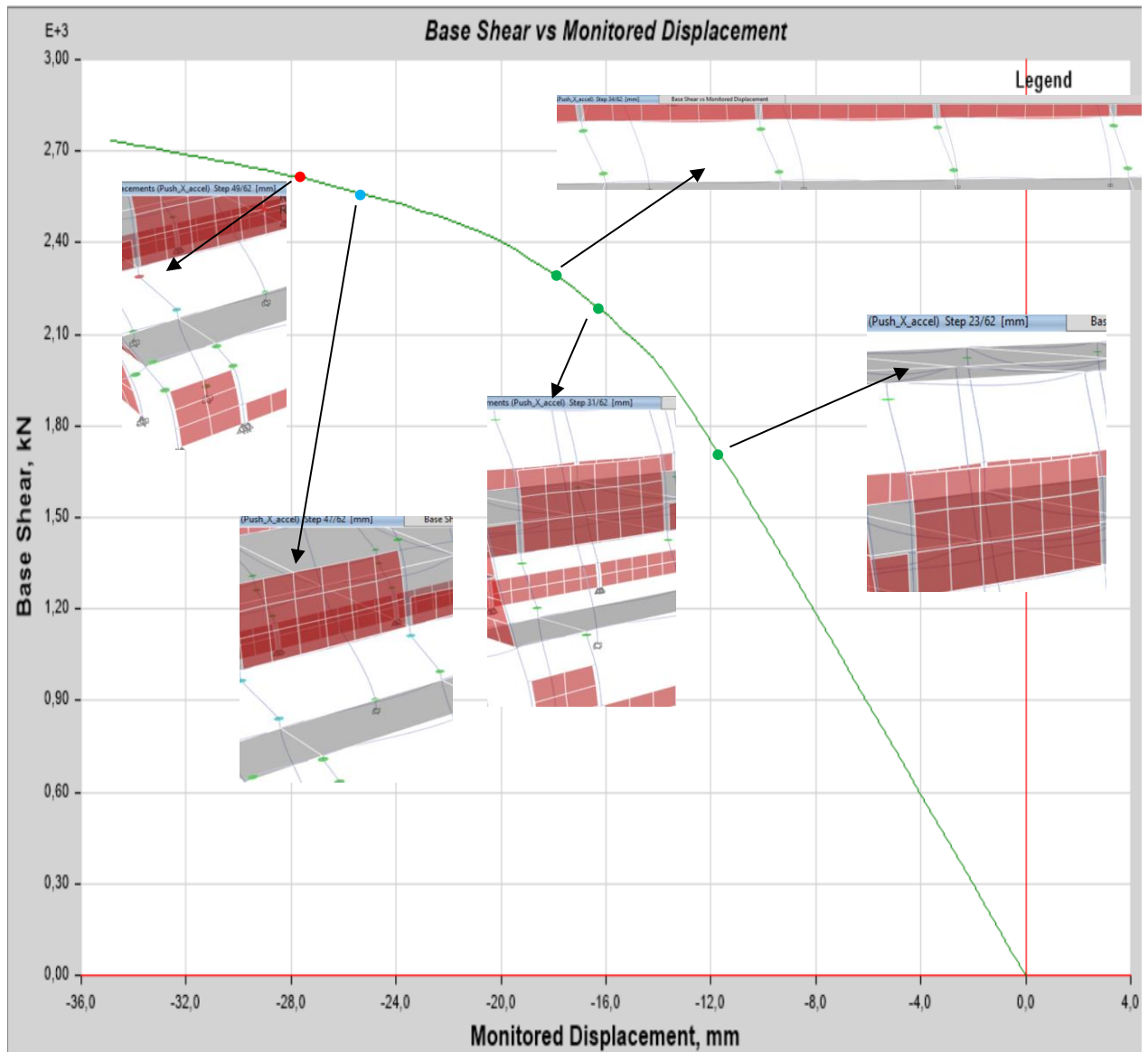


Slika 37 Prikaz pushover krivulje za opterećenje Push\_X\_mode

Na slici iznad prikazana je pushover krivulja za opterećenje Push\_X\_mode na kojoj je vidljiva potresna nosivost konstrukcije za vršno ubrzanje tla  $a_g = 0,07g$ . Nosivost je određena na temelju trenutka značajnog oštećenja kratkog stupa, što je u ovom slučaju bio step 44. Promatrana građevina ne zadovoljava kriterij potresne otpornosti usklađen sa važećim propisima.

Indeks znatnog oštećenja konstrukcije (IZO faktor) omogućuje inženjerima procjenu sigurnosti konstrukcije nakon potresa. On predstavlja omjer proračunske potresne otpornosti i zahtjeva za konstrukciju za granično stanje znatnog oštećenja. U ovom slučaju on iznosi 0,31.

- Push\_X\_accel

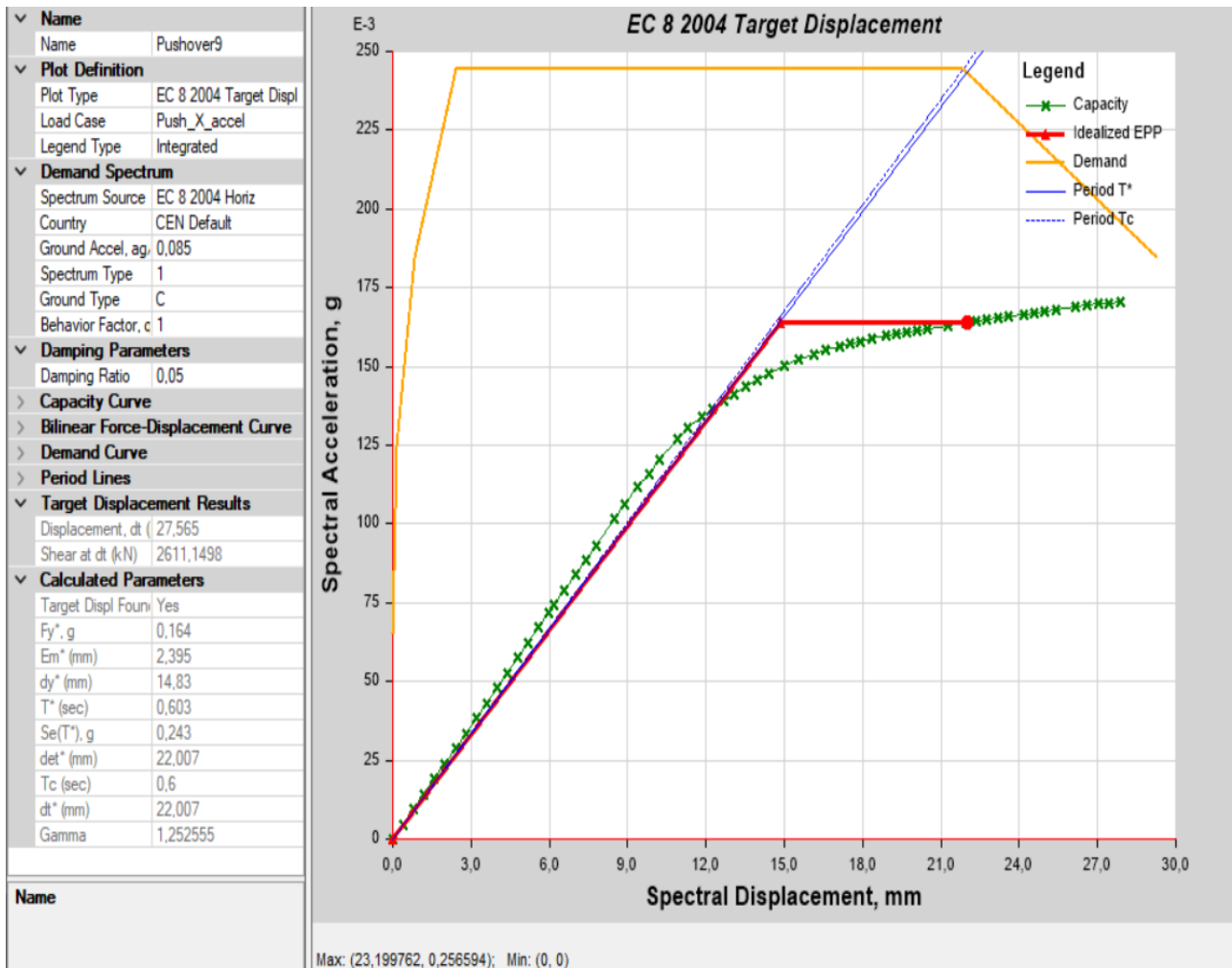


Slika 38 Prikaz krivulje kapaciteta za opterećenje Push\_X\_accel sa pripadnim mehanizmom otkazivanja

