

Procjena stanja postojeće armiranobetonske okvirne konstrukcije

Gunjača, Anđela

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:237:810444>

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

Anđela Gunjača

**PROCJENA STANJA POSTOJEĆE
ARMIRANOBETONSKE OKVIRNE
KONSTRUKCIJE**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Anđela Gunjača

**PROCJENA STANJA POSTOJEĆE
ARMIRANOBETONSKE OKVIRNE
KONSTRUKCIJE**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Mario Uroš

Zagreb, 2025.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Anđela Gunjača

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

MASTER THESIS

Supervisor: assoc. prof. Mario Uroš, Ph.D.

Zagreb, 2025.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

Anđela Gunjača

(Ime i prezime)

0082062924

(JMBAG)

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

Procjena stanja postojeće armiranobetonske okvirne konstrukcije

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

Seismic assessment of existing reinforced concrete frame structure

(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:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

Anđela Gunjača, 0082062924

(Ime i prezime, JMBAG)

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

Procjena stanja 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:

Anđela Gunjača



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja :

Anđela Gunjača, 36709831025

(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 stanja 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:

Anđela Gunjača

SAŽETAK

U radu je proveden proračun metodom postupnog guranja postojeće okvirne konstrukcije u Zagrebu kako bi se procijenila njegova potresna otpornost. Kao kontrola je napravljena metoda spektra odziva. Zbog velikog broja različitih presjeka i rasporeda armature, što bi rezultiralo velikim brojem plastičnih zglobova koji bi bili teško pregledni, za daljnju analizu metodom postupnog guranja odabran je reprezentativan višeetažni okvir. Rad započinje teorijskim pregledom korištenih metoda. Podaci o kvaliteti materijala, dimenzijama poprečnih presjeka i rasporedu armature preuzeti su iz arhivske dokumentacije te potvrđeni nerazornim ispitivanjima na zgradi. Na temelju toga izrađen je numerički model, a plastični zglobovi na stupovima i gredama definirani su prema pripadajućim krivuljama kapaciteta sukladno Eurokodu 8. Proračun je proveden u programskom paketu ETABS, pri čemu su analizirani različiti oblici opterećenja. Kao rezultat, dobivene su krivulje kapaciteta te je izračunat indeks značajnog oštećenja (IZO) za promatrani smjer. Na kraju rada izveden je kritički osvrt na primijenjenu metodu proračuna i izvornu koncepciju konstrukcije zgrade.

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

SUMMARY

The study conducts a pushover analysis of an existing frame structure in Zagreb to assess its seismic resistance. As a control method, the response spectrum analysis was performed. Due to the large number of different cross-sections and reinforcement layouts, which would result in numerous plastic hinges that would be difficult to analyze, a representative multi-story frame was selected for further analysis. The paper begins with a theoretical overview of the applied methods. Data on material quality, cross-section dimensions, and reinforcement layout were obtained from archival documentation and confirmed through non-destructive testing on the building. Based on this, a numerical model was created, and plastic hinges were defined for columns and beams according to the corresponding capacity curves, in accordance with Eurocode 8. The analysis was conducted using the ETABS software package, considering various loading conditions. As a result, capacity curves were obtained, and the significant damage index (IZO) was calculated for the analyzed direction. Finally, the study provides a critical review of the applied calculation method and the original structural concept of the building.

Key words: earthquake, frame, pushover method, plastic hinges, IZO factor

SADRŽAJ

SAŽETAK	i
SUMMARY	ii
SADRŽAJ	iii
1. UVOD	1
2. SEIZMIČKI PRORAČUN KONSTRUKCIJA.....	2
2.1. Modalna analiza spektrima odziva.....	3
2.2. Metoda postupnog guranja.....	4
3. TEHNIČKI OPIS	8
3.1. Općenito o građevini.....	8
3.2. Dilatacija A	9
3.2.3. Istražni radovi na konstrukciji građevine.....	20
3.2.4. Razina obnove	22
4. NUMERIČKI MODEL KONSTRUKCIJE	24
4.1. Linearna analiza građevine.....	24
4.1.3. Analiza opterećenja.....	24
4.1.4. Prikaz 3D modela i opterećenja građevine	29
4.1.5. Dinamičke karakteristike građevine	33
4.1.6. Rezultati linearnog proračuna.....	36
4.2. Nelinearna analiza	39
4.2.1. Definiranje nelinearnih svojstava.....	43
4.2.2. Proračun metodom spektra odziva	46
4.2.3. Rezultati nelinearne analize	48
4.2.3.1. Mehanizam otkazivanja modela sa momentim plastičnim zglobovima i posmičnim zglobovima	48
4.2.3.2. Mehanizam otkazivanja modela sa momentim plastičnim zglobovima bez posmičnih zglobova	55
5. ZAKLJUČAK.....	61
POPIS LITERATURE.....	62
POPIS SLIKA.....	64
POPIS TABLICA	66
PRILOZI	67

1. UVOD

Potres je složen i nepredvidiv prirodni fenomen koji može imati razorne posljedice na izgrađeni okoliš. Za razliku od drugih opterećenja koja djeluju na konstrukcije, potres generira dinamičke sile koje ovise o karakteristikama tla, same građevine i njezine interakcije s podlogom. Budući da se potresi događaju u nepravilnim razmacima i imaju stohastičku prirodu, njihovo djelovanje na građevinske konstrukcije podložno je značajnim neizvjesnostima, što otežava precizno predviđanje odziva građevina.

Primarni cilj projektiranja je osigurati sigurnost ljudi, očuvati funkcionalnost objekata i ograničiti materijalne štete. Dok se nove konstrukcije projektiraju prema suvremenim normama koje omogućuju pouzdanu otpornost na potres, procjena potresne otpornosti postojećih konstrukcija predstavlja poseban izazov. Postojeće konstrukcije često su projektirane prema starijim normama koje nisu uzimale u obzir suvremene spoznaje o seizmičkom djelovanju, a dodatni problem predstavljaju degradacija materijala, moguća prethodna oštećenja te nepoznate ili nepotpune informacije o konstrukciji. Upravo zbog ovakvih nesigurnosti, Eurokod 8 - dio 3 (EN 1998-3) [1], definira razine znanja koje određuju stupanj povjerenja u podatke o konstrukciji. Razine znanja direktno utječu na odabir sigurnosnih faktora i metoda proračuna. Veća razina znanja znači manji faktor sigurnosti, ali i veće troškove za provođenje detaljnijih istraživanja i testiranja.

Jedna od ključnih razlika između proračuna novih i postojećih konstrukcija odnosi se na mehanizme otkazivanja. Kod novih konstrukcija primjenjuje se koncept „jakih stupova i slabih greda“ kako bi se osigurala formacija plastičnih zglobova u gredama umjesto u stupovima, čime se sprječava progresivno rušenje. Navedeni mehanizam nije direktno propisan normom, ali se postiže samim dimenzioniranjem prema Eurokodu. Kod postojećih konstrukcija, međutim, ne možemo znati hoće li se plastični zglobovi formirati na predviđenim mjestima.

Osim toga, metode analize postojećih konstrukcija često se razlikuju od onih koje se primjenjuju na nove konstrukcije. Dok se za nove zgrade obično koristi linearni dinamički proračun s definiranim sigurnosnim faktorima, kod postojećih konstrukcija često je potrebno koristiti nelinearne metode analize, poput metode postupnog guranja (eng. *pushover analysis*) ili vremenski ovisne nelinearne analize, kako bi se realnije procijenila njihova seizmička otpornost.

Cilj ovog rada je analizirati potresnu otpornost postojeće okvirne konstrukcije koristeći suvremene metode proračuna te usporediti dobivene rezultate s propisanim kriterijima seizmičke otpornosti.

2. SEIZMIČKI PRORAČUN KONSTRUKCIJA

Suvremeni propisi i norme u seizmičkom projektiranju usmjereni su na to da konstrukcije zadrže sposobnost apsorpcije seizmičke energije, a pritom očuvaju svoju nosivost i funkcionalnost. Time se, kroz prevenciju strukturnog kolapsa, osigurava zaštita ljudskih života te sigurnost stanara i šire javnosti [2][3].

Prema europskoj normi EN 1998-3:2004 [1], propisane su sljedeće metode proračuna postojećih konstrukcija na potresna djelovanja:

- a) metoda proračuna bočnih sila
- b) modalni proračun primjenom spektra odziva
- c) metoda postupnog guranja (eng. *pushover*)
- d) nelinearni dinamički proračun upotrebom zapisa ubrzanja u vremenu (eng. *time history*)
- e) pristup s faktorom q .

Metoda proračuna bočnih sila primjenjuje se u slučajevima kada je odgovor konstrukcije dominiran osnovnim, najčešće prvim oblikom titranja, a doprinos viših oblika je zanemariv. Ova linearna statička metoda najjednostavnija je od navedenih i idealna za pravilno konfigurirane, jednostavne zgrade. S druge strane, modalni proračun spektrima odziva predstavlja linearnu dinamičku metodu primjenjivu na sve tipove konstrukcija. Ona uvažava doprinos viših modalnih oblika te, unatoč nešto većoj kompleksnosti, daje zadovoljavajuće rezultate. Obje ove metode temelje se na pristupu na osnovu sila, dok su nelinearni dinamički proračun i metoda postupnog guranja usmjereni na procjenu pomaka. Nelinearni dinamički proračun upotrebom zapisa ubrzanja najsofisticiraniji je pristup, koji precizno modelira stvarni odgovor konstrukcije na seizmičke pobude. Međutim, zbog potrebe za detaljnim podacima o kretanju tla i svojstvima konstrukcije, njegova primjena je zahtjevna i dugotrajna te se uglavnom koristi u istraživanjima, evaluacijama i rekonstrukcijama. Metoda postupnog guranja predstavlja relativno novu metodu baziranu na ponašanju konstrukcije (eng. *performance based engineering concept*), gdje se pridaje pažnja praćenju oštećenja konstrukcije. Koristi se za evaluaciju kapaciteta konstrukcije da apsorbira seizmičku energiju kroz plastične deformacije [2].

Pristup s faktorom q odnosi se na redukciju ordinate elastičnog spektra, tj. primjenu proračunskog spektra odziva kod prve dvije metode pomoću faktora ponašanja q .

Proračun postojećih konstrukcija u obzir uzima razine znanja, zbog niza nesigurnosti u odnosu na nove konstrukcije. Prema [1] definirane su 3 razine znanja: RZ1- ograničeno znanje, RZ2 – uobičajeno znanje te RZ3 – potpuno znanje. Faktori koji određuju odgovarajuću razinu su geometrijski faktori, detalji (npr. količina i oblikovanje armature u armiranom betonu, detalji spojeva elemenata) te materijali (svojstva). Određena razina znanja diktira vrijednost faktora povjerenja, ali i primjenu odgovarajuće metode proračuna. Budući da su u ovom radu korištene metode modalnog proračuna spektrima odziva i postupnog guranja, one će biti detaljno objašnjene u nastavku.

2.1. Modalna analiza spektrima odziva

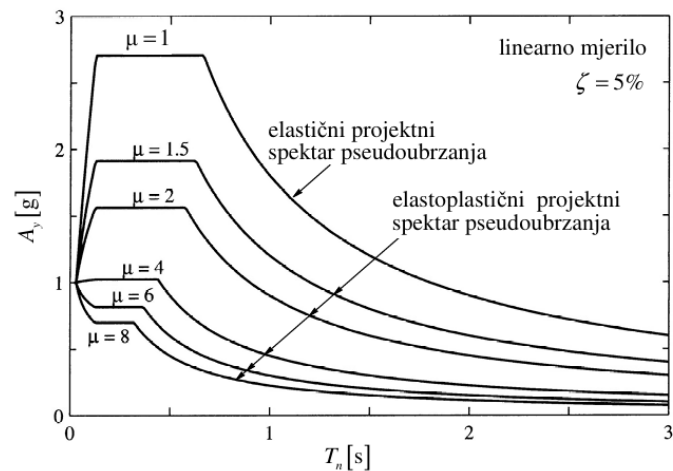
Metoda modalne analize spektrima odziva temelji se na razlaganju odziva konstrukcije na modalne oblike titranja. Transformacijom jednadžbi gibanja u modalne koordinate složeni višestupanjski sustav svodi se na niz neovisnih jednadžbi. Svaka jednadžba opisuje jedan modalni oblik, njegov period i prigušenje, a ukupni odziv konstrukcije dobiva se superpozicijom svih modalnih odziva [4].

Prema [5], potrebno je uzeti u obzir sve oblike vibracija koji značajno doprinose ukupnom odzivu, što se postiže ispunjenjem barem jednog od sljedećih kriterija:

- zbroj proračunskih modalnih masa za uključene oblike mora iznositi najmanje 90% ukupne mase,
- svi modalni oblici s proračunskim modalnim masama većim od 5% ukupne mase moraju biti uključeni u analizu.

Vršna vrijednost n – tog oblika titranja je poznata iz spektra odziva. Spektar odziva sadrži sve ekstreme tj. amplitude odziva okvira na potresnu pobudu. Ovisi o prigušenju ζ_n te vlastitim periodima titranja T_n tj. za odabrano prigušenje spektar odziva ovisi samo o vlastitom periodu. Ekstremne vrijednosti mogu biti u obliku pomaka, brzine i ubrzanja [4].

Elastični spektar prikazuje odziv pod pretpostavkom elastičnog ponašanja konstrukcije, no u stvarnosti konstrukcije često ulaze u nelinearno područje. Kako bi se izbjeglo konzervativno i neekonomično dimenzioniranje, elastične sile se reduciraju faktorom ponašanja q , čime nastaje projektni spektar.



Slika 1 Projektni spektri za različite koeficijente duktilnosti (Izvor: [4])

Glavni izazov pri primjeni faktora ponašanja je procjena prihvatljive razine oštećenja uslijed plastificiranja. Što je veća vrijednost faktora q , to su manje potresne sile, ali i veći zahtjevi za duktilnost konstrukcije [4].

Glavni nedostaci ove analize su:

- približne vrijednosti faktora q , koje ne moraju odgovarati stvarnoj konstrukciji,
- nepredvidiva preraspodjela sila i deformacija u nelinearnom području,
- nemogućnost predviđanja mehanizama loma samo elastičnom analizom [2].

Unatoč ograničenjima, linearne metode su i dalje široko korištene zbog svoje jednostavnosti. U usporedbi s metodom bočnog pomaka, metoda spektra odziva daje veću točnost uz umjereno veću složenost proračuna.

2.2. Metoda postupnog guranja

Metoda postupnog guranja je nelinearna statička metoda koja omogućava procjenu seizmičke otpornosti konstrukcije. Osnovna ideja je da se konstrukcija postupno podvrgava horizontalnim silama koje rastu monotono sve dok se ne dostigne granično stanje. Te sile predstavljaju inercijske sile koje nastaju uslijed gibanja tla tijekom potresa [6].

U početnoj fazi konstrukcija se ponaša elastično, no s porastom opterećenja dolazi do stvaranja plastičnih zglobova u kritičnim dijelovima. Kako pojedini elementi popuštaju, krutost konstrukcije se smanjuje, a sile se redistribuiraju na preostale nosive elemente. Ako

se dodatno povećava opterećenje, dolazi do progresivnog otkazivanja i formiranja mehanizma sloma. Velika prednost metode je što omogućuje praćenje mehanizama otkazivanja i procjenu stupnja oštećenja konstrukcije tijekom cijelog postupka analize. Na temelju rezultata može se identificirati koji su dijelovi konstrukcije najosjetljiviji na seizmičke sile te predložiti odgovarajuće mjere ojačanja ili sanacije. Osim toga, metoda pruža realniji uvid u raspodjelu sila unutar konstrukcije u odnosu na linearne proračune. Metoda postupnog guranja najčešće se koristi za procjenu postojećih objekata [3].

U nastavku je dan postupak provođenja navedene analize.

Prije provođenja proračuna metodom postupnog guranja (N2 metoda), potrebno je prikupiti osnovne podatke o konstrukciji, uključujući geometriju, materijale i nelinearne parametre. Također, ovisno o seizmičkoj aktivnosti područja, definira se potresni zahtjev.

Nakon prikupljenih podataka, provodi se nelinearna statička metoda guranja. Postupno guranje provodi se primjenom monotonog bočnog opterećenja, koje predstavlja inercijalne sile nastale uslijed potresa. Ove sile raspodjeljuju se po katovima.

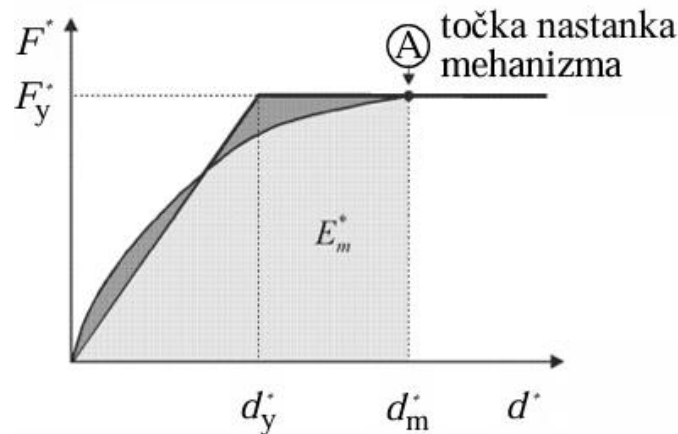
Kako bi se dobio uvid u globalno ponašanje konstrukcije, bilježi se odnos ukupne poprečne sile u temelju V i pomaka na vrhu zgrade D, čime se formira krivulja kapaciteta. Ova krivulja prikazuje sposobnost konstrukcije da apsorbira i prenosi seizmičku energiju te omogućuje procjenu njezine duktilnosti i nosivosti.

Budući da su spektri odziva definirani za sustave s jednim stupnjem slobode (SDOF), konstrukciju s više stupnjeva slobode (MDOF) potrebno je transformirati u ekvivalentni SDOF sustav. Ta pretvorba provodi se primjenom faktora pretvorbe Γ definiranog izrazom:

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \phi_i}{\sum m_i \phi_i^2} = \frac{m^*}{\sum m_i \phi_i^2} \quad (1)$$

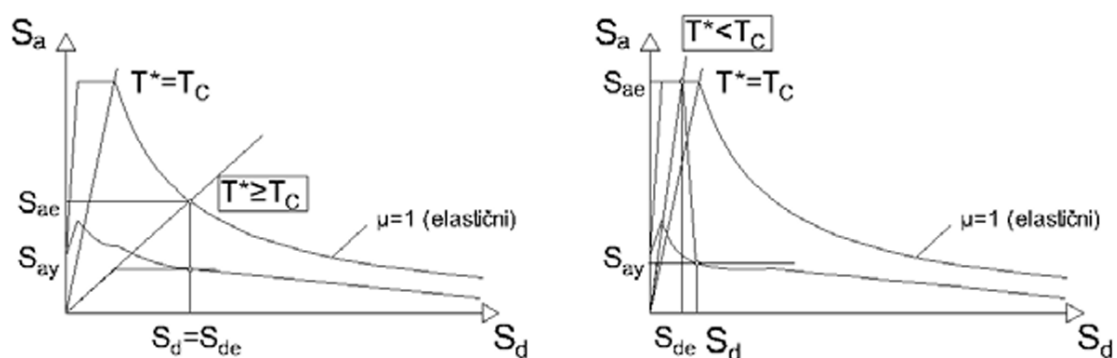
Nakon određivanja faktora pretvorbe, određuje se pomak i sila za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode:

$$D = \frac{D_t}{\Gamma} \quad F = \frac{V}{\Gamma} \quad (2)$$



Slika 2 Idealizirana krivulja kapaciteta za jedan stupanj slobode (Izvor: [7])

Dobivena ekvivalentna krivulja kapaciteta uspoređuje se s potresnim zahtjevom, koji se prikazuje u formatu spektar ubrzanja-pomak (AD format). Ovaj format omogućuje jednostavniju usporedbu potresnog zahtjeva s kapacitetom konstrukcije, budući da su ubrzanja i pomaci ključni parametri za procjenu nelinearnog odziva. Na mjestu gdje radijalni pravac, odnosno elastični period T^* idealiziranog sustava s jednim stupnjem slobode, presijeca elastični zahtijevani spektar određuje se zahtijevano elastično ubrzanje S_{ae} i zahtijevani elastični pomak S_{de} . Ako je period T veći ili jednak T_C , zahtijevani neelastični pomak S_d jednak je zahtijevanom elastičnom pomaku S_{de} , odnosno vrijedi pravilo jednakih pomaka, što kod perioda $T < T_C$ slučaj, tada vrijedi pravilo jednakih energija [6].



Slika 3 Elastični i neelastični zahtijevani spektri za dijagrame kapaciteta: za konstrukcije sa srednjim i dugim periodima (lijevo) te konstrukcije s kratkim periodima (desno) (Izvor:[8])

Pomak jednostupanjskog sustava transformira se natrag na višestupanjski sustav, pa se dobiva ciljni pomak konstrukcije, odnosno očekivani maksimalni pomak.

$$D_t = \Gamma \cdot S_d \quad (3)$$

Na temelju dobivenih rezultata vrši se procjena ponašanja i analiza oštećenja.

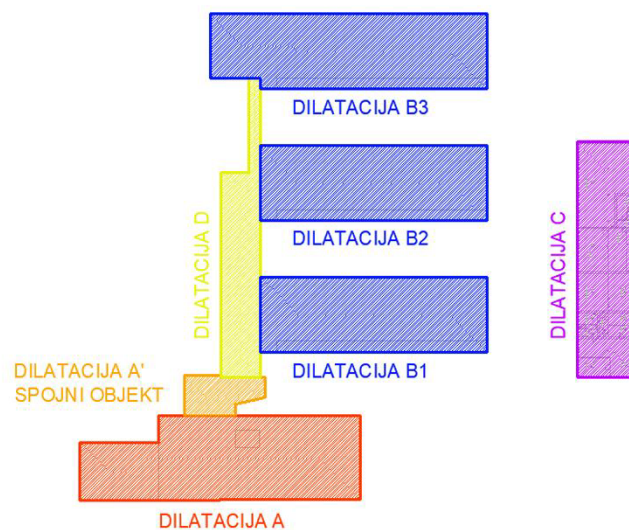
Prema [1], osim kapaciteta konstrukcije, analizira se i indeks značajnog oštećenja (IZO) kako bi se procijenilo koliko je konstrukcija blizu graničnog stanja nesigurnosti. Provodi se usporedba između rezultata analize postupnog guranja i graničnih vrijednosti deformacija za određene razine oštećenja.

3. TEHNIČKI OPIS

3.1. Općenito o građevini

Zagrebački potres 22. ožujka 2020. godine uzrokovao je oštećenja sjeverne zgrade Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Ovaj diplomski rad temelji se na projektu obnove koji je izradila tvrtka Capital ing. d.o.o.

Prema dostupnoj arhivskoj dokumentaciji, projektna dokumentacija datira iz 1958. godine, dok je građevinska dozvola izdana 1959. godine. Također, u arhivskoj dokumentaciji nalazi se i uporabna dozvola za objekt iz 1962. godine. Zgrada je prvotno građena kao zgrada Visoke tehničke škole u Zagrebu, a kasnije je postala dio Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Predmetna građevina – sjeverna zgrada Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu nije evidentirana u Registru nepokretnih kulturnih dobara Republike Hrvatske.



Slika 4 Sjeverna zgrada FSB-a – shema dilatacija (Izvor: projekt Capital Ing d.o.o.)

Sjeverna zgrada Fakulteta strojarstva i brodogradnje sastoji se od više konstrukcijskih dilatacija raspoređenih na građevnoj čestici od juga prema sjeveru (Slika 4). Dilatacija A, najveća u kompleksu, smještena je južno, prema Filozofskom fakultetu, a pristup iz ulice omogućen je preko spojnog trakta. Dilatacije B1 do B3 su tri identične zgrade smještene u smjeru istok - zapad, pri čemu je B1 najbliža dilataciji A, a B2 i B3 smještene prema sjeveru. Dilatacija A i dilatacije B povezane su zgradom dilatacije D, koja je izdužena u smjeru sjever

- jug te povezuje sve ostale dilatacije. Dilatacija C je samostalna zgrada smještena u sjevernom dijelu kompleksa.

Konstrukcije svih navedenih dilatacija izvedene su kao okvirne konstrukcije na način da su armiranobetonski okviri, postavljeni u jednom smjeru (poprečno na smjer pružanja zgrade), a uzdužno povezani samo ukrutnim rebrima stropne konstrukcije.

Predmet ovog rada je konstrukcija dilatacije A koja je detaljno obrađena u nastavku.

3.2. Dilatacija A

Dilatacija A najveća je zgrada unutar kompleksa, smještena na južnoj strani (prema Filozofskom fakultetu). Tlocrtnih je dimenzija $58,80 \times 17,60$ m, dok ukupna visina konstrukcije iznosi približno 21,0 m. Zgrada se sastoji od šest etaža: podruma (ispod manjeg dijela tlocrta), niskog prizemlja, visokog prizemlja, dva kata i uvučenog kata. Iznad stropne konstrukcije uvučenog kata nalazi se kućica dizala visoka oko 2,30 m.

Visine pojedinih etaža su:

- Podrum: cca 2,50 m
- Nisko prizemlje: 5,00 m (mjereno od razine okolnog terena)
- Visoko prizemlje te prvi i drugi kat: 4,00 m
- Uvučeni kat: 3,50 m

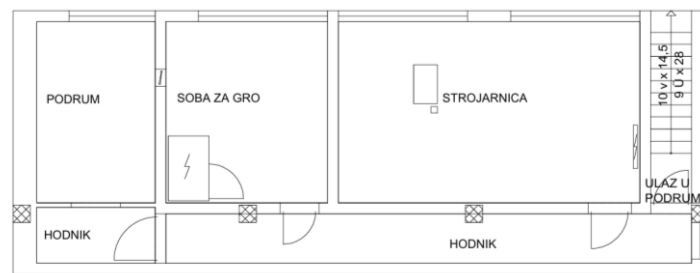


Slika 5 Pogled na dilataciju A a) sjeverno pročelje b) istočno pročelje (Izvor: a) [9], b) projekt Capital Ing d.o.o.)

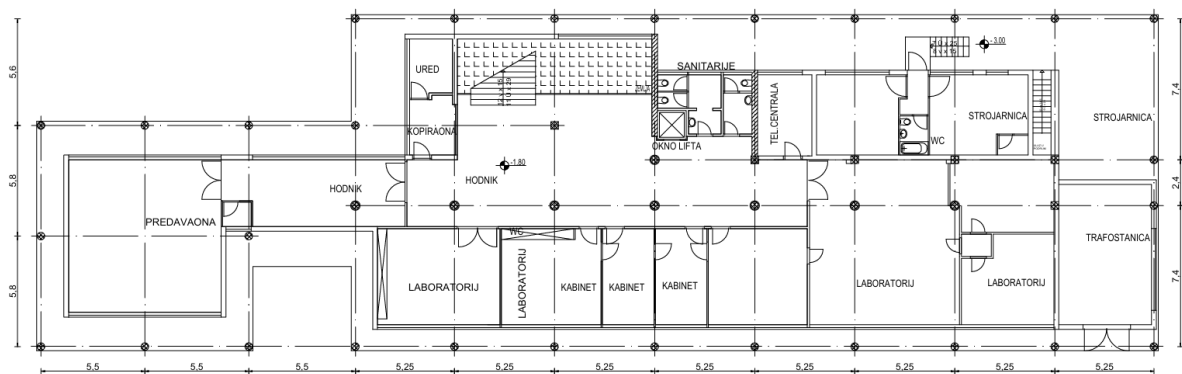
Konstrukcijski sustav čine armiranobetonski okviri (stup-greda) postavljeni poprečno u odnosu na smjer pružanja građevine, dok su uzdužno povezani ukrutnim rebrima stropne konstrukcije te rubnim gredama. Stropne konstrukcije na većem dijelu građevine izvedene

su kao sitnorebrasti stropovi, dok su strop krovne kućice dizala i dijelovi podruma izvedeni kao pune armiranobetonske ploče. Strop istaknutog volumena na zapadnoj strani objekta, gdje se nalazi velika predavaonica, izveden je kao armiranobetonski roštiljni sustav s rebrima u dva okomita smjera. Unutarnja vertikalna komunikacija omogućena je dizalom i središnjim armiranobetonskim stubištem. Stubište je izvedeno kao armirano betonsko stubište od gazišta koja su oslonjena na centralnu armiranobetonsku gredu, i preko nje na rebra – mijene stubišta u razinama podesta i međupodesta.

