

Analiza potresne otpornosti armiranobetonskog višekalnog okvira

Višnjić, Martina

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:157:518612>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-30**



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**

Martina Višnjić

Analiza potresne otpornosti armiranobetonskog višekasnog okvira

Diplomski rad

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo
Konstrukcije
Potresno inženjerstvo**

**Martina Višnjić
JMBAG: 0114030981**

Analiza potresne otpornosti armiranobetonskog višekasnog okvira

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2023.

IZJAVA

Diplomski rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom prof. dr. sc. Davorom Grandićem 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.

Martina Višnjić

U Rijeci, 13.09.2023.

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	uni-tehnic-18-127
Financijer projekta	Sveučilište u Rijeci
Pravna nadležnost	Republika Hrvatska

U Rijeci, 13. rujna 2023. godine

Mentor:

prof. dr. sc. Davor Grandić

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Davoru Grandiću te profesoru doc. dr. sc. Paulu Šćulcu na pomoći, uloženom vremenu i trudu te savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Također, želim se zahvaliti kolegama koji su mi postali prijatelji za vrijeme studiranja na pomoći, druženju te stvaranju lijepih uspomena.

Hvala svima koji su mi pomogli na putu do ovog uspjeha.

Posebno hvala mojoj prijateljici Izabeli koja mi je cijeli period studiranja bila podrška i vjetar u leđa.

SAŽETAK

U ovom radu najprije je opisano djelovanje potresa na konstrukciju te koji su to temeljni zahtjevi koje konstrukcija treba zadovoljiti pri projektiranju i izvođenju u potresnom području. Zatim su opisana neka od važnijih svojstava koje imaju utjecaj na veličinu učinaka potresnog djelovanja, kao što su masa, period vibracija, duktilnost, nosivost, itd..

Glavni dio rada započinje razvojem potresnog proračuna – polazak od linearnih metoda proračuna sve do uporabe nelinearnih metoda proračuna. Slijedi detaljan pregled proračuna linearnom metodom – metodom bočnih sila. Opisana je primjena metode – za koje konstrukcije je primjenjiva te način proračuna - od ulaznih podataka sve do izračuna ukupne vrijednosti poprečne sile konstrukcije. Nakon što je cjelovito obrađena linearna metoda proračuna, isto je prikazano i za nelinearnu statičku metodu proračuna – metodu postupnog guranja. Metoda postupnog guranja sastoji se od 8 glavnih koraka koji su detaljno obrađeni u ovom radu. Kako bi se dokazale razlike u načinima proračuna, najprije je napravljena prva metoda postupnog guranja u softveru *Seismostruct* s polaznim modelom koji je dimenzioniran osnovnim periodom određenim približnim metodama. Tim proračunom dobivena je nova vrijednost perioda kojim je konstrukcija racionalnije dimenzionirana metodom bočnih sila. Unutarnje sile i momenti za proračun metodom bočnih sila dobiveni su u softveru *Staad.Pro*. Nakon što je cijela konstrukcija ponovno dimenzionirana, ponovljena je metoda postupnog guranja.

Ključne riječi: potres, učinci, potresni proračun, armatura, metoda bočnih sila, poprečna sila, metoda postupnog guranja

ABSTRACT

This paper first describes the effect of earthquakes on the structure and what are the basic requirements that the structure must meet when designing and performing in an earthquake area. Then, some of the more important properties that have an influence on the magnitude of the effects of seismic action, such as mass, period of vibration, ductility, bearing capacity, etc., are described.

The main part of the work begins with the development of seismic calculation - starting from linear calculation methods up to the use of non-linear calculation methods. The following is a detailed overview of calculations using the linear method - the method of lateral forces. The application of the method is described - for which structures it is applicable and the method of calculation - from the input data to the calculation of the total value of the transverse force of the structure. After the linear calculation method has been fully processed, the same is shown for the non-linear static calculation method - the pushover analysis. The pushover analysis method consists of 8 main steps that are covered in detail in this paper. In order to prove the differences in the calculation methods, the first method of gradual pushing was first done in the Seismostruct software with the starting model dimensioned by the basic period determined by approximate methods. With this calculation, a new value of the period was obtained by which the structure was dimensioned more rationally using the method of lateral forces. Internal forces and moments for calculation using the lateral force method were obtained in the Staad.Pro software. After the entire structure was re-dimensioned, the gradual pushing method was repeated.

Key words: earthquake, effects, earthquake calculation, reinforcement, method of lateral forces, transverse force, pushover analysis

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. DJELOVANJE POTRESA NA KONSTRUKCIJU	2
2.1. Veličina učinka potresnog djelovanja	3
2.1.1. Masa	3
2.1.2. Osnovni period vibracija	3
2.1.3. Prigušenje	4
2.1.4. Spektar odziva	4
2.1.5. Duktilnost	6
2.1.6. Nosivost.....	7
2.1.7. Krutost	7
2.1.8. Torzija.....	8
3. POTRESNI PRORAČUN	10
3.1. Razvoj proračuna	11
3.2. Proračunske kombinacije djelovanja	12
4. METODA BOČNIH SILA	15
4.1. Primjena metode	15
4.1.1. Kriterij pravilnosti u tlocrtu.....	15
4.1.2. Kriterij pravilnosti po visini	17
4.2. Postupak proračuna metodom bočnih sila	19
4.3. Izračun ukupne vrijednosti poprečne sile konstrukcije od potresa	21
4.4. Određivanje perioda.....	22
4.5. Raspodjela ukupne poprečne sile potresa po visini građevine.....	23
5. NELINEARNI STATIČKI PRORAČUN (METODA POSTUPNOG GURANJA) ...	24
5.1. Postupak metode proračuna N2	24
6. TEHNIČKI OPIS.....	38

6.1.	Općenito.....	38
6.2.	Opis konstrukcije	40
6.3.	Proračun konstrukcije	40
7.	PRIMJENA METODE POSTUPNOG GURANJA NA ZADANI MODEL	41
7.1.	Ulazni podaci	41
7.2.	Proračun metodom postupnog guranja	54
7.3.	Analiza rezultata	61
7.4.	Usporedba rezultata	80
8.	DIMENZIONIRANJE METODOM BOČNIH SILA	82
8.1.	Proračun potresnog opterećenja.....	84
8.1.1.	Raspodjela ukupne poprečne sile potresa po visini građevine	86
8.2.	Ulazni podaci za softver Staad.Pro	89
8.2.1.	Kombinacije djelovanja.....	91
9.	DIMENZIONIRANJE OKVIRA	93
9.1.	Dimenzioniranje greda na moment savijanja.....	93
9.1.1.	Greda POZ. 311 – 311	94
9.1.2.	Greda POZ. 215 – 215.....	97
9.1.3.	Greda POZ. 115 – 115	100
9.2.	Dimenzioniranje greda okvira na poprečnu silu	103
9.2.1.	Greda POZ. 311 – 311	104
9.2.2.	Greda POZ. 215 – 215.....	110
9.2.3.	Greda POZ. 115 – 115	116
9.3.	Raspodjela armature u gredama.....	121
9.4.	Kritično područje grede	125
9.4.1.	Greda POZ. 311 – 311	126
9.4.2.	Greda POZ. 215 – 215.....	129
9.4.3.	Greda POZ. 115 – 115	131

9.5.	Proračun vitkih elemenata okvira	133
9.5.1.	Provjera međukatnih pomaka	136
9.6.	Dimenzioniranje stupova okvira na moment savijanja	139
9.7.	Dimenzioniranje stupova na ekscentrični tlak	146
9.7.1.	Stup III/300 (ŠTAP 3 i 9).....	146
9.7.2.	Stup IV/300 (ŠTAP 6).....	148
9.7.3.	Stup III/200 (ŠTAP 2 i 8).....	150
9.7.4.	Stup IV/200 (ŠTAP 5).....	152
9.7.5.	Stup III/100 (ŠTAP 1 i 7).....	154
9.7.6.	Stup IV/100 (ŠTAP 4).....	156
9.8.	Dimenzioniranje stupova na poprečnu silu.....	161
9.8.1.	Stup III/100.....	162
9.8.2.	Stup IV/100	165
9.8.3.	Stup III/200.....	167
9.8.4.	Stup IV/200	170
9.8.5.	Stup III/300.....	173
9.8.6.	Stup IV/300	175
9.9.	Raspodjela armature u stupovima.....	178
9.10.	Kritično područje stupa	179
10.	METODA POSTUPNOG GURANJA	186
10.1.	Rezultati proračuna	187
11.	ZAKLJUČAK.....	206
	LITERATURA	208

POPIS SLIKA

Slika 1: Usporedba osnovnih perioda zgrade ovisno o visini. Modificirano prema [5].....	4
Slika 2: Preporučeni elastični spektar odziva tipa 1 za temeljna tla tipa A do E (5%-tno prigušenje) [7]	5
Slika 3: Model armiranobetonskog konzolnog stupa izloženog djelovanju horizontalne sile. Modificirano prema [5]	6
Slika 4: Preuzimanje horizontalnog potresnog djelovanja armiranobetonskim zidovima. Modificirano prema [5]	7
Slika 5: Utjecaj položaja centra mase i centra krutosti. Modificirano prema [5].....	8
Slika 6: Jednostavna pravila za oblikovanje tlocrta građevine u potresnim područjima. Modificirano prema [2]	17
Slika 7: Kriteriji pravilnosti zgrada s uvučenim mjestima. Modificirano prema [7]	18
Slika 8: Prikaz modela za analizu. Modificirano prema [13].....	25
Slika 9: Elastični spektar ubrzanja [13].....	25
Slika 10: Elastični spektar ubrzanja - tradicionalni format [13].....	26
Slika 11: Elastični spektar ubrzanja - AD format [13]	26
Slika 12: Bilinearni spektar R_{μ} -T [14]	27
Slika 13: Zahtijevani nelinearni spektar za razne konstantne vrijednosti faktora duktilnosti μ u AD formatu [13].....	28
Slika 14: Krivulja kapaciteta - stvarna i idealizirana (isprekidano) [15].....	29
Slika 15: Prikaz vertikalnog opterećenja na konstrukciju [13].....	30
Slika 16: Načini raspodjele horizontalnog opterećenja - jednolično (1) i modalno (2) [13]	30
Slika 17: Transformacija sustava s više stupnjeva slobode u ekvivalentan sustav s jednim stupnjem slobode [13]	33
Slika 18. Bilinearna idealizacija odnosa sila - pomak [13]	34
Slika 19: Spektar kapaciteta sustava s jednim stupnjem slobode [13]	35
Slika 20: Određivanje ciljanog pomaka za područje dugih i srednjih perioda [14]	36
Slika 21: Određivanje ciljanog pomaka za područje kratkih perioda [14].....	36
Slika 22: Proračunski model armiranobetonskog okvira [izradio autor].....	38
Slika 23: Opterećenja na okvir [izradio autor]	39
Slika 24: Materijalne karakteristike betona C30/37	42
Slika 25: Odnos naprezanje - deformacija betona C30/37	42

Slika 26: Materijalne karakteristike čelika za armiranje B500B.....	43
Slika 27: Odnos naprezanje - deformacija čelika za armiranje B500B.....	44
Slika 28: Kartica <i>Materials</i> sa korištenim materijalima.....	44
Slika 29. Kartica <i>Sections</i>	45
Slika 30. Poprečni presjek stupa zajedno s definiranom armaturom.....	45
Slika 31. Primjer poprečnog presjeka grede zajedno s armaturom	46
Slika 32: Kartica <i>Element Classes</i>	47
Slika 33: Koordinate okvira.....	48
Slika 34: Spajanje točaka 3 i 7 u gredu	48
Slika 35: Kartica <i>Element connectivity</i>	49
Slika 36: Prikaz elemenata okvira	49
Slika 37. Prikaz kartice <i>Restraints</i>	50
Slika 38: Način transformacije trokutnog opterećenja u jednoliko kontinuirano [izradio autor].....	51
Slika 39: Vrijednosti pomaka okvirne konstrukcije za proračun potresnih sila	51
Slika 40: Kartica <i>Applied Loads</i>	53
Slika 41: Opterećeni model armiranobetonskog okvira	53
Slika 42. Kartica <i>Loading Phases</i>	54
Slika 43: Kartica <i>Target Displacement</i> i stavka <i>Limit States</i>	56
Slika 44: Stavka <i>Seismic Action</i>	56
Slika 45: Prozor za definiranje vršnog ubrzanja tla i razreda važnosti građevine.....	57
Slika 46: Prozor za definiranje faktora odnosa tri granična stanja	57
Slika 47: Kartica <i>Code – based Checks</i>	58
Slika 48: Kartica <i>Safety factors</i>	59
Slika 49: Kartica <i>Knowledge level</i>	59
Slika 50: Definicija kuta zaokreta tetive [21].....	60
Slika 51: Definiranje postavki za stanje OO - ograničeno oštećenje (eng. <i>Damage limitation, DL</i>).....	61
Slika 52: Krivulja sposobnosti nosivosti	62
Slika 53: Vrijednosti ciljanog pomaka po graničnim stanjima u metrima	62
Slika 54: Položaj osi grede kod analize rezultata [18].....	63
Slika 55: Prikaz položaja plastičnog zgloba	79
Slika 56: Periodi vibracija po tonovima	80

Slika 57. Način raspodjele ukupne poprečne potresne sile po visini građevine [izradio autor].....	87
Slika 58: Formiranje geometrije okvira.....	89
Slika 59: Prozor za zadavanje poprečnog presjeka (lijevo stup, desno greda).....	90
Slika 60: 3D prikaz okvira.....	90
Slika 61: Zadavanje parametara betona C30/37.....	91
Slika 62: Opterećenje na gredu [izradio autor].....	103
Slika 63: Skica za određivanje udaljenosti x [izradio autor].....	107
Slika 64: Anvelopa poprečnih sila.....	108
Slika 65: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 311 na vanjskom osloncu [izradio autor].....	121
Slika 66: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 311 u polju [izradio autor].....	122
Slika 67: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 311 na unutarnjem osloncu [izradio autor].....	122
Slika 68: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 215 na vanjskom osloncu [izradio autor].....	123
Slika 69: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 215 u polju [izradio autor].....	123
Slika 70: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 215 na unutarnjem osloncu [izradio autor].....	124
Slika 71: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 115 na vanjskom osloncu [izradio autor].....	124
Slika 72: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 115 u polju [izradio autor].....	125
Slika 73: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 115 na unutarnjem osloncu [izradio autor].....	125
Slika 74: Armiranje kritičnog područja. Modificirano prema [7].....	126
Slika 75: Vrijednosti pomaka okvirne konstrukcije.....	137
Slika 76: Vrijednosti momenata u čvoru 11 za smjer 1 [izradio autor].....	140
Slika 77: Vrijednosti momenata u čvoru 11 za smjer 2 [izradio autor].....	141
Slika 78: Vrijednosti momenata stupa i greda za smjer 1 [izradio autor].....	142
Slika 79: Vrijednosti momenata stupa i grede u čvoru 10 za smjer 1 [izradio autor].....	143
Slika 80: Vrijednosti momenata stupa i grede u čvoru 10 za smjer 2 [izradio autor].....	144
Slika 81: Vrijednosti momenata stupa i grede u čvoru 6 [izradio autor].....	145
Slika 82: Model stupa za određivanje poprečnih sila [izradio autor].....	161

Slika 83: Raspodjela uzdužne armature u stupovima POZ. III/200, III/300, IV/200, IV/300 [izradio autor]	178
Slika 84: Raspodjela uzdužne armature u stupovima POZ. III/100, IV/100 [izradio autor]	179
Slika 85: Krivulja sposobnosti po graničnim stanjima	188
Slika 86: Vrijednosti pomaka po graničnim stanjima.....	188
Slika 87: Plastični zglob na vanjskom osloncu grede POZ. 311	204
Slika 88: Plastični zglobovi na vanjskim osloncima POZ. 311 i POZ. 115	204
Slika 89: Plastični zglobovi na vanjskom osloncu POZ. 311 i gredi POZ. 115	205
Slika 90: Plastični zglobovi na vanjskim osloncima POZ. 311, POZ. 115 i stupu III/100	205

POPIS TABLICA

Tablica 1: Metode proračuna potresne otpornosti konstrukcija [7].....	10
Tablica 2: Karakteristike metoda proračuna [3]	11
Tablica 3: Parcijalni koeficijenti za djelovanja [11]	14
Tablica 4: Preporučene vrijednosti faktora ψ za zgrade [11]	14
Tablica 5: Vrijednosti faktora važnosti γ_I prema razredu važnosti zgrada [7]	14
Tablica 6: Vrijednosti parametara koji opisuju elastični spektar tipa odziva 1 [7].....	15
Tablica 7: Osnovne vrijednosti faktora ponašanja q prema tipu konstrukcije [7].....	19
Tablica 8: Približne vrijednosti faktora α/α_1 za zgrade pravilne u tlocrtu [7]	20
<i>Tablica 9: Vrijednosti faktora k_w [7].....</i>	<i>20</i>
Tablica 10: Vrijednosti faktora φ za proračun koeficijenta kombinacije $\psi_{E, i}$ [7].....	22
Tablica 11. Vrijednosti opterećenja na okvir [izradio autor]	39
Tablica 12: Korištena armatura za stupove; vrijednosti preuzete iz [22]	46
Tablica 13: Korištena armatura za grede [17]	47
Tablica 14: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje OO, položaj A	66
Tablica 15: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje OO, položaj B	67
Tablica 16: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje OO, položaj A	68
Tablica 17: <i>Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje OO, položaj B.....</i>	<i>69</i>
Tablica 18: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje ZO, položaj A	71
Tablica 19: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje ZO, položaj B	72
Tablica 20: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje ZO, položaj A.....	73
Tablica 21: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje ZO, položaj B.....	74
Tablica 22: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje BR, položaj A	75
Tablica 23: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje BR, položaj B	76
Tablica 24: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje BR, položaj A.....	77
Tablica 25: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje BR, položaj B.....	78
Tablica 26. Armatura stupova.....	186
Tablica 27. Uzdužna armatura grede	187
Tablica 28. Poprečna armatura grede	187
Tablica 29: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje OO, položaj A....	191
Tablica 30: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje OO, položaj B....	192
Tablica 31: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje OO, položaj A	193

Tablica 32: <i>Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje OO, položaj B.....</i>	194
Tablica 33: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje ZO, položaj A	196
Tablica 34: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje ZO, položaj B	197
Tablica 35: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje ZO, položaj A.....	198
Tablica 36: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje ZO, položaj B.....	199
Tablica 37: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje BR, položaj A ...	200
Tablica 38: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje BR, položaj B ...	201
Tablica 39: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje BR, položaj A.....	202
Tablica 40: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje BR, položaj B.....	203

POPIS GRAFOVA

Graf 1: Ovisnost interpretabilnosti o točnosti i kompleksnosti proračuna [3]	10
Graf 2: Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u stupovima, položaj A	63
Graf 3: Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u gredama, položaj A	64
Graf 4: Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u stupovima, položaj B	64
Graf 5: Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u gredama, položaj B	65
Graf 6: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje OO, položaj A	66
Graf 7: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje OO, položaj B	67
Graf 8: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje OO, položaj A	68
Graf 9: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje OO, položaj B	69
Graf 10: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje ZO, položaj A	70
Graf 11: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje ZO, položaj B	71
Graf 12: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje ZO, položaj A	72
Graf 13: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje ZO, položaj B	73
Graf 14: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje BR, položaj A	75
Graf 15: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje BR, položaj B	76
Graf 16: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje BR, položaj A	77
Graf 17: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje BR, položaj B	78
Graf 18: Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u stupovima, položaj A	189
Graf 19: Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u gredama, položaj A	189
Graf 20: Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u stupovima, položaj B	190
Graf 21: Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u gredama, položaj B	190
Graf 22: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje OO, položaj A	191
Graf 23: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje OO, položaj B	192
Graf 24: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje OO, položaj A	193
Graf 25: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje OO, položaj B	194
Graf 26: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje ZO, položaj A	195
Graf 27: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje ZO, položaj B	196
Graf 28: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje ZO, položaj A	197
Graf 29: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje ZO, položaj B	198
Graf 30: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje BR, položaj A	200
Graf 31: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje BR, položaj B	201

Graf 32: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje BR, položaj A	202
Graf 33: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje BR, položaj B	203

1. UVOD

Najveći problem kod projektiranja građevinskih konstrukcija predstavlja potresni utjecaj na građevinu budući da je nastanak potresa iznenadan, a ima visoku moć razaranja. Upravo zato važno je pri projektiranju konstrukcija, osim ispunjenja zahtjeva ekonomičnosti i estetike te statičke otpornosti, ispuniti zahtjev za odgovor konstrukcija na sile nastale gibanjem tla, odnosno potresom [1].

Prema Europskoj normi EN 1998-1:2004 postoje četiri metode izračuna učinaka potresnog djelovanja na konstrukcije. Razlikuju se dva linearno – elastična proračuna te dva nelinearna. Konstrukcije su obično projektirane prema linearno – elastičnim proračunima s obzirom na to da su to najjednostavnije i najbrže metode proračuna, no većina njih doživljava velike neelastične deformacije pod velikim potresnim djelovanjem. Kako bi se moglo utvrditi stvarno ponašanje konstrukcija, u proračun je potrebno uvesti nelinearne metode [2]. Iako nisu uvijek nužne, u iznimnim slučajevima daju novi dimenziju potresnom proračunu. Međutim, za njihovo korištenje potrebno je više znanja i vremena u odnosu na primjenu linearno – elastičnih metoda proračuna [3].

Suvremene građevine, projektirane i izgrađene prema važećim propisima, imaju odgovarajuću otpornost na potres. Time postoji vrlo mala vjerojatnost da će se djelomično ili potpuno srušiti tijekom svog životnog vijeka, naravno, ako su pravilno građene. Unatoč tome što se zna kako osigurati odgovarajuću zaštitu od potresa za suvremene građevine, veliki problem predstavljaju postojeće građevine koje su građene prema starijim propisima ili bez njih [4]. No, za takve slučajeve uočava se važnost primjene i daljnjeg razvoja nelinearnih metoda.

U ovom radu napravljena je usporedba dvaju geometrijski jednakih modela proračunanih statičkom nelinearnom metodom postupnog guranja, odnosno *pushover* metodom. Oba modela imaju jednake materijalne značajke kao i raspored armature. Jedina razlika među njima je pristup modeliranju nosivih elemenata, stupova i greda. Polazni model dimenzioniran je metodom bočnih sila, odnosno linearno elastičnim proračunom, uz primjenu osnovnog perioda konstrukcije koji je dobiven približnim postupkom. Nakon što je konstrukcija racionalnije dimenzionirana metodom bočnih sila s dinamičkim proračunom određenim osnovnim periodom ponovljen je proračun metodom postupnog guranja.

2. DJELOVANJE POTRESA NA KONSTRUKCIJU

Potres je prirodna pojava čiji je uzrok iznenadno oslobađanje energije u Zemljinoj kori i dijelu gornjega plašta, a manifestira se kao gibanje tla. Najčešća vrsta potresa su tektonski potresi koji nastaju razmicanjem tektonskih ploča na oceanskim grebenima. U blizini granica između ploča, na mjestima gdje je došlo do razmicanja ploča, gomila se velika količina potencijalne energije i formiraju se rasjedi. Kada dođe do raspucavanja stijenske mase zbog gubitka posmične čvrstoće ta potencijalna energija pretvara se u kinetičku energiju koja se oslobađa i uzorkuje pomake, a kroz stijensku masu prostiru se potresni valovi. Oni mogu biti prostorni – šire se u unutrašnjosti Zemlje i površinski – šire se na površini Zemlje [2].

Kada se projektiraju potresno otporne konstrukcije mogu se izdvojiti tri najvažnija svojstva gibanja tla. Prvo je vršno ubrzanje tla – iznosi od $< 0,2 g$ do $1,0 g$, a vrijednosti su definirane na karti potresnih područja. Nadalje, to su trajanje snažnog gibanja tla – period vibracija i frekventni sastav potresa koji prikazuje na kojim se frekvencijama oslobađa najviše energije. Također, važno svojstvo je slučajnost smjera djelovanja potresa – konstrukcija mora biti otporna na potres u svim smjerovima [5].

Konstrukcije u potresnim područjima potrebno je projektirati i izvoditi da zadovolje dva uvjeta: uvjet neurušavanja konstrukcije (eng. *No – Collapse Requirement*) i uvjet ograničenja oštećenja (eng. *Damage Limitation Requirement*). Prvi uvjet, NCR, nalaže da konstrukcija bude projektirana i izvedena tako da izdrži projektno potresno djelovanje bez lokalnih i globalnih oštećenja. Uz to, konstrukcija treba očuvati svoju cjelovitost s dovoljnim preostalim kapacitetom nosivosti nakon potresa. Prema drugom uvjetu, DLR, nalaže se da konstrukcija bude projektirana i izvedena tako da izdrži potrese manjeg intenziteta za koje je pretpostavljeno da će se dogoditi u odnosu na projektirana potresna djelovanja. Na djelovanje potresa manjeg intenziteta konstrukcija se neće oštetiti niti će imati ograničenu uporabu, a obnova konstrukcije ne smije premašiti vrijednost konstrukcije koju je imala prije potresa [2].

2.1. Veličina učinka potresnog djelovanja

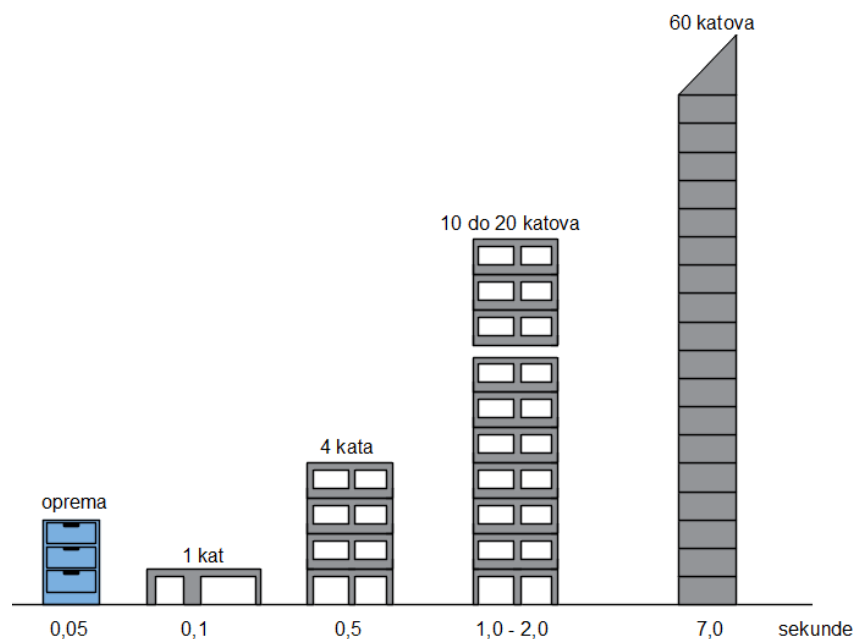
Učinak potresnog djelovanja predstavlja odzivnu veličinu konstrukcije na potresno djelovanje. To mogu biti naprezanja, unutarnje sile, pomaci, itd.. Neki od važnijih čimbenika koji imaju utjecaj na veličinu učinka potresnog djelovanja su masa, osnovni period vibracija, prigušenje, spektar odziva, duktilnost, nosivost, krutost i torzija [5].

2.1.1. Masa

Masa je najvažniji čimbenik koji utječe na veličinu učinka potresnog djelovanja. Sile inercije koje nastaju od potresnog djelovanja proporcionalne su masi građevine, tako da je kod projektiranja potrebno voditi računa o tome da povećanjem mase konstrukcije povećavamo i silu potresa [1]. Trebalo bi, kako bi se smanjila potresna oštetljivost konstrukcija, primjenjivati lakše konstrukcijske materijale kao što su drvo i čelik. Međutim, iz ekonomskih razloga konstrukcije su najčešće masivne, betonske ili zidane, stoga je potrebno voditi računa o težini građevine (katnost, geometrija) [5].

2.1.2. Osnovni period vibracija

Kod većine konstrukcija, osnovni period vibracija ima dominantan učinak na veličinu potresnih inercijalnih sila. Radi točnijeg proračuna trebalo bi uzeti u obzir i utjecaj viših vlastitih oblika, no kada ne postoji izniman doprinos viših oblika osciliranja, dovoljan je samo prvi oblik. Veći period vibracija imat će visoke i fleksibilne zgrade, u odnosu na niske i krute, što je prikazano na Slici 1. Konstrukcijski sustav, materijal i geometrija konstrukcije također utječu na period vibracija [2,5].



Slika 1: Usporedba osnovnih perioda zgrade ovisno o visini. Modificirano prema [5]

2.1.3. Prigušenje

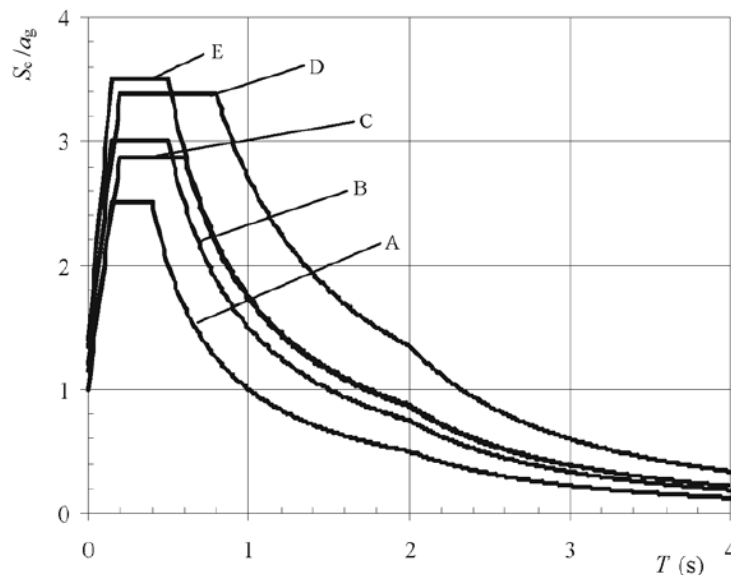
Prigušenje predstavljaju nekonzervativne sile otpora suprotstavljene gibanju. One dovode do smanjenja mehaničke energiju [5]. Razlikuju se tri vrste sile otpora:

- Sila otpora viskoznog trenja – linearna je funkciji brzine točke
- Sila otpora suhog trenja – konstantnog je intenziteta
- Histerezna sila otpora – ovisna je o pomaku, odnosno o deformaciji konstrukcije; povezana je s trošenjem energije što se u konstrukciju unosi tijekom potresa [2]

2.1.4. Spektar odziva

Spektar odziva je prikaz ovisnosti odziva konstrukcije na potres o periodu vibracija i prigušenju konstrukcije [5]. Spektri odziva mogu biti spektri akceleracije (Slika 2), brzine ili pomaka. Proračun spektra odziva temelji se na zapisu potresa promatrane lokacije. Pretpostavlja se da je konstrukcija jednostavan fizikalni sustav, s jednim stupnjem slobode. Karakteristike tog sustava su njegov vlastiti period i faktor prigušenja. Na temelju odabrane

vlastite frekvencije ili perioda dinamičkom analizom provodi se izračun maksimalnog odziva idealizirane konstrukcije na zadanu pobudu [6].



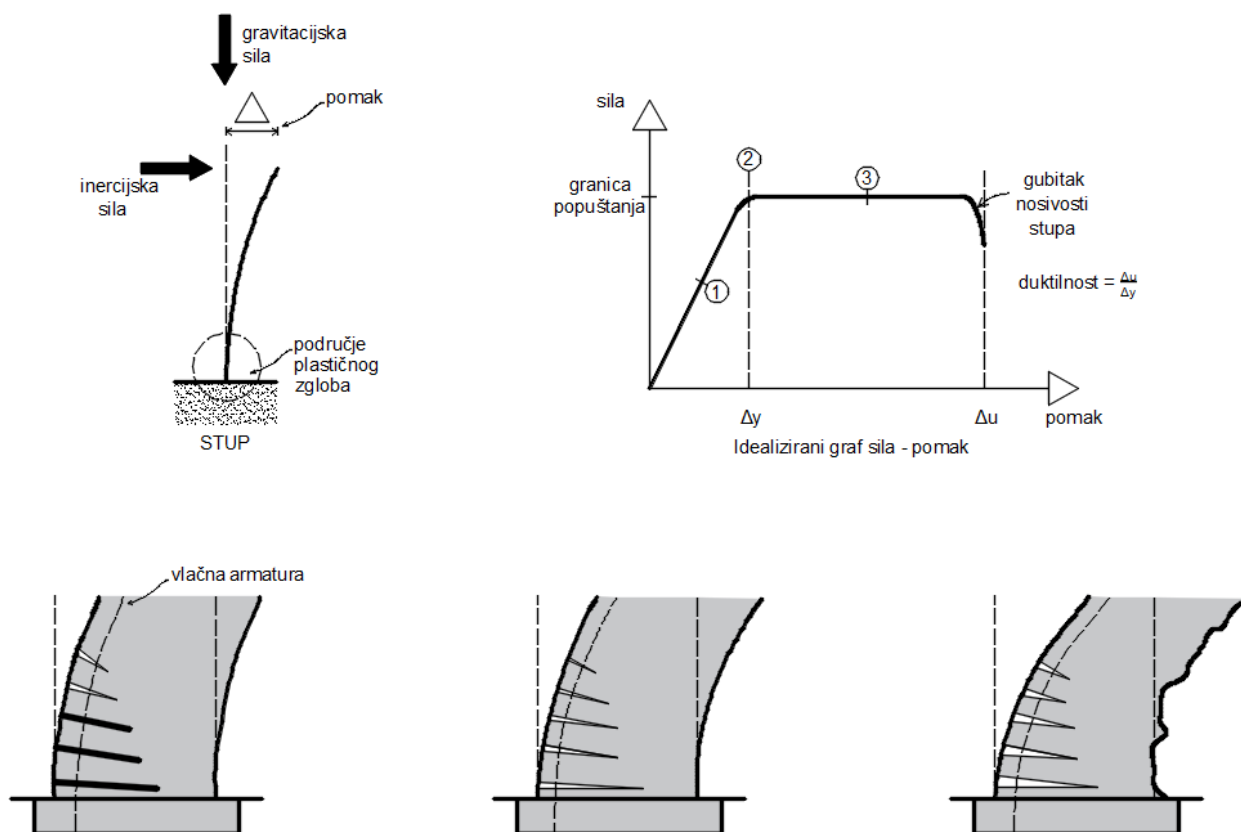
Slika 2: Preporučeni elastični spektar odziva tipa 1 za temeljna tla tipa A do E (5%-tno prigušenje) [7]

Proračunski spektar za elastični proračun

Konstruktivski sustavi u potresnim područjima su uglavnom duktilne konstrukcije, stoga je dopušteno da se proračunavaju na manje sile od onih koji odgovaraju linearno elastičnom odzivu. Pretpostavlja se da će u nelinearnom području doći do trošenja seizmičke energije na plastično deformiranje i time se izbjegava opsežan nelinearni proračun [7]. Takav reducirani elastični spektar odziva naziva se proračunski spektar. Smanjenje se postiže faktorom ponašanja q koji predstavlja približan omjer potresnih sila koje bi djelovale na konstrukciju u slučaju da je njezin odziv potpuno bio elastičan i proračunskih seizmičkih sila. Tim se faktorom korigiraju rezultati dobiveni linearno elastičnim proračunom razmatrajući nelinearni odziv konstrukcije, uz provođenje jednostavnog linearnog proračuna zasnovanog na proračunskom spektru [2].

