

Nelinearni statički proračun potresne otpornosti armiranobetonskog višekatnog okvira

Brnić, Dorian

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:922736>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Dorian Brnić

**Nelinearni statički proračun potresne otpornosti armiranobetonskog
višekatnog okvira**

Diplomski rad

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij Građevinarstvo

Konstrukcije

Potresno inženjerstvo

**Dorian Brnić
JMBAG: 0114029258**

**Nelinearni statički proračun potresne otpornosti armiranobetonskog
višekatnog okvira**

Diplomski rad

Rijeka, veljača 2023.

IZJAVA

Diplomski rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Dorian Brnić

U Rijeci, 22.02.2023

IZJAVA

Diplomski rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta:

**Poboljšanje proračunskih modela za ocjenu stanja građevinskih konstrukcija
(Improvement of Design Models for Condition Assessment of Structures)**

Voditelj projekta: prof.dr.sc. Ivana Štimac Grandić

Šifra projekta: uniri-tehnic-18-127

Financijer projekta: Sveučilište u Rijeci

Pravna nadležnost: Republika Hrvatska

U Rijeci, 15. veljače 2023.

prof.dr.sc. Davor Grandić, dipl.ing.građ.

ZAHVALA

Srdačno zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Davoru Grandiću te komentoru doc.dr.sc Paulu Šćulcu na strpljenju, pomoći i vodstvu pri izradi ovog diplomskog rada.

Veliko hvala mojim roditeljima i mojoj curi na neprestanoj podršci i razumijevanju prilikom studiranja.

Sažetak

U radu je proveden proračun armiranobetonskog dvobrodnog okvira prema nelinearnoj statičkoj metodi za gravitacijsko opterećenje i monotono rastuća horizontalna opterećenja. Na temelju podataka o dimenzijama poprečnih presjeka, kvaliteti materijala te količini i rasporedu armature, najprije su izrađeni dijagrami moment savijanja-zakretanje u plastičnim zglobovima. Ovi su dijagrami opisani pomoću dvije točke: momentom savijanja pri popuštanju armature te momentom savijanja u trenutku sloma presjeka. Pritom je u obzir uzet učinak ovijanja betona uslijed gusto postavljenih spona u kritičnom području. Zatim je proveden nelinearni statički proračun postupnog guranja u programskom paketu SeismoStruct. Stupovi i grede modelirani su linearno elastičnim elementima, dok su plastični zglobovi definirani spojnim elementima, u koje su ugrađeni prethodno definirani bilinearni dijagrami moment-zakretanje. Prema EN 1998-3:2011 razmatrana su tri granična stanja: granično stanje blizu rušenja, granično stanje znatnog oštećenja i granično stanje ograničenog oštećenja. Prikazan je redosljed formiranja plastičnih zglobova, te je dana ocjena ponašanja okvira. Plastični zglobovi formirali su se u gredama i podnožju stupova, čime je dokazan željeni mehanizam sloma u potresu (jaki stup i slaba greda).

Ključne riječi: armiranobetonski okvir, nelinearni statički proračun, potresna otpornost

Abstract

In this final year project, a nonlinear static analysis has been carried out on a reinforced concrete two-bay frame structure under gravity loads and monotonically increasing horizontal loads. Based on the data on the dimensions of the cross sections, the quality of the materials and the quantity and arrangement of the reinforcement, the bending moment-rotation diagrams in the plastic hinges were first determined. These diagrams were described using two points: the bending moment when the reinforcement yields and the bending moment at the section failure. The effect of concrete confinement due to densely placed ties in the critical area was taken into account. Then a nonlinear static pushover analysis was carried out in the SeismoStruct software package. Columns and beams were modelled by linear elastic elements, while plastic hinges were defined by connecting elements (links), in which previously defined bilinear moment-rotation diagrams are embedded. According to EN 1998-3:2011, three limit states were considered: the limit state of near collapse, the limit state of significant damage and the limit state of damage limitation. The sequence of formation of plastic hinges is shown, and the behaviour of the frame is evaluated. Plastic hinges were formed in the beams and at the base of the columns, which proved the desired failure mechanism in an earthquake (strong columns and weak beams).

Keywords: reinforced concrete frame, non-linear static analysis, earthquake resistance

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	1
POPIS TABLICA.....	3
1. UVOD	5
2. POTRESNI PRORAČUN	6
2.1. Općenito	6
2.2. Tradicionalni i suvremeni pristup	7
2.3. Nelinearni statički proračun	8
3. TEHNIČKI OPIS	20
3.1. Općenito	20
3.2. Opis konstrukcije.....	22
3.3. Proračun konstrukcije.....	22
4. PRORAČUN PLASTIČNIH ZGLOBOVA.....	23
4.1. Općenito	23
4.2. Primjer stupa (stup poz. III/100)	25
4.3. Primjer grede (greda poz. 115-115)	37
4.4. Ostali stupovi.....	55
4.5. Ostale grede.....	75
5. PRIMJENA METODE POSTUPNOG GURANJA NA VIŠEKATNI OKVIR.....	88
5.1. Ulazni podaci.....	88
5.2. Prikaz rezultata.....	97
6. ZAKLJUČAK	105
LITERATURA.....	106

POPIS SLIKA

Slika 1. Graf točnost isloženost – interpretabilnost pojedine metode proračuna [1].....	6
Slika 2. Konstrukcija (lijevo) i elastični spektar odziva ubrzanja (desno) [4].....	9
Slika 3. Transformacija sustava u odnos ubrzanje-pomak (A-D) [5]	10
Slika 4. Bilinearni spektar R_{μ} -T [4]	10
Slika 5. Točke formiranja prvog plastičnog zgloba i formiranja mehanizma na grafu αVb – D [5]	11
Slika 6. Konstrukcija podvrgnuta stalnim gravitacijskim opterećenjima [5]	12
Slika 7. Jednolična (broj 1) i modalna (broj 2) raspodjela opterećenja [5]	12
Slika 8. Bočno opterećenje {P}, Poprečna sila u podnožju V i kontrolni pomak Dt [4].....	13
Slika 9. Krivulja kapaciteta za jednoličnu (broj 1) i modalnu (broj 2) raspodjelu opterećenja [5].....	13
Slika 10. Transformacija sustava s više stupnjeva slobode u ekvivalentan sustav s jednim stupnjem slobode [5].....	14
Slika 11. Bilinearna idealizacija krivulje sila-pomak [5]	15
Slika 12. Spektar kapaciteta sustava s jednim stupnjem slobode [5]	16
Slika 13. Elastični spektar (smeđe) s obzirom na spektar kapaciteta (narančasto) za zgrade s kratkim periodom osciliranja za slučaj a) (lijevo) i slučaj b) (desno) [5].....	17
Slika 14. Elastični (smeđe) i neelastični (zeleno) spektar s obzirom na spektar kapaciteta (narančasto) za zgrade s srednje dugim i dugim periodom osciliranja [5]	17
Slika 15. Pomak konstrukcije u trenutku prije formiranja mehanizma [2]	18
Slika 16. Redoslijed formiranja plastičnih zglobova konstrukcije [2].....	19
Slika 17. Okvirni model konstrukcije [7]	20
Slika 18. Vertikalna opterećenja na okvir [7]	21
Slika 19. Dijagram moment savijanja – zakrivljenost [8]	23
Slika 20. Bilinearni dijagram M- Φ	24
Slika 21. Presjek stupa poz. III/100	25
Slika 22. Bilinearni dijagram čelika B500B sa horizontalnom granom	28
Slika 23. Dijagram ovijenog betona parabola+pravac	30
Slika 24. Raspodjela naprezanja pri srednjoj granici popuštanja.....	31
Slika 25. Raspodjela naprezanja pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	34
Slika 26. Dijagram M – θ stup III/100.....	37
Slika 27. Presjek grede	37
Slika 28. Dijagram neovijenog betona parabola + pravac	40
Slika 29. Raspodjela naprezanja pri srednjoj granici popuštanja.....	41
Slika 30. Raspodjela naprezanja pri tlačnom slomu u betonu	44
Slika 31. Dijagram M – θ greda 115-115 (neovijeni beton).....	47
Slika 32. Dijagram ovijenog betona parabola+pravac	48
Slika 33. Raspodjela naprezanja pri srednjoj granici popuštanja.....	49
Slika 34. Raspodjela naprezanja pri tlačnom slomu u betonu	51
Slika 35. Dijagram M – θ greda 115-115 (ovijeni beton)	54
Slika 36. Dijagram M – θ stup III/200.....	59
Slika 37. Dijagram M – θ stup III/300.....	63
Slika 38. Dijagram M – θ stup IV/100	67
Slika 39. Dijagram M – θ stup IV/200	71
Slika 40. Dijagram M – θ stup IV/300	75

Slika 41. Dijagram M – θ greda 215-215	79
Slika 42. Dijagram M – θ greda 311-311 (vanjski oslonac)	83
Slika 43. Dijagram M – θ greda 311-311 (unutarnji oslonac)	87
Slika 44. Seismostruct – kartica „Materials“	88
Slika 45. SeismoStruct – kartica „Sections“	89
Slika 46. SeismoStruct – kartica „Element classes“	90
Slika 47. Link element - Parametri i bilinearna simetrična krivulja za stup poz. III/100 [10].....	90
Slika 48. Link element - Parametri i bilinearna nesimetrična krivulja za gredu poz. 115-115 [10]	91
Slika 49. SeismoStruct – kartica „Nodes“	91
Slika 50. SeismoStruct – kartica „Element Connectivity“	92
Slika 51. Model višekatnog okvira.....	93
Slika 52. Seismostruct – kartica „Applied Loads“.....	94
Slika 53. Transformacija trokutastog u pravokutni sustav opterećenja.....	94
Slika 54. Seismostruct – elastični spektri ubrzanja za pojedino granično stanje.....	96
Slika 55. SeismoStruct - ravninski model konstrukcije	96
Slika 56. Krivulja sposobnosti nosivosti	97
Slika 57. Vrijednosti ciljanog pomaka u m.....	97
Slika 58. Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u gredama	98
Slika 59. Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u stupovima	98
Slika 60. SeismoStruct - periodi i frekvencije.....	102
Slika 61. Redoslijed otvaranja plastičnih zglobova.....	103
Slika 62. Pomak konstrukcije pri opterećenju 448 kN	104
Slika 63. Pomak konstrukcije pri sili 603 kN.....	104

POPIS TABLICA

Tablica 1. Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC:2009) [1].....	6
Tablica 2. Preciznost, kompleksnost i interpretabilnost pojedine metode proračuna [1].	7
Tablica 3. Vrijednosti vertikalnih opterećenja na okvir	21
Tablica 4. Tablica greda okvirne konstrukcije [7]	24
Tablica 5. Tablica stupova okvirne konstrukcije [7].....	25
Tablica 6. Vrijednosti momenta savijanja i zakrivljenosti stupa poz. III/100	36
Tablica 7. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta stupa poz. III/100	36
Tablica 8. Vrijednosti momenta savijanja i zakrivljenosti grede poz. 115-115 – neovijeni beton	46
Tablica 9. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 115-115 – neovijeni beton	46
Tablica 10. Vrijednosti momenta savijanja i zakrivljenosti grede poz. 115-115 – neovijeni beton (zamijenjena armatura)	46
Tablica 11. Vrijednosti momenta savijanja i zakrivljenosti grede poz. 115-115 – neovijeni beton	53
Tablica 12. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 115-115 – ovijeni beton	53
Tablica 13. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 115-115 – ovijeni beton (zamijenjena armatura).....	54
Tablica 14. Karakteristike poprečnog presjeka poz. III/200	55
Tablica 15. Karakteristike armature poz. III/200	55
Tablica 16. Vrijednosti za proračun ovijenog betona poz. III/200	56
Tablica 17. Proračun za granicu popuštanja armature ovijenog betona poz. III/200	57
Tablica 18. Proračun za graničnu nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona poz. III/200	58
Tablica 19. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta stupa poz. III/200.....	58
Tablica 20. Karakteristike poprečnog presjeka poz. III/300	59
Tablica 21. Karakteristike poprečnog presjeka poz. III/300	60
Tablica 22. Vrijednosti za proračun ovijenog betona poz. III/300.....	60
Tablica 23. Proračun za granicu popuštanja armature ovijenog betona poz. III/300	61
Tablica 24. Proračun za graničnu nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona poz. III/300	62
Tablica 25. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta stupa poz. III/300.....	62
Tablica 26. Karakteristike poprečnog presjeka poz. IV/100	63
Tablica 27. Karakteristike armature poz. IV/100	64
Tablica 28. Vrijednosti za proračun ovijenog betona poz. IV/100	64
Tablica 29. Proračun za granicu popuštanja armature ovijenog betona poz. IV/100	65
Tablica 30. Proračun za graničnu nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona poz. IV/100	66
Tablica 31. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta stupa poz. IV/100.....	66
Tablica 32. Karakteristike poprečnog presjeka poz. IV/200	67
Tablica 33. Karakteristike armature poz. IV/200	68
Tablica 34. Vrijednosti za proračun ovijenog betona poz. IV/200	68
Tablica 35. Proračun za granicu popuštanja armature ovijenog betona poz. IV/200	69

Tablica 36. Proračun za graničnu nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona poz. IV/200	70
Tablica 37. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta stupa poz. IV/200	70
Tablica 38. Karakteristike poprečnog presjeka poz. IV/300	71
Tablica 39. Karakteristike armature poz. IV/300	72
Tablica 40. Vrijednosti za proračun ovijenog betona poz. IV/300	72
Tablica 41. Proračun za granicu popuštanja armature ovijenog betona poz. IV/300	73
Tablica 42. Proračun za graničnu nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona poz. IV/300	74
Tablica 43. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta stupa poz. IV/300	74
Tablica 44. Karakteristike poprečnog presjeka poz. 215-215	75
Tablica 45. Karakteristike armature poz. 215-215	76
Tablica 46. Vrijednosti za proračun ovijenog betona poz. 215-215	76
Tablica 47. Proračun za granicu popuštanja armature ovijenog betona poz. 215-215	77
Tablica 48. Proračun za graničnu nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona poz. 215-215	78
Tablica 49. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 215-215	78
Tablica 50. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 215-215 – zamijenjena uzdužna armatura	78
Tablica 51. Karakteristike poprečnog presjeka poz. 311-311(vanjski oslonac)	79
Tablica 52. Karakteristike armature poz. 311-311(vanjski oslonac)	80
Tablica 53. Vrijednosti za proračun ovijenog betona poz. 311-311(vanjski oslonac)	80
Tablica 54. Proračun za granicu popuštanja armature ovijenog betona poz. 311-311(vanjski oslonac)	81
Tablica 55. Proračun za graničnu nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona poz. 311-311(vanjski oslonac)	82
Tablica 56. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 311-311 (vanjski oslonac)	82
Tablica 57. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 311-311 (vanjski oslonac) – zamijenjena uzdužna armatura	82
Tablica 58. Karakteristike poprečnog presjeka poz. 311-311(unutarnji oslonac)	83
Tablica 59. Karakteristike armature poz. 311-311(unutarnji oslonac)	84
Tablica 60. Vrijednosti za proračun ovijenog betona poz. 311-311(unutarnji oslonac)	84
Tablica 61. Proračun za granicu popuštanja armature ovijenog betona poz. 311-311(unutarnji oslonac)	85
Tablica 62. Proračun za graničnu nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona poz. 311-311(unutarnji oslonac)	86
Tablica 63. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 311-311 (unutarnji oslonac)	86
Tablica 64. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 311-311 (unutarnji oslonac) – zamijenjena uzdužna armatura	86
Tablica 65. Granično stanje ograničenog oštećenja - zahtjev i sposobnost deformiranja plastičnog zgloba	99
Tablica 66. Granično stanje znatnog oštećenja – zahtjev i sposobnost deformiranja plastičnog zgloba	100
Tablica 67. Granično stanje blizu rušenja - zahtjev i sposobnost deformiranja plastičnog zgloba	101

1. UVOD

Proteklih godina proveden je velik broj istraživanja kako bi se procijenilo ponašanje građevina tijekom djelovanja potresa. Zgrade su obično projektirane na potresno opterećenje koristeći linearni elastični proračun konstrukcije, iako većina njih doživi značajne neelastične deformacije pod velikim seizmičkim djelovanjem. Današnje metode projektiranja zahtijevaju načine određivanja stvarnog ponašanja konstrukcije. Kao takav, nelinearni proračun konstrukcije može igrati važnu ulogu u projektiranju novih i ocjeni postojećih zgrada. Koristi se za procjenu i projektiranje rješenja rekonstrukcije postojećih građevina ili projektiranja novih građevina, te za specifične zahtjeve procjene ponašanja građevine pod utjecajem potresnog djelovanja.

Za razliku od linearno elastičnog proračuna i metoda projektiranja koje su ustanovljene te imaju široku primjenu u građevinarstvu, nelinearne metode proračuna i njihova primjena u projektiranju još uvijek se razvijaju i zahtijevaju od inženjera razvijanje novih vještina. Nelinearnim proračunom je obuhvaćeno neelastično ponašanje i granična stanja koja ovise o deformiranju konstrukcije i njezinih elemenata.

2. POTRESNI PRORAČUN

2.1. Općenito

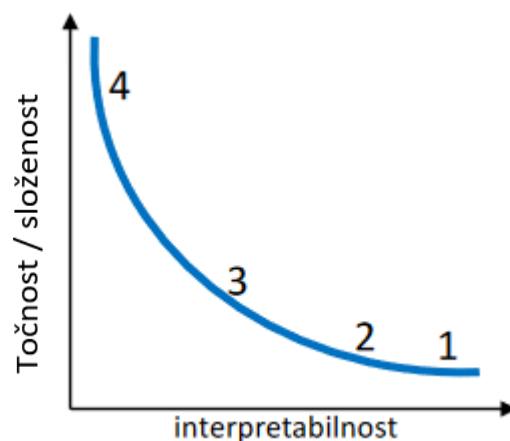
Inženjeri danas na raspolaganju imaju različite metode za potresni proračun konstrukcija. One imaju svoje prednosti i nedostatke, isto tako i svoja ograničenja u primjeni [1].

Norme za projektiranje potresne otpornosti konstrukcija ograničavaju utjecaj potresa na lokalnu i globalnu nosivost na horizontalna i vertikalna opterećenja te oštećenja koja bi utjecala na uporabljivost konstrukcije. Konkretno, Eurokod 8 sadrži četiri metode proračuna konstrukcije za potresnu proračunsku situaciju koje su prikazane u Tablici 1 [2].

Tablica 1. Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC:2009) [1]

REDNI BROJ	METODE PRORAČUNA		EN 1998-1
1.	Linearni statički proračun	Metoda proračuna bočnih sila	[4.3.3.2]
2.	Linearni dinamički proračun	Modalni proračun primjenom spektra odziva	[4.3.3.3]
3.	Nelinearni statički proračun	Metoda postupnog guranja (engl. pushover)	[4.3.3.4.2 i Dodatak B]
4.	Nelinearni dinamički proračun	Nelinearni proračun primjenom vremenskog zapisa (time-history)	[4.3.3.4.3.]

Sa rednim brojem proračuna raste i njezina točnost, ali i njezina složenost te napor i vrijeme provođenja analize. Slika 1 i tablica 2 prikazuju odnos točnosti i složenosti i interpretabilnosti pojedine metode proračuna. [1]



Slika 1. Graf točnost i složenost – interpretabilnost pojedine metode proračuna [1]

Tablica 2. Točnost, složenost i interpretabilnost pojedine metode proračuna [1]

Broj metode	Točnost	Složenost	Interpretabilnost
1	prihvatljiva	mala	jako dobra
2	dobra	prihvatljiva	dobra
3	vrlo dobra	velika	prihvatljiva
4	jako dobra	jako velika	jako slaba

Suvremeni programski paketi omogućuju dobivanje rješenja za nelinearne probleme. Međutim, potrebno je iskustvo, znanje i određene vještine za utvrđivanje njihove valjanosti i te analize mogu biti neprikladne. Treba obratiti pažnju na definiranje prikladnog modela i parametara rješenja. Razumijevanje problema i uloga koju imaju ovi parametri te planiran i logičan pristup mnogo će pridonijeti uspješnom rješenju. [3]

2.2. Tradicionalni i suvremeni pristup

Tradicionalni pristup proračunu konstrukcija zasnovan na silama na potresno djelovanje temelji se na zadovoljavanju provjere graničnih stanja nosivosti i uporabljivosti. Kako se ne bi morao provoditi nelinearni proračun, sposobnost trošenja energije se uzima u obzir tako da se umanje elastični spektri odziva ubrzanja podloge faktorom ponašanja q . Faktor ponašanja q jednak je omjeru potresnih sila kada je odziv konstrukcije potpuno elastičan uz 5%-no viskozno prigušenje i proračunskih potresnih sila i ovisi o geometriji, materijalima, pravilnosti konstrukcije i detaljima izvedbe čvorova. Zbog svoje jednostavnosti i pristupačnosti u praksi tradicionalni pristup je još uvijek korišteniji od suvremenog pristupa. Međutim, ovaj pristup ima i nekoliko nedostataka [2]:

- vrijednost faktora ponašanja q je približna te ne daje preciznu sliku promatranog sustava
- preraspodjela deformacija i sila u nelinearnom području nije uključena u proračun
- ne može se provjeriti mehanizam koji dovodi do sloma

Posljednjih se godina sve više počinju razvijati metode proračuna na temelju ponašanja konstrukcije (engl. performance based design), pri čemu se inženjeri jako zanimaju za njihove koncepte zbog njihovog potencijala u boljoj procjeni, projektiranju i razumijevanju ponašanja konstrukcije tijekom snažnog potresa. Također, pokazalo se da suvremeni pristup na osnovi pomaka (engl. displacement-based approach) daje puno realniji prikaz problema potresnog djelovanja u odnosu na tradicionalni pristup na osnovi sila (engl. force-based approach) [2].

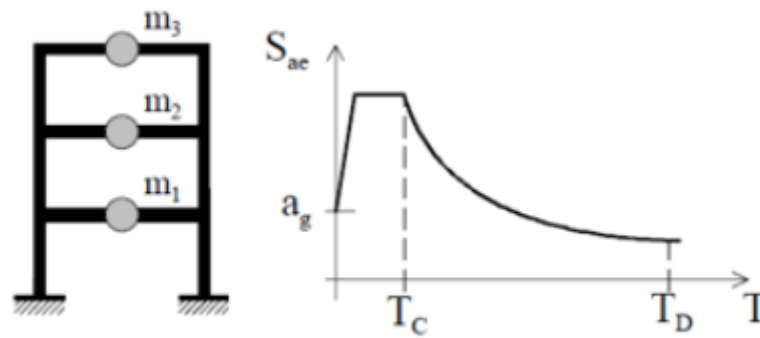
Za nove zgrade, koje su većinom predimenzionirane i gdje je poznat mehanizam sloma, linearne metode i pristup faktorom ponašanja su dovoljno pouzdane. Za pravilne zgrade čiji je odziv takav da nema značajnog doprinosa viših oblika osciliranja primjenjuje se metoda bočnih sila. Za postojeće zgrade je važno uočiti lokalne i globalne mehanizme sloma, te je za njih najpovoljnija nelinearna statička metoda. Zbog svoje složenosti, velikog broja ulaznih podataka, teške interpretacije dobivenih rezultata i dugotrajnosti proračuna, nelinearni proračun s pomoću vremenskog zapisa obično nadilazi mogućnosti praktične primjene. Isto tako, dobiveni rezultati nisu uvijek pouzdaniji zbog nesigurnosti ulaznih parametara. [2]

2.3. Nelinearni statički proračun

Eurokodom 8 [HRN EN 1998-1] uvedena je 2004. godine nelinearna statička metoda N2 kao jednu od opcija za projektiranje potresne otpornosti konstrukcija. U svojim počecima N2 metoda rabila se uz nelinearni dinamički proračun, međutim kasnije je radi praktičnosti zamijenjena proračunom s postupnim guranjem. Ova metoda daje vrlo slične rezultate kao nelinearni proračun s pomoću vremenskog zapisa, ali je brža i jednostavnija. Sastoji se od 8 koraka [3]:

- 1. korak – Podaci

Ovim korakom se daje opis geometrije konstrukcije, poprečni presjeci, konstitutivni zakoni i potresni zahtjev u obliku elastičnog spektra ubrzanja (Slika 2.).



Slika 2. Konstrukcija (lijevo) i elastični spektar odziva ubrzanja (desno) [4]

- 2. korak – potresno djelovanje u obliku AD

Kako bi usporedili sposobnost i zahtjev, potrebno je transformirati oblik spektra iz klasičnog odnosa ubrzanje - period u oblik ubrzanje – pomak (slika 3). Ovaj postupak je prilično jednostavan, a spektar odziva ubrzanja S_a i pomak S_d računaju se iz odnosa [3]:

$$S_{de} = \omega^2 S_{ae} = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} \quad (1)$$

$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \quad (2)$$

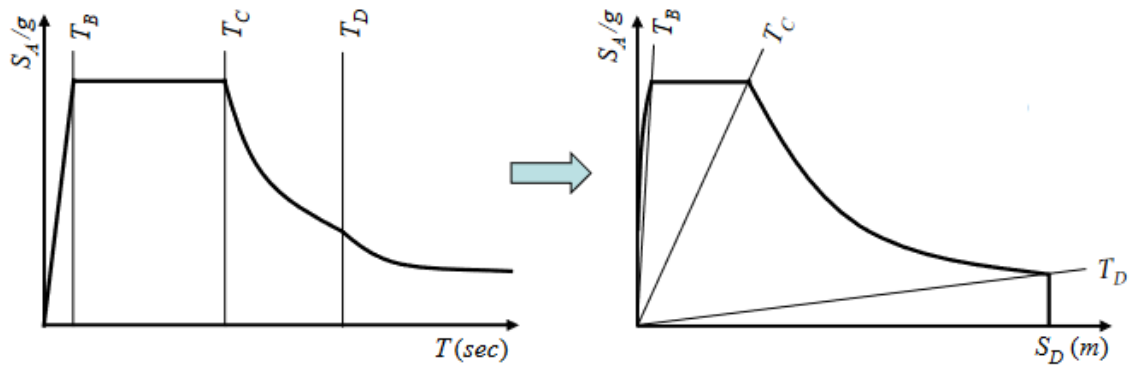
$$S_d = \frac{\mu}{R_\mu} S_{de} = \frac{\mu}{R_\mu} \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} = \mu \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (3)$$

gdje je μ koeficijent duktilnosti utvrđen kao omjer maksimalnog pomaka i pomaka pri granici popuštanja, a R_μ redukcijski faktor zbog duktilnosti. Ovaj redukcijski faktor je određen bilinearnim spektrom (slika 4), a definiran je kao [2]:

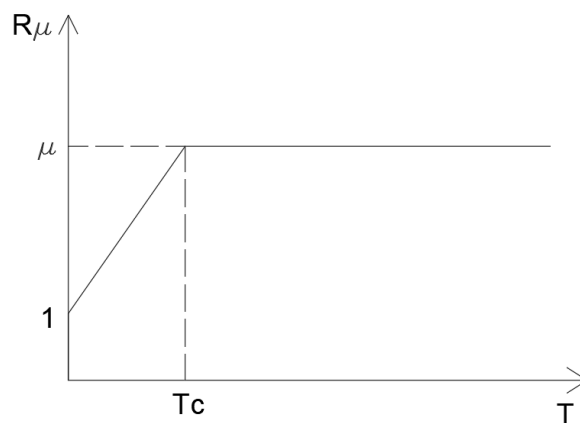
$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T}{T_C} + 1 \text{ za } T < T_C \quad (4)$$

$$R_\mu = \mu \text{ za } T \geq T_C \quad (5)$$

gdje je T_c karakteristični period gibanja podloge koji ovisi o vrsti tla (slika 4).



Slika 3. Transformacija sustava u odnos ubrzanje-pomak (A-D) [5]

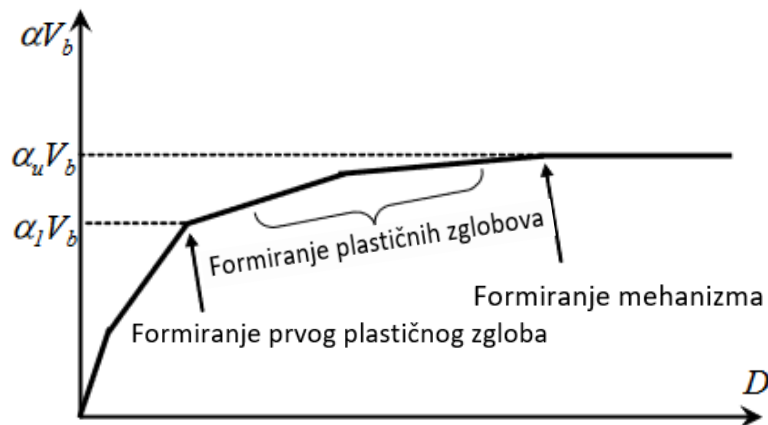


Slika 4. Bilinearni spektar $R\mu-T$ [4]

- 3. korak – metoda postupnog guranja

Metoda postupnog guranja (*engl. pushover analysis*) može biti korištena za sljedeće svrhe:

- radi provjere ili kontrole vrijednosti omjera prekomjerne čvrstoće α_u / α_1 . α_u / α_1 je omjer između poprečne sile u podnožju $\alpha_u V_b$ koja odgovara formiranju mehanizma i poprečne sile u podnožju $\alpha_1 V_b$ koja odgovara formiranju prvog plastičnog zgloba (slika 5).



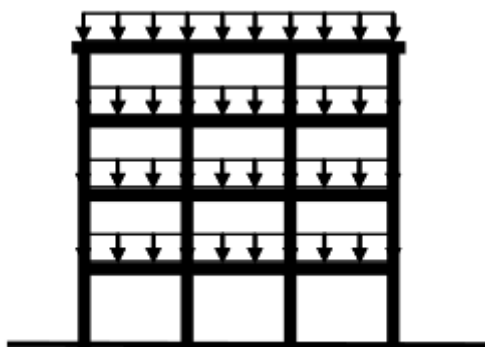
Slika 5. Točke formiranja prvog plastičnog zgloba i formiranja mehanizma na grafu $\alpha V_b - D$ [5]

- za procjenu očekivanih plastičnih mehanizama i raspodjele oštećenja
- za ocjenu ponašanja konstrukcija postojećih ili obnovljenih zgrada
- kao druga mogućnost proračuna prema linearno elastičnom proračunu u kojem se upotrebljava faktor ponašanja q . Tada se kao utemeljenje proračuna treba uzeti ciljani pomak [5].

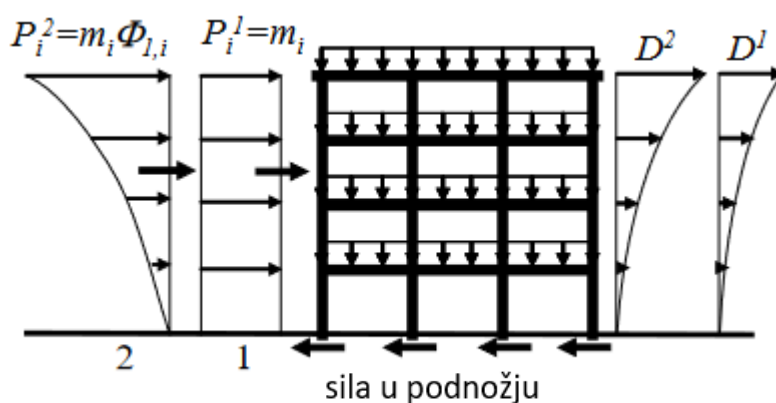
Model konstrukcije može biti ravninski ili prostorni, ovisno o pravilnosti zgrade. Nelinearne metode su posebno zanimljive za postojeće zgrade, koje su rijetko pravilne, tako da je za većinu slučajeva potreban kompletan prostorni model [5].