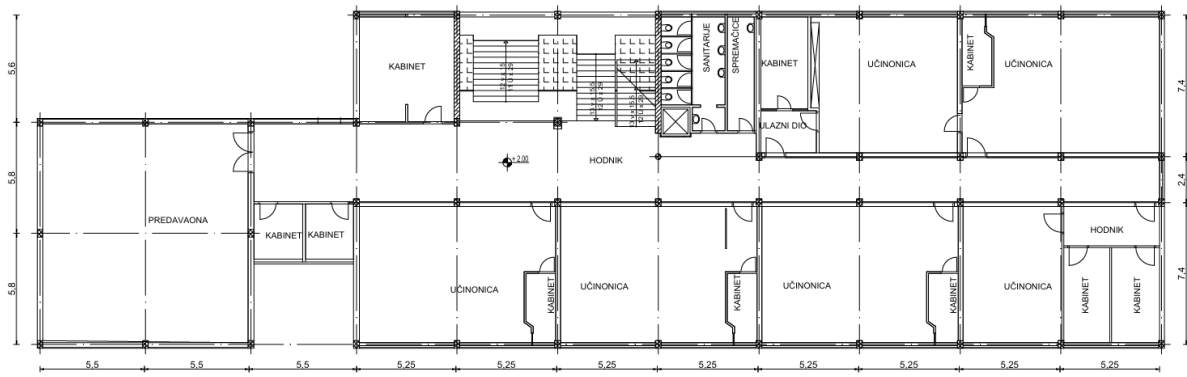
Temeljenje građevine izvedeno je nearmiranim betonskim temeljnim stopama (samcima) koje se stepenasto šire u presjeku prema dubini temeljenja.



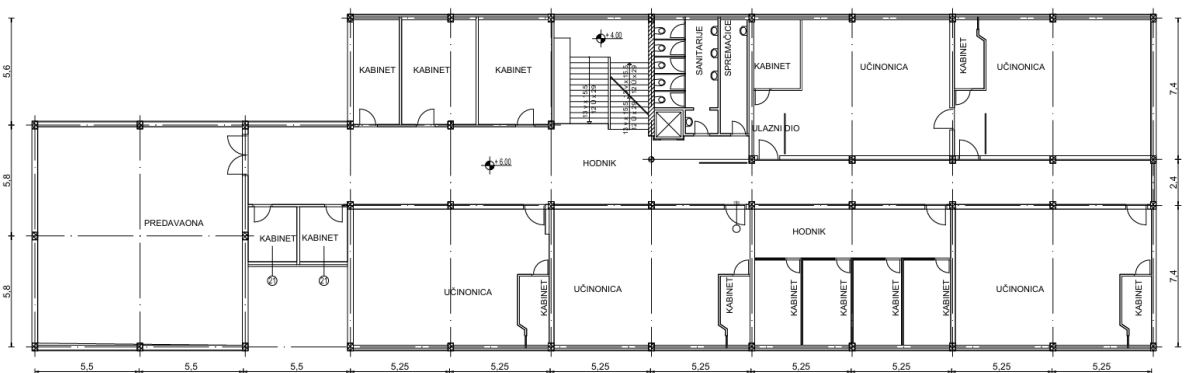
Slika 6 Tlocrt podruma (Izvor: Snimak postojećeg stanja)



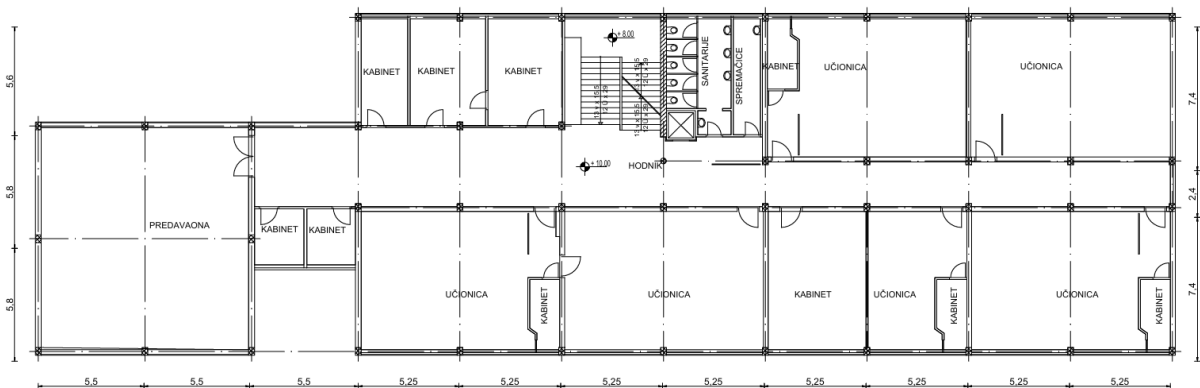
Slika 7 Tlocrt niskog prizemlja (Izvor: Snimak postojećeg stanja)



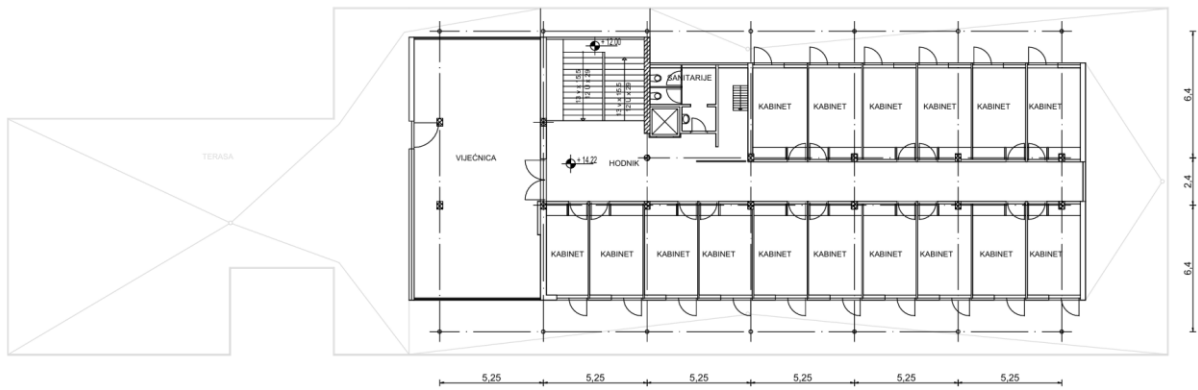
Slika 8 Tlocrt visokog prizemlja (Izvor: Snimak postojećeg stanja)



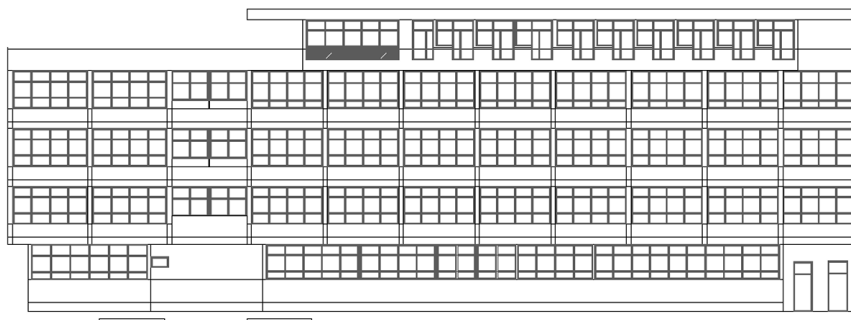
Slika 9 Tlocrt prvog kata (Izvor: Snimak postojećeg stanja)



Slika 10 Tlocrt drugog kata (Izvor: Snimak postojećeg stanja)

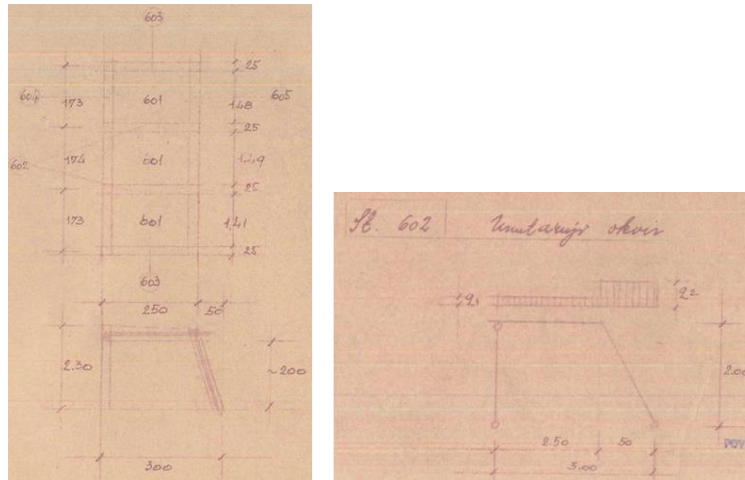


Slika 11 Tlocrt trećeg kata (Izvor: Snimak postojećeg stanja)



Slika 12 Prikaz pročelja dilatacije A (Izvor: Snimak postojećeg stanja)

Konstrukcija krovne kućice sastoji se od okvira stup – izlomljena greda postavljenih na osnovom razmaku od približno 175 cm. Stropna konstrukcija izvedena je kao puna armiranobetonska ploča debljine 7 cm. Stupovi i izlomljene grede okvira imaju dimenzije $b/h = 20/25$ cm, dok visina okvira varira između 2,0 m i 2,3 m, uz raspon $L = 3,0$ m. U uzdužnom smjeru, okviri su međusobno povezani ukрутним rebrom istih dimenzija ($b/h = 20/25$ cm). Svi elementi armirani su glatkom armaturom, a pretpostavljena tlačna čvrstoća betona odgovara razredu C15/20, sukladno važećim propisima.



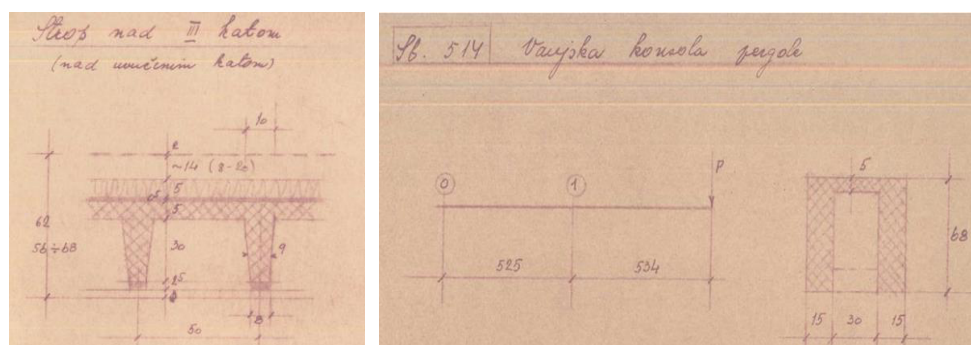
Slika 13 Proračun krovne konstrukcije dizala (Izvor: arhivska dokumentacija)

Strop uvučenog kata izveden je kao sitnorebrasti strop s rebrima $b/h=8/35$ cm koja se uzdužno protežu i oslanjaju na poprečne okvire. Tlačna ploča stropa debljine je 5 cm, a rebra presjeka $8/35$ cm postavljena su na osnom razmaku od 50 cm.

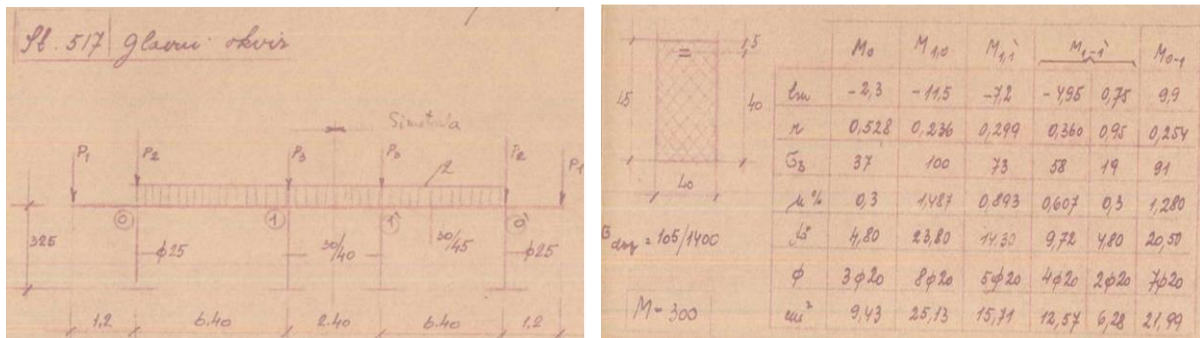
Na istočnom i zapadnom pročelju izvedena je pergola sa uzdužnim gredama $2 \times 15/60$ cm, poprečno povezanih ukrutnim rebrom $12/70$ cm. Na mjestu oslanjanja krovne kućice na stropnu ploču primijenjena su uzdužna rebra $25/70$ cm.

Stropna rebra se oslanjaju na poprečne okvire, izrađene od greda $40/45$ cm, dok se grede oslanjaju na središnje stupove presjeka $30/40$ cm, te rubne stupove kružnog presjeka promjera 25 cm.

Svi armirani elementi izvedeni su glatkom armaturom GA240/360, a korišteni su betoni razreda C15/20 i C25/30. Konstrukcija je uvučena tako da prostor ispred istake čini prohodnu terasu, a stupovi su pomaknuti 1 m od južnog i sjevernog pročelja. Prema istoku i zapadu smanjen je broj polja ravninskog okvira, iznad kojih je izvedena pergola, čime je osigurana prohodnost cijele etaže na stropnoj ploči 2. kata.



Slika 14 Prikaz stropne konstrukcije (uvučeni kat) (Izvor: arhivska dokumentacija)

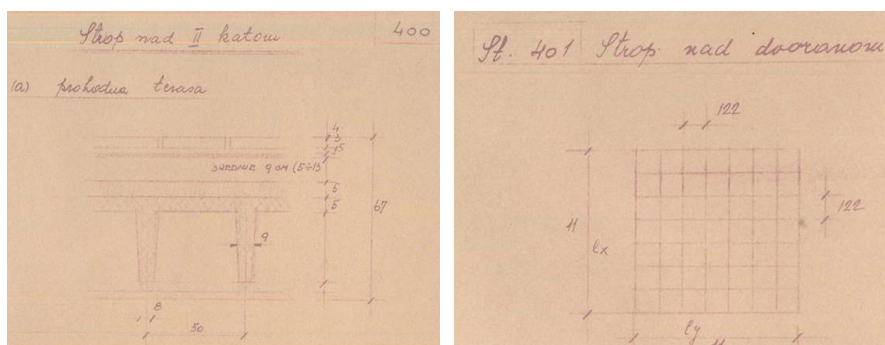


Slika 15 Prikaz proračuna armature (uvučeni kat) (Izvor: arhivska dokumentacija)

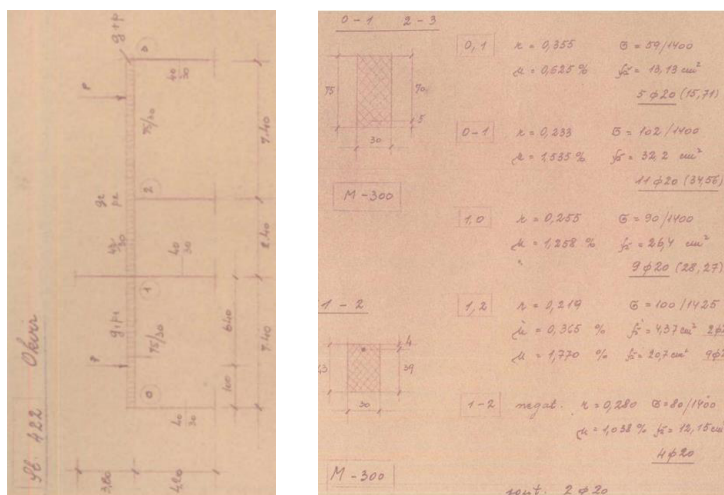
Stropna konstrukcija 2. kata izvedena je kao sitnorebrasti strop na većem dijelu tlocrta, a djelomice kao roštilj s armiranobetonskim rebrima u 2 smjera (strop nad velikom predavaonicom). Kod sitnorebrastog stropa, rebra dimenzija $b/h = 9/35$ cm pružaju se u uzdužnom smjeru građevine, na osnom razmaku od 50 cm, te oslanjaju na okvire poprečnog smjera. Poprečni okviri izvedeni su od greda dimenzija 30/75 cm te 30/43 cm, te stupova presjeka 30/40 cm. U uzdužnom smjeru između stupova uz to su izvedena i ukrutna rebra dimenzija $b/h=40/38$ te 30/38 cm.

Roštiljni strop je izrađen od rebara 15/38 cm raspoređenih u dva okomita smjera s osnim razmakom od 122 cm. Na ovom dijelu stropna konstrukcija se oslanja na grede čiji su presjeci b/h jednaki 30/43 te 30/38, te stupove 30/40 cm.

Okviri su proračunati prema vertikalnim opterećenjima u skladu s pripadajućim rasponima: na zapadnom dijelu (predavaonice) rasponi okvira su 5,50 m + 5,50 m, u središnjem dijelu 5,60 m + 4,20 m + 7,40 m, a na dijelu s učionicama 7,40 m + 2,40 m + 7,40 m. Svi armirani elementi izvedeni su glatkom armaturom tipa GA240/360, a korišteni su betoni razreda C15/20 i C25/30 u skladu s važećim propisima.



Slika 16 Prikaz stropne konstrukcije (2. kat) (Izvor: arhivska dokumentacija)



Slika 17 Prikaz proračuna armature (2. kat) (Izvor: arhivska dokumentacija)

Stropne konstrukcije prvog kata, kao i niskog i visokog prizemlja, izvedene su na isti način i proračunate kao konstrukcija tipskog kata. Tipski kat kombinira dvije vrste stropnih konstrukcija:

Sitnorebrasti strop: Većina tlocrta ima strop s rebrima dimenzija $b/h = 9/35 \text{ cm}$, koji se pružaju uzduž građevine i oslanjaju na poprečne okvire. Tlačna ploča je debljine 5 cm , a rebra su postavljena na osnovom razmaku od 50 cm . Ova rebra se podupiru poprečnim okvirima izvedenim od greda dimenzija $30/60 \text{ cm}$, $30/38 \text{ cm}$ i $50/38 \text{ cm}$, te stupovima s presjekom $30/40 \text{ cm}$, $30/45$ te kružnim presjecima u niskom prizemlju sa promjerima $D=40$ i $D=45 \text{ cm}$. U uzdužnom smjeru između stupova izvedena su ukrutna rebra dimenzija $40/38 \text{ cm}$ i $30/38 \text{ cm}$.

Roštiljni strop: Dio stropa nad predavaonicom izveden je kao roštilj, tj. s armiranobetonskim gredama (rebrima) koje idu u oba smjera. Uzdužno između stupova, postavljena su ukrutna rebra dimenzija $40 \times 38 \text{ cm}$ i $30 \times 38 \text{ cm}$. Roštiljni strop izrađen je od rebara dimenzija $15/38 \text{ cm}$, s tlačnom pločom debljine 5 cm i ukrutnim rebrima dimenzija $40/38 \text{ cm}$ i $30/38 \text{ cm}$. Rebra su raspoređena u oba smjera s međusobnim osnim razmakom od 122 cm i oslanjaju se na rubne grede čiji su presjeci $30/60 \text{ cm}$ i $40/38 \text{ cm}$, dok stupove u tom dijelu čine stupovi s presjekom $30/40 \text{ cm}$ (odnosno kružni stupovi $D=40 \text{ cm}$ u niskom prizemlju).

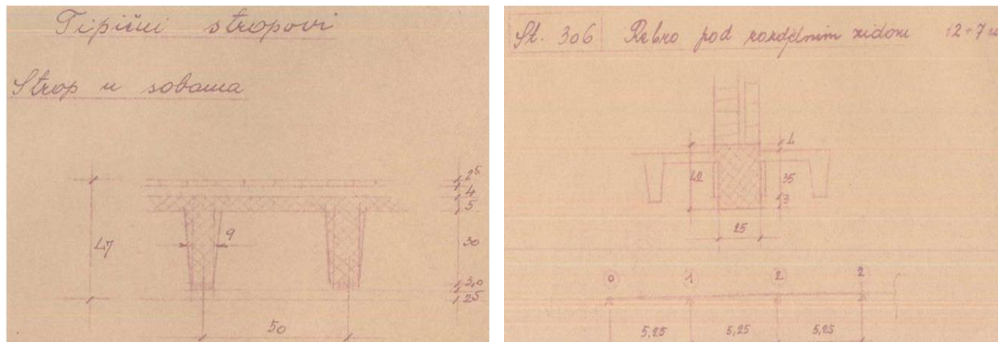
Proračun okvira proveden je na osnovi vertikalnih opterećenja prema pripadajućim rasponima:

Na zapadnom dijelu (predavaonice): $5,50 \text{ m} + 5,50 \text{ m}$,

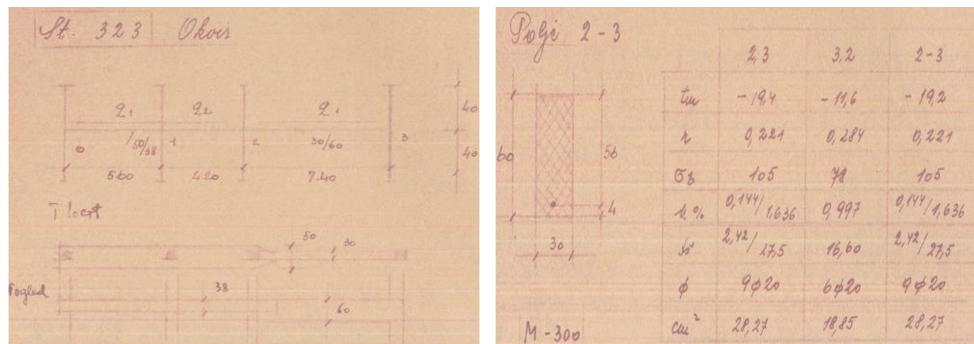
U središnjem dijelu: $5,60 \text{ m} + 4,20 \text{ m} + 7,40 \text{ m}$,

U dijelu s učionicama: $7,40 \text{ m} + 2,40 \text{ m} + 7,40 \text{ m}$.

Svi armirani elementi izvedeni su glatkom armaturom GA240/360, a korišteni su betoni razreda C15/20 i C25/30 sukladno važećim propisima.

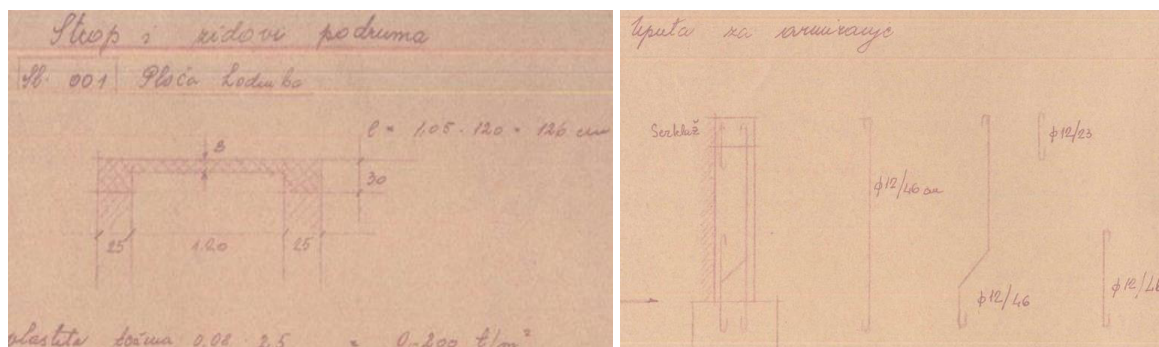


Slika 18 Prikaz stropne konstrukcije (tipski kat) (Izvor: arhivska dokumentacija)



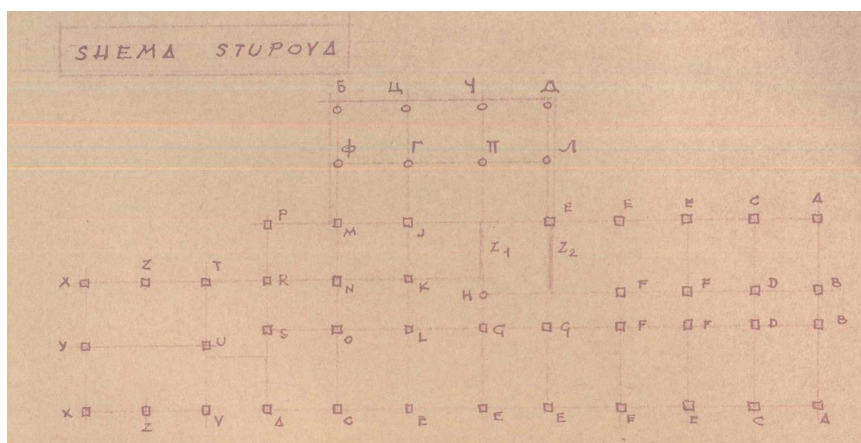
Slika 19 Prikaz proračuna armature (tipski kat) (Izvor: arhivska dokumentacija)

Podrum građevine smješten je na manjem dijelu tlocrta, na sjeveroistočnoj strani objekta. Stropna konstrukcija podruma izvedena je djelomično kao sitnorebrasti strop (na većem dijelu tlocrta) i djelomično kao puna AB ploča debljine 8 cm. Sitnorebrasti strop sastoji se od rebara dimenzija $b/h = 8/30$ cm, koja se protežu u poprečnom smjeru građevine i oslanjaju na zidove i uzdužne grede. Tlačna ploča stropa ima debljinu od 5 cm, a rebra su postavljena na osnovom razmaku od 50 cm. Ova rebra oslanjaju se na uzdužne grede dimenzija $b/h = 25/48$ cm i na uzdužne zidane zidove debljine $t = 25$ cm (po vrhu serklaža dimenzija $b/h = 25/25$ cm). Zidovi ukopani u tlo izvedeni su kao armiranobetonski potporni zidovi debljine 25 cm, temeljeni na temeljnoj stopi širine 50 cm (dubina nije utvrđena). Svi armiranobetonski elementi armirani su glatkom armaturom GA240/360 te betonima razreda tlačnih čvrstoća C15/20 i C25/30 sukladno važećim propisima.



Slika 20 Prikaz elemenata iz statičkog proračuna – podrum (Izvor: arhivska dokumentacija)

Arhivska dokumentacija (izvorni statički proračun iz rujna 1958., izradio Arhitektonski biro Haberle – ing. M. Haberle, ing. M. Jurković) sadrži proračun svih nosivih stupova građevine prema shemi pozicija prikazanoj na slici 21. Stupovi su proračunati isključivo na vertikalna opterećenja (reakcije sa stropnih greda), što znači da se nosivost i stabilnost okvira izvan ravnine zanemaruju. Također, okviri nisu analizirani za bočna opterećenja (potres, vjetar) - što je karakteristično za razdoblje izrade projektne dokumentacije. Prema tome, stupovi su armirani samo za savijanje unutar ravnine okvira, a poprečna armatura (vilice) nije zasebno proračunata.