2.1.5. Duktilnost

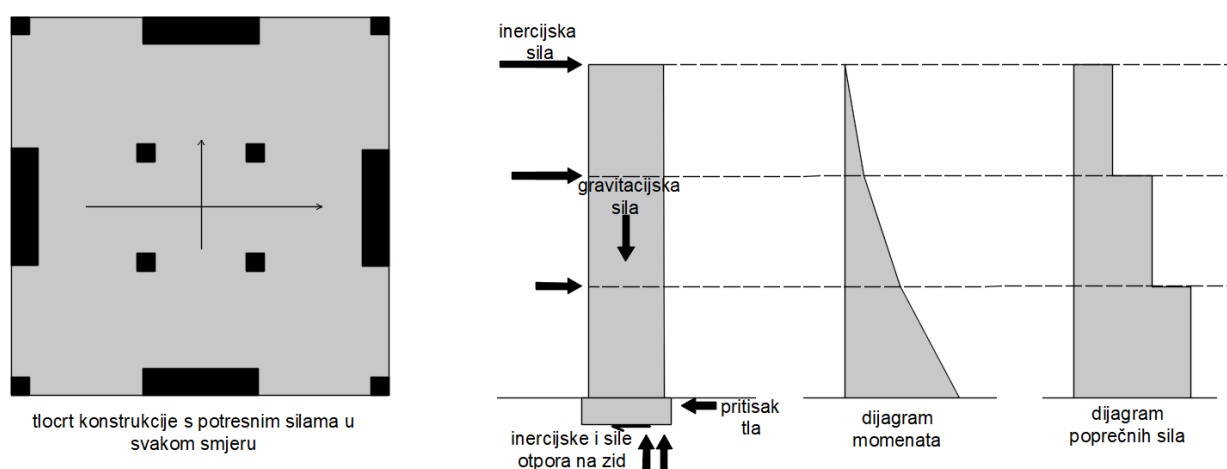
Duktilnost je svojstvo konstrukcije koje omogućava trošenje unesene potresne energije na plastično deformiranje (Slika 3). Naime, ako konstrukcija ima zadovoljavajuću duktilnost moguće ju je proračunavati na manje seizmičke sile od onih koje sustav ima kada ga se u potpunosti promatra kao elastičnog. Kao što je već spomenuto u prethodnom odlomku, pretpostavlja se da će se veći dio potresne energije potrošiti na plastično deformiranje. Pri projektiranju takvih armiranobetonskih konstrukcija, otpornih na seizmičke sile, potrebno je osigurati područja plastičnog deformiranja (zglobovi) kako bi se izbjegli krhki lomovi. Stoga ih je potrebno proračunati na povećanu nosivost na savijanje u tim područjima [8].



Slika 3: Model armiranobetonskog konzolnog stupa izloženog djelovanju horizontalne sile.
Modificirano prema [5]

2.1.6. Nosivost

Konstrukcija mora biti projektirana tako da preuzme sile uzorkovane potresnim djelovanjem, što znači da preostala nosivost nakon mogućih oštećenja izazvanih potresom, mora biti veća od sila djelovanja. To se može postići armiranobetonskim nosivim zidovima koji služe za prijenos opterećenja od potresa i vertikalnog gravitacijskog opterećenja na temelje. Momenti savijanja i poprečne sile izazvani inercijalnim silama povećavaju se prema dnu ovih zidova te se preko temelja prenose u tlo, što je prikazano na Slici 4 [5].



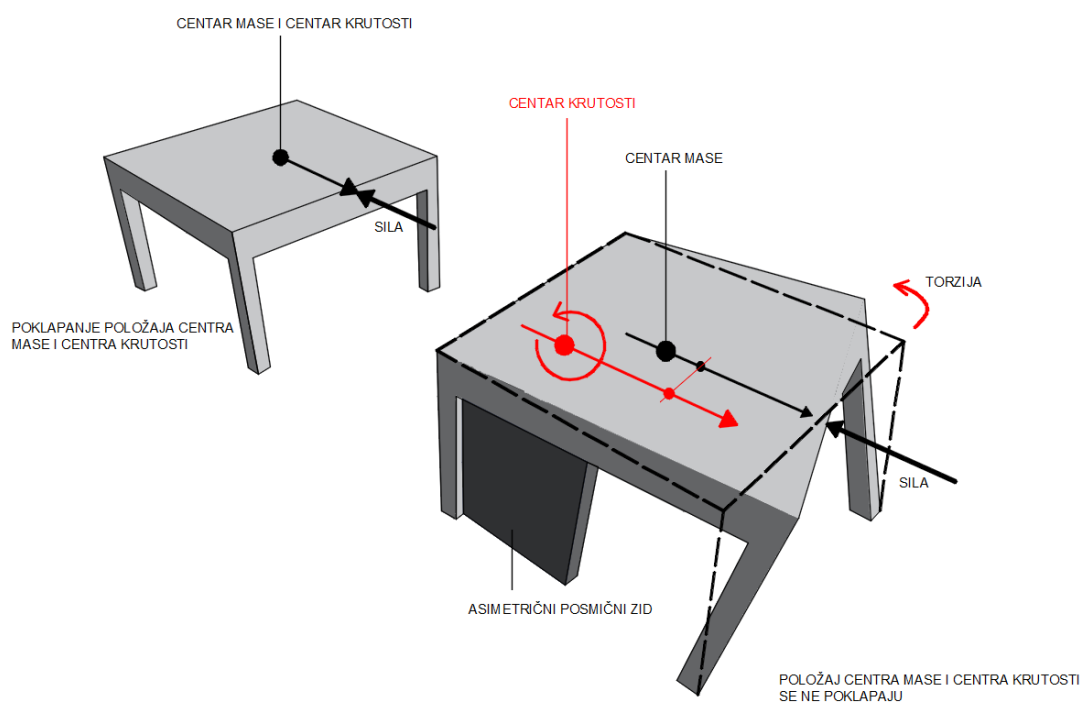
Slika 4: Preuzimanje horizontalnog potresnog djelovanja armiranobetonskim zidovima.
Modificirano prema [5]

2.1.7. Krutost

Kada konstrukcija ima veću krutost, ona će se manje deformirati. Međutim, u njoj se javljaju veći periodi vibracija, što dovodi do većih unutarnjih sila u takvim konstrukcijama. Suprotno tome, konstrukcije manje krutosti će, bez obzira na dovoljnu nosivost, doživjeti prekomjerne deformacije i oštećivati ostale nekonstrukcijske elemente kao što su pregradni zidovi, elementi pročelja, itd.. S obzirom na to da prekomjerne deformacije mogu dovesti do gubitka stabilnosti, za projektiranje potresno otpornih konstrukcija ograničeni su dopušteni pomaci [5]. Proračun ograničenja međukatnih pomaka prikazan je u poglavlju 9.5.1..

2.1.8. Torzija

Centar masa točka je u kojoj djeluje rezultanta seizmičkih (inercijalnih) sila, dok se rotacija zgrade događa oko centra krutosti [5]. Geometrija ploče, kao i tlocrtni raspored vertikalnih elemenata određuju položaj centra masa. Kada je konstrukcija tlocrtno simetrična, centar masa se nalazi u težištu ploče. Ako to nije slučaj, centar masa se pomiče iz težišta tlocrta. Tada se centar masa i centar krutosti ne poklapaju što dovodi do pojave torzijskih učinaka. Utjecaj položaja centra mase i centra krutosti na pojavu torzije prikazan je na Slici 5.



Slika 5: Utjecaj položaja centra mase i centra krutosti. Modificirano prema [5]

Slučajni torzijski učinci

Iako se pretpostavlja da se u simetričnim konstrukcijama ne javljaju torzijski učinci zbog poklapanja položaja centra masa i centra krutosti, torzijske oscilacije se ipak pobuđuju. Razlog tome može biti nesimetrija nastala zbog lošije izvedbe konstrukcije i odstupanja od projektiranih mjera. Također, mogući uzroci su nehomogenost i nejednolika kvaliteta materijala te nejednolika distribucija korisnog opterećenja. Torzija koja nastaje kao posljedica nabrojanih uzorka naziva se slučajna torzija. Efekt slučajne torzije uzima se u obzir zadavanjem slučajne ekscentričnosti $e_i = \pm 0,05 \cdot L$, gdje L predstavlja tlocrtnu dimenziju građevine okomito na smjer djelovanja potresa [9].

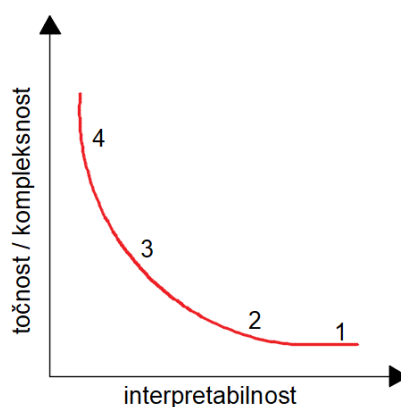
3. POTRESNI PRORAČUN

Kao što je već u uvodu spomenuto, za proračun potresne otpornosti konstrukcija razlikuju se četiri metode. One imaju svoje prednosti i nedostatke te ograničenja u primjeni, ovisno o karakteristikama građevine [2]. Metode proračuna prikazane su u Tablici 1.

Tablica 1: Metode proračuna potresne otpornosti konstrukcija [7]

REDNI BROJ	METODA 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	4.3.3.4.2. + dodatak B
4.	Nelinearni dinamički proračun	Nelinearni proračun primjenom vremenskog zapisa	4.3.3.4.3.

Porastom rednog broja dobivaju se točniji rezultati potresnog proračuna, no isto tako veća točnost rezultata zahtjeva više vremena i znanja za provođenje proračuna. Na Grafu 1 i u Tablici 2 nalazi se prikaz ovisnosti interpretabilnosti o točnosti i kompleksnosti proračuna.



Graf 1: Ovisnost interpretabilnosti o točnosti i kompleksnosti proračuna [3]

Tablica 2: Karakteristike metoda proračuna [3]

redni broj	točnost	kompleksnost	interpretabilnost
1.	prihvatljiva	mala	jako dobra
2.	dobra	prihvatljiva	dobra
3.	vrlo dobra	velika	prihvatljiva
4.	jako dobra	jako velika	jako slaba

Cilj navedenih metoda proračuna je osigurati dovoljan kapacitet trošenja energije bez većeg smanjenja lokalne i globalne nosivosti konstrukcije na horizontalna i vertikalna opterećenja tijekom potresa te da konstrukcija ne doživi oštećenja koja bi smanjila njenu uporabljivost [10].

3.1. Razvoj proračuna

Klasični pristup projektiranju konstrukcije u seizmičkim područjima temelji se na zadovoljavanju temeljnih zahtjeva konstrukcije – graničnog stanja nosivosti i uporabljivosti, uz primjenu elastičnog proračuna. Kako bi se izbjegao nelinearni proračun u elastični proračun uvodi se faktor ponašanja q [10]. To je reducirani elastični spektar koji se naziva proračunski spektar, što je već opisano u poglavlju 2.1.4. *Spektar odziva*.

Elastične metode proračuna zauzimaju prvo mjesto u današnjoj inženjerskoj praksi zbog svoje jednostavnosti i točnosti, ali imaju i sljedeće nedostatke [10]:

- vrijednosti faktora ponašanja q su približne te ne predstavljaju stvarno ponašanje konstrukcije
- proračunom nije obuhvaćena preraspodjela sila i deformiranje koje se događa kada konstrukcija uđe u nelinearno ponašanje
- nemoguće je predvidjeti mehanizam koji je uzrok sloma
- raspodjela i vrijednosti deformiranja su neusporedive za linearno i nelinearno područje

Kako se razvija tehnologija, razvijaju se i nove metode proračuna koje se temelje na stvarnom ponašanju konstrukcije, čime se ističe pozornost na kontrolu oštećenja. Metoda koja se temelji na vrijednosti pomaka, metoda postupnog guranja, daje bolji uvid u realno ponašanje konstrukcije od tradicionalnog pristupa koji se temelji na metodi sila. Najkompleksnija metoda, zapravo i najtočnija, je metoda koja se temelji na proračunu uporabom zapisa ubrzanja u vremenu. Međutim, još nije ušla u praktičnu primjenu upravo zbog svoje kompleksnosti, teške interpretacije rezultata, velikog broja ulaznih parametara i dugotrajnosti proračuna [10].

Linearno elastični proračuni dovoljno su pouzdani za nove konstrukcije koje su uglavnom predimenzionirane i poznat je mehanizam sloma. Nelinearne metode proračuna primjenjuju se za ocjenu ponašanja postojećih konstrukcija gdje je potrebno uočiti mehanizam sloma te za projekte obnove konstrukcije koji obuhvaćaju pojačanje neoštećene konstrukcije kao i popravak oštećenog dijela konstrukcije [10].

3.2. Proračunske kombinacije djelovanja

Početak svakog proračuna započinje postavljanjem opterećenja na model kako bi se mogli dobiti učinci djelovanja (E) – sile, momenti, naprezanja i pomaci. Za neku raspodjelu opterećenja projektna vrijednost učinaka djelovanja (E_d) predstavlja odziv konstrukcije prema postavljenim proračunskim djelovanjima F_d , geometriji te pouzdanosti konstrukcije. Te proračunske vrijednosti učinaka djelovanja E_d moraju biti manje ili jednake odgovarajućoj proračunskoj otpornosti poprečnog presjeka i proračunskoj otpornosti cijelog elementa, R_d . Odnosno, mora se zadovoljiti uvjet (1) [2]:

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

Proračunske vrijednosti učinaka djelovanja moraju biti određene kombinacijom vrijednosti djelovanja koja se događaju istodobno, a svrstane su u tri moguće situacije prikazane izrazima (2), (3) i (4) preuzete iz [11]:

- 1) Stalna ili prolazna proračunske situacija

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2)$$

2) Izvanredna proračunska situacija

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} P A_d + (\psi_{1,1} \text{ ili } \psi_{2,1}) Q_{k,1} \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3)$$

3) Potresna proračunska situacija

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} P A_{Ed} \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (4)$$

$G_{k,j}$ - karakteristična vrijednost stalnog djelovanja j

P – odgovarajuća reprezentativna vrijednost prednapinjanja

A_d – proračunska vrijednost izvanrednog djelovanja

A_{Ed} – proračunska vrijednost potresnog djelovanja, $A_{Ed} = \gamma_I A_{ek}$

A_{ek} – karakteristična vrijednost potresnog djelovanja

$Q_{k,1}$ - karakteristična vrijednost prevladavajućeg promjenjivog djelovanja 1

$Q_{k,i}$ - karakteristična vrijednost pratećeg promjenjivog djelovanja i

$\gamma_{G,j}$ – parcijalni koeficijent za stalno djelovanje j

γ_P – parcijalni koeficijent za djelovanje prednapinjanja

$\gamma_{Q,1}$ – parcijalni koeficijent za promjenjivo djelovanje 1

$\gamma_{Q,i}$ – parcijalni koeficijent za promjenjivo djelovanje i

γ_I – faktor važnosti (EN 1998)

ψ_0 – faktor za kombinacijsku vrijednost promjenjivog djelovanja

ψ_1 – faktor za čestu vrijednost promjenjivog djelovanja

ψ_2 – faktor za nazovistalnu vrijednost promjenjivog djelovanja

Parcijalni koeficijenti za djelovanja prikazani su u Tablici 3, vrijednosti faktora ψ u Tablici 4, a vrijednosti faktora važnosti γ_I u Tablici 5.

Tablica 3: *Parcijalni koeficijenti za djelovanja [11]*

	Stalna djelovanja (γ_G)	Promjenjiva djelovanja (γ_Q)	
		Prevladavajuće promjenjivo djelovanje	Prateća promjenjiva djelovanja
Povoljni učinak	1,0	0	0
Nepovoljni učinak	1,35	1,5	1,5

Tablica 4: *Preporučene vrijednosti faktora ψ za zgrade [11]*

Djelovanje	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Uporabna opterećenja u zgradama kategorije (vidjeti EN 1991-1-1):			
Kategorija A: kuće, stambene zgrade	0,7	0,5	0,3
Kategorija B: uredi	0,7	0,5	0,3
Kategorija C: područja za skupove	0,7	0,7	0,6
Kategorija D: trgovine	0,7	0,7	0,6
Kategorija E: skladišta	1,0	0,9	0,8
Kategorija F: prometna područja, težina vozila ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Kategorija G: prometna područja, 30 kN \leq težina vozila ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Kategorija H: krovovi	0	0	0
Opterećenja snijegom u zgradama (vidjeti EN 1991-1-3):			
- Finska, Island, Norveška, Švedska	0,7	0,5	0,2
- Ostale članice CEN-a za gradilišta na visini $H > 1000$ m n.m.	0,7	0,5	0,2
- Ostale članice CEN-a za gradilišta na visini $H \leq 1000$ m n.m.	0,5	0,2	0
Opterećenja vjetrom na zgrade (vidjeti EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatura (osim požara) u zgradama (vidjeti EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0

Tablica 5: *Vrijednosti faktora važnosti γ_I prema razredu važnosti zgrada [7]*

Razred važnosti	Zgrade	Faktor važnosti γ_I
I	Zgrade manje važnosti za javnu sigurnost npr. poljoprivredne zgrade itd.	0,8
II	Obične zgrade koje ne pripadaju drugim kategorijama	1,0
III	Zgrade čija je potresna otpornost važna s obzirom na posljedice vezane s rušenjem npr. škole, dvorane za skupove, kulturne inustrije itd.	1,2
IV	Zgrade čija je cjelovitost tijekom potresa od životne važnosti za civilnu zaštitu npr. bolnice, vatrogasne postaje, energane itd.	1,4

4. METODA BOČNIH SILA

4.1. Primjena metode

Metoda bočnih sila primjenjuje se za modele gdje ne postoji utjecaj viših oblika osciliranja. Taj uvjet zadovoljen je kod konstrukcija koje imaju zadovoljen kriterij pravilnosti tlocrta i pravilnosti po visini. Također, ovaj način proračuna moguće je primijeniti, uz navedene kriterije pravilnosti, samo kada je osnovni period vibracija T_1 u oba glavna pravca manji od sljedećih vrijednosti (5) [2]:

$$T_1 \leq \begin{cases} 4 \cdot T_c \\ 2,0 \text{ s} \end{cases} \quad (5)$$

Vrijednosti T_c dane su u Tablici 6.

Tablica 6: Vrijednosti parametara koji opisuju elastični spektar tipa odziva I [7]

Tip temeljnog tla	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,00	0,15	0,40	2,00
B	1,20	0,15	0,50	2,00
C	1,15	0,20	0,60	2,00
D	1,35	0,20	0,80	2,00
E	1,40	0,15	0,50	2,00

4.1.1. Kriterij pravilnosti u tlocrtu

Građevine koje se kategoriziraju kao pravilne u tlocrtu moraju zadovoljiti sljedeće uvjete:

- Konstrukcija zgrade mora biti približno simetrična u tlocrtu zbog raspodjele bočne krutosti i raspodjele masa. Osim što je tada projektantu lakše shvatiti ponašanje konstrukcije, izbjeci će se torzijski učinci koji mogu biti nepovoljni za konstrukciju [7].

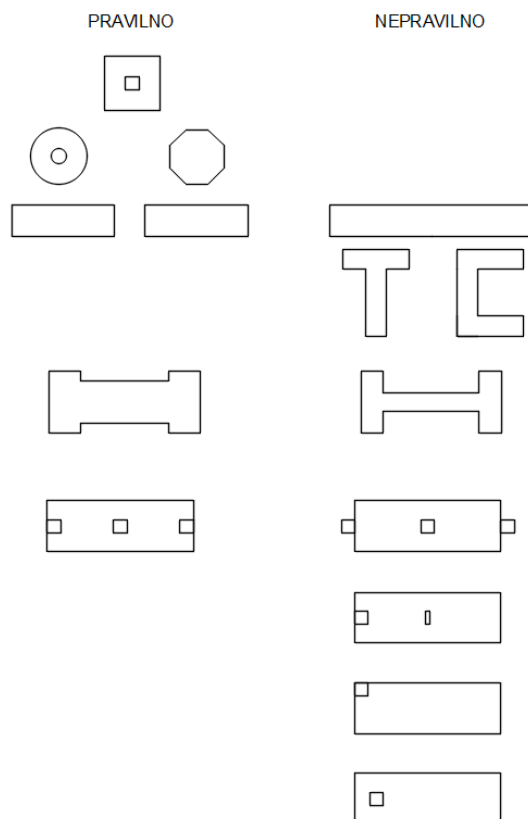
- Tlocrtni oblik mora biti omeđen poligonalnom konveksnom crtom. Međutim, kada u tlocrtu postoje uvučena mjesta konstrukcija se ipak može definirati kao tlocrtno pravilna uz uvjet da takva mjesta ne utječu na krutost stropa i da za svaki uvučeni dio ploština omeđena stropom i konveksnom poligonalnom crtom koja ovija strop ne premašuje 5% ploštine stropa [7]. (Slika 6)
- Stropovi u ravnini moraju imati dovoljno veliku krutost prema bočnoj krutosti vertikalnih konstrukcijskih elemenata kako bi deformiranje stropa imalo neprimjetan učinak kod raspodjele sila na vertikalne elemente konstrukcije. Na temelju toga, tlocrtne oblike L, C, H I i X potrebno je dodatno preispitati [7].
- Odnos dulje i kraće tlocrtne dimenzije zgrade, vitkost $\lambda = L_{max}/L_{min}$, ne smije biti veća od 4 [7].
- Ekscentričnost konstrukcije e_0 i torzijski polumjer moraju biti u skladu sa sljedećim uvjetima, za svaki kat i svaki smjer proračuna [7]:

$$e_{0x} \leq 0,30r_x ; r_x > I_s$$

r_x – drugi korijen omjera torzijske i bočne krutosti u smjeru y (polumjer torzije)

I_s – polumjer inercije mase stropa u tlocrtu

e_{0x} – udaljenost između središta krutosti i središta masa mjerena po osi x, okomito na smjer proračuna



Slika 6: Jednostavna pravila za oblikovanje tlocrta građevine u potresnim područjima. Modificirano prema [2]

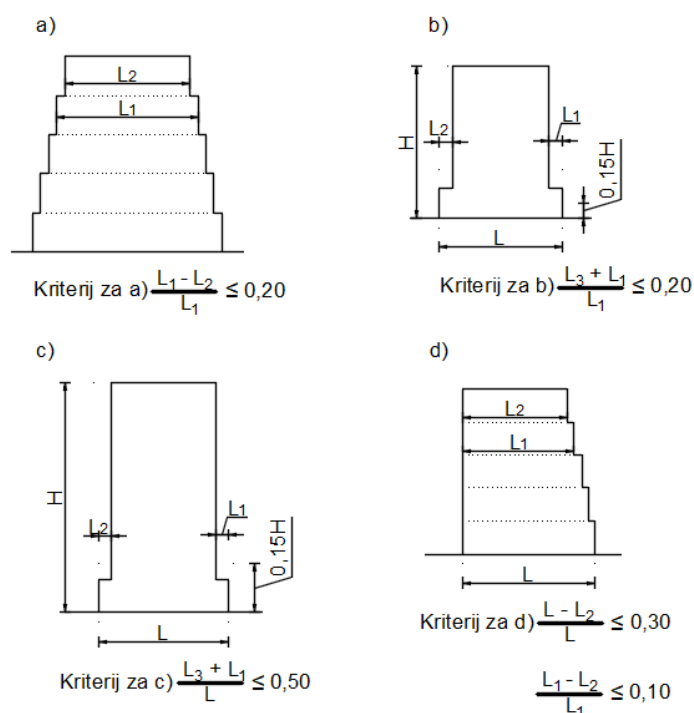
4.1.2. Kriterij pravilnosti po visini

Za zgrade koje će se kategorizirati kao pravilne po visini moraju biti ispunjeni svi sljedeći uvjeti:

- Nosivi zidovi, okviri ili jezgre moraju biti izvedeni bez prekida od temelja do vrha zgrade radi preuzimanja bočnih opterećenja [7].
- Nosivi elementi moraju imati stalan poprečni presjek ili takav da se postupno smanjuje od podnožja do vrha zgrade kako bi masa i bočna krutost katova bila konstantna [7].
- Kod zgrada koje imaju okvirnu konstrukciju odnos stvarne otpornosti kata i otpornosti zahtijevane proračunom ne treba se nerazmjerno mijenjati između susjednih katova.

U slučaju kada postoje uvučena mjesta potrebno je primijeniti sljedeće dodatne uvjete [7]:

- kada se presjek postupno smanjuje uz očuvanje osne simetrije, uvučeno mjesto na svakom katu ne smije biti veće od 20 % prethodne tlocrtno dimenzije u smjeru smanjenja (slike 7 a i 7 b) [7]
- kada se presjek smanjuje pojedinačno u donjih 15 % ukupne visine glavnog konstrukcijskog sustava uvučeno mjesto ne smije biti veće od 50 % prethodne tlocrtno dimenzije (slika 7 c); u tom slučaju treba konstrukciju u području podnožja unutar vertikalne projekcije opsega gornjih katova proračunati tako da preuzme najmanje 75 % horizontalnih poprečnih sila koje bi nastale u tom području u sličnoj građevini bez proširenja u podnožju [7]
- kada se presjek smanjuje nesimetrično, zbroj uvučenih mjesta na svim katovima ne smije biti veći od 30 % tlocrtnih dimenzija prvog kata iznad temelja ili iznad gornjeg ruba krutog podruma, a pojedino uvučeno mjesto ne smije biti veće od 10 % prethodnih tlocrtnih dimenzija [7] (slika 7 d).



Slika 7: Kriteriji pravilnosti zgrada s uvučenim mjestima. Modificirano prema [7]

4.2. Postupak proračuna metodom bočnih sila

Za postupak proračuna metodom bočnih sila potrebni parametri su geometrijske i materijalne značajke konstrukcije, opterećenja – vertikalna i horizontalna te faktor ponašanja. Već je rečeno da faktor ponašanja označava odnos između seizmičkih sila koje djeluju na konstrukciju uz potpuno elastičan odziv te proračunskih potresnih sila, a njegova vrijednost za svaki proračunski smjer dobiva se prema izrazu (6) [7]:

$$q = q_0 \cdot k_w \geq 1,5 \quad (6)$$

gdje su:

q_0 - osnovna vrijednost faktora ponašanja ovisna o tipu konstrukcijskog sustava i njegovoj pravilnosti po visini, prema Tablici 7.

k_w – faktor kojim se u obzir uzima prevladavajući oblik sloma konstrukcijskih sustava sa zidovima, prema Tablici 9.

Tablica 7: Osnovne vrijednosti faktora ponašanja q prema tipu konstrukcije [7]

Tip konstrukcije	Razred duktilnosti	
	DCM	DCH
okvirni sustav, dvojni sustav, sustav povezanih zidova	$3 \alpha_u / \alpha_1$	$4,5 \alpha_u / \alpha_1$
sustav nepovezanih zidova	3,0	$4 \alpha_u / \alpha_1$
torzijski savitljiv sustav	2,0	3,0
sustav obrnutog njihala	1,5	2,0

α_1 – vrijednost kojom se množi horizontalno potresno proračunsko djelovanje kako bi se prvo dostigla otpornost na savijanje u bilo kojem elementu konstrukcije dok sva druga proračunska djelovanja ostaju konstantna

α_u – vrijednost kojom se množi horizontalno potresno proračunsko djelovanje kako bi u određenom broju presjeka, dovoljnom za razvoj ukupne nestabilnosti konstrukcije nastali plastični zglobovi, pri čemu sva ostala proračunska djelovanja ostaju stalna; faktor α_u može se dobiti iz nelinearnog statičkog proračuna (postupnim guranjem).

Vrijednosti omjera α_u / α_1 dane su u Tablici 8.

Tablica 8: Približne vrijednosti faktora α_u/α_1 za zgrade pravilne u tlocrtu [7]

okviri i dvojni sustavi istovrijedni okvirnim	α_u/α_1
jednokatne zgrade	1,1
višekratni okviri s jednim poljem	1,2
višekratni okviri s više polja ili dvojni sustavi istovrijedni okvirnim	1,3
zidni sustavi ili dvojni sustavi istovrijedni zidnim	α_u/α_1
zidni sustavi sa samo dva nepovezana zida u svakom horizontalnom smjeru	1,0
drugi sustavi nepovezanih zidova	1,1
dvojni sustavi istovrijedni zidnim ili sustavi povezanih zidova	1,2

Tablica 9: Vrijednosti faktora k_w [7]

Vrsta konstrukcije	k_w
okvirni sustavi i dvojni sustavi istovrijedni okvirnim	1,0
zidni sustavi	$0,5 \leq (1+\alpha_0)/3 \leq 1,0$
sustavi istovrijedni zidnim sustavima	
torzijski savitljivi sustavi	

gdje je:

α_0 – prevladavajući geometrijski omjer zidova konstrukcijskoga sustava

Ukoliko omjer h_{wi}/l_{wi} svih zidova i konstrukcijskog sustava nema veliku razliku, prevladavajući geometrijski omjer α_0 može se odrediti prema izrazu (7) [2]:

$$\alpha_0 = \frac{\sum h_{wi}}{\sum l_{wi}} \quad (7)$$

gdje su:

h_{wi} – visina zida i

l_{wi} – duljina presjeka zida i

4.3. Izračun ukupne vrijednosti poprečne sile konstrukcije od potresa

Ukupna vrijednost poprečne sile građevine F_b u razini gornjeg ruba temelja za svaki horizontalni pravac djelovanja potresa određuje se izrazom (8) [7]:

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda \quad (8)$$

gdje su:

$S_d(T_1)$ - vrijednosti projektnog spektra za osnovni period vibracija konstrukcije T_1 za translacijska gibanja razmatranog pravca; ovo je projektna vrijednost jer je dobivena iz projektnog spektra [7]

m – ukupna masa građevine u trenutku djelovanja potresa koja se računa prema (9)

λ – popravni faktor čija je vrijednost $\lambda = 0,85$ ako je $T_1 \leq 2T_c$ i ako zgrada ima više od dva kata ili $\lambda = 1,00$ u drugim slučajevima [7]

Izraz prema kojem se računa ukupna masa građevine (9):

$$\sum G_{k,i} + \sum \psi_{E,i} Q_{k,i} \quad (9)$$

gdje su:

$G_{k,i}$ – karakteristična vrijednost stalnog djelovanja

$Q_{k,i}$ - karakteristična vrijednost promjenjivog djelovanja

$\psi_{E,i}$ – koeficijent kombinacije za promjenjivo djelovanje, dobiva se prema izrazu (10)

$$\psi_{E,i} = \varphi \psi_{2,i} \quad (10)$$

φ – koeficijent zauzetosti katova; ovisi o razredu građevine i stupnju opterećenosti pojedinog kata, vrijednosti su prikazane u Tablici 10.

$\psi_{2,i}$ - koeficijent za nazovistalne vrijednosti promjenjivog djelovanja, vrijednosti su prikazane u Tablici 4.

Tablica 10: Vrijednosti faktora φ za proračun koeficijenta kombinacije $\psi_{E,i}$

[7]

Tip promjenjivog djelovanja	Kat	Koeficijent φ
Kategorije A – C	Krov	1,00
	Katovi s povezanom zauzetošću	0,80
	Neovisno zauzeti katovi	0,50
Kategorije D – F Arhivi		1,00

4.4. Određivanje perioda

Za određivanje perioda T_1 može se koristiti empirijski izraz iz EC8, no postoje i drugi autori koji su predložili svoje izraze. Svi ovise o visini građevine, odnosno njezinoj katnosti.

Empirijski izraz prema EC8 (11) može se koristiti za građevine čija ukupna visina ne prelazi 80 m [2].

$$T_1 = C_t \cdot H^{\frac{3}{4}} \quad (11)$$

gdje su:

T_1 – osnovni period konstrukcije (u sekundama)

C_t – koeficijent koji ima sljedeće vrijednosti: 0,085 za čelične prostorne okvirne konstrukcije bez dijagonala; 0,075 za prostorne betonske okvirne konstrukcije i čelične konstrukcije s ekscentričnim dijagonalama; 0,050 za sve druge konstrukcije

H – visina građevine [m]; mjereno od ruba temelja ili krutog podruma

Ostali izrazi navedeni su u nastavku. U svakom izrazu T_1 [s] označava osnovni period konstrukcije, a N broj katova [12].

Izraz prema Kobayashiju (12) [12]:

$$T_1 = 0,105 \cdot N \quad (12)$$

Izraz prema Navarru (13) [12]:

$$T_1 = (0,049 \mp 0,001) \cdot N \quad (13)$$

Opći empirijski izraz prema knjizi profesora Aničića (14) [12]:

$$T_1 = 0,1 \cdot N \quad (14)$$

4.5. Raspodjela ukupne poprečne sile potresa po visini građevine

Raspodjela ukupne poprečne sile po visini građevine temelji se na pretpostavci da ukupna masa građevine čini zamjenjujuću masu koja pripada samo prvom tonu vibracija. No, to je samo aproksimativna pretpostavka jer prema modalnom proračunu svaki ton ima odgovarajuću poprečnu silu koja je proporcionalna efektivnoj težini tog tona [2].

Ukupna potresna poprečna sila raspodjeljuje se po katovima konstrukcije te prema tome horizontalna sila i -tog kata iznosi (15) [2]:

$$F_i = F_b \cdot \frac{s_i \cdot m_i}{\sum s_j \cdot m_j} \quad (15)$$

Gdje su:

F_i – sila koja djeluje na i – tom katu

F_b - ukupna proračunska poprečna sila (eng. *base shear*) u razini gornjeg ruba temelja

s_i, s_j – „pomaci“ masa m_i i m_j u osnovnom tonu

m_i, m_j – mase katova i, j određene prema (9)

Za slučaj kada je vlastiti ton aproksimiran pravom crtom, horizontalne sile računaju se prema (16) [2]:

$$F_i = F_b \cdot \frac{z_i \cdot m_i}{\sum z_j \cdot m_j} \quad (16)$$

z_i, z_j – visinski položaji masa m_i i m_j mjereno od gornjeg ruba temelja

5. NELINEARNI STATIČKI PRORAČUN (METODA POSTUPNOG GURANJA)

Iako se uvođenjem faktora ponašanja q u linearni proračun obuhvatilo nelinearno ponašanje konstrukcije u potresu, temeljem te metode linearno statički proračun i dalje se primjenjuje stoga je uočena potreba za uvođenjem u praksu jedne nelinearne statičke metode proračuna. Nelinearna statička metoda uvedena je u Eurokod 8 2004. godine pod nazivom: Proračun ciljanog pomaka (eng. *target displacement*) za nelinearnu statičku metodu postupnog guranja (eng. *pushover*), a poznatija je kao N2 metoda. Slovo N označava nelinearnu metodu, a broj 2 da su primijenjena dva matematička modela [2].