Metoda postupnog guranja se provodi na način da se konstrukcija podvrgne stalnim gravitacijskim opterećenjima (slika 6) te monotono rastućim bočnim opterećenjima koja približno predstavljaju sile izazvane potresom. Najmanje dvije vertikalne raspodjele bočnih opterećenja trebaju biti primijenjene (slika 7) [6]:

1. jednolična raspodjela - raspodjela bočnih opterećenja proporcionalna masi, ubrzanje je jednolično po visini
2. modalna raspodjela - raspodjela bočnih opterećenja proporcionalna bočnim silama spojivim s raspodjelom bočne sile u promatranom smjeru određenu elastičnim proračunom [6]

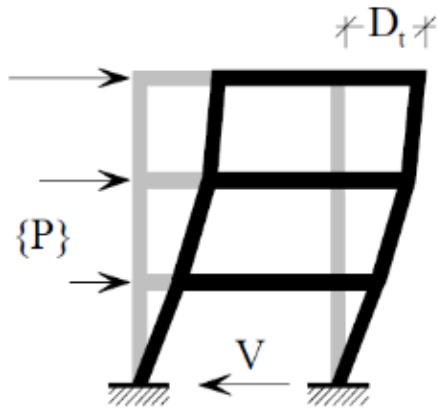


Slika 6. Konstrukcija podvrgnuta stalnim gravitacijskim opterećenjima [5]

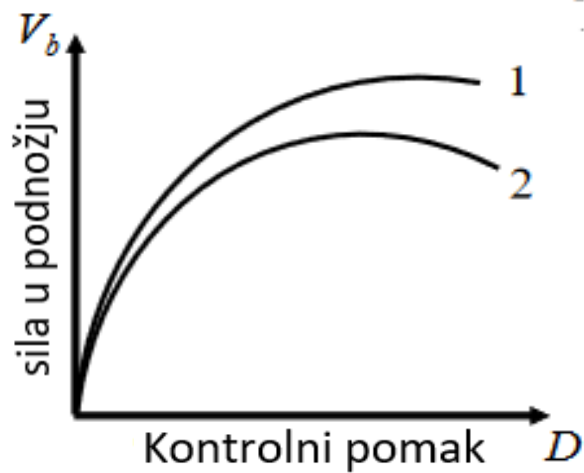


Slika 7. Jednolična (broj 1) i modalna (broj 2) raspodjela opterećenja [5]

Primijenjena bočna opterećenja i odgovor konstrukcije grafički su prikazani u obliku odnosa ukupne poprečne sile u podnožju zgrade te pomaka vrha zgrade (kontrolni pomak) (slika 8). Kontrolni pomak smije se uzeti u središtu mase krova zgrade. Grafički prikaz odnosa poprečne sile u podnožju i kontrolnog pomaka nazivamo i krivulja sposobnosti nosivosti pomoću koje istovremeno dobijemo podatke o nosivosti, duktilnosti i krutosti zgrade (slika 9) [2].



Slika 8. Bočno opterećenje $\{P\}$, Poprečna sila u podnožju V i kontrolni pomak Δ [4]



Slika 9. Krivulja sposobnosti nosivosti za jednoličnu (broj 1) i modalnu (broj 2) raspodjelu opterećenja [5]

Vektor bočnog opterećenja računa se prema izrazu:

$$P = p \cdot m \cdot \phi \quad (6)$$

gdje je p intenzitet bočnih sila, m matrica masa i ϕ pretpostavljeni oblik pomaka.

- 4. korak - ekvivalentni model s jednim stupnjem slobode i dijagram kapaciteta

Izvorni sustav s više stupnjeva slobode potrebno je transformirati u ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode (slika 10), a njegova jednadžba gibanja glasi [2]:

$$m^* \ddot{D}^* + F^* = -m^* a \quad (7)$$

gdje je m^* ekvivalentna masa s jednim stupnjem slobode, D^* ekvivalentni pomak, a F^* ekvivalentna sila sustava s jednim stupnjem slobode. Ove vrijednosti određuju se pomoću izraza:

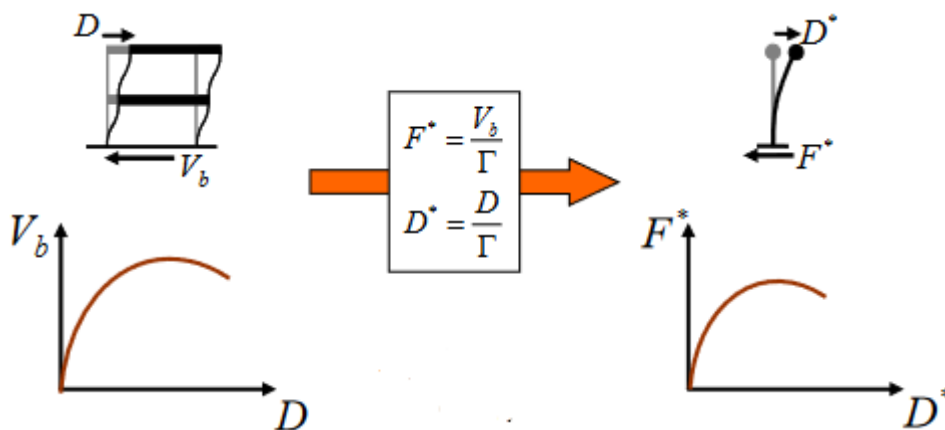
$$m^* = \Phi^T m 1 = \sum m_i \Phi_i \quad (8)$$

$$D^* = \frac{D_t}{\Gamma} \quad (9)$$

$$F^* = \frac{V}{\Gamma} \quad (10)$$

gdje je Γ faktor pretvorbe iz sustava s više stupnjeva slobode u sustav s jednim stupnjem slobode koji se računa prema sljedećem izrazu:

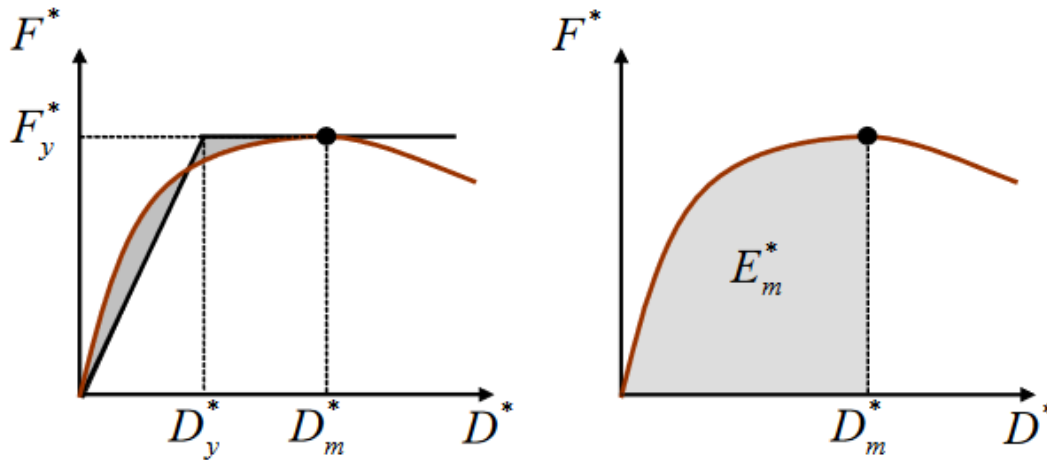
$$\Gamma = \frac{\Phi^T m 1}{\Phi^T m \Phi} = \frac{\sum m_i \Phi_i}{\sum m_i \Phi_i^2} = \frac{m^*}{\sum m_i \Phi_i^2} \quad (11)$$



Slika 10. Transformacija sustava s više stupnjeva slobode u ekvivalentan sustav s jednim stupnjem slobode [5]

Krivulja postupnog guranja idealizira se približnim bilinearnim, elastoplastičnim odnosom sila – pomak (slika 11). Sila pri popuštanju F_y^* predstavlja silu u podnožju zgrade pri stvaranju plastičnog mehanizma te istovremeno i graničnu nosivost idealiziranog

sustava. Izjednačavanjem površine ispod stvarne i idealizirane krivulje određuje se početna krutost idealiziranog sustava. [2]



Slika 11. Bilinearna idealizacija krivulje sila-pomak [5]

Izraz za računanje pomaka na granici popuštanja glasi:

$$D_y^* = 2 \left(D_m^* - \frac{E_m^*}{F_y^*} \right), \quad (12)$$

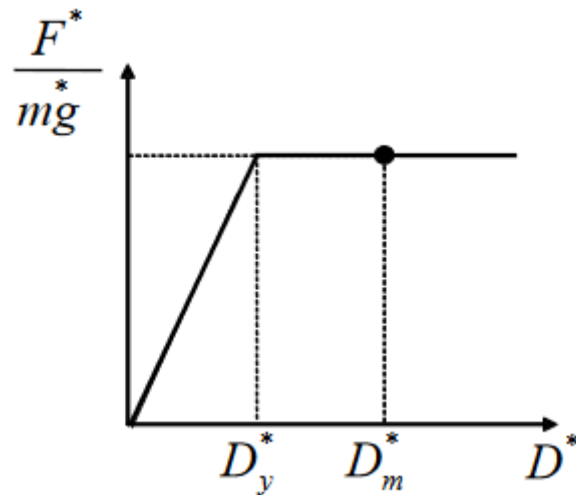
gdje je E_m^* modul elastičnosti sustava s jednim stupnjem slobode.

Odnos sila – pomak sustava s jednim stupnjem slobode i sustava s više stupnja slobode razlikuju se samo za faktor pretvorbe Γ , jer on vrijedi i za transformaciju pomaka te transformaciju sila. Dobivanjem odgovarajućih vrijednosti za pomak, silu i masu sustava s jednim stupnjem slobode može se izračunati njegov elastični period T^* te ubrzanje na granici popuštanja S_{ay} prema izrazima [2]:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* D_y^*}{F_y^*}} \quad (13)$$

$$S_{ay}^* = \frac{F_y^*}{m^*} \quad (14)$$

Na temelju izraza (14) krivulja sposobnosti nosivosti transformirana je u dijagram ubrzanja u odnosu na pomak sustava s jednim stupnjem slobode koji je prikazan na slici 12.



Slika 12. Spektar kapaciteta sustava s jednim stupnjem slobode [5]

- 5. korak - Potresni zahtjev za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode

Grafički, zahtijevano ubrzanje S_{ae} određuje sjecište pravca koji odgovara periodu T^* i idealiziranog bilinearnog sustava sa elastičnim zahtijevanim spektrom. Za kratke periode, tj. one periode gdje je $T^* < T_c$ vrijedi:

a) ako je $\frac{F_y^*}{m^*} \geq S_A$ odziv ostaje linearno elastičan te je ciljani pomak jednak:

$$D_t^* = D_{et}^* \quad (15)$$

b) ako je $\frac{F_y^*}{m^*} < S_A$ odziv ulazi u nelinearnu zonu te je ciljani pomak jednak:

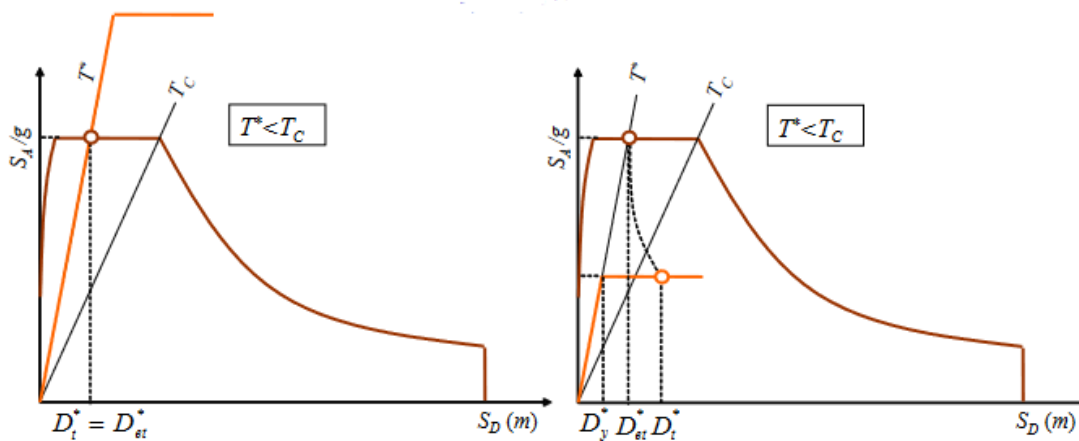
$$D_t^* = \frac{D_{et}^*}{q_u} \left(1 + (q_u - 1) \frac{T_c}{T^*} \right) \quad (16)$$

gdje je:

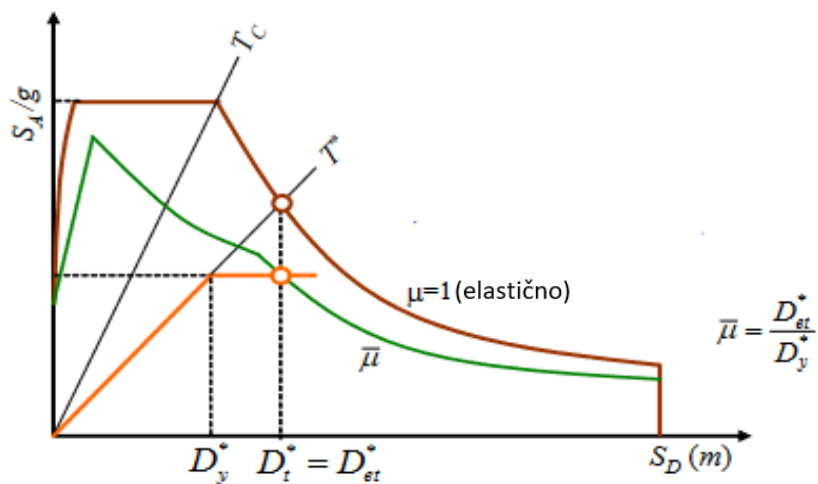
$$q_u = R\mu = \frac{S_e(T^*) \cdot m^*}{F_y^*} \quad (17)$$

Za srednje duge i duge periode, odnosno one periode gdje je $T^* \geq T_c$ vrijedi jednakost za ciljani pomak (15) [2]:

$$D_t^* = D_{et}^*$$



Slika 13. Elastični spektrar (smeđe) s obzirom na spektrar kapaciteta (narančasto) za zgrade s kratkim periodom osciliranja za slučaj a) (lijevo) i slučaj b) (desno) [5]



Slika 14. Elastični (smeđe) i neelastični (zeleno) spektrar s obzirom na spektrar kapaciteta (narančasto) za zgrade s srednje dugim i dugim periodom osciliranja [5]

- 6. korak – Globalni potresni zahtjev za sustav s više stupnjeva slobode

Ciljani pomak sustava s jednim stupnjem slobode potrebno je transformirati u ciljani pomak sustava s više stupnjeva slobode preko izraza:

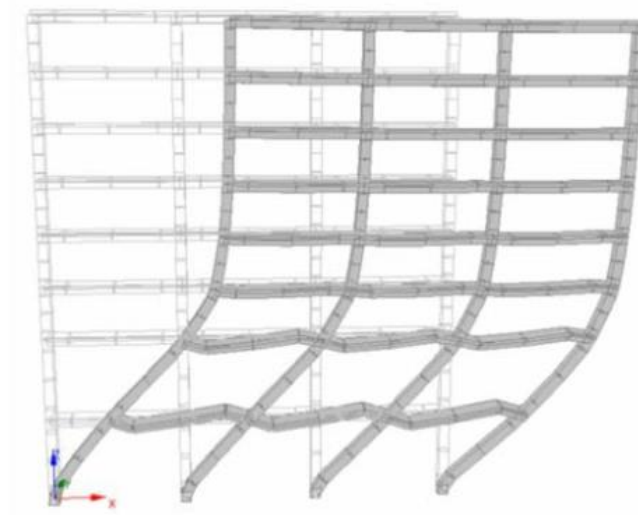
$$D_t = \Gamma \cdot D_t^* \quad (17)$$

- 7. korak – Lokalni potresni zahtjev za sustav s više stupnjeva slobode

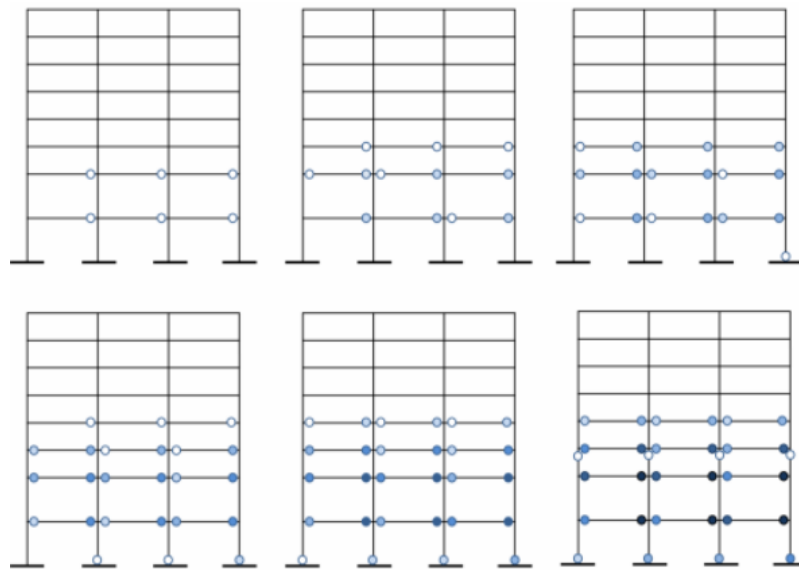
Provodi se metoda postupnog guranja dok se ne postignu vrijednosti ciljanog pomaka dobivenih 6. korakom koja nam daje oblik pomaka cijele konstrukcije, tj. lokalne potresne zahtjeve u obliku apsolutnih i relativnih pomaka katova. [2]

- 8. korak – procjena ponašanja konstrukcije (analiza oštećenja)

Uspoređivanjem seizmičkih zahtjeva s kapacitetima odgovarajućih razina ponašanja provodi se analiza oštećenja konstrukcije. Na slikama 15 i 16 prikazani je mehanizam sloma zgrade te redoslijed formiranja plastičnih zglobova. [2]



Slika 15. Pomak konstrukcije u trenutku prije formiranja mehanizma [2]

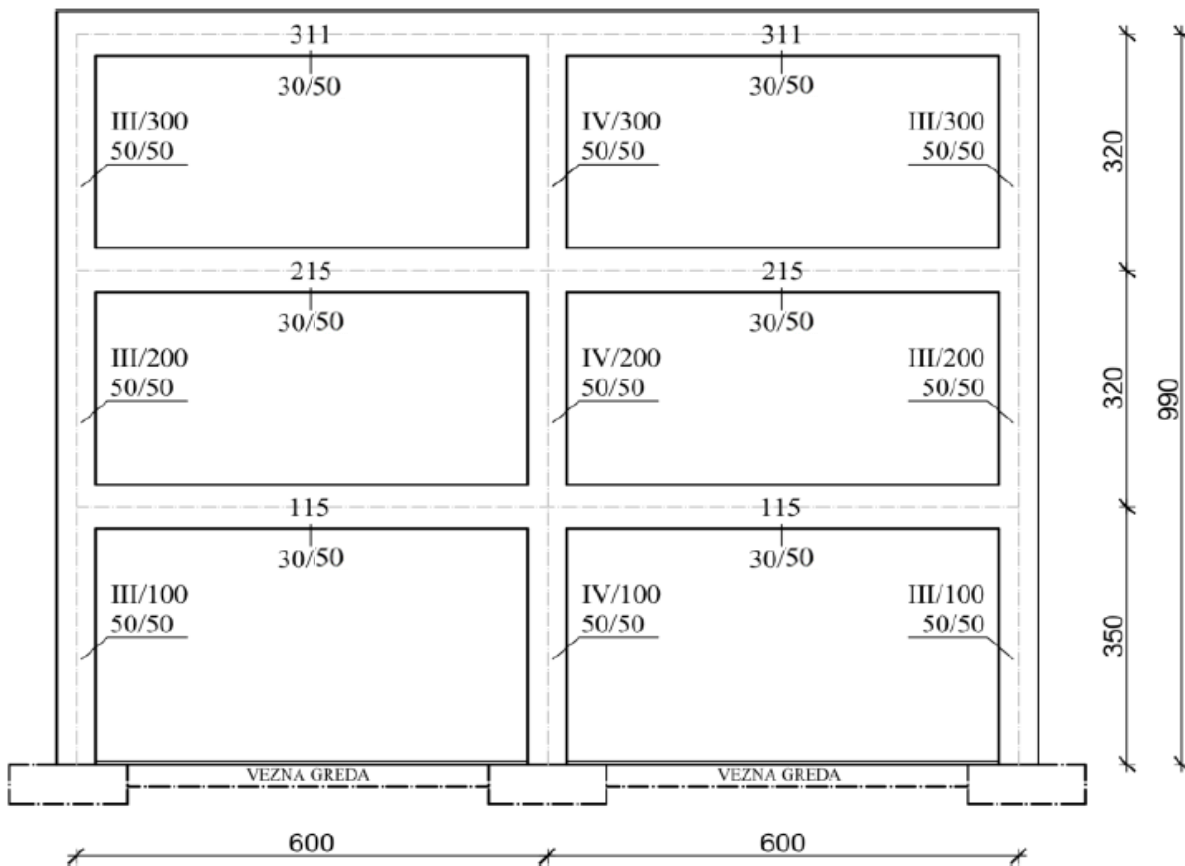


Slika 16. Redosljed formiranja plastičnih zglobova konstrukcije [2]

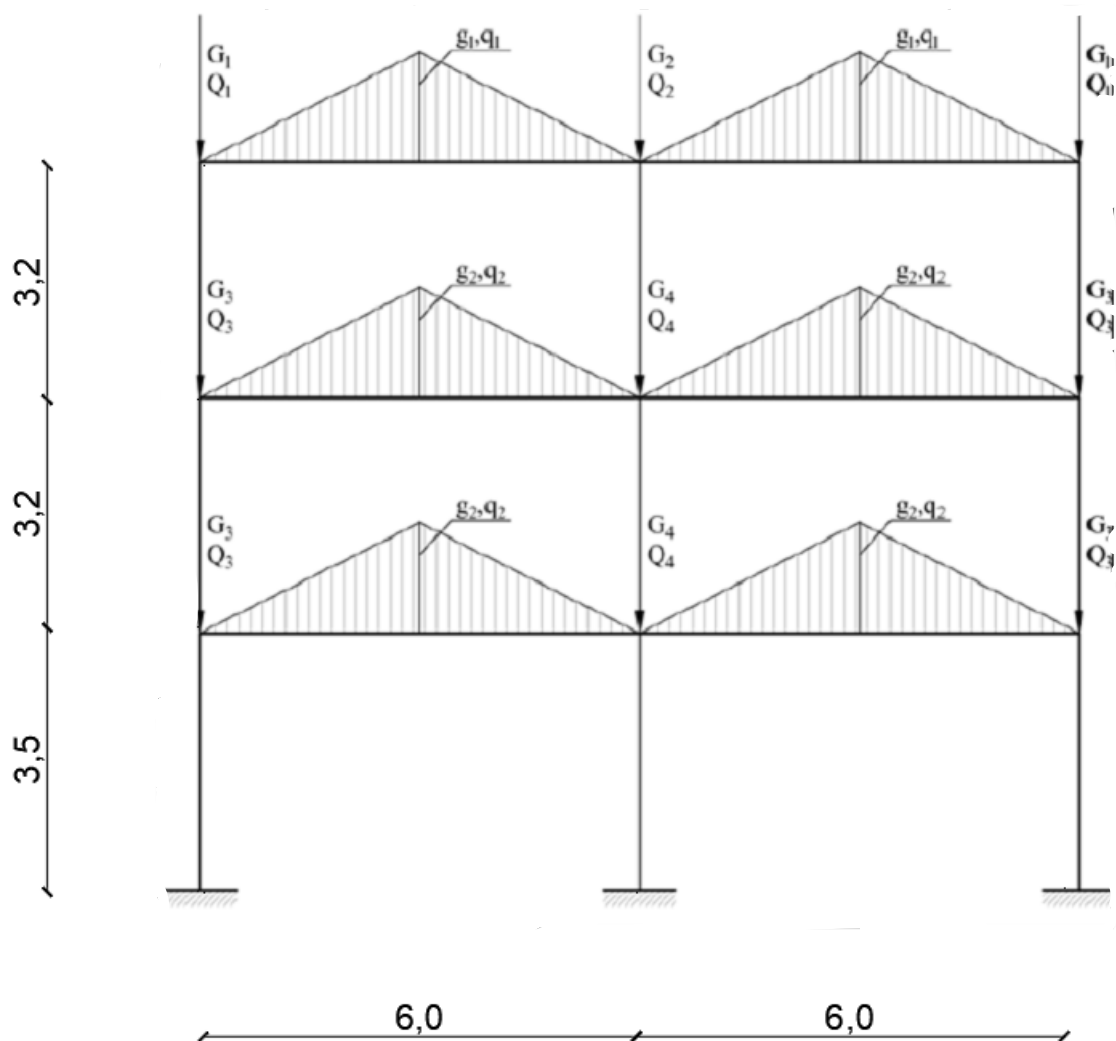
3. TEHNIČKI OPIS

3.1. Općenito

Konstrukcija poslovne zgrade katnosti P+2 ($g_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$) nalazi se u Rijeci na nadmorskoj visini od 200 m. Tlocrtno, zgrada je široka 12,0 m i dugačka 25,6m, dok je ukupna visina konstrukcije od kote terena 9,75 m, a od temeljne ploče 10,2 m. Svijetla visina prizemlja iznosi 3,5 m, dok su ostali katovi visoki 3,2 m. Okvirna konstrukcija prikazana je na slici 17, dok su vertikalna opterećenja na okvir prikazana na slici 18, a njihove vrijednosti u tablici 3. [7]



Slika 17. Okvirna armiranobetonska konstrukcija [7]



Slika 18. Vertikalna opterećenja na okvir [7]

Tablica 3. Vrijednosti vertikalnih opterećenja na okvir

Vertikalna opterećenja na okvir			
		mjerna jedinica	Potresna kombinacija $P=G+0,3*Q$
G1	145,48	kN	148,744
Q1	4,08	kN	
G2	223,70	kN	230,228
Q2	8,16	kN	
G3	129,61	kN	145,93
Q3	20,4	kN	
G4	168,01	kN	200,65
Q4	40,8	kN	
g1	61,56	kN/m	63,48
q1	2,4	kN/m	
g2	45,18	kN/m	54,78
q2	12,00	kN/m	

3.2. Opis konstrukcije

Krov je projektiran kao neprohodan ravni krov s završnim slojem pijeska te se na njemu nalazi betonski zid visine 34 cm. Konstrukcija poslovne zgrade izvedena je kao monolitna armiranobetonska konstrukcija. Također, ploče međukatnih konstrukcija se izvode od armiranog betona i noseive su u dva smjera. Oslonjene su na uzdužne i poprečne grede, a njihova debljina iznosi 20 cm. Stupovi su dimenzija 50x50 cm, dok su grede dimenzija 30x50. Ukrućenje okvirne konstrukcije postignuto je armiranobetonskim zidovima debljine 18 cm. Zidanim opečnim blokovima debljine 30 cm izvedena je ispuna AB okvira konstrukcije. Pregradni zidovi debljine 10 cm izvedeni su od gips–kartonskih ploča. Tlo temeljenja je tlo kategorije A. Temelji samci su dimenzija 150x150x55 cm, a temeljna ploča debljine 10 cm. [7]

3.3. Proračun konstrukcije

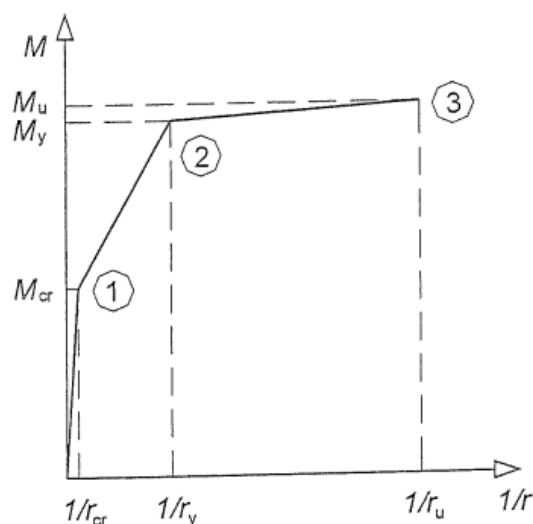
Projektiranje je provedeno u skladu sa važećim normama i propisima. Za statički proračun koristio se softverski paket StaadPRO V8i. Razred betona koji se koristi za sve noseive elemente konstrukcije je C 30/37, a za armiranje odabran je čelik B 500B. [7]

4. PRORAČUN PLASTIČNIH ZGLOBOVA

4.1. Općenito

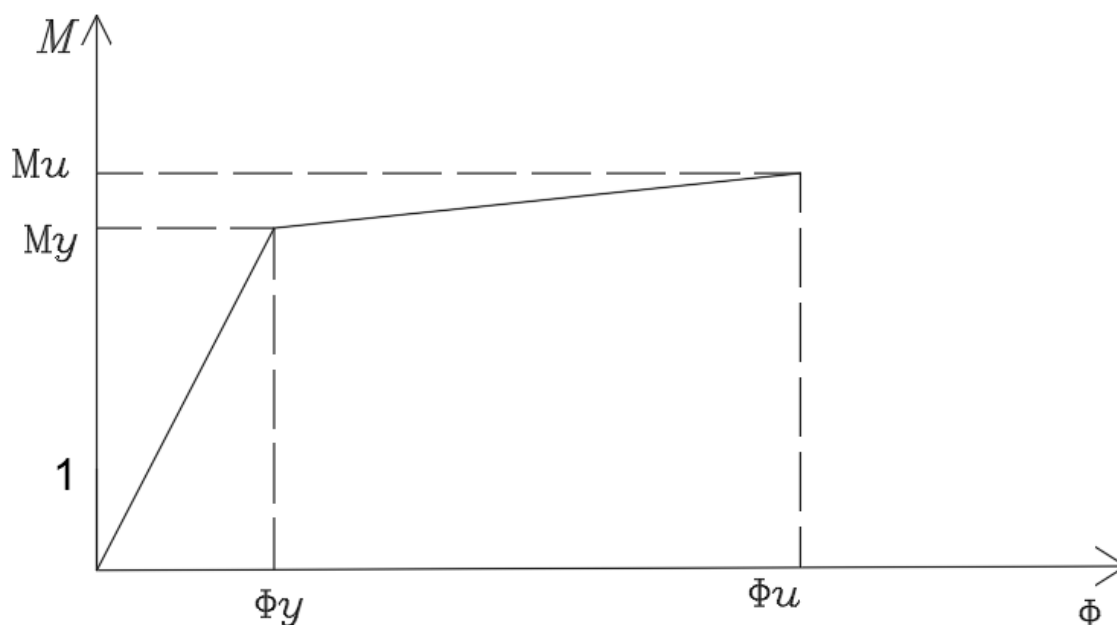
Kod projektiranja konstrukcije bitno je osigurati trošenje potresne energije bez značajnog gubitka nosivosti konstrukcije [11]. Ukoliko su ispunjeni uvjeti nosivosti i duktilnosti u kritičnim područjima konstrukcije, ispunjen je i jedan od kriterija da ne dođe do rušenja građevine. Kritičnim područjem naziva se područje konstrukcijskih elemenata najnepovoljnije kombinacije reznih sila i područje stvaranja plastičnih zglobova, koji se pojavljuju na krajevima stupova i greda. Duktilnom konstrukcijom može se nazvati ona konstrukcija čiji se elementi u kritičnim područjima mogu plastično deformirati [9].