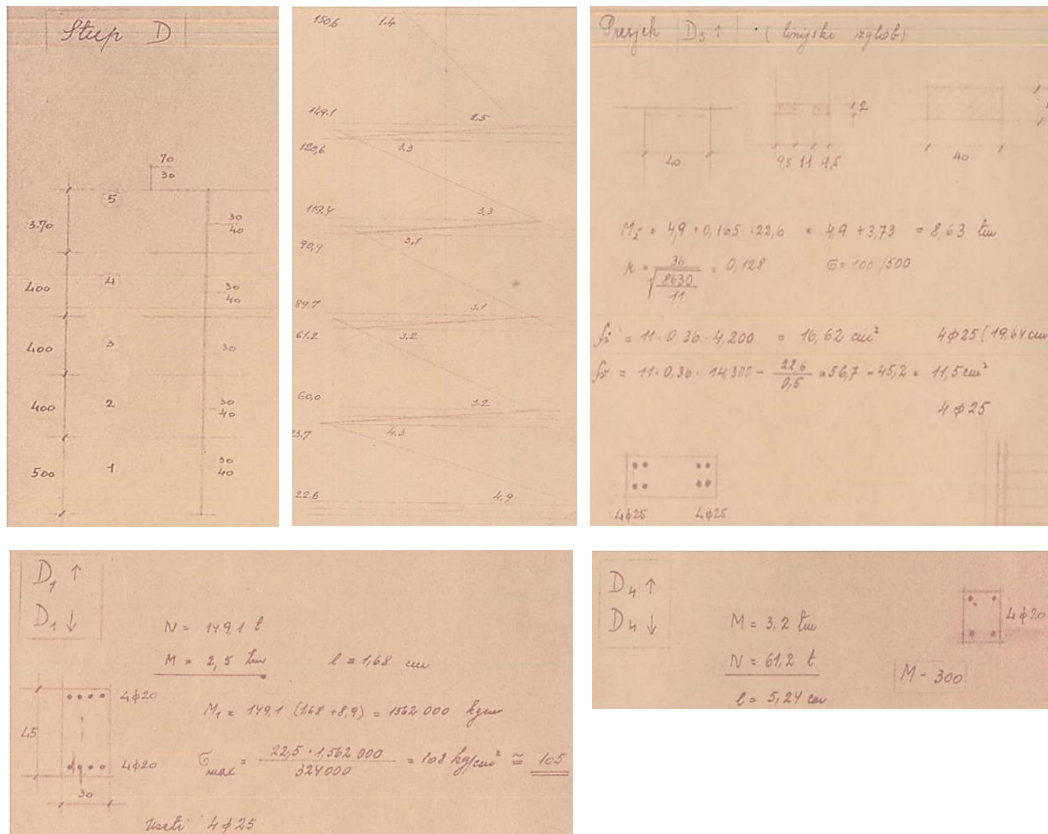


Slika 21 Shema stupova (Izvor: arhivska dokumentacija)

Ovim pristupom, građevina konceptualno ne zadovoljava današnje propise potresne otpornosti. Potresna otpornost okvira u ravnini ostvaruje se djelomično armaturom stupova i greda, proračunatom na vertikalna opterećenja, dok se otpornost izvan ravnine oslanja isključivo na krutost elemenata, s obzirom da stupovi nisu dimenzionirani za savijanje izvan ravnine te su međusobno povezani samo ukrutnim rebrima (bez osigurane upetosti u

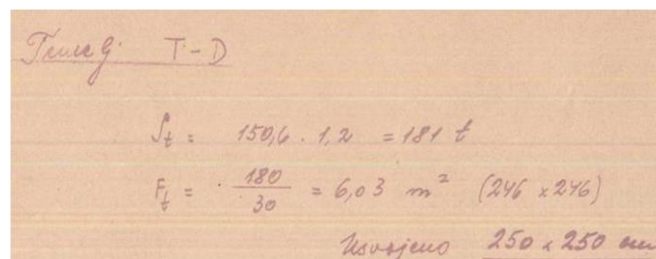
čvorovima stup-greda). Također, stupovi imaju relativno male presjeke za statički sustav "čiste" konzole.

Proračuni stupova prikazani su slikovno u arhivskim dokumentima, a isti postupak primijenjen je i na preostale stupove okvira, sukladno njihovim pozicijama.



Slika 22 Prikaz proračuna i dimenzioniranja stupova (Izvor: arhivska dokumentacija)

Građevina je oslonjena na temelje samce. Prema arhivskoj dokumentaciji (statički proračun), za svaku poziciju stupa zasebno je utvrđena potrebna tlocrtna dimenzija temeljne stope (Slika 23).



Slika 23 Prikaz proračuna temeljne stope (Izvor: arhivska dokumentacija)

Pretpostavljalo se da temeljne stope nisu izvedene s konstantnim tlocrtom tijekom cijele dubine, već se stepenasto proširuju prema dolje budući da je isti raspored primijenjen i na ostalim dilatacijama (B, C, D).

Međutim, za predmetnu dilataciju analiza arhivske dokumentacije nije otkrila točne podatke o dubini temeljenja ni o poprečnom presjeku temeljnih stopa, kao što je to napravljeno za ostale dilatacije. Pretpostavljalo se da su temelji ukopani na dubini od oko 2 m. Prema [10] temelji su prilikom iskopa zatečeni na znatno većim dubinama. Daljnja istraživanja pokazala su da se gotovo svi temelji razlikuju, a njihove dubine variraju. Temeljne stope ispod nosivih stupova dimenzionirane su isključivo prema kriteriju naprezanja tla ispod temeljne stope. Nije provedena kontrola stabilnosti temelja uslijed potresnog djelovanja (problem prevrtanja). Također, temeljne stope su nearmirane, izuzev armaturnih sidara za stupove. Shema temelja prikazana je u prilogima.



Slika 24 Prikaz konstrukcijskih detalja za vrijeme obnove građevine

3.2.3. Istražni radovi na konstrukciji građevine

Na predmetnoj građevini proveden je niz nerazornih ispitivanja kako bi se utvrdile dimenzije elemenata, čvrstoća betona te količina i kvaliteta armature. Ispitivanja su obavljena na stupovima i gredama okvira, a rezultati su prikazani u nastavku.

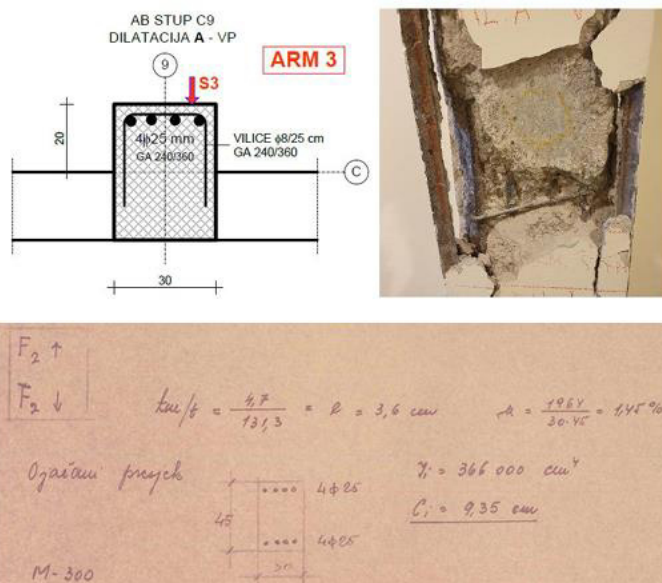
Sonda A - S1 – Utvrđivanje količine i kvalitete armature uklanjanjem zaštitnog sloja betona (stup okvira)

Sonda A - S2 – Utvrđivanje količine i kvalitete armature uklanjanjem zaštitnog sloja betona (greda okvira)

Sonda A - S3, AS – 5, AS -6, A – S9, A – S11 – Procjena količine armature i zaštitnog sloja betona primjenom radara (stup okvira)

Sonda A - S4, A - S7, AS – 8, A – S10, A – S11 – Procjena količine armature i zaštitnog sloja betona primjenom radara (greda okvira)

Sonda A – S3, A – S4, A – S5 i A - S7 – Procjena tlačne čvrstoće betona sklerometrom.



Slika 25 Usporedba ugrađene armature utvrđene istražnim radovima i armature iz statičkog proračuna (Izvor: projekt Capital ing d.o.o.)

Provedenim istražnim radovima potvrđeno je da ugrađena armatura odgovara onoj iz izvornog statičkog proračuna. Na većem broju mjesta armatura je potvrđena nerazornim metodama, kao što je upotreba profometra.

AB STUP B'6 U NISKOM PRIZEMLJU ZGRADE (oznaka PROF 1)

Dimenzije ab stupa: 36 x 58 cm (s žbukom)
Količina uzdužne armature: 4 ϕ 25 mm na užoj strani stupa
Vilice: ϕ 8/30 cm
Debljina zaštitnog sloja: a = 3 do 4 cm.

Fotografije ispitivanja vide se na slici 8.1.



Slika 26 Utvrđivanje armature stupova nerazornom metodom (profometar) (Izvor: projekt Capital Ing d.o.o.)

Istražnim radovima utvrđeno je da kvaliteta betona većine elemenata odgovara današnjem razredu tlačne čvrstoće betona C25/30, što je sukladno izvornom statičkom proračunu. Sva ugrađena armatura je glatka armature oznake GA 240/360.






Tablica 1 Rezultati ispitivanja kvalitete betona ugrađenog u stupove i grede (sklerometrom) (Izvor: projekt Capital Ing d.o.o.)

DILATACIJA	Oznaka mjernog mjesta	Mjesto ispitivanja	Srednja vrijednost odskoka sklerometra R	Standardno odstupanje R	Procijenjena tlačna čvrstoća betona (MPa)
A	S1	AB STUP B'5 - NP	41,20	2,62	42,73
	S2	BET. ZID B8 - NP	34,50	1,83	30,97
	S3	AB STUP B9 - VP	44,10	2,07	48,08
	S4	AB GREDA u osi 9 iznad VP	36,20	2,43	33,86

3.2.4. Razina obnove

Dana 23. veljače 2022. izveden je pregled konstrukcije sjeverne zgrade Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, koja je oštećena u potresu 22. ožujka 2020. Nakon brzog pregleda, zgrada je označena žutom naljepnicom i svrstana u kategoriju "Privremeno Neuporabljivo – Potrebne mjere hitne sanacije" (PN2). U travnju 2021. proveden je detaljan pregled te je prema EMS 98 klasifikaciji zgrada svrstana u razinu II oštećenja, što je u skladu s početnim procjenama iz brzog pregleda.

Tablica 2 Prikaz razina oštećenja (Izvor: projekt Capital Ing d.o.o.)

Kategorija	Korisćenje	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	

Detektirana oštećenja uključuju oštećenja na ispunskom i pregradnom zidu, horizontalne i vertikalne pukotine u spojevima, dijagonalne lomove, te potpuni slom nekih dijelova zida. Veliki dio oštećenja pregradnih zidova je saniran nakon potresa. Na spoju ulaznog trakta i zgrade dilatacije A pojavile su se pukotine na podnoj ploči, koje prate liniju dilatacije između različitih konstrukcijskih cjelina zgrade, što je rezultat neispravne izvedbe dilatacije. Osim toga, u niskom prizemlju zgrade dilatacije A došlo je do diferencijalnog slijeganja podne ploče. Iako je slijeganje započelo prije potresa, tijekom potresa došlo je do značajnog povećanja njegove veličine. Uz to su zabilježena manja nekonstruktivna oštećenja poput pukotina žbuke i otpadanja žbuke.

Tablica 3 Razredi važnosti građevina (Izvor: [5])

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.

Na temelju svega navedenog, zgrada je klasificirana u razinu II oštećenja prema EMS 98 i proglašena privremeno neuporabljivom. Zgrada pripada razredu važnosti III (prema HRN EN 1998-1) [5], što znači da je u njoj moguće veće okupljanje ljudi. Sukladno članku 24. Tehničkog propisa za građevinske konstrukcije i [5], obnova zgrade mora biti izvedena na **Razinu 3: Pojačanje konstrukcije**, kako bi se osigurala potrebna potresna otpornost u skladu s važećim propisima i smanjenjem seizmičkog rizika.

4. NUMERIČKI MODEL KONSTRUKCIJE

Modeliranje i proračun postojeće konstrukcije proveden je u računalnom programu ETABS 20. Provedena su dva proračuna: linearni dinamički proračun prostorne konstrukcije metodom spektra odziva te nelinearni statički proračun metodom postupnog guranja.

4.1. Linearna analiza građevine

Proveden je proračun otpornosti postojeće okvirne konstrukcije na potres metodom spektra odziva. Shema konstrukcije po etažama i armatura u elementima prikazani su u priložima. Za proračun na potres pretpostavljeno je raspucavanje armiranobetonskih elemenata i redukcija njihove krutosti na savijanje i poprečnu silu od 50%. Korišten je faktor povjerenja 1,0. Faktor važnosti građevine iznosi $\gamma_1 = 1,2$. Kvaliteta ugrađene armature je GA240 dok je beton kvalitete C25/30.

Stropne konstrukcije su modelirane kao membrane (eng. *membrane*) te diskretizirane kao jedan element između jednog polja greda. Membrane prenose sile samo u svojoj ravnini, odnosno nije moguće savijanje. Na taj način opterećenje se direktno prenosi na grede, trapezno ili trokutno, bez uzimanja u obzir savojne krutosti ploče.

Faktor ponašanja, uz pretpostavku niske razine duktilnosti konstrukcije, odabran je s vrijednošću $q = 1,5$, dok je temeljno tlo klasificirano kao tip C.

Rubni uvjeti su definirani kao upeti ležajevi.

Utjecaj podruma, krovne kućice i pergole je zanemaren pri proračunu na potresno djelovanje.

4.1.3. Analiza opterećenja

Stalno opterećenje:

U nastavku su prikazana opterećenja na konstrukciju. Budući da je sitnorebrasti strop modeliran kao membrana, težina AB ploče automatski je uključena u slučaj opterećenja DEAD. Kod roštiljne stropne konstrukcije stropna konstrukcija je modelirana kao mebrana sa rebrima u dva okomita smjera, pa su u tom slučaju težina AB ploče i rebara automatski uzeti u obzir u slučaju opterećenja DEAD.

Stropna konstrukcija uvučenog kata (i djelomice strop 2.kata – prohodna terasa)	
Šljunak 5 cm	1.00 kN/m ²
Beton za pad $h_{sr} = 6$ cm	1.50 kN/m ²
Slojevi izolacija	0.25 kN/m ²
Rebra 8/35 cm (e = 50 cm)	1.50 kN/m ²
Podgled (gipskarton + instalacije)	0.50 kN/m ²
Ukupno (sitnorebrasti strop)	$\Sigma \Delta g = 4.75$ kN/m ²
Ukupno (roštilj)	$\Sigma \Delta g = 3.25$ kN/m ²

Linijsko opterećenje od težine nadozida $g_1' = 3.00$ kN/m'

Stropna konstrukcija 2.kata, 1.kata, niskog i visokog prizemlja	
Lagane GK pregrade	0.50 kN/m ²
Slojevi poda + glazura	1.50 kN/m ²
Slojevi izolacija	0.25 kN/m ²
Rebra 8/35 cm (e = 50 cm)	1.50 kN/m ²
Podgled (gipskarton + instalacije)	0.50 kN/m ²
Ukupno (sitnorebrasti strop)	$\Sigma \Delta g = 4.25$ kN/m ²
Ukupno (roštilj)	$\Sigma \Delta g = 2.75$ kN/m ²

Linijsko opterećenje od težine fasade (staklo) $g_1' = 2.50$ kN/m'

Uporabno opterećenje:

Uporabno opterećenja prema [11]	
Krovište (kategorija H – krovovi s nagibom manjim od 20°)	$q = 0.60 \text{ kN/m}^2$
Prostori u kojima se mogu okupljati ljudi (kategorija C1 – Prostorije sa stolovima kao što su dječji vrtići, jaslice, škole, učionice, recepcije, zbornice...)	$q = 3.00 \text{ kN/m}^2$
Balkoni (kategorija P – Krovne terase, trijemovi, lođe, balkoni, izlazni podesti)	$q = 4.00 \text{ kN/m}^2$

Za navedena djelovanja su dalje napravljene kombinacije prikazane u tablici.

Tablica 4 Prikaz definiranih kombinacija opterećenja

Name	Load Name	SF
GSN	VT	1,35
GSN	dG	1,35
GSN	Q	1,5
MASS	VT	1
MASS	dG	1
MASS	Q	0,3

Potresno djelovanje

Budući da obnova zgrade treba biti izvedena na razinu 3 iz karte potresnih područja Republike Hrvatske iščitani su podaci horizontalnih vršnih ubrzanja a_{gR} tla tipa A za povratna razdoblja od $T_p = 95$ godina te $T_p = 225$ godina.



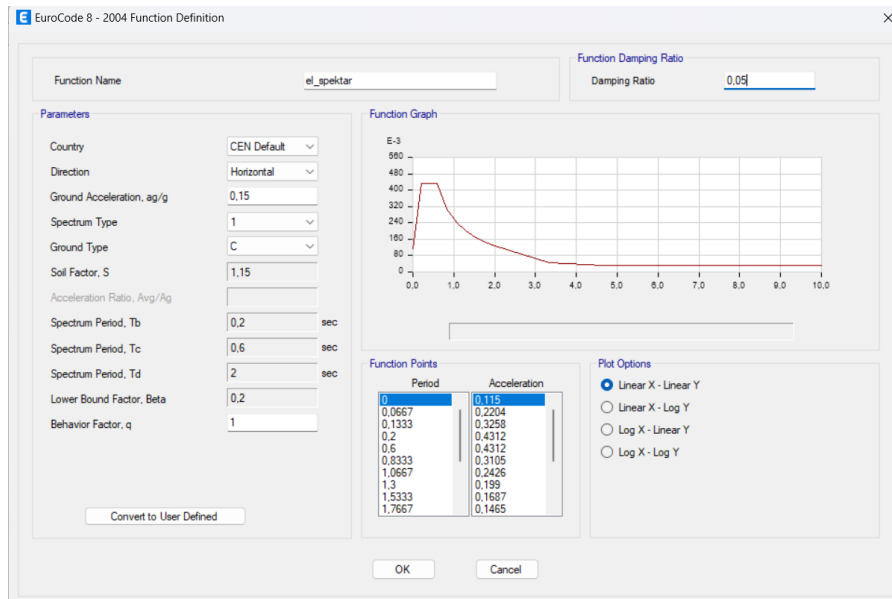
Slika 27 Vrijednosti horizontalnih vršnih ubrzanja tla (Izvor: [12])

Na temelju vršnog ubrzanja tla i podacima o tlu, faktoru važnosti i faktoru ponašanja koji su navedeni na početku poglavlja, mogu se definirati spektri odziva.

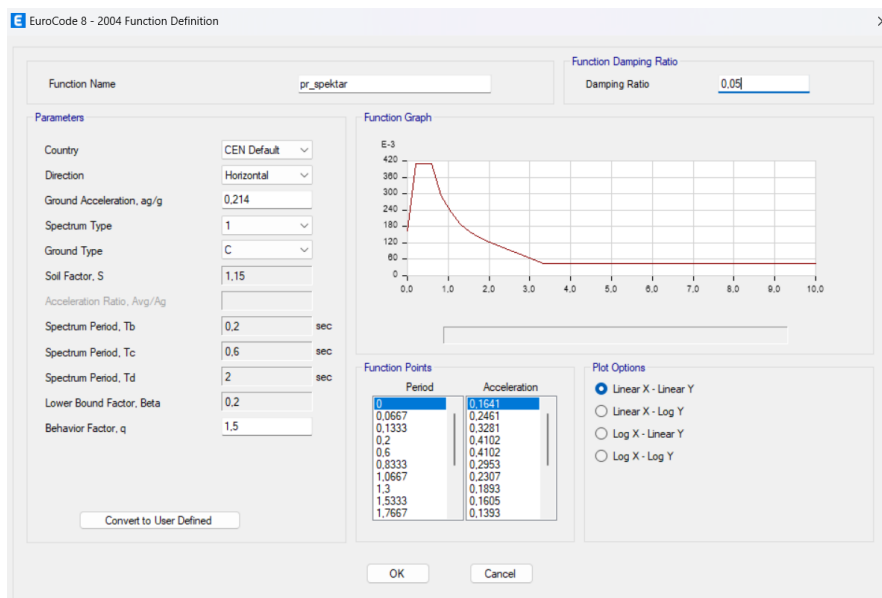
Vršno ubrzanje tla za traženi period množi se sa faktorom važnosti te se tako dobivaju sljedeće vrijednosti:

$$\text{za } T=95 \text{ godina} \quad a_g = 0,125 \cdot 1,2 \text{ g} = 0,125\text{g}$$

$$\text{za } T=225 \text{ godina} \quad a_g = 0,178 \cdot 1,2 \text{ g} = 0,214\text{g}$$

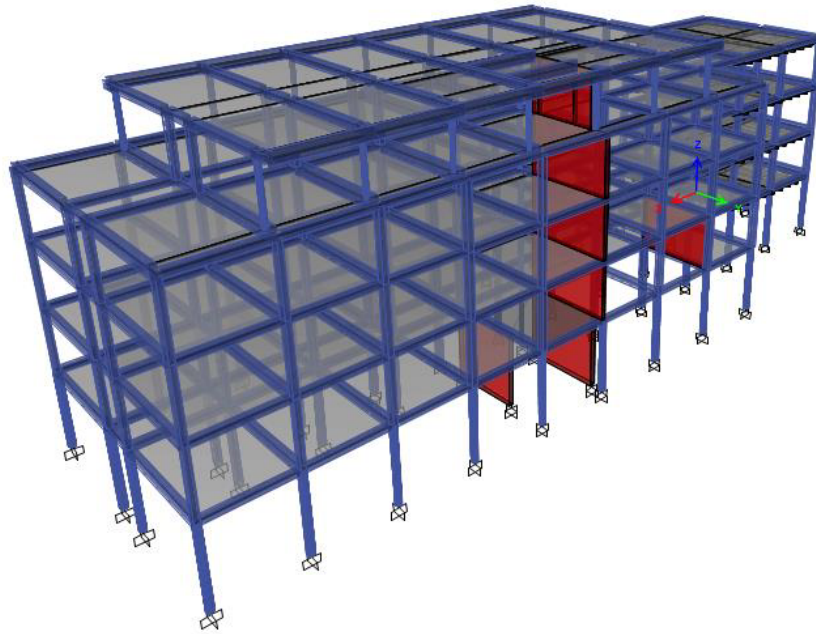


Slika 28 Definiranje elastičnog spektra odziva

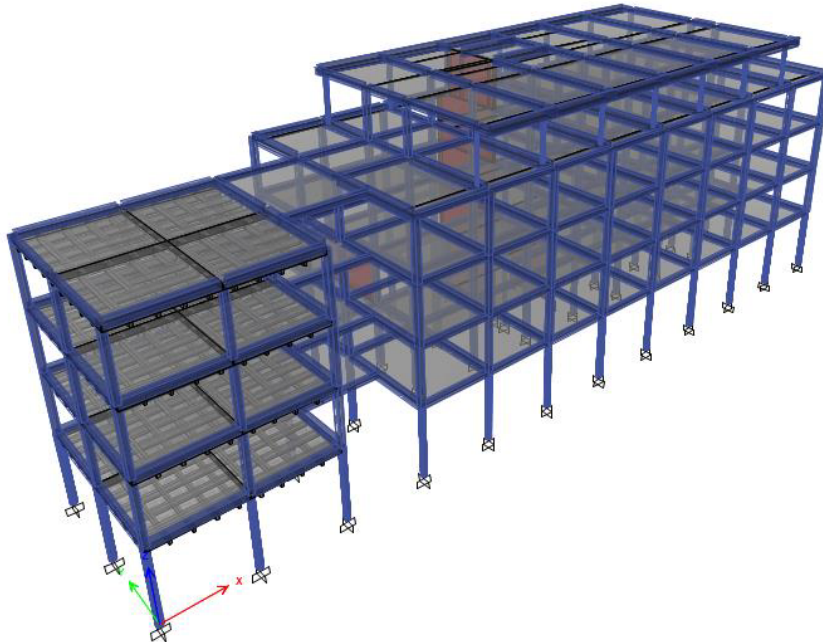


Slika 29 Definiranje projektnog spektra odziva

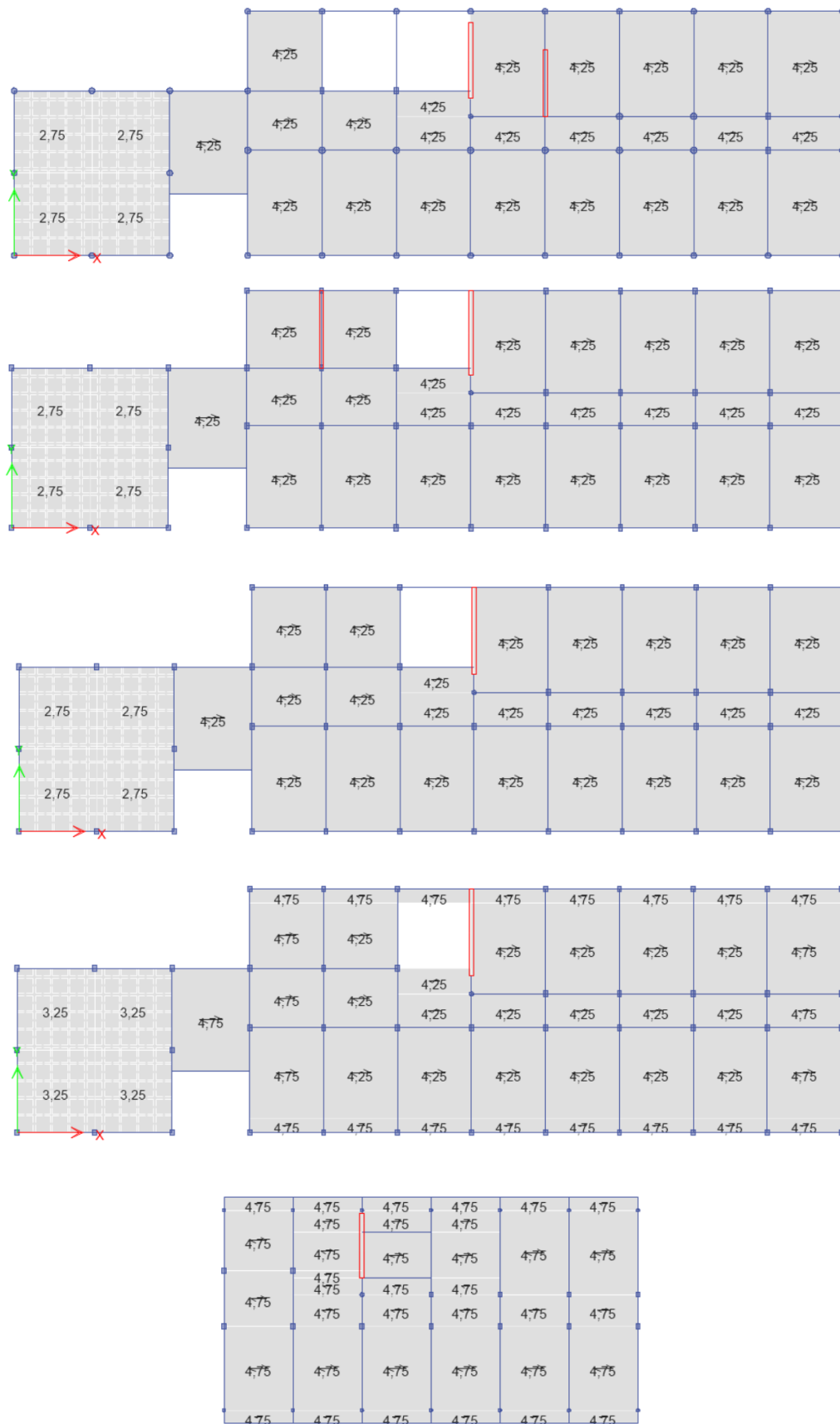
4.1.4. Prikaz 3D modela i opterećenja građevine



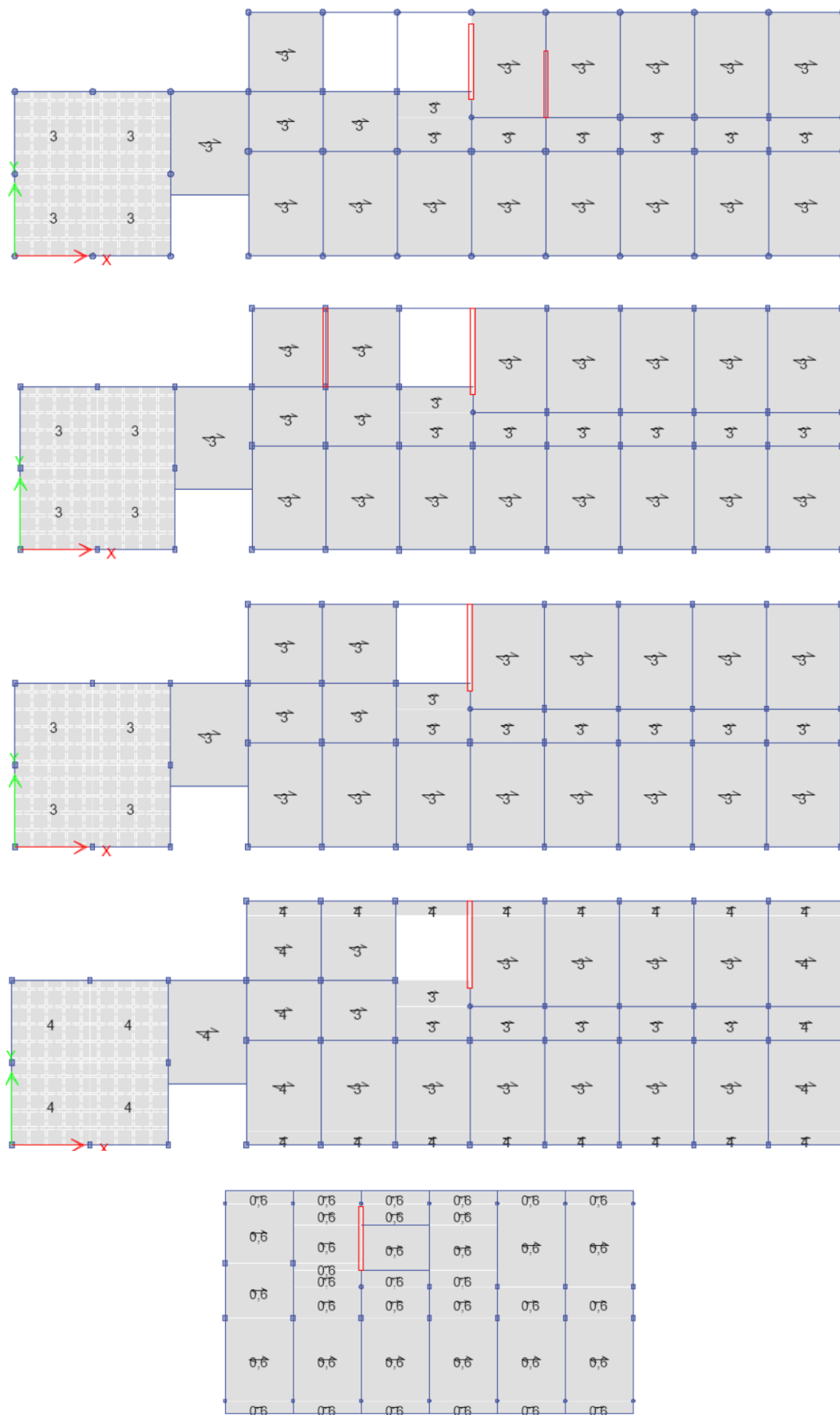
Slika 30 Prikaz 3D modela (pogled 1)



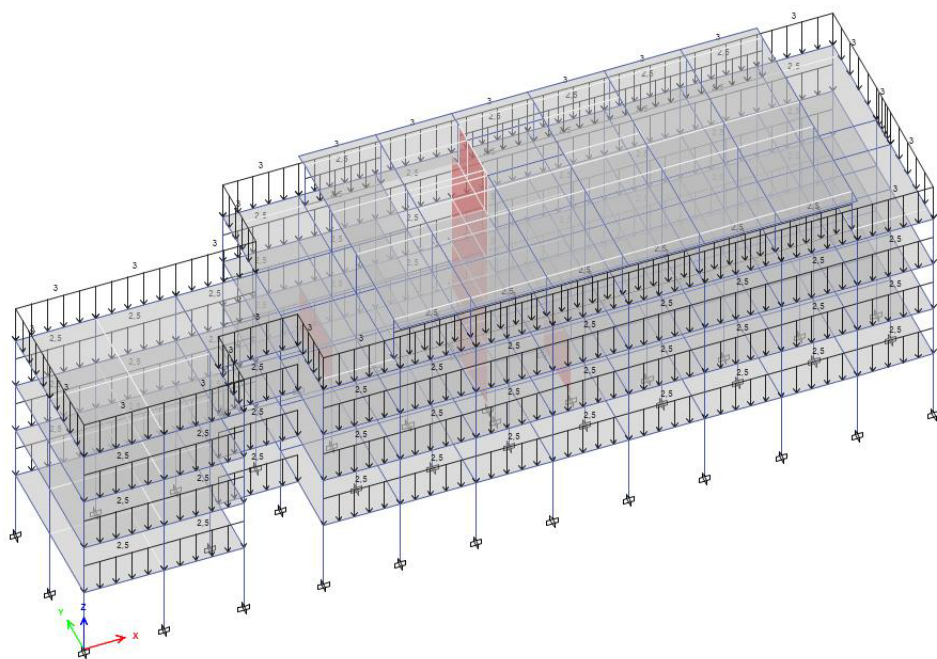
Slika 31 Prikaz 3D modela (pogled 2)



Slika 32 Prikaz dodatnog stalnog djelovanja na membrane redom od niskog prizemlja do 3. kata



Slika 33 Prikaz korisnog djelovanja na membrane redom od niskog prizemlja do 3. kata



Slika 34 Prikaz linijskog opterećenja na prostornom modelu

Linijsko opterećenje zadano je na mjestima staklene fasade, točnije na sjevernom i južnom pročelju svake etaže. Uz to budući da je 3. etaža uvučena na rubovima prohodne terase naneseo je opterećenje od težine nadozida.