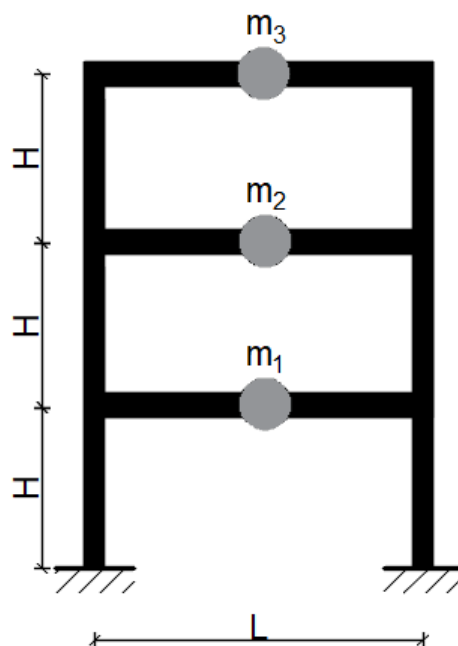
U metodi N2 kombinira se metoda postupnog guranja modela s više stupnjeva slobode (MDOF) sa spektralnim proračunom ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode (SDOF). Na taj način uspoređuju se seizmički kapacitet konstrukcije (eng. *capacity*) i seizmički zahtjev (eng. *demand*) jer se kontroli oštećenja želi posvetiti veća pažnja. Format metode je ubrzanje – pomak (AD) kako bi se omogućila vizualna interpretacija postupka i odnosa između osnovnih vrijednosti koje imaju utjecaj na seizmički odziv konstrukcije. Rezultati metode su prihvatljivo točni u slučaju kada konstrukcija ima dominantan utjecaj osciliranja prvog tona, zato je dosta ograničena za vrste konstrukcija na koje je primjenjiva [2].

5.1. Postupak metode proračuna N2

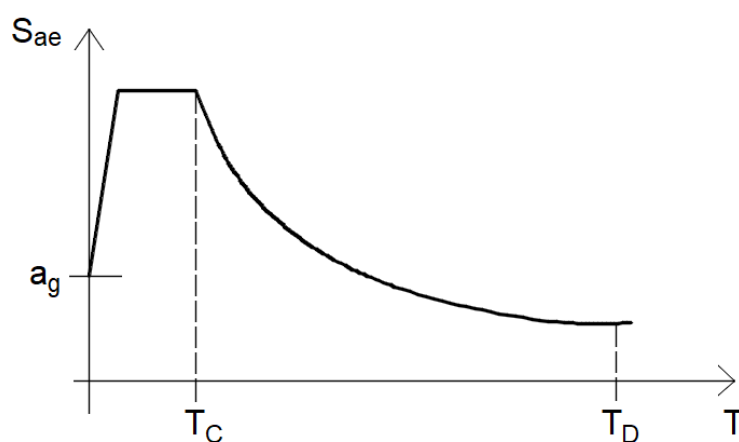
Metoda proračuna provodi se u osam koraka [2]:

- 1. korak - Podaci

U ovom koraku navode se podaci o modelu – geometrija, broj katova i poprečni presjeci. Osim toga, treba i podatak o nelinearnom odnosu sila – pomak elemenata koji su opterećeni monotonim opterećenjem. Obično je to bilinearni ili trilinearni odnos moment – rotacija. Potresni zahtjev definira se u obliku elastičnog spektra ubrzanja S_{ae} . [2]. Podaci su prikazani na Slici 8 – prikaz modela i Slici 9 – elastični spektar ubrzanja.



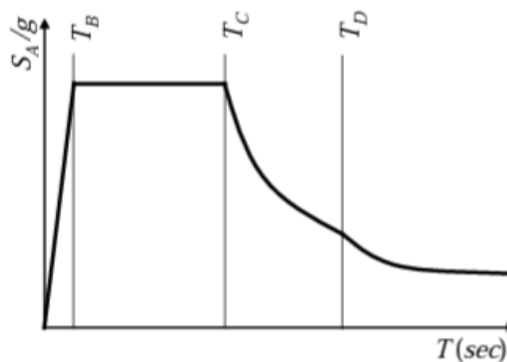
Slika 8: Prikaz modela za analizu. Modificirano prema [13]



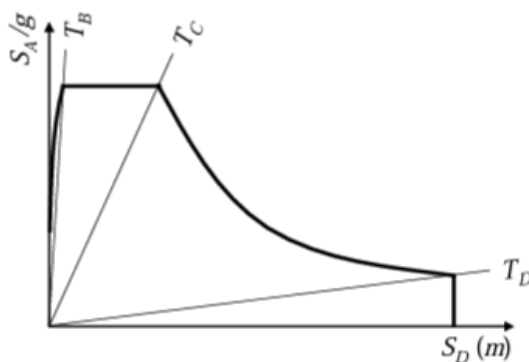
Slika 9: Elastični spektar ubrzanja [13]

- 2. korak – Potresno opterećenje u „AD“ zapisu

Kako bi mogli usporediti potresnu sposobnost i potresni zahtjev, potrebno je uobičajeni spektar u ubrzanje – period zapisu transformirati u AD format zapisa. On predstavlja nelinearni spektar u ubrzanje – pomak zapisu (eng. *Acceleration – Displacement*). Transformacija je prikazana na Slici 10 i 11 [2].



Slika 10: Elastični spektar ubrzanja - tradicionalni format [13]



Slika 11: Elastični spektar ubrzanja - AD format [13]

Izraz za elastičan sustav s jednim stupnjem slobode glasi (17):

$$S_{de} = \omega^2 \cdot S_{ae} = \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot S_{ae} \quad (17)$$

gdje su S_{ae} i S_{de} vrijednosti iz elastičnih spektara ubrzanja i pomaka, za određeni osnovni period T i stupanj viskoznog prigušenja [2].

Za nelinearni sustav s jednim stupnjem slobode, gdje je odnos između sile i pomaka bilinearan, spektralno ubrzanje S_{ae} i spektralni pomak S_{de} određuju pomoću izraza (18) i (19) [2]:

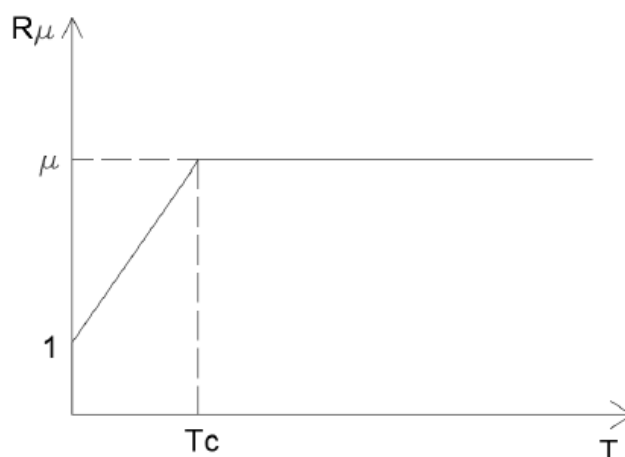
$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \quad (18)$$

$$S_d = \frac{\mu}{R_\mu} \cdot S_{de} = \frac{\mu}{R_\mu} \cdot \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot S_{ae} = \mu \cdot \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot S_a \quad (19)$$

U navedenim izrazima μ predstavlja faktor duktilnosti koji se definira kao odnos između maksimalnog pomaka i pomaka na granici popuštanja, a R_μ označava faktor redukcije uslijed duktilnosti, odnosno histereznog trošenja energije kod duktilnih konstrukcija. Za određivanje faktora redukcije R_μ koristi se bilinearni spektar, prikazan na Slici 12, definiran izrazima (20) i (21) [2].

$$R_\mu = (\mu - 1) \cdot \frac{T}{T_c} + 1, \quad \text{za } T < T_c \quad (20)$$

$$R_\mu = \mu \quad \text{za } T \geq T_c \quad (21)$$



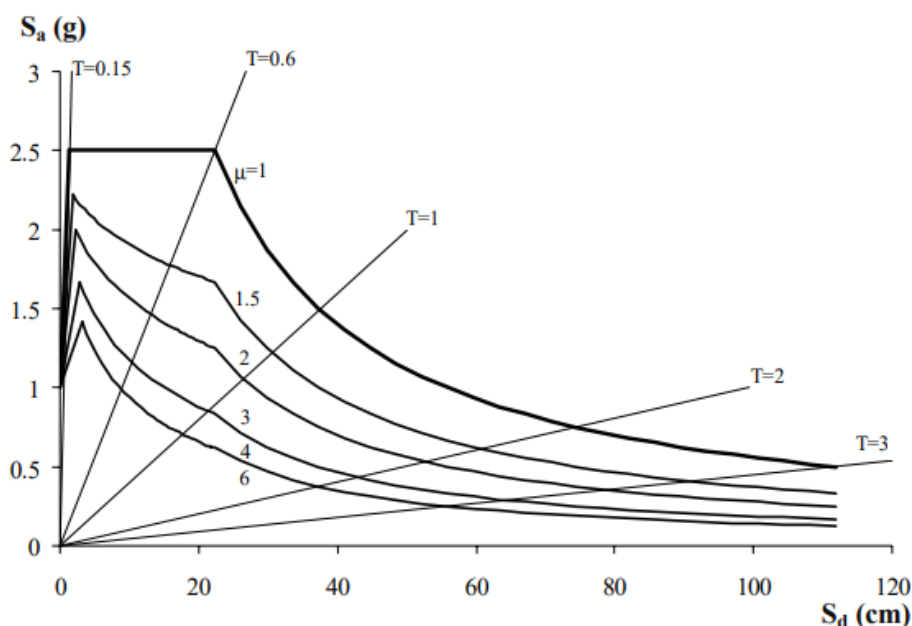
Slika 12: Bilinearni spektar $R_\mu - T$ [14]

U izrazima (20) i (21) T_c je karakteristični period gibanja podloge. Uobičajeno se definira kao prijelazno područje između dijela konstantnog ubrzanja spektra odziva (područje kratkih perioda) i dijela konstantne brzine (područje dugih perioda). Prema Slici 10 zaključuje se da za to područje vrijedi (22). Također, iz jednadžbi (19), (20) i (21) konstatira se da je u području srednjih $T_B \leq T \leq T_c$ i dugih perioda, $T_c \leq T \leq T_D$, pomak neelastičnog sustava jednak pomaku odgovarajućeg elastičnog sustava s istim periodom (23) [2].

$$S_{ve} = \frac{dS_{de}}{dt} = const. \quad (22)$$

$$S_d = S_{de} \quad (23)$$

Polazeći od elastičnog spektra prikazanog na Slici 10 uz jednadžbe (20) do (23) dobiva zahtijevani nelinearni spektar (potresni zahtjev) u AD formatu za konstantne faktore duktilnosti μ , prikazan na Slici 13 [2].

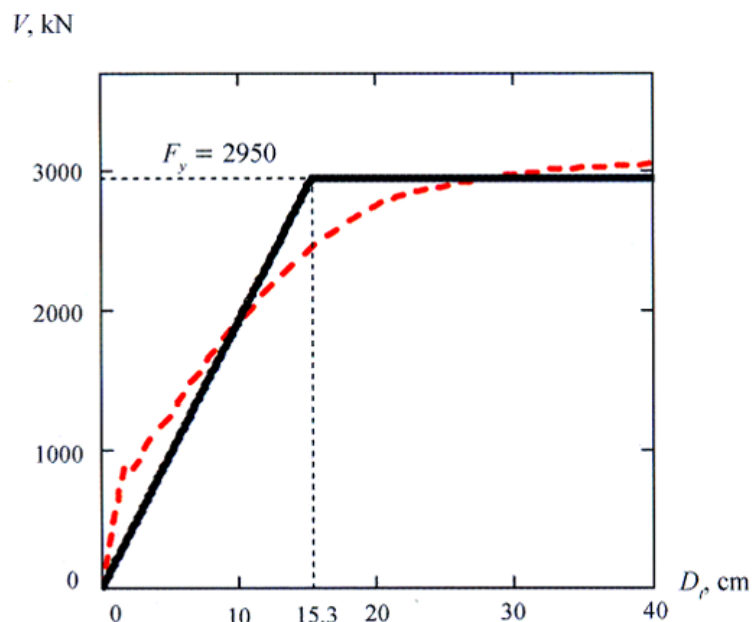


Slika 13: Zahtijevani nelinearni spektar za razne konstantne vrijednosti faktora duktilnosti μ u AD formatu [13]

- 3. korak – Metoda postupnog guranja (eng. *pushover*)

Kod provođenja metode postupnog guranja konstrukciju je potrebno podvrgnuti monotono rastućem obliku bočnih sila. Takvo opterećenje su inercijalne sile koje se u konstrukciji javljaju tijekom potresa. Povećanjem opterećenja dolazi do popuštanja konstruktivnih elemenata te dolazi do smanjenja krutosti konstrukcije. Rezultat provođenja metode postupnog guranja je karakterističan nelinearni odnos sile i pomaka. Slobodno je odabrati bilo koju silu i bilo koji pomak, no najčešće se prikazuje kao odnos ukupne poprečne sile u razini temelja V (eng. *base shear*) i pomaka na vrhu zgrade D_t

(eng. *top Displacement*) (Slika 14). Ta krivulja naziva se krivulja sposobnosti nosivosti - ujedno daje informacije o krutosti, čvrstoći i duktilnosti [2].

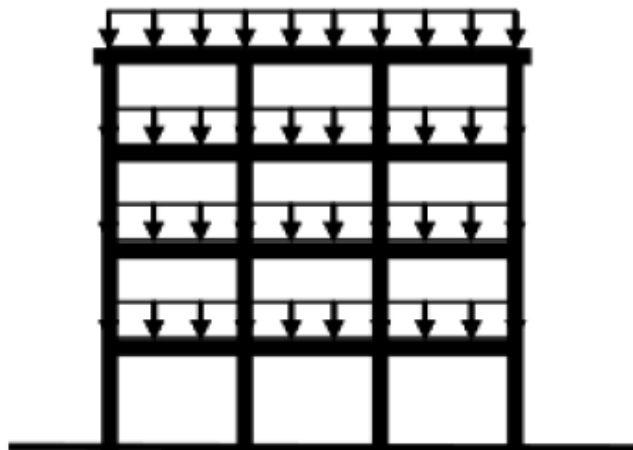


Slika 14: Krivulja kapaciteta - stvarna i idealizirana (isprekidano) [15]

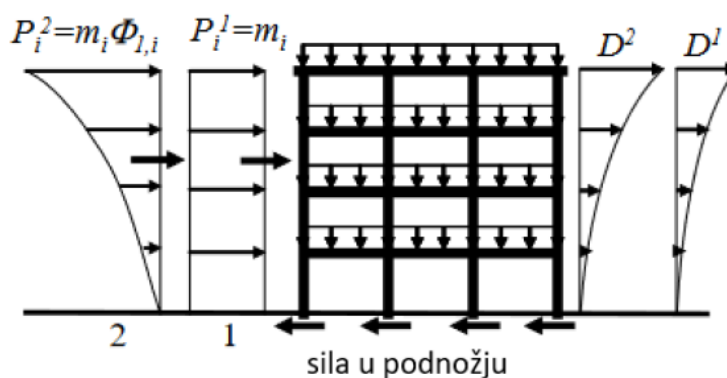
Unutar proračuna metodom postupnog guranja važno je odrediti način raspodjele bočnog opterećenja jer on imitira protupotresne inercijalne sile u središtu mase svakog kata. Tri su različita načina raspodjele opterećenja [16]:

- trokutasti: raspodjela bočnih opterećenja raste linearno po visini
- jednoliki: raspodjela bočnih opterećenja proporcionalna je masi, ubrzanje je jednolično po visini
- modalni: raspodjela bočnih opterećenja u promatranom smjeru određena elastičnim proračunom

Iako svi načini raspodjele daju slične rezultate, prema EC8 treba upotrijebiti najmanje dva načina – jednoliki i modalni te im se zatim traži anvelopa rješenja. Prikaz opterećenja na konstrukciju dan je na Slici 15, a prikaz načina raspodjele horizontalnih opterećenja na Slici 16.



Slika 15: Prikaz vertikalnog opterećenja na konstrukciju [13]



Slika 16: Načini raspodjele horizontalnog opterećenja - jednolično (1) i modalno (2) [13]

Vektor bočnog opterećenja, P , koji se koristi u metodi postupnog guranja, određuje se prema (24) [2]:

$$P = p \cdot \psi = p \cdot m \cdot \phi \quad (24)$$

gdje su:

p – intenzitet bočnih opterećenja

ψ – funkcija raspodjele bočnih opterećenja, povezana je s ϕ

ϕ – pretpostavljeni oblik pomaka

m – dijagonalna matrica masa

Prema tome, iz jednadžbe (24) slijedi da je bočna sila na i -tom katu P_i jednaka (25) [2]:

$$P_i = p \cdot m_i \cdot \phi_i \quad (25)$$

gdje su:

m_i – masa na i -tom katu

ϕ_i – pomak na i -tom katu

Pomaci se normaliziraju tako da je pomak na vrhu čvora $\phi_n = 1,00$ [15].

- 4. korak – Ekvivalentni model s jednim stupnjem slobode i dijagram kapaciteta (eng. *capacity*)

Kod postupka proračuna metodom N2 potresni zahtjev određuje se korištenjem spektra odziva sustava s jednim stupnjem slobode, stoga je i konstrukciju potrebno modelirati ekvivalentnim modelom s jednim stupnjem slobode. Kako bise odredile karakteristike ekvivalentnog modela sustava s jednim stupnjem slobode polazi se od jednadžbe gibanja ravninskog sustava s više stupnjeva slobode (26):

$$m \cdot \ddot{u} + R = -m \cdot 1 \cdot a \quad (26)$$

gdje su u i R vektori pomaka i unutarnjih sila, 1 je jedinični vektor, dok je a ubrzanje podloge u funkciji vremena [2].

Prva pretpostavka je da je oblik pomaka ϕ nepromjenjiv za vrijeme odziva konstrukcije tijekom potresa. Vektor pomaka u definira se na sljedeći način (27):

$$u = \phi \cdot D_t \quad (27)$$

gdje oznaka D_t predstavlja krovni pomak u funkciji vremena [2]. Već je spomenuto da se vektor ϕ normalizira tako da vrijednost na krovu iznosi jedan.

S obzirom na to da su unutarnje sile R jednake statičkim vanjskim opterećenjima P (28),

$$P = R \quad (28)$$

uvrštanjem izraza (24), (27) i (28) u izraz (26) i množenjem tako dobivenog izraza s transponiranim vektorom ϕ^T dobiva se izraz (29) [2]:

$$\phi^T \cdot m \cdot \phi \cdot \ddot{D}_t + \phi^T \cdot m \cdot \phi \cdot p = -\phi^T \cdot m \cdot 1 \cdot a \quad (29)$$

Množenjem i dijeljenjem lijeve strane izraza (29) s $\phi^T \cdot m \cdot 1$, konačno se dobiva jednačba gibanja ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode (30):

$$m^* \cdot \ddot{D}^* + F^* = -m^* \cdot a \quad (30)$$

gdje je m^* ekvivalentna masa sustava s jednim stupnjem slobode (31), a D^* i F^* predstavljaju pomak (32) i silu (33) ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode [2].

$$m^* = \phi^T \cdot m \cdot 1 = \sum m_i \cdot \phi_i \quad (31)$$

$$D^* = \frac{D_t}{\Gamma} \quad (32)$$

$$F^* = \frac{V}{\Gamma} \quad (33)$$

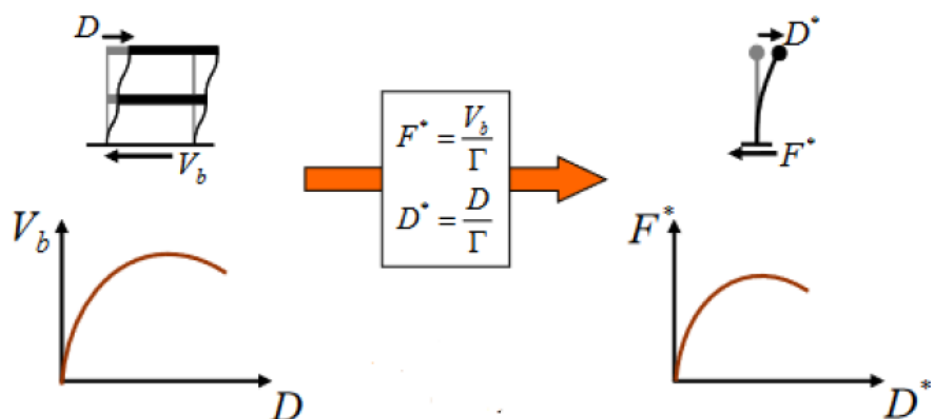
Oznaka V predstavlja poprečnu silu u razini temelja modela konstrukcije s više stupnjeva slobode (34) [2].

$$V = \sum P_i = \phi^T \cdot m \cdot 1 \cdot p = p \cdot \sum m_i \cdot \phi_i = p \cdot m^* \quad (34)$$

Konstanta Γ naziva se faktor transformacije, a služi kao kontrola prijelaza iz sustava s više stupnjeva slobode na sustav s jednim stupnjem slobode [2]. Izražava se izrazom (35):

$$\Gamma = \frac{\phi^T \cdot m \cdot 1}{\phi^T \cdot m \cdot \phi} = \frac{\sum m_i \cdot \phi_i}{\sum m_i \cdot \phi_i^2} = \frac{m^*}{\sum m_i \cdot \phi_i^2} \quad (35)$$

Transformacija sustava s više stupnjeva slobode u sustav s jednim stupnjem slobode prikazan je na Slici 17.



Slika 17: Transformacija sustava s više stupnjeva slobode u ekvivalentan sustav s jednim stupnjem slobode [13]

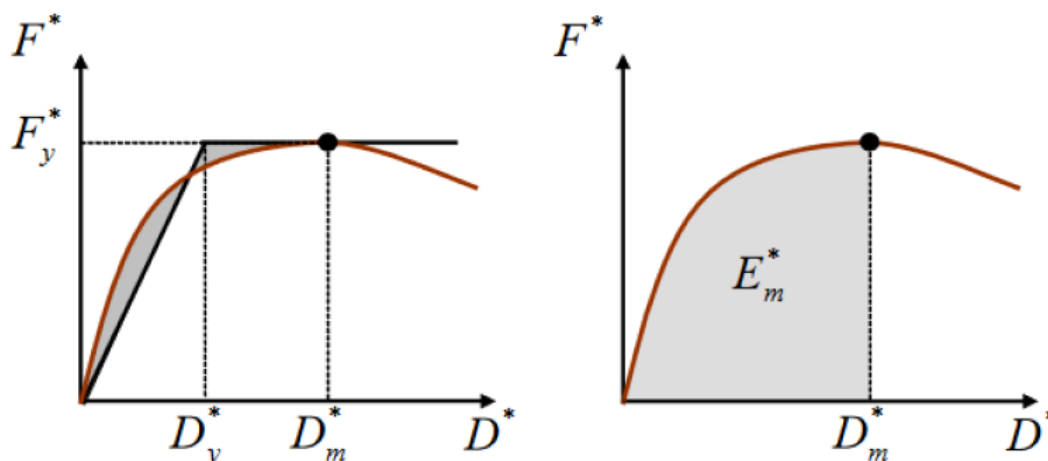
Za određivanje pojednostavljene elastične – idealno plastične veze odnosa sila – pomak za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode služi Dodatak B Eurokoda 8. Prikaz bilinearne idealizacije krivulje sila - pomak dan je na Slici 18. Sila pri popuštanju F_y^* je sila u razini temelja koja označava stvaranje plastičnog mehanizma, a ujedno i krajnju čvrstoću idealiziranog sustava. Početna krutost k_{init}^* ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode uzima se kao krutost početnog modela s više stupnjeva slobode koja je definirana $V - D_t$ dijagramom (36). Određuje se uz uvjeta da je površina ispod stvarne i idealizirane krivulje sila – pomak jednaka [2].

$$k_{init}^* = \frac{F_y^*}{D_y^*} \quad (36)$$

Shodno tome, pomak na granici popuštanja idealiziranog sustava s jednim stupnjem slobode D_y^* ima vrijednost (37) [13]:

$$D_y^* = 2 \cdot \left(D_m^* - \frac{E_m^*}{E_y^*} \right) \quad (37)$$

gdje je E_m^* modul elastičnosti sustava s jednim stupnjem slobode, odnosno stvarna energija deformacije do stvaranja plastičnog mehanizma. [13]



Slika 18. Bilinearna idealizacija odnosa sila - pomak [13]

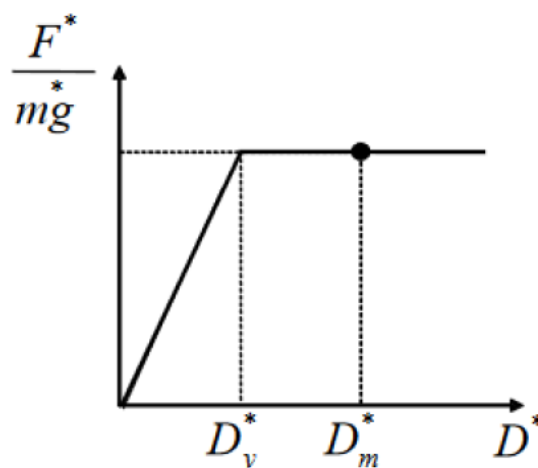
Razliku odnosa sila – pomak sustava s više stupnjeva slobode i sustava s jednim stupnjem slobode čini faktor transformacije Γ jer se ista vrijednost koristi i za transformaciju pomaka (32) i sile (33). Uz poznate vrijednosti sile, pomaka i mase za sustav s jednim stupnjem slobode može se odrediti elastični period sustava s jednim stupnjem slobode (38) [2].

$$T^* = \frac{2\pi}{\omega^2} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m^*}{k_{init}^*}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m^* \cdot D_y^*}{F_y^*}} \quad (38)$$

Na kraju se može dobiti i vrijednost ubrzanja na granici popuštanja u AD formatu (39) [2].

$$S_{ay} = \frac{F_y^*}{m^*} \quad (39)$$

U konačnici, izrazom (39) krivulja sposobnosti nosivosti transformira se u dijagram ubrzanja u odnosu na pomak sustava s jednim stupnjem slobode, prikazan na Slici 19 [13].

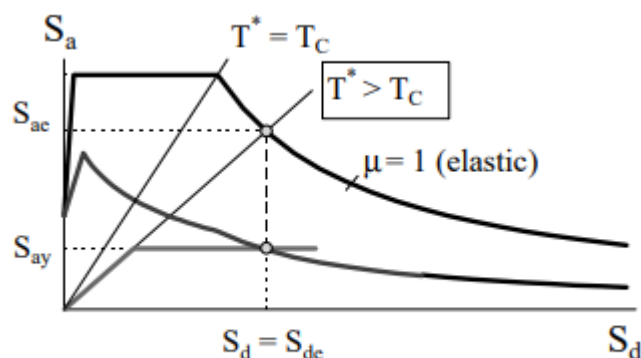


Slika 19: Spektar kapaciteta sustava s jednim stupnjem slobode [13]

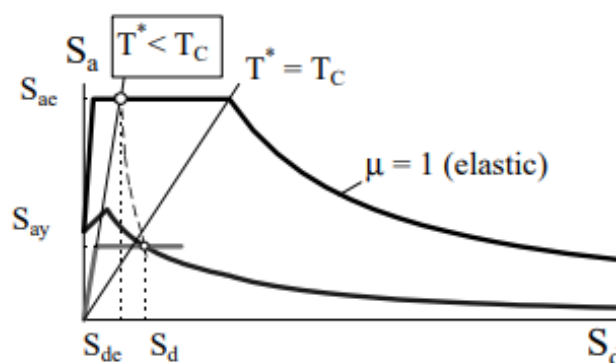
- 5. korak – Potresni zahtjev (eng. *demand*) za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode

Za određivanje potresnog zahtjeva kod konstrukcija sa srednjim i dugim periodom za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode služi grafički postupak prikazan na Slici 20. Za konstrukcije s kratkim periodima prikazan je postupak na Slici 21. Kada se presječe radijalni pravac na ordinati koja odgovara elastičnoj periodi T^* idealiziranog bilinearnog sustava, s elastičnim zahtijevanim spektrom, dobiva se vrijednost zahtijevanog elastičnog ubrzanja S_{ae} kao i zahtijevani elastični pomak S_{de} . Ubrzanje na granici popuštanja S_{ay} označava vrijednost zahtijevanog ubrzanja i kapacitet neelastičnog sustava, koji se računa prema (39). Faktor redukcije R_μ određuje se kao omjer između ubrzanja konstrukcije s neograničenim elastičnim ponašanjem S_{ae} i ubrzanja konstrukcije s ograničenom čvrstoćom S_{ay} (40) [2].

$$R_\mu = \frac{S_{ae}}{S_{ay}} = \frac{S_{ae}(T^*) \cdot m^*}{F_y^*} \quad (40)$$



Slika 20: Određivanje ciljanog pomaka za područje dugih i srednjih perioda [14]



Slika 21: Određivanje ciljanog pomaka za područje kratkih perioda [14]

Za proračun ciljanog pomaka vrha građevine $S_d = D^*$ perioda T^* koristi se određeni izraz ovisno o tome je li građevina s kratkim periodima i njen odziv elastičan (41), građevina s kratkim periodima uz nelinearan odziv (42) ili je građevina sa srednjim i dugim periodima (43) [7].

Za područje kratkih perioda vrijedi $T^* < T_c$ i

a) elastičan odziv građevine $S_{ay} \geq S_{ae}(T^*)$ (36):

$$D_t^* = D_{et}^* \quad (41)$$

b) nelinearan odziv građevine $S_{ay} < S_{ae}(T^*)$ (37):

$$D_t^* = \frac{D_{et}^*}{R_\mu} (1 + (R_\mu - 1) \cdot \frac{T_c}{T^*}) \quad (42)$$

Za područje srednjih i dugih perioda vrijedi $T^* \geq T_c$ i izraz (38):

$$D_t^* = D_{et}^* \quad (43)$$

- 6. korak – Globalni potresni zahtjev (eng. *demand*) za sustav s više stupnjeva slobode

U ovom koraku potrebno je transformirati zahtijevani pomak sustava s jednim stupnjem slobode D^* u globalni zahtijevani maksimalni pomak sustava s više stupnjeva slobode prema izrazu (32). Odnosno, ako se gleda krovni pomak D_t^* tada vrijedi izraz (44):

$$D_t = D_t^* \cdot \Gamma \quad (44)$$

gdje je D_t ciljani pomak [2].

- 7. korak – Lokalni potresni zahtjev (eng. *demand*) za sustav s više stupnjeva slobode

Lokalni potresni zahtjevi određuju se uz pomoć metode postupnog guranja na način da se konstrukcija gura sve dok se ne dođe do vrijednosti ciljanog pomaka D_t koji je određen u prethodnom koraku [2].

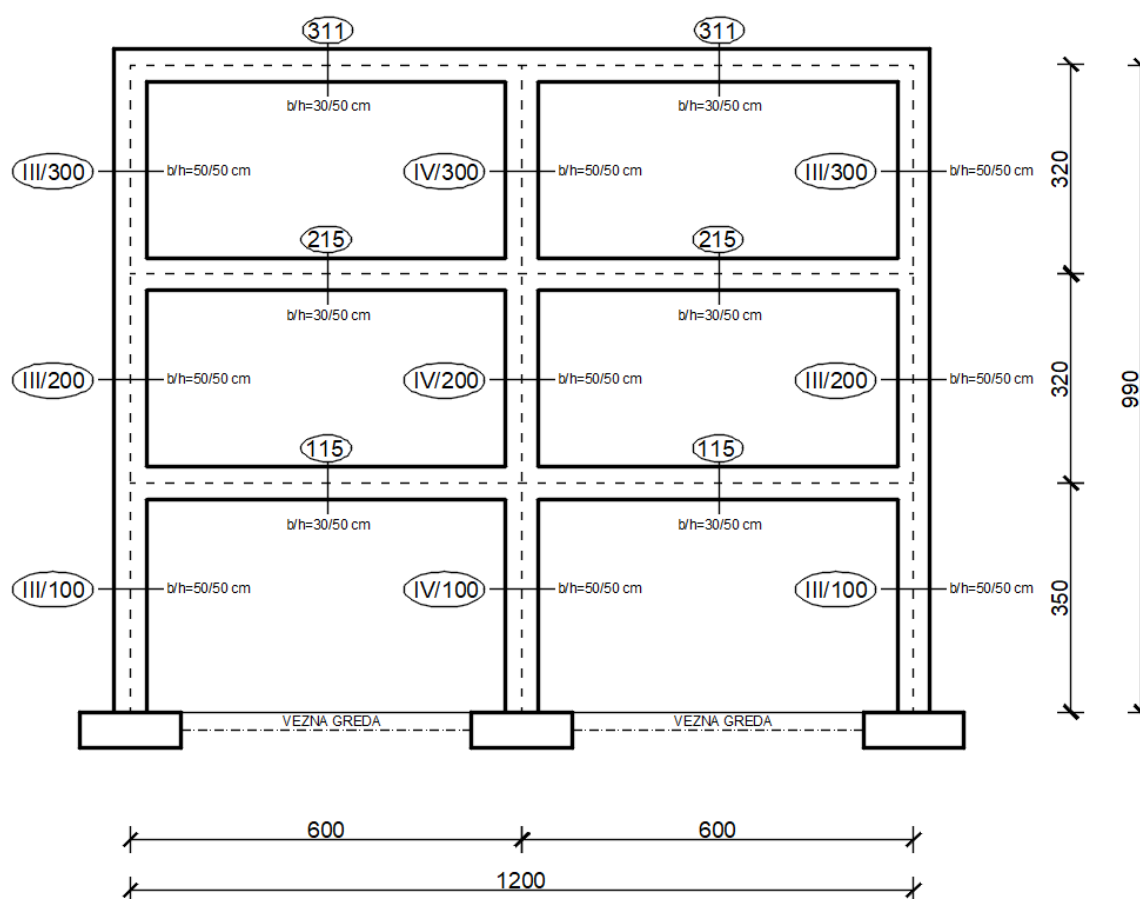
- 8. korak – Procjena ponašanja (analiza oštećenja)

Očekivano ponašanje može se procijeniti usporedbom globalnih i lokalnih potresnih zahtjeva s kapacitetom odgovarajućih razina ponašanja. Usporedbom kapaciteta pomaka i pomaka prema potresnom zahtjevu može se utvrditi globalno ponašanje konstrukcije, kao što su mehanizam sloma i redoslijed pojave plastičnih zglobova [2].