Ponašanje plastičnih zglobova u elementima konstrukcije opisano je $M-\Phi$ dijagramima ($M-1/r$), tj. dijagramima moment savijanja – zakrivljenost. Oni se mogu opisati s pomoću tri točke, odnosno tri područja ponašanja presjeka prilikom povećavanja momenta savijanja. Prva točka označava pojavu prve pukotine, druga točka označava granicu popuštanja armature, dok treća točka označava slom presjeka koji može biti preko armature ili preko betona. Do pojave prve pukotine presjek je neraspucan i ponaša se elastično. U drugom području, između pojave prve pukotine i popuštanja armature, tlačna naprezanja preuzimaju beton i tlačna armatura, a vlačna naprezanja armatura. Daljnim povećanjem momenta savijanja, presjek se nalazi u trećem području sve dok ne dođe do sloma [8]. (Slika 19.)



Slika 19. Dijagram moment savijanja – zakrivljenost [8]

Za potrebe ovog diplomskog rada, za prikaz grafa koriste se dvije točke, točka 2 i točka 3 (bilinearni dijagram moment savijanja- zakrivljenost ($M-\Phi$), slika 20).



Slika 20. Bilinearni dijagram $M-\Phi$

Granični moment savijanja M_u i zakrivljenost Φ_u u daljnjem tekstu rada imaju oznaku M_{pz} i Φ_{pz} . U tablici 4. prikazane su grede okvirnog modela konstrukcije te pripadajuća armatura donje i gornje zone za unutarnji i vanjski oslonac grede. U tablici 5. prikazani su stupovi okvirne konstrukcije s pripadajućom armaturom i uzdužnom silom u presjeku pri dnu i pri vrhu stupa. Za svaki pojedini element (stup ili greda) proračunat je pripadajući bilinearni dijagram $M-\Phi$. U daljnjem tekstu prikazati će se po jedan primjer proračuna za stup te jedan za gredu, dok će vrijednosti ostalih stupova i greda biti prikazani tablično. Za izvođenje proračuna plastičnih zglobova koristi se programski paket Mathcad.

Tablica 4. Tablica grede okvirne konstrukcije [7]

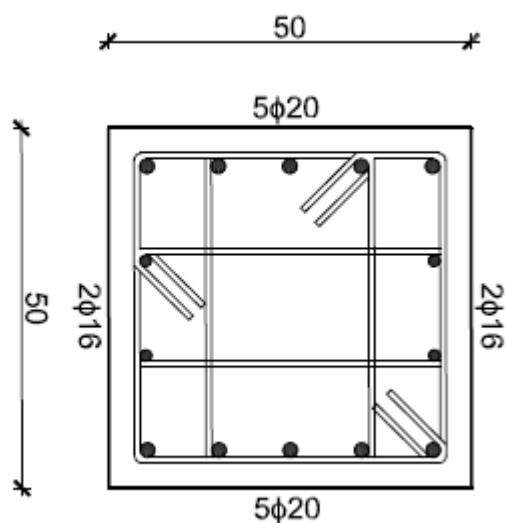
GREDE				
Poz	Vanjski oslonac		Unutarnji oslonac	
	Armatura gornja zona	Armatura donja zona	Armatura gornja zona	Armatura donja zona
311-311	5 \emptyset 16	3 \emptyset 16	6 \emptyset 16	4 \emptyset 16
215-215	4 \emptyset 14+4 \emptyset 16	3 \emptyset 20	4 \emptyset 14+4 \emptyset 16	3 \emptyset 20
115-115	5 \emptyset 20	2 \emptyset 14+4 \emptyset 16	5 \emptyset 20	2 \emptyset 14+4 \emptyset 16

Tablica 5. Tablica stupova okvirne konstrukcije [7]

STUPOVI				
Poz	Armatura	Ploština presjeka armature (cm ²)	Oсна sila, presjek dolje (kN)	Oсна sila, presjek gore (kN)
III/300	2x5 ϕ 20+2x2 ϕ 16*	39,46	-263,96	-243,96
IV/300	2x5 ϕ 20+2x2 ϕ 16*	39,46	-345,45	-325,45
III/200	2x5 ϕ 20+2x2 ϕ 16*	39,46	-572,32	-552,32
IV/200	2x5 ϕ 20+2x2 ϕ 16*	39,46	-831,51	-811,61
III/100	2x5 ϕ 20+2x2 ϕ 16*	39,46	-866,38	-844,51
IV/100	2x4 ϕ 25+2x2 ϕ 20*	51,82	-1207,69	-1185,81

* na bočnim stranama stupa

4.2. Primjer stupa (stup poz. III/100)



Slika 21. Presjek stupa poz. III/100

- Svojstva poprečnog presjeka stupa III/100

- Širina presjeka stupa $b = 50$ cm

- Visina presjeka stupa $h = 50$ cm

- Osnova tlačna sila koja djeluje na stup $N_{Ed} = 866,38 \text{ kN}$
- Uzdužna armatura 1 $\Phi_1 = 20 \text{ mm}$ $n_1 = 10 \text{ kom}$
- Uzdužna armatura 2 $\Phi_2 = 16 \text{ mm}$ $n_2 = 4 \text{ kom}$
- Poprečna armatura $\Phi_w = 8 \text{ mm}$
- Zaštitni sloj betona $c_{nom} = 3,5 \text{ cm}$
- Statička visina $d = (h - c_{nom} - \Phi_w - \Phi_1/2) = 44,7 \text{ cm}$
- Udaljenost od vlačnog ruba do težišta armature $d_1 = h - d = 5,3 \text{ cm}$
- Udaljenost od tlačnog ruba do težišta tlačne armature $d_2 = d_1 = 5,3 \text{ cm}$
- Ploština presjeka stupa $A_c = b \cdot h$
- Najmanja širina ovijene betonske jezgre (do osi spona) $b_0 = b - 2 c_{nom} - \Phi_w$
 $b_0 = 42,2 \text{ cm}$
- Visina ovijene jezgre u stupu $h_0 = h - 2 c_{nom} - \Phi_w = 42,2 \text{ cm}$
- Udaljenost između dviju susjednih šipki $b_i = (d - d_2)/2 - (8\text{cm} - \Phi_w - \Phi_1/2)$
 $b_i = 13,3 \text{ cm}$
- Proračunska visina ovijenog presjeka $d_0 = d - c_{nom} - \Phi_w/2 = 40,8 \text{ cm}$

- Svojstva uzdužne armature

- Armatura 1. red $A_{S_1} := \frac{1}{2} \cdot n_1 \cdot \phi_1^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 15.708 \cdot \text{cm}^2$

- Armatura 2. red $A_{S_2} := \frac{1}{2} n_2 \cdot \phi_2^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 4.021 \cdot \text{cm}^2$

- Armatura 3. red $A_{S_3} := \frac{1}{2} n_2 \cdot \phi_2^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 4.021 \cdot \text{cm}^2$

- Armatura 4. red $A_{S_4} := \frac{1}{2} \cdot n_1 \cdot \phi_1^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 15.708 \cdot \text{cm}^2$

- Svojstva ovijajućih spona

- Ploština presjeka spona $A_w := \frac{\phi_w^2 \cdot \pi}{4} = 5.027 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

- Ukupna duljina ovijajućih spona $l_{wuk} := 192\text{cm} + 152\text{cm} + 138\text{cm} = 4.82\text{m}$

- Odabrani razmak spona $s_{\text{xxx}} := 12\text{cm}$

- Koeficijent armiranja ovijajućim sponama u kritičnom području ω_{wd}

- Volumen ovijajućih spona $V_{ch} := l_{wuk} \cdot A_w = 2.423 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^3$

- Volumen betonskih jezgara $V_{cc} := b_0 \cdot h_0 \cdot s = 0.021 \cdot \text{m}^3$

- Mehanički koeficijent armiranja sponama $\omega_{wm} := \frac{f_{ym}}{f_{cm}} \cdot \frac{V_{ch}}{V_{cc}} = 0.164$

- Svojstva betona i čelika

Beton C30/37

- Karakteristična tlačna čvrstoća $f_{ck} := 30\text{MPa}$

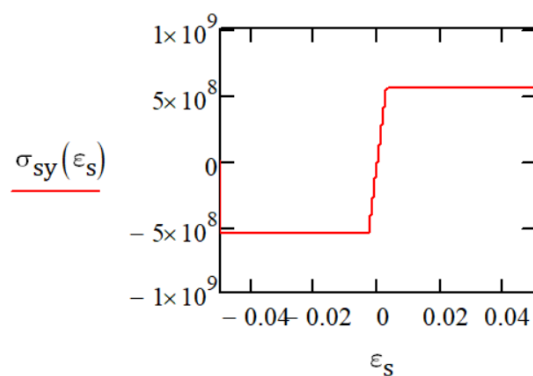
- Srednja tlačna čvrstoća $f_{cm} := f_{ck} + 8\text{MPa} = 38 \cdot \text{MPa}$

Čelik B500B

- karakteristična granica popuštanja $f_{yk} := 500\text{MPa}$
- srednja granica popuštanja $f_{ym} := 1.1 \cdot f_{yk} = 550\text{ MPa}$

- Bilinearni dijagram čelika B500B sa horizontalnom granom

- deformacija čelika pri granici popuštanja $\varepsilon_{sym} := \frac{f_{ym}}{E_S} = 2.75 \times 10^{-3}$
- deformacija čelika pri slomu $\varepsilon_{syu} := 50 \cdot \frac{1}{1000}$
- modul elastičnosti čelika $E_S := 200\text{GPa}$



Slika 22. Bilinearni dijagram čelika B500B sa horizontalnom granom

Ova funkcija (Slika 22) definirana je sljedećim izrazom:

$$\sigma_{sy}(\varepsilon_s) := \begin{cases} y \leftarrow -f_{ym} & \text{if } -\varepsilon_{syu} < \varepsilon_s \leq -\varepsilon_{sym} \\ y \leftarrow \varepsilon_s \cdot E_S & \text{if } -\varepsilon_{sym} < \varepsilon_s \leq 0 \\ y \leftarrow \varepsilon_s \cdot E_S & \text{if } 0 < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sym} \\ y \leftarrow f_{ym} & \text{if } \varepsilon_{sym} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{syu} \\ y & \end{cases}$$

- Proračun ovijenog betona

- Ukupan broj šipki bočno pridržan sponama $n = 12$
- Koeficijenti ovisni o obliku poprečnog presjeka stupa,

$$\alpha_{n1} := 1 - \frac{8}{3} \cdot \frac{1}{n} = 0.778$$

izrazi za pravokutni stup

$$\alpha_{s1} := \left(1 - \frac{s}{2b_0}\right) = 0.858$$

- Efektivno bočno tlačno naprezanje u GSN prema ograničenju deformacija

$$\sigma_2 := \frac{1}{2} \cdot f_{ck} \cdot \alpha_{n1} \cdot \alpha_{s1} \cdot \omega_{wm} = 1.642 \cdot \text{MPa}$$

- Omjer efektivnog bočnog tlačnog naprezanja i karakteristične čvrstoće betona

$$\frac{\sigma_2}{f_{ck}} = 0.055$$

- Tlačna čvrstoća ovijenog betona

$$f_{ckc} := f_{ck} \cdot \left(1.125 + 2.5 \cdot \frac{\sigma_2}{f_{ck}}\right) = 37.856 \cdot \text{MPa}$$

- Srednja tlačna čvrstoća ovijenog betona

$$f_{cmc} := f_{ckc} \cdot \left(1 + 8 \frac{\text{MPa}}{f_{ck}}\right) = 47.95 \cdot \text{MPa}$$

- Srednja vlačna čvrstoća ovijenog betona

$$f_{ctmc} := 0.3 \cdot \sqrt[3]{f_{ckc}^2 \cdot \text{MPa}} = 3.382 \cdot \text{MPa}$$

- Sekantni modul elastičnosti betona

$$E_{cmc} := 22000 \text{MPa} \cdot \left(\frac{f_{cmc}}{10 \text{MPa}}\right)^{0.3} = 3.521 \times 10^4 \cdot \text{MPa}$$

- Granične deformacije betona C30/37 za ovijeni beton za dijagram pravac + parabola

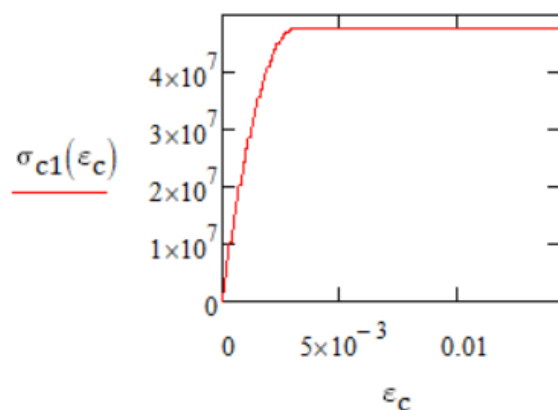
- Deformacija pri granici parabole ovijenog betona

$$\varepsilon_{c2c} := \varepsilon_{c2} \cdot \left(\frac{f_{ckc}}{f_{ck}}\right)^2 = 3.185 \times 10^{-3}$$

- Deformacija pri tlačnoj čvrstoći ovijenog betona

$$\varepsilon_{cu2c} := \varepsilon_{cu2} + 0.2 \cdot \frac{\sigma_2}{f_{ck}} = 0.014$$

- Dijagram ovijenog betona parabola+pravac



Slika 23. Dijagram ovijenog betona parabola+pravac

Ova funkcija (Slika 23) definirana je sljedećim izrazom:

$$\sigma_{c1}(\epsilon_c) := \begin{cases} y \leftarrow f_{cmc} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2c}} \right)^2 \right] & \text{if } 0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{c2c} \\ y \leftarrow f_{cmc} & \text{if } \epsilon_{c2c} < \epsilon_c < \epsilon_{cu2c} \\ y & \end{cases}$$

U sljedećem koraku bilo je potrebno dobiti ispravnu deformaciju na način da se pretpostavlja vrijednost deformacije sve dok se za istu ne dobije stvarna uzdužna sila koja djeluje na stup. Ovaj postupak izveden je za granicu popuštanja (točka 2 M- Φ dijagrama) te za slom presjeka (točka 3 M- Φ dijagrama).

- **Granica popuštanja armature ovijenog betona**

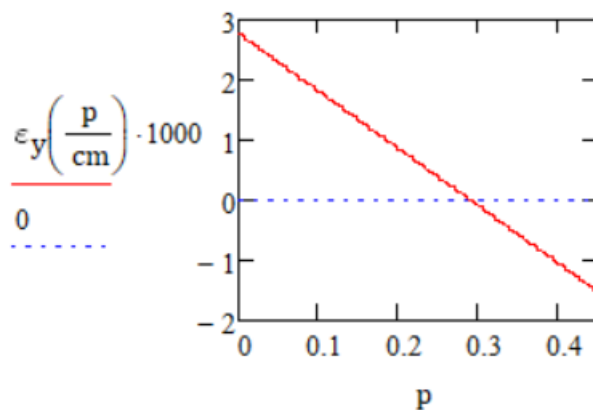
- Deformacija u armaturi pri srednjoj granici popuštanja $\varepsilon_{sym} := \frac{f_{ym}}{E_s} = 2.75 \times 10^{-3}$

- Pretpostavljena deformacija u betonu pri srednjoj granici popuštanja $\varepsilon_{cym} := -1.5291 \cdot \frac{1}{1000}$

Raspodjela deformacija pri granici popuštanja uzduž presjeka definirana je izrazom:

$$\varepsilon_y(p) := \varepsilon_{sym} + \frac{(\varepsilon_{cym} - \varepsilon_{sym}) \cdot cm}{d - 0cm} \cdot p$$

gdje p označava širinu presjeka (Slika 24).



Slika 24. Raspodjela naprezanja pri srednjoj granici popuštanja

Plava isprekidana linija na dijagramu predstavlja neutralnu os (u daljnjem tekstu N.O.), dok crvena raspodjelu naprezanja uzduž presjeka. Sa dijagrama se može očitati da se većina presjeka nalazi u vlačnom, a manji dio u tlačnom području.

$$x_{t,y} := \frac{d \cdot |\varepsilon_{cym}|}{|\varepsilon_{cym}| + \varepsilon_{sym}} = 0.16m$$

- Visina tlačnog područja betona (od N.O. do tlačnog ruba)

- Udaljenost od armature do N.O. $x_{no2,y} := d - x_{t,y} = 0.287m$

- Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže granicu popuštanja $\xi_{sy} := \frac{x_{t,y}}{d} = 0.357$

- Prosječno tlačno naprezanje u betonu $f_{t,y} := \frac{\int_0^{|\varepsilon_{cym}|} \sigma_{c1}(\varepsilon_c) d\varepsilon_c}{|\varepsilon_{cym}|} = 19.339 \cdot MPa$

• Suma sila u betonu i armaturi

- Nul-točka udaljenosti (armatura 1.red) $e_1 := 0cm$

- Udaljenost 2. reda armature od nulte udaljenosti $e_2 := b_i = 0.133m$

- Udaljenost 3. reda armature od nulte udaljenosti $e_3 := e_2 + b_i = 0.266m$

- Udaljenost 4. reda armature od nulte udaljenosti $e_4 := d - d_2 = 0.394m$

- Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1 $\sigma_{y_1} := \sigma_{sy} \left(\varepsilon_y \left(\frac{e_1}{cm} \right) \right) = 550 \cdot MPa$

- Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2 $\sigma_{y_2} := \sigma_{sy} \left(\varepsilon_y \left(\frac{e_2}{cm} \right) \right) = 295.36 \cdot MPa$

- Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_3 $\sigma_{y_3} := \sigma_{sy} \left(\varepsilon_y \left(\frac{e_3}{cm} \right) \right) = 40.72 \cdot MPa$

- Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_4 $\sigma_{y_4} := \sigma_{sy} \left(\varepsilon_y \left(\frac{e_4}{cm} \right) \right) = -204.347 \cdot MPa$

- Tlačna površina betona $A_{t,y} := x_{t,y} \cdot b = 798.588 \cdot cm^2$

Uzdužnu silu u stupu dobijemo oduzimanjem sume umnoška površina armature i njihovih naprezanja od umnoška tlačne površine betona i prosječnog tlačnog naprezanja u betonu:

$$N_{ed,y} := f_{t,y} \cdot A_{t,y} - \sum_{i=1}^4 (A_{s_i} \cdot \sigma_{y_i}) = 866.422 \cdot kN$$

- Moment savijanja s obzirom na težište presjeka

Principom izjednačavanja površina dobije se deformacija u težištu presjeka $\varepsilon_y(x)$, iz čega se može izračunati udaljenost težišta od težišta stupa $z_{c,y}$:

$$\int_0^{|x|} \sigma_{c1}(\varepsilon_c) d\varepsilon_c = \int_{|x|}^{|\varepsilon_{cym}|} \sigma_{c1}(\varepsilon_c) d\varepsilon_c$$

$$x_{t,y} := \text{Find}(x) = -1.05 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_y(x) = x_{t,y}$$

$$z_{cf,y} := \text{Find}(x) = 39.7$$

$$z_{c,y} := z_{cf,y} \cdot \text{cm} - \left(\frac{h}{2} - d_1\right) = 0.2 \text{ m}$$

- Udaljenost armature od težišta presjeka

- Udaljenost 1. reda armature od težišta presjeka $z_1 := -\left(\frac{h}{2} - d_1\right) = -19.7 \cdot \text{cm}$
- Udaljenost 2. reda armature od težišta presjeka $z_2 := -\frac{h - 2c_{\text{nom}} - 2\phi_w - \phi_1}{6} = -6.567 \cdot \text{cm}$
- Udaljenost 3. reda armature od težišta presjeka $z_3 := \frac{h - 2c_{\text{nom}} - 2\phi_w - \phi_1}{6} = 6.567 \cdot \text{cm}$
- Udaljenost 4. reda armature od težišta presjeka $z_4 := \frac{h}{2} - d_2 = 19.7 \cdot \text{cm}$

- Moment savijanja s obzirom na težište

$$M_y := f_{t,y} \cdot A_{t,y} \cdot z_{c,y} - \sum_{i=1}^4 (A_{s_i} \cdot \sigma_{y_i} \cdot z_i) = 549.043 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

- Zakrivljenost pri granici popuštanja armature

$$\phi_{\text{sym}} := \frac{\varepsilon_{\text{sym}}}{x_{\text{no}2,y}} = 9.572 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{m}}$$

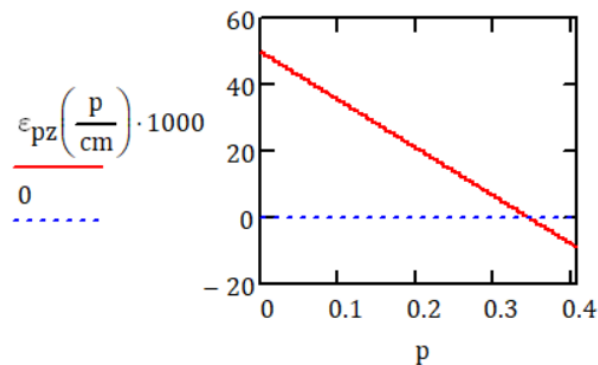
- **Granična nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona**

- Deformacija u armaturi pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba $\varepsilon_{s,pz} := 50 \cdot \frac{1}{1000}$

- Deformacija u betonu pri slomu $\varepsilon_{c,pz} := -8.949 \cdot \frac{1}{1000}$

U ovom slučaju slom presjeka dogodio se u armaturi, dok se za neke druge presjeke slom može dogoditi u betonu. Raspodjela deformacija pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba uzduž presjeka (Slika 25) definirana je izrazom:

$$\varepsilon_{pz}(p) := \varepsilon_{s,pz} + \frac{(\varepsilon_{c,pz} - \varepsilon_{s,pz}) \text{cm}}{d_0 - 0 \text{cm}} \cdot p$$



Slika 25. Raspodjela naprezanja pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba

Kao i sa prošlog dijagrama, može se očitati da se većina presjeka nalazi u vlačnom, a manji dio u tlačnom području.

- Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba) $x_{t,pz} := \frac{d_0 \cdot |\varepsilon_{c,pz}|}{|\varepsilon_{c,pz}| + \varepsilon_{s,pz}} = 6.194 \cdot \text{cm}$
- Udaljenost od armature do N.O. $x_{no3,pz} := d_0 - x_{t,pz} = 34.606 \cdot \text{cm}$
- Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže graničnu nosivost plastičnog zgloba $\xi_{syw} := \frac{x_{t,pz}}{d_0} = 0.152$
- Prosječno tlačno naprezanje u betonu $f_{t,pz} := \frac{\int_0^{|\varepsilon_{c,pz}|} \sigma_{c1}(\varepsilon_c) d\varepsilon_c}{|\varepsilon_{c,pz}|} = 42.263 \cdot \text{MPa}$
- Suma sila u betonu i armaturi
 - Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1 $\sigma_{pz_1} := \sigma_{sy} \left(\varepsilon_{pz} \left(\frac{e_1}{\text{cm}} \right) \right) = 550 \cdot \text{MPa}$
 - Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2 $\sigma_{pz_2} := \sigma_{sy} \left(\varepsilon_{pz} \left(\frac{e_2}{\text{cm}} \right) \right) = 550 \cdot \text{MPa}$
 - Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_3 $\sigma_{pz_3} := \sigma_{sy} \left(\varepsilon_{pz} \left(\frac{e_3}{\text{cm}} \right) \right) = 550 \cdot \text{MPa}$
 - Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_4 $\sigma_{pz_4} := \sigma_{sy} \left(\varepsilon_{pz} \left(\frac{e_4}{\text{cm}} \right) \right) = -550 \cdot \text{MPa}$
 - Tlačna površina betona $A_{t,pz} := x_{t,pz} \cdot b = 0.031 \text{m}^2$
 - Uzdužna silu u stupu $N_{ed,pz} := f_{t,pz} \cdot A_{t,pz} - \sum_{i=1}^4 (A_{s_i} \cdot \sigma_{pz_i}) = 866.497 \cdot \text{kN}$
- Moment savijanja s obzirom na težište presjeka

Principom izjednačavanja površina dobije se deformacija u težištu presjeka $\varepsilon_{pz}(x)$, iz čega se može izračunati udaljenost težišta od težišta stupa $z_{c,pz}$:

$$\int_0^{|x|} \sigma_{c1}(\varepsilon_c) d\varepsilon_c = \int_{|x|}^{|\varepsilon_{c,pz}|} \sigma_{c1}(\varepsilon_c) d\varepsilon_c$$

$$x_{t,pz} := \text{Find}(x) = -5.005 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{pz}(x) = x_{t,pz}$$

$$z_{cf,pz} := \text{Find}(x) = 38.07$$

$$z_{c,pz} := z_{cf,pz} \cdot \text{cm} - \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) = 18.37 \cdot \text{cm}$$

- Moment savijanja s obzirom na težište

$$M_{pz} := f_{t,pz} \cdot A_{t,pz} \cdot z_{c,pz} - \sum_{i=1}^4 \left(A_{s_i} \cdot \sigma_{pz_i} \cdot z_i \right) = 580.83 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

- Kut zaokreta pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba

$$\phi_{su} := \frac{\varepsilon_{s,pz}}{x_{no3,pz}} = 0.144 \frac{1}{\text{m}}$$

U nastavku se nalazi tablični prikaz izračunatih vrijednosti stupa poz. III/100 za momente savijanja s obzirom na težište i zakrivljenosti ϕ po duljini plastičnog zgloba. Uz pretpostavku da je na duljini plastičnog zgloba zakrivljenost konstantna dobiva se:

Tablica 6. Vrijednosti momenta savijanja i zakrivljenosti stupa poz. III/100

III/100		
	granica popuštanja	nosivost plastičnog zgloba
M [kNm]	548,97	580,83
ϕ [1/m]	0,009572	0,144

Kut zaokreta plastičnog zgloba θ dobiva se integriranjem zakrivljenosti

$$\theta := L_{pl} \cdot \phi$$

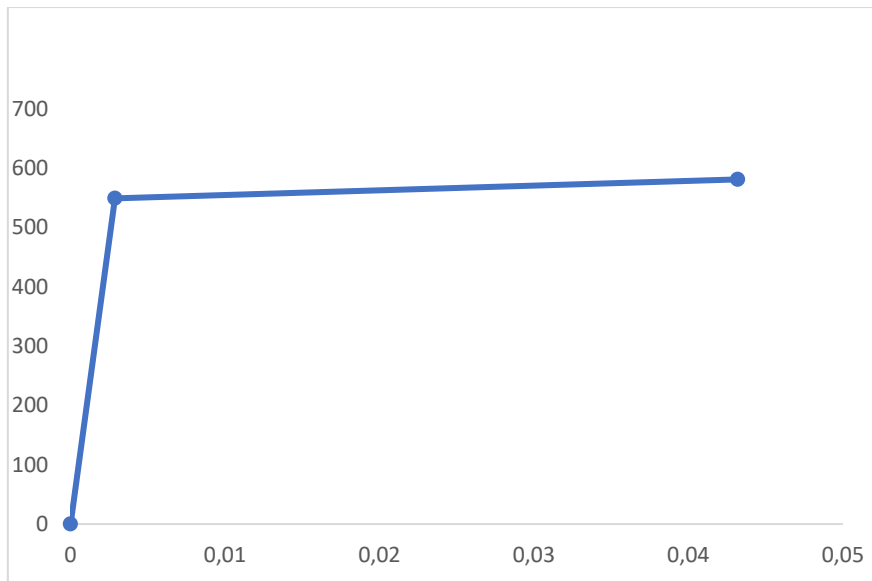
gdje je L_{pl} duljina plastičnog zgloba i računa se izrazom [13]:

$$L_{pl} := 0.6 \cdot h$$

Potrebne točke za definiranje dijagrama moment savijanja – kut zaokreta prikazane su u tablici 7, a dijagram na slici 26.

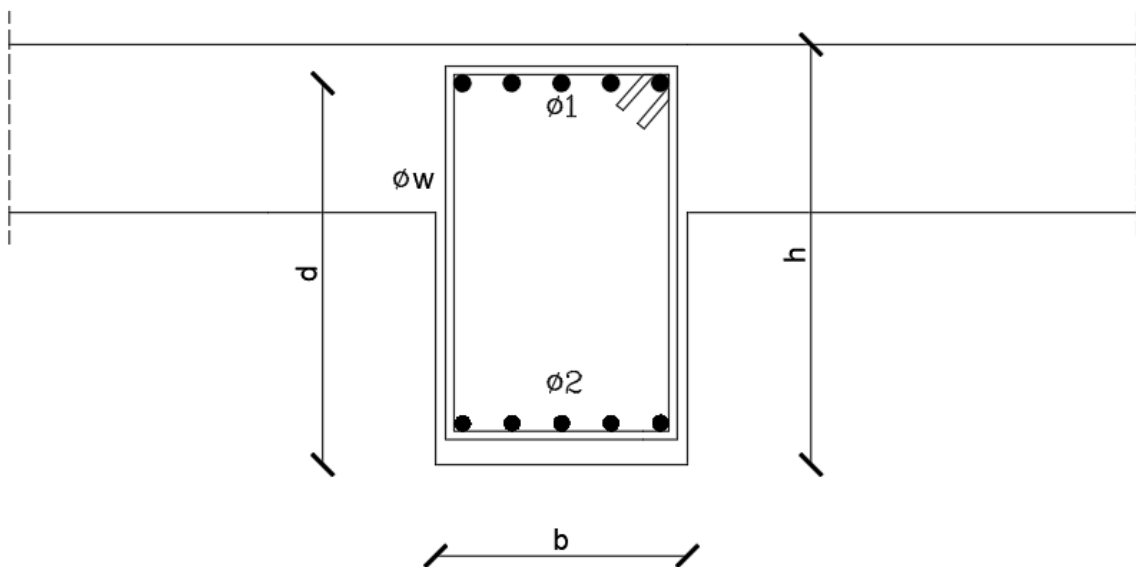
Tablica 7. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta stupa poz. III/100

III/100		
	granica popuštanja	nosivost plastičnog zgloba
M [kNm]	548,97	580,83
$\theta = \phi \cdot 0,6 \cdot h$	0,0028716	0,0432



Slika 26. Dijagram M - θ stup III/100

4.3. Primjer grede (greda poz. 115-115)



Slika 27. Presjek grede

Kako bi se u obzir uzela ovijenost i neovijenost betonskog presjeka, proveo se proračun grede za neovijeni i ovijeni beton.