4.1.5. Dinamičke karakteristike građevine

U nastavku su dane informacije o dinamičkim karakteristikama građevine, kao što su vlastiti period titranja, frekvencije te oblici titranja. ove informacije pomažu nam u razumijevanju ponašanja konstrukcije pod djelovanjem dinamičkih opterećenja.

U tablicama u nastavku prikazani su periodi i frekvencije za svaki modalni oblik, te postotak aktivirane mase u svakom smjeru.

Tablica 5 Prikaz perioda i frekvencija

Case	Mode	Period sec	Frequency cyc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad ² /sec ²
Modal	1	2,218	0,451	2,8323	8,0219
Modal	2	1,551	0,645	4,0523	16,4209
Modal	3	0,762	1,312	8,2421	67,9324
Modal	4	0,744	1,344	8,4458	71,3319
Modal	5	0,546	1,832	11,5137	132,5648
Modal	6	0,47	2,128	13,3713	178,7913
Modal	7	0,39	2,561	16,0913	258,9296
Modal	8	0,319	3,137	19,7092	388,4517
Modal	9	0,273	3,661	23,0052	529,2396
Modal	10	0,264	3,786	23,7887	565,9028
Modal	11	0,239	4,19	26,3284	693,186
Modal	12	0,232	4,313	27,1002	734,4226
Modal	13	0,207	4,838	30,3993	924,1175
Modal	14	0,198	5,056	31,7655	1009,0491
Modal	15	0,171	5,855	36,7878	1353,3447
Modal	16	0,169	5,911	37,1385	1379,2715

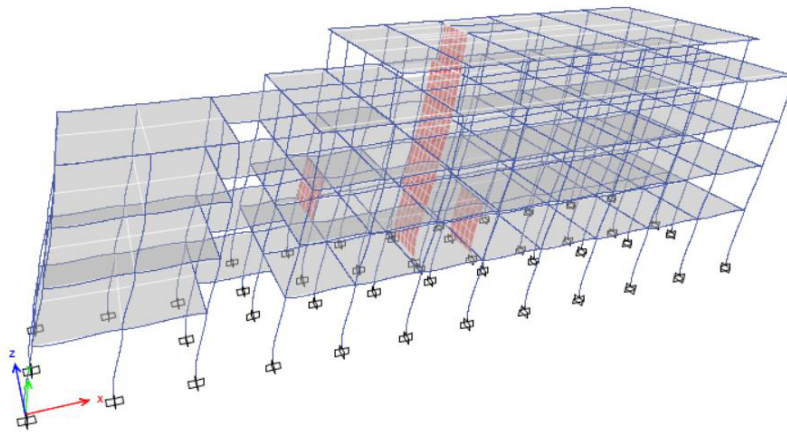
Tablica 6 Prikaz aktivirane mase

Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Modal	1	2,218	0,8553	4,175E-06	0	0,8553	4,175E-06	0	1,147E-05	0,1652	0,0015	1,147E-05	0,1652	0,0015
Modal	2	1,551	0,0009	0,0001	0	0,8563	0,0001	0	0,0089	0,0014	0,889	0,0089	0,1666	0,8905
Modal	3	0,762	0,0679	0,1826	0	0,9242	0,1827	0	0,0642	0,4748	0,0018	0,0731	0,6414	0,8923
Modal	4	0,744	0,025	0,5362	0	0,9492	0,7189	0	0,1809	0,1695	0,0045	0,2539	0,8109	0,8968
Modal	5	0,546	1,803E-05	0,0315	0	0,9492	0,7504	0	0,0257	0,0002	0,0796	0,2796	0,8111	0,9764
Modal	6	0,47	0,0288	0,0022	0	0,978	0,7525	0	0,0013	0,1025	1,076E-05	0,2809	0,9136	0,9764
Modal	7	0,39	0,0038	0,0124	0	0,9818	0,765	0	0,0328	0,0117	0,0066	0,3137	0,9253	0,983
Modal	8	0,319	0,0122	3,794E-06	0	0,994	0,765	0	0,0034	0,0472	0,001	0,3172	0,9725	0,984
Modal	9	0,273	0,0024	0,0013	0	0,9964	0,7663	0	0,0013	0,0103	0,0066	0,3185	0,9828	0,9906
Modal	10	0,264	0	0,103	0	0,9964	0,8693	0	0,3431	2,417E-06	0,0023	0,6616	0,9828	0,9929
Modal	11	0,239	0,0031	0,0001	0	0,9995	0,8693	0	4,612E-05	0,015	0,0004	0,6616	0,9978	0,9933
Modal	12	0,232	0,0002	0,0074	0	0,9997	0,8767	0	0,0046	0,0007	0,0002	0,6662	0,9985	0,9935
Modal	13	0,207	3,112E-05	0,0035	0	0,9997	0,8802	0	0,01	0,0001	0,0019	0,6762	0,9986	0,9954
Modal	14	0,198	0,0002	0,0005	0	0,9999	0,8806	0	0,0006	0,0012	0,0026	0,6768	0,9997	0,998
Modal	15	0,171	2,856E-06	0,0085	0	0,9999	0,8891	0	0,018	1,117E-05	4,793E-06	0,6949	0,9998	0,998
Modal	16	0,169	1,144E-06	0,0663	0	0,9999	0,9554	0	0,1811	5,195E-06	0,0007	0,876	0,9998	0,9987

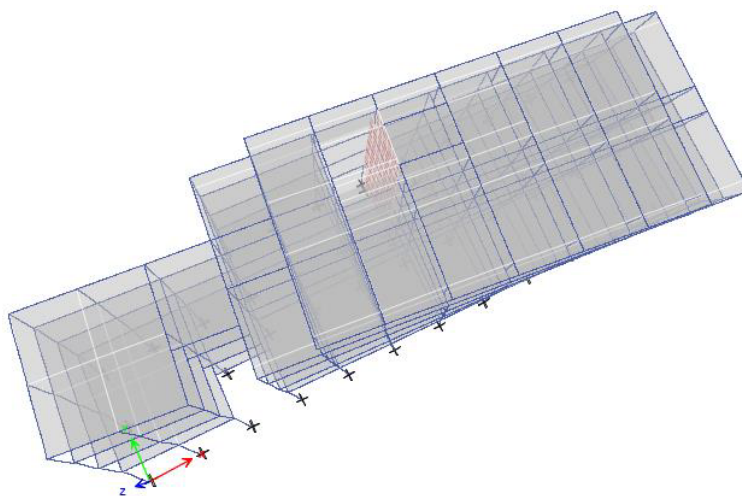
U okviru modalne analize razmatrano je 16 modalnih oblika kako bi se ispunio uvjet aktivacije mase veće od 90%. Iz tablice se može primijetiti da se u prvom obliku aktivira 85%

mase u x smjeru, dok se u drugom obliku aktivira 89% mase rotacijom oko osi z, odnosno torzijom. Veća aktivacija mase u y smjeru javlja se u 4. obliku titranja. Prisutnost torzije u prvim oblicima je očekivana zbog tlocrtne nepravilnosti konstrukcije. Također, budući da su okviri postavljeni u poprečnom smjeru, i da su u uzdužnom smjeru povezani samo ukrutnim rebrima očekivano je da prvi oblik titranja bude translacija u x - smjeru.

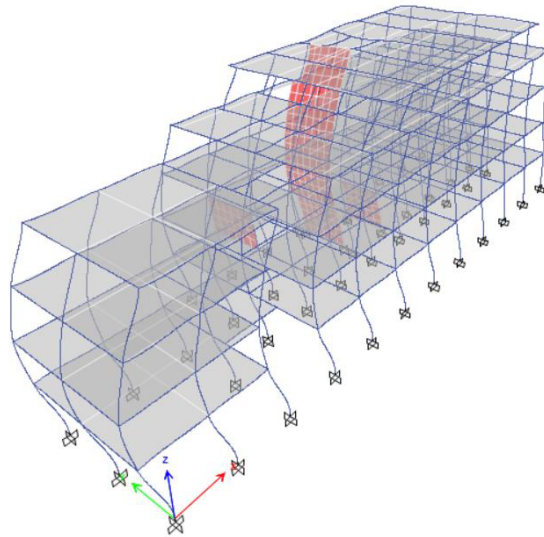
Na slikama u nastavku su prikazana prva četiri oblika titranja. Prvi oblik titranja je translacijski u smjeru x – osi s periodom $T=2,21$ s. Drugi oblik titranja je torzija s periodom od 1,55 s, a u trećem obliku ponovno se može vidjeti translacija u smjeru x – smjeru, sada sa jednom točkom infleksije, s periodom 0,762 s. Četvrti oblik titranja je translacijski u smjeru osi y te ima period 0,744 s.



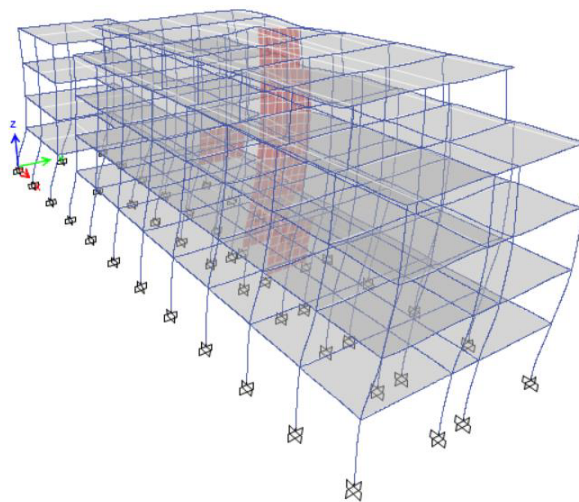
Slika 35 Prvi oblik titranja (translacija u x smjeru, $T = 2,218$ s)



Slika 36 Drugi oblik titranja (torzija, $T = 1,551$ s)



Slika 37 Treći oblik titranja (translacija u x smjeru, $T = 0,762$ s)



Slika 38 Četvrti oblik titranja (translacija u y smjeru, $T = 0,744$ s)

4.1.6. Rezultati linearnog proračuna

U nastavku su prikazani rezultati linearnog proračuna metodom spektra odziva točnije koeficijent poprečne sile, maksimalni međukatni pomaci i poprečne sile po etažama.

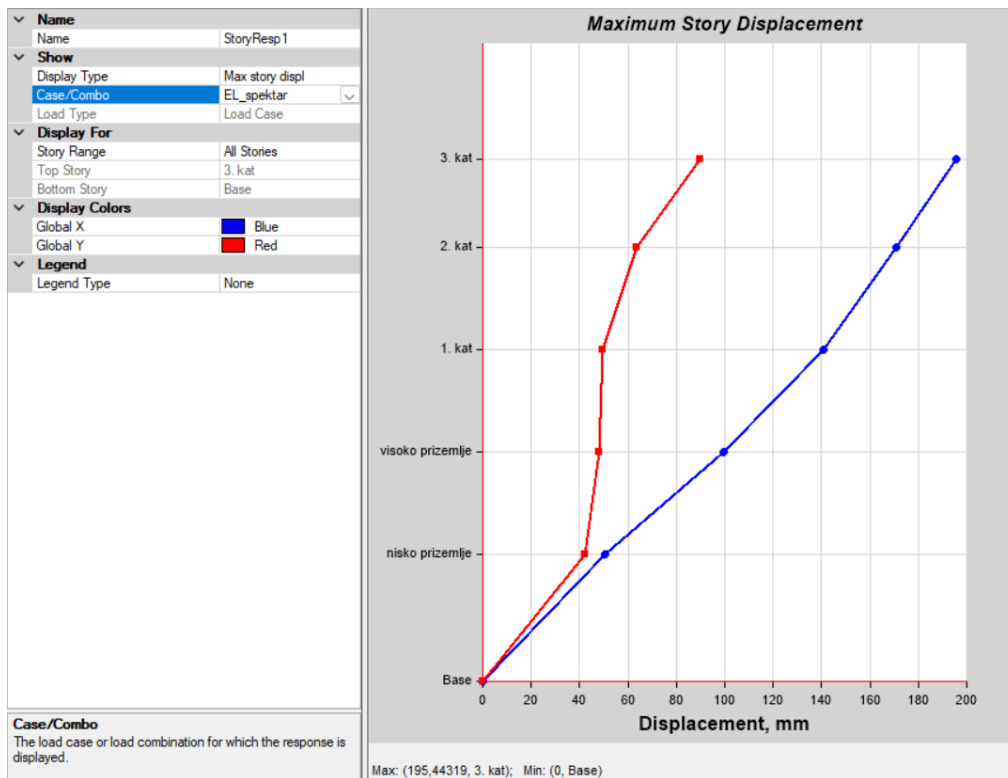
Output Case	Case Type	Step Type	FX kN	FY kN	FZ kN	MX kN-m	MY kN-m	MZ kN-m
VT	LinStatic		1,309E-06	0	15780,7161	132170,7098	-487906,5807	-1,525E-05
dG	LinStatic		3,123E-06	0	17902,7625	144228,7997	-602361,225	-2,859E-05
Q	LinStatic		1,229E-06	0	10891,755	85733,1686	-347116,0312	-8,678E-06
Ptr_X	LinStatic		0	0	0	0	0	0
Ptr_Y	LinStatic		0	0	0	0	0	0
PR_spektar	LinRespSpec	Max	3690,4995	9036,9903	1,923E-05	132579,7147	49067,1117	282281,6574
EL_spektar	LinRespSpec	Max	3880,198	9498,5166	2,022E-05	139391,7349	51589,2529	296680,6664
MASS	Combination		4,801E-06	0	36951,0051	302119,4601	-1194403	-4,645E-05
GSN	Combination		7,826E-06	0	61810,3287	501739,0908	-1992536	-0,0001

Slika 39 Ležajne reakcije

Na temelju ležajnih reakcija određen je koeficijent poprečne sile (eng. *Base shear*) za dva okomita smjera. Koeficijent poprečne sile omjer je poprečne sile u prizemlju i težine zgrade. Ukupna težina zgrade iznosi 3695,1 t.

$$B.S \text{ (smjer x)} = \frac{3690,5}{36951} = 9,99\%$$

$$B.S \text{ (smjer y)} = \frac{3690,5}{36951} = 24,1\%$$



Slika 40 Prikaz međukatnih pomaka

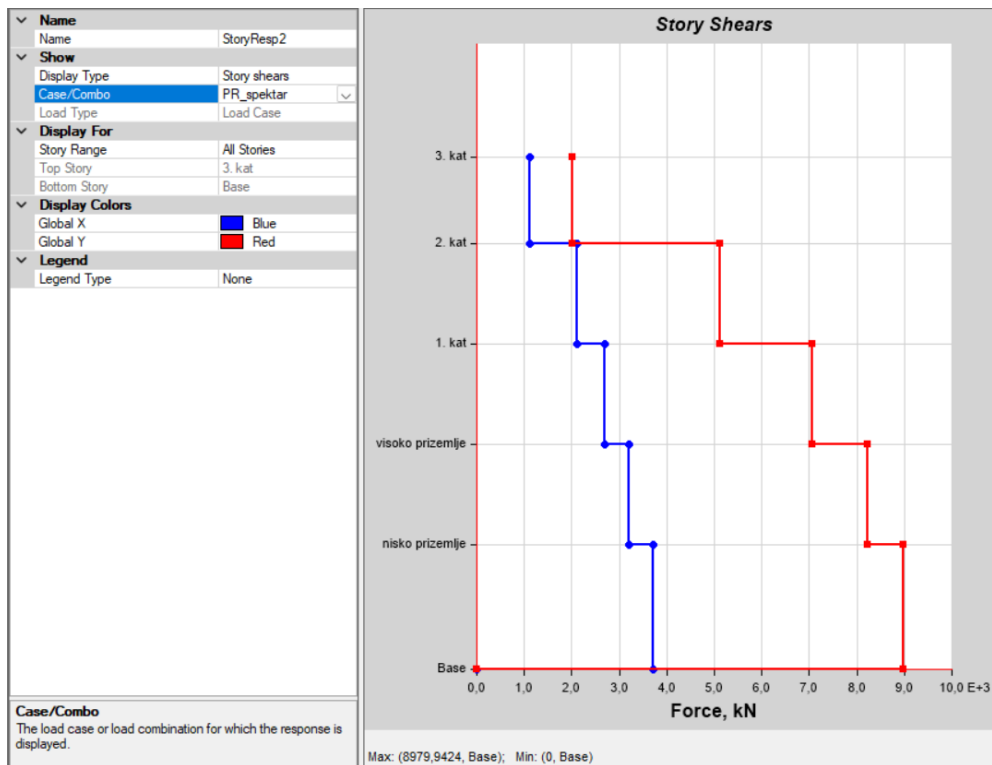
Sukladno [5] ograničenje međukatnog pomaka iznosi:

$$d_e \leq 0,005 h$$

$$\frac{0,05}{4} \leq 0,005$$

$$0,0125 > 0,005$$

Uvjet nije zadovoljen



Slika 41 Prikaz poprečnih sila po etažama

Najveća vrijednost poprečne sile u razini temelja u x – smjeru iznosi 3690 kN, a u smjeru y ta vrijednost iznosi 9037 kN.

Budući da je sustav promatrane građevine okvirna AB konstrukcija sa okvirima postavljenima u poprečnom smjeru, rezultati prikazani na slici 40 i slici 41 su očekivani. Poprečne sile u većoj mjeri preuzimaju okviri u y smjeru, budući da je u tom smjeru veća krutost. Posljedično, pomaci su izraženiji u x-smjeru.

4.2. Nelinearna analiza

Izvršen je proračun otpornosti ravninskog armiranobetonskog okvira na potres primjenom metode postupnog guranja, pri čemu je analiziran okvir koji je dio konstrukcije promatrane postojeće zgrade. Rezultati su prikazani i dana je usporedba različitih oblika otkazivanja stupova. Uspoređeni su rezultati metode spektra odziva te metode postupnog guranja za dva različita slučaja. Usporedba se vrši na temelju IZO faktora.

Indeks znatnog oštećenja konstrukcije (IZO) je omjer proračunske potresne otpornosti i zahtjeva za konstrukciju za granično stanje znatnog oštećenja.

Ulazni podaci za konstrukciju

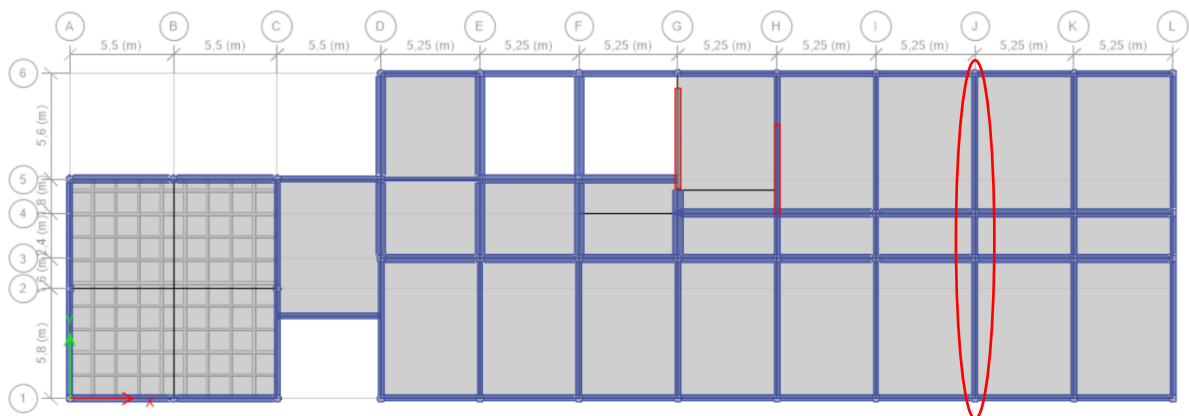
Schema okvira i armature prikazana je na slici 43. Kvaliteta betona je C25/30, dok je kvaliteta ugrađene armature GA240. Korišten je faktor povjerenja 1,0.

Prema [1] svojstva elementa za nelinearni proračun uzeta su sa srednjim vrijednostima svojstava materijala.

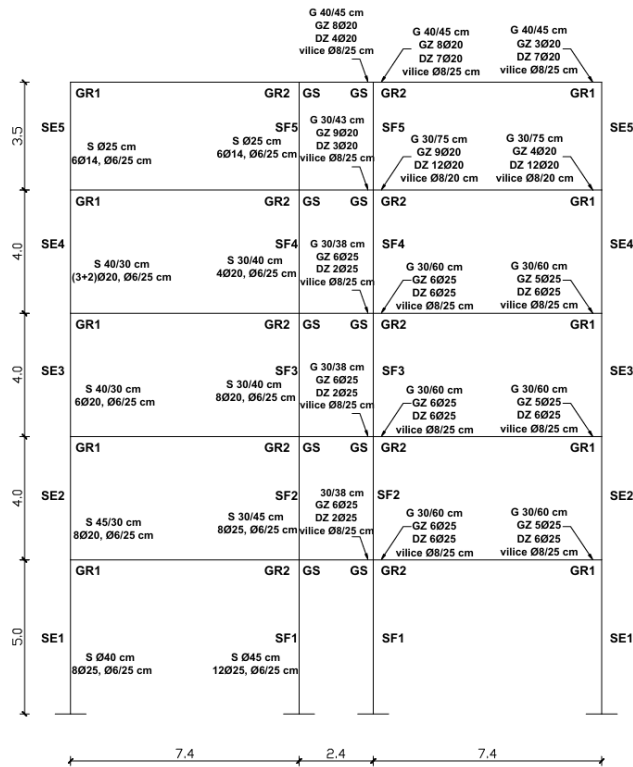
$$\text{Za čelik } \frac{f_{ym}}{f_{yk}} = 1,15 \quad \longrightarrow \quad f_{ym} = 1,15 \cdot 240 = 276 \text{ MPa}$$

$$\text{Za beton } f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa} \quad \longrightarrow \quad f_{ck} = 33 \text{ MPa}$$

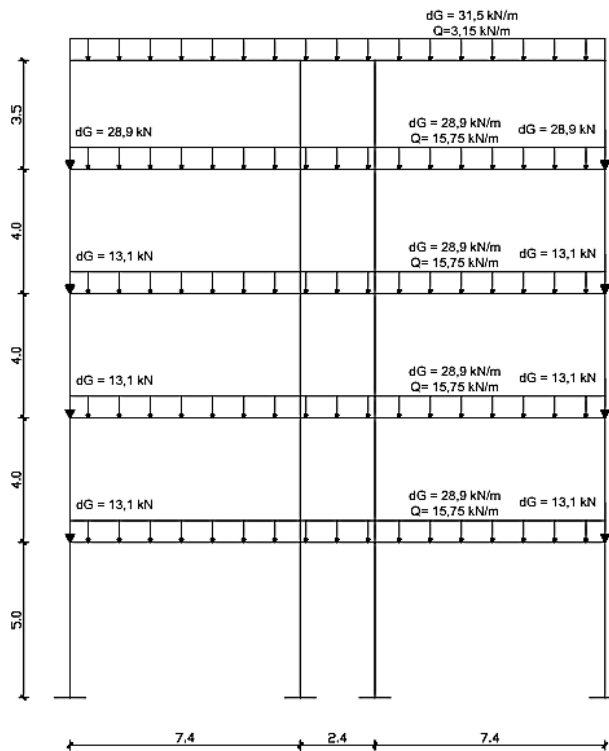
Vršno ubrzanje tla na lokaciji zgrade iznosi 0,247g. Budući da je faktor važnosti 1,2. Referentno vršno ubrzanje za povratni period od 475 godina iznosi $a_g = 0,30g$.



Slika 42 Prikaz izdvojenog okvira iz tlocrta prostorne konstrukcije



Slika 43 Shema okvira



Slika 44 Shema opterećenja okvira

Težina okvira s odgovarajućim potresnim opterećenjem iznosi 3640,35 kN. Kada je riječ o osnovnim dinamičkim parametrima, prvi period okvirne konstrukcije iznosi $T_1 = 1,37$ s, dok je drugi period $T_2 = 0,45$ s.

U programskom paketu SAP2000 analizirani su presjeci i ovijenost betona koja će se uzeti u nelinearnom proračunu. Poprečni presjeci i armatura greda i stupova prikazani su u tablicama u nastavku.