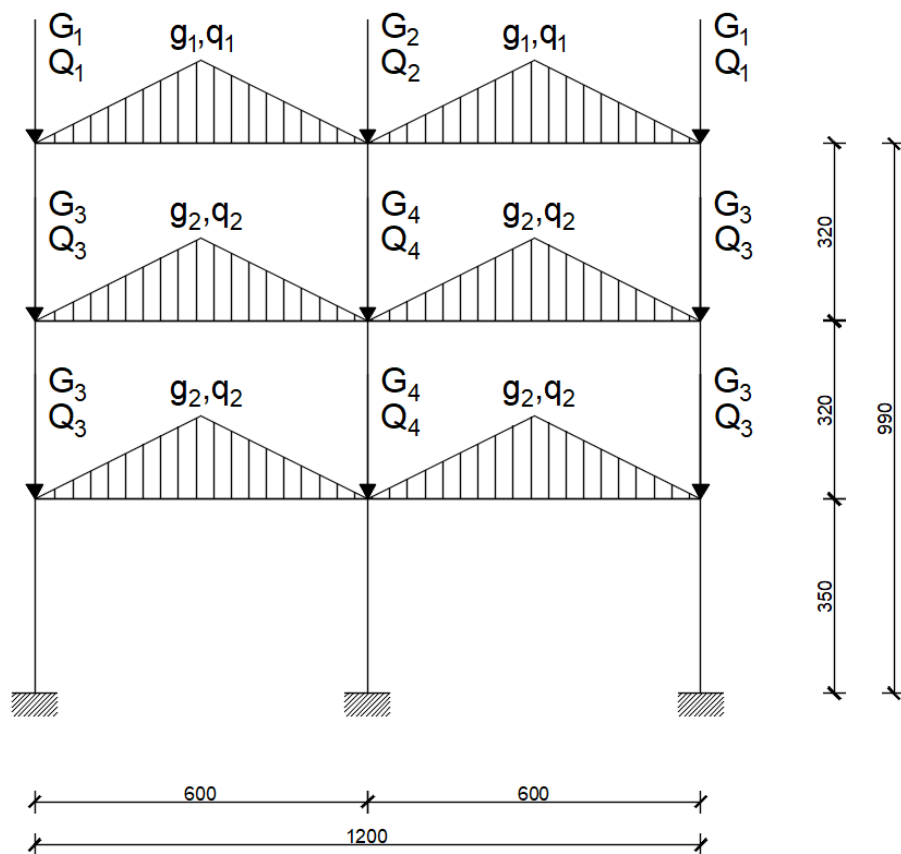
6. TEHNIČKI OPIS

6.1. Općenito

Proračunski model je poslovna zgrada ($g_k = 2,00 \text{ kN/m}^2$) koja se sastoji od prizemlja i dva kata. Smještena je u Rijeci, na nadmorskoj visini od 200 m.n.m. Tlocrtni gabariti konstrukcije su $25,6 \times 12,0 \text{ m}$. Od kote terena doseže visinu 9,75 m, a od temeljne ploče 10,2 m. Svijetla visina prizemlja je 3,5 m, dok su visine prvog i drugog kata jednake – iznose 3,2 m [17]. Prikaz modela okvira nalazi se na Slici 22, a opterećenja na model na Slici 23. U Tablici 11 dane su vrijednosti opterećenja.



Slika 22: Proračunski model armiranobetonskog okvira [izradio autor]



Slika 23: Opterećenja na okvir [izradio autor]

Tablica 11. Vrijednosti opterećenja na okvir [izradio autor]

VERTIKALNA OPTEREĆENJA NA OKVIR			
OPTEREĆENJE	IZNOS	MJ. JEDINICA	POTRESNA KOMBINACIJA $P=G+0,3Q$ [kN]
G_1	145,48	kN	146,70
Q_1	4,08	kN	
G_2	223,70	kN	226,15
Q_2	8,16	kN	
G_3	129,61	kN	135,73
Q_3	20,40	kN	
G_4	168,01	kN	180,25
Q_4	40,80	kN	
g_1	61,56	kN/m	62,28
q_1	2,40	kN/m	
g_2	45,18	kN/m	48,78
q_2	12,00	kN/m	

6.2. Opis konstrukcije

Konstrukcija završava s ravnim neprohodnim krovom čiji je završni sloj pijesak, a na njemu se nalazi betonska atika visine 34 cm. Cijela konstrukcija izvedena je kao monolitna konstrukcija od armiranog betona. Debljina armiranobetonskih međukatnih ploča je 20 cm te su nosive u dva smjera, a oslanjaju se na uzdužne i poprečne grede. Poprečni presjeci greda su 30 x 50 cm, a stupova 50 x 50 cm. Kao ukrućenje okvira u uzdužnom smjeru služe armiranobetonski zidovi debljine 18 cm. Pročelje okvira ispunjeno je zidanim opečnim blokovima debljine 30 cm, a pregradni zidovi debljine 10 cm izvedeni su od gips-kartonskih ploča. Temeljno tlo je kategorije A. Temeljnu konstrukciju čine temeljne ploče debljine 10 cm i temelji samci dimenzije 150 x 150 x 55 cm [17].

6.3. Proračun konstrukcije

Konstrukcija je projektirana prema važećim normama i propisima HRN EN 1992 i HRN EN 1998. Model konstrukcije čini ravninski okvir koji je proračunan u programskom paketu StaadPRO V8i za sva vertikalna i horizontalna djelovanja [17].

Potresni proračun i provjera potresne otpornosti armiranobetonske zgrade provodi se najprije linearno elastičnim proračunom – metodom bočnih sila, uz zadovoljene kriterija proračuna prema sposobnosti nosivosti i lokalne duktilnosti konstrukcije [17]. Takav dimenzionirani model je polazni model za proračun metodom postupnog guranja. Nakon što je dinamičkim proračunom određen period konstrukcije, ponovljeno je dimenzioniranje konstrukcije s racionalnijim odabirom armature. Zatim je opet provedena metoda postupnog guranja.

Materijali koji se koriste pri modeliranju konstrukcije su razred betona C30/37 te čelik za armiranje B500B [17].

7. PRIMJENA METODE POSTUPNOG GURANJA NA ZADANI MODEL

Modeliranje okvira i proračun metodom postupnog guranja provedeni su u programskom paketu *SeismoStruct*. To je softver koji ima mogućnost predviđanja ponašanja konstrukcija pod statičkim ili dinamičkim opterećenjem gdje su u proračun uključene geometrijske nelinearnosti i neelastičnost materijala [18]. U daljnjem tekstu objašnjeno je modeliranje okvira te postupak provođenja potresnog proračuna. Na kraju su prikazani rezultati koji su zatim uspoređeni s prethodno dobivenim rezultatima iz diplomskog rada „*Nelinearni statički proračun potresne otpornosti armiranobetonskog višekratnog okvira*“ autora Dorian Brnića. Oni su u cijelosti dani u *Prilogu 1*.

7.1. Ulazni podaci

U korisničkom sučelju softvera *SeismoStruct* prva kartica je *Materials*, stoga modeliranje okvira započinje s definiranjem materija, odnosno njihovih karakteristika. Vrste materijala su već spomenute – beton C30/37 i čelik za armiranje B500B.

Odnos naprezanje - deformacija prema kojem se definira ponašanje betona je *con_ma*, odnosno *Mander et al. nonlinear concrete model*. To je jednoosni nelinearni model ponašanja ovijenog betona, gdje su u obzir uzeti učinci ovijanja betona poprečnom armaturom. Učinci su uzeti u obzir pretpostavkom konstantnog ovijanja u cijelom rasponu naprezanja i deformacija [18]. Prikaz materijalnih karakteristika betona nalazi se na Slici 24, a odnos naprezanje – deformacija zadanog modela ponašanja nalazi se na Slici 25.

Parametri potrebni za definiranje ponašanja betona C30/37 su:

- srednja tlačna čvrstoća, f_{cm} : 38000,00 kPa
- srednja vlačna čvrstoća, f_{ctm} : 2900,00 kPa
- početni modul elastičnosti, E_0 : 30 GPa $\rightarrow 3 \cdot 10^7$ kPa
- deformacija pri vršnom naprežanju, ε_{c1} : 0,0022 m/m
- specifična težina betona, γ_{AB} : 25 kN/m³

Ostali parametri koji ovdje nisu navedeni *SeismoStruct* definira sam.

Edit Material Properties

Material Name:

Material Type: Note: Go the Constitutive Models' Settings menu to define which material models are displayed here

Mander et al. nonlinear concrete model

Parameters for Code-based Checks

Existing_Material New_Material

Strength

Mean Strength

Lower-bound Strength

Ok Cancel Help

Sample Plot
Material Properties

Compressive Strength (kPa)

Tensile strength (kPa)

Modulus of elasticity (kPa)

Strain at peak stress (m/m)

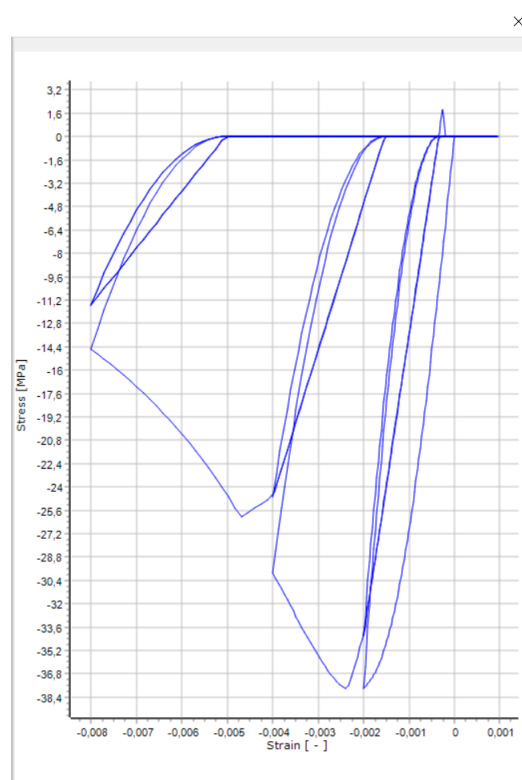
Specific Weight (kN/m3)

Sample Plot
Confinement Factor (indicative value)

The confinement factor specified hereby is **indicative** and is employed only for **display purposes**. The confinement factors employed in the analysis are defined in the Sections module, based on the sections' reinforcement.

(Pseudo)Time	Strain
8	-0,004
9	0,001
10	-0,008
11	0,001
12	-0,008
13	0,001
14	-0,008
15	0,001
16	-0,008

Slika 24: Materijalne karakteristike betona C30/37



Slika 25: Odnos naprezanje - deformacija betona C30/37

Odnos naprezanje – deformacija čelika za armiranje definiran je modelom ponašanja *stl_mp*, odnosno *Menegotto – Pinto steel model*. Taj model ponašanja daje točnije rezultate ponašanja armiranobetonskih konstrukcija tijekom potresnog opterećenja, a karakterizira ga histerezna krivulja odnosa naprezanja i deformacija [18]. Materijalne karakteristike dane su na Slici 26, a prikaz odnosa naprezanje – deformacija na Slici 27. Karakteristike uzdužne i poprečne armature definirane su zasebno, iako su im karakteristike jednake, radi lakšeg snalaženja kod zadavanja armature u softveru.

Materijalne karakteristike čelika za armiranje B500B su sljedeći:

- modul elastičnosti, $E = 200000 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 2 \cdot 10^8 \text{ kPa}$
- srednja granica popuštanja, $f_{ym} = 550000,00 \text{ kPa}$
- specifična težina, $\gamma_{\text{čelik}} = 78 \text{ kN/m}^3$

Ostali parametri uzeti su u obzir prema zadanim vrijednostima *SeismoStructa*.

Material Name:

Material Type:

Menegotto-Pinto steel model

Note: Go to the Constitutive Models' Settings menu to define which material models are displayed here

Parameters for Code-based Checks

Existing_Material New_Material

Strength

Mean Strength:

Lower-bound Strength:

Sample Plot

Material Properties

Modulus of elasticity (kPa):

Yield strength (kPa):

Strain hardening parameter (-):

Transition curve initial shape parameter (-):

Transition curve shape calibrating coeff. A1 (-):

Transition curve shape calibrating coeff. A2 (-):

Isotropic hardening calibrating coeff. A3 (-):

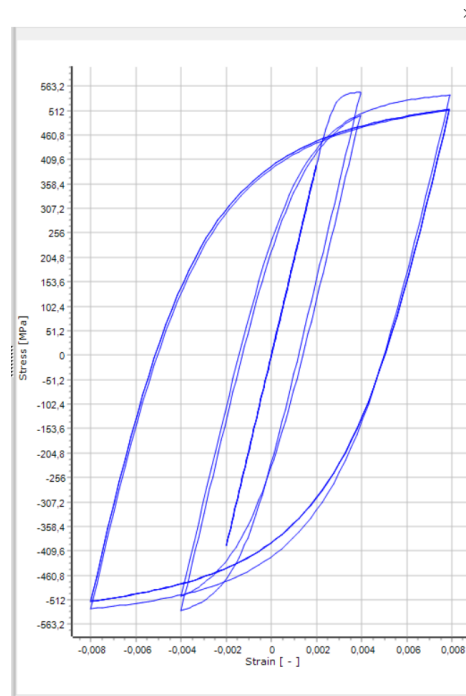
Isotropic hardening calibrating coeff. A4 (-):

Fracture/buckling strain (-):

Specific Weight (kN/m3):

(Pseudo)Time	Strain
1	0,002
2	-0,002
3	0,002
4	-0,002
5	0,004
6	-0,004
7	0,004
8	-0,004
9	0,008
10	-0,008
11	0,008
12	-0,008
13	0,008
14	-0,008
15	0,008
16	-0,008

Slika 26: Materijalne karakteristike čelika za armiranje B500B



Slika 27: Odnos naprezanje - deformacija čelika za armiranje B500B

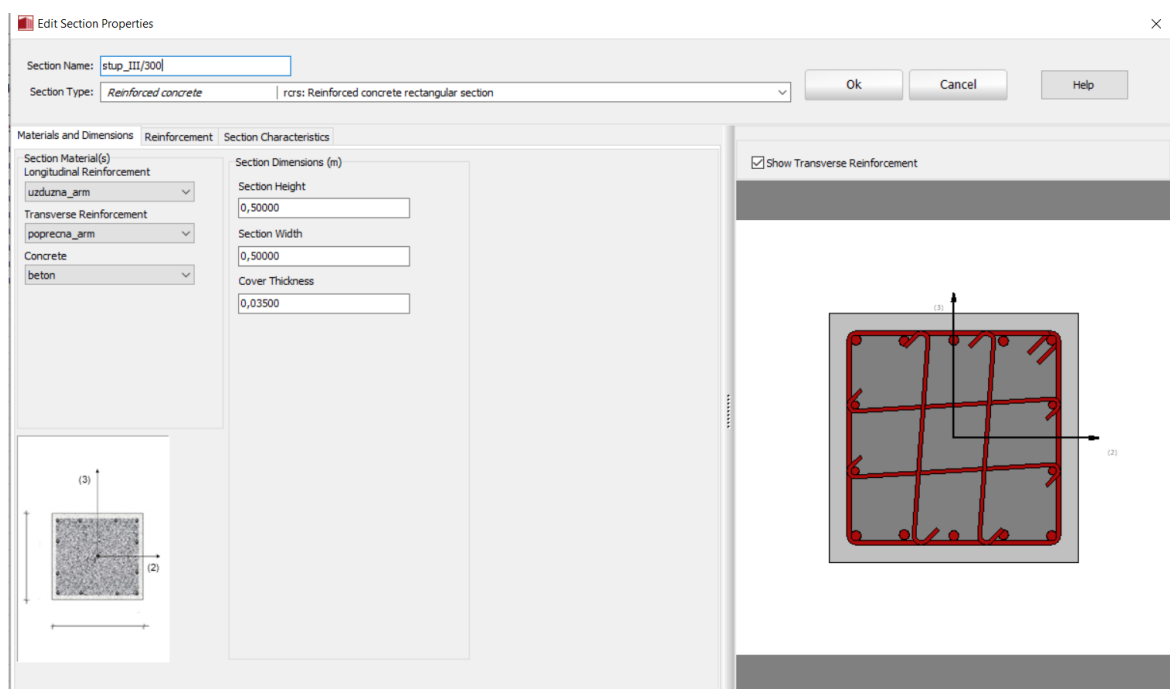
Na Slici 28 prikazana je kartica *Materials* gdje se nalazi popis korištenih materijala kod modeliranja.

	Material Name	Material Type	Material Properties	Code-based Checks Parameters
Add General Material	uzduzna_arm	st_mp	2,0000E+008 550000,00 0,005 20,00 18,50 0,15 ...	New_Material Mean_Strength=550000,00 Chara
Add Material Class	poprecna_arm	st_mp	2,0000E+008 550000,00 0,005 20,00 18,50 0,15 ...	New_Material Mean_Strength=550000,00 Chara
Edit	beton	con_ma	38000,00 2900,00 3,0000E+007 0,0022 25,00	New_Material Mean_Strength=38000,00 Chara
Remove				
Help				
<<				

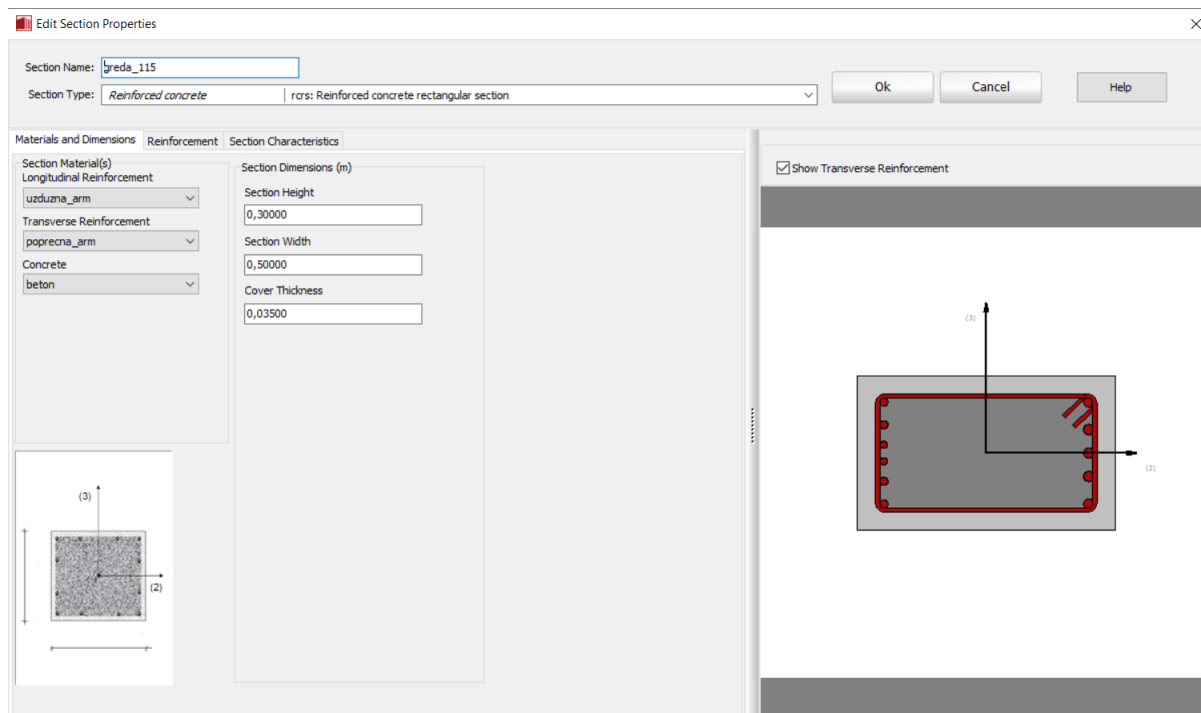
Slika 28: Kartica *Materials* sa korištenim materijalima

Poprečni presjeci definiraju se u kartici *Sections*. Poprečni presjek stupova i gređa je *rcrs* – armiranobetonski pravokutni, stupovi su dimenzija 50 x 50 cm, a gređe 30 x 50 cm. Također, u ovoj kartici definira se i armatura poprečnog presjeka. Zaštitni sloj iznosi 3,5 cm. Kartica *Sections* prikazana je na Slici 29. Primjer poprečnog presjeka stupa nalazi se na Slici 30, a primjer poprečnog presjeka gređe na Slici 31. U Tablici 12 nalazi se korištena armatura stupa, a u Tablici 13 gređe.

	Section...	Section...	Section Materials	Section Dimensions	Reinforcement Patterns	Addit...	Transverse...	FRP S
Add	stup_II...	rcrs	uzduzna_arm poprecna_arm ...	0,50000 0,50000 ...	corners(4@20mm) top_bo...		(4-4)@8m...	wrap
Add Steel Profile	stup_IV...	rcrs	uzduzna_arm poprecna_arm ...	0,50000 0,50000 ...	corners(4@20mm) top_bo...		(4-4)@8m...	wrap
Edit	stup_II...	rcrs	uzduzna_arm poprecna_arm ...	0,50000 0,50000 ...	corners(4@20mm) top_bo...		(4-4)@10m...	wrap
Remove	stup_IV...	rcrs	uzduzna_arm poprecna_arm ...	0,50000 0,50000 ...	corners(4@20mm) top_bo...		(4-4)@10m...	wrap
	stup_II...	rcrs	uzduzna_arm poprecna_arm ...	0,50000 0,50000 ...	corners(4@20mm) top_bo...		(4-4)@8m...	wrap
	stup_IV...	rcrs	uzduzna_arm poprecna_arm ...	0,50000 0,50000 ...	corners(4@25mm) top_bo...		(4-4)@8m...	wrap
	gređa_...	rcrs	uzduzna_arm poprecna_arm ...	0,30000 0,50000 ...	corners(0@20mm) top_bo...	0,00...	(2-2)@8m...	wrap
	gređa_...	rcrs	uzduzna_arm poprecna_arm ...	0,30000 0,50000 ...	corners(0@20mm) top_bo...	0,00...	(2-2)@8m...	wrap
	gređa_...	rcrs	uzduzna_arm poprecna_arm ...	0,30000 0,50000 ...	corners(0@20mm) top_bo...	0,00...	(2-2)@8m...	wrap

Slika 29. Kartica *Sections*

Slika 30. Poprečni presjek stupa zajedno s definiranom armaturom



Slika 31. Primjer poprečnog presjeka grede zajedno s armaturom

Napomena: Poprečni presjeci grede definiraju se obrnuto; visina se zadaje kao širina, a širina kao visina zbog položaja glavnih osi u *SeismoStructu*.

Tablica 12: Korištena armatura za stupove; vrijednosti preuzete iz [22]

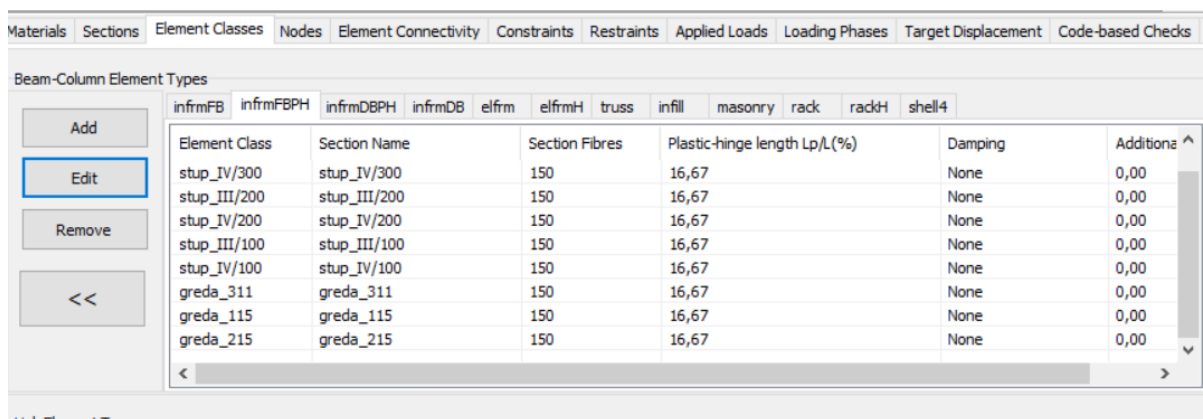
STUPOVI		
POZICIJA	UZDUŽNA ARMATURA	POPREČNA ARMATURA
III/300	2x5Φ20+2x2Φ16*	Φ8/12 cm
IV/300	2x5Φ20+2x2Φ16*	Φ8/12 cm
III/200	2x5Φ20+2x2Φ16*	Φ8/12 cm
IV/200	2x5Φ20+2x2Φ16*	Φ8/12 cm
III/100	2x5Φ20+2x2Φ16*	Φ8/12 cm
IV/100	2x4Φ25+2x2Φ20*	Φ8/12 cm

*na bočnim stranama stupa

Tablica 13: Korištena armatura za grede [17]

GREDE				
POZICIJA	VANJSKI OSOLONAC		UNUTARNJI OSOLONAC	
	Armatura gornja zona	Armatura donja zona	Armatura gornja zona	Armatura donja zona
311-311	5Φ16	3Φ16	6Φ16	4Φ16
215-215	4Φ14+4Φ16	3Φ20	4Φ14+4Φ16	3Φ20
115-115	5Φ20	2Φ14+4Φ16	5Φ20	3Φ20

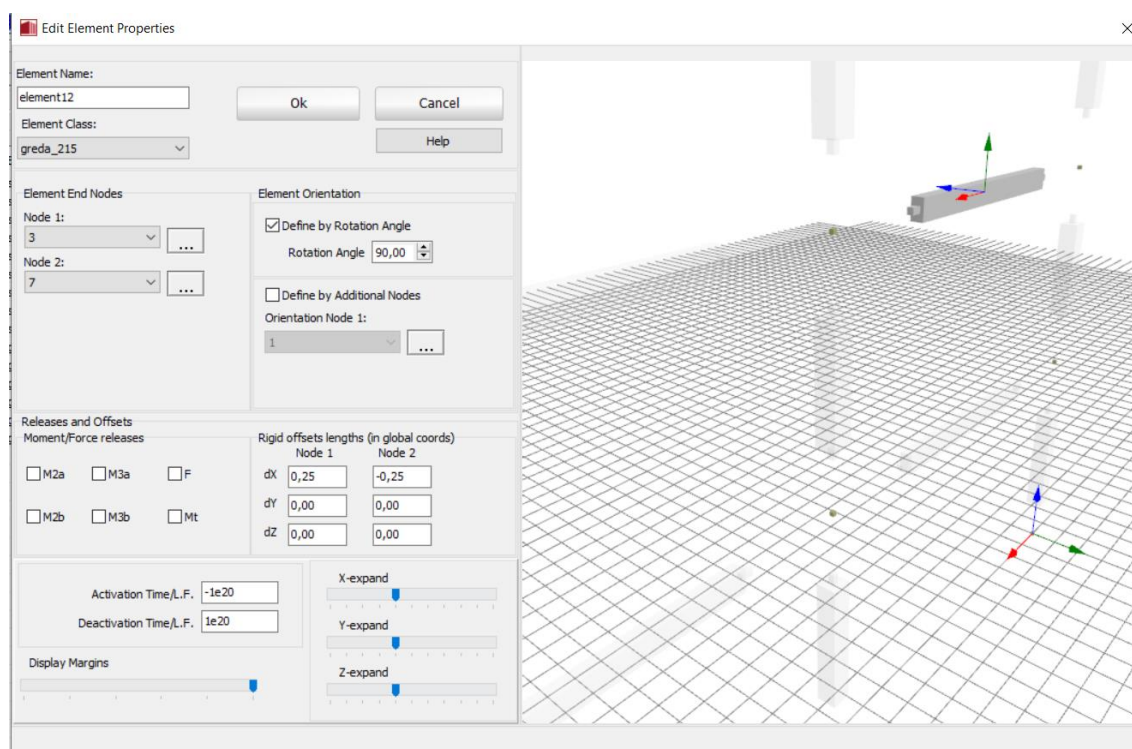
Nadalje, u kartici *Element Classes* definiraju se tipovi elementa okvira prema kojima se određuje ponašanje spoja stup – greda. Za ovaj model okvira elementi su definirani kao *infrmFBPH: Inelastic nonlinear plastic - hinge force - based elements*. Odnosno, elementi s nelinearnim ponašanjem te pojavom plastičnog zgloba. Poprečni presjek diskretizira se vlaknima te je zadani postotak duljine plastičnog zgloba. Kartica *Element Classes* nalazi se na Slici 32.

Slika 32: Kartica *Element Classes*

Nakon što su definirani svi parametri stupova i greda, slijedi njihovo spajanje. Najprije se u kartici *Nodes* po koordinatama x, y, z upisuju položaji stupova i greda, a zatim se u kartici *Element Connectivity* te točke povezuju u jednu cjelinu – okvir. Koordinate okvira, odnosno kartica *Nodes* nalazi se na Slici 33, a prikaz spajanja točaka na Slici 34.

Node Name	X	Y	Z	Type
1	0,00000	0,00000	0,00000	structural
2	0,00000	0,00000	3,50000	structural
3	0,00000	0,00000	6,70000	structural
4	0,00000	0,00000	9,90000	structural
5	6,00000	0,00000	0,00000	structural
7	6,00000	0,00000	6,70000	structural
8	6,00000	0,00000	9,90000	structural
9	12,00000	0,00000	0,00000	structural
10	12,00000	0,00000	3,50000	structural
11	12,00000	0,00000	6,70000	structural
12	12,00000	0,00000	9,90000	structural
6	6,00000	0,00000	3,50000	structural

Slika 33: Koordinate okvira



Slika 34: Spajanje točaka 3 i 7 u gredu

Napomena: Kako bi se povećala krutost okvira, duljine greda i stupova smanjene su za $h/2$ odnosno 0,25 m na krajevima gdje bi trebalo doći do pojave plastičnog zgloba.

Svi elementi okvira koji se nalaze u kartici *Element connectivity* prikazani su na Slici 35, a 2D prikaz cijelog okvira na Slici 36.

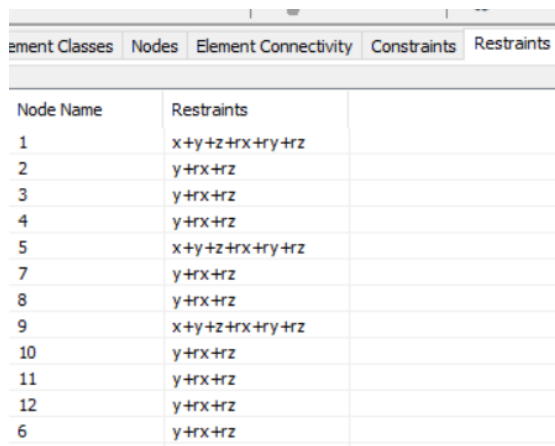
Element Name	Element Class	Node name(s)	Rigid Offsets	Force/Moment Releases	Activation Time/L.F.
element1	stup_III/100	1 2 deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element2	stup_III/200	2 3 deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element3	stup_III/300	3 4 deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element4	stup_IV/100	5 6 deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element5	stup_IV/200	6 7 deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element6	stup_IV/300	7 8 deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element7	stup_III/100	9 10 deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element8	stup_III/200	10 11 deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element9	stup_III/300	11 12 deg=0,00	0,00 0,00...		-1e20 1e20
element10	greda_115	6 10 deg=90,00	0,25 0,00...		-1e20 1e20
element11	greda_115	2 6 deg=90,00	0,25 0,00...		-1e20 1e20
element12	greda_215	3 7 deg=90,00	0,25 0,00...		-1e20 1e20
element13	greda_215	7 11 deg=90,00	0,25 0,00...		-1e20 1e20
element14	greda_311	4 8 deg=90,00	0,25 0,00...		-1e20 1e20
element15	greda_311	8 12 deg=90,00	0,25 0,00...		-1e20 1e20

Slika 35: Kartica *Element connectivity*



Slika 36: Prikaz elemenata okvira

Kod modeliranja 2D okvira potrebno je zadržati pomake i rotacije u čvorovima. To se dodjeljuje u kartici *Restraints*. Prikaz te kartice nalazi se na Slici 37.



Node Name	Restraints
1	x+y+z+rx+ry+rz
2	y+rx+rz
3	y+rx+rz
4	y+rx+rz
5	x+y+z+rx+ry+rz
7	y+rx+rz
8	y+rx+rz
9	x+y+z+rx+ry+rz
10	y+rx+rz
11	y+rx+rz
12	y+rx+rz
6	y+rx+rz

Slika 37. Prikaz kartice *Restraints*

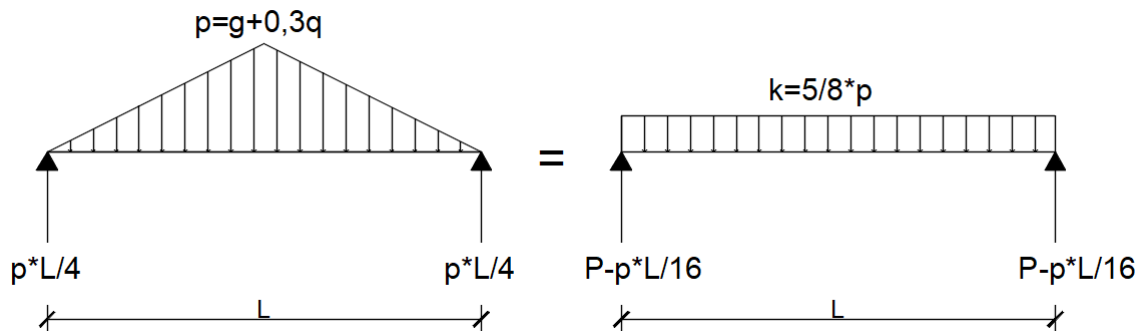
Opterećenja se zadaju u kartici *Applied Loads*. S obzirom na to da je raspodjela opterećenja na grede okvira trokutna, a *SeismoStruct* nema mogućnost takve raspodjele, izvedena je transformacija trokutnog opterećenja u kontinuirano. Transformacija je prikazana na Slici 38. Kako bi se dobile jednake vrijednosti poprečnih sila za slučaj kada je raspodjela opterećenja trokutna i za slučaj kada je raspodjela opterećenja jednolika, na osloncima je potrebno oduzeti vrijednost sile P za $p \cdot L/16$, gdje je p vrijednost trokutnog opterećenja, a P vrijednost poprečne sile od trokutnog opterećenja za potresnu kombinaciju.

Primjer načina oduzimanja poprečne sile; čvorovi 4 i 12:

$$146,704 - 62,28 \cdot \frac{6}{16} = 123,35 \text{ kN}$$

Primjer načina transformacije trokutnog opterećenja u kontinuirano; element 14 (greda 311):

$$k_1 = \frac{5}{8} \cdot 62,28 = 38,93 \text{ kN/m}$$



Slika 38: Način transformacije trokutnog opterećenja u jednoliko kontinuirano [izradio autor]

Proračun horizontalnih potresnih sila

Što se tiče potresnog opterećenja horizontalnim silama, korišten je modalni način raspodjele sile preko pomaka okvirne konstrukcije. Za tu svrhu je istim postupkom i svim materijalnim i geometrijskim karakteristikama modeliran okvir u *SeismoStructu*, no bez potresnih sila kako bi se dobio prvi vlastiti vektor (mod) vibracija okvira.