Za razliku od prethodnog slučaja opterećenja, na krivulji kapaciteta za opterećenje pomoću jednolikog ubrzanja tla, prva plastifikacija na kratkom stupu javlja se ranije, na Step 23, označeno zelenom bojom na krivulji. Malo kasnije, step 34, prikazuje plastifikaciju ostalih kratkih stupova prve etaže, gotovo u isto vrijeme. Ovi kratki stupovi nisu nastali zbog zidova između njih, nego zbog upola niže etaže hodnika koji se nalazi ispod njih. Na slici se vidi da su plastični zglobovi otvoreni na mjestima gdje su stupovi najizloženiji, što predstavlja kritičnu točku potencijalnog loma. Kako krivulja raste, pomaci se povećavaju, a rast posmične sile se smanjuje. Tada se javljaju prve plastične deformacije i postiže se granično stanje značajnog oštećenja što je vidljivo na slici za step 47, označeno plavom bojom na krivulji. Konstrukcija se još malo deformira prije nego što dođe do otkazivanja elementa u stepu 49.



- IZO faktor

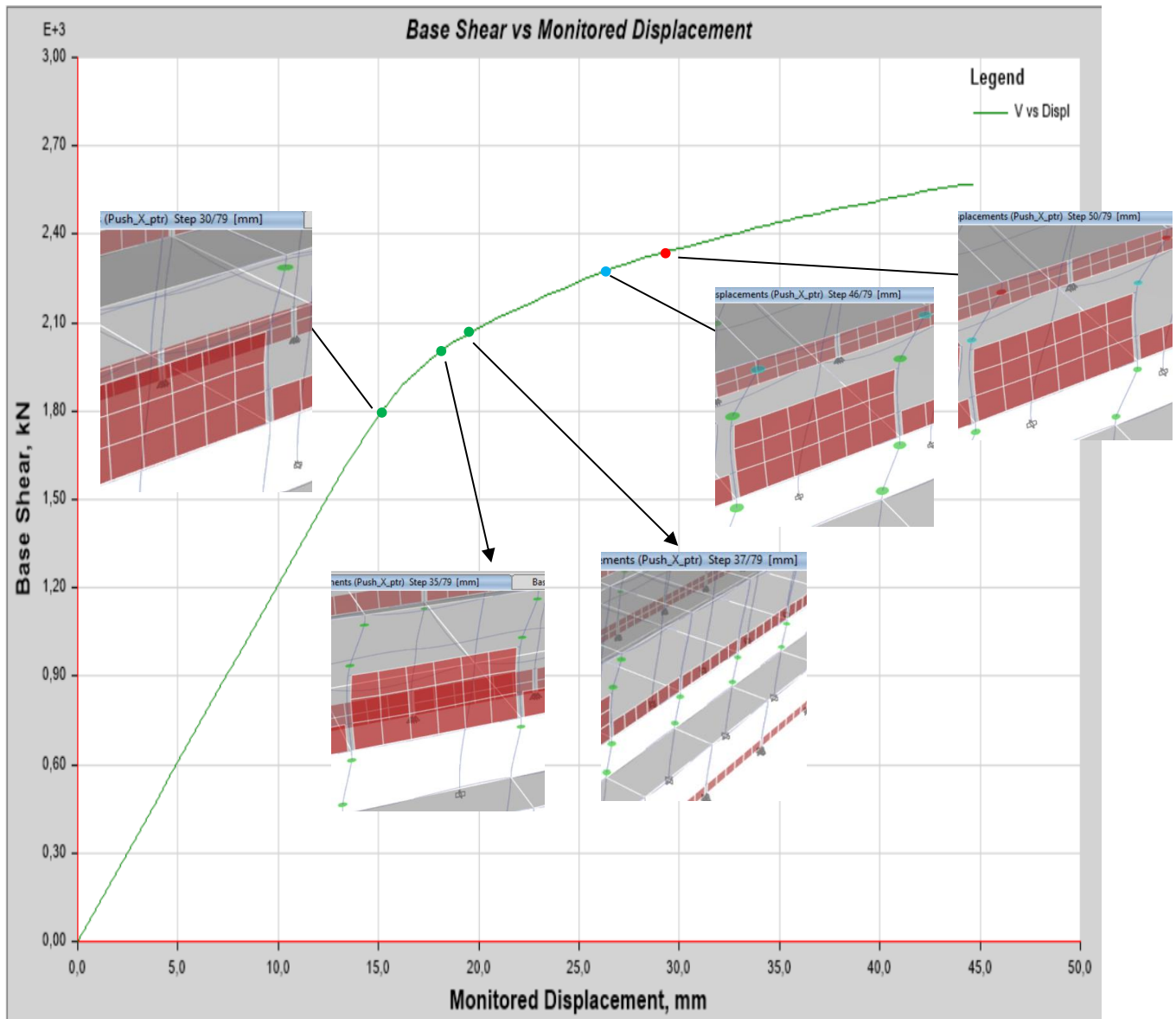


Slika 39 Prikaz pushover krivulje za opterećenje Push\_X\_accel

Na slici iznad prikazana je pushover krivulja za opterećenje Push\_X\_accel na kojoj je vidljiva malo veća potresna nosivost konstrukcije za vršno ubrzanje tla  $a_g = 0,085g$ . Nosivost je određena na temelju trenutka značajnog oštećenja prvog kratkog stupa, što je u ovom slučaju bio step 47. Promatrana građevina ne zadovoljava kriterij potresne otpornosti usklađen sa važećim propisima.

U ovom slučaju IZO faktor iznosi 0,34.