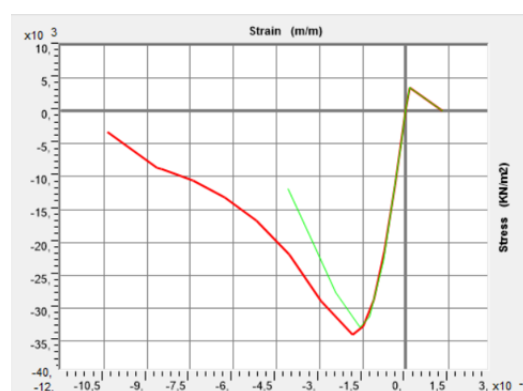
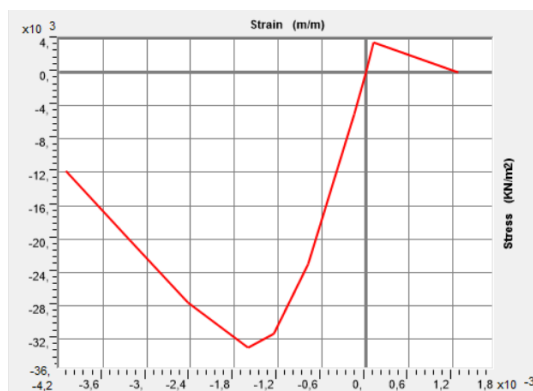
Tablica 7 Prikaz armature greda ravninskog okvira prema položajima

Naziv	Položaj	Donja zona	Gornja zona
G30/60	GR1	6 ϕ 25	5 ϕ 25
G30/60	GR2	6 ϕ 25	6 ϕ 25
G30/38	GS	2 ϕ 25	6 ϕ 25
G30/75	GR1	12 ϕ 20	4 ϕ 20
G30/75	GR2	12 ϕ 20	9 ϕ 20
G30/43	GS	3 ϕ 20	9 ϕ 20
G40/45	GR1	7 ϕ 20	3 ϕ 20
G40/45	GR2	7 ϕ 20	8 ϕ 20
G40/45	GS	4 ϕ 20	8 ϕ 20

Tablica 8 Prikaz armature stupova ravninskog okvira

Naziv	Poprečni presjek [cm]	Armatura
SE1	D=40	8 ϕ 25
SF1	D=45	12 ϕ 25
SE2	30/45	8 ϕ 20
SF2	30/45	8 ϕ 25
SE3	30/40	6 ϕ 20
SF3	30/40	8 ϕ 20
SE4	30/40	(3+2) ϕ 20
SF4	30/40	4 ϕ 20
SE5	D=25	6 ϕ 14
SF5	30/40	4 ϕ 20

Zbog nedostatnog armiranja poprečnom armaturom, većina presjeka se prema krivulji ne može smatrat ovijenim, dok su tek kružni presjeci promjera D=40 i D=45 cm mogu smatrati ovijenim.



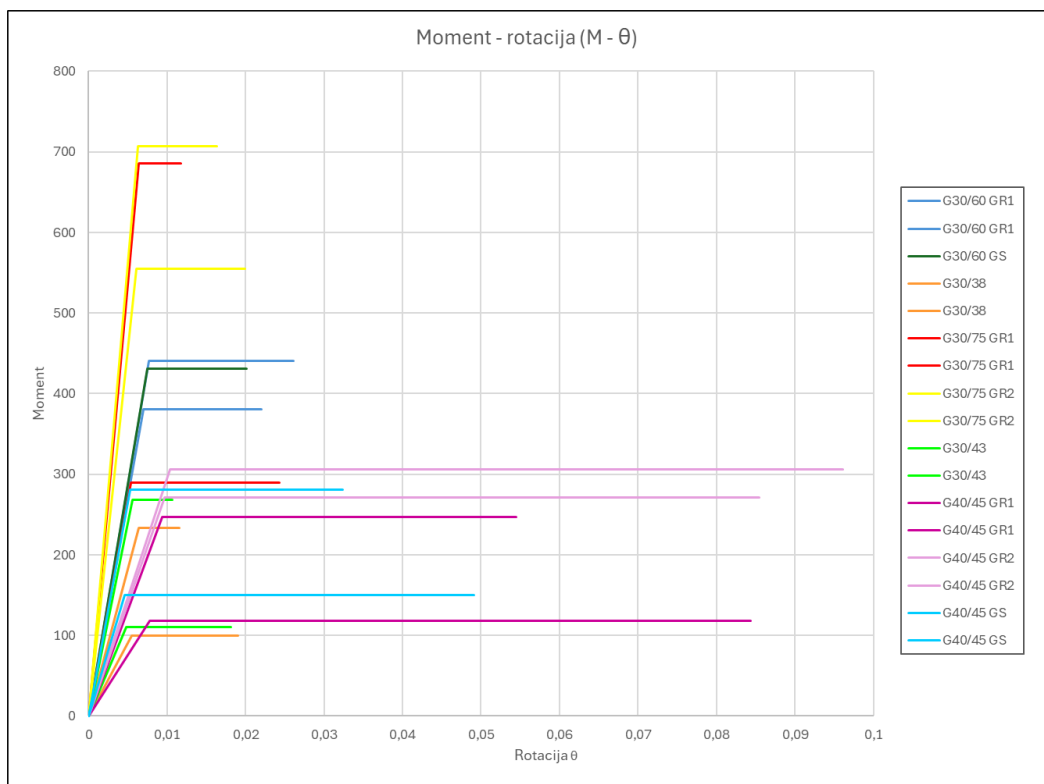
Slika 45 Prikaz krivulje a) neovijenog betona b) ovijenog betona

4.2.1. Definiranje nelinearnih svojstava

Nakon analize presjeka u softverskom paketu SAP2000 i postupku proračuna prema EN1998-3 [1] dobivene su vrijednosti za definiranje krivulja kapaciteta te zadavanje zglobova. Vrijednosti za definiranje plastičnih zglobova prikazani su u tablici 9 i tablici 10. Budući da grede imaju nesimetričnu armaturu za njih je zadana asimetrična krivulja kapaciteta. U tom slučaju je ponašanje grede u smjeru gravitacije i suprotno njemu različito. To se može i primijetiti na slici 46, gdje su dvije krivulje kapaciteta greda istog presjeka označene istom bojom.

Tablica 9 Vrijednosti parametara greda u odnosu na položaj elemenata unutar konstrukcije

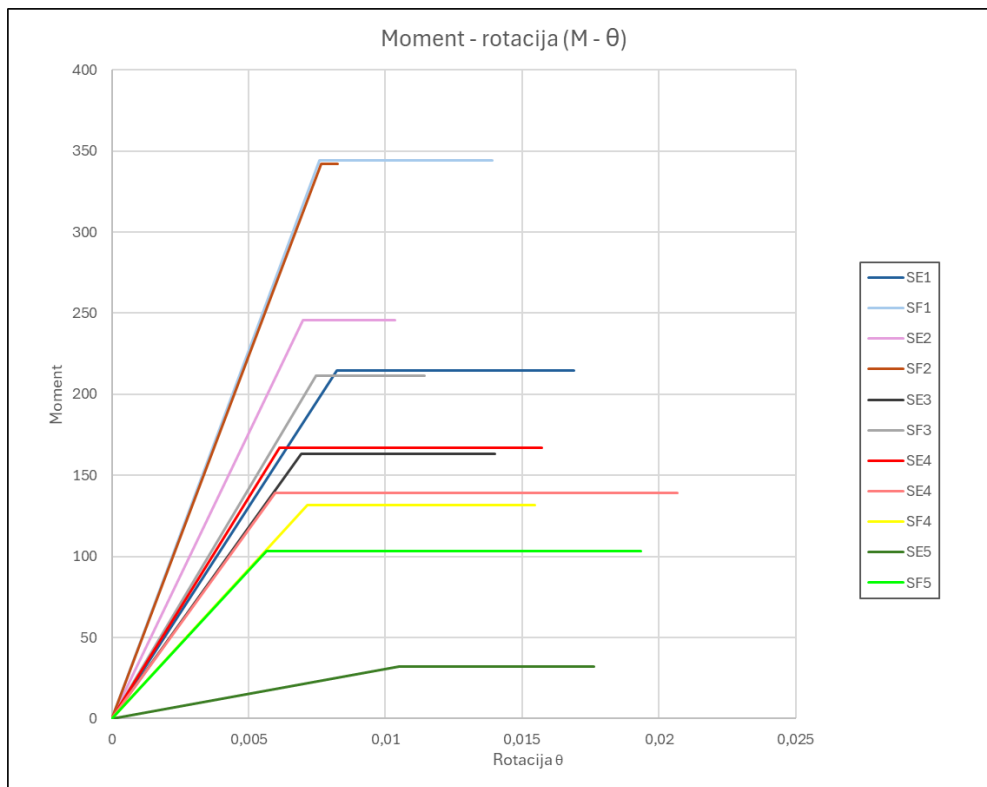
pozicija	H (m)	L_{pl}	θ_y	θ_u	θ_{SD}	M_{pl} (kNm)	M/V
G30/60 (GR1)	7,4	0,76	0,0077 (0,0069)	0,0261 (0,0220)	0,0195 (0,0165)	440,57 (380,25)	3,7
G30/60 (GR2)	7,4	0,76	0,0075	0,0201	0,0151	430,90	3,7
G30/38 (GS)	2,4	0,47	0,0055 (0,0064)	0,0190 (0,0116)	0,0143 (0,0087)	99,87 (233)	1,2
G30/75 (GR1)	7,4	0,72	0,0063 (0,0054)	0,0118 (0,0243)	0,0088 (0,0183)	685,62 (289,58)	3,7
G30/75 (GR2)	7,4	0,72	0,0063 (0,0060)	0,0163 (0,0199)	0,0122 (0,0150)	706,99 (554,45)	3,7
G30/43 (GS)	2,4	0,42	0,0048 (0,0056)	0,0181 (0,0107)	0,0136 (0,0080)	110,65 (268,39)	1,2
G40/45 (GR1)	7,4	0,68	0,0094 (0,0077)	0,0545 (0,0844)	0,0408 (0,0633)	246,81 (118,15)	3,7
G40/45 (GR2)	7,4	0,68	0,0097 (0,0104)	0,0854 (0,0961)	0,0641 (0,0721)	271,14 (306)	3,7
(G40/45) (GS)	2,4	0,43	0,0047 (0,0053)	0,0494 (0,0324)	0,0371 (0,0243)	149,61 (280,40)	1,2



Slika 46 Graf usporedbe krivulja moment-rotacija gređa

Tablica 10 Vrijednosti parametara stupova u odnosu na položaj elemenata unutar konstrukcije

pozicija	H (m)	Lpl	θ_y	θ_u	θ_{SD}	M_{pl} (kNm)	P (kN)	VR (kN)	M/V
SE1	5	0,52	0,0082	0,0169	0,0127	214,7	788,8	119,5	2,75
SF1	5	0,53	0,0076	0,0139	0,0104	344,4	1021,9	160,3	2,7
SE2	4	0,52	0,0070	0,0104	0,0078	245,84	624	103,8	1,95
SF2	4	0,57	0,0077	0,0083	0,0062	341,9	814,7	147,8	1,92
SE3	4	0,49	0,0069	0,0140	0,0105	163,0	458,9	67,9	1,92
SF3	4	0,49	0,0074	0,0114	0,0086	211,4	616,5	79,7	1,95
SE4	4	0,5	0,0061 (0,0060)	0,0157 (0,020)	0,0118 (0,0155)	166,9 (139,1)	295	68,7	1,67
SF4	4	0,51	0,0072	0,0155	0,0116	131,9	419,8	56,5	1,89
SE5	3,5	0,47	0,0105	0,0176	0,0132	31,8	118,2	46,7	1,66
SF5	3,5	0,45	0,0057	0,0193	0,0145	103,1	211,9	58,5	1,73



Slika 47 Graf usporedbe krivulja moment-rotacija stupova

Osim toga za stupove je proračunata i otpornost elemenata na poprečnu silu (Tablica 10). Budući da je kod postojećih građevina poprečna armatura često mala u odnosu na današnji standard, otpornost elementa na poprečnu silu je često mjerodavna. U nastavku je prikazan proračun otpornosti stupa okvira na poprečnu silu sukladno HRN EN 1998-3 [3].

Posmična čvrstoća za cikličko opterećenje armiranobetonskih elemenata iznosi:

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \left[\frac{h-x}{2L_V} \min(N; 0,55A_c f_c) + (1 - 0,05 \min(5; \mu_{\Delta}^{pl})) \right] \times$$

$$\times \left[0,16 \max(0,5; 100\rho_{tot}) \left(1 - 0,16 \min\left(5; \frac{L_V}{h}\right) \right) \sqrt{f_c} A_c + V_w \right] \quad (4)$$

mjerne jedinice [MN, m]

Gdje su koeficijenti za rubni stup SE1 jednaki:

$h=0,40$; $x=0,34$ cm; $N = 788$ kN; $\gamma_{el}, \gamma_M=1$; $f_{sr} = 33$ MPa; $A_c=0,126$ m²; $L_V=2,75$; $\rho_{tot}=0,031$;

$\mu_{\Delta}^{pl}=2,0$.

A V_w (doprinos poprečne armature posmičnoj nosivosti) je jednako:

$$V_w = \frac{\pi}{2} \times \frac{A_{sw}}{s} \times f_{yw} \times (d - 2c) \text{ [MN]} \quad (5)$$

Gdje je $A_{sw} = 0,0001 \text{ m}^2$, s (razmak spona)=0,25 m, $f_{yw}=276 \text{ N/mm}^2$, $c = 0,03 \text{ m}$.

$$V_w = 0,05927 \text{ MN}$$

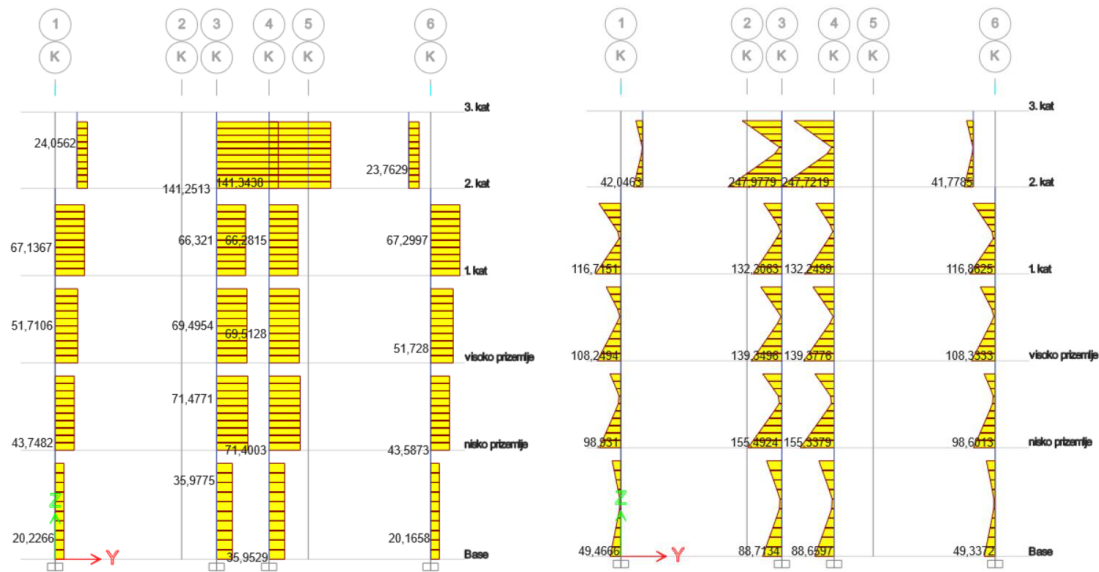
Razlog odabira isključivo stupova leži u činjenici da se, nakon definiranja momentnih plastičnih zglobova, pokazalo kako mehanizam otkazivanja okvira zapravo nastaje uslijed otkazivanja stupova, što će biti prikazano u rezultatima u poglavlju 4.2.3.2.

Uz to samom usporedbom grafova sa slike 46 i slike 47, može se primjetiti da su momenti plastičnosti za grede, kao i rotacijske sposobnosti kod većine greda veći u odnosu na stupove.

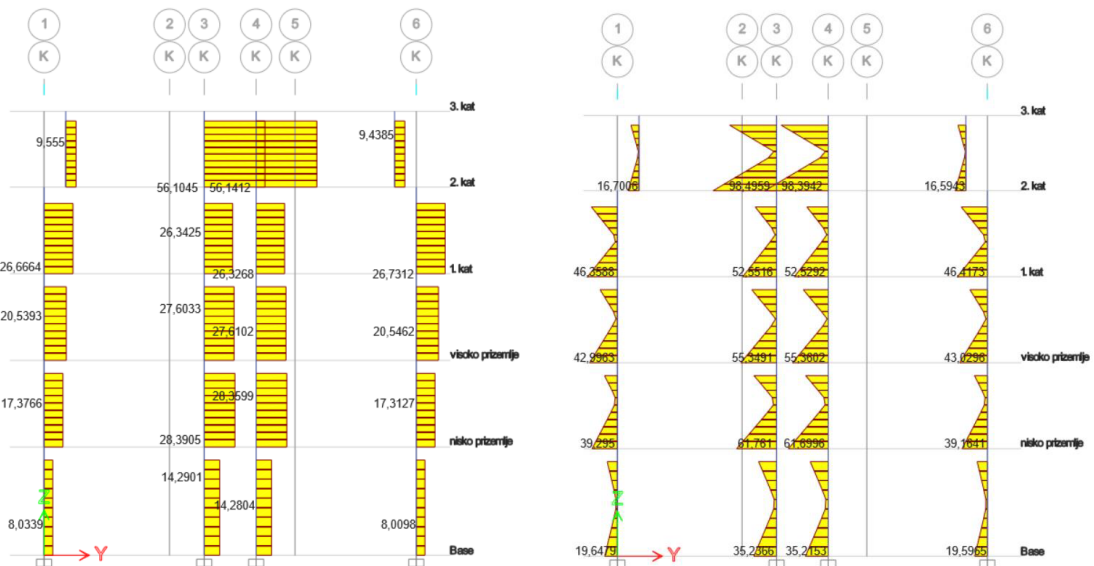
4.2.2. Proračun metodom spektra odziva

Radi kontrole i usporedbe proveden je proračun metodom spektra odziva na prostornom modelu koji je analiziran u prethodnom poglavlju. Granično stanje znatnog oštećenja odgovara prekoračenju poprečne sile u središnjem stupu najviše etaže. Otpornost stupa mjerodavnog okvira iznosi $V_R=55,5 \text{ kN}$. Granično stanje znatnog oštećenja događa se pri vršnom ubrzanju tla od 0,085 g što bi značilo da je **IZO faktor = 0,28**.

Na slikama u nastavku su prikazane vrijednosti unutarnjih sila točnije, poprečnih sila (lijevo) te momenata savijanja (desno), za projektno ubrzanje sa povratnim periodom od 225 godina (Slika 48) te ubrzanje koje definira potresnu otpornost konstrukcije (Slika 49).



Slika 48 Unutarnje sile za potresno djelovanje $a_g=0,214g$ ($T=225$ godina)



Slika 49 Prikaz unutarnjih sila za ubrzanje pri kojem konstrukcija doseže granično stanje znatnog oštećenja

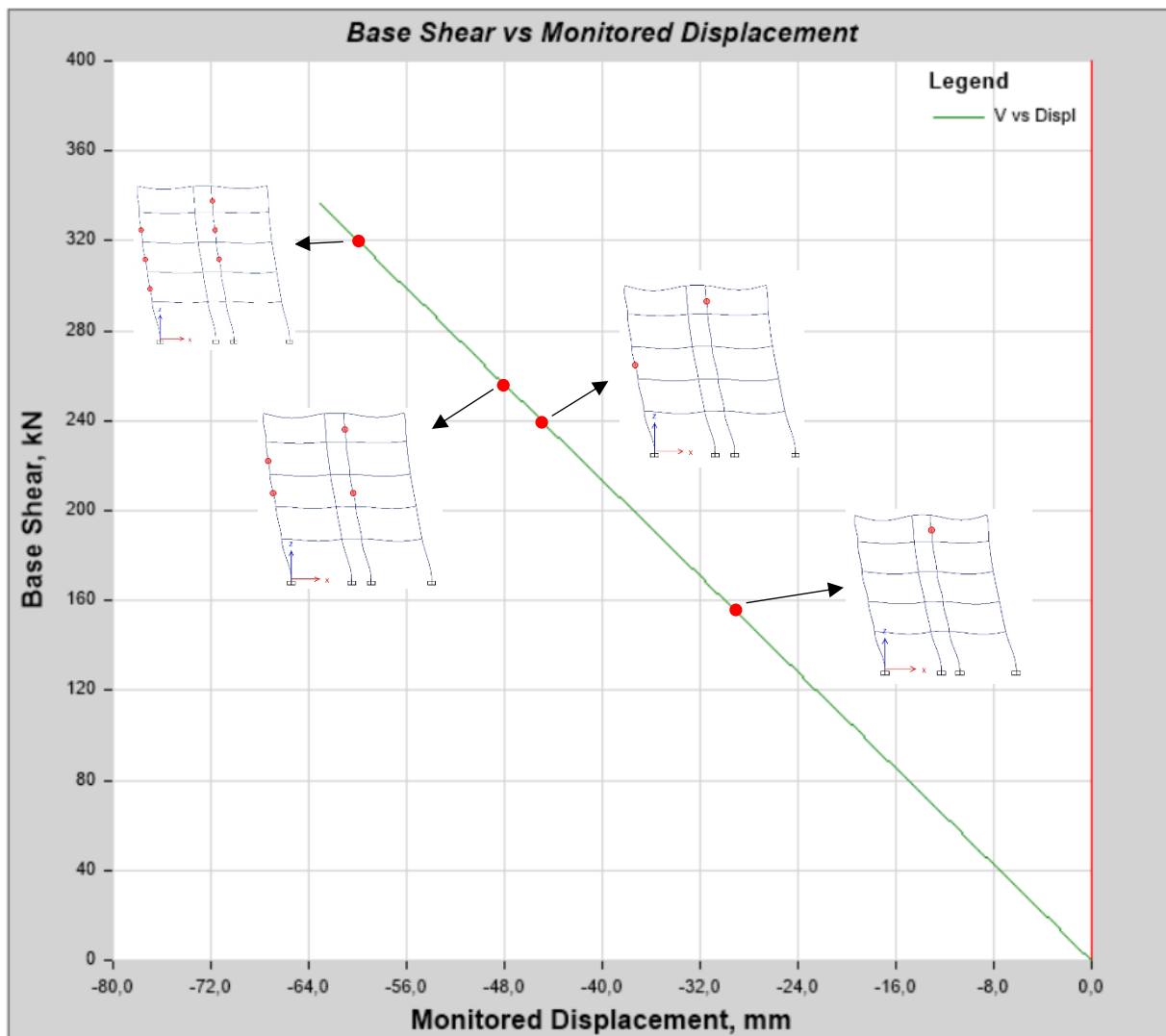
4.2.3. Rezultati nelinearne analize

Sa definiranim plastičnim zglobovima ulazi se u nelinearni statički proračun metodom postupnog guranja. Kao početno stanje konstrukcije uzima se rezultat nelinearne analize koja u obzir uzima kombinaciju gravitacijskih djelovanja ($1 \cdot G + 1 \cdot dG + 0,3 \cdot Q$). Razmatrat će se tri vrste raspodjele poprečne sile: trokutna, modalna te jednolika raspodjela. Jednolika raspodjela temelji se na jednolikom ubrzanju tla tijekom potresa i nazvana je *potres_acc_NL*. Modalna raspodjela uključuje postupno guranje konstrukcije uz primjenu modalne raspodjele sila, koja odgovara dominantnom obliku titranja te je definirana kao *potres_mode_NL*. Trokutna raspodjela koristi statičku raspodjelu potresnih sila prema Eurocode-u, a definirana je kao *potres_NL*. U nastavku su dani rezultati u obliku krivulje kapaciteta te '*pushover*' krivulje. Na kraju će se usporediti vrijednost IZO faktora za svaku metodu.

4.2.3.1. Mehanizam otkazivanja modela sa momentim plastičnim zglobovima i posmičnim zglobovima

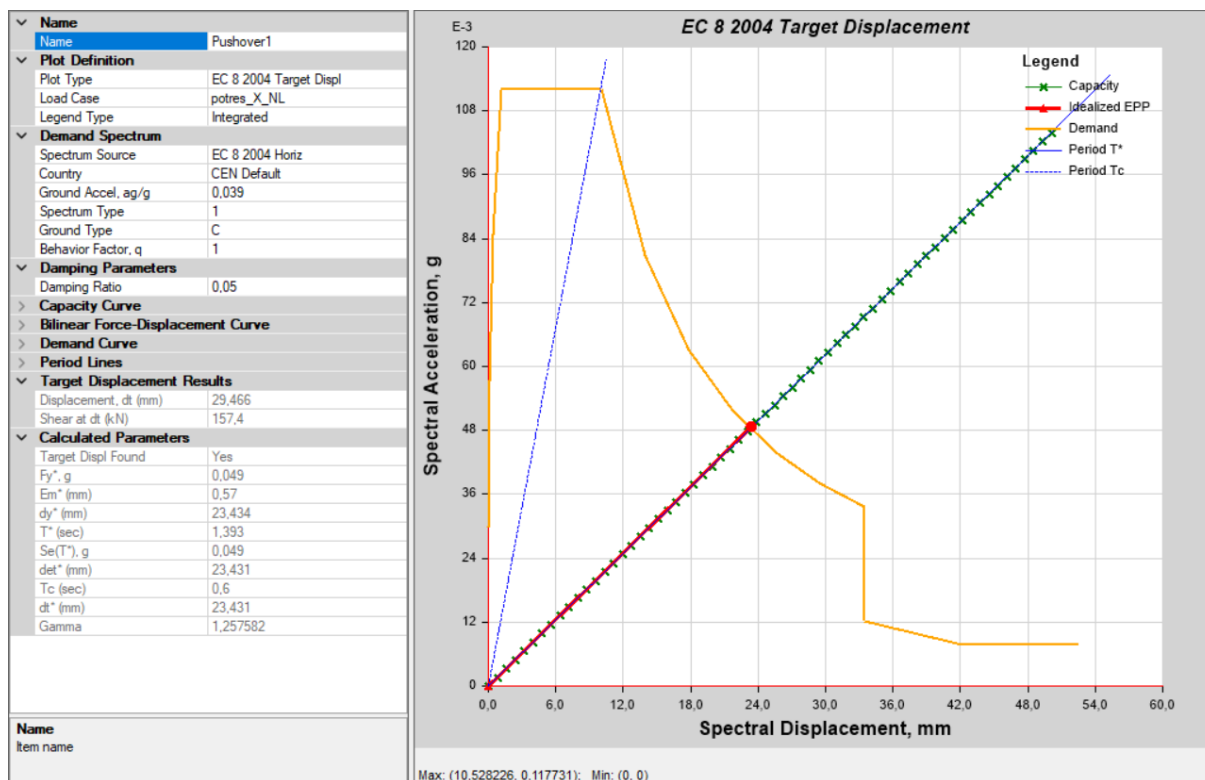
U ovom slučaju, momentni plastični zglobovi proračunati su i postavljeni blizu krajeva stupova i greda. Uz njih su zadani i posmični zglobovi na sredinama stupova, pri čemu su deformacije odnosno rotacijske sposobnosti pretpostavljene malima, jer nas ovdje primarno zanima mehanizam loma kada se dosegne kritična sila.

U nastavku su prikazani rezultati za tri slučaja opterećenja.