Vrijednosti pomaka su sljedeće, a iste su prikazane na Slici 39:

- 2. kat (točka 4): $8,16 \cdot 10^{-5}$ m
- 1. kat (točka 3): $5,93 \cdot 10^{-5}$ m
- prizemlje (točka 2): $2,77 \cdot 10^{-5}$ m

```
Eigen-Solution 1
Natural Frequency (Hertz) = 1,85748 (Real)
Natural Period (sec) = 0,53836358

Nodal Displacements
```

Node Name	X	Y	Z	RX	RY	RZ
1	0,0000E+000	0,0000E+000	0,0000E+000	0,0000E+000	0,0000E+000	0,0000E+000
2	2,7671E-005	0,0000E+000	4,0764E-007	0,0000E+000	9,4150E-006	0,0000E+000
3	5,9313E-005	0,0000E+000	5,9764E-007	0,0000E+000	7,6833E-006	0,0000E+000
4	8,1630E-005	0,0000E+000	6,6424E-007	0,0000E+000	4,7641E-006	0,0000E+000
5	0,0000E+000	0,0000E+000	0,0000E+000	0,0000E+000	0,0000E+000	0,0000E+000
7	5,9326E-005	0,0000E+000	0,0000E+000	0,0000E+000	6,9963E-006	0,0000E+000
8	8,1598E-005	0,0000E+000	0,0000E+000	0,0000E+000	3,6593E-006	0,0000E+000
9	0,0000E+000	0,0000E+000	0,0000E+000	0,0000E+000	0,0000E+000	0,0000E+000
10	2,7671E-005	0,0000E+000	-4,0764E-007	0,0000E+000	9,4150E-006	0,0000E+000
11	5,9313E-005	0,0000E+000	-5,9764E-007	0,0000E+000	7,6833E-006	0,0000E+000
12	8,1630E-005	0,0000E+000	-6,6424E-007	0,0000E+000	4,7641E-006	0,0000E+000
6	2,7752E-005	0,0000E+000	0,0000E+000	0,0000E+000	7,8183E-006	0,0000E+000

Slika 39: Vrijednosti pomaka okvirne konstrukcije za proračun potresnih sila

Vrijednosti pomaka je potrebno normalizirati kako bi na vrhu konstrukcije njihova vrijednost bila jednaka 1,00.

Stoga, nove vrijednosti pomaka iznose:

- 2. kat (točka 4): $8,16 \cdot 10^{-5} \text{ m} / 8,16 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 1,00$
- 1. kat (točka 3): $5,93 \cdot 10^{-5} \text{ m} / 8,16 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 0,73$
- prizemlje (točka 2): $2,77 \cdot 10^{-5} \text{ m} / 8,16 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 0,34$

Mase katova iznose [17]:

- 2. kat: 3349,27 kN
- 1. kat: 5266,78 kN
- prizemlje: 5266,78 kN

Konačno, vrijednosti potresnih sila iznose:

- 2. kat (točka 4): $1,00 \cdot 3349,27 = 3349,27 \text{ kN}$
- 1. kat (točka 3): $0,73 \cdot 5266,78 = 3844,75 \text{ kN}$
- prizemlje (točka 2): $0,34 \cdot 5266,78 = 1790,70 \text{ kN}$

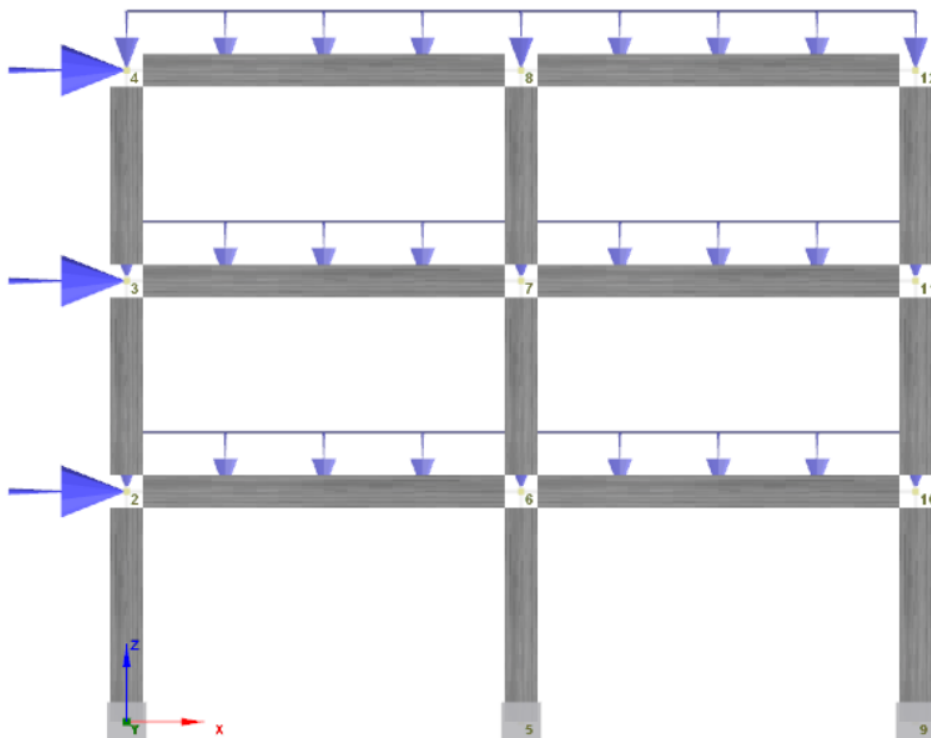
Kada ih se normalizira, dobivaju se vrijednosti potresnih sila kojima je opterećen model:

- 2. kat (točka 4): $3349,27/3844,75 = 0,87 \text{ kN}$
- 1. kat (točka 3): $3844,75/3844,75 = 1,00 \text{ kN}$
- prizemlje (točka 2): $1790,70/3844,75 = 0,47 \text{ kN}$

Na Slici 40 nalazi se kartica *Applied Loads* sa svim zadanim opterećenjima, a na Slici 41 opterećeni model.

Category	Node Name	Direction	Type	Value	Curve Name
Incremental Load	2	x	force	0,47	
Incremental Load	3	x	force	1,00	
Incremental Load	4	x	force	0,87	
Permanent Load	6	z	force	-161,96	
Permanent Load	7	z	force	-161,96	
Permanent Load	2	z	force	-117,43	
Permanent Load	10	z	force	-117,43	
Permanent Load	11	z	force	-117,43	
Permanent Load	8	z	force	-196,79	
Permanent Load	3	z	force	-117,43	
Permanent Load	4	z	force	-123,35	
Permanent Load	12	z	force	-123,35	

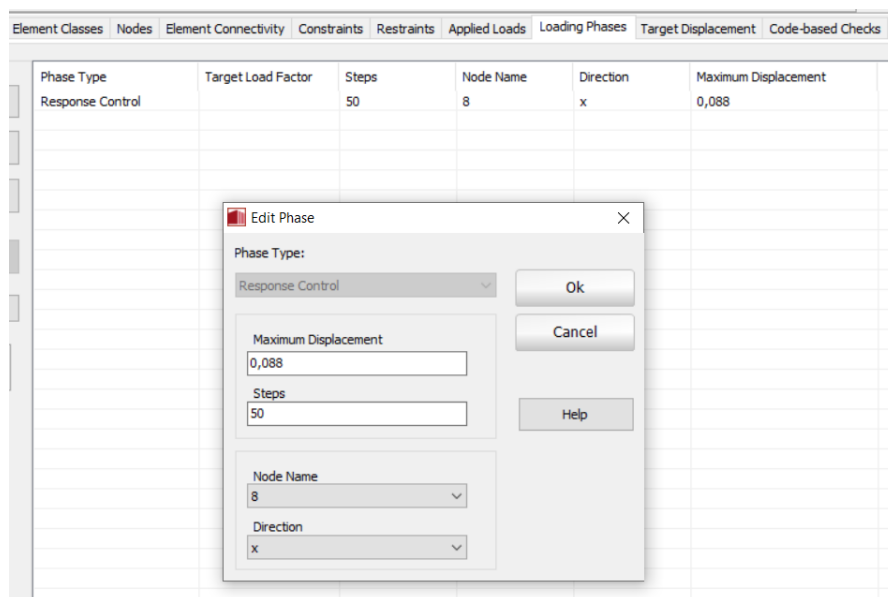
Category	Element Name	Direction	Type	Value
Permanent Load	element10	z	force	-30,49
Permanent Load	element11	z	force	-30,49
Permanent Load	element12	z	force	-30,49
Permanent Load	element13	z	force	-30,49
Permanent Load	element14	z	force	-38,93
Permanent Load	element15	z	force	-38,93

Slika 40: Kartica *Applied Loads*

Slika 41: Opterećeni model armiranobetonskog okvira

7.2. Proračun metodom postupnog guranja

Prije provođenja proračuna metodom postupnog guranja potrebno je zadati vrstu kontrole. Ona se zadaje u kartici *Loading Phases*, prikazana na Slici 42. *SeismoStruct* ima tri mogućnosti kontrole: kontrola čvora s odabirom broja koraka proračuna (eng. *Response Control*), kontrola vektora opterećenja (eng. *Load Control*) i automatska kontrola čvora koja nema mogućnost odabira broja koraka proračuna (eng. *Automatic Response Control*). Za ovaj slučaj odabran je *Response Control*, odnosno kontrolira se jedan odabrani čvor. Kod ovog proračuna kontrolira se čvor 8 u smjeru *x*, koji se nalazi na vrhu konstrukcije. Također je potrebno pretpostaviti vrijednost ciljanog pomaka konstrukcije i broj koraka proračuna. Broj koraka proračuna određuje se kao broj na koji će ciljani pomak biti podijeljen za postupno primjenjivanje. U skladu s time, broj koraka određuje veličinu vektora opterećenja koje je potrebo za ostvarenje ciljanog pomaka u istom koraku. Ova faza završava kada se postigne vrijednost ciljanog pomaka koji je zadan [18].



Slika 42. Kartica *Loading Phases*

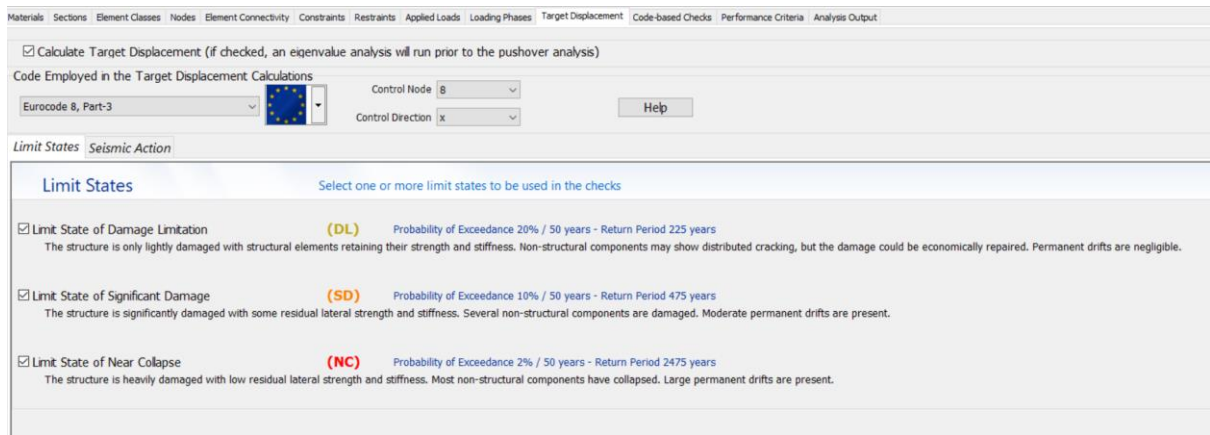
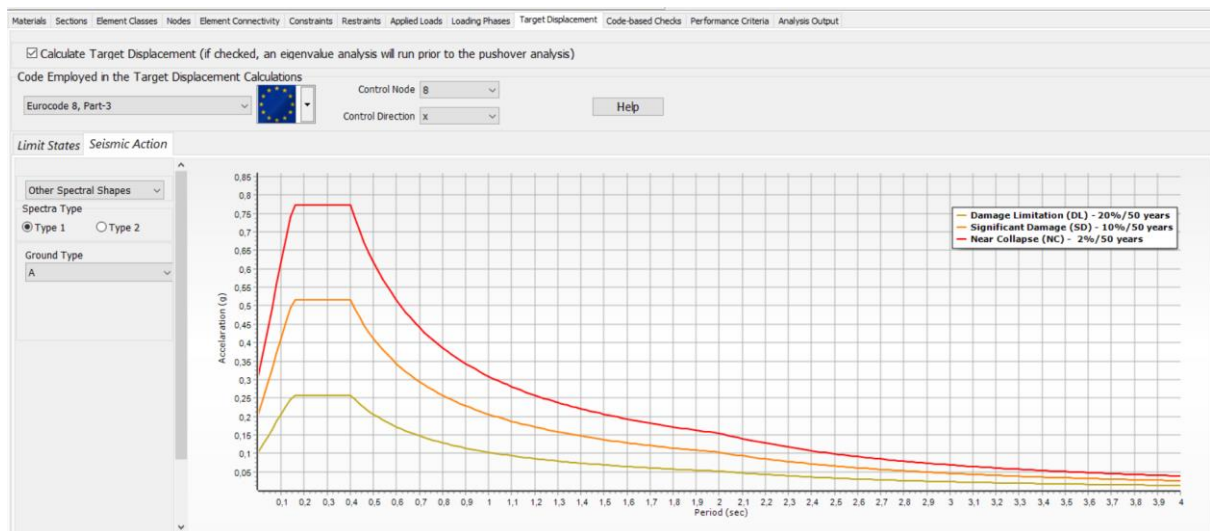
Sljedeća kartica je *Target Displacement*, prikazana na Slici 43. Ova kartica ima dvije stavke, *Limit States* i *Seismic Action*. U stavci *Limit States* (granična stanja) definiraju se propisi prema kojima se izvodi proračun. S obzirom da se radi o potresu, odabran je Eurokod 8: Proračun seizmički otpornih konstrukcija – dio 3. Ponovno se postavi kontrolni čvor i smjer ciljanog pomaka (8, x).

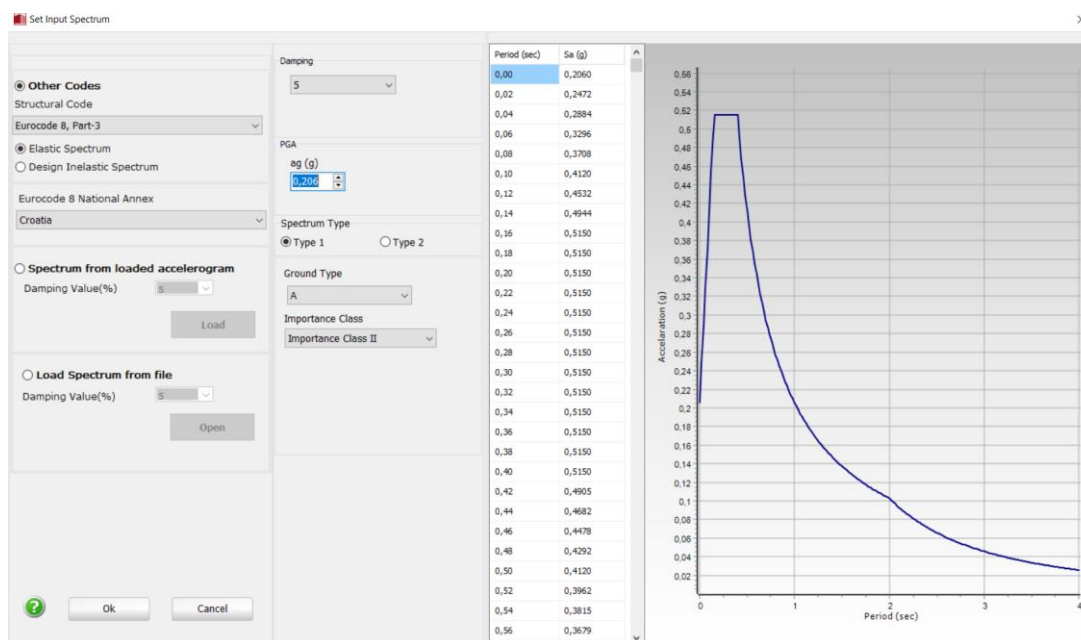
Potrebno je označiti granična stanja koja se provjeravaju: granično stanje ograničenog oštećenja (OO), granično stanje znatnog oštećenja (ZO) i granično stanje blizu rušenja (BR).

- Granično stanje ograničenog oštećenja, OO (eng. *Damage limitation – DL*): Konstrukcija je doživjela mala oštećenja uz zadržavanje čvrstoće i krutosti. Vrijednosti pomaka su zanemarivo male te nisu potrebni popravci [19].
- Granično stanje znatnog oštećenja, ZO (eng. *Significant damage – SD*): Konstrukcija je doživjela znatna oštećenja, no još uvijek ima određenu bočnu čvrstoću i krutost, a vertikalni elementi još uvijek mogu preuzimati vertikalna opterećenja. Nekonstrukcijski elementi su jako oštećeni. Popravak cijele konstrukcije bi bio neekonomičan, a ona može izdržati još jedan potres manjeg intenziteta [19].
- Granično stanje blizu rušenja, BR (eng. *Near collapse – NC*): Konstrukcija je doživjela teška oštećenja, a velik broj nekonstrukcijskih elemenata je srušen. Ima malu preostalu bočnu čvrstoću i krutost, a vertikalni elementi još uvijek preuzimaju vertikalna opterećenja. Konstrukcija je blizu rušenja te ne bi mogla izdržati potres čak ni najmanjeg intenziteta [19].

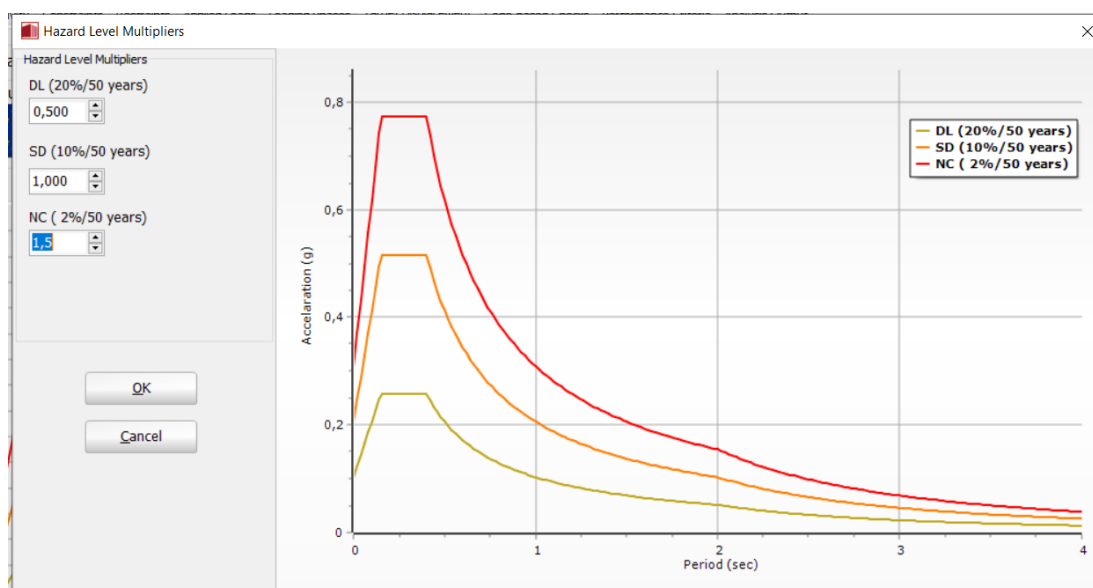
Ova stavka također se nalazi na Slici 43.

U stavci *Seismic Action*, Slika 44, najprije je potrebno odabrati elastični spektar odziva. Klikom na *Other Spectral Shapes* otvara se novi prozor (Slika 45) gdje se definiraju vršno ubrzanje temeljnog tla, $a_{gr} = 0,206$ i razred važnosti (razred 2, $\gamma_I = 1,00$). Klikom na „Ok“ otvara se prozor za definiranje faktora odnosa tri prethodno navedena granična stanja kako bi se u potpunosti mogao definirati elastični spektar odziva za pojedino stanje (Slika 46). Nakon što je definiran elastični spektar odziva, odabire se odabire se tip spektra i tip temeljnog tla.

Slika 43: Kartica *Target Displacement* i stavka *Limit States*Slika 44: Stavka *Seismic Action*



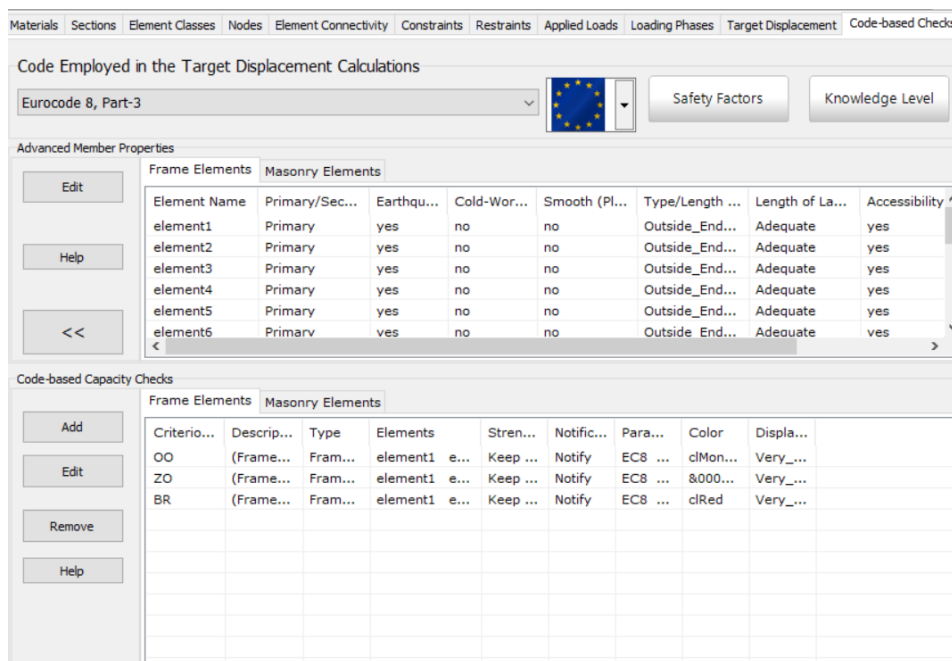
Slika 45: Prozor za definiranje vršnog ubrzanja tla i razreda važnosti građevine



Slika 46: Prozor za definiranje faktora odnosa tri granična stanja

Posljednja kartica koju je potrebno definirati je kartica *Code – based Checks*, Slika 47. U ovom odjeljku definiraju se elementi okvira na koje se odnosi proračun. U ovom slučaju to su sve grede i svi stupovi. Kartica *Safety Factors* (Slika 48) ima niz stavki za koje je automatski generiran faktor sigurnosti odabirom norme Eurokod 8 – dio 3. Također, odabrane su i jednadžbe iz Eurokoda 8 – dio 3 prema kojima se proračunavaju čvorovi

(zahtjev i sposobnost). U kartici *Knowledge Level* (Slika 49) potrebno je odabrati faktor povjerenja na temelju poznatih podataka o konstrukciji. Tri su razine, a za ovu analizu odabrana je razina 3: potpuno znanje te je faktor povjerenja jednak 1,00 – znaju se točne geometrijske i materijalne karakteristike.



Slika 47: Kartica *Code – based Checks*

Safety Factors Specify the values of the Safety factors used in the checks

Eurocode 8, Part-3 ASCE 41-17 NTC-08 NTC-18 Greek Code TBDY

Safety Factors

Factor γ_{el} for the calculation of the shear capacity, primary members (A.12) 1,150

Factor γ_{el} for the calculation of the shear capacity, secondary members (A.12) 1,000

Factor γ_{el} for the calculation of the chord rotation capacity θ_u , rectangular sections & primary members (A.1) 1,500

Factor γ_{el} for the calculation of the chord rotation capacity θ_u , rectangular sections & secondary members (A.1) 1,000

Factor γ_{el} for the calculation of the chord rotation capacity $\theta_{u,pl}$, rectangular sections & primary members (A.3) 1,800

Factor γ_{el} for the calculation of the chord rotation capacity $\theta_{u,pl}$, rectangular sections & secondary members (A.3) 1,000

Factor γ_{el} for the calculation of the chord rotation capacity θ_u , circular sections & primary members (A.1) 2,000

Factor γ_{el} for the calculation of the chord rotation capacity θ_u , circular sections & secondary members (A.1) 1,000

Partial Factor γ_c for concrete (A.12) 1,500

Partial Factor γ_s for steel (A.12) 1,150

Factor γ_{RD} for beam-column joints (EN 1998-1:2004, Section 5.5.2.3) 1,200

Partial Factor γ_{fd} for fiber reinforced polymers, FRP (A.33) 1,500

Partial Factor γ_m for masonry (C.2) 2,000

Calculation of Chord Rotation Capacity

From equation (A.1) From equations (A.3) and (A.10) or (A.11)

Calculation of Chord Rotation Yielding

From equations (A.10.a) and (A.11.a) From equations (A.10.b) and (A.11.b)

Ok

Cancel

Program Defaults

Set As Default

Slika 48: Kartica *Safety factors*

Knowledge Level Select the Knowledge Level, based on the available structural data

	Knowledge Level 1	Knowledge Level 2	Knowledge Level 3
Geometry	From original outline construction drawings with sample visual survey or from full survey	From original outline construction drawings with sample visual survey or from full survey	From original outline construction drawings with sample visual survey or from full survey
Details	Simulated design in accordance with relevant practice and from limited in-situ inspection	From incomplete original detailed construction drawings with limited in-situ inspection or from extended in-situ inspection	From original detailed construction drawings with limited in-situ inspection or from comprehensive in-situ inspection
Materials	Default values in accordance with standards of the time of construction and from limited in-situ testing	From original design specifications with limited in-situ testing or from extended in-situ testing	From original test reports with limited in-situ testing or from comprehensive in-situ testing
Confidence Factor	CF = 1,35	CF = 1,20	CF = 1,00

Confidence Factor 1,000 Custom value

Ok

Cancel

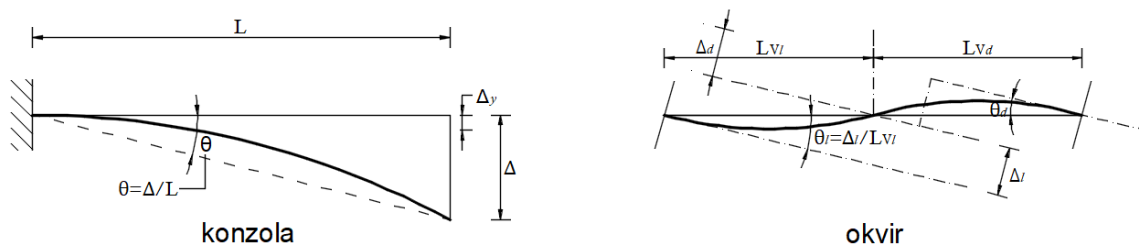
Slika 49: Kartica *Knowledge level*

Za proračun je još potrebno definirati tri granična stanja (OO, ZO, BR) prema kriteriju rotacije tetive.

Rotacija tetive θ , odnosno kut zaokreta, je veličina definirana kao sposobnost deformiranja elemenata koji popuštaju zbog savijanja s osnom silom ili bez nje, što je prikazano na Slici 50. Za armiranobetonske konstrukcije razlikuju se duktilni (savijanje) i krhki (posmični) mehanizmi sloma. Kriteriji za deformiranje prema kutu zaokreta tetive dani su s pomoću niza izraza (sa srednjim vrijednostima čvrstoće betona i granice popuštanja čelika za armiranje) za [20]:

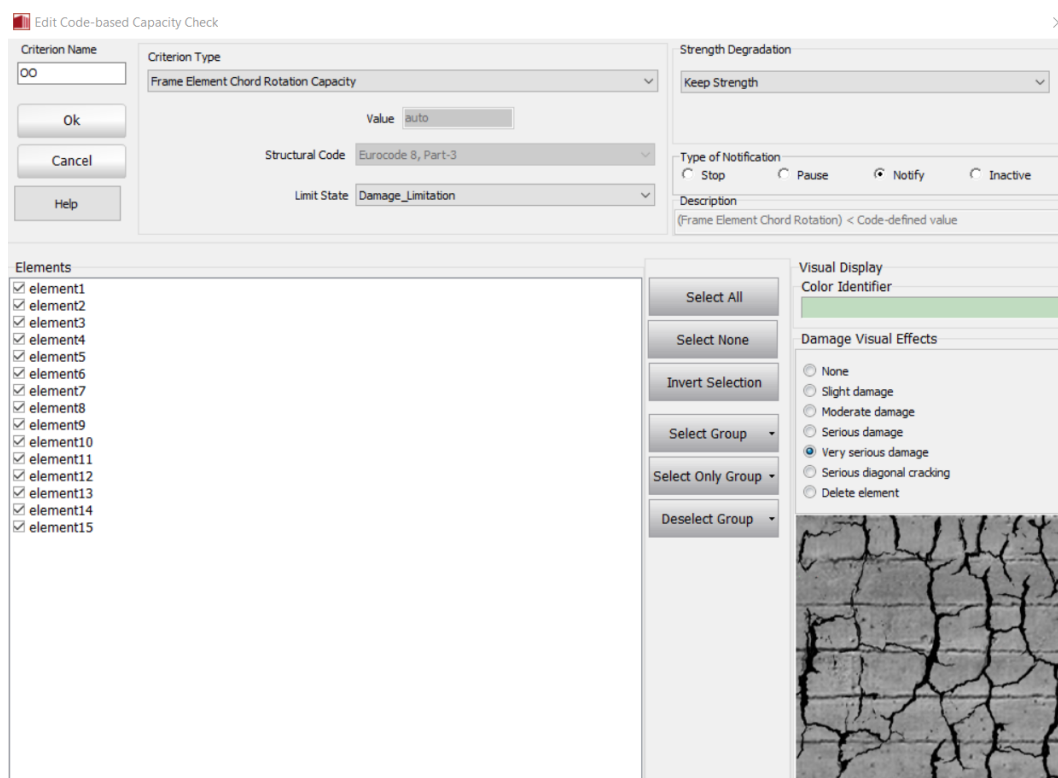
- zaokretanje tetive pri popuštanju na krajevima (ili kraju – konzola) armiranobetonskog elementa θ_y [20]
- granično (najveće) zaokretanje tetive pri slomu kritičnog područja na kraju elementa θ_u koje se sastoji od spomenutog zaokretanja pri popuštanju θ_y i plastičnog dijela zaokretanja tetive θ_u^{pl} ($\theta_u = \theta_y + \theta_u^{pl}$) [20]

Na Slici 51 prikazano je definiranje postavki graničnog stanja OO, no one su jednake za definiranje sva tri granična stanja. Potrebno je samo promijeniti vrstu graničnog stanja, *limit state*.



Slika 50: Definicija kuta zaokreta tetive [21]

Napomena: Kut zaokreta tetive θ , jednak je omjeru pomaka nosača po duljini elementa, tj. kod okvira omjer pomaka nosača po duljini do kraja presjeka, odnosno duljini grede do nultočke. Općenito, nultočka nije uvijek na sredini raspona, stoga se razlikuju kut zaokreta tetive s lijeve strane θ_l i kut zaokreta tetive s desne strane θ_d [20]. Duljina L_{vl} označava raspon grede do nultočke s lijeve strane, a L_{vd} raspon grede do nultočke s desne strane.

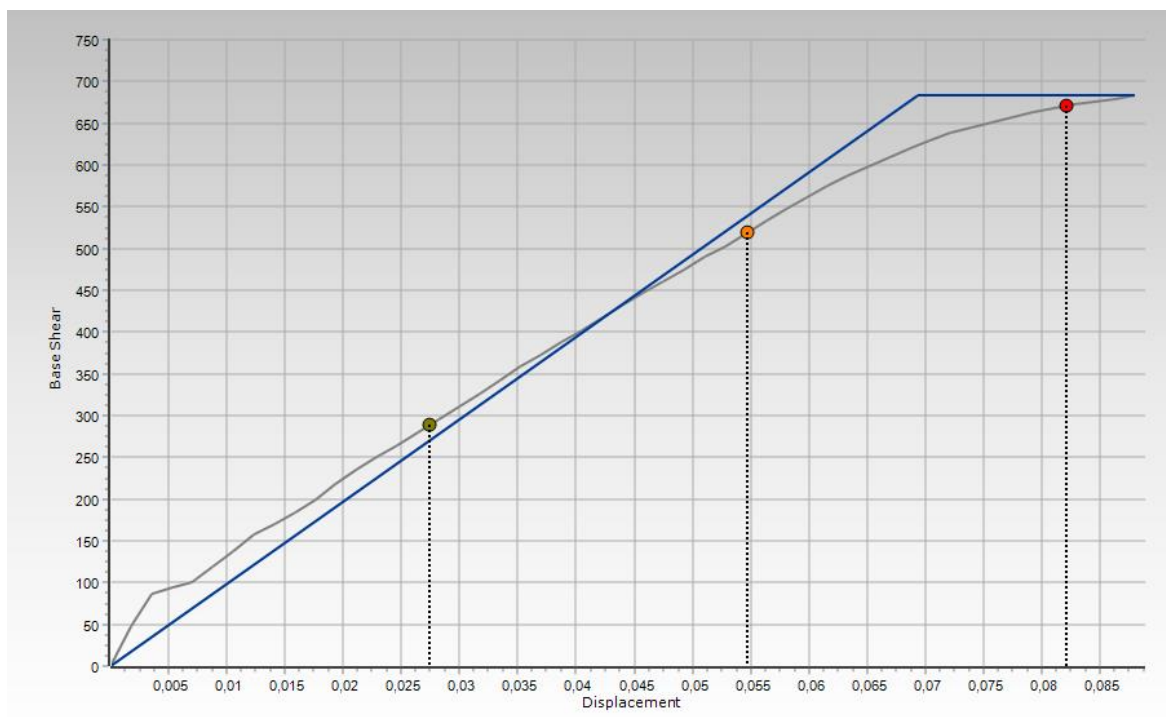


Slika 51: Definiranje postavki za stanje OO - ograničeno oštećenje (eng. *Damage limitation*, DL)

7.3. Analiza rezultata

Nakon što su zadane sve materijalne i geometrijske karakteristike armiranobetonskog okvira te propisi i postavke provedbe proračuna metodom postupnog guranja dobiveni su rezultati prikazani u nastavku.

Na Slici 52 nalazi se krivulja sposobnosti nosivosti zadanog modela. Na krivulji su naznačene tri točke, a svaka označava po jedno granično stanje. Iz krivulje se može vidjeti da deformiranje okvira počinje linearno, no kada dosegne silu vrijednosti 86,9 kN konstrukcija naglo gubi krutost zbog početka raspucavanja. Vrijednost poprečne sile u podnožju je 683,00 kN uz vrijednost ciljanog pomaka od 0,082 m. Međutim, konstrukcija nije prešla u područje stvaranja plastičnog mehanizma. Na Slici 53 dane su vrijednosti ciljanog pomaka za pojedino granično stanje u metrima.