- Svojstva poprečnog presjeka stupa III/100

- Širina grede $b = 30 \text{ cm}$

- Visina grede $h = 50 \text{ cm}$

- Osnova tlačna sila koja djeluje na gredu $N_{Ed} = 0 \text{ kN}$

- Uzdužna armatura 1 $\Phi_1 = 20 \text{ mm}$ $n_1 = 5 \text{ kom}$

- Uzdužna armatura 2 $\Phi_2 = 16 \text{ mm}$ $n_2 = 4 \text{ kom}$

- Uzdužna armatura 3 $\Phi_3 = 14 \text{ mm}$ $n_3 = 2 \text{ kom}$

- Poprečna armatura $\Phi_w = 8 \text{ mm}$

- Zaštitni sloj betona $c_{nom} = 3,5 \text{ cm}$

- Statička visina $d := \left(h - c_{nom} - \phi_w - \frac{\phi_1}{2} \right) = 0.447 \text{ m}$

- Udaljenost od vlačnog ruba do težišta armature $d_1 := h - d = 5.3 \cdot \text{cm}$

- Udaljenost od tlačnog ruba do težišta tlačne armature

$$d_2 := \frac{\left(c_{nom} + \phi_w + \frac{\phi_2}{2} \right) \cdot 8.04 + \left(c_{nom} + \phi_w + \phi_2 + 3\text{cm} + \frac{\phi_3}{2} \right) \cdot 3.08}{8.04 + 3.08} = 6.346 \cdot \text{cm}$$

- Ploština presjeka grede $A_c := b \cdot h = 0.15 \text{ m}^2$

- Najmanja širina ovijene betonske jezgre (do osi spona) $b_0 := b - 2c_{nom} - \phi_w = 0.222 \text{ m}$

- Visina ovijene jezgre u stupu $h_0 := h - 2c_{nom} - \phi_w = 0.422 \text{ m}$

- Udaljenost između dviju uzastopnih šipki $b_i := b - 2 \cdot c_{\text{nom}} - 2\phi_w - \frac{\phi_1}{2} - \frac{\phi_2}{2} = 0.196\text{m}$

- Statička visina ovijenog presjeka $d_0 := d - c_{\text{nom}} - \frac{\phi_w}{2} = 0.408\text{m}$

• Svojstva uzdužne armature

- Armatura 1. red $A_{S_1} := 5 \cdot \phi_1^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 15.708 \cdot \text{cm}^2$

- Armatura 2. red $A_{S_2} := 4 \cdot \phi_2^2 \cdot \frac{\pi}{4} + 2 \cdot \phi_3^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 11.121 \cdot \text{cm}^2$

• Svojstva ovijajućih spona

- Površina presjeka spona $A_w := \frac{\phi_w^2 \cdot \pi}{4} = 5.027 \times 10^{-5} \text{m}^2$

- Ukupna duljina ovijajućih spona $l_{\text{wuk}} := 2 \cdot (h - 2c_{\text{nom}}) + 2 \cdot (b - 2c_{\text{nom}}) = 1.32\text{m}$

- Odabrani razmak spona $s_s := 12\text{cm}$

• Koeficijent armiranja ovijajućim sponama u kritičnom području ω_{wd}

- Volumen ovijajućih spona $V_{\text{ch}} := l_{\text{wuk}} \cdot A_w = 6.635 \times 10^{-5} \cdot \text{m}^3$

- Volumen betonskih jezgra $V_{\text{cc}} := b_0 \cdot h_0 \cdot s = 0.011 \cdot \text{m}^3$

- Mehanički koeficijent armiranja sponama $\omega_{\text{wm}} := \frac{V_{\text{ch}}}{V_{\text{cc}}} \cdot \frac{f_{\text{ym}}}{f_{\text{cm}}} = 0.085$

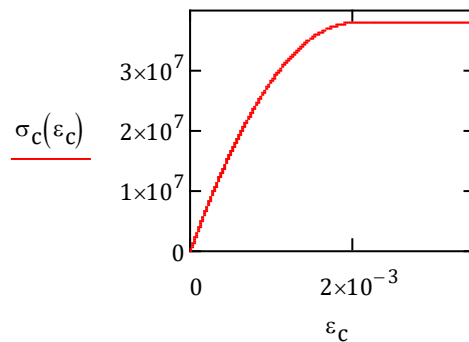
- Svojstva betona i čelika

Svojstva čelika i ovijenog betona i pripadajući dijagrami isti su kao i kod primjera proračuna stupa. U nastavku se nalaze karakteristike neovijenog betona koje se kod proračuna stupa nisu obrađivale.

- Grafične deformacije neovijenog betona C 30/37 za dijagram pravac + parabola

- Deformacija pri granici parabole neovijenog betona $\varepsilon_{c2} := \frac{2}{1000}$
- Deformacija pri tlačnoj čvrstoći neovijenog betona $\varepsilon_{cu2} := \frac{3.5}{1000}$

- Dijagram neovijenog betona parabola + pravac



Slika 28. Dijagram neovijenog betona parabola + pravac

Ova funkcija (Slika 28) definirana je sljedećim izrazom:

$$\sigma_c(\varepsilon_c) := \begin{cases} y \leftarrow f_{cm} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^2 \right] & \text{if } 0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \\ y \leftarrow f_{cm} & \text{if } \varepsilon_{c2} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu2} \\ y & \text{if } \varepsilon_c \geq \varepsilon_{cu2} \end{cases}$$

- Sekantni modul elastičnosti betona $E_{cm} := 33000\text{MPa}$
- Srednja vlačna čvrstoća betona $f_{ctm} := 2.9\text{MPa}$

- PRORAČUN NEOVIJENOG BETONA

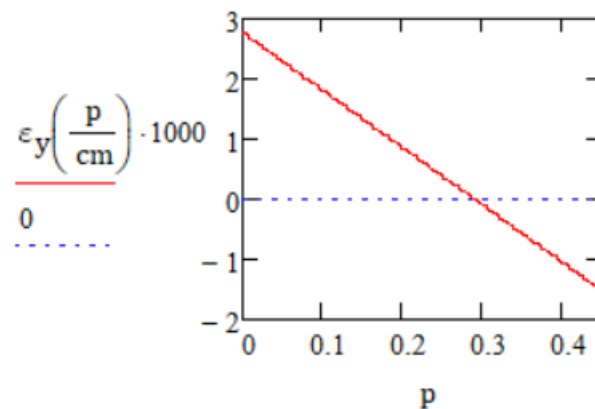
- **Granica popuštanja armature neovijenog betona**

- Deformacija u armaturi pri srednjoj granici popuštanja $\varepsilon_{sym} := \frac{f_{ym}}{E_s} = 2.75 \times 10^{-3}$

- Pretpostavljena deformacija u betonu pri srednjoj granici popuštanja $\varepsilon_{cym} := -1.1804 \cdot \frac{1}{1000}$

- Raspodjela deformacija pri granici popuštanja uzduž presjeka

$$\varepsilon_y(p) := \varepsilon_{sym} + \frac{(\varepsilon_{cym} - \varepsilon_{sym}) \cdot p}{d - 0 \text{ cm}}$$



Slika 29. Raspodjela naprezanja pri srednjoj granici popuštanja

- Visina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba) $x_{ty} := \frac{d \cdot |\varepsilon_{cym}|}{|\varepsilon_{cym}| + \varepsilon_{sym}} = 0.134 \text{ m}$

- Udaljenost od armature do N.O. $x_{no2.y} := d - x_{ty} = 0.313 \text{ m}$

- Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže granicu popuštanja $\xi_{sy} := \frac{x_{ty}}{d} = 0.3$

- Prosječno tlačno naprezanje u betonu

$$f_{t,y} := \frac{\int_0^{|\varepsilon_{cym}|} \sigma_c(\varepsilon_c) d\varepsilon_c}{|\varepsilon_{cym}|} = 18.015 \cdot \text{MPa}$$

- Suma sila u betonu i armaturi

- Nul-točka udaljenosti (armatura 1.red) $e_1 := 0\text{cm}$

- Udaljenost 2. reda armature od nulte udaljenosti $e_2 := d - d_2 = 38.354 \cdot \text{cm}$

- Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1 $\sigma_{y_1} := \sigma_{sy} \left(\varepsilon_y \left(\frac{e_1}{\text{cm}} \right) \right) = 550 \cdot \text{MPa}$

- Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2 $\sigma_{y_2} := \sigma_{sy} \left(\varepsilon_y \left(\frac{e_2}{\text{cm}} \right) \right) = -124.474 \cdot \text{MPa}$

- Tlačna površina betona $A_{t,y} := x_{ty} \cdot b = 402.737 \cdot \text{cm}^2$

Izraz za određivanje uzdužne sile jednak je onome koji se koristio i za stup. Deformaciju u betonu pri granici popuštanja se pretpostavlja sve dok se ne dobije da je uzdužna sila u gredi jednaka 0.

$$N_{ed,y} := f_{t,y} \cdot A_{t,y} - \sum_{i=1}^2 (A_{s_i} \cdot \sigma_{y_i}) = 0.037 \cdot \text{kN}$$

- Moment savijanja s obzirom na težište presjeka

Principom izjednačavanja površina dobije se deformacija u težištu presjeka $\varepsilon_y(x)$, iz čega se može izračunati udaljenost težišta od težišta grede $z_{c,y}$:

$$\int_0^{|x|} \sigma_c(\varepsilon_c) d\varepsilon_c = \int_{|x|}^{|\varepsilon_{cym}|} \sigma_c(\varepsilon_c) d\varepsilon_c$$

$$x_{ty} := \text{Find}(x) = -8.039 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_y(x) = x_{ty}$$

$$z_{cf,y} := \text{Find}(x) = 40.418$$

$$z_{c,y} := z_{cf,y} \cdot cm - \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) = 0.207m$$

- Udaljenost armature od težišta presjeka

- Udaljenost 1. reda armature od težišta presjeka $z_1 := -\left(\frac{h}{2} - d_1 \right) = -0.197m$

- Udaljenost 2. reda armature od težišta presjeka $z_2 := \frac{h}{2} - d_2 = 0.187m$

- Moment savijanja s obzirom na težište

$$M_y := f_{t,y} \cdot A_{t,y} \cdot z_{c,y} - \sum_{i=1}^2 (A_{s_i} \cdot \sigma_{y_i} \cdot z_i) = 346.334 \cdot kN \cdot m$$

- Zakrivljenost pri granici popuštanja armature

$$\phi_{sym} := \frac{\varepsilon_{sym}}{x_{no2,y}} = 8.793 \times 10^{-3} \frac{1}{m}$$

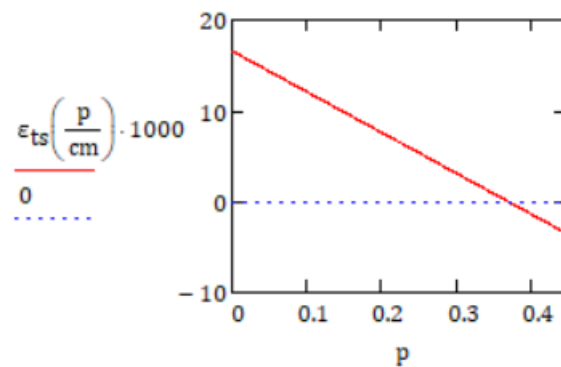
- **Tlačni slom u betonu neovijenog betona**

- Deformacija u armaturi pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba $\varepsilon_{s1u} := 16.5711 \cdot \frac{1}{1000}$

- Deformacija u betonu pri slomu $\varepsilon_{cu2c1} := -\varepsilon_{cu2} = -3.5 \times 10^{-3}$

Raspodjela deformacija uzduž presjeka definirana je izrazom:

$$\varepsilon_{ts}(p) := \varepsilon_{s1u} + \frac{(\varepsilon_{cu2c1} - \varepsilon_{s1u}) \text{cm}}{d - 0 \text{cm}} \cdot p$$



Slika 30. Raspodjela naprezanja pri tlačnom slomu u betonu

- Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba) $x_{tl.ts} := \frac{d \cdot |\varepsilon_{cu2c1}|}{|\varepsilon_{cu2c1}| + \varepsilon_{s1u}} = 7.795 \cdot \text{cm}$

- Udaljenost od armature do N.O. $x_{no2.ts} := d - x_{tl.ts} = 36.905 \cdot \text{cm}$

- Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže graničnu nosivost plastičnog zgloba $\xi_{sy.ts} := \frac{x_{tl.ts}}{d} = 0.174$

- Prosječno tlačno naprezanje u betonu $f_{t.ts} := \frac{\int_0^{|\varepsilon_{cu2c1}|} \sigma_c(\varepsilon_c) d\varepsilon_c}{|\varepsilon_{cu2c1}|} = 30.762 \cdot \text{MPa}$

- Suma sila u betonu i armaturi

- Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1 $\sigma_{ts_1} := \sigma_{sy} \left(\varepsilon_{ts} \left(\frac{e_1}{\text{cm}} \right) \right) = 550 \cdot \text{MPa}$

- Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2 $\sigma_{ts_2} := \sigma_{sy} \left(\varepsilon_{ts} \left(\frac{e_2}{\text{cm}} \right) \right) = -130.07 \cdot \text{MPa}$

- Tlačna površina betona $A_{tl.ts} := x_{tl.ts} \cdot b = 233.844 \cdot \text{cm}^2$

- Uzdužna sila u gredi $N_{ed.ts} := f_{t.ts} \cdot A_{tl.ts} - \sum_{i=1}^2 (A_{s_i} \cdot \sigma_{ts_i}) = 0.064 \cdot \text{kN}$

- Moment savijanja s obzirom na težište presjeka

Principom izjednačavanja površina dobije se deformacija u težištu presjeka $\varepsilon_{pz}(x)$, iz čega se može izračunati udaljenost težišta od težišta grede $z_{c,pz}$:

$$\int_0^{|x|} \sigma_c(\varepsilon_c) d\varepsilon_c = \int_{|x|}^{|\varepsilon_{cu2c1}|} \sigma_c(\varepsilon_c) d\varepsilon_c$$

$$x_{t.ts} := \text{Find}(x) = -2.083 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{ts}(x) = x_{t.ts}$$

$$z_{cf.ts} := \text{Find}(x) = 41.545$$

$$z_{c.ts} := z_{cf.ts} \cdot \text{cm} - \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) = 0.218 \text{m}$$

- Moment savijanja s obzirom na težište

$$M_{ts} := f_{t.ts} \cdot A_{tl.ts} \cdot z_{c.ts} - \sum_{i=1}^2 (A_{s_i} \cdot \sigma_{ts_i} \cdot z_i) = 354.32 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

- Zakrivljenost pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba

$$\phi_{ck.ts} := \frac{\varepsilon_{s1u}}{x_{no2.ts}} = 0.045 \frac{1}{m}$$

U nastavku se nalazi tablični prikaz izračunatih vrijednosti grede poz. 115-115 za momente savijanja s obzirom na težište i zakrivljenost (neovijeni beton).

Tablica 8. Vrijednosti momenta savijanja i zakrivljenosti grede poz. 115-115 – neovijeni beton

115-115 - neovijeni beton		
	granica popuštanja	tlačni slom u betonu
M [kNm]	346,33	354,32
ϕ [1/m]	0,00879	0,045

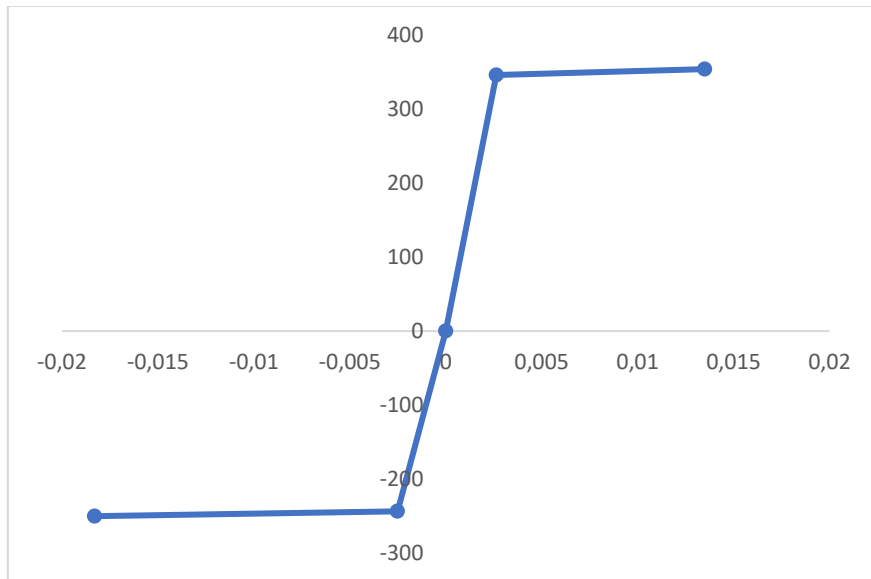
Potrebne točke prve grane bilinearnog dijagrama moment savijanja – zakrivljenost prikazane su u tablici 9. Kako bi se definirala druga grana dijagrama potrebnog za daljni proračun proveo se identičan postupak, ali sa zamijenjenim pozicijama uzdužne armature. Dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 10, a dijagram na slici 31.

Tablica 9. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 115-115 – neovijeni beton

115-115 - neovijeni beton		
	granica popuštanja	tlačni slom u betonu
M [kNm]	346,33	354,32
$\Theta = \phi \cdot 0,6 \cdot h$	0,002637	0,0135

Tablica 10. Vrijednosti momenta savijanja i zakrivljenosti grede poz. 115-115 – neovijeni beton (zamijenjena armatura)

115-115 - neovijeni beton (zamijenjena armatura)		
	granica popuštanja	tlačni slom u betonu
M [kNm]	-243,78	-250,35
$\Theta = \phi \cdot 0,6 \cdot h$	-0,002517	-0,0183



Slika 31. Dijagram M – θ greda 115-115 (neovijeni beton)

- Proračun ovijenog betona

- Ukupan broj šipki bočno pridržan sponama $n = 4$

- Koeficijenti ovisni o obliku poprečnog presjeka, izrazi za pravokutni presjek

$$\alpha_{n1} := 1 - \frac{8}{3} \cdot \frac{1}{n} = 0.333$$

$$\alpha_{s1} := \left(1 - \frac{s}{2b_0} \right) = 0.73$$

- Efektivno bočno tlačno naprezanje u GSN prema ograničenju deformacija

$$\sigma_2 := \frac{1}{2} \cdot f_{ck} \cdot \alpha_{n1} \cdot \alpha_{s1} \cdot \omega_{wm} = 0.312 \cdot \text{MPa}$$

- Omjer efektivnog bočnog tlačnog naprezanja i karakteristične čvrstoće betona

$$\frac{\sigma_2}{f_{ck}} = 0.01$$

- Tlačna čvrstoća ovijenog betona

$$f_{ckc} := f_{ck} \cdot \left(1.125 + 2.5 \cdot \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right) = 34.529 \cdot \text{MPa}$$

- Srednja tlačna čvrstoća ovijenog betona

$$f_{cmc} := f_{ckc} \cdot \left(1 + 8 \frac{\text{MPa}}{f_{ck}} \right) = 43.737 \cdot \text{MPa}$$

- Srednja vlačna čvrstoća ovijenog betona

$$f_{ctmc} := 0.3 \cdot \sqrt[3]{f_{ckc}^2} \cdot \text{MPa} = 3.181 \cdot \text{MPa}$$

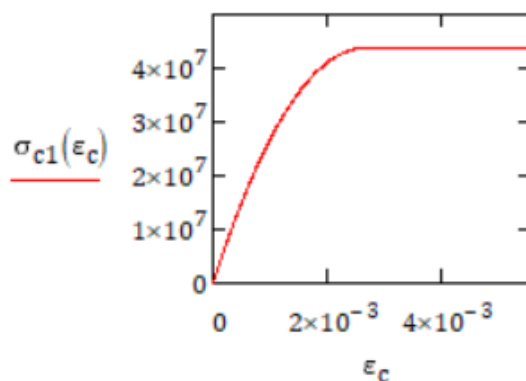
- Sekantni modul elastičnosti betona $E_{cmc} := 22000 \text{MPa} \cdot \left(\frac{f_{cmc}}{10 \text{MPa}} \right)^{0.3} = 3.425 \times 10^4 \cdot \text{MPa}$

- Granične deformacije betona C30/37 za ovijeni beton za dijagram pravac + parabola

- Deformacija pri granici parabole ovijenog betona $\varepsilon_{c2c} := \varepsilon_{c2} \cdot \left(\frac{f_{ckc}}{f_{ck}} \right)^2 = 2.649 \times 10^{-3}$

- Deformacija pri tlačnoj čvrstoći ovijenog betona $\varepsilon_{cu2c} := \varepsilon_{cu2} + 0.2 \cdot \frac{\sigma_2}{f_{ck}} = 5.578 \times 10^{-3}$

- Dijagram ovijenog betona parabola+pravac



Slika 32. Dijagram ovijenog betona parabola+pravac

Ova funkcija (Slika 32) definirana je sljedećim izrazom:

$$\sigma_{c1}(\varepsilon_c) := \begin{cases} y \leftarrow f_{cmc} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2c}} \right)^2 \right] & \text{if } 0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2c} \\ y \leftarrow f_{cmc} & \text{if } \varepsilon_{c2c} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu2c} \\ y & \text{if } \varepsilon_c \geq \varepsilon_{cu2c} \end{cases}$$

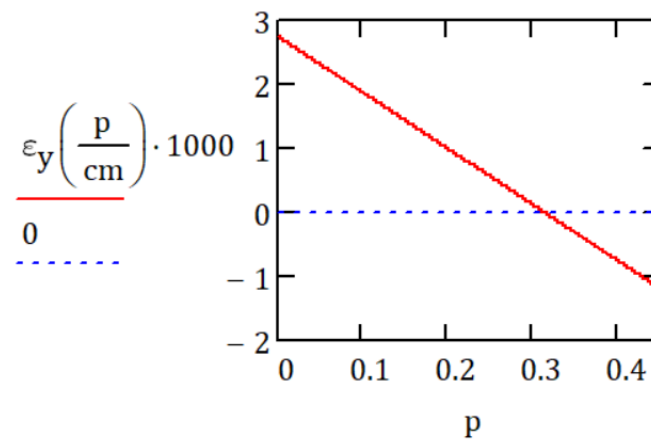
- **Granica popuštanja armature neovijenog betona**

- Deformacija u armaturi pri srednjoj granici popuštanja $\varepsilon_{sym} := \frac{f_{ym}}{E_s} = 2.75 \times 10^{-3}$

- Pretpostavljena deformacija u betonu pri srednjoj granici popuštanja $\varepsilon_{cym} := -1.180408 \cdot \frac{1}{1000}$

- Raspodjela deformacija pri granici popuštanja uzduž presjeka

$$\varepsilon_y(p) := \varepsilon_{sym} + \frac{(\varepsilon_{cym} - \varepsilon_{sym}) \text{cm}}{d - 0 \text{cm}} \cdot p$$



Slika 33. Raspodjela naprezanja pri srednjoj granici popuštanja

- Visina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba) $x_{t,y} := \frac{d \cdot |\varepsilon_{cym}|}{|\varepsilon_{cym}| + \varepsilon_{sym}} = 0.134 \text{m}$

- Udaljenost od armature do N.O. $x_{no2,y} := d - x_{t,y} = 0.318 \text{m}$

- Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže granicu popuštanja $\xi_{sy} := \frac{x_{t,y}}{d} = 0.3$

- Prosječno tlačno naprezanje u betonu $f_{t,y} := \frac{\int_0^{|\varepsilon_{cym}|} \sigma_{c1}(\varepsilon_c) d\varepsilon_c}{|\varepsilon_{cym}|} = 17.214 \text{MPa}$

- Suma sila u betonu i armaturi

- Nul-točka udaljenosti (armatura 1.red) $e_1 := 0\text{cm}$

- Udaljenost 2. reda armature od nulte udaljenosti $e_2 := d - d_2 = 38.354 \cdot \text{cm}$

- Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1 $\sigma_{y_1} := \sigma_{sy} \left(\varepsilon_y \left(\frac{e_1}{\text{cm}} \right) \right) = 550 \cdot \text{MPa}$

- Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2 $\sigma_{y_2} := \sigma_{sy} \left(\varepsilon_y \left(\frac{e_2}{\text{cm}} \right) \right) = -124.474 \cdot \text{MPa}$

- Tlačna površina betona $A_{t,y} := x_{t,y} \cdot b = 415.478 \cdot \text{cm}^2$

- Uzdužna sila u gredi $N_{ed,y} := f_{t,y} \cdot A_{t,y} - \sum_{i=1}^2 (A_{s_i} \cdot \sigma_{y_i}) = 0.015 \cdot \text{kN}$

- Moment savijanja s obzirom na težište presjeka

Principom izjednačavanja površina dobije se deformacija u težištu presjeka $\varepsilon_y(x)$, iz čega se može izračunati udaljenost težišta od težišta grede $z_{c,y}$:

$$\int_0^{|x|} \sigma_{c1}(\varepsilon_c) d\varepsilon_c = \int_{|x|}^{|\varepsilon_{cym}|} \sigma_{c1}(\varepsilon_c) d\varepsilon_c$$

$$x_{t,y} := \text{Find}(x) = -8.489 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_y(x) = x_{t,y}$$

$$z_{cf,y} := \text{Find}(x) = 40.374$$

$$z_{c,y} := z_{cf,y} \cdot \text{cm} - \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) = 0.207 \text{ m}$$

- Moment savijanja s obzirom na težište

$$M_y := f_{t,y} \cdot A_{t,y} \cdot z_{c,y} - \sum_{i=1}^2 \left(A_{s_i} \cdot \sigma_{y_i} \cdot z_i \right) = 345.804 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

- Zakrivljenost pri granici popuštanja armature

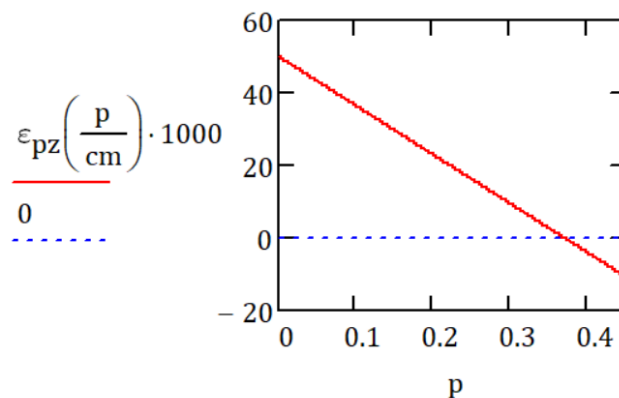
$$\phi_{\text{sym}1} := \frac{\varepsilon_{\text{sym}}}{x_{\text{no}2,y}} = 8.914 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{m}}$$

- **Granična nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona**

- Deformacija u armaturi pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba $\varepsilon_{s,pz} := 50 \cdot \frac{1}{1000}$
- Deformacija u betonu pri slomu $\varepsilon_{c,pz} := -5.285 \cdot \frac{1}{1000} = -5.285 \times 10^{-3}$

Raspodjela deformacija uzduž presjeka definirana je izrazom:

$$\varepsilon_{pz}(p) := \varepsilon_{s,pz} + \frac{(\varepsilon_{c,pz} - \varepsilon_{s,pz}) \text{cm}}{d_0 - 0 \text{cm}} \cdot p$$



Slika 34. Raspodjela naprezanja pri tlačnom slomu u betonu

- Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba) $x_{t,pz} := \frac{d_0 \cdot |\varepsilon_{c,pz}|}{|\varepsilon_{c,pz}| + \varepsilon_{s,pz}} = 3.9 \cdot \text{cm}$

- Udaljenost od armature do N.O. $x_{no3,pz} := d_0 - x_{t,pz} = 36.9 \cdot \text{cm}$

- Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže graničnu nosivost plastičnog zgloba $\xi_{sy,pz} := \frac{x_{t,pz}}{d_0} = 0.096$

- Prosječno tlačno naprezanje u betonu $f_{t,pz} := \frac{\int_0^{|\varepsilon_{c,pz}|} \sigma_{c1}(\varepsilon_c) d\varepsilon_c}{|\varepsilon_{c,pz}|} = 36.428 \cdot \text{MPa}$

• Suma sila u betonu i armaturi

- Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1 $\sigma_{pz_1} := \sigma_{sy} \left(\varepsilon_{pz} \left(\frac{e_1}{\text{cm}} \right) \right) = 550 \cdot \text{MPa}$

- Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2 $\sigma_{pz_2} := \sigma_{sy} \left(\varepsilon_{pz} \left(\frac{e_2}{\text{cm}} \right) \right) = -394.013 \cdot \text{MPa}$

- Tlačna površina betona $A_{tl,pz} := x_{t,pz} \cdot b = 0.012 \text{m}^2$

- Uzdužna sila u gredi $N_{ed,pz} := f_{t,pz} \cdot A_{tl,pz} - \sum_{i=1}^2 (A_{s_i} \cdot \sigma_{pz_i}) = 0.496 \cdot \text{kN}$

• Moment savijanja s obzirom na težište presjeka

Principom izjednačavanja površina dobije se deformacija u težištu presjeka $\varepsilon_{pz}(x)$, iz čega se može izračunati udaljenost težišta od težišta grede $z_{c,pz}$:

$$\int_0^{|x|} \sigma_{c1}(\varepsilon_c) d\varepsilon_c = \int_{|x|}^{|\varepsilon_{c,pz}|} \sigma_{c1}(\varepsilon_c) d\varepsilon_c$$

$$x_{t,pz} := \text{Find}(x) = -3.084 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{pz}(x) = x_{t,pz}$$

$$z_{cf,pz} := \text{Find}(x) = 39.176$$

$$z_{c,pz} := z_{cf,pz} \cdot \text{cm} - \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) = 19.476 \cdot \text{cm}$$

- Moment savijanja s obzirom na težište

$$M_{pz} := f_{t,pz} \cdot A_{tl,pz} \cdot z_{c,pz} - \sum_{i=1}^2 \left(A_{s_i} \cdot \sigma_{pz_i} \cdot z_i \right) = 334.948 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

- Zakrivljenost pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba

$$\phi_{s,pz} := \frac{\varepsilon_{s,pz}}{x_{no3,pz}} = 0.136 \frac{1}{\text{m}}$$

U nastavku se nalazi tablični prikaz izračunatih vrijednosti grede poz. 115-115 za momente savijanja s obzirom na težište i kutova zaokreta (ovijeni beton).