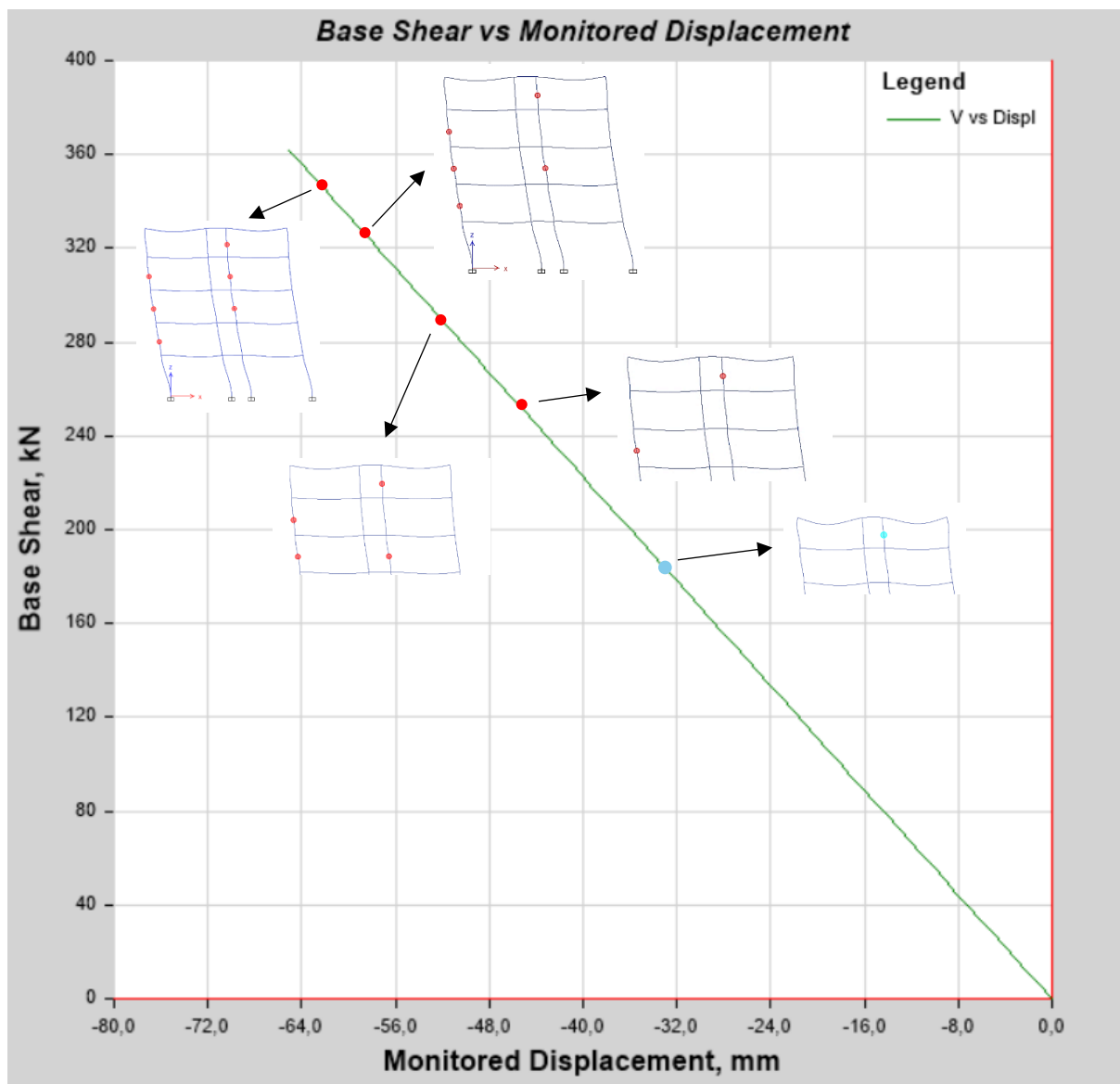
Slika 50 Krivulja kapaciteta za opterećenje potres_NL (slučaj 1)

Na prikazanoj krivulji kapaciteta može se primijetiti da se dešava krhki lom budući da je krivulja kapaciteta zapravo pravac u ovom slučaju. Prvo pojavljivanje graničnog stanja blizu rušenja pojavljuje se na zadnjoj etaži. Stanje znatnog oštećenja je preskočeno, pri čemu je u koraku 28 dosegnuto stanje ograničenog oštećenja, nakon čega u koraku 29 nastupa stanje blizu rušenja. Dosezanjem stanja blizu rušenja prvog stupa na poprečnu silu, dosegnuto je granično stanje blizu rušenja cijele konstrukcije. Krto otkazivanje stupova vodi urušavaju cijele konstrukcije, što je i prikazano ostalim mehanizmima duž krivulje kapaciteta.



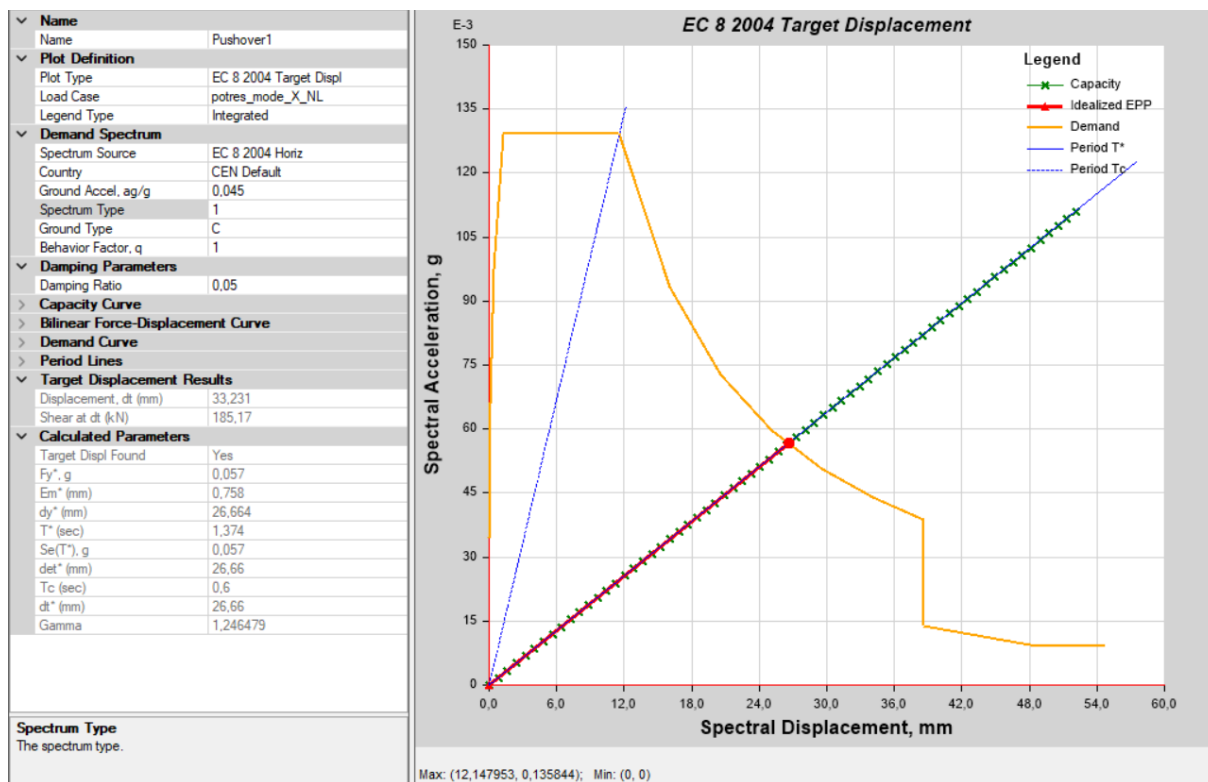
Slika 51 Prikaz pushover krivulje za slučaj opterećenja potres_NL (slučaj 1)

Za slučaj trokutne raspodjele opterećenja potresna otpornost ravninskog okvira iznosi 0,039g. Nosivost je određena na temelju trenutka oštećenja blizu rušenja stupa zadnje etaže u koraku 29 prekoračenjem poprečne nosivosti. Prema tome IZO faktor iznosi 0,13.



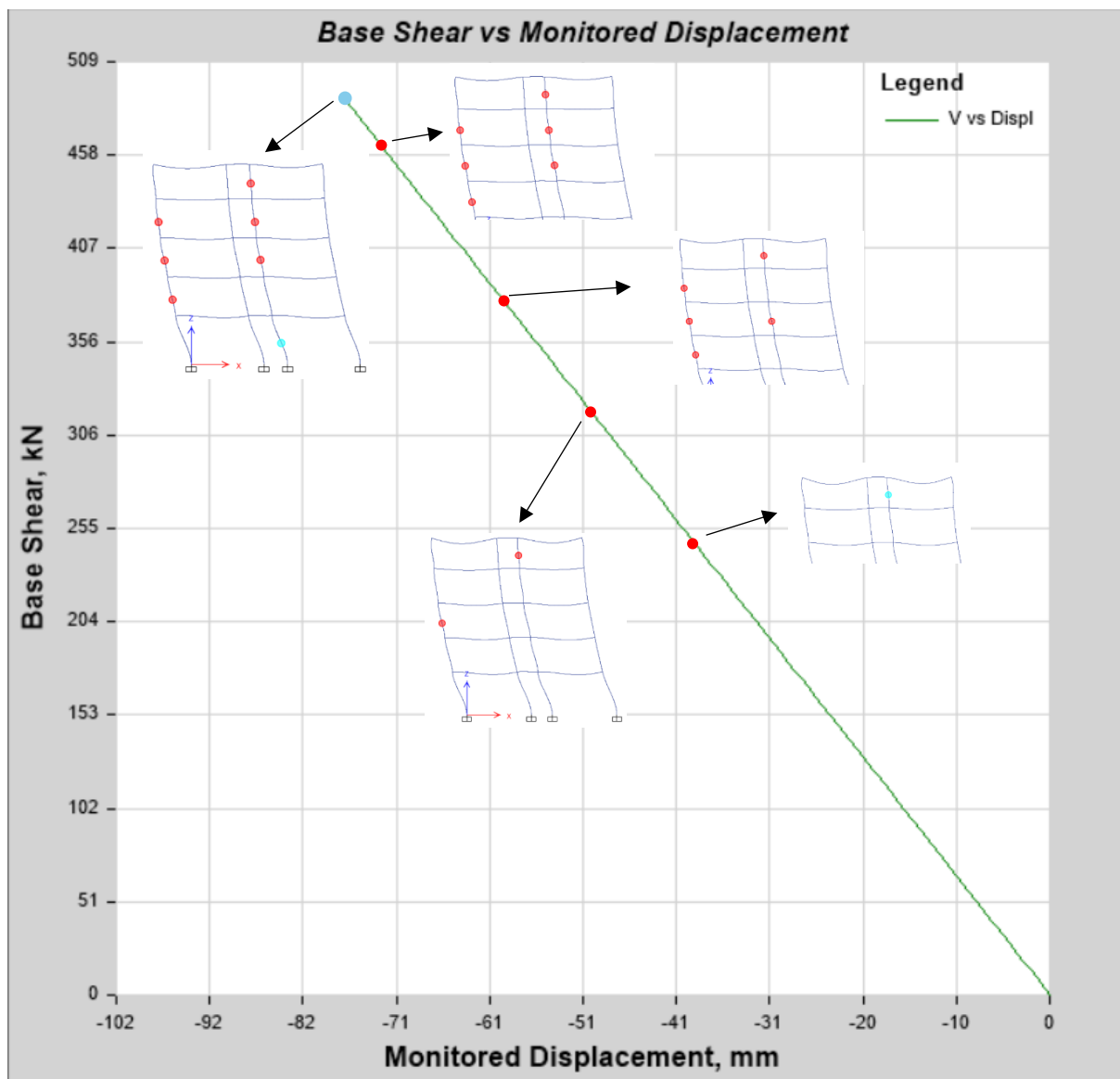
Slika 52 Prikaz krivulje kapaciteta za slučaj opterećenja potres_mode_NL (slučaj 1)

Na krivulji kapaciteta pri modalnoj raspodjeli opterećenja dešava se isti mehanizam otkazivanja kao u prethodnom. Granično stanje znatnog oštećenja dosegnuto je u 33. koraku.



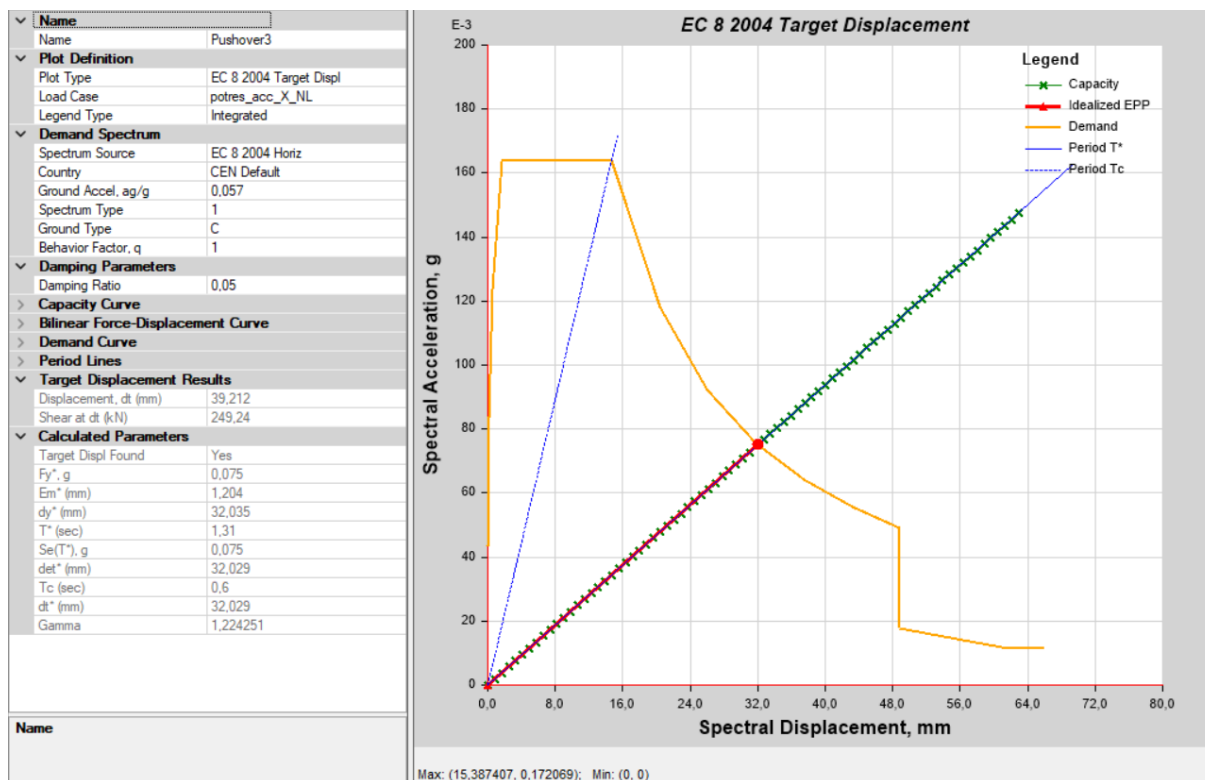
Slika 53 Prikaz pushover krivulje za slučaj opterećenja potres_mode_NL (slučaj 1)

Prema modalnoj raspodjeli poprečnog opterećenja, potresna otpornost građevine iznosi 0,045g, što je nešto veća vrijednost u odnosu na trokutastu raspodjelu. U tom slučaju, IZO faktor iznosi 0,15.



Slika 54 Prikaz pushover krivulje za slučaj opterećenja potres_acc_NL (slučaj 1)

Treća varijanta raspodjele opterećenja, također, daje isti mehanizam otkazivanja, s tim da se u ovom primjeru može primjetiti da je sljedeći mehanizam otkazivanja stup u prizemlju (zadnja točka). U ovom se slučaju stanje znatnog oštećenja dostiže u 39. koraku.



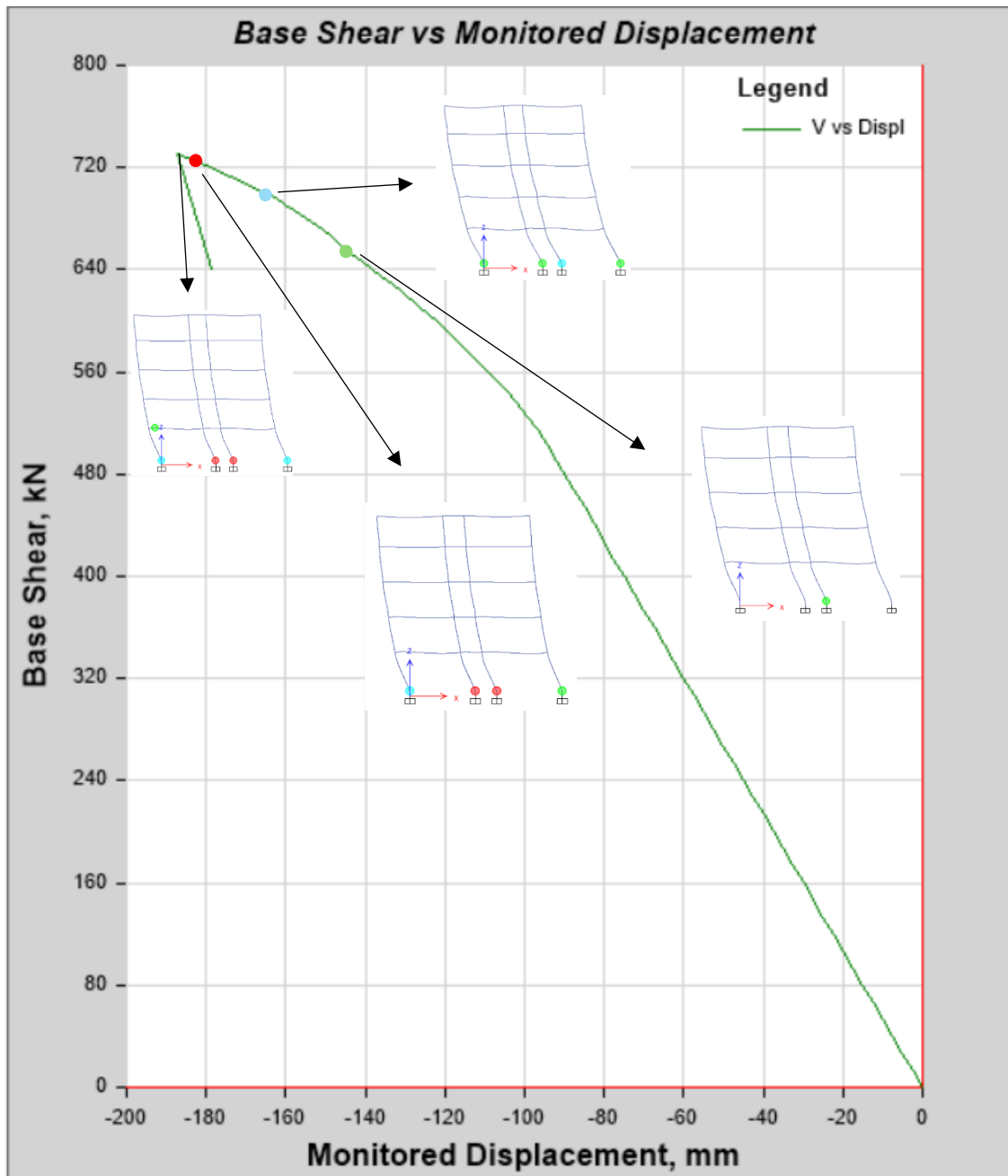
Slika 55 Prikaz pushover krivulje za slučaj opterećenja potres_acc_NL (slučaj 1)

Treća varijanta opterećenja (jednoliko ubrzanje) ujedno daje i najveću potresnu otpornost za okvirnu konstrukcije u iznosu od 0,057g. IZO faktor iznosi 0,19.

Mjerodavni IZO faktor određuje se kao najnepovoljnija vrijednost, a u ovom slučaju iznosi 0,13. Prema tome građevina ne zadovoljava kriterij potresne otpornosti.

4.2.3.2. Mehanizam otkazivanja modela sa momentim plastičnim zglobovima bez posmičnih zglobova

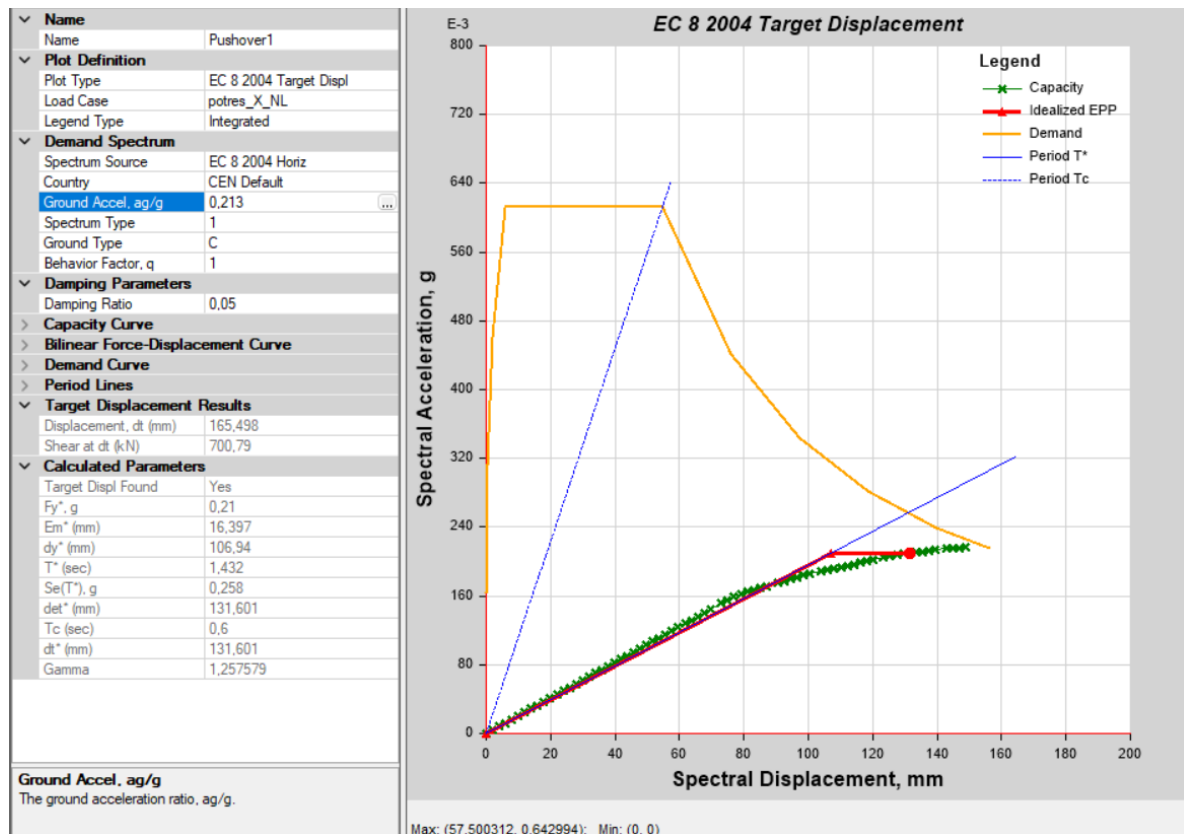
U ovom slučaju, okvirna konstrukcija je definirana momentnim plastičnim zglobovima na krajevima greda i stupova, što omogućuje analizu usporedbe potresne otpornosti kod posmičnog loma u odnosu na duktilni lom.



Slika 56 Prikaz krivulje kapaciteta za slučaj opterećenja potres_NL (slučaj 2)

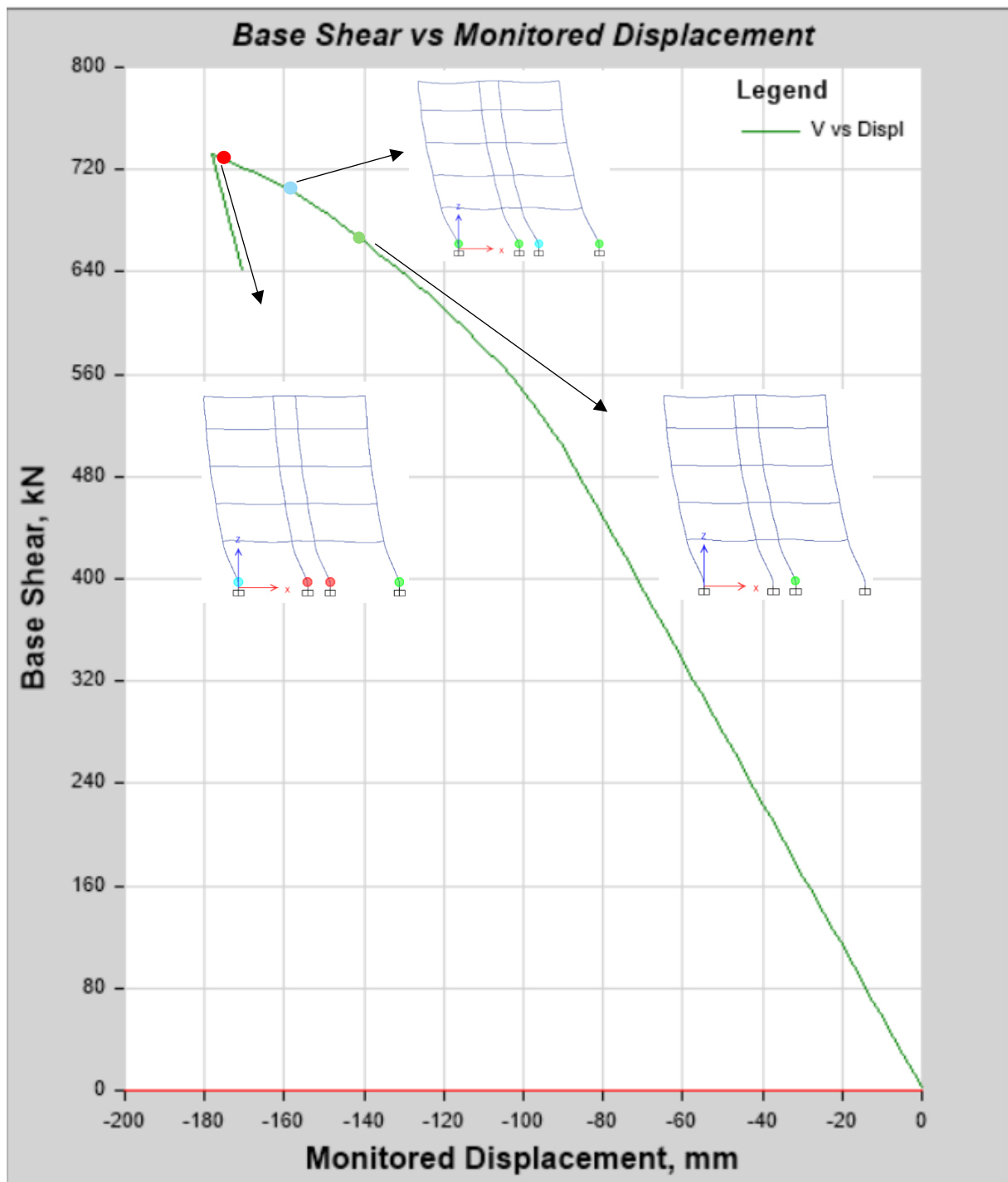
Krivulja kapaciteta u ovom slučaju uključuje nelinearni segment – nakon početnog dijela s konstantnim nagibom, dolazi do zakrivljenja odnosno popuštanja. Prvo ograničeno oštećenje zabilježeno je u koraku 56, na dnu središnjeg stupa prizemlja, dok se prvo značajno oštećenje javlja u koraku 63, nakon što su na svim donjim dijelovima stupova dosegnuta ograničena oštećenja. Stanje oštećenja pred kolaps pojavljuje se u koraku 70.

Ovakav mehanizam otkazivanja pokazuje da je riječ o konstrukciji s 'mekim katom'.



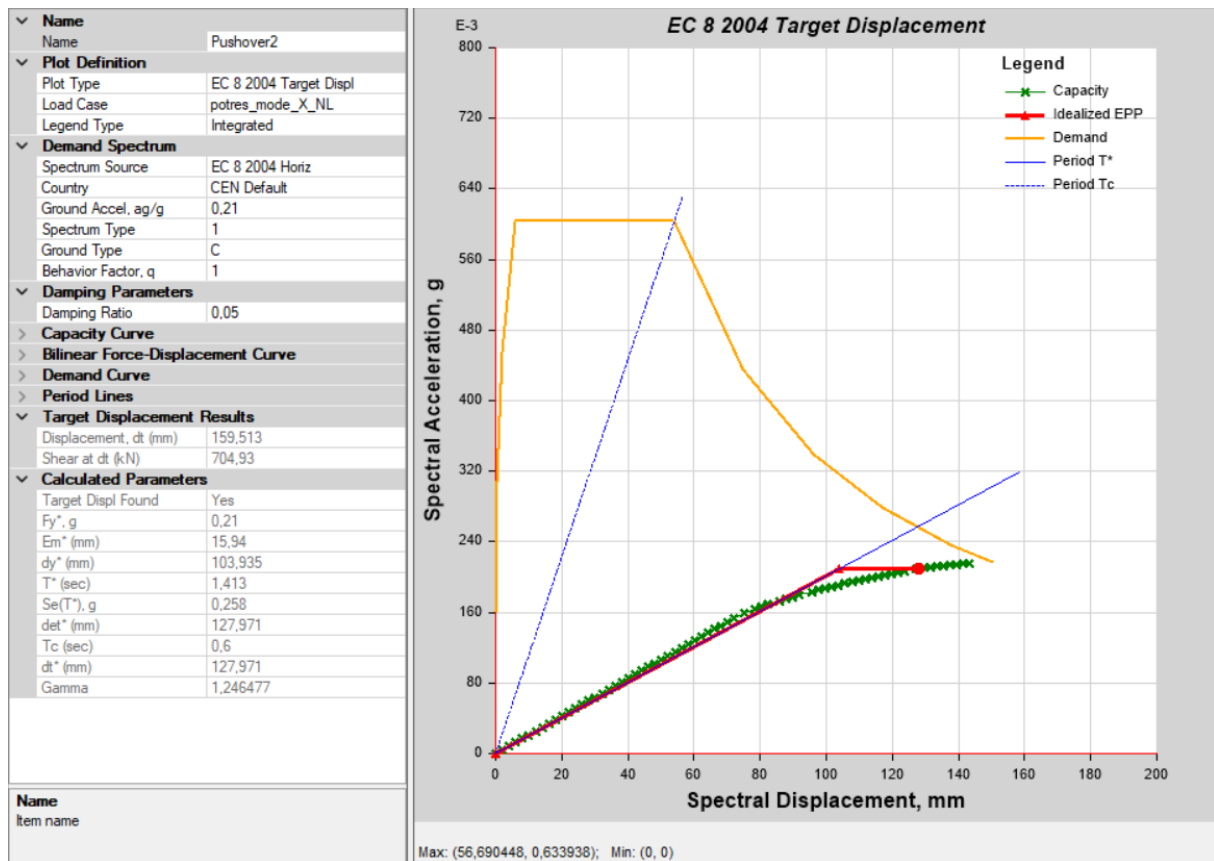
Slika 57 Prikaz pushover krivulje za slučaj opterećenja potres_NL (slučaj 2)

Nosivost je određena dosezanjem stanja znatnog oštećenja stupa u prizemlju, što je u ovom slučaju bio korak 63. Potresna otpornost iznosi 0,213g, što znači da je IZO faktor jednak 0,71.