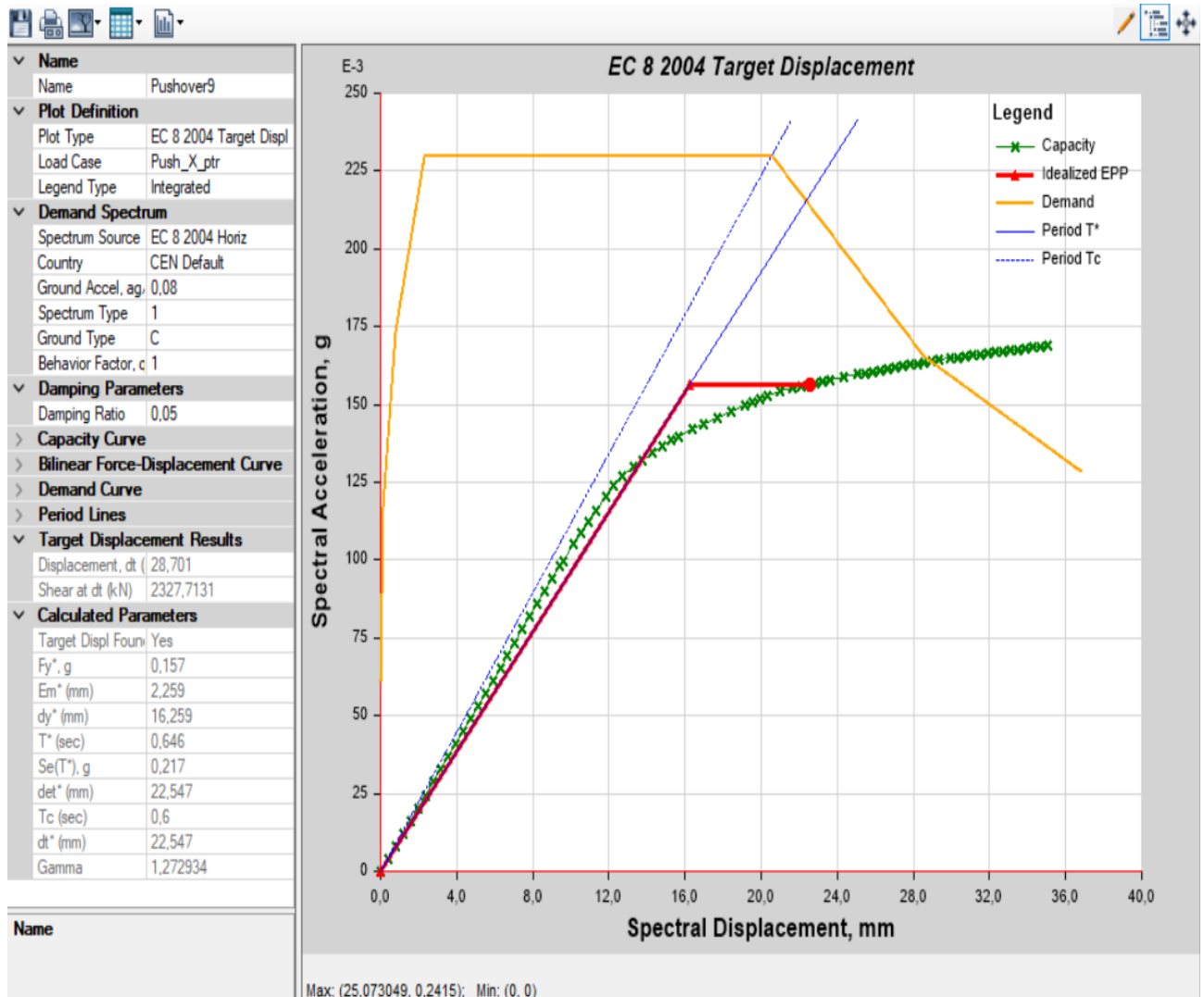
- Push\_X\_ptr



Slika 40 Prikaz krivulje kapaciteta za opterećenje Push\_X\_ptr sa pripadnim mehanizmom otkazivanja

Kao i kod prethodna dva opterećenja, krivulja kapaciteta ima fazu elastičnog ponašanja konstrukcije te fazu nelinearnog ponašanja, odnosno fazu bržeg rasta deformacija od posmične sile. Prva plastifikacija na vrhu kratkog stupa javlja se na stepu 30, a na dnu supa je vidljiva na stepu 35. To granično stanje ograničenog oštećenja označeno je zelenom bojom, dok je granično stanje značajnog oštećenja označeno plavom bojom na krivulji. Malo nakon počinju otkazivati i ostali kratki stupovi. Prve plastične deformacije i granično stanje značajnog oštećenja uočeno je na vrhu istog kratkog stupa na stepu 46, dok do otkazivanja na istom tom mjestu dolazi na koraku 50.

- IZO faktor



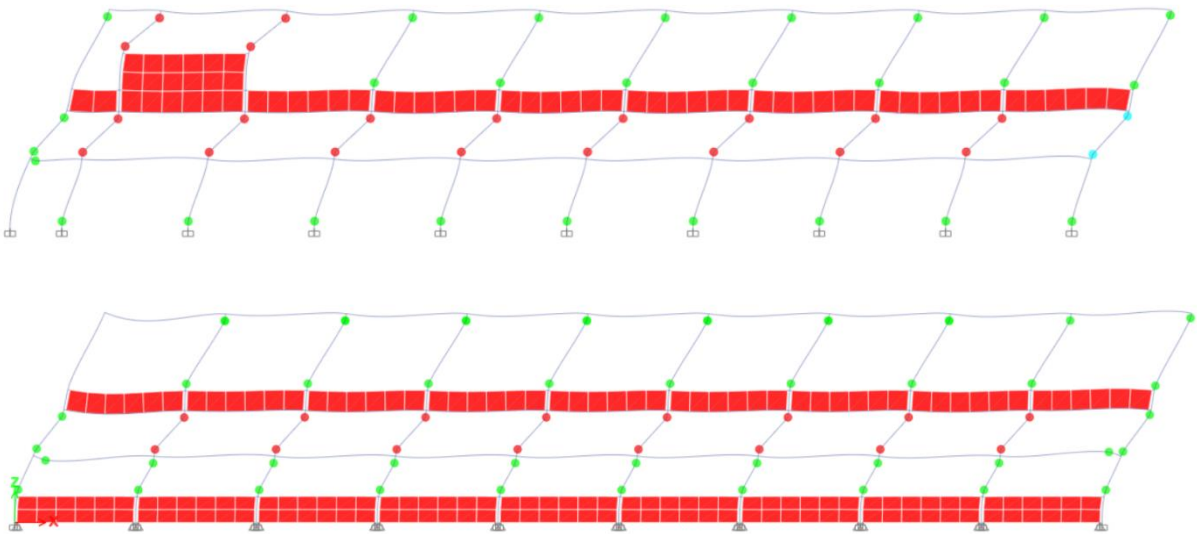
Slika 41 Prikaz pushover krivulje za opterećenje Push\_X\_ptr

Na slici iznad prikazana je pushover krivulja za opterećenje Push\_X\_ptr na kojoj je vidljiva potresna nosivost konstrukcije za vršno ubrzanje tla  $a_g = 0,08g$ . Nosivost je određena na temelju trenutka značajnog oštećenja prvog kratkog stupa, što je u ovom slučaju bio step 46. Promatrana građevina ne zadovoljava kriterij potresne otpornosti usklađen sa važećim propisima.

IZO faktor u ovom slučaju iznosi 0,32.

### 6.3.1.1. Problem kratkog stupa

Problem kratkog stupa javlja se kod armiranobetonskih okvira u slučajevima kada je duljina stupa smanjena zbog arhitektonskih ili strukturnih elemenata kao što su parapetni zidovi, ukrućenja ili promjene u visini etaža. Na slici se vidi sustav okvirnih elemenata koji prikazuje kratke stupove na promatranjoj konstrukciji. Vidljivo je da se između stupova nalaze niski zidovi koji uzrokuju efekt kratkih stupova. Ove pregrade smanjuju visinu stupova, što dovodi do neravnomjerne raspodjele sila duž visine konstrukcije.



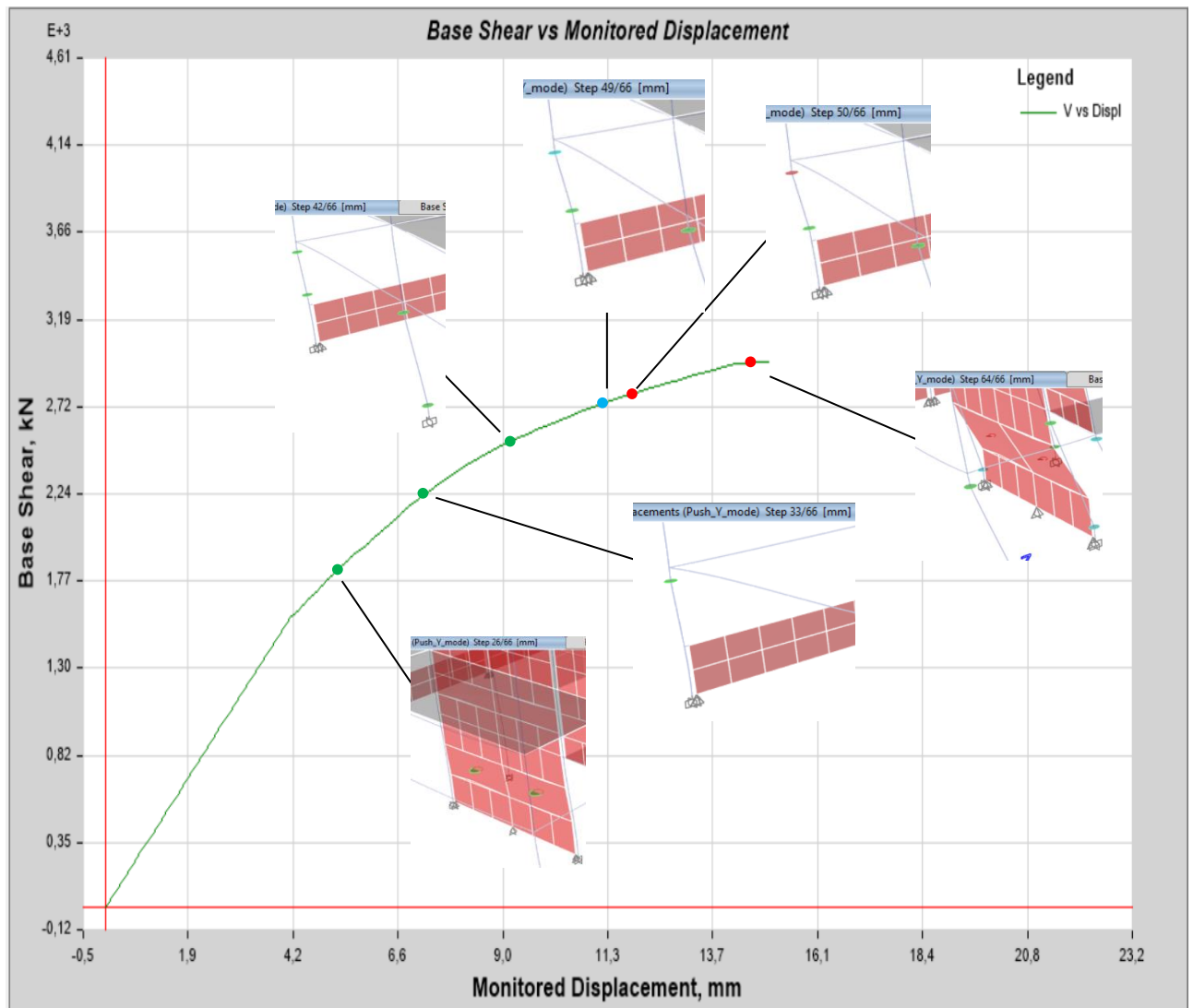
Slika 42 Stanje blizu rušenja kod kratkih stupova na konstrukciji