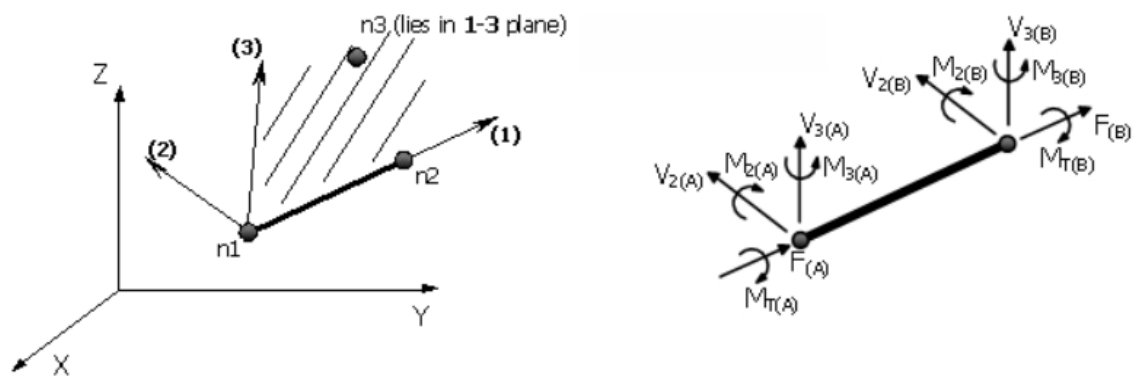


Slika 52: Krivulja sposobnosti nosivosti

Target Displacement	
Damage Limitation (DL)	0,02736287
Significant Damage (SD)	0,05472574
Near Collapse (NC)	0,08208861

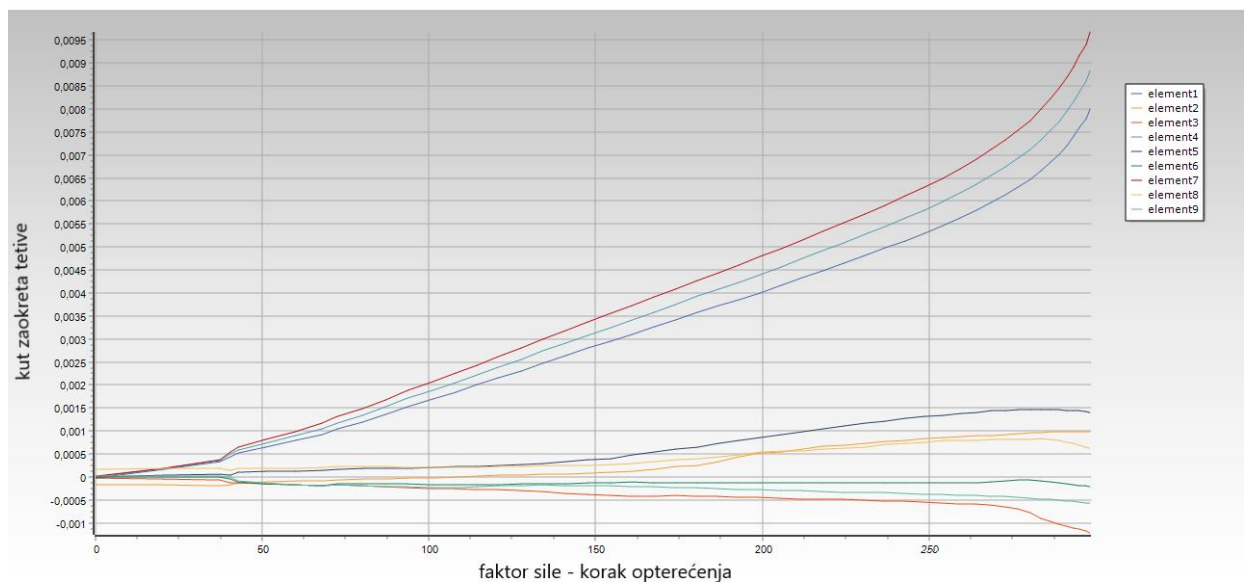
Slika 53: Vrijednosti ciljanog pomaka po graničnim stanjima u metrima

U nastavku je na Slici 54 prikazan položaj osi grede kako bi jasnije prikazali rotacije čvorova. Prema tome je kod stupa koji je rotiran za 90° točka A na dnu, a B na vrhu.

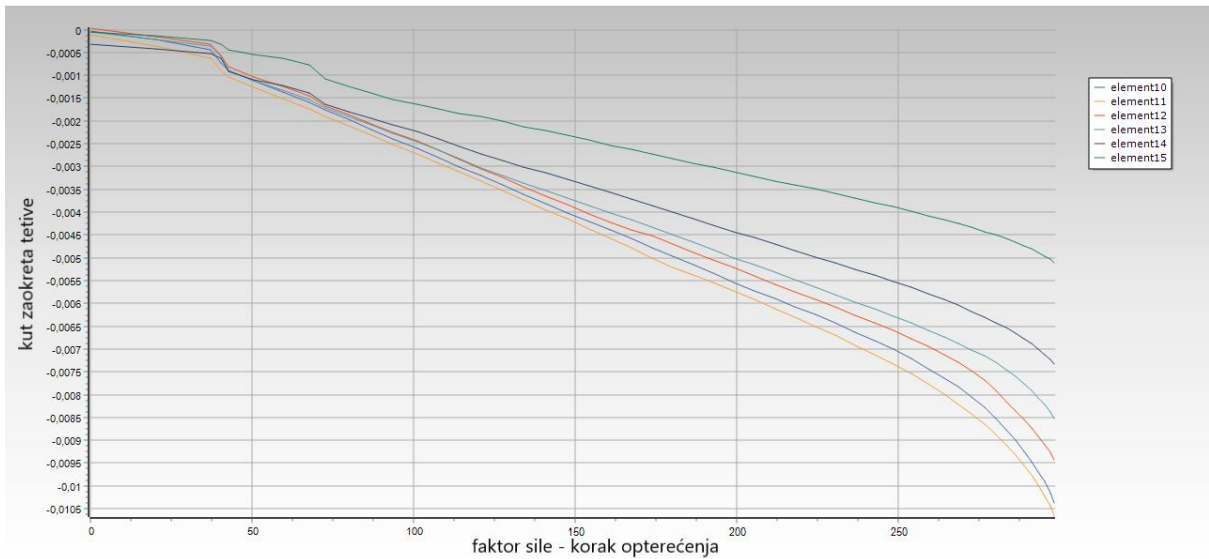


Slika 54: Položaj osi grede kod analize rezultata [18]

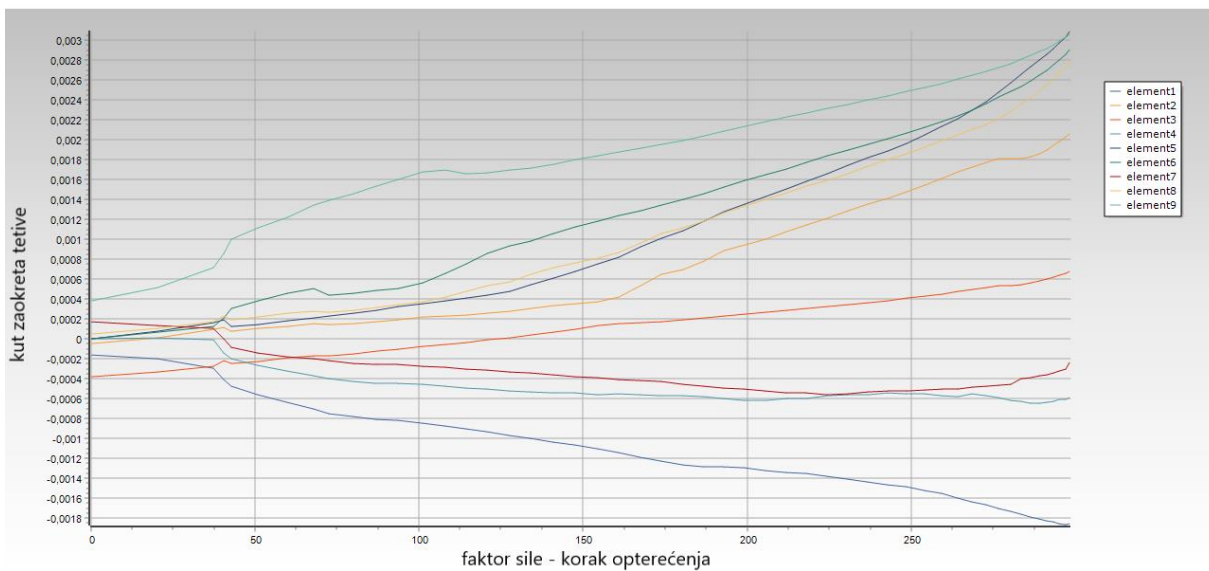
Na grafu 2 prikazan je odnos kuta zaokreta tetive stupova (elementi 1 - 9), a na grafu 3 za grede (elementi 10 - 14) s obzirom na opterećenje (silu) koja se povećavala svakim korakom tijekom provedbe metode postupnim guranjem u položaju A. Isto to prikazano je na grafu 4 (stupovi) i grafu 5 (grede) u položaju B.



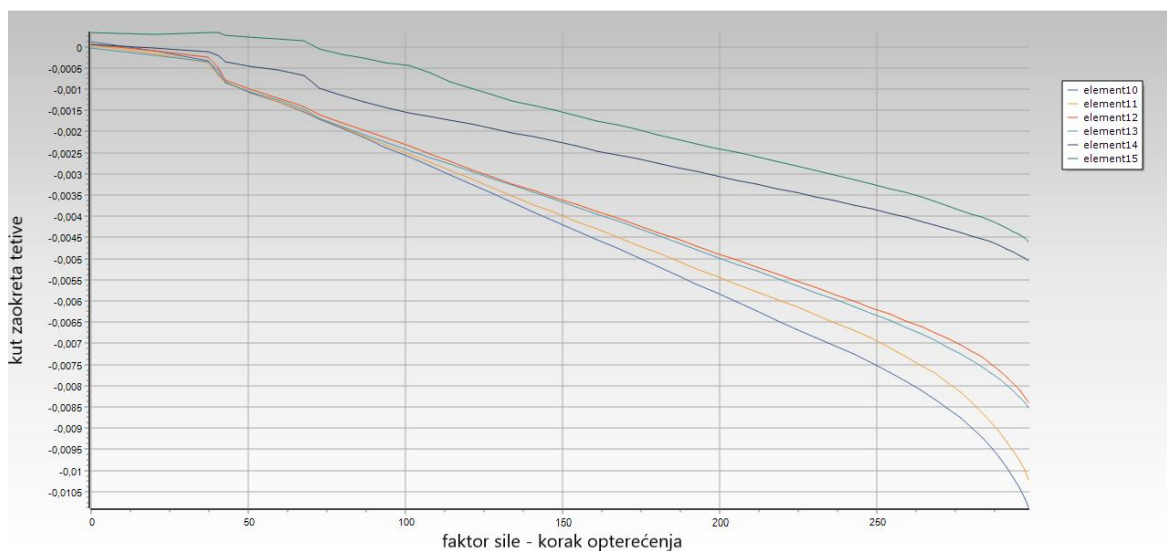
Graf 2: Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u stupovima, položaj A



Graf 3: Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u gredama, položaj A



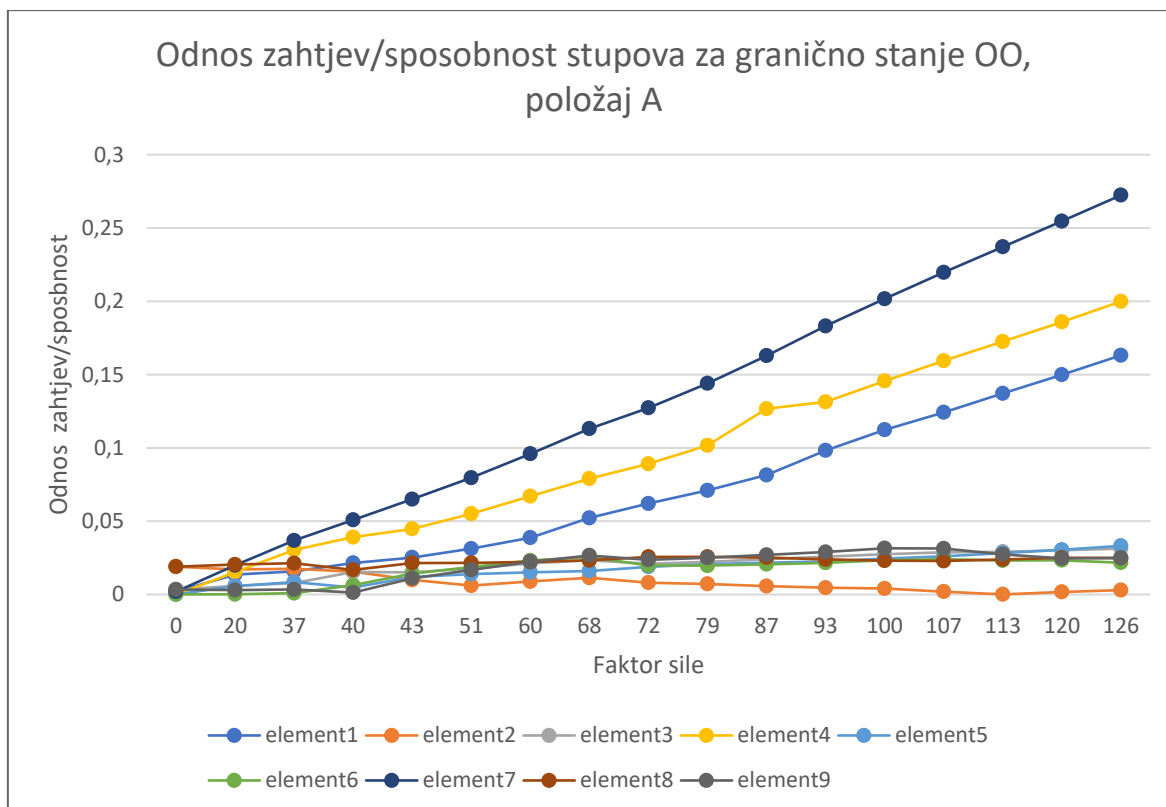
Graf 4: Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u stupovima, položaj B



Graf 5: Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u gredama, položaj B

GRANIČNO STANJE OGRANIČENOG OŠTEĆENJA

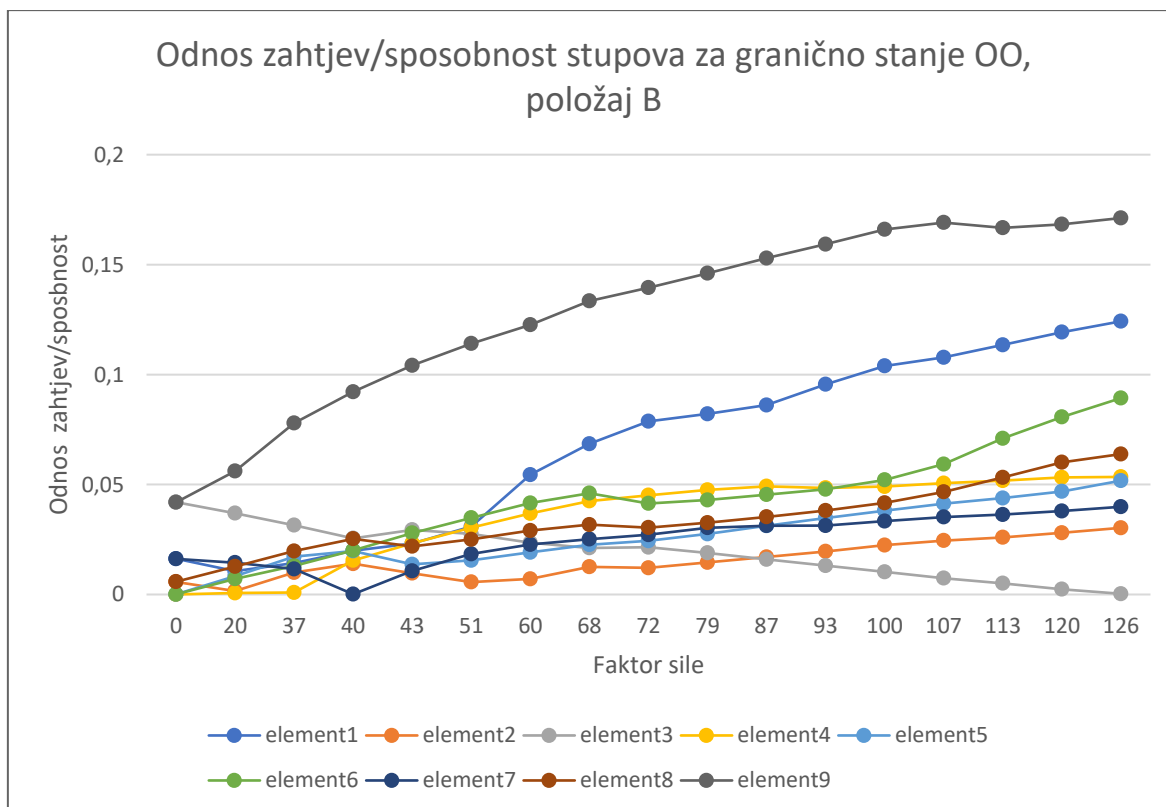
Na grafovima 6 i 7 prikazan je odnos zahtjev/sposobnost deformiranja čvorova stupova konstrukcije za granično stanje ograničenog oštećenja. Vrijednosti odnosa zahtjeva i sposobnosti za iznos sile 288,12 kN koja odgovara zahtijevanom pomaku od 0,027 m za granično stanje ograničenog oštećenja, izražene u %, prikazane su u Tablicama 14 i 15. Grafovi 8 i 9 te Tablice 16 i 17 prikazuju iste parametre, samo za grede.



Graf 6: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje OO, položaj A

Tablica 14: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje OO,
položaj A

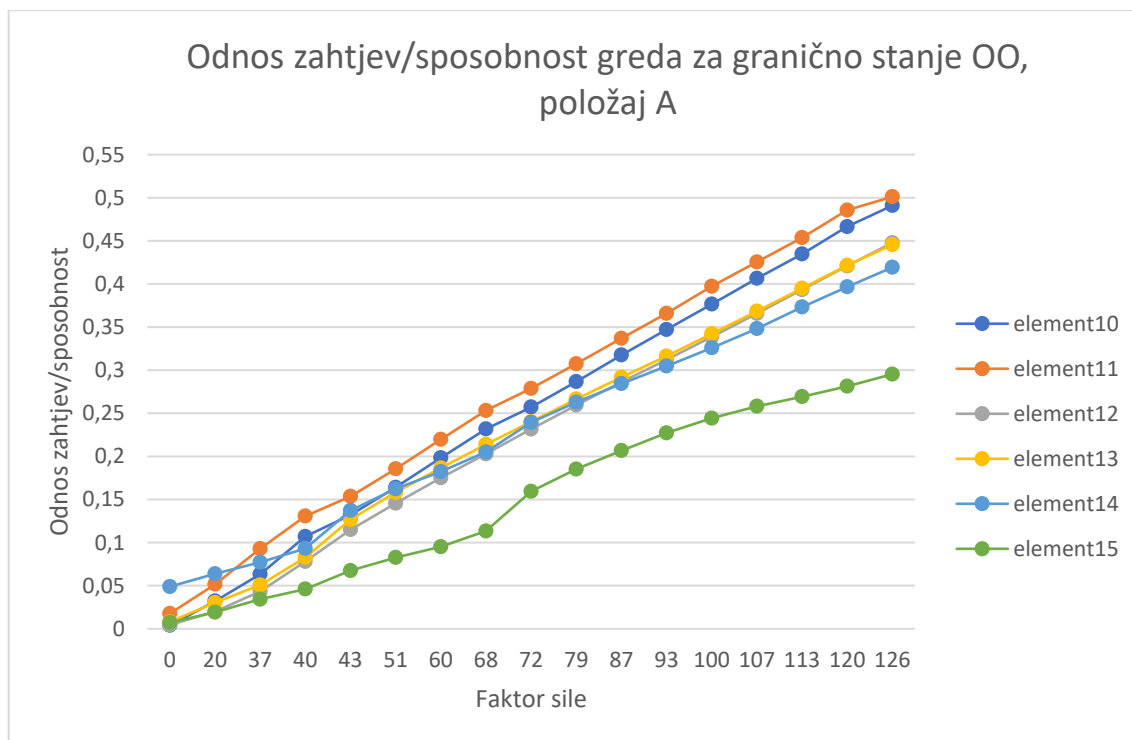
ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 1	16,31
ELEMENT 2	0,30
ELEMENT 3	3,13
ELEMENT 4	19,99
ELEMENT 5	3,32
ELEMENT 6	2,17
ELEMENT 7	27,23
ELEMENT 8	2,49
ELEMENT 9	2,49



Graf 7: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje OO, položaj B

Tablica 15: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje OO,
položaj B

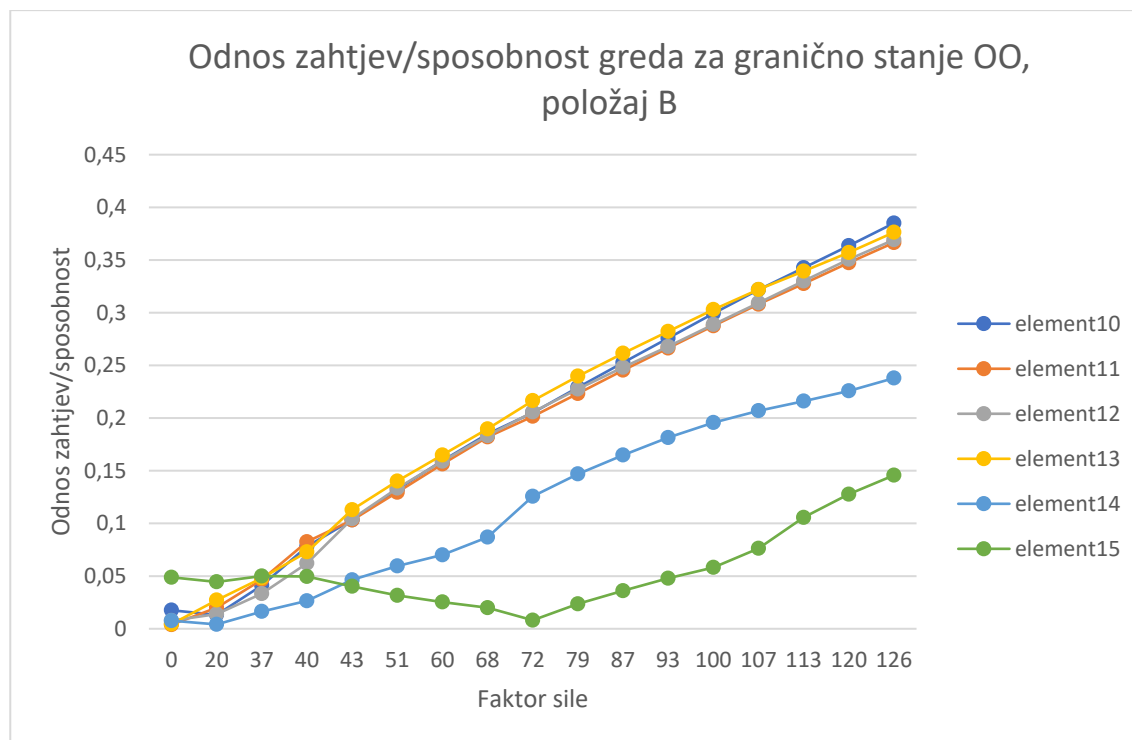
ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 1	12,42
ELEMENT 2	3,03
ELEMENT 3	0,03
ELEMENT 4	5,35
ELEMENT 5	5,18
ELEMENT 6	8,93
ELEMENT 7	3,99
ELEMENT 8	6,38
ELEMENT 9	17,12



Graf 8: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje OO, položaj A

Tablica 16: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje OO, položaj A

ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 10	49,09
ELEMENT 11	50,12
ELEMENT 12	44,78
ELEMENT 13	44,55
ELEMENT 14	41,93
ELEMENT 15	29,53



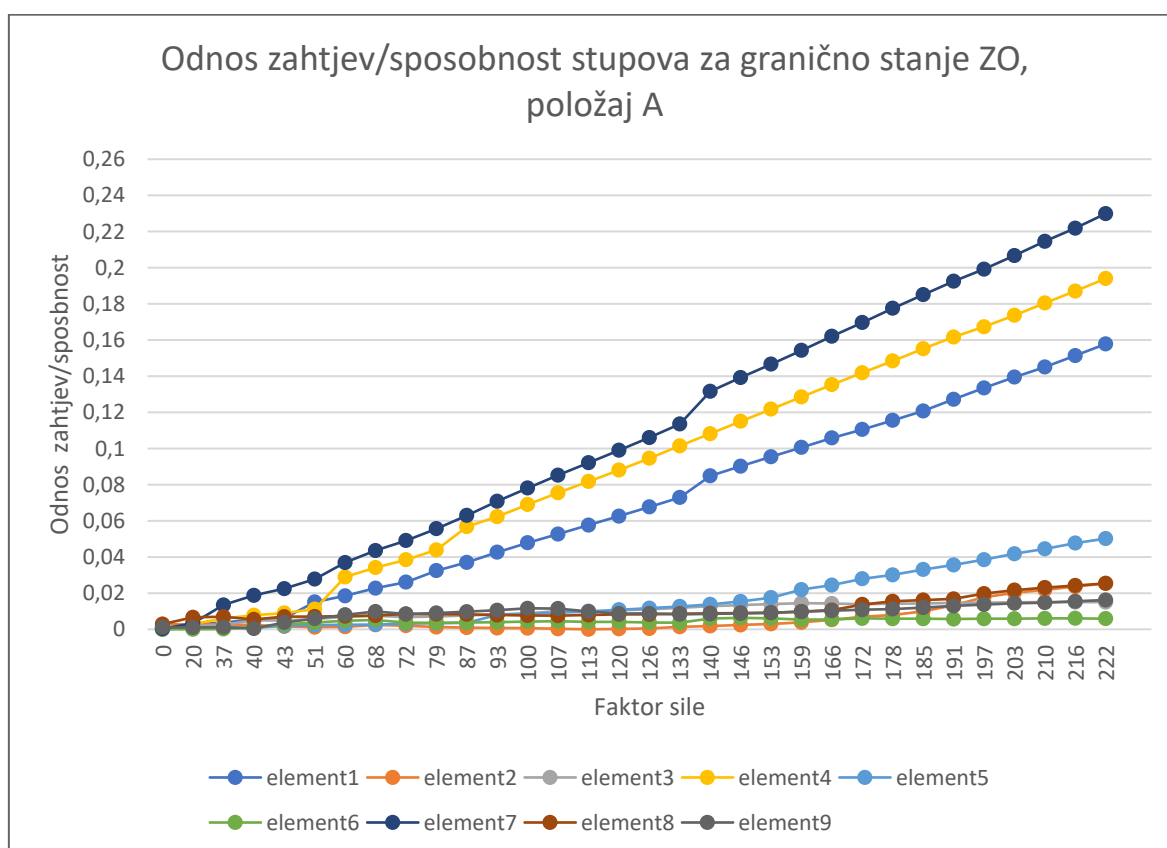
Graf 9: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje OO, položaj B

Tablica 17: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje OO, položaj B

ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 10	38,50
ELEMENT 11	36,65
ELEMENT 12	36,92
ELEMENT 13	37,63
ELEMENT 14	23,79
ELEMENT 15	14,57

GRANIČNO STANJE ZNATNOG OŠTEĆENJA

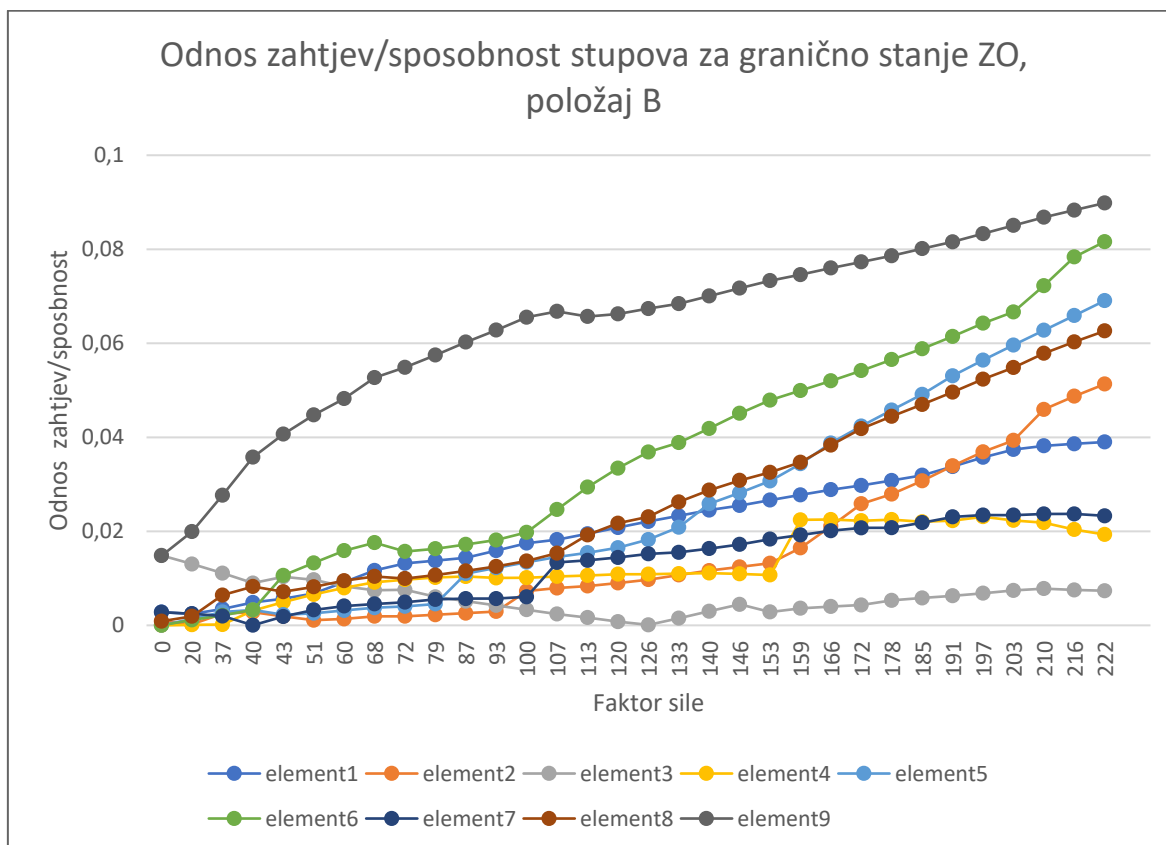
Na grafovima 10 i 11 prikazan je odnos zahtjev/sposobnost deformiranja čvorova stupova konstrukcije za granično stanje znatnog oštećenja. Vrijednosti odnosa zahtjeva i sposobnosti za iznos sile 510,78 kN koja odgovara zahtijevanom pomaku od 0,055 m za granično stanje znatnog oštećenja, izražene u %, prikazane su u Tablicama 18 i 19. Grafovi 12 i 13 te Tablice 20 i 21 prikazuju iste parametre, samo za grede.