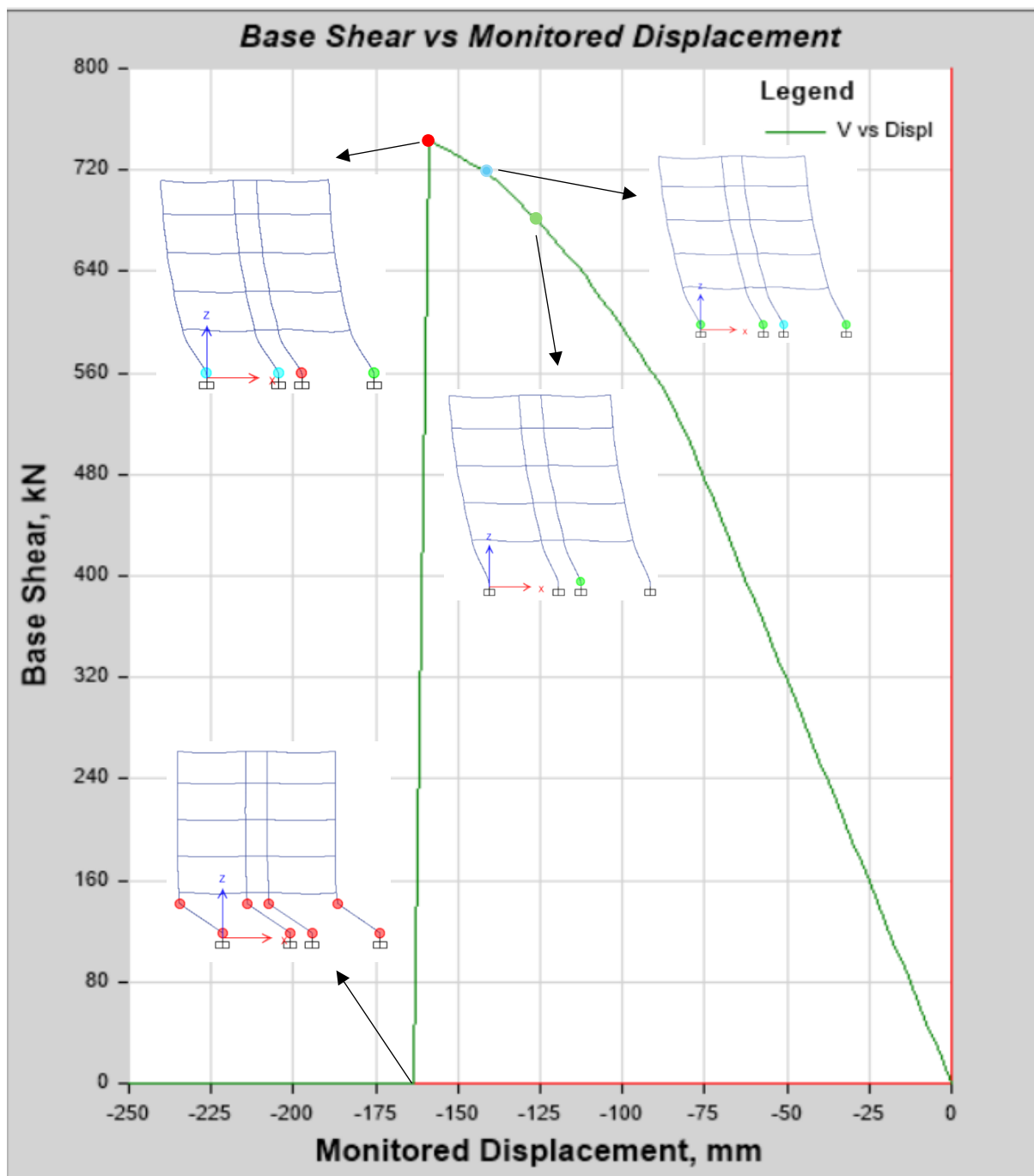
Slika 58 Prikaz krivulje kapaciteta za slučaj opterećenja potres_mode_NL (slučaj 2)

Za slučaj modalne raspodjele opterećenja javlja se isti redoslijed stvaranja plastičnih zlobova kao u prethodnom. U koraku 54 dolazi do prve plastifikacije (označeno zelenom bojom), a u koraku 60 dolazi se do stanja znatnog oštećenja na dnu stupa. Stanje pred kolaps dosegnuto je u 67. koraku.



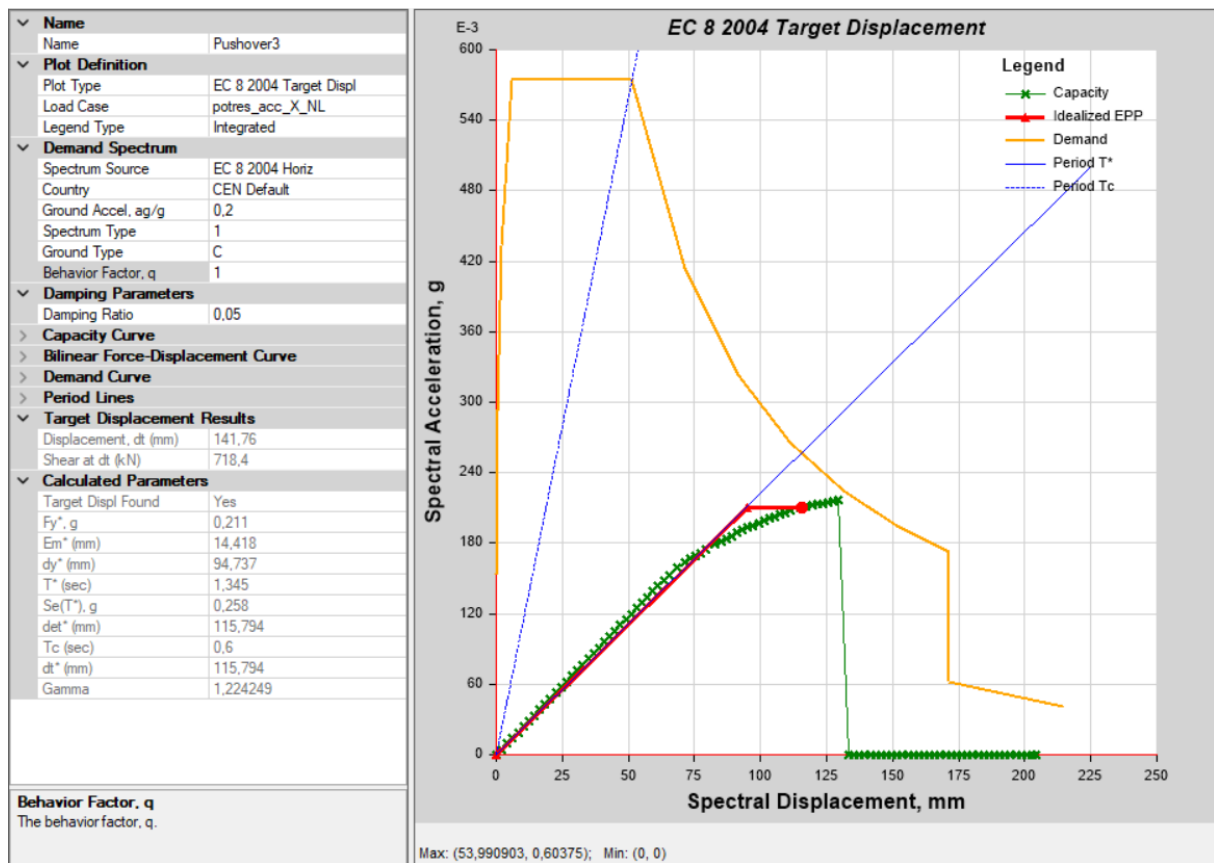
Slika 59 Prikaz pushover krivulje za slučaj opterećenja potres_mode_NL (slučaj 2)

Nosivost je određena korakom 60 u kojem je stup dosegno stanje znatnog oštećenja. Potresna nosivost iznosi 0,21, prema tome IZO faktor je jednak 0,7. Modalna raspodjela daje skoro pa identične rezultate kao i trokutna.



Slika 60 Prikaz krivulje kapaciteta za slučaj opterećenja potres_acc_NL (slučaj 2)

Iz prikazane krivulje kapaciteta ovaj se put može vidjeti kolaps konstrukcije, a zadnji mehanizam je mehanizam karakterističan za otkazivanje konstrukcija s 'mekim katom'. Što se tiče prve plastifikacije, ona se pojavljuje 49. koraku, dok se znatno oštećenje pojavljuje u koraku 54. Stanje blizu rušenja pojavljuje se u 60. koraku, a vrlo brzo nastupa i kolaps konstrukcije u koraku 62.



Slika 61 Prikaz pushover krivulje za slučaj opterećenja potres_acc_NL (slučaj 2)

Potresna otpornost kao i u zadnja dva slučaja određena je pojavljivanjem znatnog oštećenja na stupu prizemlja (korak 54), a iznosi 0,2g. U odnosu na zahtijevano ubrzanje od 0,3g, IZO faktor je jednak 0,67.

Mjerodavni IZO faktor određuje se kao najnepovoljnija vrijednost, a u ovom slučaju iznosi 0,67. Prema tome konstrukcija ne zadovoljava potresni kriterij.

5. ZAKLJUČAK

Procjena stanja postojeće armiranobetonske konstrukcije provedena je primjenom nelinearne metode postupnog guranja, pri čemu su analizirana dva modela: jedan koji uključuje posmične i momentne zglobove, a drugi koji sadrži isključivo momentne zglobove. Kao dodatna kontrola, provedena je i analiza metodom spektra odziva.

Kod modela s posmičnim zglobovima dobiveni mehanizam loma karakteriziran je krhkim lomom stupova, što je iznimno nepoželjan fenomen budući da se takav lom javlja nenajavljeno i vrlo brzo se razvija. Rezultati pokazuju mjerodavni IZO faktor od 0,13 za ovaj model.

Suprotno tome, model s isključivo momentnim zglobovima rezultirao je IZO faktorom od 0,67, čime se postiže znatno duktilniji odgovor, iako ni on ne ostvaruje željeni mehanizam otkazivanja. Ovaj model otkriva pojavu efekta mekog kata – situacije u kojoj je prizemlje, zbog veće visine u odnosu na ostale etaže, manje krutosti i time podložno bočnoj nestabilnosti. Kao posljedica toga, zgrada se translacijski pomiče do granica otpornosti stupova u prizemlju na bočne deformacije, što može dovesti do rušenja cijelog mekog kata.

Idealni mehanizam loma trebao bi osigurati prvo popuštanje greda, a tek potom stupova.

Kontrolna analiza metodom spektra odziva rezultirala je IZO faktorom od 0,28, što je znatno više od vrijednosti dobivene nelinearnom analizom za model s posmičnim zglobovima.

Zaključno, analizirana građevina nije konceptijski izvedena kao potresno otporna. Izvorni projektni koncept, koji je u vrijeme izgradnje predviđao isključivo vertikalna opterećenja, zanemaruje bočna potresna djelovanja te ne osigurava potrebnu poprečnu armaturu u stupovima i čvorovima. Konstrukcijski elementi opremljeni su glatkom armaturom oznake GA 240/360, koja ne zadovoljava suvremene zahtjeve duktilnosti, a ugrađena količina armature nije usklađena s važećim normama. Nadalje, stupovi relativno malih presjeka u odnosu na svoju visinu nisu adekvatno projektirani za seizmička opterećenja.

Prema normi HRN EN 1998-3 i zahtjevima za razinu III obnove, potrebni IZO faktor konstrukcije iznosi 0,75, dok je mjerodavni faktor postojeće konstrukcije samo 0,13. To ukazuje na ozbiljan nedostatak potresne otpornosti, što znači da bi konstrukcija, u sadašnjem stanju, bila izložena visokim rizicima pri seizmičkim djelovanjima. Kako bi se osigurala adekvatna otpornost na potres, nužna su značajna ojačanja i prilagodbe konstrukcije u skladu sa suvremenim normama i smjernicama za potresnu otpornost.

POPIS LITERATURE

- [1] Hrvatski zavod za norme. (2011). *HRN EN 1998-3: Projektiranje potresne otpornosti – 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada*. Zagreb: Hrvatski zavod za norme.
- [2] Obradović, N., Mitković, P., & Radovanović, S. (2017). Nelinearna statička metoda postupnog guranja – pushover analiza AB okvira sa zidanom ispunom. *Zbornik radova Međunarodnog simpozijuma o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija*, Vršac, 18-20. oktobar 2017., 245-254. ISBN: 978-86-87615-08-3.
- [3] Khan, M. A. (2013). Seismic design for buildings. In *Earthquake-Resistant Structures* (pp. 283–315). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-501-2.00010-9>
- [4] Lazarević, D., Šavor Novak, M., & Uroš, M. (2018). *Dinamika konstrukcija s uvodom u potresno inženjerstvo*. Skripta. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet.
- [5] Hrvatski zavod za norme. (2011). *HRN EN 1998-1: Projektiranje potresne otpornosti, 1. dio – Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade*. Zagreb: Hrvatski zavod za norme.
- [6] Čaušević, M., & Zehenter, E. (2007). Nelinearni seizmički proračun konstrukcija prema normi EN 1998-1:2004. *Građevinar*, 59(9), 767–777.
- [7] Uroš, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Demšić, M., & Baniček, M. (2025). *Proračun postojećih konstrukcija u seizmički aktivnim područjima*. Pristupljeno 18. veljače 2025. Dostupno na: https://moodle.srce.hr/2023-2024/pluginfile.php/9589781/mod_resource/content/1/9%20PPK%20Predavanje%20-%20Pushover.pdf
- [8] Ivanko, A.-M., Kraus, I., & Kraus, L. (2020). Nelinearno ponašanje zgrada podvrgnutih monotono rastućem bočnom opterećenju. *Zbornik radova (Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci)*, 23(1), 119–135. <https://doi.org/10.32762/zr.23.1.8>
- [9] Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. (2013). *Dan Fakulteta strojarstva i brodogradnje*. Pristupljeno 10. veljače 2025. Dostupno na: <https://www.unizg.hr/vijest/article/dan-fakulteta-strojarstva-i-brodogradnje/>

- [10] Vrančić, T. (2024). Konstrukcijska obnova Fakulteta strojarstva i brodogradnje. *Građevinar*, 76(1), 53–61.
- [11] Hrvatski zavod za norme. (2012). *HRN EN 1991-1-1: Djelovanja na konstrukcije, dio 1-1: Opća djelovanja — Obujamske težine, vlastite težine i uporabna opterećenja zgrada* (2002+AC:2009). Zagreb: Hrvatski zavod za norme.
- [12] Herak, M. *Karte potresnih područja Republike Hrvatske* [Internet]. Sveučilište u Zagrebu. Pristupljeno 20. studenog 2024. Dostupno na: <http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/karta.php>

POPIS SLIKA

Slika 1 Projektni spektri za različite koeficijente duktilnosti (Izvor: [4])	4
Slika 2 Idealizirana krivulja kapaciteta za jedan stupanj slobode (Izvor: [7]).....	6
Slika 3 Elastični i neelastični zahtijevani spektri za dijagrame kapaciteta: za konstrukcije sa srednjim i dugim periodima (lijevo) te konstrukcije s kratkim periodima (desno) (Izvor:[8]).	6
Slika 4 Sjeverna zgrada FSB-a – shema dilatacija (Izvor: projekt Capital Ing d.o.o.).....	8
Slika 5 Pogled na dilataciju A a) sjeverno pročelje b)istočno pročelje (Izvor: a) [9], b) projekt Capital Ing d.o.o.)	9
Slika 6 Tlocrt podruma (Izvor: Snimak postojećeg stanja).....	10
Slika 7 Tlocrt niskog prizemlja (Izvor: Snimak postojećeg stanja).....	10
Slika 8 Tlocrt visokog prizemlja (Izvor: Snimak postojećeg stanja).....	11
Slika 9 Tlocrt prvog kata (Izvor: Snimak postojećeg stanja).....	11
Slika 10 Tlocrt drugog kata (Izvor: Snimak postojećeg stanja).....	11
Slika 11 Tlocrt trećeg kata (Izvor: Snimak postojećeg stanja).....	12
Slika 12 Prikaz pročelja dilatacije A (Izvor: Snimak postojećeg stanja).....	12
Slika 13 Proračun krovne konstrukcije dizala (Izvor: arhivska dokumentacija)	13
Slika 14 Prikaz stropne konstrukcije (uvučeni kat) (Izvor: arhivska dokumentacija)	13
Slika 15 Prikaz proračuna armature (uvučeni kat) (Izvor: arhivska dokumentacija).....	14
Slika 16 Prikaz stropne konstrukcije (2. kat) (Izvor: arhivska dokumentacija)	14
Slika 17 Prikaz proračuna armature (2. kat) (Izvor: arhivska dokumentacija).....	15
Slika 18 Prikaz stropne konstrukcije (tipski kat) (Izvor: arhivska dokumentacija).....	16
Slika 19 Prikaz proračuna armature (tipski kat) (Izvor: arhivska dokumentacija)	16
Slika 20 Prikaz elemenata iz statičkog proračuna – podrum (Izvor: arhivska dokumentacija	17
Slika 21 Shema stupova (Izvor: arhivska dokumentacija)	17
Slika 22 Prikaz proračuna i dimenzioniranja stupova (Izvor: arhivska dokumentacija)	18
Slika 23 Prikaz proračuna temeljne stope (Izvor: arhivska dokumentacija)	18
Slika 24 Prikaz konstrukcijskih detalja za vrijeme obnove građevine	19
Slika 25 Usporedba ugrađene armature utvrđene istražnim radovima i armature iz statičkog proračuna (Izvor: projekt Capital ing d.o.o.)	20
Slika 26 Utvrđivanje armature stupova nerazornom metodom (profometar) (Izvor: projekt Capital Ing d.o.o.)	21
Slika 27 Vrijednosti horizontalnih vršnih ubrzanja tla (Izvor: [12])	27
Slika 28 Definiranje elastičnog spektra odziva.....	28
Slika 29 Definiranje projektnog spektra odziva.....	28

Slika 30 Prikaz 3D modela (pogled 1)	29
Slika 31 Prikaz 3D modela (pogled 2)	29
Slika 32 Prikaz dodatnog stalnog djelovanja na membrane redom od niskog prizemlja do 3. kata	30
Slika 33 Prikaz korisnog djelovanja na membrane redom od niskog prizemlja do 3. kata..	31
Slika 34 Prikaz linijskog opterećenja na prostornom modelu	32
Slika 35 Prvi oblik titranja (translacija u x smjeru, $T = 2,218$ s).....	34
Slika 36 Drugi oblik titranja (torzija, $T = 1,551$ s).....	34
Slika 37 Treći oblik titranja (translacija u x smjeru, $T = 0,762$ s)	35
Slika 38 Četvrti oblik titranja (translacija u y smjeru, $T = 0,744$ s)	35
Slika 39 Ležajne reakcije.....	36
Slika 40 Prikaz međukatnih pomaka.....	37
Slika 41 Prikaz poprečnih sila po etažama	38
Slika 42 Prikaz izdvojenog okvira iz tlocrta prostorne konstrukcije	39
Slika 43 Shema okvira.....	40
Slika 44 Shema opterećenja okvira	40
Slika 45 Prikaz krivulje a) neovijenog betona b) ovijenog betona.....	42
Slika 46 Graf usporedbe krivulja moment-rotacija greda	44
Slika 47 Graf usporedbe krivulja moment-rotacija stupova.....	45
Slika 48 Unutarnje sile za potresno djelovanje $a_g=0,214g$ ($T=225$ godina).....	47
Slika 49 Prikaz unutarnjih sila za ubrzanje pri kojem konstrukcija doseže granično stanje znatnog oštećenja.....	47
Slika 50 Krivulja kapaciteta za opterećenje potres_NL (slučaj 1).....	49
Slika 51 Prikaz pushover krivulje za slučaj opterećenja potres_NL (slučaj 1).....	50
Slika 52 Prikaz krivulje kapaciteta za slučaj opterećenja potres_mode_NL (slučaj 1).....	51
Slika 53 Prikaz pushover krivulje za slučaj opterećenja potres_mode_NL (slučaj 1).....	52
Slika 54 Prikaz pushover krivulje za slučaj opterećenja potres_acc_NL (slučaj 1).....	53
Slika 55 Prikaz pushover krivulje za slučaj opterećenja potres_acc_NL (slučaj 1).....	54
Slika 56 Prikaz krivulje kapaciteta za slučaj opterećenja potres_NL (slučaj 2).....	55
Slika 57 Prikaz pushover krivulje za slučaj opterećenja potres_NL (slučaj 2).....	56
Slika 58 Prikaz krivulje kapaciteta za slučaj opterećenja potres_mode_NL (slučaj 2).....	57
Slika 59 Prikaz pushover krivulje za slučaj opterećenja potres_mode_NL (slučaj 2).....	58
Slika 60 Prikaz krivulje kapaciteta za slučaj opterećenja potres_acc_NL (slučaj 2)	59
Slika 61 Prikaz pushover krivulje za slučaj opterećenja potres_acc_NL (slučaj 2).....	60

POPIS TABLICA

Tablica 1 Rezultati ispitivanja kvalitete betona ugrađenog u stupove i grede (sklerometrom) (Izvor: projekt Capital Ing d.o.o.).....	21
Tablica 2 Prikaz razina oštećenja (Izvor: projekt Capital Ing d.o.o.)	22
Tablica 3 Razredi važnosti građevina (Izvor: [5]).....	23
Tablica 4 Prikaz definiranih kombinacija opterećenja.....	26
Tablica 5 Prikaz perioda i frekvencija	33
Tablica 6 Prikaz aktivirane mase	33
Tablica 7 Prikaz armature greda ravninskog okvira prema položajima	41
Tablica 8 Prikaz armature stupova ravninskog okvira.....	42
Tablica 9 Vrijednosti parametara greda u odnosu na položaj elemenata unutar konstrukcije	43
Tablica 10 Vrijednosti parametara stupova u odnosu na položaj elemenata unutar konstrukcije.....	44

PRILOZI

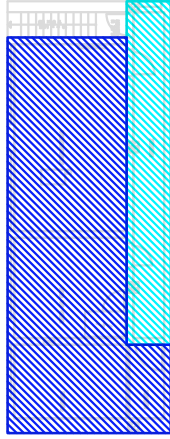
DILATACIJA A

TLOCRT PODRUMA - STROPNA KONSTRUKCIJA, GREDE I ZIDOVI (izvor : projekt Capital Ing d.o.o.)

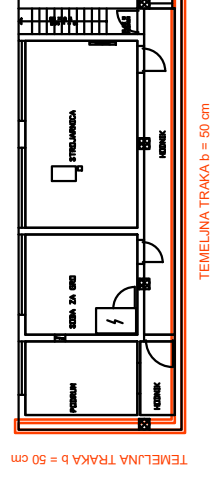
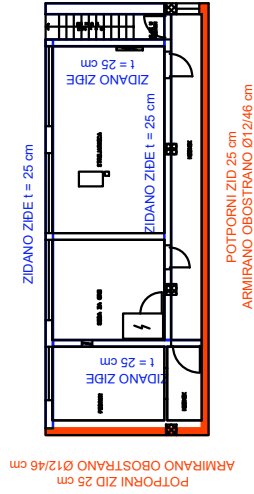
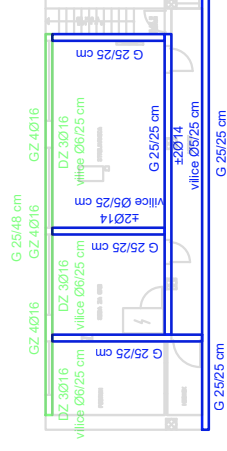
SITNOREBRASI STROP

PLOČA 5 cm, SITNA REBRA 8/30 cm (e = 50 cm)

PLOČA - UZDUŽNO (X): Ø5/20 cm, POPREČNO (Y) Ø5/50 cm
REBRA (Y SMJER): POLJE D.Z. 2Ø10 + 2Ø8, vij: Ø5/25 cm



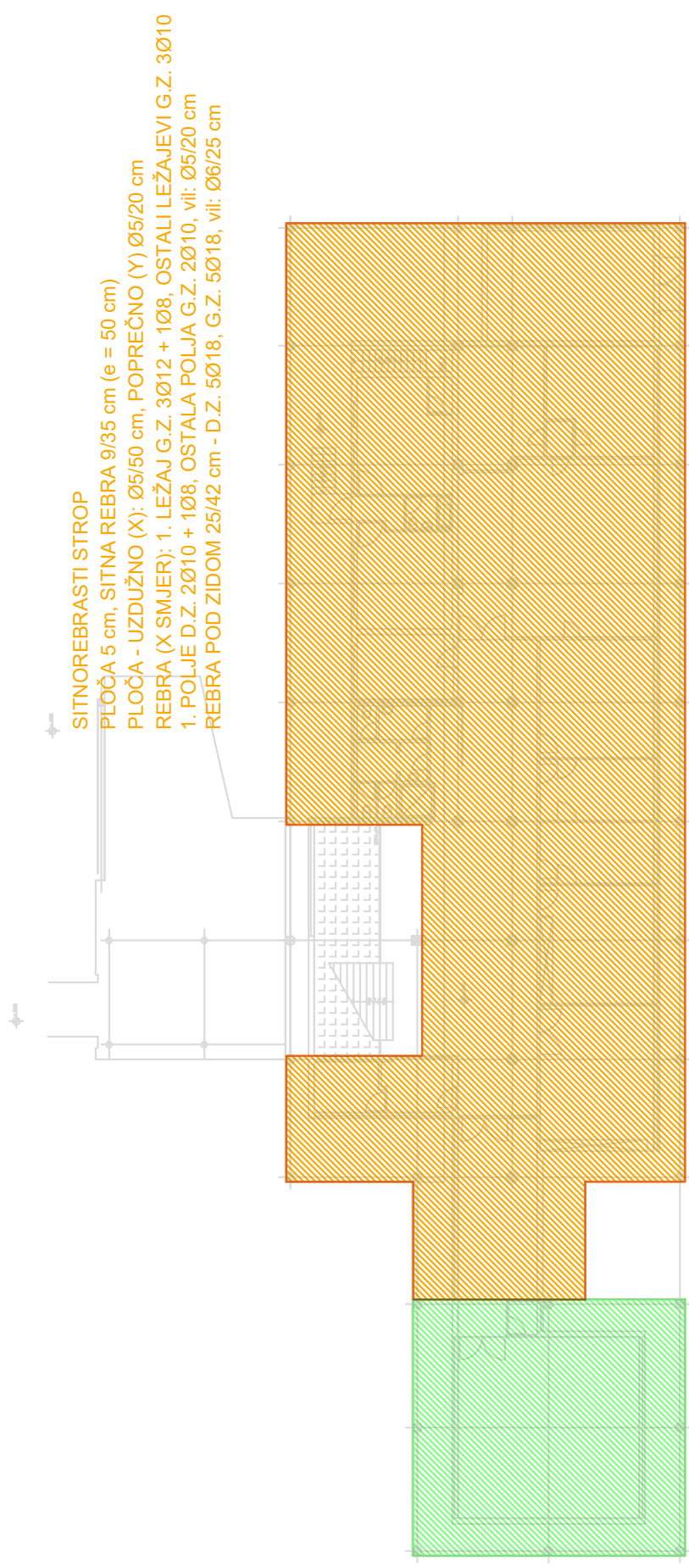
PLOČA 8 cm,
GLAVNA ARM: Ø6/15 cm
RAZDJEJLNO : Ø6/65 cm



DILATACIJA A

TLOCRT NISKOGR PRIZEMLJA - STROPNA KONSTRUKCIJA

(izvor : projekt Capital Ing d.o.o.)