Pri seizmičkim opterećenjima, krutost tih stupova uzrokuje koncentraciju sila, što dovodi do otvaranja plastičnih zglobova na krajevima stupa. Na slici se vidi da su plastični zglobovi otvoreni na mjestima gdje su stupovi najizloženiji. Slom kratkih stupova uzrokovan je posmičnim naprezanjem, dok kod običnih stupova do popuštanja dolazi zbog savijanja ili izvijanja. Kratki stupovi obično trpe veće posmične sile u usporedbi s normalnim stupovima, što može uzrokovati krhke lomove [12]. Zbog ograničene visine, deformacije su koncentrirane na manjem području, čime se povećava rizik od posmičnog sloma.

Kod kratkih stupova, plastični zglobovi se često formiraju blizu spojeva s gredama, jer kruti stupovi ne mogu ravnomjerno rasporediti deformacije po svojoj visini. Formiranje plastičnih zglobova na kratkim stupovima može značajno umanjiti nosivost konstrukcije, jer ti zglobovi signaliziraju lokalno popuštanje materijala. Ako dođe do kaskadnog otvaranja plastičnih zglobova u kratkim stupovima, konstrukcija gubi mogućnost sigurne raspodjele sila, što može dovesti do kolapsa tijekom jakih seizmičkih opterećenja, a upravo do takvog načina otkazivanja stupova dolazi u promatranjoj konstrukciji [12].

## 6.3.2. Y smjer

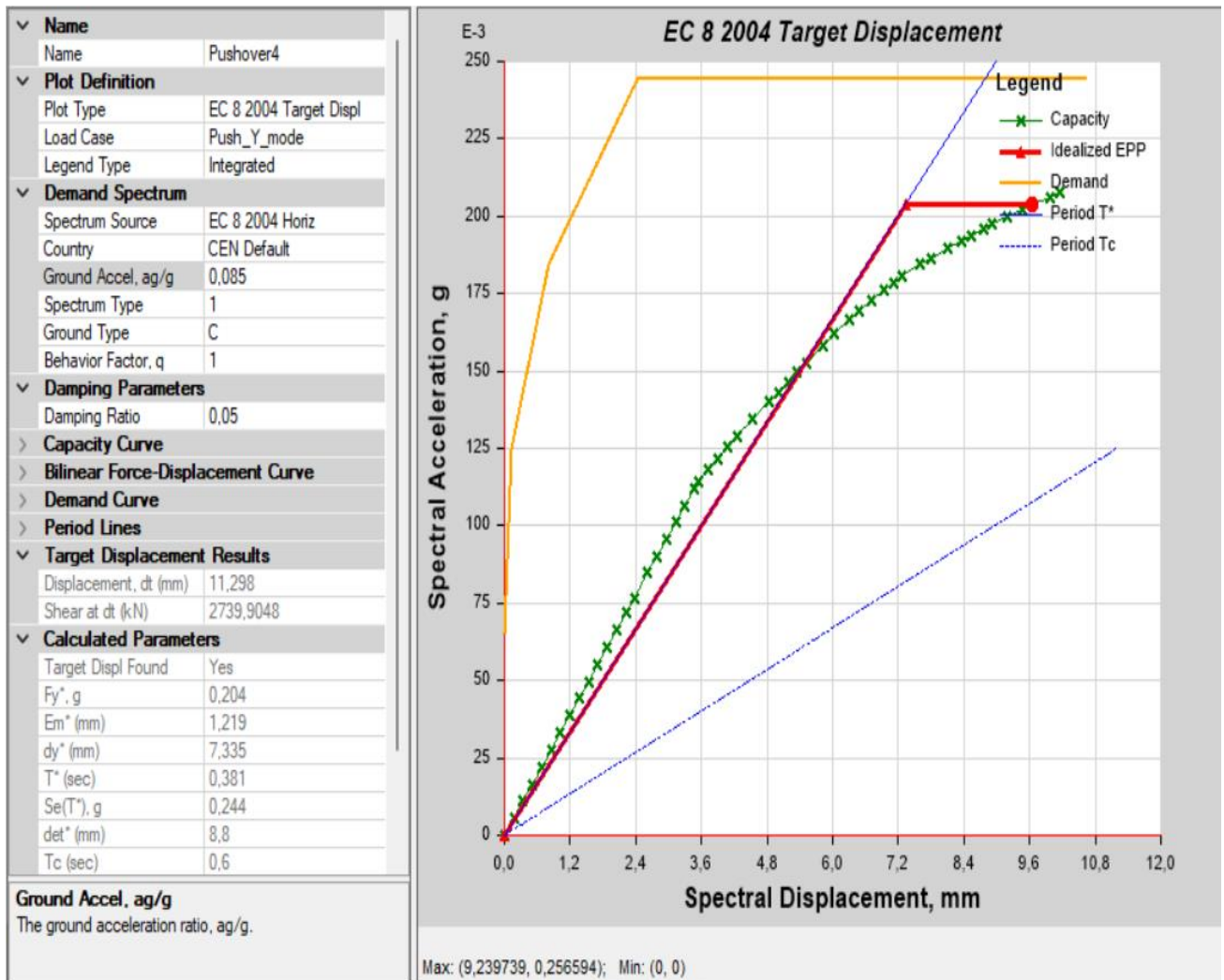
- Push\_Y\_mode



Slika 43 Prikaz krivulje kapaciteta za opterećenje Push\_Y\_mode sa pripadnim mehanizmom otkazivanja

Na krivulji kapaciteta zelenom bojom označeno je granično stanje ograničenog oštećenja, plavom bojom granično stanje značajnog oštećenja te crvenom bojom je granično stanje blizu rušenja. Krivulja kapaciteta za opterećenje Push\_Y\_mode počinje rastom sile uz pomak, što ukazuje na elastično ponašanje konstrukcije. Najprije se plastične deformacije javljaju u pregradnom zidu kraj stubišta, u stepu 26, a zatim i na stupu na samom rubu zgrade. Taj isti stup i prvi postiže granično stanje značajnog oštećenja u stepu 49. Uočljivo je da i u y smjeru javlja problem kratkih stupova kakav je bio i pri opterećenjima u x smjeru.