Graf 10: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje ZO, položaj A

Tablica 18: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje ZO, položaj A

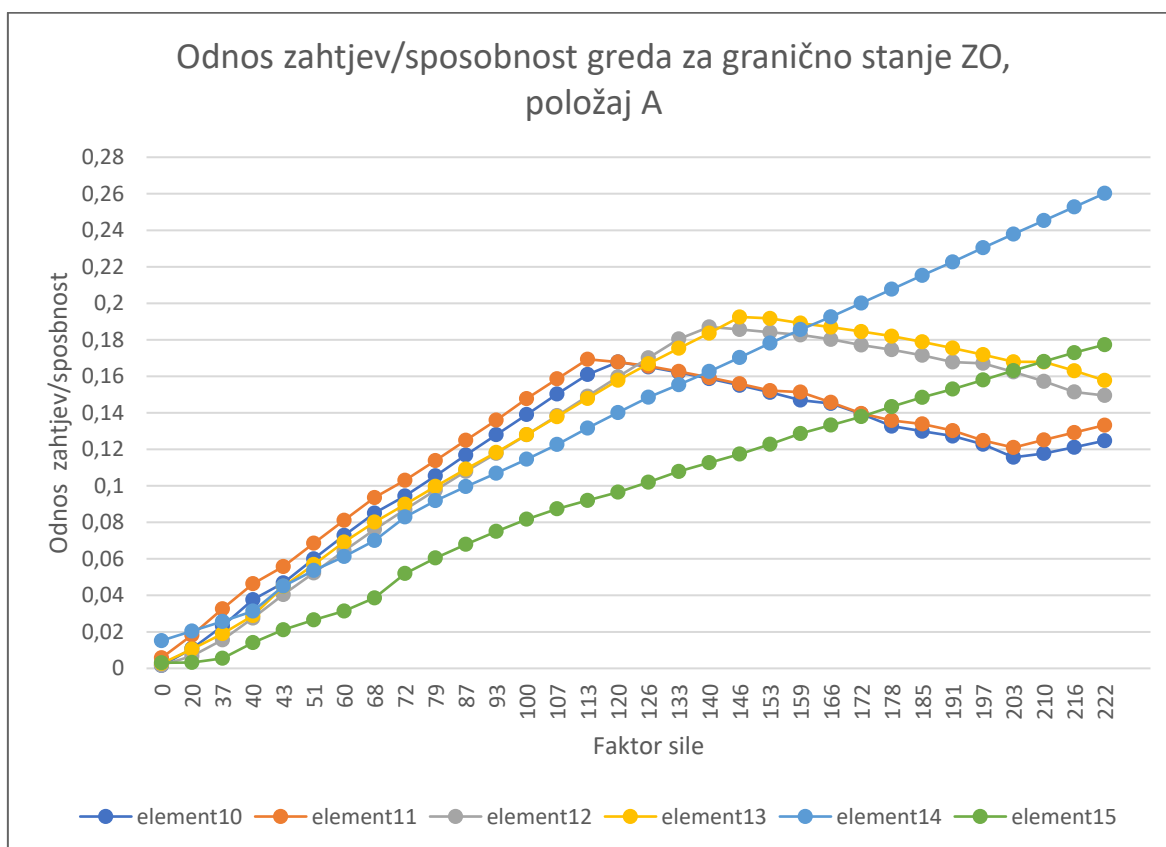
ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 1	15,78
ELEMENT 2	2,54
ELEMENT 3	1,51
ELEMENT 4	19,40
ELEMENT 5	5,02
ELEMENT 6	0,59
ELEMENT 7	22,99
ELEMENT 8	2,54
ELEMENT 9	1,62



Graf 11: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje ZO, položaj B

Tablica 19: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje ZO, položaj B

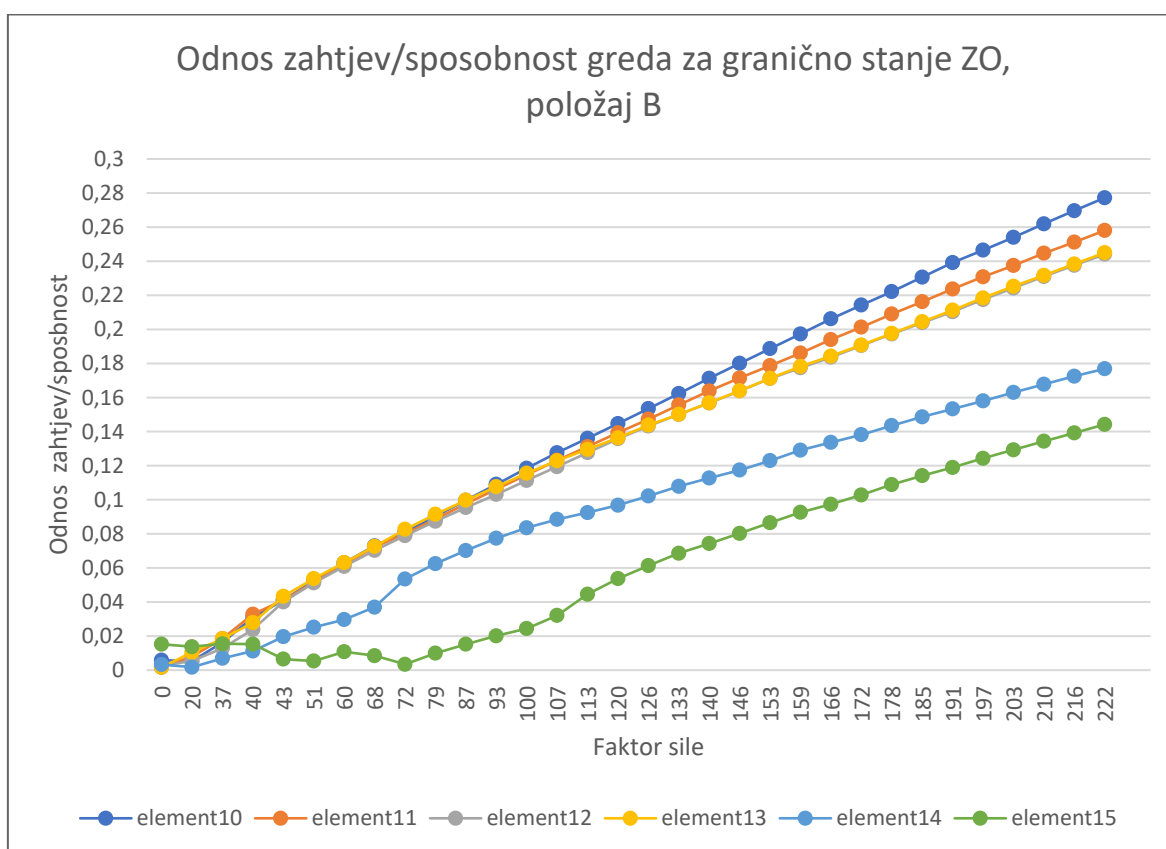
ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 1	3,90
ELEMENT 2	5,13
ELEMENT 3	0,74
ELEMENT 4	1,93
ELEMENT 5	6,91
ELEMENT 6	8,16
ELEMENT 7	2,33
ELEMENT 8	6,26
ELEMENT 9	8,98



Graf 12: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje ZO, položaj A

Tablica 20: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje ZO, položaj A

ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 10	12,47
ELEMENT 11	13,32
ELEMENT 12	14,95
ELEMENT 13	15,77
ELEMENT 14	26,03
ELEMENT 15	17,73



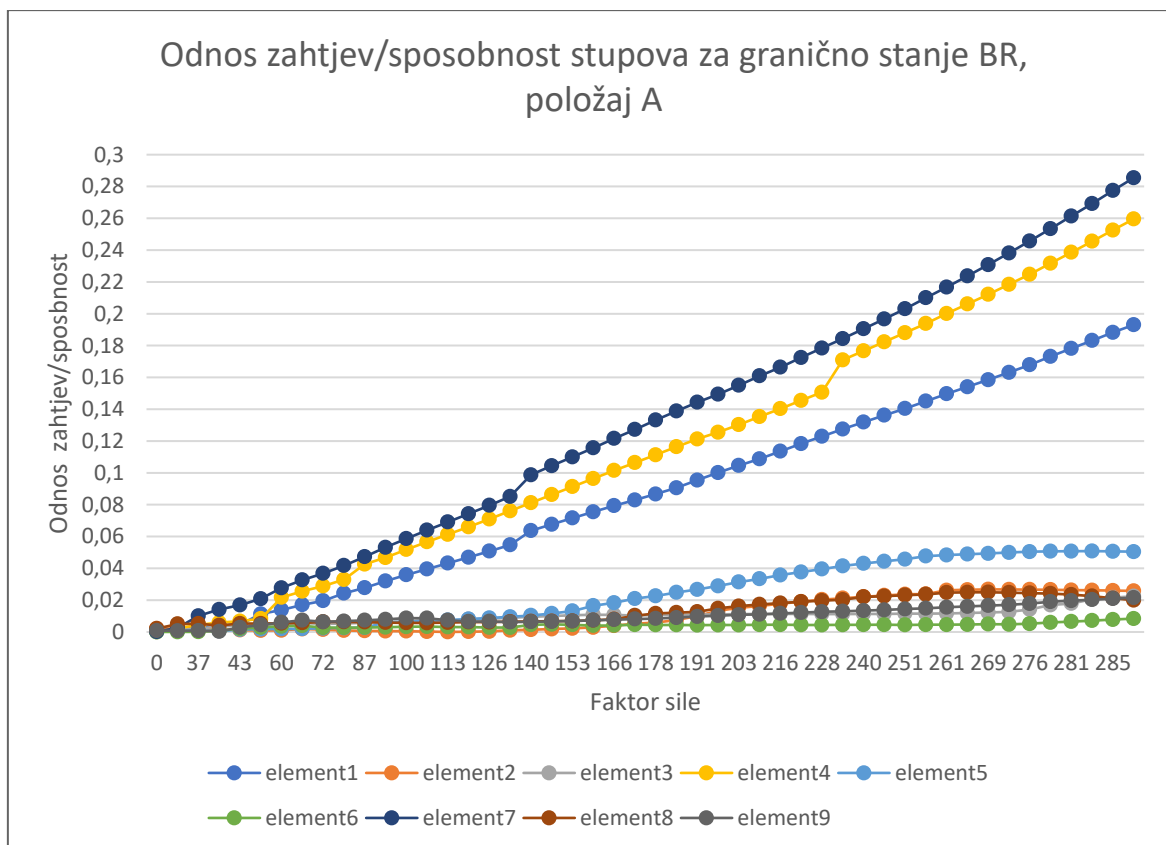
Graf 13: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje ZO, položaj B

Tablica 21: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje ZO, položaj B

ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 10	27,73
ELEMENT 11	25,81
ELEMENT 12	24,41
ELEMENT 13	24,50
ELEMENT 14	17,69
ELEMENT 15	14,42

GRANIČNO STANJE BLIZU RUŠENJA

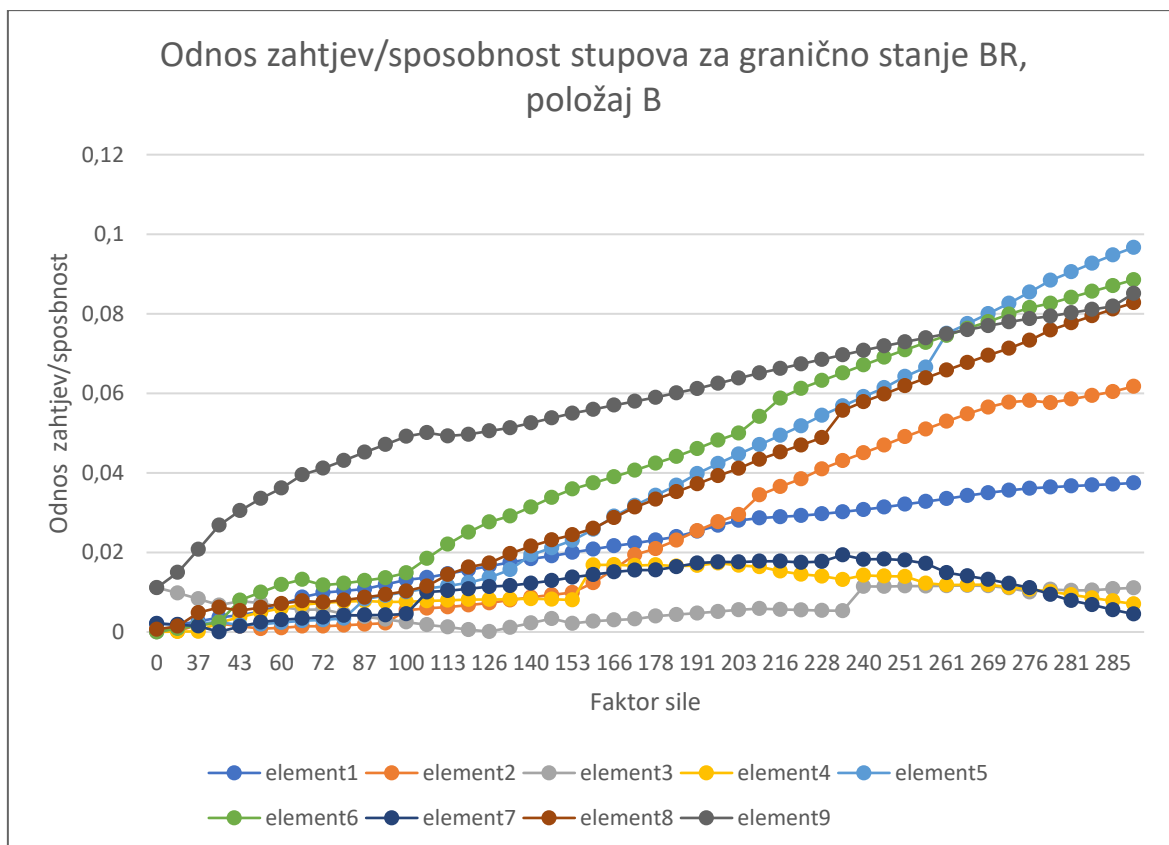
Na grafovima 14 i 15 prikazan je odnos zahtjev/sposobnost deformiranja čvorova stupova konstrukcije za granično stanje blizu rušenja. Vrijednosti odnosa zahtjeva i sposobnosti za iznos sile 670,11 kN koja odgovara zahtijevanom pomaku od 0,082 m za granično stanje blizu rušenja, izražene u %, prikazane su u Tablicama 22 i 23. Grafovi 16 i 17 te Tablice 24 i 25 prikazuju iste parametre, samo za grede.



Graf 14: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje BR, položaj A

Tablica 22: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje BR, položaj A

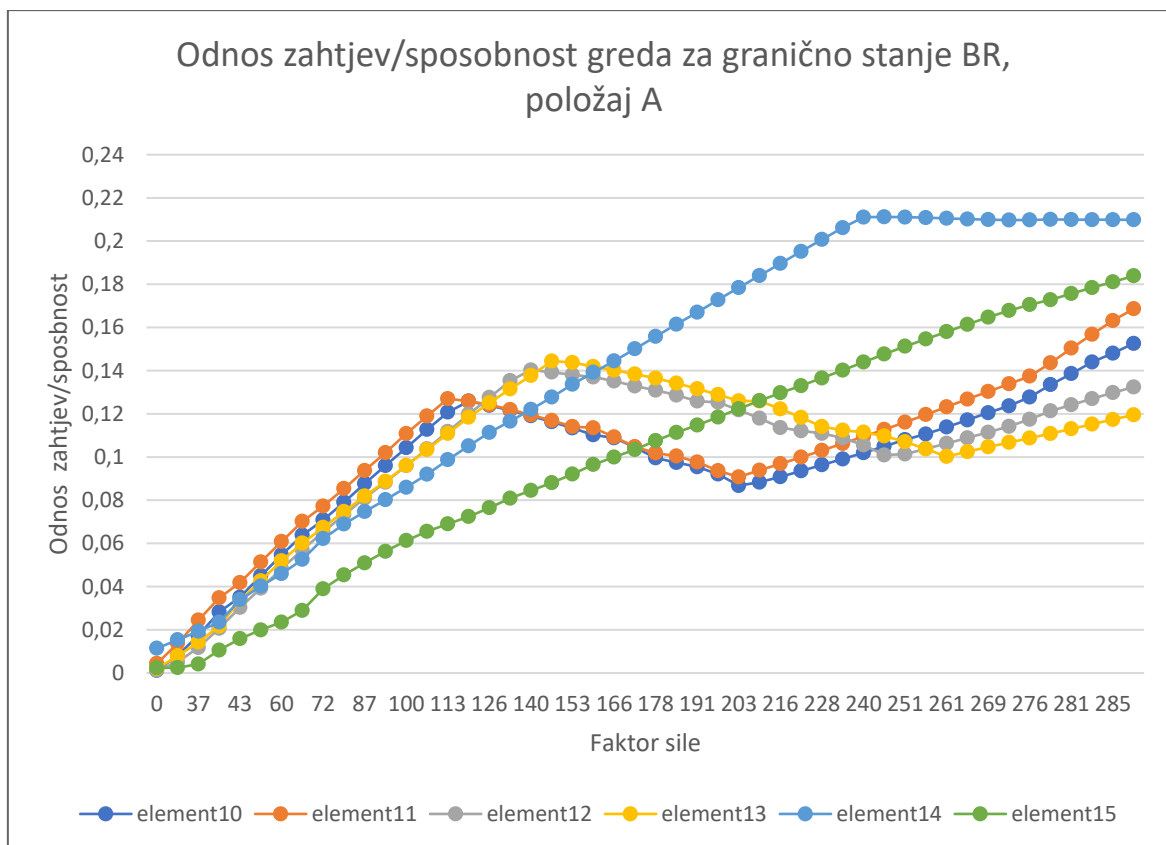
ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 1	19,30
ELEMENT 2	2,58
ELEMENT 3	2,24
ELEMENT 4	25,96
ELEMENT 5	5,04
ELEMENT 6	0,84
ELEMENT 7	28,55
ELEMENT 8	1,99
ELEMENT 9	2,15



Graf 15: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje BR, položaj B

Tablica 23: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje BR,
položaj B

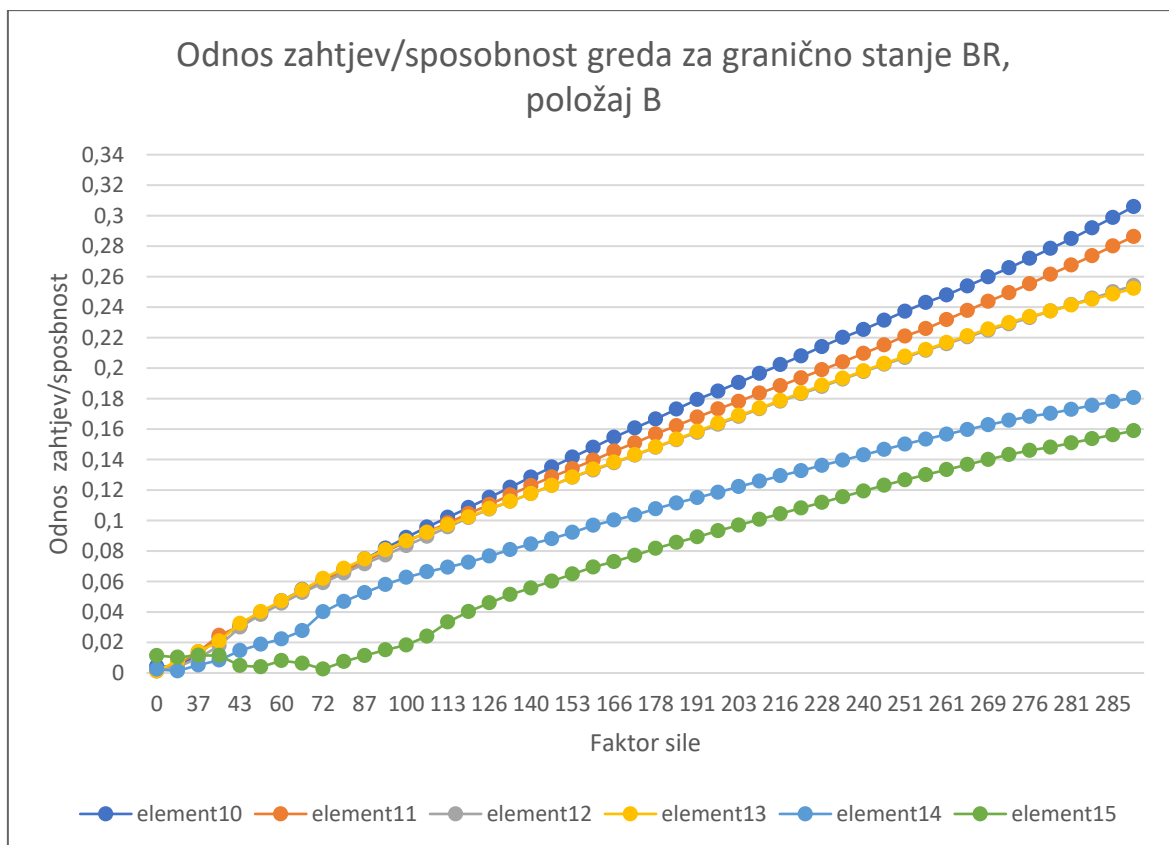
ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 1	3,75
ELEMENT 2	6,17
ELEMENT 3	1,11
ELEMENT 4	0,70
ELEMENT 5	9,67
ELEMENT 6	8,85
ELEMENT 7	0,45
ELEMENT 8	8,28
ELEMENT 9	8,51



Graf 16: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje BR, položaj A

Tablica 24: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje BR, položaj A

ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 10	15,26
ELEMENT 11	16,86
ELEMENT 12	13,24
ELEMENT 13	11,95
ELEMENT 14	20,98
ELEMENT 15	18,39

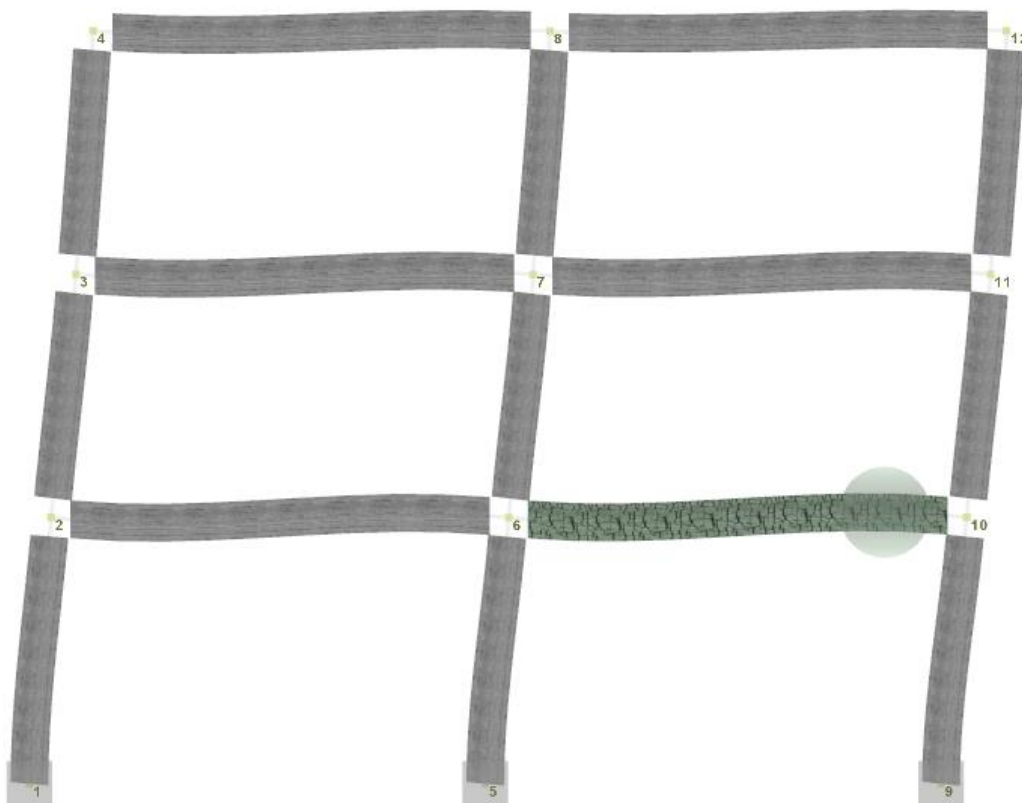


Graf 17: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje BR, položaj B

Tablica 25: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje BR, položaj B

ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 10	30,59
ELEMENT 11	28,63
ELEMENT 12	25,42
ELEMENT 13	25,22
ELEMENT 14	18,06
ELEMENT 15	15,89

Plastični zglob pojavio se samo u elementu 10, odnosno gredi POZ. 115, kod proračuna graničnog stanja ograničenog oštećenja. Vrijednost pomaka pri kojoj je nastupila pojava plastičnog zgloba iznosi 0,08448 m, a vrijednost poprečne sile tada iznosi 676,14 kN. Dakle, granično stanje ograničenog oštećenja nije prekoračeno, kao ni granično stanje znatnog oštećenja niti granično stanje blizu rušenja. Time je dokazano da je ova konstrukcija predimenzionirana te ima jako velike rezerve. Položaj plastičnog zgloba nalazi se na Slici 55.



Slika 55: Prikaz položaja plastičnog zgloba

Na Slici 56 prikazani su periodi vibracija po tonovima. Prvi period iznosi 0,54 s što je razlika od 0,13 sekundi prema periodu od 0,41 s [17] kojim je konstrukcija dimenzionirana.

MODAL Mode	PERIODS Period (sec)	AND Frequency (Hertz)	FREQUENCIES Angular Frequency (rad/sec)
1	0,53666317	1,86336619	11,70787505
2	0,14874632	6,72285525	42,24094534
3	0,06974123	14,33872107	90,09284155
4	0,05571524	17,94841107	112,77319273
5	0,04322999	23,13208790	145,34319480
6	0,04318993	23,15354582	145,47801890
7	0,03430694	29,14862412	183,14620682
8	0,03250960	30,76014911	193,27171696
9	0,01009901	99,01962428	622,15864838
10	0,01009798	99,02972385	622,22210586

Slika 56: Periodi vibracija po tonovima

7.4. Usporedba rezultata

U ovom poglavlju uspoređeni su dobiveni rezultati s rezultatima koji se nalaze u Prilogu 1.

Za ovaj način proračuna, gdje je ponašanje nosivih elemenata definirano kao neelastično vrijednost poprečne sile u podnožju iznosi 683,00 kN, dok je za način proračuna gdje su nosivi elementi zadani kao elastični s bilinearnom krivuljom i plastičnim zglobovima kao *link elementima* [22] dobivena je vrijednost poprečne sile od 602,5 kN. To čini razliku od 11,7 % što nije velika vrijednost. Pomaci su također približno jednake vrijednosti, za granično stanje OO razlika je 0,3 cm, za stanje ZO 0,6 cm, dok je za stanje BR razlika nešto veća, oko 1 cm.

Što se tiče odnosa zahtjeva i sposobnosti čvorova, ovim proračunom dokazane su još veće rezerve plastičnih zglobova za vrijednost ciljanog pomaka koji odgovaraju graničnim stanjima jer je vrijednost odnosa zahtjev/sposobnost greda i stupova za sva granična stanja manja nego kod [22]. Za oba načina proračuna nije se dogodilo ni jedno prekoračenje graničnih stanja. Ipak, za ovaj način proračuna pojavio se samo jedan plastični zglob, u elementu 10 (greda POZ. 115), dok su se kod [22] plastični zglobovi pojavili u svim gredama i stupovima 1,5 i 9.

Vrijednosti prvog tona osnovnog perioda se također dosta razlikuju. U ovom proračunu on iznosi 0,54 s dok je kod [22] ta vrijednost 0,76 s što je dosta velika razlika.

Dakle, razlike u proračunu dogodile su se zbog načina definiranja ponašanja nosivih elemenata te načina zadavanja potresnih sila. Iako su u oba modela proračuni napravljeni za ovijeni beton, način zadavanja odnosa naprezanje – deformacija nosivih elemenata donio je razlike u rezultatima. Također, u ovom modelu nije bilo potrebno posebno definirati

ponašanje plastičnih zglobova, jer su oni uključeni u model ponašanja zadanim *element classom* – *infrmFBPH*. U [22] vrijednosti horizontalnih potresnih sila zadane su trokutno, rastući linearno od dna prema vrhu, dok je u ovom radu korišten modalni način zadavanja istih te konstrukcija na vrhu nema najveću vrijednost sile zbog manje mase u odnosu na prethodne katove. Također, u ovom načinu proračuna poprečni presjeci su pretpostavljeni kao neraspucani, dok se u [22] proračun provodio s raspucanim presjekom.

U globalu, vrijednosti ciljanog pomaka za sva tri granična stanja su gotovo jednake, no ovim načinom proračuna dokazane su još veće rezerve elemenata dimenzioniranih prema [17] stoga je potrebno s novom vrijednosti perioda ponoviti linearni proračun kako bi se uštedjelo na armaturi.

8. DIMENZIONIRANJE METODOM BOČNIH SILA

Provedbom proračuna metodom postupnog guranja utvrdilo se da konstrukcija sadrži velike rezerve što se tiče nosivosti, stoga je ponovljen proračun s novim osnovnim periodom.

Na Slici 56 prikazani su rezultati osnovnih perioda i frekvencija dobivenih metodom postupnog guranja. S obzirom na to da su to vrijednosti dobivene uz pretpostavku neraspucanih presjeka, potrebno je dobiti novu vrijednost perioda za linearni proračun. To se radi na način da se vrijednost omjera krutosti raspucanih i neraspucanih presjeka uzme jednaka 0,5.

Dakle, imamo izraz za kružnu frekvenciju, ω (45) i frekvenciju titranja, f (46) [2]:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \rightarrow \omega^2 = \frac{k}{m} \quad (45)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \rightarrow \omega = 2\pi \cdot f \quad (46)$$

gdje su:

ω – kružna frekvencija, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$

k – krutost, N/m

m – masa, kg

f – frekvencija titranja, Hz

Kada se ti izrazi izjednače, dobiva se izraz (47):

$$4\pi^2 \cdot f^2 = \frac{k}{m} \quad (47)$$

Prema (47) imamo frekvenciju prvog perioda izračunatog u *SeismoStructu*, f_1^1 (48):

$$(f_1^1)^2 = \frac{k_1}{m \cdot 4\pi^2} \quad (48)$$

te novu vrijednost frekvencije prvog perioda koja je potrebna za linearni proračun, f_1^2 (49):

$$(f_1^2)^2 = \frac{k_2}{m \cdot 4\pi^2} \quad (49)$$

Provedenim matematičkim operacijama izraza (48) i (49) dobiva se izraz (50):

$$\frac{(f_1^1)^2}{(f_1^2)^2} = \frac{k_1}{k_2} \quad (50)$$

Kako je već napisano, uzima se da je omjer krutosti jednak 0,5 te iz stoga slijedi (51):

$$\frac{(f_1^1)^2}{(f_1^2)^2} = 0,5 \quad (51)$$

Kada se izraz (51) okrene, dobiva se nova vrijednost frekvencije f_1^2 (52):

$$(f_1^2)^2 = (f_1^1)^2 \cdot 0,5 \quad (52)$$

Vrijednost f_1^1 je poznata sa Slike 56 te ona iznosi 1,863 Hz.

Kada se ta vrijednost uvrsti u izraz (52) dobiva se nova frekvencija titranja potrebna za linearni proračun, f_1^2 (53):

$$\begin{aligned} (f_1^2)^2 &= (1,863)^2 \cdot 0,5 \\ (f_1^2)^2 &= 1,735 \\ f_1^2 &= \sqrt{1,735} \\ f_1^2 &= 1,317 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (53)$$

Linearni proračun provodi se s vrijednostima perioda, tako da je vrijednost frekvencije potrebno preračunati u vrijednost prvog perioda vibracija. Izraz koji povezuje vrijednost perioda vibracija i frekvencije titranja glasi (54) [2]:

$$f = \frac{1}{T} \quad (54)$$

pri čemu je T osnovna vrijednost perioda vibracija, izraženo u s.

Dakle, prema (54) vrijednost prvog perioda vibracija potrebnih za proračun, T_1^2 jednaka je (55):

$$T_1^2 = \frac{1}{f_1^2} = \frac{1}{1,317} = 0,76 \text{ s} \quad (55)$$

8.1. Proračun potresnog opterećenja

Vrijednost prvog perioda prema izrazu (55) iznosi:

$$T_1 = 0,76 \text{ s}$$

Kako bi se mogla primijeniti metoda proračuna s bočnim silama, vrijednost osnovnog perioda konstrukcije T_1 mora biti manja od sljedećih vrijednosti (56) [7]:

$$T_1 \leq \begin{cases} 4 \cdot T_c \\ 2,0 \text{ s} \end{cases} \quad (56)$$

Vrijednosti T_c dane su u Tablici 6. Za temeljno tlo kategorije A vrijednost T_c iznosi 0,4 s.

Kada se ta vrijednost uvrsti u izraz (56) ograničena vrijednost osnovnog perioda iznosi (57):

$$T_1 \leq \begin{cases} 4 \cdot T_c = 4 \cdot 0,4 = 1,6 \text{ s} \\ 2,0 \text{ s} \end{cases} = 1,6 \text{ s} \quad (57)$$

Dakle, prema (57) ispada:

$$T_1 \leq 1,6 \text{ s}$$

$$0,76 \text{ s} < 1,6 \text{ s}$$

Usvojena vrijednost osnovnog perioda konstrukcije iznosi 0,76 s.

Ukupna potresna sila (eng. *base shear*), F_b dobiva se prema izrazu (8) navedenom u poglavlju 4.3. *Izračun ukupne vrijednosti poprečne sile konstrukcije od potresa*, no radi lakšeg snalaženja u proračunu naveden je u nastavku:

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda \quad (8)$$

Poznati parametri su:

$$T_1 = 0,76 \text{ s}$$

$$\lambda = 0,85 \quad (T_1 \leq 2T_c)$$

$$m = 13973,99 \text{ kN prema [17]}$$

Vrijednost ordinata proračunskog spektra za period T_1 , $S_d(T_1)$ dobiva se prema izrazu (58) za proračunskog horizontalnog elastični spektar tipa 1 iz [7]:

$$\begin{aligned}
 S_d(T) &= a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] && \text{za} && 0 \leq T \leq T_B \\
 S_d(T) &= a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} && \text{za} && T_B \leq T \leq T_C \\
 S_d(T) &= \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} && \text{za} && T_C \leq T \leq T_D \\
 S_d(T) &= \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} && \text{za} && T_D \leq T
 \end{aligned} \tag{58}$$

gdje su:

q – faktor ponašanja

$S_d(T)$ – proračunski elastični spektar odziva za period T

S – faktor sloja, Tablica 6.

T – period vibracija sustava s jednim stupnjem slobode

T_B, T_C - granice perioda s vrijednostima konstantnog spektralnog ubrzanja, Tablica 6.

T_D - vrijednost koja definira početak raspona odziva spektra sa konstantnim pomacima, Tablica 6.

a_g - proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu tipa A, $a_g = 0,206g$ [17]

a_{gR} - referentno vršno ubrzanje temeljnog tla tipa A, $a_{gR} = 0,206g$ [17]

β - donja vrijednost faktora horizontalnog spektra odziva ($\beta = 0,2$)

$$T_1 = 0,76 \text{ s}$$

Prema (58) izračunava se proračunski elastični spektar odziva za prvi period, $S_d(T_1)$

$$T_C \leq T \leq T_D: \quad S_d(T_1) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T_1} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

$$0,40 \text{ s} \leq 0,76 \text{ s} \leq 2,00 \text{ s}: \quad S_d(T_1 = 0,76 \text{ s}) = \begin{cases} 0,206g \cdot 1,5 \cdot \frac{2,5}{3,9} \cdot \left[\frac{0,40}{0,76} \right] \\ \geq 0,2 \cdot 0,206g \end{cases}$$

$$\frac{S_d}{g}(T_1 = 0,76 \text{ s}) = \begin{cases} 0,104 \text{ s} \\ \geq 0,041 \text{ s} \end{cases}$$

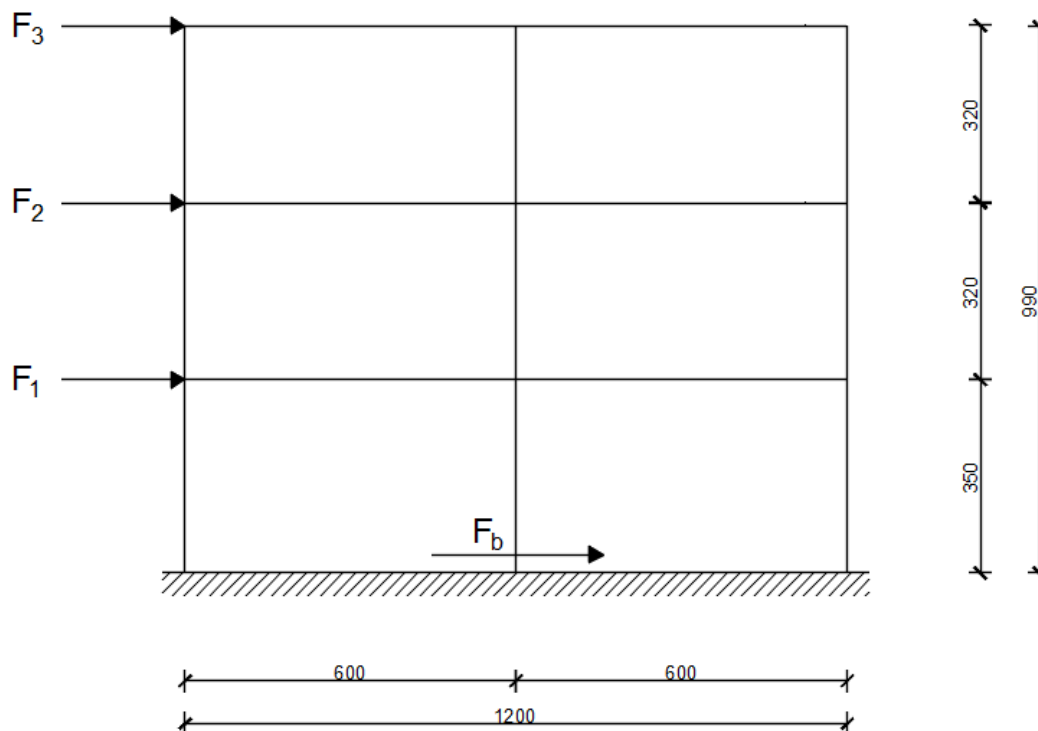
Usvojena vrijednost proračunskog elastičnog spektra odziva za prvi period, $S_d(T_1)$ iznosi 0,104 s.