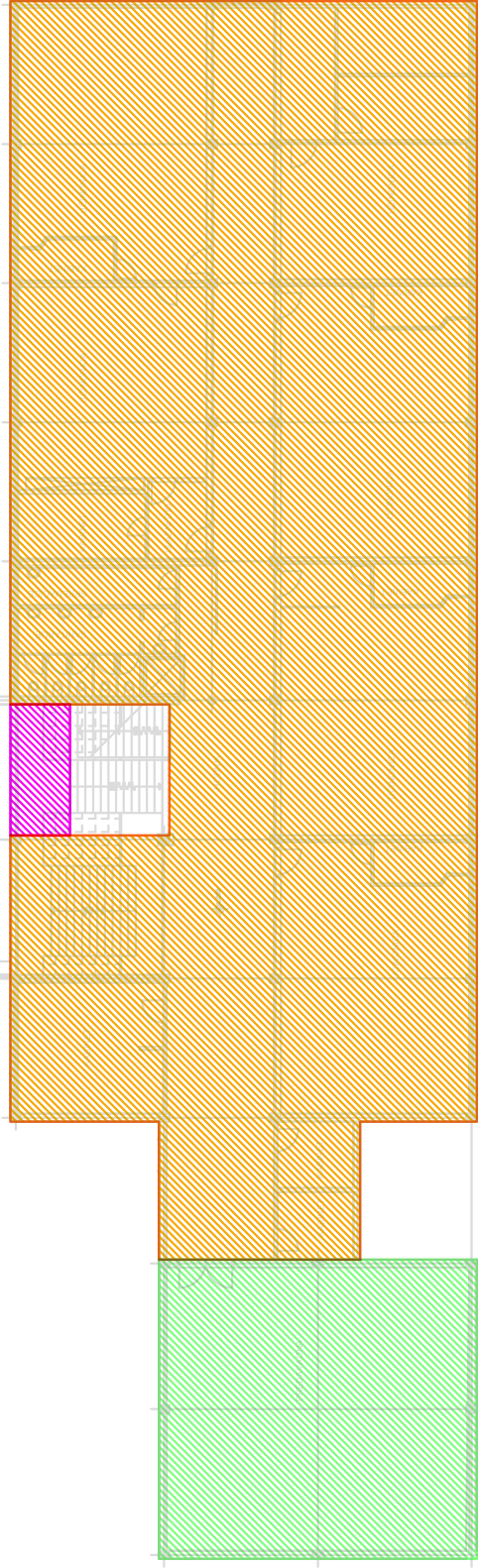
DILATACIJA A

TLOCRT TIPSKOG KATA - STROPNA KONSTRUKCIJA

(izvor : projekt Capital Ing d.o.o.)



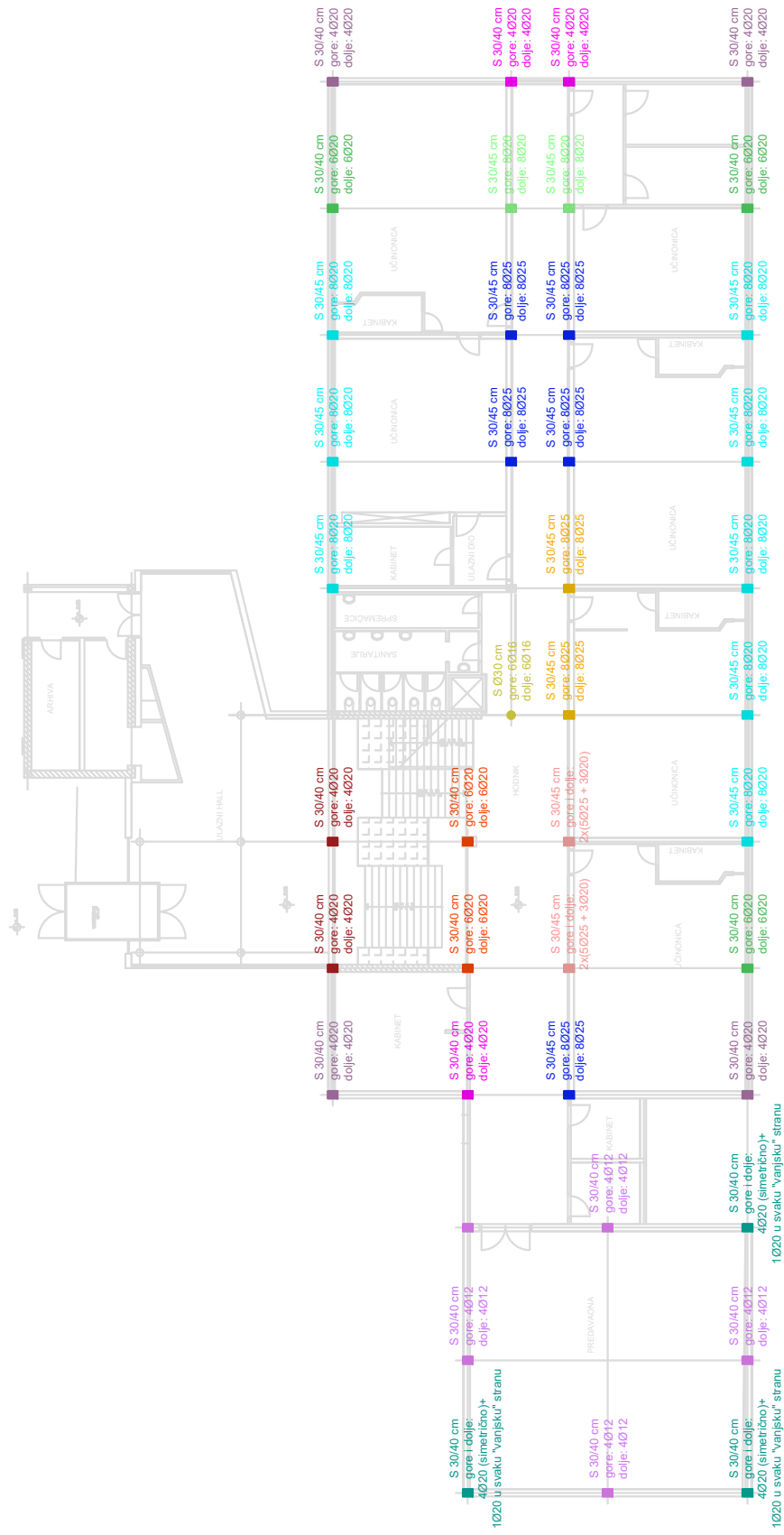
PLOČA PODESTA 8 cm, RAZDJELNO: Ø6/40 cm
GREDE OSLONAC STUBIŠTA (x) 38/48 cm
D.Z. 4Ø20, G.Z. 5Ø20, vii: Ø6/25 cm



ROŠTILJNA STROPNA KONSTRUKCIJA
PLOČA 5 cm, SITNA REBRA 15/38 cm (e = 122 cm)
PLOČA - OBA SMJERA: Ø5/15 cm
REBRA: D.Z. 5Ø20, vii: Ø6/20 cm

DILATACIJA A

TLOCRT VISOKOG PRIZEMLJA - STUPOVI (izvor : projekt Capital Ing d.o.o.)



DILATACIJA A

TLOCRT 2. KATA - STROPNA KONSTRUKCIJA

(izvor : projekt Capital Ing d.o.o.)

SITNOREBRASTI STROP

PLOČA 5 cm, SITNA REBRA 9/35 cm (e = 50 cm)

PLOČA - UZDUŽNO (X): Ø5/50 cm, POPREČNO (Y) Ø5/20 cm

REBRA SOBE (X SMJER): G.Z. 1Ø10 + 3Ø8, D.Z. 3Ø8, vii: Ø5/25 cm

REBRA HODNIK (X SMJER): G.Z. 3Ø10 + 2Ø8, D.Z. 1Ø10 + 2Ø8, vii: Ø5/25 cm

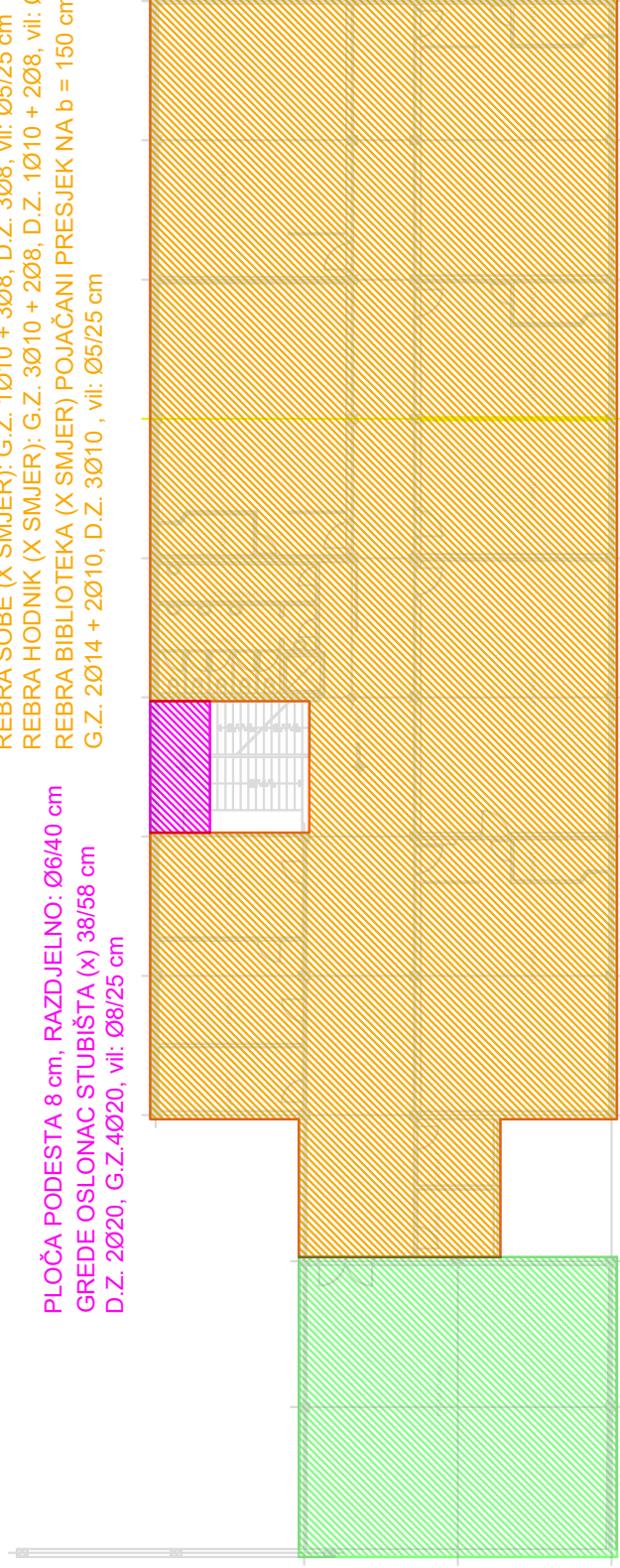
REBRA BIBLIOTEKA (X SMJER) POJAČANI PRESJEK NA b = 150 cm

G.Z. 2Ø14 + 2Ø10, D.Z. 3Ø10 , vii: Ø5/25 cm

PLOČA PODESTA 8 cm, RAZDJELNO: Ø6/40 cm

GREDE OSLONAC STUBIŠTA (x) 38/58 cm

D.Z. 2Ø20, G.Z.4Ø20, vii: Ø8/25 cm



ROŠTILJNA STROPNA KONSTRUKCIJA

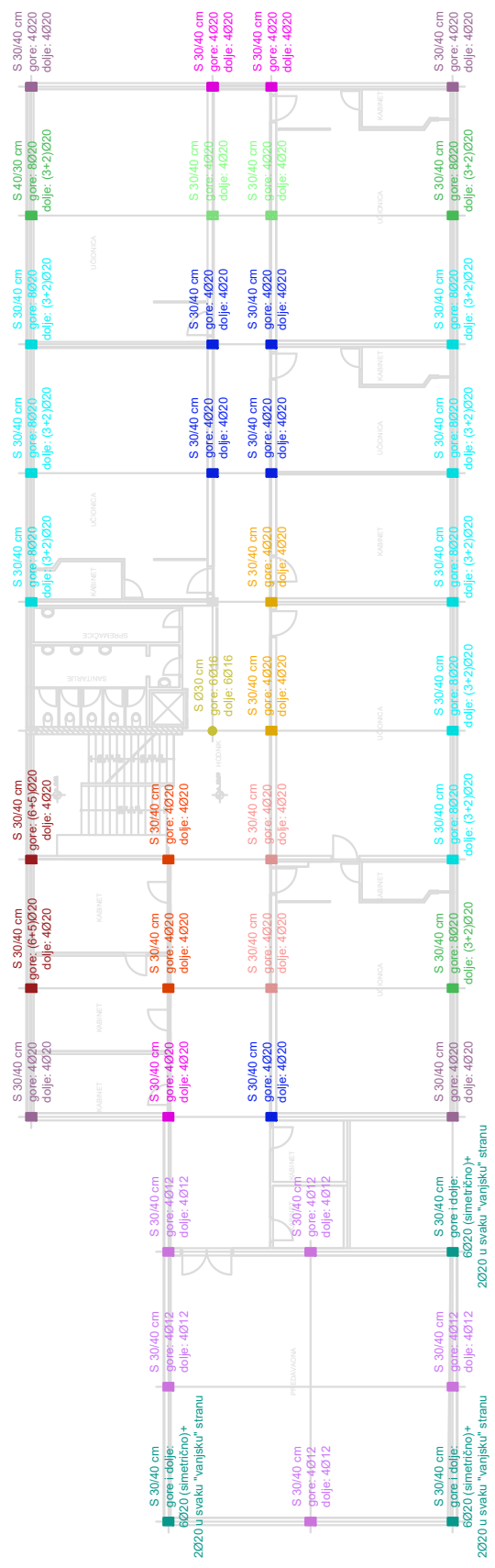
PLOČA 5 cm, SITNA REBRA 15/33 cm (e = 122 cm)

PLOČA - OBA SMJERA: Ø5/11 cm

REBRA: D.Z. 6Ø20, vii:Ø6/25 cm

DILATACIJA A

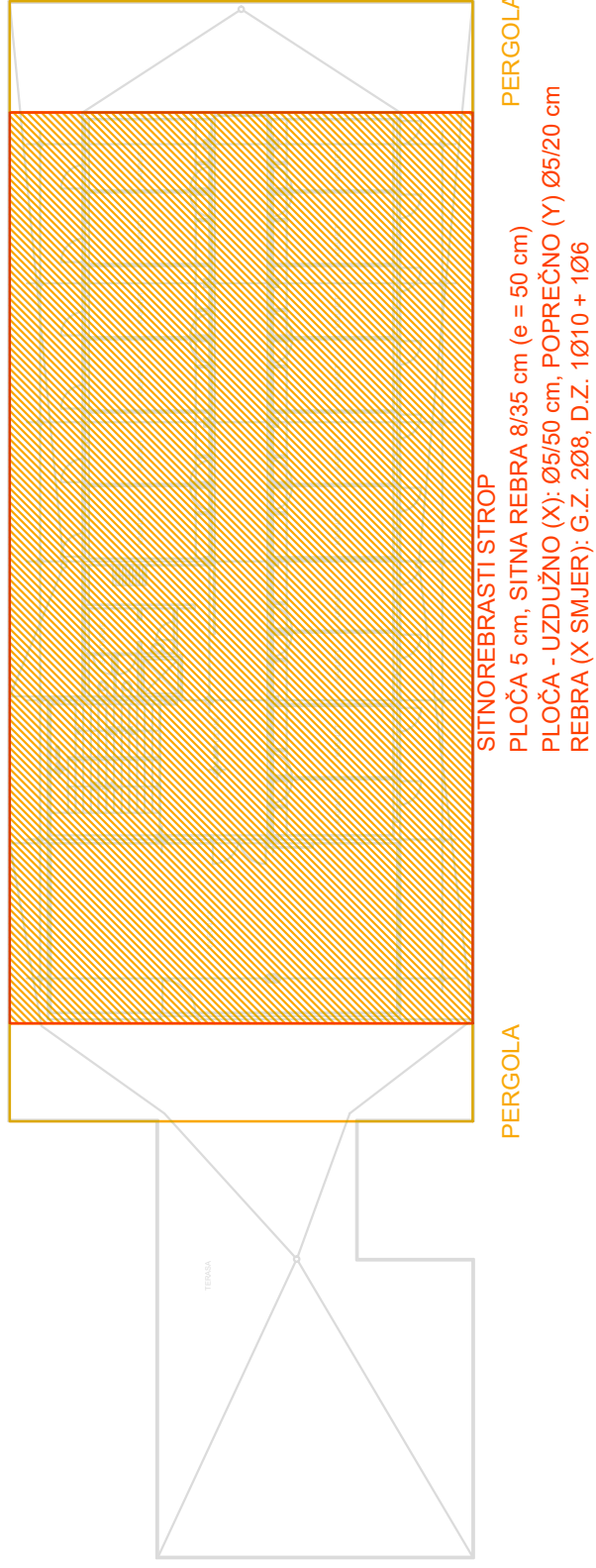
TLOCRT 2. KATA - STUPOVI
(izvor : projekt Capital Ing d.o.o.)



DILATACIJA A

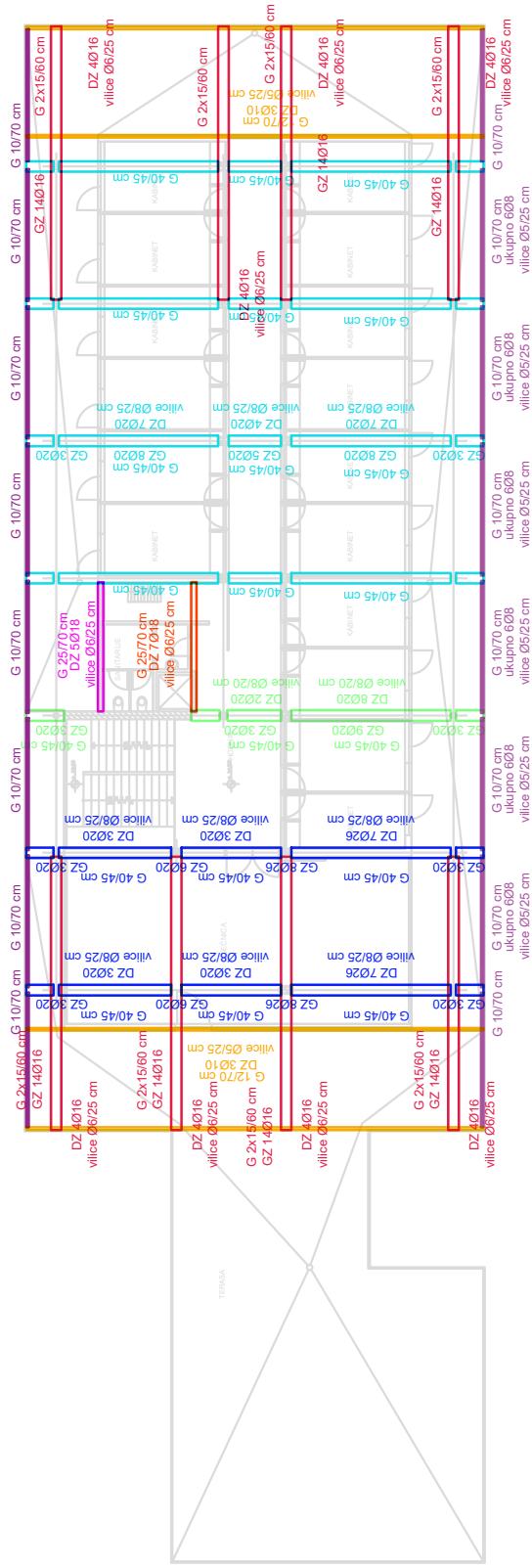
TLOCRT 3. KATA - STROPNA KONSTRUKCIJA

(izvor : projekt Capital Ing d.o.o.)



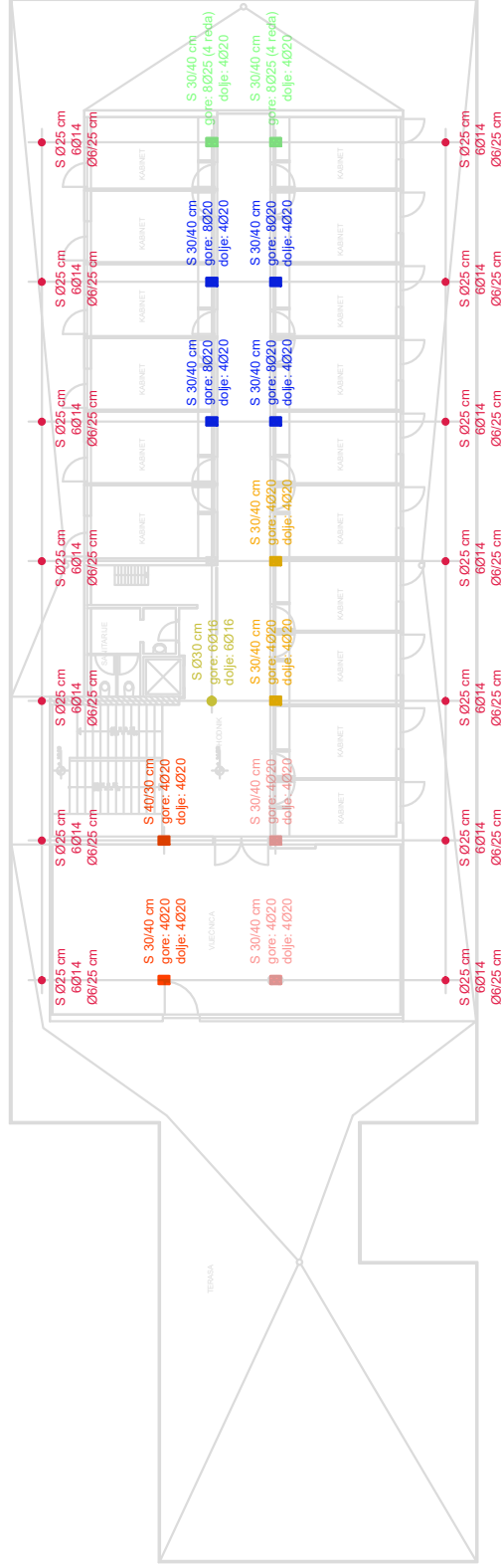
DILATACIJA A

TLOCRT 3. KATA - GREDE
(izvor : projekt Capital Ing d.o.o.)



DILATACIJA A

TLOCRT 3. KATA - STUPOVI
(izvor : projekt Capital Ing d.o.o.)

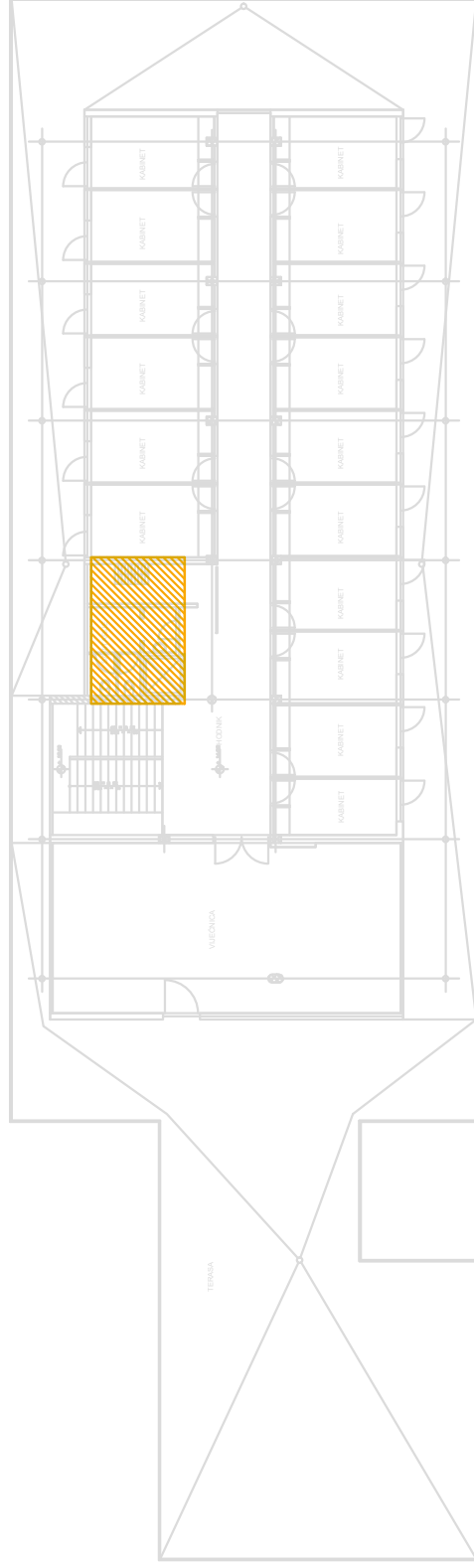


DILATACIJA A

TLOCRT KROVNE KUĆICE - STROPNA KONSTRUKCIJA

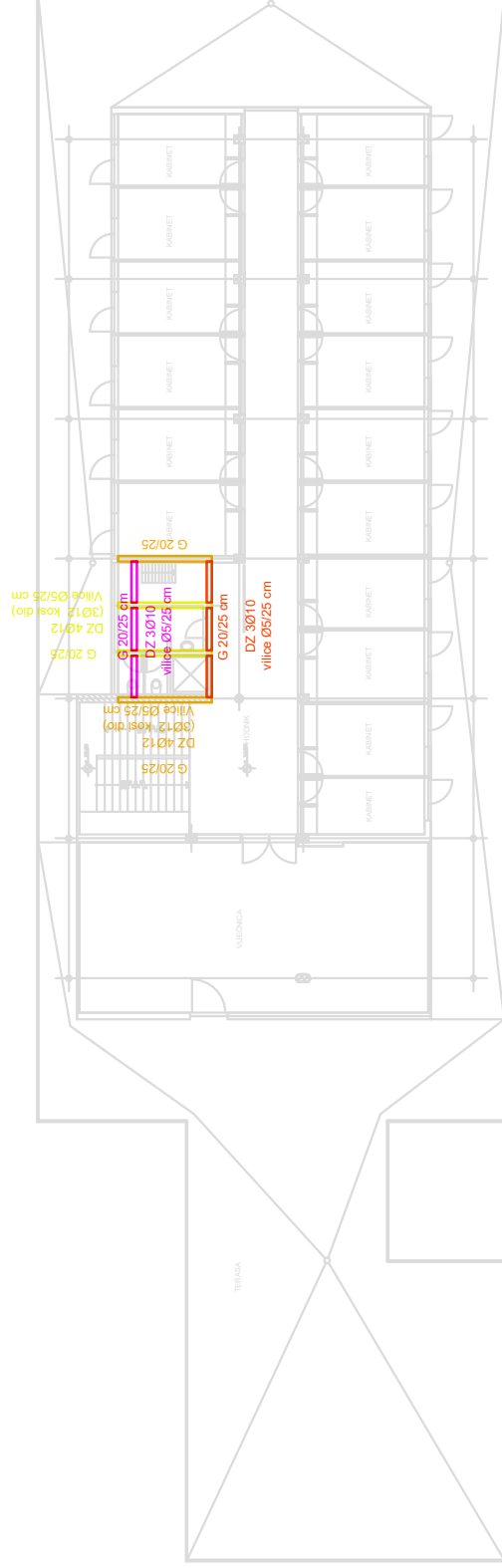
(izvor : projekt Capital Ing d.o.o.)

AB PLOČA KROVNE KUĆICE 7 cm
POLJE - GLAVNA ARMATURA: Ø5/10 cm, RAZDJELENO Ø5/45 cm



DILATACIJA A

TLOCRT KROVNE KUĆICE - GREDE
(izvor : projekt Capital Ing d.o.o.)



DILATACIJA A

TLOCRT KROVNE KUĆICE - STUPOVI
(izvor : projekt Capital Ing d.o.o.)