- IZO faktor

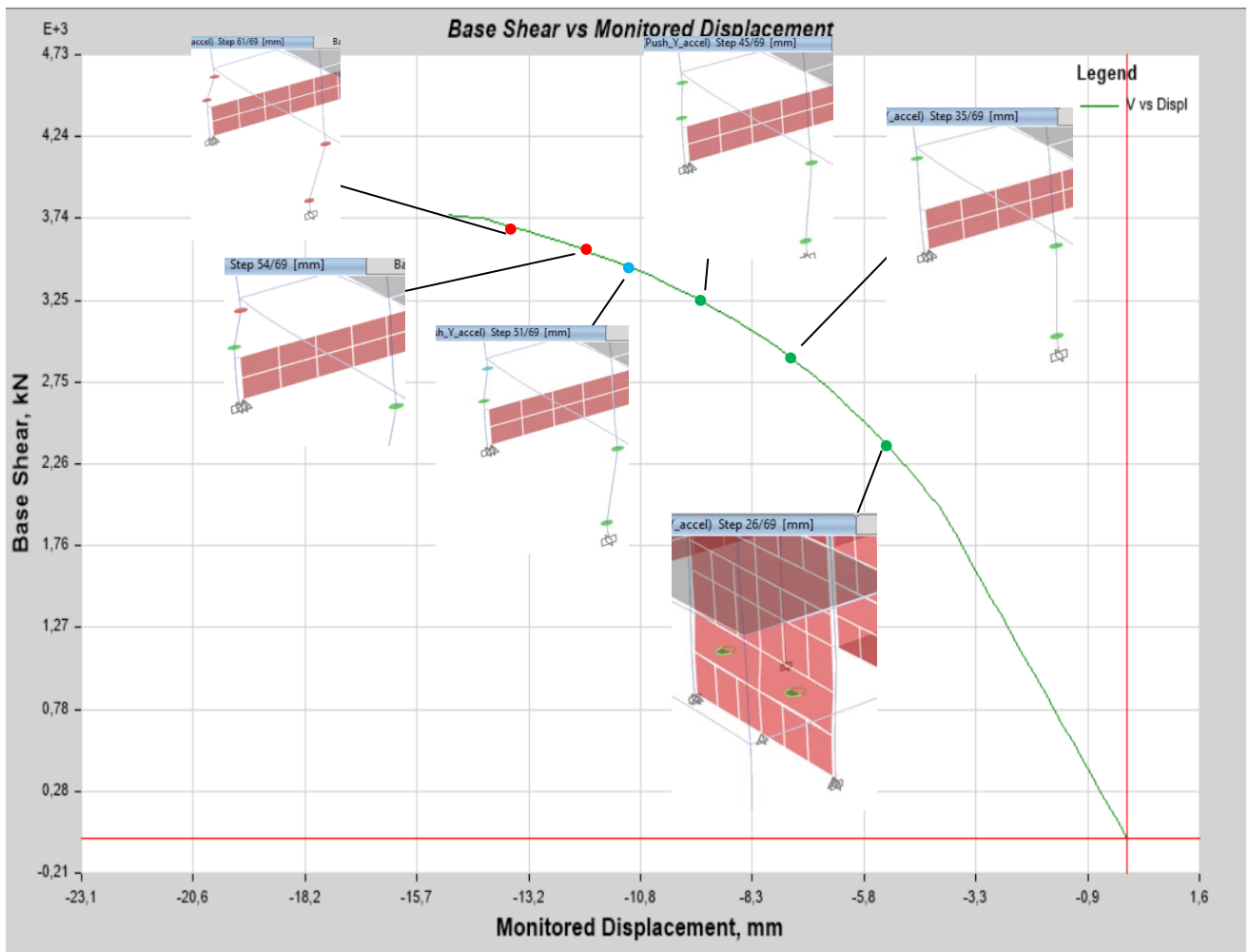


Slika 44 Prikaz pushover krivulje za opterećenje Push\_Y\_mode

Na slici iznad prikazana je pushover krivulja za opterećenje Push\_Y\_mode na kojoj je vidljiva otpornost konstrukcije na potres za vršno ubrzanje tla od 0,085g. Nosivost je određena na temelju trenutka značajnog oštećenja prvog kratkog stupa, što je u ovom slučaju bio step 49. Promatrana građevina ne zadovoljava kriterij potresne otpornosti usklađen sa važećim propisima.

U ovom slučaju indeks znatnog oštećenja konstrukcije iznosi 0,34.

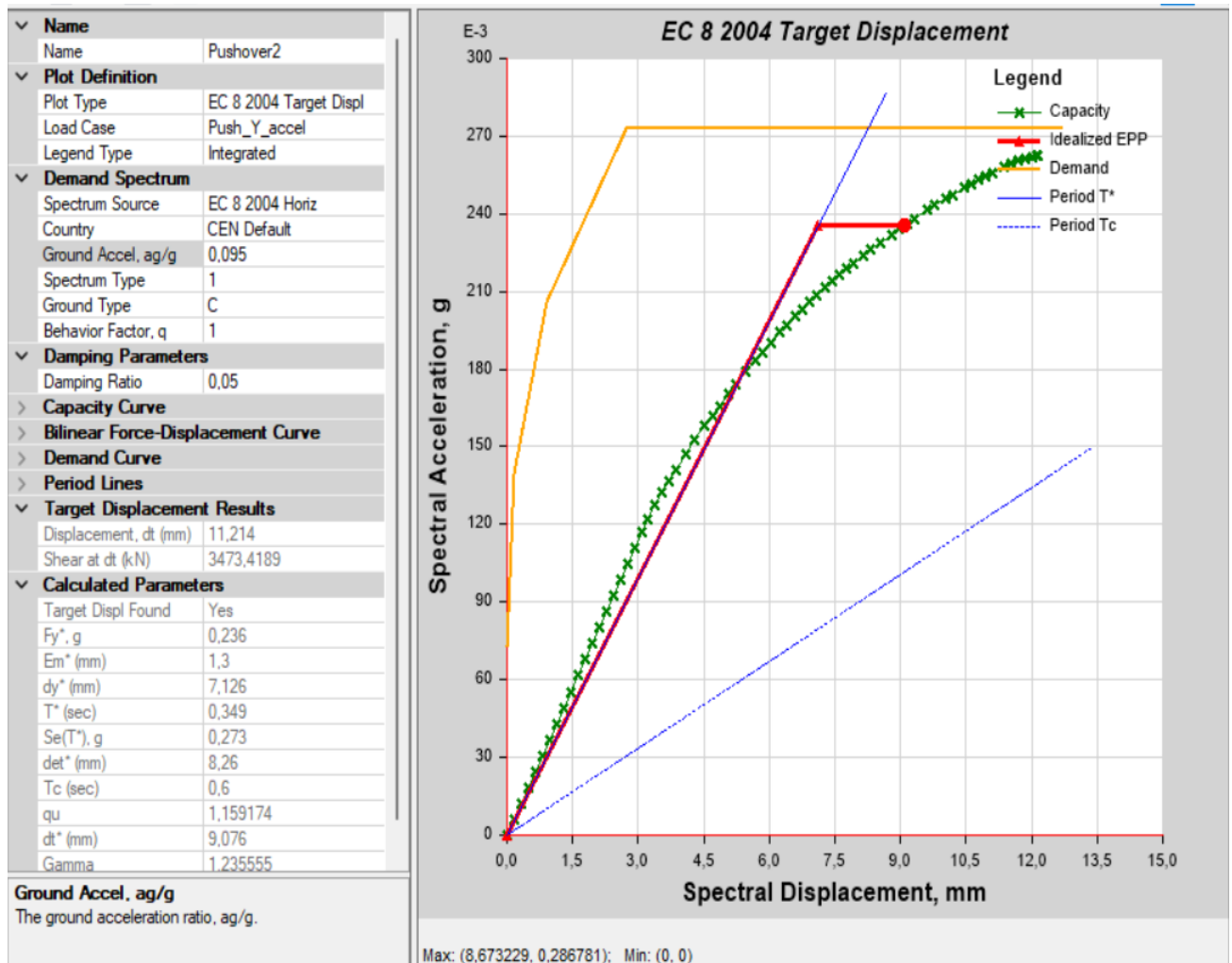
- Push\_Y\_accel



Slika 45 Prikaz krivulje kapaciteta za opterećenje Push\_Y\_accel sa pripadnim mehanizmom otkazivanja

Za slučaj opterećenja jednolikim ubrzanjem tla, dobivena je krivulja kapaciteta jako sličnog oblika kao i ona dobivena pomoću modalne raspodjele sila. Prema ovoj analizi također najprije dolazi do graničnog stanja ograničenog oštećenja u pregradnom zidu, step 26 (označeno zelenom bojom na krivulji), a zatim i u stupu na rubu zgrade. Točka u kojoj se doseže granično stanje značajnog oštećenja na stupu nalazi se na stepu 51 (označeno plavom bojom na krivulji), a malo nakon toga i stup do njega postiže stanje značajnog oštećenja. Stanje blizu rušenja događa se u stepu 54, također na kratkom stupu.