Tablica 11 Vrijednosti momenta savijanja i zakrivljenosti grede poz. 115-115 – neovijeni beton

115-115 - ovijeni beton		
	granica popuštanja	tlačni slom u betonu
M [kNm]	345,80	334,95
ϕ [1/m]	0,008914	0,136

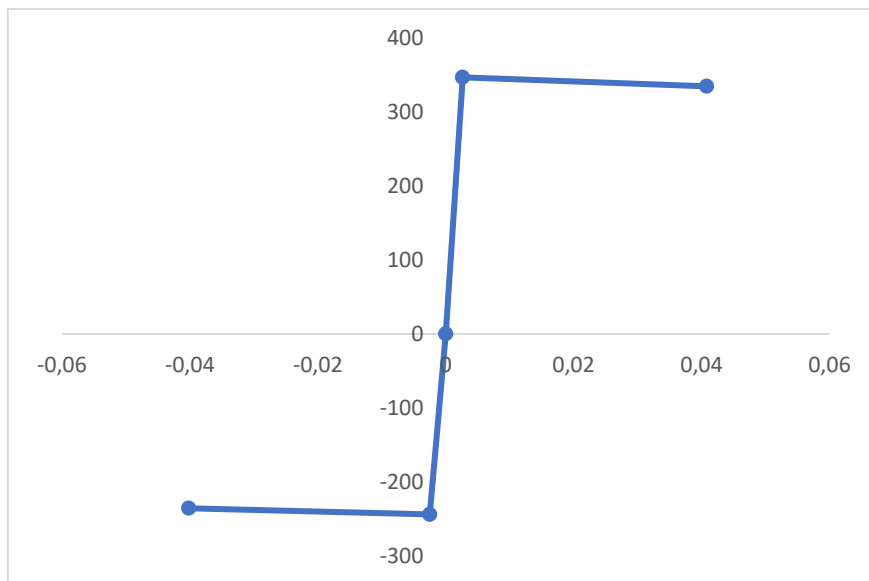
Potrebne točke prve grane bilinearnog dijagrama moment savijanja – zakrivljenost prikazane su u tablici 12, a druge u tablici 13. Dijagram je prikazan na slici 35.

Tablica 12. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 115-115 – ovijeni beton

115-115 - ovijeni beton		
	granica popuštanja	tlačni slom u betonu
M [kNm]	345,80	334,95
$\Theta = \phi \cdot 0,6 \cdot h$	0,0026742	0,0408

Tablica 13. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 115-115 – ovijeni beton (zamijenjena armatura)

115-115 - ovijeni beton (zamijenjena armatura)		
	granica popuštanja	tlačni slom u betonu
M [kNm]	-243,78	-250,35
$\Theta = \varnothing \cdot 0,6 \cdot h$	-0,002508	-0,0402



Slika 35. Dijagram M – Θ grede 115-115 (ovijeni beton)

4.4. Ostali stupovi

Poz. III/200

- Karakteristike poprečnog presjeka

Tablica 14. Karakteristike poprečnog presjeka poz. III/200

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
b	Širina stupa	50	cm
h	Visina stupa	50	cm
N_{Ed}	Ekscentrična uzdužna tlačna sila koja djeluje na stup	572,32	kN
Φ_1	Uzdužna armatura 1	20 ; 10	mm ; kom
Φ_2	Uzdužna armatura 2	16 ; 4	mm ; kom
Φ_w	Poprečna armatura	8	mm
c_{nom}	Zaštitni sloj betona	3.5	cm
d	Statička visina	44,70	cm
d_1	Visina od vlačnog ruba do težišta armature	5,30	cm
d_2	Visina od tlačnog ruba do težišta tlačne armature	5,30	cm
b_0	Minimalna širina ovijene betonske jezgre (do osi spona)	42,20	cm
h_0	Visina ovijene jezgre u stupu	42,20	cm
b_i	Udaljenost između dviju uzastopnih šipki	13,30	cm
d_0	Statička visina ovijenog presjeka	40,80	cm

- Karakteristike armature

Tablica 15. Karakteristike armature poz. III/200

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
A_{s1}	Armatura 1. red	15,71	cm ²
A_{s2}	Armatura 2. red	4,02	cm ²
A_{s3}	Armatura 3. red	4,02	cm ²
A_{s4}	Armatura 4. red	15,71	cm ²
A_w	Površina presjeka spona	0,50	cm ²
l_{wuk}	Ukupna duljina ovijajućih spona	4,82	m
s	Usvojeni razmak spona	12	cm
V_{ch}	Volumen ovijajućih spona	$2.42 \cdot 10^{-4}$	m ²
V_{cc}	Volumen betonskih jezgra	0,021	m ²
ω_{wm}	Koeficijent armiranja ovijajućim sponama u kritičnom području	0,164	-

- Proračun ovijenog betona

Tablica 16. Vrijednosti za proračun ovijenog betona poz. III/200

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
n	Ukupan broj šipki bočno pridržan sponama	12	kom
α_{n1}	Koeficijenti ovisni o obliku poprečnog presjeka stupa	0,78	-
α_{s1}		0,86	-
σ_2	Efektivno bočno tlačno naprezanje u GSN prema ograničenju deformacija	1,64	MPa
σ_2/f_{ck}	Omjer efektivnog bočnog tlačnog naprezanja i karakteristične čvrstoće betona	0,055	-
f_{ckc}	Tlačna čvrstoća ovijenog betona	37,86	MPa
f_{cmc}	Srednja tlačna čvrstoća ovijenog betona	47,95	MPa
f_{ctmc}	Srednja vlačna čvrstoća ovijenog betona	3,38	MPa
E_{cmc}	Sekantni modul elastičnosti betona	$3,52 \cdot 10^{-4}$	MPa
ϵ_{c2c}	Deformacija pri granici parabole ovijenog betona	$3,19 \cdot 10^{-3}$	-
ϵ_{cu2c}	Deformacija pri tlačnoj čvrstoći ovijenog betona	0,014	-

- **Granica popuštanja armature ovijenog betona**

Tablica 17. Proračun za granicu popuštanja armature ovijenog betona poz. III/200

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
ϵ_{sym}	Deformacija u armaturi pri srednjoj granici popuštanja	$2,75 \cdot 10^{-3}$	-
ϵ_{cym}	Pretpostavljena deformacija u betonu pri granici popuštanja	$-1,36 \cdot 10^{-3}$	-
$x_{t,y}$	Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba)	14,80	cm
$x_{no2,y}$	Udaljenost od armature do N.O.	29,90	cm
ξ_{sy}	Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže granicu popuštanja	0,332	-
$f_{t,y}$	Prosječno tlačno naprezanje u betonu	17,63	MPa
e_1	Nul-točka udaljenosti (armatura 1.red)	0	cm
e_2	Udaljenost 2. reda armature od nulte udaljenosti	13,33	cm
e_3	Udaljenost 3. reda armature od nulte udaljenosti	26,66	cm
e_4	Udaljenost 4. reda armature od nulte udaljenosti	39,99	cm
σ_{y1}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1	550	MPa
σ_{y2}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2	305,06	MPa
σ_{y3}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_3	60,12	MPa
σ_{y4}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_4	-175,61	MPa
$A_{t,y}$	Tlačna površina betona	741,78	cm ²
$N_{Ed,y}$	Uzdužna sila u stupu	572,32	kN
$x_{t,y}$	Deformacija u težištu presjeka	$-9,42 \cdot 10^{-4}$	-
$z_{c,y}$	Udaljenost težišta od težišta stupa	20,40	cm
z_1	Udaljenost 1. reda armature od težišta presjeka	-19,70	cm
z_2	Udaljenost 2. reda armature od težišta presjeka	-6,57	cm
z_3	Udaljenost 3. reda armature od težišta presjeka	6,57	cm
z_4	Udaljenost 4. reda armature od težišta presjeka	19,70	cm
M_y	Moment savijanja s obzirom na težište	497,67	kNm
ϕ_{sym}	Zakrivljenost pri granici popuštanja armature	$9,21 \cdot 10^{-3}$	1/m

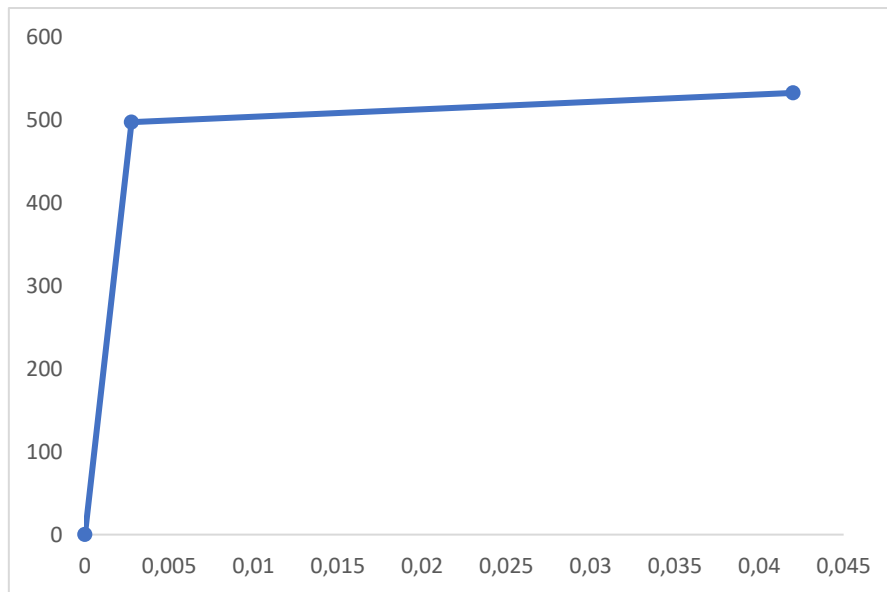
- **Granična nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona**

Tablica 18. Proračun za graničnu nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona poz. III/200

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
$\varepsilon_{s,pz}$	Deformacija u armaturi pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	$50 \cdot 10^{-3}$	-
$\varepsilon_{c,pz}$	Pretpostavljena deformacija u betonu pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	$-6,97 \cdot 10^{-3}$	-
$x_{t,pz}$	Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba)	4,99	cm
$x_{no3,pz}$	Udaljenost od armature do N.O.	35,81	cm
$\xi_{s,pz}$	Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže graničnu nosivost plastičnog zgloba	0,122	-
$f_{t,pz}$	Prosječno tlačno naprezanje u betonu	40,65	MPa
σ_{pz1}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1	550	MPa
σ_{pz2}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2	550	MPa
σ_{pz3}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_3	550	MPa
σ_{pz4}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_4	-550	MPa
$A_{t,pz}$	Tlačna površina betona	249,50	cm ²
$N_{ed,pz}$	Uzdužna sila u stupu	572,32	kN
$x_{t,pz}$	Deformacija u težištu presjeka	$-4,05 \cdot 10^{-3}$	-
$z_{c,pz}$	Udaljenost težišta od težišta stupa	18,99	cm
M_{pz}	Moment savijanja s obzirom na težište	532,96	kNm
ϕ_{spz}	Zakrivljenost pri granici popuštanja armature	0,14	1/m

Tablica 19. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta stupa poz. III/200

III/200		
	granica popuštanja	nosivost plastičnog zgloba
M [kNm]	497,67	532,96
$\Theta = \varnothing \cdot 0,6 \cdot h$	0,002763	0,042



Slika 36. Dijagram M - θ stup III/200

Poz. III/300

- Karakteristike poprečnog presjeka

Tablica 20. Karakteristike poprečnog presjeka poz. III/300

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
b	Širina stupa	50	cm
h	Visina stupa	50	cm
N_{ed}	Ekscentrična uzdužna tlačna sila koja djeluje na stup	263,96	kN
Φ_1	Uzdužna armatura 1	20 ; 10	mm ; kom
Φ_2	Uzdužna armatura 2	16 ; 4	mm ; kom
Φ_w	Poprečna armatura	8	mm
c_{nom}	Zaštitni sloj betona	3,5	cm
d	Statička visina	44,70	cm
d_1	Visina od vlačnog ruba do težišta armature	5,30	cm
d_2	Visina od tlačnog ruba do težišta tlačne armature	5,30	cm
b_0	Minimalna širina ovijene betonske jezgre (do osi spona)	42,20	cm
h_0	Visina ovijene jezgre u stupu	42,20	cm
b_i	Udaljenost između dviju uzastopnih šipki	13,30	cm
d_0	Statička visina ovijenog presjeka	40,80	cm

- Karakteristike armature

Tablica 21. Karakteristike poprečnog presjeka poz. III/300

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
A_{s1}	Armatura 1. red	15,71	cm ²
A_{s2}	Armatura 2. red	4,02	cm ²
A_{s3}	Armatura 3. red	4,02	cm ²
A_{s4}	Armatura 4. red	15,71	cm ²
A_w	Površina presjeka spona	0,50	cm ²
l_{wuk}	Ukupna duljina ovijajućih spona	4,82	m
s	Usvojeni razmak spona	12	cm
V_{ch}	Volumen ovijajućih spona	$2,42 \cdot 10^{-4}$	m ²
V_{cc}	Volumen betonskih jezgra	0,021	m ²
ω_{wm}	Koeficijent armiranja ovijajućim sponama u kritičnom području	0,164	-

- Proračun ovijenog betona

Tablica 22. Vrijednosti za proračun ovijenog betona poz. III/300

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
n	Ukupan broj šipki bočno pridržan sponama	12	kom
α_{n1}	Koeficijenti ovisni o obliku poprečnog presjeka stupa	0,78	-
α_{s1}		0,86	-
σ_2	Efektivno bočno tlačno naprezanje u GSN prema ograničenju deformacija	1,64	MPa
σ_2/f_{ck}	Omjer efektivnog bočnog tlačnog naprezanja i karakteristične čvrstoće betona	0,055	-
f_{ckc}	Tlačna čvrstoća ovijenog betona	37,86	MPa
f_{cmc}	Srednja tlačna čvrstoća ovijenog betona	47,95	MPa
f_{ctmc}	Srednja vlačna čvrstoća ovijenog betona	3,38	MPa
E_{cmc}	Sekantni modul elastičnosti betona	$3,52 \cdot 10^{-4}$	MPa
ϵ_{c2c}	Deformacija pri granici parabole ovijenog betona	$3,19 \cdot 10^{-3}$	-
ϵ_{cu2c}	Deformacija pri tlačnoj čvrstoći ovijenog betona	0,014	-

- **Granica popuštanja armature ovijenog betona**

Tablica 23. Proračun za granicu popuštanja armature ovijenog betona poz. III/300

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
ε_{sym}	Deformacija u armaturi pri srednjoj granici popuštanja	$2,75 \cdot 10^{-3}$	-
ε_{cym}	Pretpostavljena deformacija u betonu pri granici popuštanja	$-1,19 \cdot 10^{-3}$	-
$x_{tl,y}$	Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba)	13,50	cm
$x_{no2,y}$	Udaljenost od armature do N.O.	31,20	cm
ξ_{sy}	Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže granicu popuštanja	0,302	-
f_{ty}	Prosječno tlačno naprezanje u betonu	15,70	MPa
e_1	Nul-točka udaljenosti (armatura 1.red)	0	cm
e_2	Udaljenost 2. reda armature od nulte udaljenosti	13,33	cm
e_3	Udaljenost 3. reda armature od nulte udaljenosti	26,66	cm
e_4	Udaljenost 4. reda armature od nulte udaljenosti	39,99	cm
σ_{y1}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1	550	MPa
σ_{y2}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2	315,49	MPa
σ_{y3}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_3	80,97	MPa
σ_{y4}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_4	-144,73	MPa
$A_{t,y}$	Tlačna površina betona	675,39	cm ²
$N_{Ed,y}$	Uzdužna sila u stupu	263,96	kN
$x_{t,y}$	Deformacija u težištu presjeka	$-8,24 \cdot 10^{-4}$	-
$z_{c,y}$	Udaljenost težišta od težišta stupa	20,80	cm
z_1	Udaljenost 1. reda armature od težišta presjeka	-19,70	cm
z_2	Udaljenost 2. reda armature od težišta presjeka	-6,57	cm
z_3	Udaljenost 3. reda armature od težišta presjeka	6,57	cm
z_4	Udaljenost 4. reda armature od težišta presjeka	19,70	cm
M_y	Moment savijanja s obzirom na težište	442,11	kNm
ϕ_{sym}	Zakrivljenost pri granici popuštanja armature	$8,82 \cdot 10^{-3}$	1/m

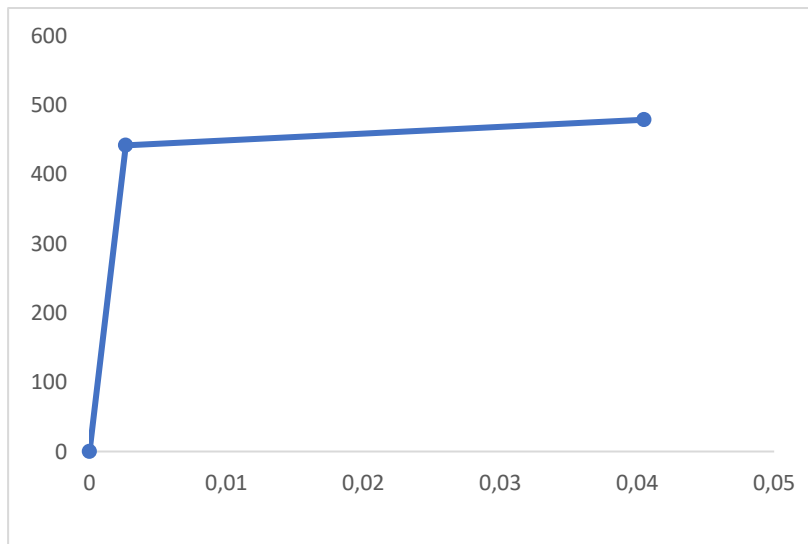
- **Granična nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona**

Tablica 24. Proračun za graničnu nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona poz. III/300

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
$\varepsilon_{s,pz}$	Deformacija u armaturi pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	$50 \cdot 10^{-3}$	-
$\varepsilon_{c,pz}$	Pretpostavljena deformacija u betonu pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	$-5,03 \cdot 10^{-3}$	-
$x_{t,pz}$	Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba)	3,73	cm
$x_{no3,pz}$	Udaljenost od armature do N.O.	37,06	cm
$\xi_{s,pz}$	Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže graničnu nosivost plastičnog zgloba	0,092	-
$f_{t,pz}$	Prosječno tlačno naprezanje u betonu	37,85	MPa
σ_{pz1}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1	550	MPa
σ_{pz2}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2	550	MPa
σ_{pz3}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_3	550	MPa
σ_{pz4}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_4	-550	MPa
$A_{t,pz}$	Tlačna površina betona	186,71	cm ²
$N_{Ed,pz}$	Uzdužna sila u stupu	263,96	kN
$x_{t,pz}$	Deformacija u težištu presjeka	$-3,05 \cdot 10^{-3}$	-
$z_{c,pz}$	Udaljenost težišta od težišta stupa	19,63	cm
M_{pz}	Moment savijanja s obzirom na težište	479,07	kNm
ϕ_{spz}	Zakrivljenost pri granici popuštanja armature	0,135	1/m

Tablica 25. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta stupa poz. III/300

III/300		
	granica popuštanja	nosivost plastičnog zgloba
M [kNm]	442,11	479,07
$\theta = \theta \cdot 0,6 \cdot h$	0,002646	0,0405



Slika 37. Dijagram M - θ stup III/300

Poz. IV/100

- Karakteristike poprečnog presjeka

Tablica 26. Karakteristike poprečnog presjeka poz. IV/100

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
b	Širina stupa	50	cm
h	Visina stupa	50	cm
N_{Ed}	Ekscentrična uzdužna tlačna sila koja djeluje na stup	1207,69	kN
Φ_1	Uzdužna armatura 1	25 ; 8	mm ; kom
Φ_2	Uzdužna armatura 2	20 ; 4	mm ; kom
Φ_w	Poprečna armatura	8	mm
c_{nom}	Zaštitni sloj betona	3,50	cm
d	Statička visina	44,40	cm
d_1	Visina od vlačnog ruba do težišta armature	5,60	cm
d_2	Visina od tlačnog ruba do težišta tlačne armature	5,60	cm
b_0	Minimalna širina ovijene betonske jezgre (do osi spona)	42,20	cm
h_0	Visina ovijene jezgre u stupu	42,20	cm
b_i	Udaljenost između dviju uzastopnih šipki	13,2	cm
d_0	Statička visina ovijenog presjeka	40,5	cm

- Karakteristike armature

Tablica 27. Karakteristike armature poz. IV/100

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
A_{s1}	Armatura 1. red	19,64	cm ²
A_{s2}	Armatura 2. red	6,28	cm ²
A_{s3}	Armatura 3. red	6,28	cm ²
A_{s4}	Armatura 4. red	19,64	cm ²
A_w	Površina presjeka spona	0,50	cm ²
l_{wuk}	Ukupna duljina ovijajućih spona	4,82	m
s	Usvojeni razmak spona	12	cm
V_{ch}	Volumen ovijajućih spona	$2,42 \cdot 10^{-4}$	m ²
V_{cc}	Volumen betonskih jezgra	0,021	m ²
ω_{wm}	Koeficijent armiranja ovijajućim sponama u kritičnom području	0,164	-

- Proračun ovijenog betona

Tablica 28. Vrijednosti za proračun ovijenog betona poz. IV/100

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
n	Ukupan broj šipki bočno pridržan sponama	12	kom
α_{n1}	Koeficijenti ovisni o obliku poprečnog presjeka stupa	0,778	-
α_{s1}		0,858	-
σ_2	Efektivno bočno tlačno naprezanje u GSN prema ograničenju deformacija	1,64	MPa
σ_2/f_{ck}	Omjer efektivnog bočnog tlačnog naprezanja i karakteristične čvrstoće betona	0,055	-
f_{ckc}	Tlačna čvrstoća ovijenog betona	37,86	MPa
f_{cmc}	Srednja tlačna čvrstoća ovijenog betona	47,95	MPa
f_{ctmc}	Srednja vlačna čvrstoća ovijenog betona	3,38	MPa
E_{cmc}	Sekantni modul elastičnosti betona	$3,52 \cdot 10^4$	MPa
ϵ_{c2c}	Deformacija pri granici parabole ovijenog betona	$3,19 \cdot 10^{-3}$	-
ϵ_{cu2c}	Deformacija pri tlačnoj čvrstoći ovijenog betona	0,014	-

- **Granica popuštanja armature ovijenog betona**

Tablica 29. Proračun za granicu popuštanja armature ovijenog betona poz. IV/100

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
ε_{sym}	Deformacija u armaturi pri srednjoj granici popuštanja	$2,75 \cdot 10^{-3}$	-
ε_{cym}	Pretpostavljena deformacija u betonu pri granici popuštanja	$-1,83 \cdot 10^{-3}$	-
$x_{tl,y}$	Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba)	17,70	cm
$x_{no2,y}$	Udaljenost od armature do N.O.	26,70	cm
ξ_{sy}	Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže granicu popuštanja	0,399	-
$f_{t,y}$	Prosječno tlačno naprezanje u betonu	22,23	MPa
e_1	Nul-točka udaljenosti (armatura 1.red)	0	cm
e_2	Udaljenost 2. reda armature od nulte udaljenosti	13,20	cm
e_3	Udaljenost 3. reda armature od nulte udaljenosti	26,50	cm
e_4	Udaljenost 4. reda armature od nulte udaljenosti	38,90	cm
σ_{y1}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1	550	MPa
σ_{y2}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2	277,23	MPa
σ_{y3}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_3	4,48	MPa
σ_{y4}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_4	-250,80	MPa
$A_{t,y}$	Tlačna površina betona	886,63	cm ²
$N_{Ed,y}$	Uzdužna sila u stupu	1207,69	kN
$x_{t,y}$	Deformacija u težištu presjeka	$-1,24 \cdot 10^{-3}$	-
$z_{c,y}$	Udaljenost težišta od težišta stupa	19,40	cm
z_1	Udaljenost 1. reda armature od težišta presjeka	-19,45	cm
z_2	Udaljenost 2. reda armature od težišta presjeka	-6,48	cm
z_3	Udaljenost 3. reda armature od težišta presjeka	6,48	cm
z_4	Udaljenost 4. reda armature od težišta presjeka	19,45	cm
M_y	Moment savijanja s obzirom na težište	698,55	kNm
ϕ_{sym}	Zakrivljenost pri granici popuštanja armature	0,01	1/m

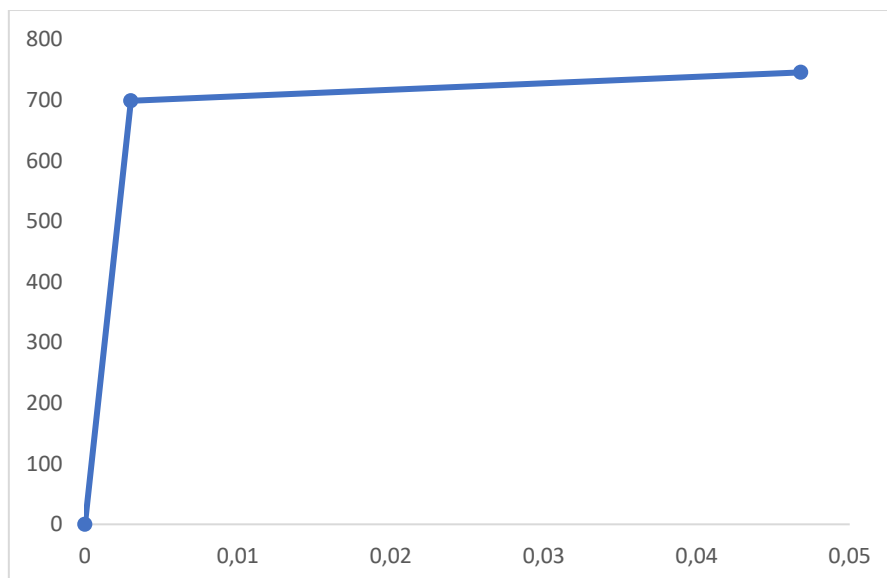
- **Granična nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona**

Tablica 30. Proračun za graničnu nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona poz. IV/100

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
$\varepsilon_{s,pz}$	Deformacija u armaturi pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	$50 \cdot 10^{-3}$	-
$\varepsilon_{c,pz}$	Pretpostavljena deformacija u betonu pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	$-13,45 \cdot 10^{-3}$	-
$x_{t,pz}$	Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba)	8,60	cm
$x_{no3,pz}$	Udaljenost od armature do N.O.	31,95	cm
$\xi_{s,pz}$	Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže graničnu nosivost plastičnog zgloba	0,212	-
$f_{t,pz}$	Prosječno tlačno naprezanje u betonu	44,16	MPa
σ_{pz1}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1	550	MPa
σ_{pz2}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2	550	MPa
σ_{pz3}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_3	550	MPa
σ_{pz4}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_4	-550	MPa
$A_{t,pz}$	Tlačna površina betona	429,78	cm ²
$N_{Ed,pz}$	Uzdužna sila u stupu	1207,69	kN
$x_{t,pz}$	Deformacija u težištu presjeka	$-7,25 \cdot 10^{-3}$	-
$z_{c,pz}$	Udaljenost težišta od težišta stupa	17,14	cm
M_{pz}	Moment savijanja s obzirom na težište	745,47	kNm
ϕ_{spz}	Zakrivljenost pri granici popuštanja armature	0,156	1/m

Tablica 31. Vrijednosti momenta savijanja i l kuteva zaokreta stupa poz. IV/100

IV/100		
	granica popuštanja	nosivost plastičnog zgloba
M [kNm]	698,55	745,47
$\Theta = \phi \cdot 0,6 \cdot h$	0,003	0,0468



Slika 38. Dijagram M - θ stup IV/100

Poz. IV/200

- Karakteristike poprečnog presjeka

Tablica 32. Karakteristike poprečnog presjeka poz. IV/200

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
b	Širina stupa	50	cm
h	Visina stupa	50	cm
N_{Ed}	Ekscentrična uzdužna tlačna sila koja djeluje na stup	831,77	kN
Φ_1	Uzdužna armatura 1	20 ; 10	mm
Φ_2	Uzdužna armatura 2	16 ; 4	mm
Φ_w	Poprečna armatura	8	mm
c_{nom}	Zaštitni sloj betona	3,5	cm
d	Statička visina	44,70	cm
d_1	Visina od vlačnog ruba do težišta armature	5,30	cm
d_2	Visina od tlačnog ruba do težišta tlačne armature	5,30	cm
b_0	Minimalna širina ovijene betonske jezgre (do osi spona)	42,20	cm
h_0	Visina ovijene jezgre u stupu	42,20	cm
b_i	Udaljenost između dviju uzastopnih šipki	13,30	cm
d_0	Statička visina ovijenog presjeka	40,80	cm

- Karakteristike armature

Tablica 33. Karakteristike armature poz. IV/200

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
A_{s1}	Armatura 1. red	15,71	cm ²
A_{s2}	Armatura 2. red	4,02	cm ²
A_{s3}	Armatura 3. red	4,02	cm ²
A_{s4}	Armatura 4. red	15,71	cm ²
A_w	Površina presjeka spona	0,50	cm ²
l_{wuk}	Ukupna duljina ovijajućih spona	4,82	m
s	Usvojeni razmak spona	12	cm
V_{ch}	Volumen ovijajućih spona	$2,42 \cdot 10^{-4}$	m ²
V_{cc}	Volumen betonskih jezgra	0,021	m ²
ω_{wm}	Koeficijent armiranja ovijajućim sponama u kritičnom području	0,164	-

- Proračun ovijenog betona

Tablica 34. Vrijednosti za proračun ovijenog betona poz. IV/200

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
n	Ukupan broj šipki bočno pridržan sponama	12	kom
α_{n1}	Koeficijenti ovisni o obliku poprečnog presjeka stupa	0,78	-
α_{s1}		0,86	-
σ_2	Efektivno bočno tlačno naprezanje u GSN prema ograničenju deformacija	1,64	MPa
σ_2/f_{ck}	Omjer efektivnog bočnog tlačnog naprezanja i karakteristične čvrstoće betona	0,055	-
f_{ckc}	Tlačna čvrstoća ovijenog betona	37,86	MPa
f_{cmc}	Srednja tlačna čvrstoća ovijenog betona	47,95	MPa
f_{ctmc}	Srednja vlačna čvrstoća ovijenog betona	3,38	MPa
E_{cmc}	Sekantni modul elastičnosti betona	$3,52 \cdot 10^{-4}$	MPa
ϵ_{c2c}	Deformacija pri granici parabole ovijenog betona	$3,19 \cdot 10^{-3}$	-
ϵ_{cu2c}	Deformacija pri tlačnoj čvrstoći ovijenog betona	0,014	-

- **Granica popuštanja armature ovijenog betona**

Tablica 35. Proračun za granicu popuštanja armature ovijenog betona poz. IV/200

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
ϵ_{sym}	Deformacija u armaturi pri srednjoj granici popuštanja	$2,75 \cdot 10^{-3}$	-
ϵ_{cym}	Pretpostavljena deformacija u betonu pri granici popuštanja	$-1,51 \cdot 10^{-3}$	-
$x_{tl,y}$	Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba)	15,80	cm
$x_{no2,y}$	Udaljenost od armature do N.O.	28,90	cm
ξ_{sy}	Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže granicu popuštanja	0,354	-
f_{ty}	Prosječno tlačno naprezanje u betonu	19,14	MPa
e_1	Nul-točka udaljenosti (armatura 1.red)	0	cm
e_2	Udaljenost 2. reda armature od nulte udaljenosti	13,30	cm
e_3	Udaljenost 3. reda armature od nulte udaljenosti	26,60	cm
e_4	Udaljenost 4. reda armature od nulte udaljenosti	39,40	cm
σ_{y1}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1	550	MPa
σ_{y2}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2	296,50	MPa
σ_{y3}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_3	42,99	MPa
σ_{y4}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_4	-200,98	MPa
$A_{t,y}$	Tlačna površina betona	792,22	cm ²
$N_{Ed,y}$	Uzdužna sila u stupu	831,77	kN
$x_{t,y}$	Deformacija u težištu presjeka	$-1,03 \cdot 10^{-3}$	-
$z_{c,y}$	Udaljenost težišta od težišta stupa	20	cm
z_1	Udaljenost 1. reda armature od težišta presjeka	-19,70	cm
z_2	Udaljenost 2. reda armature od težišta presjeka	-6,57	cm
z_3	Udaljenost 3. reda armature od težišta presjeka	6,57	cm
z_4	Udaljenost 4. reda armature od težišta presjeka	19,70	cm
M_y	Moment savijanja s obzirom na težište	543,06	kNm
ϕ_{sym}	Zakrivljenost pri granici popuštanja armature	$9,53 \cdot 10^{-3}$	1/m