- IZO faktor



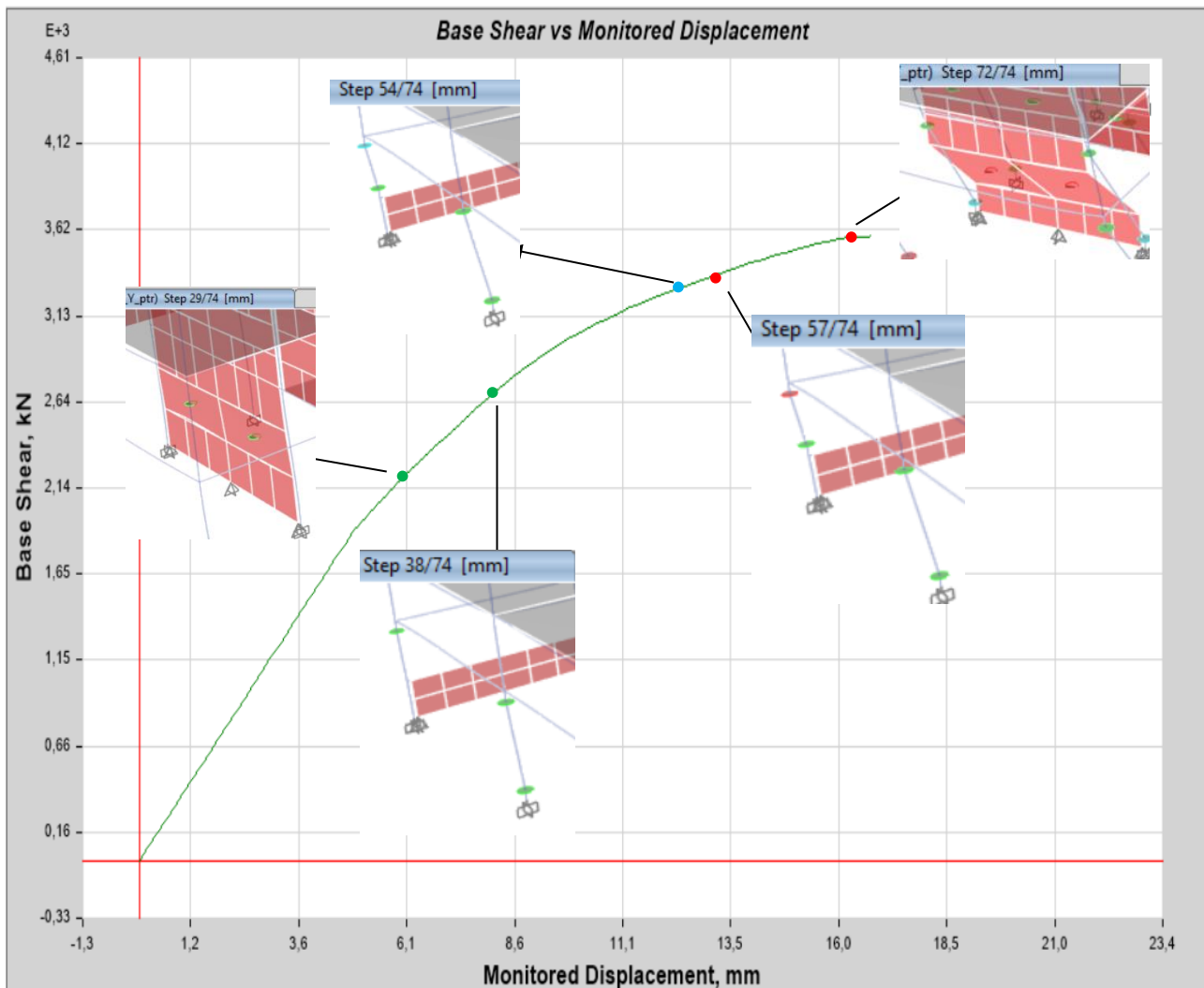
Slika 46 Prikaz pushover krivulje za opterećenje Push\_Y\_accel

Na slici iznad prikazana je pushover krivulja za opterećenje Push\_Y\_accel na kojoj je vidljiva potresna nosivost konstrukcije za vršno ubrzanje tla  $a_g = 0,095g$ . Nosivost je određena na temelju trenutka značajnog oštećenja prvog kratkog stupa, što je u ovom slučaju bio Step 51. Promatrana građevina ne zadovoljava kriterij potresne otpornosti usklađen sa važećim propisima.

U ovom slučaju indeks znatnog oštećenja konstrukcije iznosi 0,38.



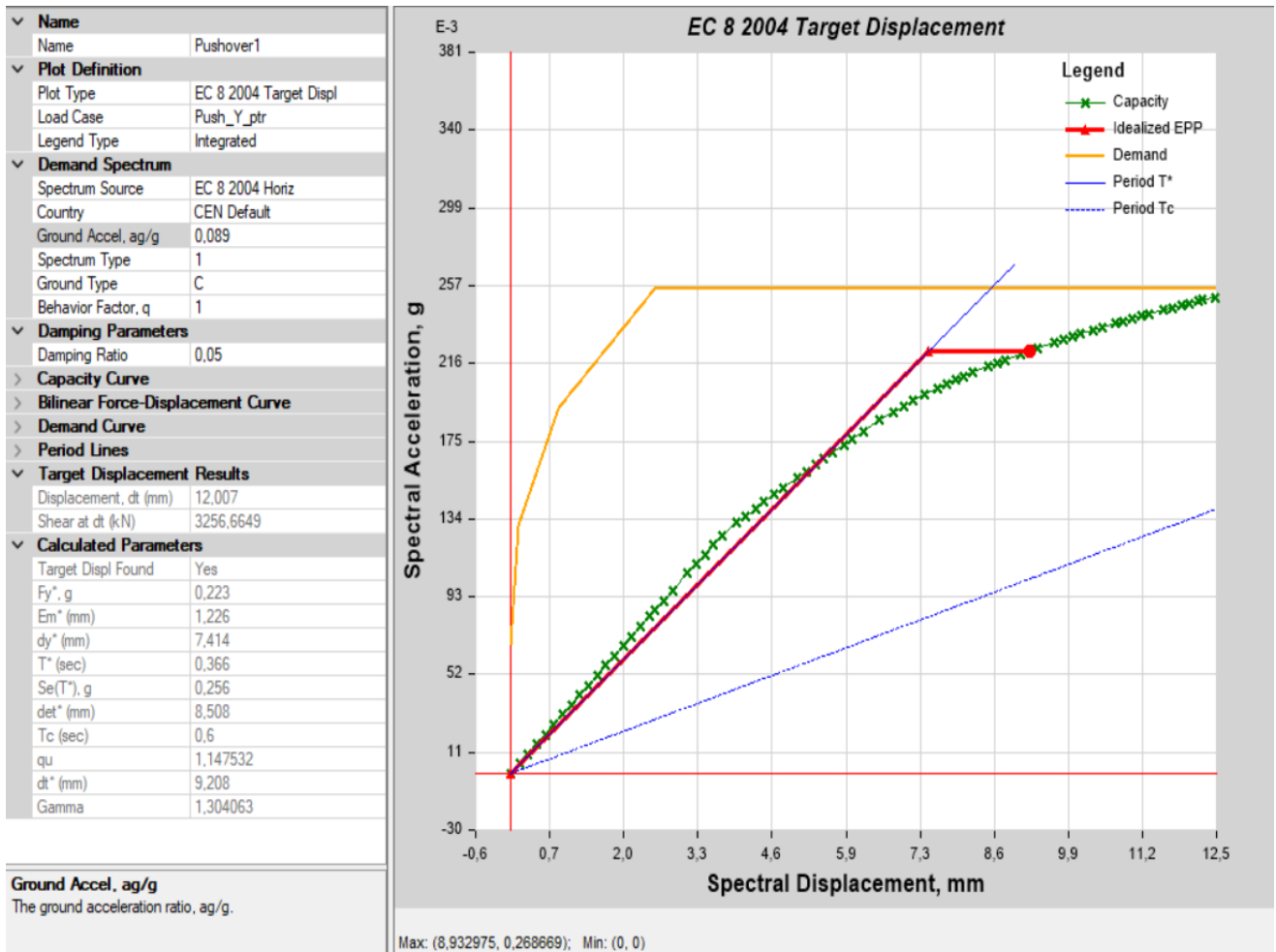
- Push\_Y\_ptr



Slika 47 Prikaz krivulje kapaciteta za opterećenje Push\_Y\_ptr sa pripadnim mehanizmom otkazivanja

Kao i kod prve dvije analize, i u analizi pomoću statičke raspodjele potresnih sila, postoji postupno povećanje posmične sile i pomaka. Element koji prvi postiže granično stanje značajnog oštećenja jest kratki stup na rubu konstrukcije u stepu 54, što je označeno plavom bojom na krivulji. Malo nakon njega otkazuje i stup do, koji nije kratki stup. Pregradni zid je prvi element koji postiže plastične deformacije, odnosno stanje ograničenog oštećenja (označeno zelenom bojom na krivulji), na stepu 26, ali posljednji otkazuje. Znatna oštećenja primjetna su samo na lijevom rubu i polovici zgrade, te na nekolicini kratkih stupova prve etaže.