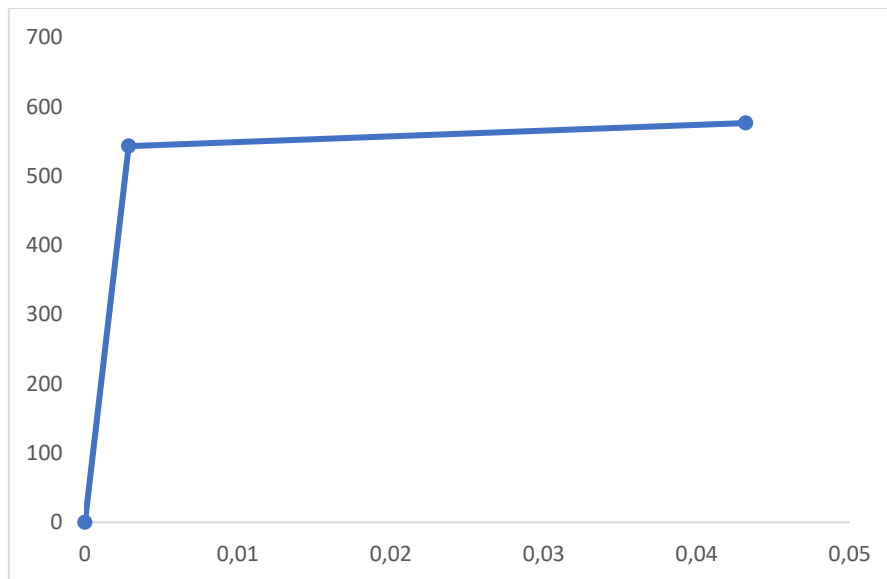
- **Granična nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona**

Tablica 36. Proračun za graničnu nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona poz. IV/200

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
$\varepsilon_{s,pz}$	Deformacija u armaturi pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	$50 \cdot 10^{-3}$	-
$\varepsilon_{c,pz}$	Pretpostavljena deformacija u betonu pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	$-8,71 \cdot 10^{-3}$	-
$x_{t,pz}$	Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba)	6,05	cm
$x_{no3,pz}$	Udaljenost od armature do N.O.	34,75	cm
$\xi_{s,pz}$	Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže graničnu nosivost plastičnog zgloba	0,148	-
$f_{t,pz}$	Prosječno tlačno naprezanje u betonu	42,10	MPa
σ_{pz1}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1	550	MPa
σ_{pz2}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2	550	MPa
σ_{pz3}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_3	550	MPa
σ_{pz4}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_4	-550	MPa
$A_{t,pz}$	Tlačna površina betona	302,50	cm ²
$N_{Ed,pz}$	Uzdužna sila u stupu	831,77	kN
$x_{t,pz}$	Deformacija u težištu presjeka	$-4,88 \cdot 10^{-3}$	-
$z_{c,pz}$	Udaljenost težišta od težišta stupa	18,44	cm
M_{pz}	Moment savijanja s obzirom na težište	576,3	kNm
ϕ_{spz}	Zakrivljenost pri granici popuštanja armature	0,144	1/m

Tablica 37. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta stupa poz. IV/200

IV/200		
	granica popuštanja	nosivost plastičnog zgloba
M [kNm]	543,06	576,3
$\Theta = \phi \cdot 0,6 \cdot h$	0,002859	0,0432



Slika 39. Dijagram M - θ stup IV/200

Poz. IV/300

- Karakteristike poprečnog presjeka

Tablica 38. Karakteristike poprečnog presjeka poz. IV/300

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
b	Širina stupa	50	cm
h	Visina stupa	50	cm
N_{Ed}	Ekscentrična uzdužna tlačna sila koja djeluje na stup	345,08	kN
Φ_1	Uzdužna armatura 1	20 ; 10	mm
Φ_2	Uzdužna armatura 2	16 ; 4	mm
Φ_w	Poprečna armatura	8	mm
c_{nom}	Zaštitni sloj betona	3,5	cm
d	Statička visina	44,70	cm
d_1	Visina od vlačnog ruba do težišta armature	5,30	cm
d_2	Visina od tlačnog ruba do težišta tlačne armature	5,30	cm
b_0	Minimalna širina ovijene betonske jezgre (do osi spona)	42,20	cm
h_0	Visina ovijene jezgre u stupu	42,20	cm
b_i	Udaljenost između dviju uzastopnih šipki	13,30	cm
d_0	Statička visina ovijenog presjeka	40,80	cm

- Karakteristike armature

Tablica 39. Karakteristike armature poz. IV/300

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
A_{s1}	Armatura 1. red	15,71	cm ²
A_{s2}	Armatura 2. red	4,02	cm ²
A_{s3}	Armatura 3. red	4,02	cm ²
A_{s4}	Armatura 4. red	15,71	cm ²
A_w	Površina presjeka spona	0,50	cm ²
l_{wuk}	Ukupna duljina ovijajućih spona	4,82	m
s	Usvojeni razmak spona	12	cm
V_{ch}	Volumen ovijajućih spona	$2,42 \cdot 10^{-4}$	m ²
V_{cc}	Volumen betonskih jezgra	0,021	m ²
ω_{wm}	Koeficijent armiranja ovijajućim sponama u kritičnom području	0,164	-

- Proračun ovijenog betona

Tablica 40. Vrijednosti za proračun ovijenog betona poz. IV/300

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
n	Ukupan broj šipki bočno pridržan sponama	12	kom
α_{n1}	Koeficijenti ovisni o obliku poprečnog presjeka stupa	0,78	-
α_{s1}		0,86	-
σ_2	Efektivno bočno tlačno naprezanje u GSN prema ograničenju deformacija	1,64	MPa
σ_2/f_{ck}	Omjer efektivnog bočnog tlačnog naprezanja i karakteristične čvrstoće betona	0,055	-
f_{ckc}	Tlačna čvrstoća ovijenog betona	37,86	MPa
f_{cmc}	Srednja tlačna čvrstoća ovijenog betona	47,95	MPa
f_{ctmc}	Srednja vlačna čvrstoća ovijenog betona	3,38	MPa
E_{cmc}	Sekantni modul elastičnosti betona	$3,52 \cdot 10^{-4}$	MPa
ϵ_{c2c}	Deformacija pri granici parabole ovijenog betona	$3,19 \cdot 10^{-3}$	-
ϵ_{cu2c}	Deformacija pri tlačnoj čvrstoći ovijenog betona	0,014	-

- **Granica popuštanja armature ovijenog betona**

Tablica 41. Proračun za granicu popuštanja armature ovijenog betona poz. IV/300

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
ϵ_{sym}	Deformacija u armaturi pri srednjoj granici popuštanja	$2,75 \cdot 10^{-3}$	-
ϵ_{cym}	Pretpostavljena deformacija u betonu pri granici popuštanja	$-1,24 \cdot 10^{-3}$	-
$x_{tl,y}$	Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba)	13,90	cm
$x_{no2,y}$	Udaljenost od armature do N.O.	30,80	cm
ξ_{sy}	Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže granicu popuštanja	0,31	-
$f_{t,y}$	Prosječno tlačno naprezanje u betonu	16,22	MPa
e_1	Nul-točka udaljenosti (armatura 1.red)	0	cm
e_2	Udaljenost 2. reda armature od nulte udaljenosti	13,30	cm
e_3	Udaljenost 3. reda armature od nulte udaljenosti	26,60	cm
e_4	Udaljenost 4. reda armature od nulte udaljenosti	39,40	cm
σ_{y1}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1	550	MPa
σ_{y2}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2	312,72	MPa
σ_{y3}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_3	75,44	MPa
σ_{y4}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_4	-152,92	MPa
$A_{t,y}$	Tlačna površina betona	693,58	cm ²
$N_{Ed,y}$	Uzdužna sila u stupu	345,08	kN
$x_{t,y}$	Deformacija u težištu presjeka	$-8,56 \cdot 10^{-3}$	-
$z_{c,y}$	Udaljenost težišta od težišta stupa	20,70	cm
z_1	Udaljenost 1. reda armature od težišta presjeka	-19,70	cm
z_2	Udaljenost 2. reda armature od težišta presjeka	-6,57	cm
z_3	Udaljenost 3. reda armature od težišta presjeka	6,57	cm
z_4	Udaljenost 4. reda armature od težišta presjeka	19,70	cm
M_y	Moment savijanja s obzirom na težište	456,85	kNm
ϕ_{sym}	Zakrivljenost pri granici popuštanja armature	$8,92 \cdot 10^{-3}$	1/m

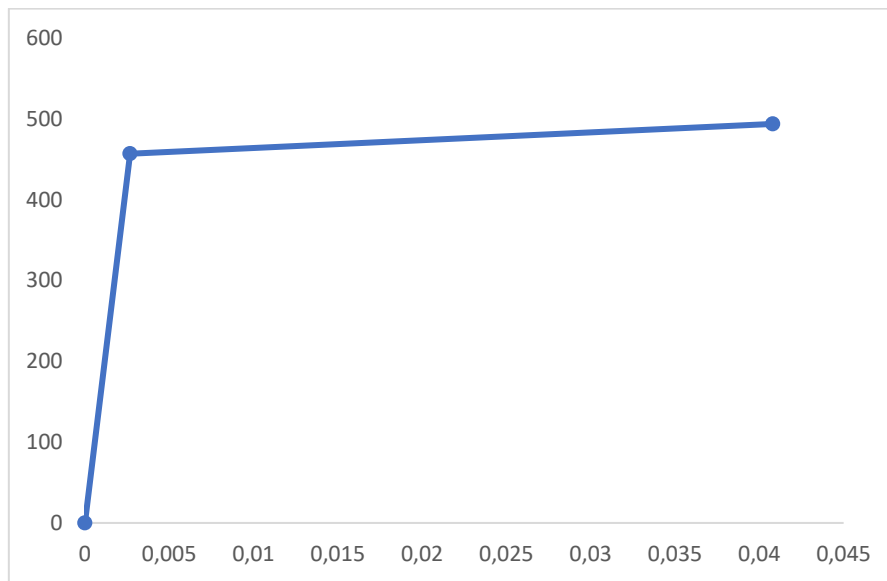
- **Granična nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona**

Tablica 42. Proračun za graničnu nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona poz. IV/300

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
$\varepsilon_{s,pz}$	Deformacija u armaturi pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	$50 \cdot 10^{-3}$	-
$\varepsilon_{c,pz}$	Pretpostavljena deformacija u betonu pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	$-5,53 \cdot 10^{-3}$	-
$x_{t,pz}$	Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba)	4,07	cm
$x_{no3,pz}$	Udaljenost od armature do N.O.	36,74	cm
$\xi_{s,pz}$	Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže graničnu nosivost plastičnog zgloba	0,1	-
$f_{t,pz}$	Prosječno tlačno naprezanje u betonu	38,75	MPa
σ_{pz1}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1	550	MPa
σ_{pz2}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2	550	MPa
σ_{pz3}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_3	550	MPa
σ_{pz4}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_4	-550	MPa
$A_{t,pz}$	Tlačna površina betona	203,22	cm ²
$N_{Ed,pz}$	Uzdužna sila u stupu	345,08	kN
$x_{t,pz}$	Deformacija u težištu presjeka	$-3,30 \cdot 10^{-3}$	-
$z_{c,pz}$	Udaljenost težišta od težišta stupa	19,46	cm
M_{pz}	Moment savijanja s obzirom na težište	493,62	kNm
ϕ_{spz}	Zakrivljenost pri granici popuštanja armature	0,136	1/m

Tablica 43. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta stupa poz. IV/300

IV/300		
	granica popuštanja	nosivost plastičnog zgloba
M [kNm]	456,85	493,62
$\Theta = \phi \cdot 0,6 \cdot h$	0,002676	0,0408



Slika 40. Dijagram M - θ stup IV/300

4.5. Ostale grede

Poz. 215-215

- Karakteristike poprečnog presjeka

Tablica 44. Karakteristike poprečnog presjeka poz. 215-215

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
b	Širina grede	30	cm
h	Visina grede	50	cm
N_{ed}	Ekscentrična uzdužna tlačna sila koja djeluje na gredu	0	kN
Φ_1	Uzdužna armatura 1	16 ; 4	mm ; kom
Φ_2	Uzdužna armatura 2	14 ; 4	mm ; kom
Φ_3	Uzdužna armatura 3	20 ; 3	mm ; kom
Φ_w	Poprečna armatura	8	mm
c_{nom}	Zaštitni sloj betona	3,5	cm
d	Statička visina	43,7	cm
d_1	Visina od vlačnog ruba do težišta armature	6,35	cm
d_2	Visina od tlačnog ruba do težišta tlačne armature	5,3	cm
b_0	Minimalna širina ovijene betonske jezgre (do osi spona)	22,20	cm
h_0	Visina ovijene jezgre u gredi	42,20	cm
d_0	Statička visina ovijenog presjeka	39,80	cm

- Karakteristike armature

Tablica 45. Karakteristike armature poz. 215-215

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
A_{s1}	Armatura 1. red	14,20	cm ²
A_{s2}	Armatura 2. red	9,43	cm ²
A_w	Površina presjeka spona	0,50	cm ²
l_{wuk}	Ukupna duljina ovijajućih spona	1,32	m
s	Usvojeni razmak spona	12	cm
V_{ch}	Volumen ovijajućih spona	$6,64 \cdot 10^{-5}$	m ²
V_{cc}	Volumen betonskih jezgra	0,011	m ²
ω_{wm}	Koeficijent armiranja ovijajućim sponama u kritičnom području	0,085	-

- Proračun ovijenog betona

Tablica 46. Vrijednosti za proračun ovijenog betona poz. 215-215

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
n	Ukupan broj šipki bočno pridržan sponama	4	kom
α_{n1}	Koeficijenti ovisni o obliku poprečnog presjeka grede	0,333	-
α_{s1}		0,730	-
σ_2	Efektivno bočno tlačno naprezanje u GSN prema ograničenju deformacija	0,312	MPa
σ_2/f_{ck}	Omjer efektivnog bočnog tlačnog naprezanja i karakteristične čvrstoće betona	0,01	-
f_{ck}	Tlačna čvrstoća ovijenog betona	34,53	MPa
f_{cm}	Srednja tlačna čvrstoća ovijenog betona	43,74	MPa
f_{ctm}	Srednja vlačna čvrstoća ovijenog betona	3,18	MPa
E_{cm}	Sekantni modul elastičnosti betona	$3,43 \cdot 10^4$	MPa
ϵ_{c2c}	Deformacija pri granici parabole ovijenog betona	$2,65 \cdot 10^{-3}$	-
ϵ_{cu2c}	Deformacija pri tlačnoj čvrstoći ovijenog betona	$5,58 \cdot 10^{-3}$	-

- **Granica popuštanja armature ovijenog betona**

Tablica 47. Proračun za granicu popuštanja armature ovijenog betona poz. 215-215

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
ε_{sym}	Deformacija u armaturi pri srednjoj granici popuštanja	$2,75 \cdot 10^{-3}$	-
ε_{cym}	Pretpostavljena deformacija u betonu pri granici popuštanja	$-1,12 \cdot 10^{-3}$	-
$x_{t,y}$	Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba)	12,60	cm
$x_{no2,y}$	Udaljenost od armature do N.O.	31	cm
ξ_{sy}	Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže granicu popuštanja	0,29	-
$f_{t,y}$	Prosječno tlačno naprezanje u betonu	15,91	MPa
e_1	Nul-točka udaljenosti (armatura 1.red)	0	cm
e_2	Udaljenost 2. reda armature od nulte udaljenosti	38,35	cm
σ_{y1}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1	550	MPa
σ_{y2}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2	-130,38	MPa
$A_{t,y}$	Tlačna površina betona	379,49	cm ²
$N_{Ed,y}$	Uzdužna sila u gredi	0	kN
$x_{t,y}$	Deformacija u težištu presjeka	$-7,73 \cdot 10^{-3}$	-
$z_{c,y}$	Udaljenost težišta od težišta stupa	21,10	cm
z_1	Udaljenost 1. reda armature od težišta presjeka	18,70	cm
z_2	Udaljenost 2. reda armature od težišta presjeka	19,70	cm
M_y	Moment savijanja s obzirom na težište	308,54	kNm
ϕ_{sym}	Zakrivljenost pri granici popuštanja armature	$8,87 \cdot 10^{-3}$	1/m

- **Granična nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona**

Tablica 48. Proračun za graničnu nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona poz. 215-215

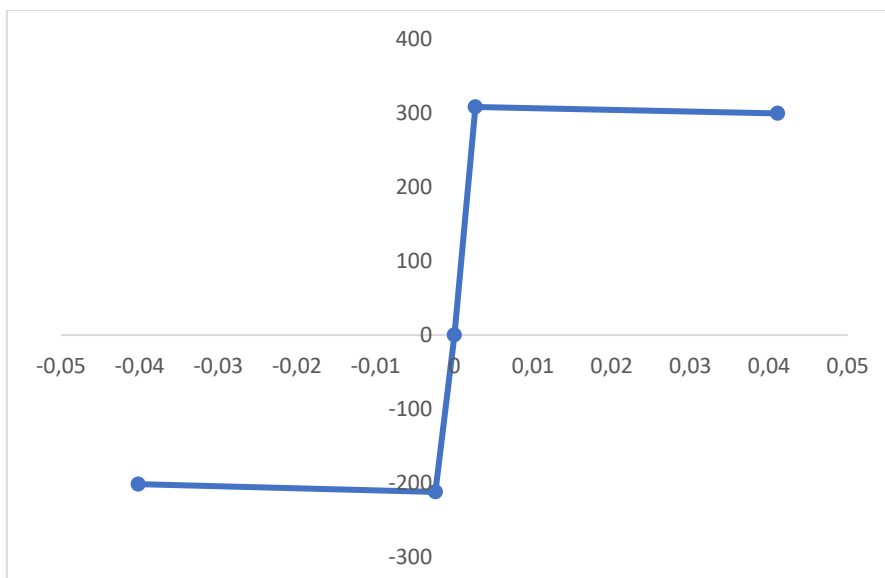
Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
$\varepsilon_{s,pz}$	Deformacija u armaturi pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	$50 \cdot 10^{-3}$	-
$\varepsilon_{c,pz}$	Pretpostavljena deformacija u betonu pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	$-4,31 \cdot 10^{-3}$	-
$x_{t,pz}$	Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba)	3,15	cm
$x_{no3,pz}$	Udaljenost od armature do N.O.	36,60	cm
$\xi_{s,pz}$	Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže graničnu nosivost plastičnog zgloba	0,079	-
$f_{t,pz}$	Prosječno tlačno naprezanje u betonu	34,77	MPa
σ_{pz1}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1	550	MPa
σ_{pz2}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2	-478,98	MPa
$A_{t,pz}$	Tlačna površina betona	94,59	cm ²
$N_{Ed,pz}$	Uzdužna sila u gredi	0	kN
$x_{t,pz}$	Deformacija u težištu presjeka	$-2,6 \cdot 10^{-3}$	-
$z_{c,pz}$	Udaljenost težišta od težišta stupa	19,85	cm
M_{pz}	Moment savijanja s obzirom na težište	299,89	kNm
ϕ_{spz}	Zakrivljenost pri granici popuštanja armature	0,137	1/m

Tablica 49. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 215-215

215-215		
	granica popuštanja	nosivost plastičnog zgloba
M [kNm]	308,54	299,89
$\Theta = \varnothing \cdot 0,6 \cdot h$	0,002661	0,0411

Tablica 50. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 215-215 – zamijenjena uzdužna armatura

215-215 – zamijenjena armatura		
	granica popuštanja	nosivost plastičnog zgloba
M [kNm]	-212,17	-201,63
$\Theta = \varnothing \cdot 0,6 \cdot h$	-0,002415	-0,0402



Slika 41. Dijagram M – θ greda 215-215

Poz. 311-311 (vanjski oslonac)

- Karakteristike poprečnog presjeka

Tablica 51. Karakteristike poprečnog presjeka poz. 311-311(vanjski oslonac)

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
b	Širina grede	30	cm
h	Visina grede	50	cm
N_{Ed}	Ekscentrična uzdužna tlačna sila koja djeluje na gredu	0	kN
Φ_1	Uzdužna armatura 1	16 ; 5	mm
Φ_2	Uzdužna armatura 2	16 ; 3	mm
Φ_w	Poprečna armatura	8	mm
c_{nom}	Zaštitni sloj betona	3,5	cm
d	Statička visina	43,7	cm
d_1	Visina od vlačnog ruba do težišta armature	6,35	cm
d_2	Visina od tlačnog ruba do težišta tlačne armature	5,3	cm
b_0	Minimalna širina ovijene betonske jezgre (do osi spona)	22,20	cm
h_0	Visina ovijene jezgre u gredi	42,20	cm
d_0	Statička visina ovijenog presjeka	39,80	cm

- Karakteristike armature

Tablica 52. Karakteristike armature poz. 311-311(vanjski oslonac)

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
A_{s1}	Armatura 1. red	10,05	cm ²
A_{s2}	Armatura 2. red	6,03	cm ²
A_w	Površina presjeka spona	0,50	cm ²
l_{wuk}	Ukupna duljina ovijajućih spona	1,32	m
s	Usvojeni razmak spona	12	cm
V_{ch}	Volumen ovijajućih spona	$6,64 \cdot 10^{-5}$	m ²
V_{cc}	Volumen betonskih jezgra	0,011	m ²
ω_{wm}	Koeficijent armiranja ovijajućim sponama u kritičnom području	0,085	-

- Proračun ovijenog betona

Tablica 53. Vrijednosti za proračun ovijenog betona poz. 311-311(vanjski oslonac)

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
n	Ukupan broj šipki bočno pridržan sponama	4	kom
α_{n1}	Koeficijenti ovisni o obliku poprečnog presjeka grede	0,333	-
α_{s1}		0,73	-
σ_2	Efektivno bočno tlačno naprezanje u GSN prema ograničenju deformacija	0,312	MPa
σ_2/f_{ck}	Omjer efektivnog bočnog tlačnog naprezanja i karakteristične čvrstoće betona	0,01	-
f_{ckc}	Tlačna čvrstoća ovijenog betona	34,53	MPa
f_{cmc}	Srednja tlačna čvrstoća ovijenog betona	43,74	MPa
f_{ctmc}	Srednja vlačna čvrstoća ovijenog betona	3,18	MPa
E_{cmc}	Sekantni modul elastičnosti betona	$3,43 \cdot 10^4$	MPa
ϵ_{c2c}	Deformacija pri granici parabole ovijenog betona	$2,65 \cdot 10^{-3}$	-
ϵ_{cu2c}	Deformacija pri tlačnoj čvrstoći ovijenog betona	$5,58 \cdot 10^{-3}$	-

- **Granica popuštanja armature ovijenog betona**

Tablica 54. Proračun za granicu popuštanja armature ovijenog betona poz. 311-311 (vanjski oslonac)

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
ε_{sym}	Deformacija u armaturi pri srednjoj granici popuštanja	$2,75 \cdot 10^{-3}$	-
ε_{cym}	Pretpostavljena deformacija u betonu pri granici popuštanja	$-0,91 \cdot 10^{-3}$	-
$x_{t,y}$	Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba)	11,18	cm
$x_{no2,y}$	Udaljenost od armature do N.O.	33,70	cm
ξ_{sy}	Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže granicu popuštanja	0,249	-
$f_{t,y}$	Prosječno tlačno naprezanje u betonu	13,33	MPa
e_1	Nul-točka udaljenosti (armatura 1.red)	0	cm
e_2	Udaljenost 2. reda armature od nulte udaljenosti	39,8	cm
σ_{y1}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1	550	MPa
σ_{y2}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2	-99,3	MPa
$A_{t,y}$	Tlačna površina betona	335,60	cm ²
$N_{Ed,y}$	Uzdužna sila u gredi	0	kN
$x_{t,y}$	Deformacija u težištu presjeka	$-6,32 \cdot 10^{-3}$	-
$z_{c,y}$	Udaljenost težišta od težišta stupa	21,60	cm
z_1	Udaljenost 1. reda armature od težišta presjeka	-19,9	cm
z_2	Udaljenost 2. reda armature od težišta presjeka	19,9	cm
M_y	Moment savijanja s obzirom na težište	228,42	kNm
ϕ_{sym}	Zakrivljenost pri granici popuštanja armature	$8,16 \cdot 10^{-3}$	1/m

- **Granična nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona**

Tablica 55. Proračun za graničnu nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona poz. 311-311 (vanjski oslonac)

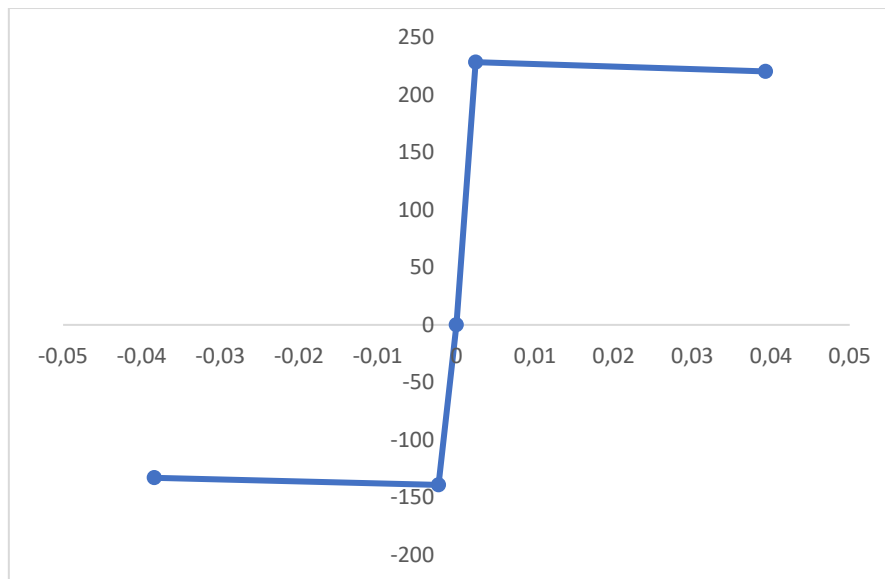
Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
$\varepsilon_{s,pz}$	Deformacija u armaturi pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	$50 \cdot 10^{-3}$	-
$\varepsilon_{c,pz}$	Pretpostavljena deformacija u betonu pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	$-3,76 \cdot 10^{-3}$	-
$x_{t,pz}$	Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba)	2,87	cm
$x_{no3,pz}$	Udaljenost od armature do N.O.	38,13	cm
$\xi_{s,pz}$	Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže graničnu nosivost plastičnog zgloba	0,07	-
$f_{t,pz}$	Prosječno tlačno naprezanje u betonu	33,48	MPa
σ_{pz1}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1	550	MPa
σ_{pz2}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2	-438,78	MPa
$A_{t,pz}$	Tlačna površina betona	86,13	cm ²
$N_{Ed,pz}$	Uzdužna sila u gredi	0	kN
$x_{t,pz}$	Deformacija u težištu presjeka	$-2,33 \cdot 10^{-3}$	-
$z_{c,pz}$	Udaljenost težišta od težišta stupa	20	cm
M_{pz}	Moment savijanja s obzirom na težište	220,31	kNm
ϕ_{spz}	Zakrivljenost pri granici popuštanja armature	0,131	1/m

Tablica 56. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 311-311 (vanjski oslonac)

311-311 (vanjski oslonac)		
	granica popuštanja	nosivost plastičnog zgloba
M [kNm]	228,42	220,31
$\Theta = \varnothing \cdot 0,6 \cdot h$	0,002448	0,0393

Tablica 57. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 311-311 (vanjski oslonac) – zamijenjena uzdužna armatura

311-311 (vanjski oslonac) – zamijenjena armatura		
	granica popuštanja	nosivost plastičnog zgloba
M [kNm]	-139,15	-132,94
$\Theta = \varnothing \cdot 0,6 \cdot h$	-0,002268	-0,0384



Slika 42. Dijagram M – θ greda 311-311 (vanjski oslonac)

Poz. 311-311 (unutarnji oslonac)

- Karakteristike poprečnog presjeka

Tablica 58. Karakteristike poprečnog presjeka poz. 311-311 (unutarnji oslonac)

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
b	Širina grede	30	cm
h	Visina grede	50	cm
N_{Ed}	Ekscentrična uzdužna tlačna sila koja djeluje na gredu	0	kN
Φ_1	Uzdužna armatura 1	16 ; 6	mm
Φ_2	Uzdužna armatura 2	16 ; 4	mm
Φ_w	Poprečna armatura	8	mm
c_{nom}	Zaštitni sloj betona	3,5	cm
d	Statička visina	44,9	cm
d_1	Visina od vlačnog ruba do težišta armature	5,10	cm
d_2	Visina od tlačnog ruba do težišta tlačne armature	5,10	cm
b_0	Minimalna širina ovijene betonske jezgre (do osi spona)	22,20	cm
h_0	Visina ovijene jezgre u gredi	42,20	cm
d_0	Statička visina ovijenog presjeka	41	cm

- Karakteristike armature

Tablica 59. Karakteristike armature poz. 311-311(unutarnji oslonac)

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
A_{s1}	Armatura 1. red	12,06	cm ²
A_{s2}	Armatura 2. red	8,04	cm ²
A_w	Površina presjeka spona	0,5	cm ²
l_{wuk}	Ukupna duljina ovijajućih spona	1,32	m
s	Usvojeni razmak spona	12	cm
V_{ch}	Volumen ovijajućih spona	$6,64 \cdot 10^{-5}$	m ³
V_{cc}	Volumen betonskih jezgra	0,011	m ³
ω_{wm}	Koeficijent armiranja ovijajućim sponama u kritičnom području	0,085	-

- Proračun ovijenog betona

Tablica 60. Vrijednosti za proračun ovijenog betona poz. 311-311(unutarnji oslonac)

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
n	Ukupan broj šipki bočno pridržan sponama	4	kom
α_{n1}	Koeficijenti ovisni o obliku poprečnog presjeka grede	0,333	-
α_{s1}		0,73	-
σ_2	Efektivno bočno tlačno naprezanje u GSN prema ograničenju deformacija	0,31	MPa
σ_2/f_{ck}	Omjer efektivnog bočnog tlačnog naprezanja i karakteristične čvrstoće betona	0,01	-
f_{ckc}	Tlačna čvrstoća ovijenog betona	34,53	MPa
f_{cmc}	Srednja tlačna čvrstoća ovijenog betona	43,74	MPa
f_{ctmc}	Srednja vlačna čvrstoća ovijenog betona	3,18	MPa
E_{cmc}	Sekantni modul elastičnosti betona	$3,43 \cdot 10^4$	MPa
ϵ_{c2c}	Deformacija pri granici parabole ovijenog betona	$2,65 \cdot 10^{-3}$	-
ϵ_{cu2c}	Deformacija pri tlačnoj čvrstoći ovijenog betona	$5,58 \cdot 10^{-3}$	-