- IZO faktor



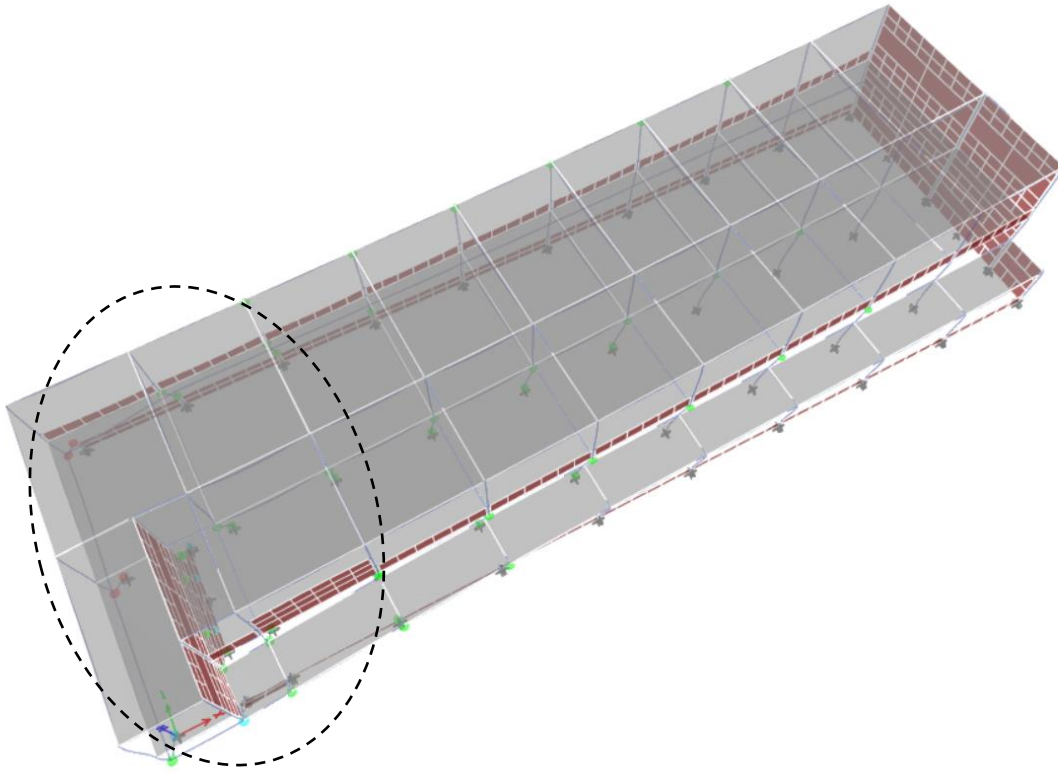
Slika 48 Prikaz pushover krivulje za opterećenje Push\_Y\_ptr

Na slici iznad prikazana je pushover krivulja za opterećenje Push\_Y\_ptr na kojoj je vidljiva potresna nosivost konstrukcije za vršno ubrzanje tla  $a_g = 0,089g$ . Nosivost je određena na temelju trenutka značajnog oštećenja prvog kratkog stupa, što je u ovom slučaju bio step 54. Promatrana građevina ne zadovoljava kriterij potresne otpornosti usklađen sa važećim propisima.

U ovom slučaju indeks znatnog oštećenja konstrukcije iznosi 0,36.

### 6.3.2.1. Torzija

Dominantan problem u ovom slučaju pri opterećenjima u y smjeru jest torzija. Na slici niže jasno je prikazano torzijsko stanje konstrukcije pri takvim opterećenjima. Najveća oštećenja na konstrukciji primjetna su na lijevom rubu zgrade (označeno crnom bojom na slici), što je rezultat djelovanja torzije.



Slika 49 Torzija pri opterećenju u y smjeru

Torzijska opterećenja uzrokovana su neravnomjernom raspodjelom krutosti i masa unutar zgrade, zbog čega se zgrada uvija pod djelovanjem horizontalnih sila. Na lijevoj strani zgrade nema krutih zona, poput zidova koji se nalaze na desnom rubu, koje bi mogle apsorbirati ili preusmjeriti dio sile. Zbog toga lijevi rub postaje kritična točka s najvećim deformacijama, što dovodi do otvaranja plastičnih zglobova i većeg rizika od oštećenja ili loma stupova.

## 7. ZAKLJUČAK

Glavni cilj ovog rada bio je provesti proračun postojeće armiranobetonske konstrukcije koristeći metodu postupnog guranja te istražiti utjecaj seizmičkih opterećenja na ponašanje armiranobetonskih konstrukcija s problemom kratkih stupova. Model i proračun rađeni su u računalnom programu ETABS. Ovom nelinearnom statičkom analizom dobivene su krivulje kapaciteta konstrukcije koje predstavljaju odnos između pomaka kontrolne točke na zadnjoj etaži blizu centra mase, i sile na dnu zgrade.

Na temelju dobivenih krivulja kapaciteta za x smjer da se zaključiti kako veliki problem stvaraju kratki stupovi koji se javljaju na mjestima parapetnih zidova, ukrućenja i promjena u visini katova. Glavni problem kratkih stupova jest nemogućnost ravnomjerne raspodjele sila po svojoj visini. Zbog njihove krutosti dolazi do većih koncentracija sila, zbog čega se na krajevima stupova otvaraju plastični zglobovi. Najmanja vrijednost IZO faktora dobivena je pri slučaju opterećenja Push\_X\_mode i iznosi 0,31 uz potresnu otpornost konstrukcije koja odgovara vršnom ubrzanju tla  $a_g=0,077g$ , što znači da promatrana građevina ne zadovoljava kriterij potresne otpornosti usklađen sa važećim propisima kao što je i pretpostavljeno u uvodnom dijelu rada.

Dominantan problem pri opterećenjima u y smjeru jest torzija. S obzirom na to da na lijevoj strani zgrade nema krutih zona poput onih na desnoj strani, lijevi rub postiže najveće deformacije što dovodi do otvaranja plastičnih zglobova i većeg rizika od sloma stupova i ziđa. Najveća oštećenja na konstrukciji primijećena su na zapadnom rubu zgrade. Kao i pri slučaju opterećenja u x smjeru, tako i pri opterećenjima u ovom smjeru najprije otkazuju kratki stupovi. Najmanja vrijednost IZO faktora dobivena je pri slučaju opterećenja Push\_Y\_mode i iznosi 0,34 uz potresnu otpornost konstrukcije koja odgovara vršnom ubrzanju tla  $a_g=0,085g$ , iz čega se da zaključiti kako promatrana građevina ne zadovoljava kriterij potresne otpornosti u skladu sa propisima.

Rezultati ove analize potvrđuju važnost posebnog tretmana kratkih stupova u seizmičkom proračunu. Seizmički proračun bi trebao predvidjeti ove probleme kako bi se izbjegli lokalni slomovi, koji mogu uzrokovati lančano otkazivanje u konstrukciji. Stoga je važno, kod projektiranja, posebnu pažnju posvetiti pravilnom dimenzioniranju i ojačanju kratkih stupova kako bi se spriječili ovakvi problemi, posebno u područjima s visokim seizmičkim rizikom.