- **Granica popuštanja armature ovijenog betona**

Tablica 61. Proračun za granicu popuštanja armature ovijenog betona poz. 311-311 (unutarnji oslonac)

Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
ϵ_{sym}	Deformacija u armaturi pri srednjoj granici popuštanja	$2,75 \cdot 10^{-3}$	-
ϵ_{cym}	Pretpostavljena deformacija u betonu pri granici popuštanja	$-1,002 \cdot 10^{-3}$	-
$x_{t,y}$	Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba)	0,12	cm
$x_{no2,y}$	Udaljenost od armature do N.O.	0,329	cm
ξ_{sy}	Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže granicu popuštanja	0,267	-
$f_{t,y}$	Prosječno tlačno naprezanje u betonu	14,46	MPa
e_1	Nul-točka udaljenosti (armatura 1.red)	0	cm
e_2	Udaljenost 2. reda armature od nulte udaljenosti	39,8	cm
σ_{y1}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1	550	MPa
σ_{y2}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2	-115,79	MPa
$A_{t,y}$	Tlačna površina betona	359,75	cm ²
$N_{Ed,y}$	Uzdužna sila u gredi	0	kN
$x_{t,y}$	Deformacija u težištu presjeka	$-6,93 \cdot 10^{-4}$	-
$z_{c,y}$	Udaljenost težišta od težišta stupa	21,30	cm
z_1	Udaljenost 1. reda armature od težišta presjeka	-19,90	cm
z_2	Udaljenost 2. reda armature od težišta presjeka	19,90	cm
M_y	Moment savijanja s obzirom na težište	272,02	kNm
ϕ_{sym}	Zakrivljenost pri granici popuštanja armature	$8,36 \cdot 10^{-3}$	1/m

- **Granična nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona**

Tablica 62. Proračun za graničnu nosivost plastičnog zgloba ovijenog betona poz. 311-311 (unutarnji oslonac)

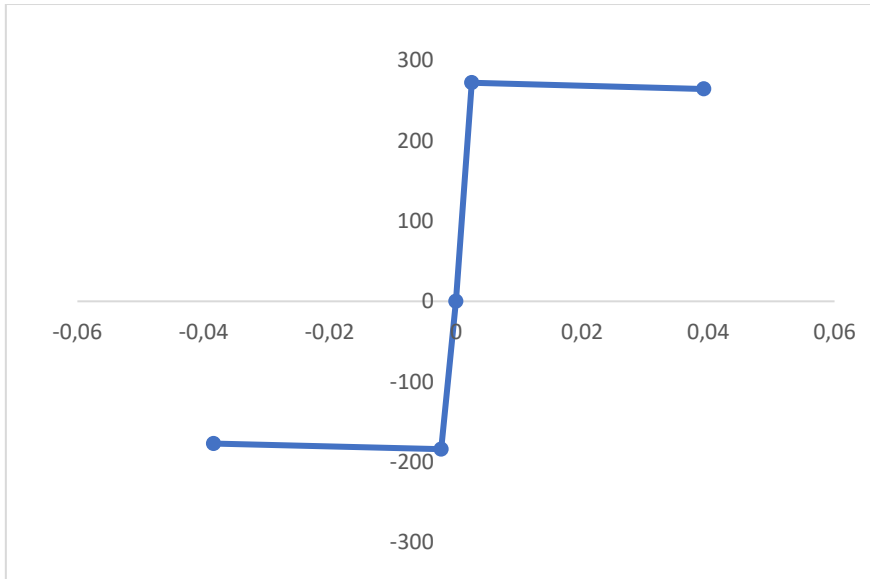
Oznaka	Opis	Količina	Mjerna jedinica
$\varepsilon_{s,pz}$	Deformacija u armaturi pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	$50 \cdot 10^{-3}$	-
$\varepsilon_{c,pz}$	Pretpostavljena deformacija u betonu pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba	$-3,86 \cdot 10^{-3}$	-
$x_{t,pz}$	Duljina tlačnog područja u betonu (od N.O. do tlačnog ruba)	2,94	cm
$x_{no3,pz}$	Udaljenost od armature do N.O.	38,06	cm
$\xi_{s,pz}$	Koeficijent položaja N.O. kada naprezanje u čeliku dostiže graničnu nosivost plastičnog zgloba	0,072	-
$f_{t,pz}$	Prosječno tlačno naprezanje u betonu	33,71	MPa
σ_{pz1}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_1	550	MPa
σ_{pz2}	Naprezanje u armaturi na udaljenosti e_2	-455,75	MPa
$A_{t,pz}$	Tlačna površina betona	88,05	cm ²
$N_{Ed,pz}$	Uzdužna sila u gredi	0	kN
$x_{t,pz}$	Deformacija u težištu presjeka	$-2,37 \cdot 10^{-3}$	-
$z_{c,pz}$	Udaljenost težišta od težišta stupa	19,97	cm
M_{pz}	Moment savijanja s obzirom na težište	264,26	kNm
ϕ_{spz}	Zakrivljenost pri granici popuštanja armature	0,131	1/m

Tablica 63. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 311-311 (unutarnji oslonac)

311-311 (unutarnji oslonac)		
	granica popuštanja	nosivost plastičnog zgloba
M [kNm]	272,02	264,26
$\Theta = \varnothing \cdot 0,6 \cdot h$	0,002508	0,0393

Tablica 64. Vrijednosti momenta savijanja i kuteva zaokreta grede poz. 311-311 (unutarnji oslonac) – zamijenjena uzdužna armatura

311-311 (unutarnji oslonac) – zamijenjena armatura		
	granica popuštanja	nosivost plastičnog zgloba
M [kNm]	-184,02	-177,08
$\Theta = \varnothing \cdot 0,6 \cdot h$	-0,002337	-0,0384



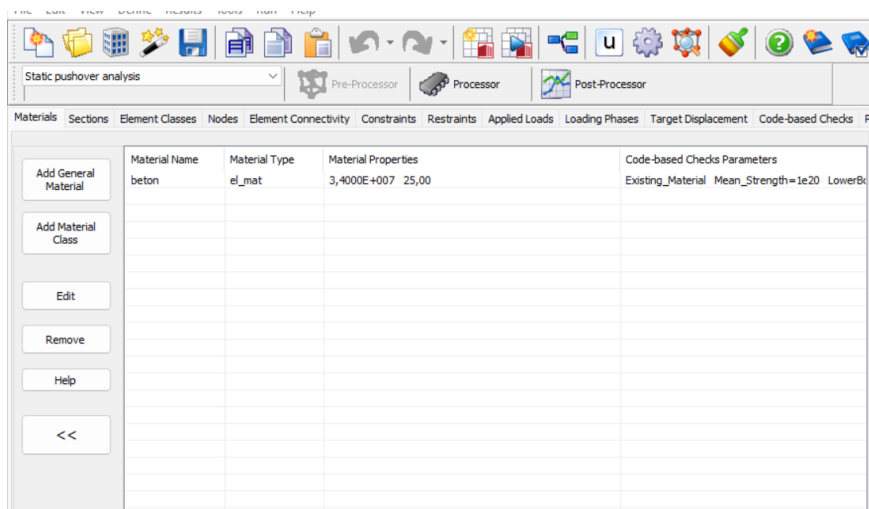
Slika 43. Dijagram $M - \theta$ gređa 311-311 (unutarnji oslonac)

5. PRIMJENA METODE POSTUPNOG GURANJA NA VIŠEKATNI OKVIR

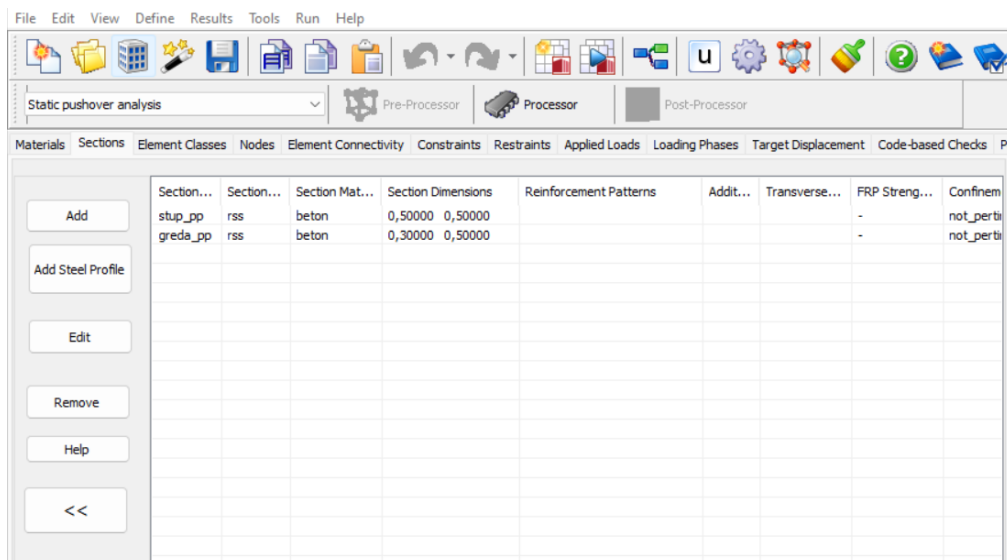
Za primjenu metode postupnog guranja okvir je modeliran u programskom paketu SeismoStruct. SeismoStruct je paket koji može predvidjeti ponašanje prostornih ili ravninskih okvira pod statičkim ili dinamičkim opterećenjem, uzimajući u obzir i geometrijske nelinearnosti i neelastičnost materijala. U nastavku je prikazan postupak zadavanja ulaznih podataka i parametara, te dobiveni rezultati primjene metode postupnog guranja.

5.1. Ulazni podaci

Za početak, potrebno je definirati materijal: beton sa specifičnom težinom 25 kN/m^3 te s modulom elastičnosti 34 GPa (slika 44). Poprečne presjeke za grede i stupove te njihove dimenzije definiraju se u kartici „Sections“ (slika 45).

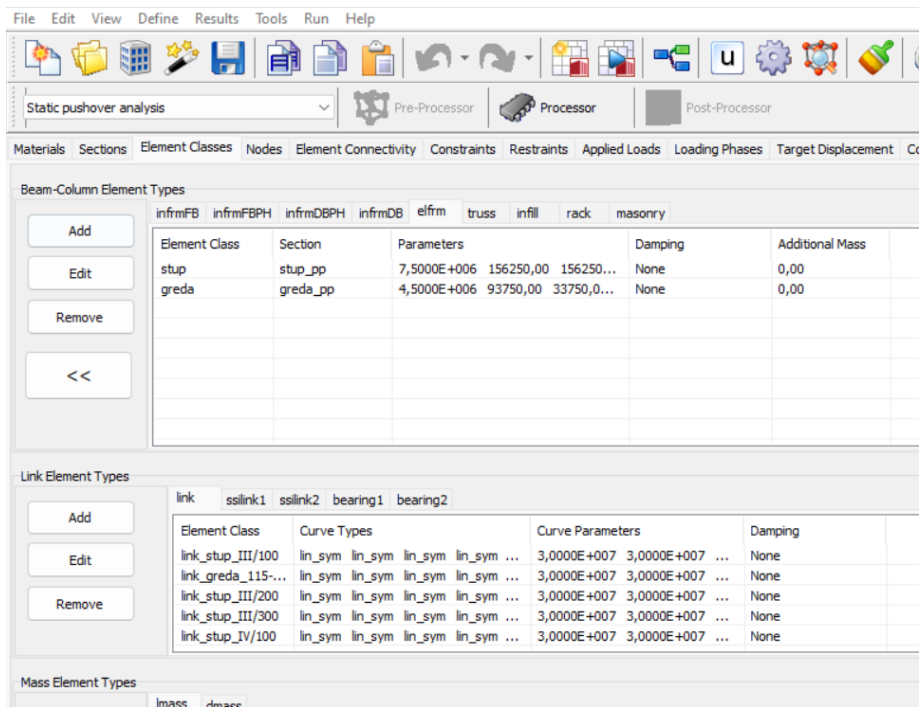


Slika 44. Seismostruct – kartica „Materials“

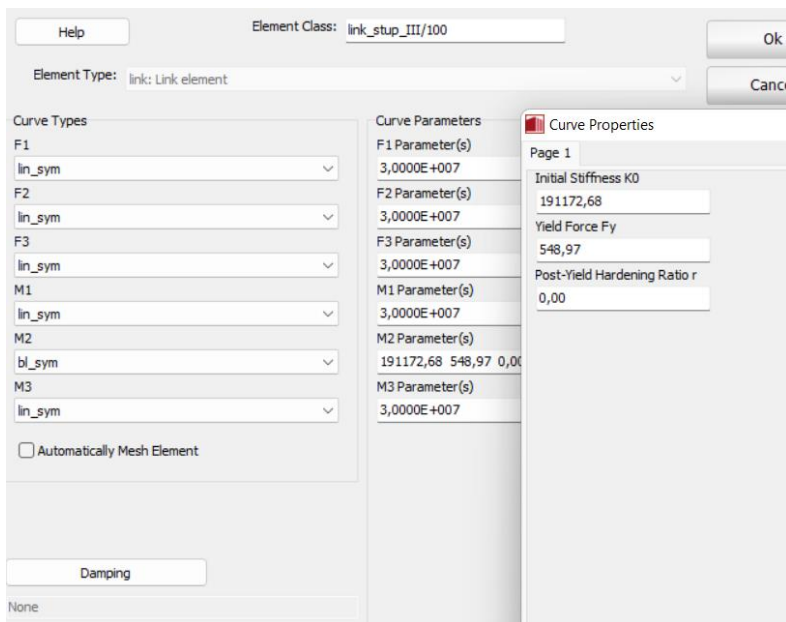


Slika 45. SeismoStruct – kartica „Sections“

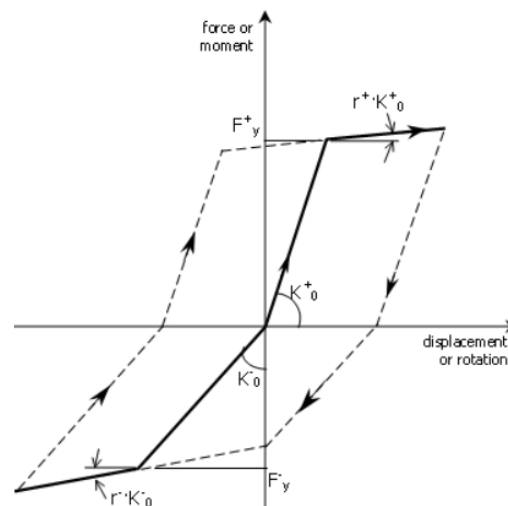
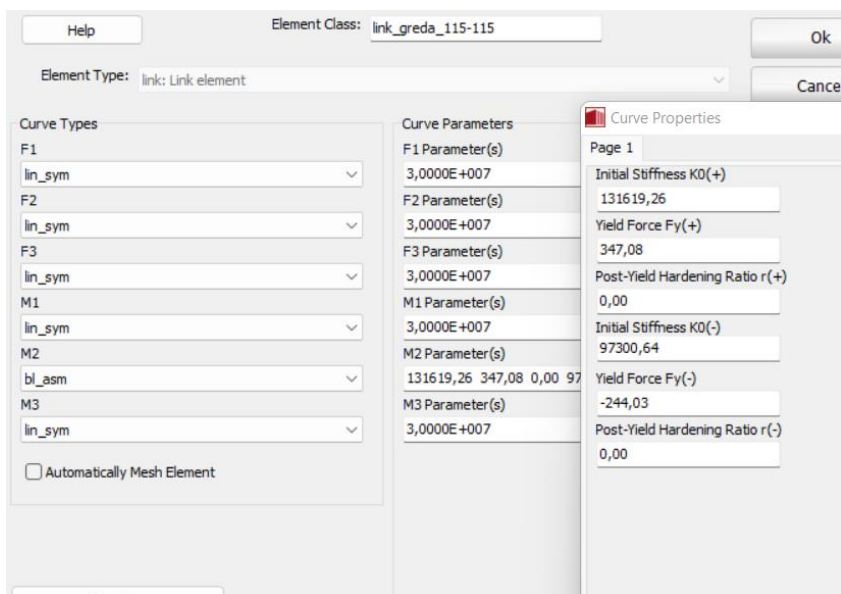
Nadalje, u kartici „Element classes“ definirani su stupovi i grede kao elastični elementi okvira (engl. Elastic frame elements – elfrm), a plastični zglobovi kao „link“ elementi (Slika 46). Svaki prethodno proračunati plastični zglob i pripadajući dijagram moment savijanja – kut zaokreta poseban je „link“ element. Za $M-\theta$ dijagrame stupova zadana je bilinearna simetrična krivulja (engl. bilinear symmetric curve - bl_sym), dok se za dijagrame greda zadala bilinearna nesimetrična krivulja (engl. bilinear asymmetric curve - bl_asm). Ove krivulje određuju 3 parametara: Početna krutost K_0 , moment savijanja pri granici popuštanja M_y i koeficijent r . Početnu krutost K_0 dobije se iz omjera momenta savijanja te kuta zaokreta pri granici popuštanja. U nekim slučajevima moment savijanja pri granici popuštanja je veći nego moment savijanja pri graničnoj nosivosti plastičnog zgloba, što u programskom paketu SeismoStruct nije moguće zadati. To proizlazi iz činjenice da nije moguće zadati negativni koeficijent r , pa se u takvim slučajevima on uzima jednak 0. Na slici 47 prikazan je primjer parametara i prikaz funkcije $M-\theta$ za stup, dok je na slici 48 prikazan primjer parametara i prikaz funkcije $M-\theta$ za grede.



Slika 46. SeismoStruct – kartica „Element classes“



Slika 47. Link element - Parametri i bilinearna simetrična krivulja za stup poz. III/100 [10]



Slika 48. Link element - Parametri i bilinearna nesimetrična krivulja za gredu poz. 115-115 [10]

U kartici „Nodes“ definiraju se točke modela sa njihovim x,y i z koordinatama (Slika 49). Brojevima od 1 do 12 označene su čvorovi čijim spajanjem definiramo elemente okvira (grede i stupove), a točkama kod kojih uz broj stoji i smjer (gore, dolje, lijevo, desno) definiramo link elemente.

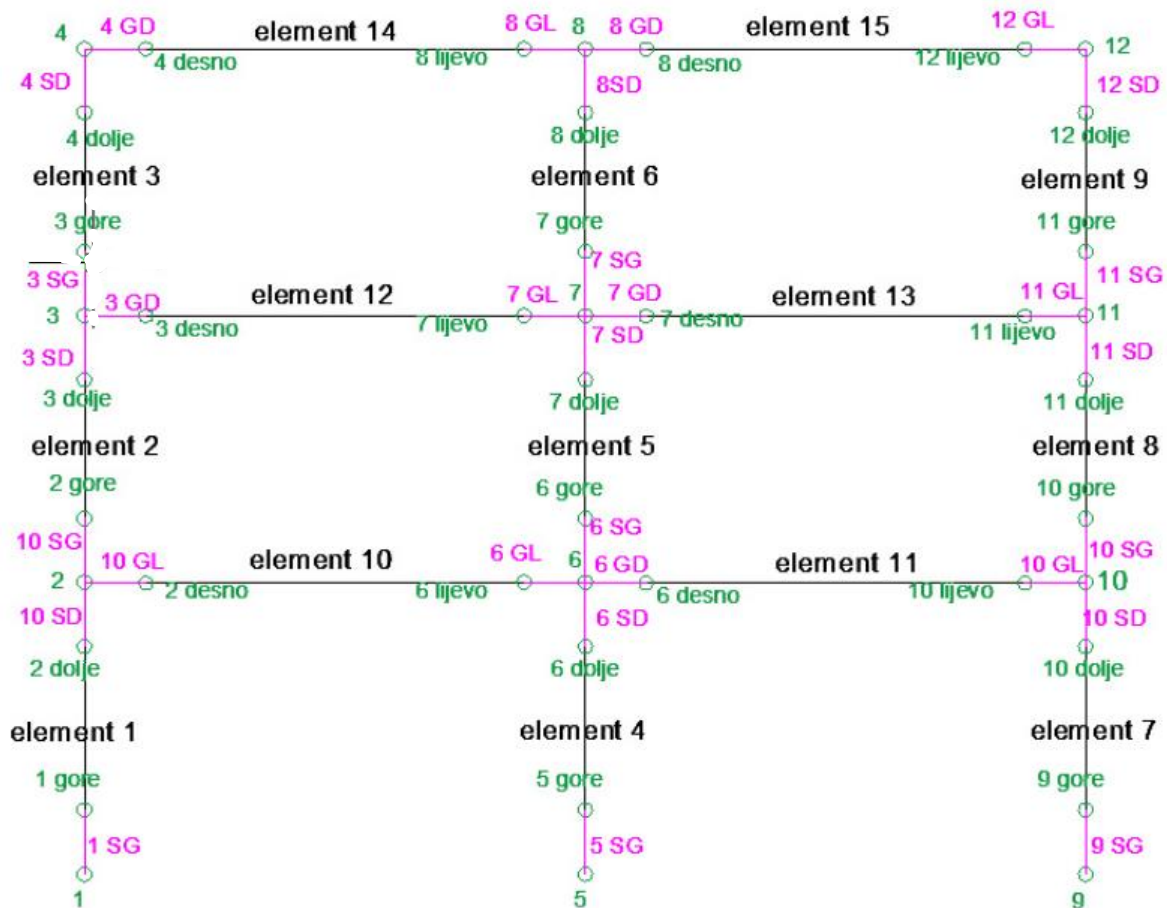
Node Name	X	Y	Z	Type
12lijevo	12,00000	0,00000	9,90000	structural
1gore	0,00000	0,00000	0,00000	structural
2	0,00000	0,00000	3,50000	structural
12	12,00000	0,00000	9,90000	structural
2desno	0,00000	0,00000	3,50000	structural
2dolje	0,00000	0,00000	3,50000	structural
2gore	0,00000	0,00000	3,50000	structural
3	0,00000	0,00000	6,70000	structural
3desno	0,00000	0,00000	6,70000	structural
3dolje	0,00000	0,00000	6,70000	structural
3gore	0,00000	0,00000	6,70000	structural
4	0,00000	0,00000	9,90000	structural
4desno	0,00000	0,00000	9,90000	structural
4dolje	0,00000	0,00000	9,90000	structural
5	6,00000	0,00000	0,00000	structural
5gore	6,00000	0,00000	0,00000	structural
6	6,00000	0,00000	3,50000	structural
6desno	6,00000	0,00000	3,50000	structural
6dolje	6,00000	0,00000	3,50000	structural
6gore	6,00000	0,00000	3,50000	structural
6lijevo	6,00000	0,00000	3,50000	structural
nonstr 1	15,00000	0,00000	15,00000	non-structural
7	6,00000	0,00000	6,70000	structural
7desno	6,00000	0,00000	6,70000	structural
7dolje	6,00000	0,00000	6,70000	structural
7gore	6,00000	0,00000	6,70000	structural
7lijevo	6,00000	0,00000	6,70000	structural
8	6,00000	0,00000	9,90000	structural
8desno	6,00000	0,00000	9,90000	structural
8dolje	6,00000	0,00000	9,90000	structural
8lijevo	6,00000	0,00000	9,90000	structural
9	12,00000	0,00000	0,00000	structural
9gore	12,00000	0,00000	0,00000	structural

Slika 49. SeismoStruct – kartica „Nodes“

Za definiranje elemenata okvira te link elemenata koristi se kartica “Element Connectivity” (Slika 50). Njihove oznake i pozicije na modelu okvirne konstrukcije prikazani su na slici 51. Zelenom bojom prikazane su točke, rozom bojom linkovi, a crnom bojom grede i stupovi. Nazivi linkova koncipirani su na način da broj označava čvor linka, prvo slovo označava je li riječ o stupu ili gredi, dok drugo slovo govori o smjeru linka (npr. 2SD – čvor 2, stup, dolje)

Element Name	Element Class	Node name(s)	Rigid Offsets	Force/Moment Releases	Activation Time/L.F.
element1	stup	1gore 2dolje deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element2	stup	2gore 3dolje deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element3	stup	3gore 4dolje deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element4	stup	5gore 6dolje deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element5	stup	6gore 7dolje deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element6	stup	7gore 8dolje deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element7	stup	9gore 10dolje deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element8	stup	10gore 11dolje deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element9	stup	11gore 12dolje deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element10	greda	2desno 6lijevo deg=0,00	0,55 0,00...		-1e20 1e20
element11	greda	6desno 10lijevo deg=0,00	0,55 0,00...		-1e20 1e20
element12	greda	3desno 7lijevo deg=0,00	0,55 0,00...		-1e20 1e20
element13	greda	7desno 11lijevo deg=0,00	0,55 0,00...		-1e20 1e20
element14	greda	4desno 8lijevo deg=0,00	0,55 0,00...		-1e20 1e20
element15	greda	8desno 12lijevo deg=0,00	0,55 0,00...		-1e20 1e20
2SD	link_stup_I...	2 2dolje 1 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
2GD	link_greda...	2 2desno 6 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
2SG	link_stup_I...	2 2gore 3 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
6SD	link_stup_I...	6 6dolje 5 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
6GD	link_greda...	6 6desno 10 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
6SG	link_stup_I...	6 6gore 7 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
6GL	link_greda...	6 6lijevo 2 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
10SD	link_stup_I...	10 10dolje 9 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
10SG	link_stup_I...	10 10gore 11 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
10GL	link_greda...	10 10lijevo 6 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
3SD	link_stup_I...	3 3dolje 2 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
3GD	link_greda...	3 3desno 7 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
3SG	link_stup_I...	3 3gore 4 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
7SD	link_stup_I...	7 7dolje 6 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
7GD	link_greda...	7 7desno 11 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
7SG	link_stup_I...	7 7gore 8 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
7GL	link_greda...	7 7lijevo 3 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
11SD	link_stup_I...	11 11dolje 10 nonstr1	-	-	-1e20 1e20
11SG	link_stup_I...	11 11gore 12 nonstr1	-	-	-1e20 1e20

Slika 50. SeismoStruct – kartica „Element Connectivity“



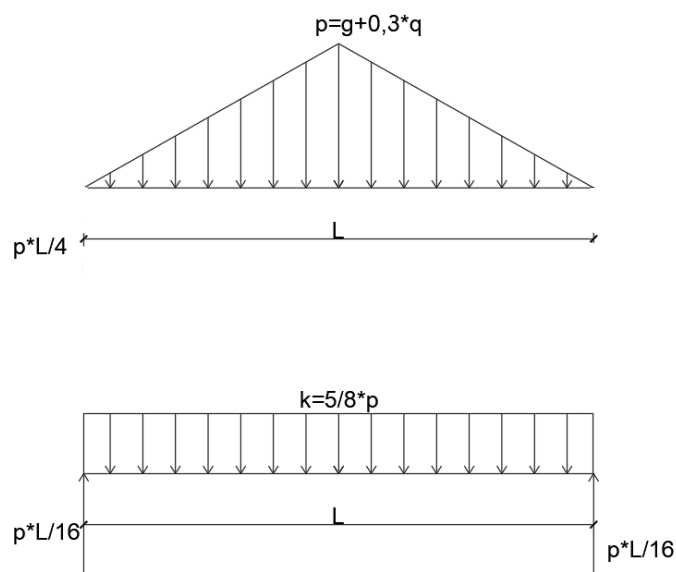
Slika 51. Model višekatnog okvira

Opterećenja koja djeluju na konstrukciju unose se u kartici „Applied loads“ (Slika 52). S obzirom da u SeismoStruct-u nije moguće unijeti trokutno opterećenje, izvedena je zamjena trokutnog opterećenja u jednoliko kontinuirano opterećenje koje je prikazano na Slici 53. Pritom je kako bi se dobile iste vrijednosti poprečnih sila kao za izvorno opterećenje potrebno na osloncima oduzeti silu u iznosu od $P \cdot L/16$, gdje je P vrijednost trokutnog opterećenja. Po visini zgrade zadana je trokutna raspodjela bočnih sila od 10, 20 i 30 kN.

Applied Loads						
Nodal Loads						
Category	Node Name	Direction	Type	Value	Curve Nam	
Permanent Load	11	z	force	-117,43		
Permanent Load	7	z	force	-161,96		
Permanent Load	10	z	force	-117,43		
Permanent Load	2	z	force	-117,43		
Permanent Load	6	z	force	-161,96		
Incremental Load	2	x	force	10,00		
Incremental Load	3	x	force	20,00		
Incremental Load	4	x	force	30,00		

Element Loads						
Category	Element Name	Direction	Type	Value		
Permanent Load	element10	z	force	-30,49		
Permanent Load	element11	z	force	-30,49		
Permanent Load	element12	z	force	-30,49		
Permanent Load	element13	z	force	-30,49		
Permanent Load	element14	z	force	-38,93		
Permanent Load	element15	z	force	-38,93		

Slika 52. Seismostruct – kartica „Applied Loads“



Slika 53. Transformacija trokutastog u pravokutni sustav opterećenja

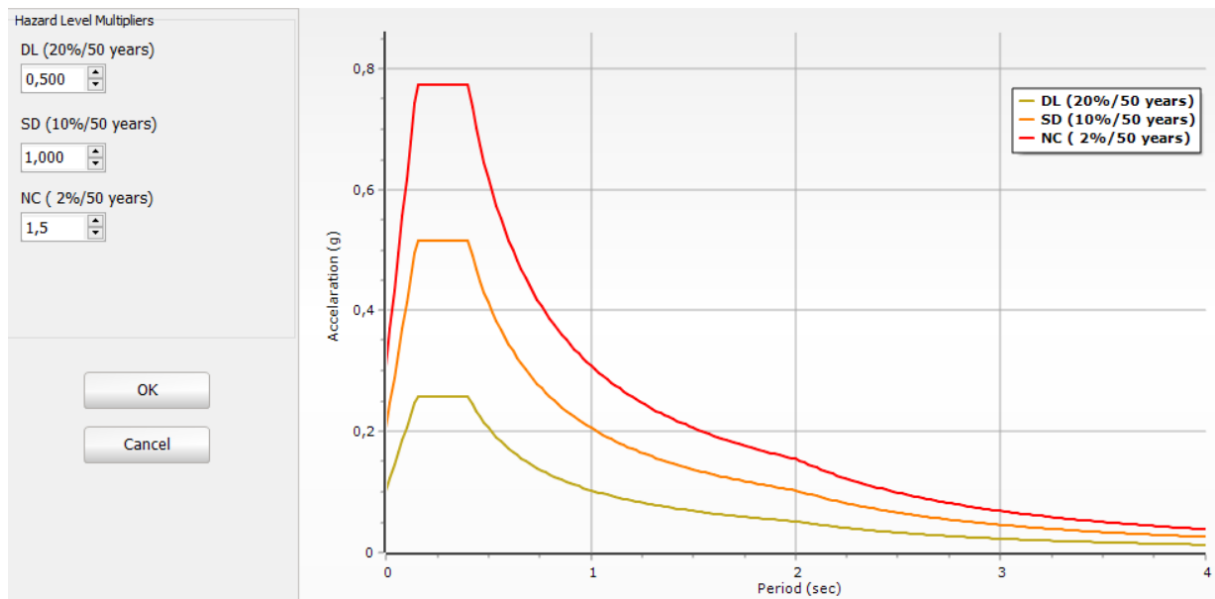
Prema HRN EN 1998-3: 2011 [9], temeljni zahtjevi u odnosu na stanje oštećenja konstrukcije, opisani su trima граниčnim stanjima: граниčnim stanjem ograničenog oštećenja (OO), граниčnim stanjem znatnog oštećenja (ZO) i граниčnim stanjem blizu rušenja (BR).