**LITERATURA**

- [1] „EN 1998-1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings“, 2004.
- [2] S. Mitrović, M. Čaušević, „Nelinearni statički seizmički proračuni konstrukcija“, Građevinar 61, 2009. (6), str. 521-531
- [3] M. Stepinac, F. Borak, I. Šušteršič, I. Gavrić „Metode proračuna potresne otpornosti – energetske metode“ , Polytechnic & Design, Vol. 8, No. 1, 2020., str. 15-28
- [4] D. Lazarević, M. Šavor Novak, i M. Uroš, „DINAMIKA KONSTRUKCIJA s uvodom u potresno inženjerstvo“
- [5] S. Mitrović, „Primjena nelinearnog statičkog proračuna u seizmičkoj analizi postojećih konstrukcija“. Pristupljeno: 10. srpnja 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.hcpi.hr/sites/default/files/inline-files/SM1%20-%20Ciklus%20predavanja%20-%20Zagrebu%20od%20Rijeke.pdf>
- [6] N. Majidi, H. T. Riahi, S. M. Zandi, i I. Hajirasouliha, „Development of practical downsampling methods for nonlinear time history analysis of complex structures“, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, sv. 175, str. 108247, pros. 2023, doi: 10.1016/j.soildyn.2023.108247.
- [7] N. Obradović, P. Mitković, S. Radovanović, „Nelinearna statička metoda postupnog guranja – pushover analiza AB okvira sa zidanom ispunom“, n Zbornik radova Međunarodnog simpozijuma o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija, Vršac, 2017., str. 245-254
- [8] M. A. Khan, „Seismic Design for Buildings“, u Earthquake-Resistant Structures, Elsevier, 2013, str. 283–315. doi: 10.1016/B978-1-85617-501-2.00010-9
- [9] M. Stepinac i T. Kišiček, „Metode proračuna potresnog djelovanja“
- [10] M. Rak, N. Bjelajac, „Otkrivanje oštećenja konstrukcija mjerenjem dinamičkih karakteristika“, Građevinar 53, 2001. (10), str. Str. 631-639
- [11] M. Uroš, J. Atalić, M. Šavor Novak, M. Demšić i M. Baniček, „Proračun postojećih konstrukcija u seizmički aktivnim područjima“, Pristupljeno: 01.09.2024. [Na internetu]. Dostupno na : [https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/8046420/mod\\_resource/content/1/PPK%201\\_vjezbe\\_linear\\_sustav.pdf](https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/8046420/mod_resource/content/1/PPK%201_vjezbe_linear_sustav.pdf)
- [12] I. Tomičić, „Proračun i konstruiranje kratkih armiranobetonskih stupova“, Građevinar 62, 2010. (8), str. 717 - 722

## POPIS SLIKA

<i>Slika 1. Raspored bočnih sila po visini konstrukcije</i> .....	2
<i>Slika 2. Kriterij za pravilnost zgrade s nepravilnostima po visini</i> .....	2
<i>Slika 3 Model konstrukcije i okolnog tla (lijevo) i neelastični sustav (desno) [4]</i> .....	3
<i>Slika 4 Krivulja kapaciteta SDOF I MDOF [9]</i> .....	5
<i>Slika 5 Definiranje graničnih stanja</i> .....	6
<i>Slika 6 Položaj građevine u prostoru</i> .....	7
<i>Slika 7 Sjeverna zgrada FSB-a (arhivska dokumentacija)</i> .....	8
<i>Slika 8 Sjeverna zgrada FSB-a – shema dilatacija (preuzeto iz projekta Capital ing.)</i> .....	9
<i>Slika 9 Prikaz dilatacije B2 u stanju obnove</i> .....	10
<i>Slika 10 Tlocrt niskog i visokog prizemlja te prvog kata dilatacije B2</i> .....	11
<i>Slika 11 Prikaz južnog i sjevernog pročelja Dilatacije B2</i> .....	12
<i>Slika 12 Prikaz stropnih rebara (iz arhivske dokumentacije)</i> .....	12
<i>Slika 13 Statički proračun grede okvira (iz arhivske dokumentacije)</i> .....	13
<i>Slika 14 Prikaz proračuna i dimenzioniranja stupova po presjecima (iz arhivske dokumentacije)</i> .....	14
<i>Slika 15 Prikaz proračuna i dimenzioniranja stupova i temelja po presjecima (iz arhivske dokumentacije)</i> .....	15
<i>Slika 17 Usporedba ugrađene armature i armature iz statičkog proračuna u gredi (izvor: projekt Capital ing.)</i> .....	16
<i>Slika 18 Usporedba ugrađene armature i armature iz statičkog proračuna u ovalnim stupu (izvor: projekt Capital ing.)</i> .....	17
<i>Slika 19 Ubrzanja tla za mjerodavne povratne periode</i> .....	20
<i>Slika 20 Prikaz pozicija AB elemenata</i> .....	22
<i>Slika 21 Zadani projektni spektar</i> .....	23
<i>Slika 22 Prikaz perioda i frekvencija</i> .....	24
<i>Slika 23 Prvi oblik titranja</i> .....	24
<i>Slika 24 Drugi oblik titranja</i> .....	25
<i>Slika 25 Treći oblik titranja</i> .....	25
<i>Slika 26 Tablični prikaz aktivirane mase</i> .....	26
<i>Slika 27 Ukupne reakcije</i> .....	27
<i>Slika 28 Prikaz poprečne sile po etažama konstrukcije</i> .....	27
<i>Slika 29 Prikaz maksimalnih pomaka u razini etaža</i> .....	28
<i>Slika 30 Prikaz definicije plastičnog zgloba i značenje oznaka u tablici</i> .....	29
<i>Slika 31 Podaci za definiranje krivulja kapaciteta grede (gore) i stupova (dolje)</i> .....	30
<i>Slika 32 Shema rasporeda plastičnih zglobova u modelu</i> .....	33
<i>Slika 33 Prikaz definicije plastičnog zgloba za ispunsko ziđe</i> .....	33
<i>Slika 34 Početno stanje sustava u nelinearnoj analizi</i> .....	34

<i>Slika 35 Nelinearni slučajevi opterećenja .....</i>	<i>35</i>
<i>Slika 36 Kontrolna točka – čvor 18 na zadnjoj etaži .....</i>	<i>35</i>
<i>Slika 37 Prikaz krivulje kapaciteta za opterećenje Push_X_mode sa pripadnim mehanizmom otkazivanja .....</i>	<i>36</i>
<i>Slika 38 Prikaz pushover krivulje za opterećenje Push_X_mode .....</i>	<i>37</i>
<i>Slika 39 Prikaz krivulje kapaciteta za opterećenje Push_X_accel sa pripadnim mehanizmom otkazivanja .....</i>	<i>38</i>
<i>Slika 40 Prikaz pushover krivulje za opterećenje Push_X_accel .....</i>	<i>39</i>
<i>Slika 41 Prikaz krivulje kapaciteta za opterećenje Push_X_accel sa pripadnim mehanizmom otkazivanja .....</i>	<i>40</i>
<i>Slika 42 Prikaz pushover krivulje za opterećenje Push_X_ptr.....</i>	<i>41</i>
<i>Slika 43 Stanje blizu rušenja kod kratkih stupova na konstrukciji .....</i>	<i>42</i>
<i>Slika 44 Prikaz krivulje kapaciteta za opterećenje Push_Y_mode sa pripadnim mehanizmom otkazivanja .....</i>	<i>43</i>
<i>Slika 45 Prikaz pushover krivulje za opterećenje Push_Y_mode .....</i>	<i>44</i>
<i>Slika 46 Prikaz krivulje kapaciteta za opterećenje Push_Y_accel sa pripadnim mehanizmom otkazivanja .....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 47 Prikaz pushover krivulje za opterećenje Push_Y_accel .....</i>	<i>46</i>
<i>Slika 48 Prikaz krivulje kapaciteta za opterećenje Push_Y_accel sa pripadnim mehanizmom otkazivanja .....</i>	<i>47</i>
<i>Slika 49 Prikaz pushover krivulje za opterećenje Push_Y_ptr.....</i>	<i>48</i>
<i>Slika 50 Torzija pri opterećenju u y smjeru .....</i>	<i>49</i>

## POPIS TABLICA

<i>Tablica 1 Rezultati ispitivanja kvalitete betona ugrađenog u stupove i grede (sklerometrom)</i>	17
<i>Tablica 2 Razine oštećenja utvrđivanih brzim pregledima .....</i>	18
<i>Tablica 3 Razredi važnosti građevina .....</i>	19
<i>Tablica 5 Podaci o AB konstruktivnim elementima.....</i>	21
<i>Tablica 6 Vrijednosti za definiranje krivulja kapaciteta elemenata prizemlja.....</i>	32
<i>Tablica 7 Vrijednosti za definiranje krivulja kapaciteta elemenata prve etaže.....</i>	32
<i>Tablica 8 Vrijednosti za definiranje krivulja kapaciteta elemenata druge etaže.....</i>	33