Kod graničnog stanja ograničenog oštećenja, skraćeno OO, (engl. Damage limitation – DL) na konstrukciji dolazi samo do laganog oštećenja, a njezini elementi su zadržali svoju čvrstoću i krutost. Pomaci su zanemarivi te nema potrebe za popravcima konstrukcije.

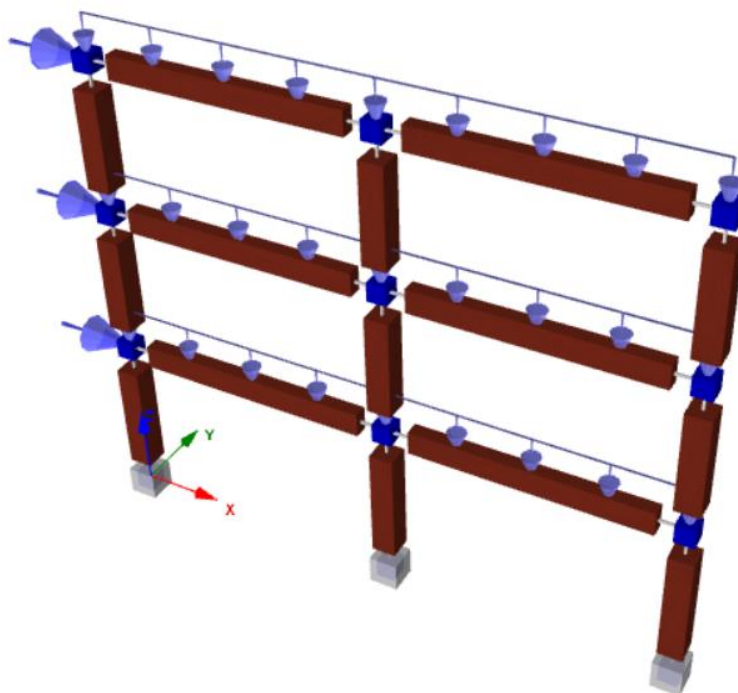
Granično stanje znatnog oštećenja, skraćeno ZO, (engl. Significant damage – SD) je stanje kod kojeg dolazi do znatnog oštećenja konstrukcije. Konstrukcija može izdržati naknadni udar umjerenoga intenziteta, a popravak konstrukcije bio bi neekonomičan.

Kod graničnog stanja blizu rušenja ZO (engl. Near collapse – NC) - konstrukcija je teško oštećena s malom preostalom bočnom čvrstoćom i krutošću iako vertikalni elementi još mogu nositi vertikalna opterećenja. Postoje veliki trajni pomaci, te konstrukcija ne bi izdržala još jedan potres.

Na slici 54 prikazani su elastični spektri ubrzanja za granično stanje ograničenog oštećenja (OO), znatnog oštećenja (ZO) i graničnim stanjem blizu rušenja (BR) definirani u SeismoStructu. Vršno ubrzanje temeljnog tla a_{gr} iznosi 0,206g, dok je faktor važnosti γ_1 jednak 1. Kao kontrolni čvor odabran je čvor br. 8 koji se nalazi na vrhu konstrukcije. Također, određeno je da se metoda postupnog guranja provodi u 50 koraka postupnog povećavanja bočne sile. Na slici 55 prikazan je ravninski (2D) model konstrukcije u SeismoStructu.



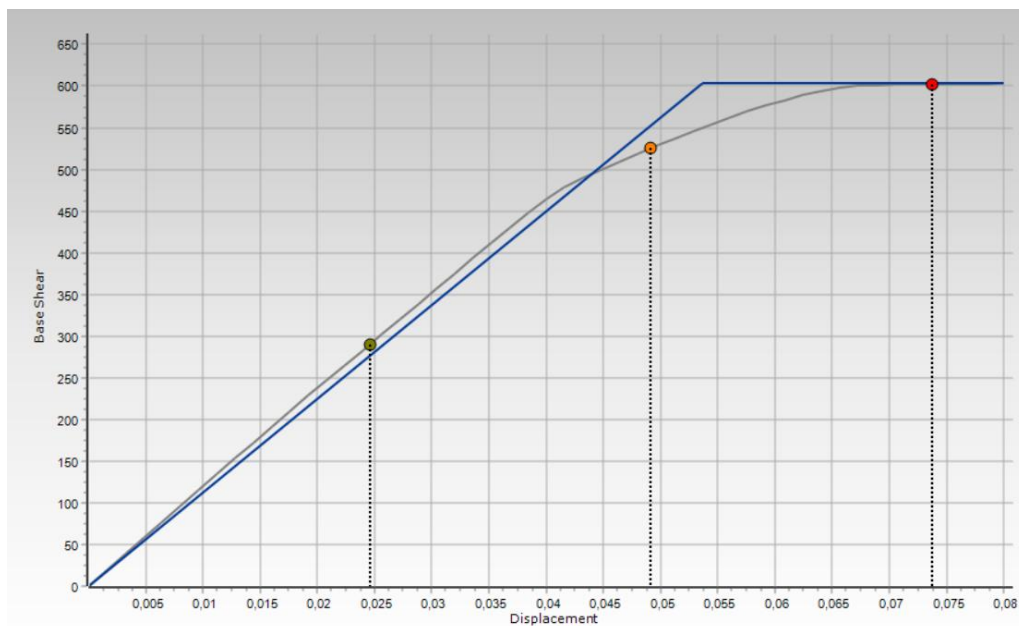
Slika 54. Seismostruct – elastični spektri ubrzanja za pojedino granično stanje



Slika 55. SeismoStruct - ravninski model konstrukcije

5.2. Prikaz rezultata

Nakon unosa ulaznih podataka, provedena je metoda postupnog guranja na zadanu konstrukciju. Na slici 56 prikazana je dobivena krivulja sposobnosti nosivosti sa 3 točke koje označavaju granična stanja (s lijeva na desno: OO, ZO, BR), dok su na slici 57 prikazane vrijednosti ciljanog pomaka za pojedino granično stanje. Poprečna sila u podnožju iznosi 602,8 kN.

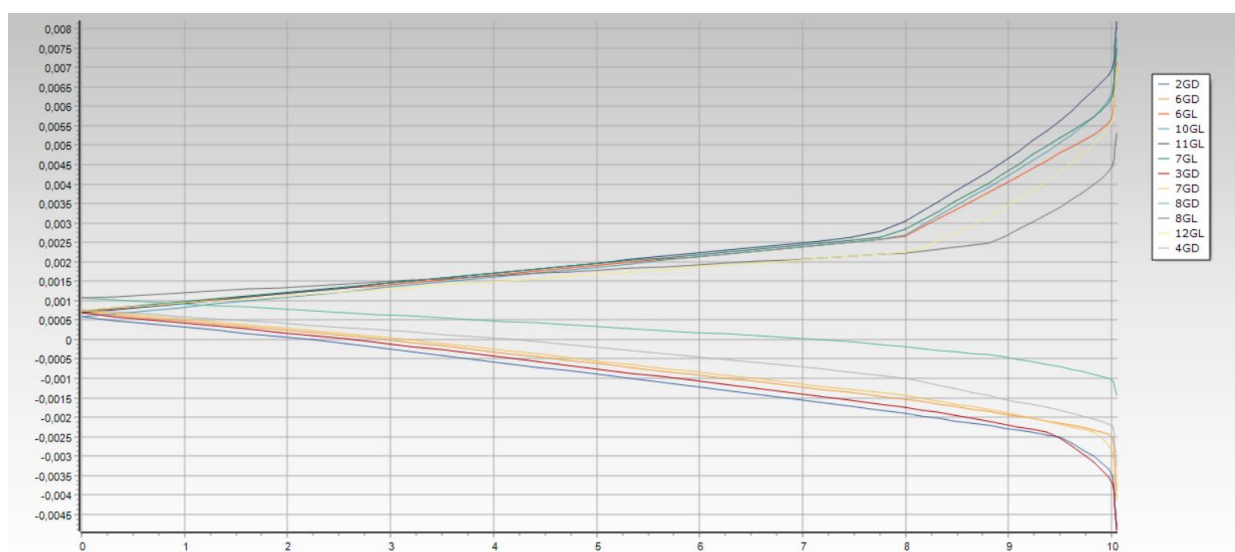


Slika 56. Krivulja sposobnosti nosivosti

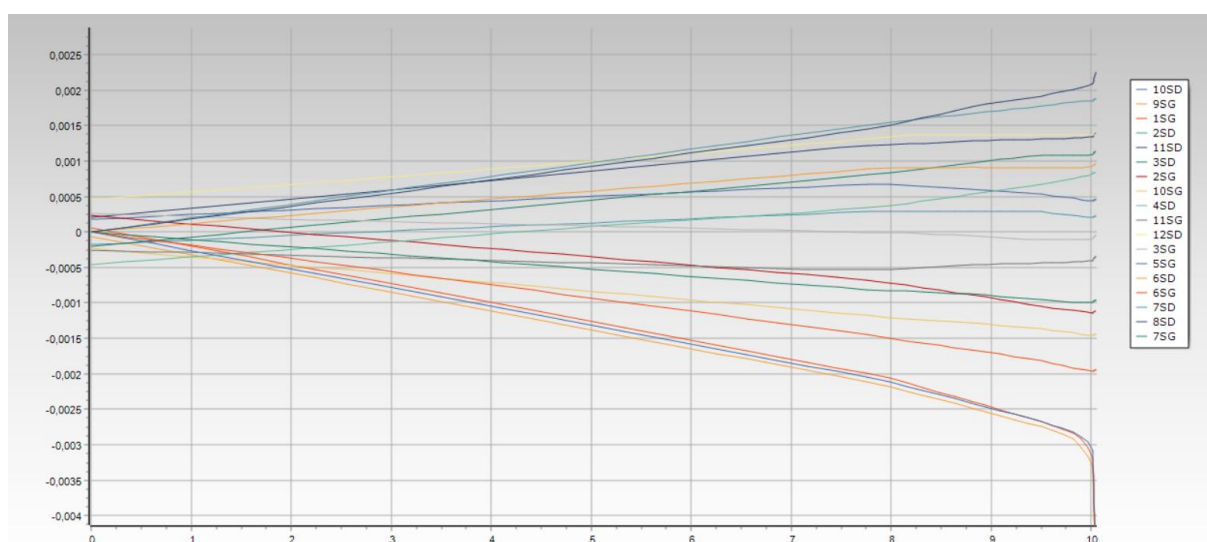
Target Displacement	
Damage Limitation (DL)	0,02458187
Significant Damage (SD)	0,04916374
Near Collapse (NC)	0,07374562

Slika 57. Vrijednosti ciljanog pomaka u m

Na sljedećim slikama (slika 58, 59) prikazani su dijagrami koji prikazuju kutove zaokreta plastičnih zglobova s obzirom na silu koja se povećavala svakim korakom metode postupnog guranja. Iz ovih dijagrama izvučene su vrijednosti kutova zaokreta pojedinog plastičnog zgloba (link elementa) za sva 3 granična stanja : OO, ZO i BR. Te vrijednosti kutova zaokreta, njihovi zahtjevi i omjeri kutova zaokreta i zahtjeva prikazani su u tablicama 65 - 67.



Slika 58. Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u gredama



Slika 59. Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u stupovima

- **Granično stanje ograničenog oštećenja (00)**

Kao sposobnost usvojen je kut zaokreta pri granici popuštanja na bilinearnim dijagramu.

Tablica 65. Granično stanje ograničenog oštećenja - zahtjev i sposobnost deformiranja plastičnog zgloba (rad)

Plastični zglobovi (link elementi)	1SG	2GD	2SG	2SD	3SD
zahtjev	-0,00081	-0,00053	0,00184	0,00180	0,00190
sposobnost	-0,00287	-0,00267	0,00276	0,00287	0,00276
zahtjev /sposobnost [%]	28,06	19,90	66,48	62,57	68,76

Plastični zglobovi (link elementi)	3GD	3SG	4SD	4GD	5SG
zahtjev	0,00188	-0,00066	-0,00046	0,00037	0,00175
sposobnost	0,00266	-0,00265	-0,00265	0,00245	0,00300
zahtjev /sposobnost [%]	70,76	25,04	17,49	15,31	58,18

Plastični zglobovi (link elementi)	6SD	6GD	6SG	6GL	7SD
zahtjev	0,00162	-0,00012	0,00048	-0,00130	-0,00118
sposobnost	0,00300	-0,00267	0,00286	-0,00267	-0,002859
zahtjev /sposobnost [%]	54,10	4,57	16,89	48,74	41,42

Plastični zglobovi (link elementi)	7GD	7SG	7GL	8SD	8GD
zahtjev	0,00011	0,00083	0,00041	-0,00032	-0,00080
sposobnost	0,002661	0,002676	0,002661	-0,002676	-0,002508
zahtjev /sposobnost [%]	4,25	30,87	15,47	11,89	31,91

Plastični zglobovi (link elementi)	8GL	9SG	10SD	10SG	10GL
zahtjev	0,00005	-0,00043	0,00096	0,00009	-0,00124
sposobnost	0,00251	-0,00287	0,00287	0,00276	-0,00267
zahtjev /sposobnost [%]	1,94	14,90	33,59	3,37	46,39

Plastični zglobovi (link elementi)	11SD	11SG	11GL	12SD	12GL
zahtjev	0,00055	-0,00088	0,00092	0,00087	-0,00049
sposobnost	0,00276	-0,00265	0,00266	0,00265	-0,00245
zahtjev /sposobnost [%]	19,74	33,23	34,68	32,91	20,11

- **Granično stanje znatnog oštećenja (ZO)**

Kao sposobnost u graničnom stanju znatnog oštećenja usvojeno je 3/4 vrijednosti za granično stanje blizu rušenja.

Tablica 66. Granično stanje znatnog oštećenja – zahtjev i sposobnost deformiranja plastičnog zgloba (rad)

Plastični zglobovi (link elementi)	1SG	2GD	2SG	2SD	3SD
zahtjev	-0,00221	-0,00185	0,00377	0,00392	0,00432
sposobnost	-0,01620	-0,01530	0,01575	0,01620	0,01575
zahtjev /sposobnost [%]	13,66	12,09	23,94	24,17	27,46

Plastični zglobovi (link elementi)	3GD	3SG	4SD	4GD	5SG
zahtjev	0,00402	-0,00209	-0,00180	-0,00039	0,00249
sposobnost	0,01541	-0,01519	-0,01519	-0,01474	0,01755
zahtjev /sposobnost [%]	26,09	13,79	11,84	2,64	14,20

Plastični zglobovi (link elementi)	6SD	6GD	6SG	6GL	7SD
zahtjev	0,00314	-0,00145	0,00061	-0,00248	-0,00239
sposobnost	0,01755	-0,01530	0,01620	-0,01530	-0,01620
zahtjev /sposobnost [%]	17,89	9,45	3,74	16,19	14,72

Plastični zglobovi (link elementi)	7GD	7SG	7GL	8SD	8GD
zahtjev	0,00029	0,00128	0,00098	-0,00088	-0,00128
sposobnost	0,01541	0,01530	0,01541	-0,01530	-0,01474
zahtjev /sposobnost [%]	1,90	8,39	6,33	5,78	8,72

Plastični zglobovi (link elementi)	8GL	9SG	10SD	10SG	10GL
zahtjev	0,00053	-0,00046	0,00137	-0,00005	-0,00241
sposobnost	0,01156	-0,01148	0,01156	0,01148	0,01105
zahtjev /sposobnost [%]	4,61	4,04	11,83	0,43	21,78

Plastični zglobovi (link elementi)	11SD	11SG	11GL	12SD	12GL
zahtjev	0,00091	-0,00166	0,00167	0,00176	-0,00088
sposobnost	0,01575	0,01519	0,01541	0,01519	0,01474
zahtjev /sposobnost [%]	5,77	10,93	10,82	11,60	5,95

- **Granično stanje blizu rušenja (BR)**

Kao sposobnost usvojen je kut zaokreta pri nosivosti plastičnog zgloba, koji je dodatno podijeljen sa koeficijent γ_{el} (prema Eurokodu 8 [9]) koji je jednak 2,0 za primarne potresne elemente u slučaju kada se primjene izrazi za ovijanje betona iz norme EN 1992-1-1:2004.

Tablica 67. Granično stanje blizu rušenja - zahtjev i sposobnost deformiranja plastičnog zgloba (rad)

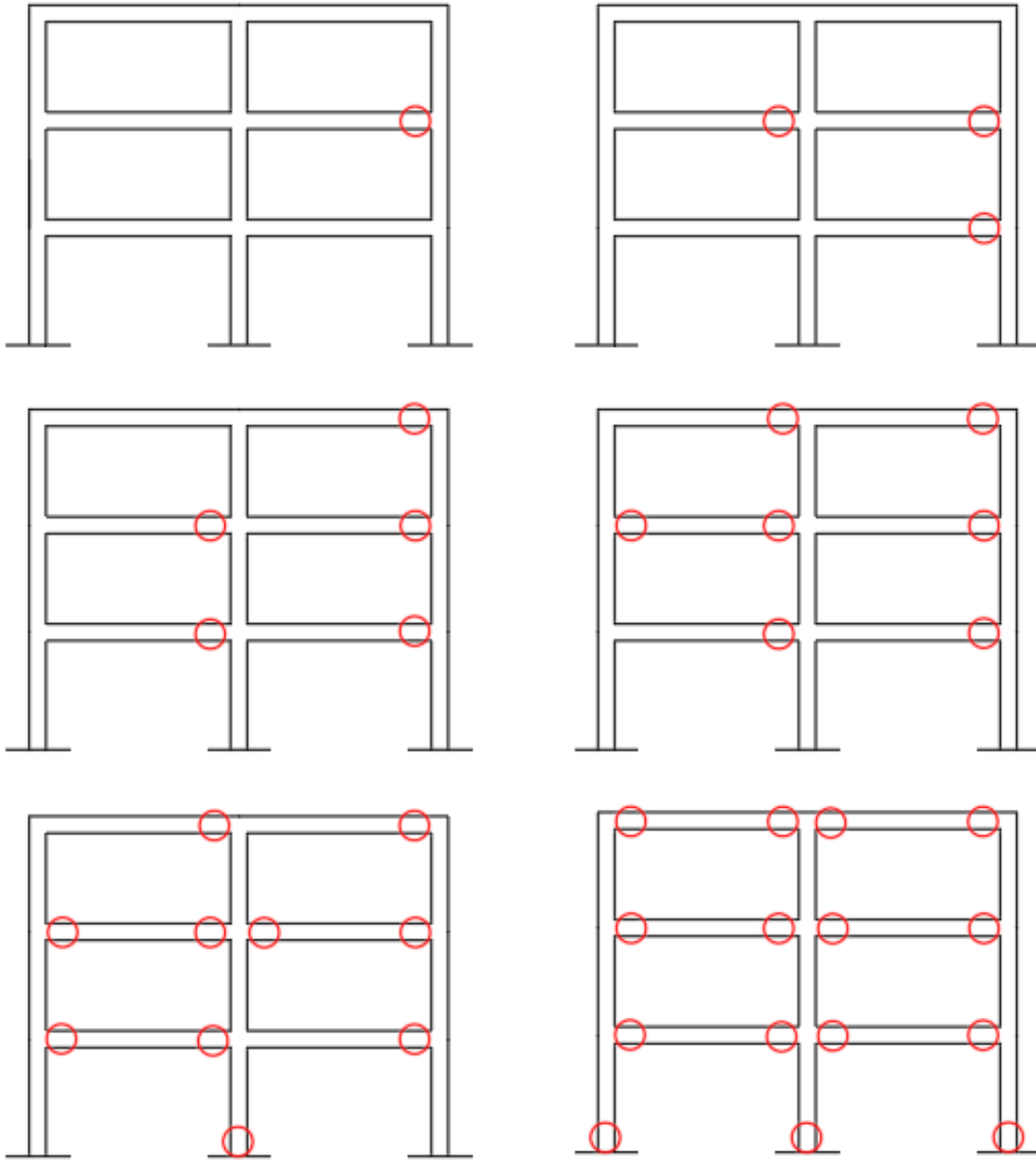
Plastični zglobovi (link elementi)	1SG	2GD	2SG	2SD	3SD
zahtjev	-0,00419	-0,00319	0,00643	0,00709	0,00758
sposobnost	-0,0216	-0,0204	0,021	0,0216	0,021
zahtjev /sposobnost [%]	19,41	15,64	30,63	32,83	36,07
Plastični zglobovi (link elementi)	3GD	3SG	4SD	4GD	5SG
zahtjev	0,00689	-0,00430	-0,00352	-0,00124	0,00490
sposobnost	0,02055	-0,02025	-0,02025	-0,01965	0,0234
zahtjev /sposobnost [%]	33,54	21,26	17,36	6,31	20,92
Plastični zglobovi (link elementi)	6SD	6GD	6SG	6GL	7SD
zahtjev	0,00633	-0,00272	0,00045	-0,00404	-0,00392
sposobnost	0,0234	-0,0204	0,0216	-0,0204	-0,0216
zahtjev /sposobnost [%]	27,03	13,35	2,08	19,81	18,17
Plastični zglobovi (link elementi)	7GD	7SG	7GL	8SD	8GD
zahtjev	0,00022	0,00137	0,00111	-0,00112	-0,00145
sposobnost	0,0206	0,0204	0,0206	-0,0204	-0,0197
zahtjev /sposobnost [%]	1,06	6,70	5,43	5,51	7,38
Plastični zglobovi (link elementi)	8GL	9SG	10SD	10SG	10GL
zahtjev	0,00083	-0,00037	0,00137	-0,00007	-0,00382
sposobnost	0,0197	-0,0216	0,0216	-0,0210	-0,0204
zahtjev /sposobnost [%]	4,24	1,72	6,33	-0,32	18,70
Plastični zglobovi (link elementi)	11SD	11SG	11GL	12SD	12GL
zahtjev	0,00095	-0,00195	0,00187	0,00217	-0,00097
sposobnost	0,0210	-0,0203	0,0206	0,0203	-0,0197
zahtjev /sposobnost [%]	4,50	9,65	9,09	10,69	4,95

Na slici 60 prikazani su dobiveni periodi iz kojih se može očitati da je 1. vlastiti period 0,75 s iz čega se dobije potresno ubrzanje koje iznosi 0,27 g. Vrijednost perioda bitno se razlikuje od [7] na kojem se ovaj diplomski rad temeljio, gdje 1. vlastiti period iznosi 0,41 s, a potresno ubrzanje bi u tom slučaju iznosilo 0,51g (slika 54).

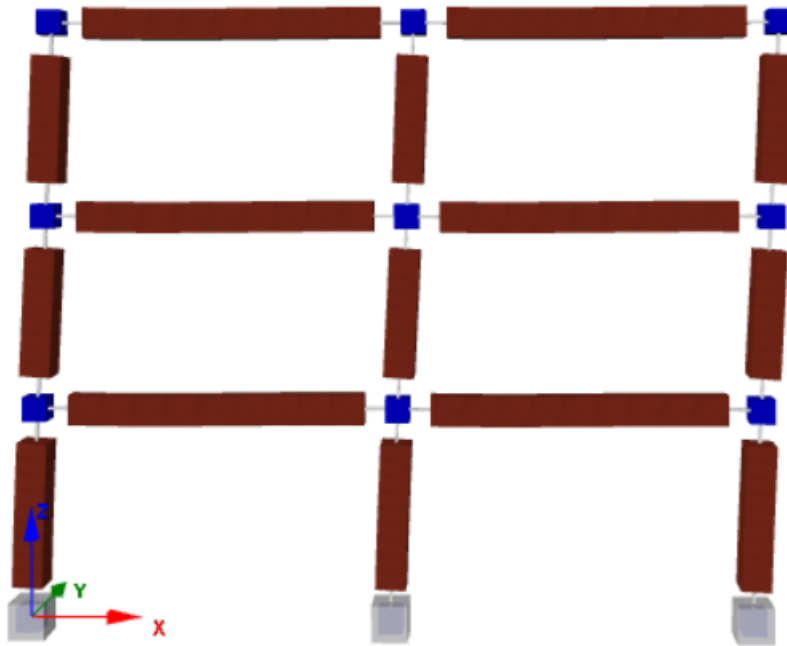
M O D A L P E R I O D S A N D F R E Q U E N C I E S			
Mode	Period (sec)	Frequency (Hertz)	Angular Frequency (rad/sec)
1	0,75185176	1,33004942	8,35694699
2	0,21862271	4,57409025	28,73985664
3	0,11518716	8,68152341	54,54762034
4	0,05274676	18,95850950	119,11982832
5	0,04057337	24,64670497	154,85981451
6	0,04054630	24,66316314	154,96322428
7	0,03247432	30,79356331	193,48166457
8	0,03100641	32,25139502	202,64149132
9	0,03004575	33,28257384	209,12057894
10	0,01838953	54,37875437	341,67179046

Slika 60. SeismoStruct - periodi i frekvencije

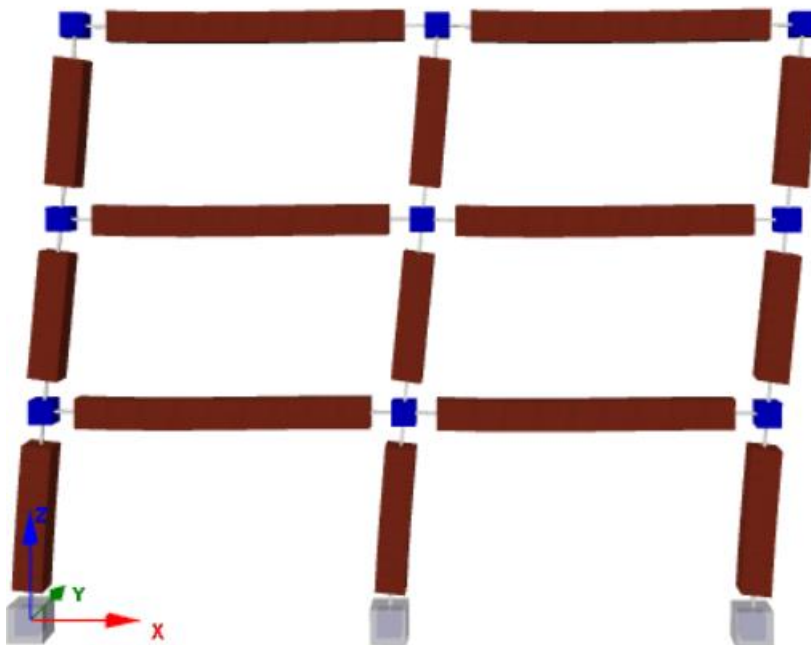
Na slici 61 prikazan je redosljed otvaranja plastičnih zglobova konstrukcije uslijed potresnog opterećenja. Plastični zglobovi su označeni crvenim krugovima. Na slikama 62, 63 prikazani su pomaci konstrukcije uslijed povećanja sila.



Slika 61. Redosljed otvaranja plastičnih zglobova



Slika 62. Pomak konstrukcije pri opterećenju 448 kN



Slika 63. Pomak konstrukcije pri sili 603 kN

6. ZAKLJUČAK

Plastični zglobovi promatrane konstrukcije otvorili su se u svim gredama, za razliku od stupova kod kojih su se otvorili samo u čvorovima 1, 5 i 9 u podnožju konstrukcije. Time se dokazala ispravnost projektiranja kojim se želio postići sustav „jaki stup – slaba greda“ te izbjegavanje „mekog kata“, odnosno u konstrukciji se pojavio poželjni mehanizam pri potresnom opterećenju. Pravilnim armiranjem može se postići bolja duktilnost koja je vrlo bitna za ponašanje konstrukcije. Ni u jednom plastičnom zglobu nije došlo do prekoračenja graničnih stanja te je omjer sposobnosti nosivosti i zahtjeva relativno mali, iz više razloga. Proračun plastičnih zglobova proveden je za ovijeni beton, što je uvelike povećalo kutu zaokreta pri nosivosti plastičnog zgloba. Pritom su korištene srednje vrijednosti svojstava materijala. Drugi razlog je taj što je u obzir uzeta tlačna armatura armiranobetonskog presjeka. Također, na rezultate je utjecalo i veće potresno ubrzanje na koje je projektirana konstrukcija. Ovim proračunom dobili smo veću vrijednost prvog perioda i znatno manju vrijednost potresnog ubrzanja, te bi se projektiranjem na tu vrijednost dobila znatno manja količina armature. Svi ovi čimbenici su nešto što klasičnim potresnim proračunom ne bi mogli precizno odrediti, te je zato nelinearni statički proračun vrlo učinkovita metoda za opisivanje ponašanja konstrukcije u nelinearnom području i za otkrivanje slabosti projektiranja.

LITERATURA

- [1] Mitrović, S., Predavanje, *Primjena nelinearnog statičkog proračuna u seizmičkoj analizi postojećih konstrukcija*, Obnova grada Zagreba nakon potresa – Ciklus predavanja, 2020. (<https://www.hcpi.hr/sites/default/files/inline-files/SM2%20-%20Ciklus%20predavanja%20-%20Zagrebu%20od%20Rijeke.pdf>, datum pristupanja: 23.09.2022)
- [2] Mitrović, S., Čaušević, M., *Nelinearni statički seizmički proračuni konstrukcija*, Građevinar, 61(6), str. 521.- 531, 2009.
- [3] Cerovečki, A., Kraus, I., Morić, D., *Metoda N2 za projektiranje zgrada*, Građevinar, 70(6), str. 509.- 518, 2018.
- [4] Fajfar, P., *The Story of the N2 Method*, Internacional Association for Earthquake Engineering, 2021.
- [5] Urbanski, A., Spacone, E., Belgasmia, M., Sarf, J.-L., Zimmermann, T., *Static pushover analysis*, ZSoil. PC 070202 Report, Lausanne, Švicarska
- [6] Grandić, D., Predavanje, kolegij Potresno inženjerstvo, *Nelinearna statička metoda postupnog guranja*, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2022.
- [7] Rušidi, T., *Potresni proračun i dimenzioniranje armiranobetonske zgrade*, Diplomski rad, Građevinski fakultet u Rijeci, 2018.
- [8] Sorić Z., Kišiček T., *Betonske konstrukcije 3*, Skripta građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [9] HRN EN 1998-3 : 2011 Eurokod 8, *Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada*, (EN 1998-3 : 2005 + AC : 2010)

[10] *SeismoStruct – User manual*, 2021 (www.seismosoft.com)

[11] Vido, H., Martinović, M., Dokaz lokalne duktilnosti unutar kritičnog područja stupa u potresu, Seminarski rad, Građevinski fakultet u Rijeci, 2013.

[12] HRN EN 1992-1-1 : 2013 *Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija – dio 1-1: OPĆA PRAVILA I PRAVILA ZA ZGRADE (EN 1992-1-1:2004/A1:2014)*

[13] Paulay, T., Priestley M.J.N., *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*, John Wiley, 1992.