Kada su poznati svi parametri, prema izrazu (8) dobiva se ukupna vrijednost potresne poprečne sile (59):

$$F_b = 0,104 \cdot 13973,99 \cdot 0,85 = 1235,3 \text{ kN} \quad (59)$$

8.1.1. Raspodjela ukupne poprečne sile potresa po visini građevine

Vrijednost ukupne poprečne sile iz (59) potrebno je rasporediti po visini građevine, kao što je to prikazano na Slici 62. Raspodjela sile računa se prema izrazu (15) koji je naveden u poglavlju 4.5. *Raspodjela ukupne poprečne sile potresa po visini građevine.*



Slika 57. Način raspodjele ukupne poprečne potresne sile po visini građevine [izradio autor]

$$F_i = F_b \cdot \frac{s_i \cdot m_i}{\sum s_j \cdot m_j} \quad (15)$$

gdje su:

F_i – sila koja djeluje na i – tom katu

$F_b = 1235,3$ kN (prema (59))

s_i, s_j – „pomaci“ masa m_i i m_j u osnovnom tonu

m_i, m_j – mase katova i, j određene prema (9)

Pomaci masa prikazani su na Slici 39, a iznose:

- $s_3 = 8,16 \cdot 10^{-5}$ m
- $s_2 = 5,93 \cdot 10^{-5}$ m
- $s_1 = 2,77 \cdot 10^{-5}$ m

Mase katova izračunate su u [17], njihove vrijednosti su:

- $m_3 = 3349,27 \text{ kN}$
- $m_2 = 5266,78 \text{ kN}$
- $m_1 = 5266,78 \text{ kN}$

$$\Sigma s_j \cdot m_j = 8,16 \cdot 10^{-5} \cdot 3349,27 + (5,93 \cdot 10^{-5} + 2,77 \cdot 10^{-5}) \cdot 5266,78 = 0,73 \text{ kNm}$$

$$F_3 = 1235,3 \cdot \frac{8,16 \cdot 10^{-5} \cdot 3349,27}{0,73} = 461,52 \text{ kN}$$

$$F_2 = 1235,3 \cdot \frac{5,93 \cdot 10^{-5} \cdot 5266,78}{0,73} = 527,42 \text{ kN}$$

$$F_1 = 1235,3 \cdot \frac{2,77 \cdot 10^{-5} \cdot 5266,78}{0,73} = 246,36 \text{ kN}$$

$$\sum F_i = F_b = 1235,3 \text{ kN}$$

Horizontalne sile prenose se na svih 5 poprečnih okvira. Zbog jednakih dimenzija imaju i jednake krutosti pa na jedan okvir otpada:

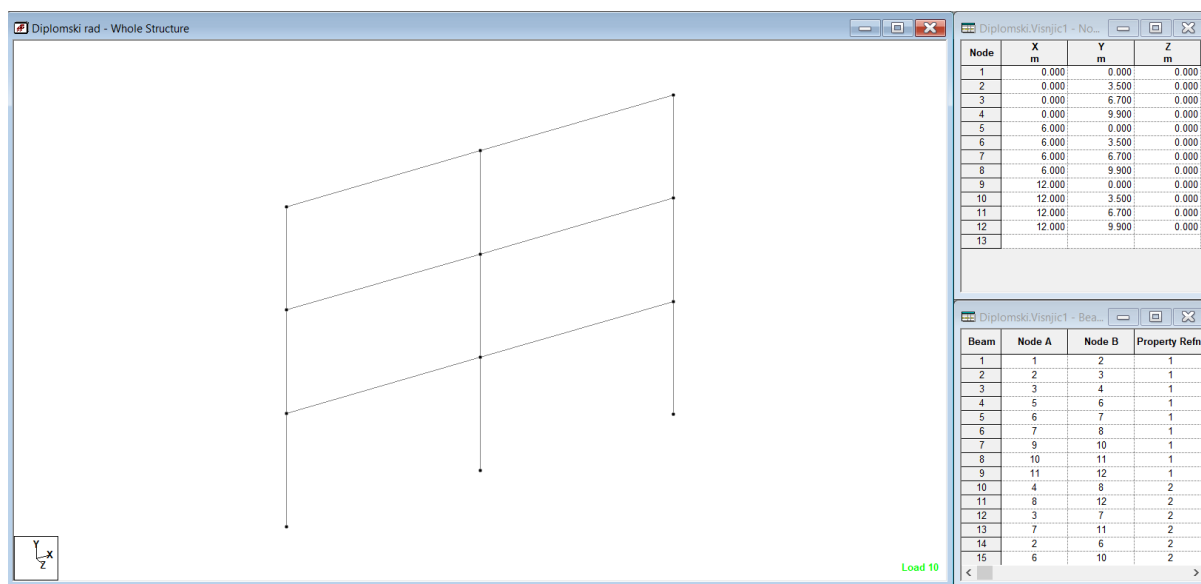
$$F'_3 = \frac{1}{5} \cdot 461,52 = 92,30 \text{ kN}$$

$$F'_2 = \frac{1}{5} \cdot 527,42 = 105,48 \text{ kN}$$

$$F'_1 = \frac{1}{5} \cdot 246,36 = 49,27 \text{ kN}$$

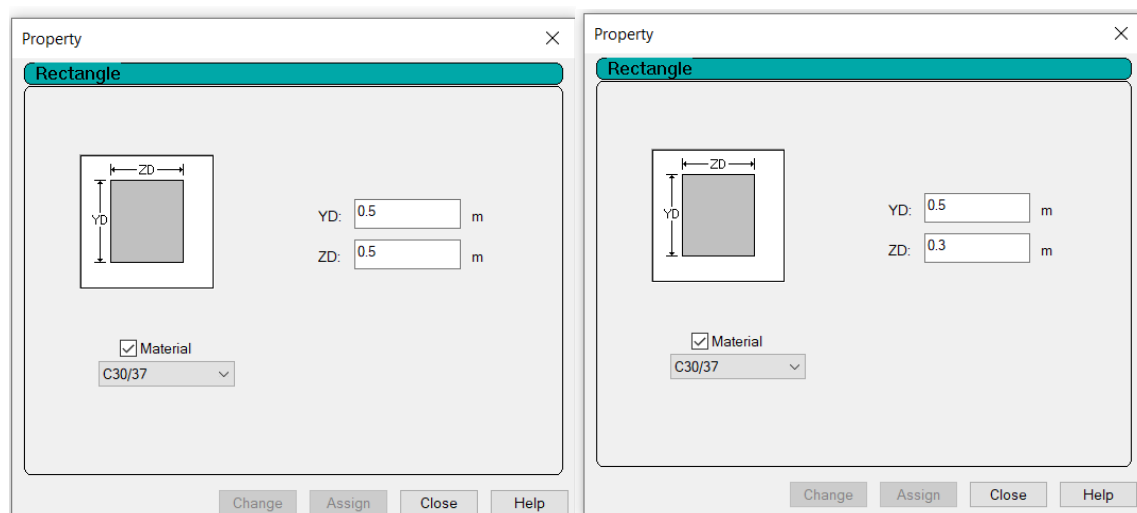
8.2. Ulazni podaci za softver Staad.Pro

Prvi korak proračuna u softveru Staad.Pro je unos geometrije okvira, što je prikazano na Slici 58.

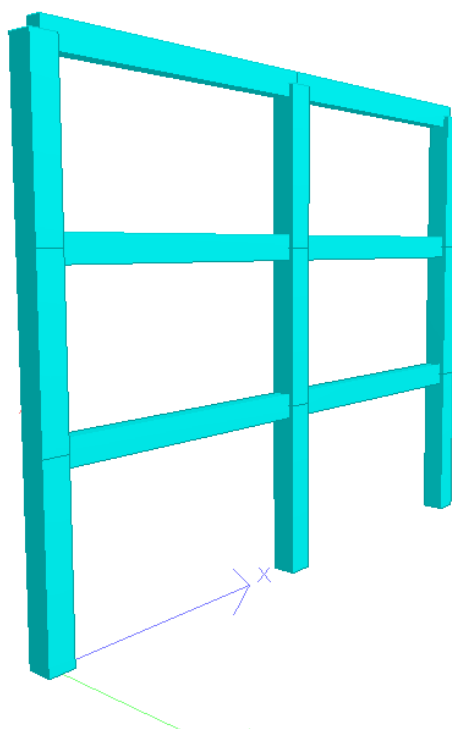


Slika 58: Formiranje geometrije okvira

Zatim se unose dimenzije poprečnog presjeka greda i stupova. Poprečni presjek stupa je 50x50 cm, a greda je dimenzija 30x50 cm. Dimenzije poprečnog presjeka zadaju se u kartici *Properties*, prikazanoj na Slici 59 (lijevo stup, desno greda). Prikaz cijele konstrukcije nakon zadanih poprečnih presjeka nalazi se na Slici 60.



Slika 59: Prozor za zadavanje poprečnog presjeka (lijevo stup, desno greda)



Slika 60: 3D prikaz okvira

Sljedeće je zadavanje materijala. To je beton C30/37 čiji je modul elastičnosti 33 GPa, a modul posmika jednak je 13.75 GPa za vrijednost Poissonovog koeficijenta 0,2. Gustoća iznosi 25 kN/m³. Sve to prikazano je na Slici 61.

Identification	
Title :	C30/37
Material Properties	
Young's Modulus (E) :	3.3e+07 kN/m ²
Poisson's Ratio (nu) :	0.2
Density :	25 kN/m ³
Thermal Coeff(a) :	0 /°F
Critical Damping :	0
Shear Modulus (G) :	1.375e+07 kN/m ²

Slika 61: Zadavanje parametara betona C30/37

U kartici *Supports* potrebno je još dodati upete oslonce kod stupova te se može prijeći na zadavanje opterećenja u kartici *Loading*.

Vrijednosti svih opterećenja preuzeta su iz [17], osim vrijednosti horizontalnih potresnih sila koje su izračunate u poglavlju 8.1.1. *Raspodjela ukupne poprečne sile potresa po visini građevine*.

8.2.1. Kombinacije djelovanja

Opći izraz za stalnu kombinaciju djelovanja dan je izrazom (2), dok je potresna proračunska kombinacija dana izrazom (4).

Kombinacije djelovanja za zadani model su sljedeće:

Stalna proračunska kombinacija:

- 1) Stalno + uporabno simetrično + snijeg $\rightarrow 1,35G_{k,j} + 1,5Q_{k,1} + 1,5 \cdot 0,5Q_{k,2}$
- 2) Stalno + uporabno nesimetrično desno + snijeg $\rightarrow 1,35G_{k,j} + 1,5Q_{k,1} + 1,5 \cdot 0,5Q_{k,2}$
- 3) Stalno + uporabno nesimetrično lijevo + snijeg $\rightarrow 1,35G_{k,j} + 1,5Q_{k,1} + 1,5 \cdot 0,5Q_{k,2}$
- 4) Stalno + uporabno simetrično + vjetar + snijeg $\rightarrow 1,35G_{k,j} + 1,5Q_{k,1} + 1,5 \cdot 0,6Q_{k,2} + 1,5 \cdot 0,5Q_{k,3}$
- 5) Stalno + uporabno nesimetrično desno + vjetar + snijeg $\rightarrow 1,35G_{k,j} + 1,5Q_{k,1} + 1,5 \cdot 0,6Q_{k,2} + 1,5 \cdot 0,5Q_{k,3}$

- 6) Stalno + uporabno nesimetrično lijevo + vjetar + snijeg $\rightarrow 1,35G_{k,j} + 1,5Q_{k,1} + 1,5 \cdot 0,6Q_{k,2} + 1,5 \cdot 0,5Q_{k,3}$
- 7) Stalno + vjetar + uporabno simetrično + snijeg $\rightarrow 1,35G_{k,j} + 1,5Q_{k,1} + 1,5 \cdot 0,7Q_{k,2} + 1,5 \cdot 0,5Q_{k,3}$
- 8) Stalno + vjetar + uporabno nesimetrično desno + snijeg $\rightarrow 1,35G_{k,j} + 1,5Q_{k,1} + 1,5 \cdot 0,7Q_{k,2} + 1,5 \cdot 0,5Q_{k,3}$
- 9) Stalno + vjetar + uporabno nesimetrično lijevo + snijeg $\rightarrow 1,35G_{k,j} + 1,5Q_{k,1} + 1,5 \cdot 0,7Q_{k,2} + 1,5 \cdot 0,5Q_{k,3}$
- 10) Stalno + snijeg + uporabno simetrično + vjetar $\rightarrow 1,35G_{k,j} + 1,5Q_{k,1} + 1,5 \cdot 0,7Q_{k,2} + 1,5 \cdot 0,6Q_{k,3}$
- 11) Stalno + snijeg + uporabno nesimetrično desno + vjetar $\rightarrow 1,35G_{k,j} + 1,5Q_{k,1} + 1,5 \cdot 0,7Q_{k,2} + 1,5 \cdot 0,6Q_{k,3}$
- 12) Stalno + snijeg + uporabno nesimetrično lijevo + vjetar $\rightarrow 1,35G_{k,j} + 1,5Q_{k,1} + 1,5 \cdot 0,7Q_{k,2} + 1,5 \cdot 0,6Q_{k,3}$

Potresna proračunska kombinacija:

- 13) Stalno + potresno opterećenje + uporabno simetrično $\rightarrow G_{k,j} + A_{Ed} + 0,3Q_{k,1}$
- 14) Stalno - potresno opterećenje + uporabno simetrično $\rightarrow G_{k,j} - A_{Ed} + 0,3Q_{k,1}$
- 15) Stalno + potresno opterećenje + uporabno nesimetrično desno $\rightarrow G_{k,j} + A_{Ed} + 0,3Q_{k,1}$
- 16) Stalno - potresno opterećenje + uporabno nesimetrično desno $\rightarrow G_{k,j} - A_{Ed} + 0,3Q_{k,1}$
- 17) Stalno + potresno opterećenje + uporabno nesimetrično lijevo $\rightarrow G_{k,j} + A_{Ed} + 0,3Q_{k,1}$
- 18) Stalno - potresno opterećenje + uporabno nesimetrično lijevo $\rightarrow G_{k,j} - A_{Ed} + 0,3Q_{k,1}$

9. DIMENZIONIRANJE OKVIRA

9.1. Dimenzioniranje greda na moment savijanja

Provođenjem analize u programskom softveru *Staad.Pro* dobivene su vrijednosti momenata savijanja za sve kombinacije djelovanja. Za svaku poziciju grede očita se maksimalna vrijednost u polju i na osloncima prema kojoj se radi dimenzioniranje.

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Ed}}{b_{eff} \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad (60)$$

M_{Ed} – najveća vrijednost momenta savijanja

b_{eff} – sudjelujuća širina poprečnog presjeka

d – statička visina presjeka

f_{cd} – proračunska tlačna čvrstoća betona

Potrebna površina armature:

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} \quad (61)$$

ζ – koeficijent kraka unutarnjih sila

f_{yd} – proračunska granica popuštanja čelika za armiranje

Minimalna armatura (stalna proračunska kombinacija):

$$A_{s,min} = \max \begin{cases} 0,26 * b_w * d * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \\ 0,0013 * b_w * d \end{cases} \quad (62)$$

f_{ctm} – srednja vlačna čvrstoća betona

f_{yk} – karakteristična granica popuštanja čelika za armiranje

b_w – najmanja širina poprečnog presjeka u vlačnom području

Minimalna armatura (potresna proračunska kombinacija):

$$A_{s,min} = \rho_{min} \cdot b_w \cdot d \quad (63)$$

ρ_{min} – koeficijent armiranja vlačnom armaturom

$$\rho_{min} = 0,5 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \quad (64)$$

Vrijednosti preuzete iz [17]:

- sudjelujuća širina poprečnog presjeka, $b_{eff} = 198$ cm (polje)
- statička visina presjeka, $d = 44,5$ cm
- proračunska tlačna čvrstoća betona, $f_{cd} = 20$ Mpa
- proračunska granica popuštanja čelika za armiranje, $f_{yd} = 434,78$ Mpa
- srednja vlačna čvrstoća betona, $f_{ctm} = 29$ Mpa
- najmanja širina poprečnog presjeka u vlačnom području, $b_w = 30$ cm

9.1.1. Greda POZ. 311 – 311

POLJE

Mjerodavna je stalna proračunska situacija (kombinacija 11).

$$M_{Ed} = 117,7 \text{ kNm}$$

Pretpostavka je da neutralna os prolazi kroz poču ili njezinim donjim rubom $x \leq h_f$.

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Ed}}{b_{eff} \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{11771}{198 \cdot 44,5^2 \cdot 2} = 0,015$$

Za $\mu_{Ed} = 0,020$ očitano je:

$$\xi = 0,025 \quad \zeta = 0,990$$

Uvjet: $x \leq h_f$:

$$\xi = \frac{x}{d} \rightarrow x = \xi \cdot d = 0,025 \cdot 44,5 = 1,11$$

$$1,11 < 20 \text{ cm}$$

Neutralna os prolazi kroz ploču, stoga je dimenzioniramo kao pravokutni presjek širine b_{eff} i visine h .

Potrebna površina armature:

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{11771}{0,990 \cdot 44,5 \cdot 43,48} = 6,15 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

Minimalna armatura:

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,26 \cdot b_w \cdot d \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} = 0,26 \cdot 30 \cdot 44,5 \cdot \frac{2,9}{500} = 2,01 \text{ cm}^2/\text{m}' \\ 0,0013 \cdot b_w \cdot d = 0,0013 \cdot 30 \cdot 44,5 = 1,74 \text{ cm}^2/\text{m}' \end{array} \right.$$

Glavna armatura u polju POZ. 311 – 311:

Odabrano: 4 ϕ 14 (6, 16 cm²/m').

VANJSKI OSLOHCI

Mjerodavna je potresna proračunska situacija (kombinacija 13).

$$M_{Ed} = 160,29 \text{ kNm}$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Ed}}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{16029}{30 \cdot 44,5^2 \cdot 2} = 0,134$$

Za $\mu_{Ed} = 0,134$ očitano je:

$$\xi = 0,179 \quad \zeta = 0,925$$

$\xi < \xi_{lim} = 0,45 \rightarrow$ nije potrebno dvostruko armiranje.

Potrebna površina armature:

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{16029}{0,925 \cdot 44,5 \cdot 43,48} = 8,96 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

Minimalna armatura:

$$A_{s,min} = \rho_{min} \cdot b_w \cdot d$$

Za C30/37 koeficijent armiranja iznosi:

$$\rho_{min} = 0,5 \cdot \frac{2,9}{500} = 0,0029$$

Odakle je minimalna armatura:

$$A_{s,min} = 0,0029 \cdot 30 \cdot 45 = 3,87 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

Glavna armatura nad vanjskim osloncem POZ. 311 – 311:

Odabrano: 4 ϕ 16 + 2 ϕ 8 (8,04 + 1,01 = 9,05 cm²/m').

Kod potresene proračunske situacije radi osiguranja lokalne duktilnosti potrebno je najmanje 50% vlačne armature staviti u tlačno područje:

Odabrano: 3 ϕ 14 (4,62 cm²/m').

UNUTARNJI OSLOMAC

Mjerodavna je stalna proračunska situacija (kombinacija 7).

$$M_{Ed} = 201,56 \text{ kNm}$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Ed}}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{20156}{30 \cdot 44,5^2 \cdot 2} = 0,1696$$

Za $\mu_{Ed} = 0,171$ očitano je:

$$\xi = 0,233 \quad \zeta = 0,903$$

Potrebna površina armature:

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{20156}{0,903 \cdot 44,5 \cdot 43,48} = 11,53 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

Minimalna armatura:

$$A_{s,min} = \max \begin{cases} 0,26 * b_{eff} * d * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} = 0,26 * 30 * 44,5 * \frac{2,9}{500} = 2,01 \text{ cm}^2/m' \\ 0,0013 * b_w * d = 0,0013 * 30 * 44,5 = 1,74 \text{ cm}^2/m' \end{cases}$$

Glavna armatura nad unutarnjim osloncem grede POZ. 311 – 311:

Odabrano: 2 ϕ 25 + 1 ϕ 16 (9,82 + 2,01 = 11,83 cm²/m').

9.1.2. Greda POZ. 215 – 215

POLJE

Mjerodavna je stalna proračunska situacija (kombinacija 6).

$$M_{Ed} = 101,1 \text{ kNm}$$

Pretpostavka je da neutralna os prolazi kroz poču ili njezinim donjim rubom $x \leq h_f$.

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Ed}}{b_{eff} \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{10110}{198 \cdot 44,5^2 \cdot 2} = 0,013$$

Za $\mu_{Ed} = 0,020$ očitano je:

$$\xi = 0,025 \quad \zeta = 0,990$$

Uvjet: $x \leq h_f$:

$$\xi = \frac{x}{d} \rightarrow x = \xi \cdot d = 0,025 * 44,5 = 1,11$$

$$1,11 < 20 \text{ cm}$$

Neutralna os prolazi kroz ploču, stoga je dimenzioniramo kao pravokutni presjek širine b_{eff} i visine h .

Potrebna površina armature:

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{10110}{0,990 \cdot 44,5 \cdot 43,48} = 5,28 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

Minimalna armatura:

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,26 \cdot b_w \cdot d \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} = 0,26 \cdot 30 \cdot 44,5 \cdot \frac{2,9}{500} = 2,01 \text{ cm}^2/\text{m}' \\ 0,0013 \cdot b_w \cdot d = 0,0013 \cdot 30 \cdot 44,5 = 1,74 \text{ cm}^2/\text{m}' \end{array} \right.$$

Glavna armatura u polju POZ. 215 – 215:

Odabrano: 5 ϕ 12 (5,66 cm²/m').

VANJSKI OSLONCI

Mjerodavna je potresna proračunska situacija (kombinacija 18).

$$M_{Ed} = 210,23 \text{ kNm}$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Ed}}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{21023}{30 \cdot 44,5^2 \cdot 2} = 0,177$$

Za $\mu_{Ed} = 0,181$ očitano je:

$$\xi = 0,250 \quad \zeta = 0,896$$

Potrebna površina armature:

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{21023}{0,896 \cdot 44,5 \cdot 43,48} = 12,13 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

Minimalna armatura:

$$A_{s,min} = 0,0029 \cdot 30 \cdot 45 = 3,87 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

Glavna armatura nad vanjskim osloncem POZ. 215 – 215:

Odabrano: 2 ϕ 28 (12,32 cm²/m').

Kod potresene proračunske situacije radi osiguranja lokalne duktilnosti potrebno je najmanje 50% vlačne armature staviti u tlačno područje:

Odabrano: 5 ϕ 14 (7,70 cm²/m').

UNUTARNJI OSOLONAC

Mjerodavna je potresna proračunska situacija (kombinacija 13).

$$M_{Ed} = 204,41 \text{ kNm}$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Ed}}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{20441}{30 \cdot 44,5^2 \cdot 2} = 0,171$$

Za $\mu_{Ed} = 0,176$ očitano je:

$$\xi = 0,241 \quad \zeta = 0,900$$

Potrebna površina armature:

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{20441}{0,900 \cdot 44,5 \cdot 43,48} = 11,74 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

Minimalna armatura:

$$A_{s,min} = 0,0029 \cdot 30 \cdot 45 = 3,87 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

Glavna armatura nad unutarnjim osloncem grede POZ. 215 – 215:

Odabrano: 2 ϕ 25 + 1 ϕ 16 (9,82 + 2,01 = 11,83 cm²/m').

Kod potresene proračunske situacije radi osiguranja lokalne duktilnosti potrebno je najmanje 50% vlačne armature staviti u tlačno područje:

Odabrano: $5\phi 14$ ($7,70 \text{ cm}^2/\text{m}'$).

9.1.3. Greda POZ. 115 – 115

POLJE

Mjerodavna je stalna proračunska situacija (kombinacija 4).

$$M_{Ed} = 103,22 \text{ kNm}$$

Pretpostavka je da neutralna os prolazi kroz poču ili njezinim donjim rubom $x \leq h_f$.

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Ed}}{b_{eff} \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{10322}{198 \cdot 44,5^2 \cdot 2} = 0,013$$

Za $\mu_{Ed} = 0,020$ očitano je:

$$\xi = 0,025 \quad \zeta = 0,990$$

Uvjet: $x \leq h_f$:

$$\xi = \frac{x}{d} \rightarrow x = \xi \cdot d = 0,025 \cdot 44,5 = 1,11$$

$$1,11 < 20 \text{ cm}$$

Neutralna os prolazi kroz ploču, stoga je dimenzioniramo kao pravokutni presjek širine b_{eff} i visine h .

Potrebna površina armature:

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{10322}{0,990 \cdot 44,5 \cdot 43,48} = 5,39 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

Minimalna armatura:

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,26 \cdot b_w \cdot d \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} = 0,26 \cdot 30 \cdot 44,5 \cdot \frac{2,9}{500} = 2,01 \text{ cm}^2/\text{m}' \\ 0,0013 \cdot b_w \cdot d = 0,0013 \cdot 30 \cdot 44,5 = 1,74 \text{ cm}^2/\text{m}' \end{array} \right.$$

Glavna armatura u polju POZ. 215 – 215:

Odabrano: $5\phi 12$ ($5,66 \text{ cm}^2/\text{m}'$).

VANJSKI OSLONCI

Mjerodavna je potresna proračunska situacija (kombinacija 18).

$$M_{Ed} = 226,34 \text{ kNm}$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Ed}}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{22634}{30 \cdot 44,5^2 \cdot 2} = 0,190$$

Za $\mu_{Ed} = 0,194$ očitano je:

$$\xi = 0,269 \quad \zeta = 0,888$$

Potrebna površina armature:

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{22634}{0,888 \cdot 44,5 \cdot 43,48} = 13,17 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

Minimalna armatura:

$$A_{s,min} = 0,0029 \cdot 30 \cdot 45 = 3,87 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

Glavna armatura nad vanjskim osloncem POZ. 215 – 215:

Odabrano: $2\phi 25 + 3\phi 12$ ($9,82 + 3,39 = 13,21 \text{ cm}^2/\text{m}'$).

Kod potresene proračunske situacije radi osiguranja lokalne duktilnosti potrebno je najmanje 50% vlačne armature staviti u tlačno područje:

Odabrano: $3\phi 20$ ($9,42 \text{ cm}^2/\text{m}'$).

UNUTARNJI OSOLONAC

Mjerodavna je potresna proračunska situacija (kombinacija 13).

$$M_{Ed} = 230,82 \text{ kNm}$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Ed}}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{23082}{30 \cdot 44,5^2 \cdot 2} = 0,194$$

Za $\mu_{Ed} = 0,194$ očitano je:

$$\xi = 0,269 \quad \zeta = 0,888$$

Potrebna površina armature:

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{23082}{0,900 \cdot 44,5 \cdot 43,48} = 13,26 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

Minimalna armatura:

$$A_{s,min} = 0,0029 \cdot 30 \cdot 45 = 3,87 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

Glavna armatura nad unutarnjim osloncem grede POZ. 215 – 215:

Odabrano: $2\phi 25 + 2\phi 16$ ($9,82 + 4,02 = 13,84 \text{ cm}^2/\text{m}'$).

Kod potresene proračunske situacije radi osiguranja lokalne duktilnosti potrebno je najmanje 50% vlačne armature staviti u tlačno područje:

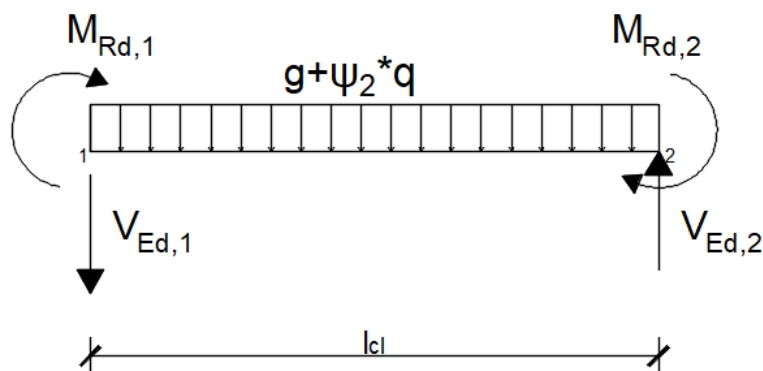
Odabrano: $3\phi 20$ ($9,42 \text{ cm}^2/\text{m}'$).

9.2. Dimenzioniranje greda okvira na poprečnu silu

Poprečne sile u gredama određuju se u skladu s sposobnosti nosivosti na savijanje na krajevima greda. Određuju se tako da su momenti nosivosti na krajevima grede $M_{i,d}$ i poprečno opterećenje uravnoteženi. Na krajevima presjeka grede potrebno je odrediti vrijednosti poprečnih sila $V_{Ed,max,i}$ i $V_{Ed,min,i}$ koje odgovaraju najvećim pozitivnim i negativnim momentima $M_{i,d}$. Proračun poprečnih sila provodi se u oba smjera potresnog djelovanja [23].

Napomena: 2. slučaj proračuna grede POZ. 311 – 311 (unutarnji oslonac) nije napravljen u skladu s sposobnosti nosivosti na savijanje jer je mjerodavna stalna proračunska situacija, stoga se proračunska vrijednost sile V_{Ed} uzima iz anvelope poprečnih sila.

Na Slici 62 prikazano je djelovanje opterećenja na gredu za određivanje poprečnih sila. Vrijedi za sve grede, osim za unutarnji oslonac grede POZ. 311 – 311.



Slika 62: Opterećenje na gredu [izradio autor]

9.2.1. Greda POZ. 311 – 311

1. SLUČAJ (vanjski oslonac)

Proračun momenta nosivosti za odabranu armaturu, $M_{Rd,1}$:

$$\omega_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \quad (65)$$

 A_{s1} – odabrana armatura f_{yd} - proračunska granica popuštanja čelika f_{cd} – proračunska tlačna čvrstoća betona b – širina hrpta grede d – statička visina gredeProračun momenta nosivosti za odabranu armaturu, $M_{Rd,1}$:

$$\omega_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{9,05}{30 \cdot 44,5} \cdot \frac{43,48}{2} = 0,147$$

Za $\omega_1 = 0,149$ očitano je:

$$\zeta = 0,923$$

$$M_{Rd,1} = \zeta \cdot d \cdot f_{yd} \cdot A_{s1} = 0,923 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 9,05 = 161,62 \text{ kNm}$$

Proračun $M_{Rd,2}$:

$$\omega_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{4,62}{30 \cdot 44,5} \cdot \frac{43,48}{2} = 0,075$$

Za $\omega_1 = 0,079$ očitano je:

$$\zeta = 0,960$$

$$M_{Rd,2} = \zeta \cdot d \cdot f_{yd} \cdot A_{s1} = 0,960 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 4,62 = 85,81 \text{ kNm}$$

U potresnoj proračunskoj situaciji na gredu djeluje:

$$w = g + \psi_{E,i} \cdot q$$

$$g = 10,26 \cdot \frac{6}{2} + 0,3 \cdot 0,5 \cdot 25 = 34,53 \text{ kNm}$$

$$q = 0,4 \cdot \frac{6,0}{2} = 1,20 \text{ kNm}$$

$$w = 34,53 + 0,00 \cdot 1,20 = 34,53 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed,1} = \frac{\gamma_{Rd} \cdot (M_{Rd,1} + M_{Rd,2})}{l_{cl}} + \frac{w \cdot l_{cl}}{2}$$

$$V_{Ed,1} = \frac{1,0 \cdot (161,62 + 85,81)}{5,5} + \frac{34,53 \cdot 5,5}{2} = 139,312 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti tlačnih štapova

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

Za elemente s vertikalnom poprečnom armaturom ($\alpha = 90^\circ$)

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{ctg\Theta + tg\Theta} \quad (66)$$

α_{cw} – koeficijent kojim se uzima u obzir stanje naprezanja u tlačnom pojasu nosača

($\alpha_{cw} = 1,0$ za $\sigma_{cp} = 0$ (za neprednapete konstrukcije)

b_w – najmanja širina poprečnog presjeka u vlačnom području

z – krak unutarnjih sila ($z \approx 0,9 \cdot d$)

v_1 – faktor smanjenja tlačne čvrstoće betona raspucanog od poprečnih sila:

$$v_1 = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \quad (67)$$

$$v_1 = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{30}{250} \right] = 0,53$$

Θ – kut nagiba tlačnih štapova; $\Theta = 40^\circ$; $ctg\Theta = 1,2$

$$V_{Rd,max} = \frac{1 \cdot 30 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 0,53 \cdot 2,0}{1,2 + \frac{1}{1,2}} = 627,12 \text{ kN}$$

$$139,321 \text{ kN} < 627,12 \text{ kN}$$

→ Nosivost tlačnih štapova zadovoljava.

Proračun minimalne armature:

1) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz uvjeta najmanje poprečne armature

$$s_{l,max} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{b_w \cdot \rho_{w,min}} \quad (68)$$

Gdje je:

A_{sw} – ploština presjeka poprečne armature na razmaku s ($A_{sw} = A_{sw}^1 \cdot m$)

A_{sw}^1 – ploština presjeka jedne grane spone ($A_{sw}^1 = 0,5 \text{ cm}^2$)

m – reznost ($m = 2$)

$\rho_{w,min}$ – koeficijent armiranja najmanjom poprečnom armaturom

$$\rho_{w,min} = 0,15 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yd}} \quad (69)$$

$$\rho_{w,min} = 0,15 \cdot \frac{2,9}{434,8} = 0,0010$$

Za $\phi 8$: $A_{sw}^1 = 0,5 \text{ cm}^2$ i reznost $m = 2$:

$$s_{l,max} = \frac{0,5 \cdot 2}{30 \cdot 0,0010} = 33,33 \text{ cm}$$

2) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz odnosa $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}}$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{139,31}{627,12} = 0,23 < 0,30$$

$$s_{l,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 44,5 = 33,38 \text{ cm} \\ 30 \text{ cm} \end{array} \right\}$$

Mjerodavna je manja vrijednost od 1) i 2).

Usvojeno: $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

Odabire se minimalna armatura $\phi 8/30 \text{ cm}$.

Proračun poprečne sile $V_{Rd,s}^{min}$ koju nose minimalne spone $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s_{l,max}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2}{30} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 69,65 \text{ kN}$$

Proračun potrebne poprečne armature

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$$

$$s \leq \frac{A_{sw}^1 \cdot m \cdot z \cdot f_{ywd}}{V_{Ed}} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48}{139,321} \cdot 1,2 = 15 \text{ cm}$$

Usvojeni razmak spona $\phi 8/15 \text{ cm}$.

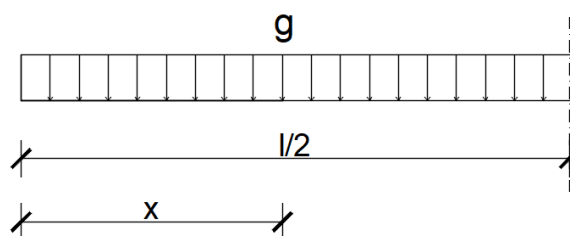
$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2}{15} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 149,26 \text{ kN}$$

$$139,321 = 139,321 \text{ kN}$$

Odabrana armatura za vanjski oslonac: **$\phi 8/15$** .

Prema skici na Slici 63 određuje se udaljenost x na kojoj je potrebno staviti gušću armaturu.

Proračun udaljenosti x :



Slika 63: Skica za određivanje udaljenosti x [izradio autor]

$$V_{Ed} - g_{greda} \cdot x - \frac{g + \psi_2 \cdot q}{\frac{l}{2}} \cdot x \cdot \frac{x}{2} = V_{Rd,s}^{min}$$

$$139,321 - 3,75 \cdot x - \frac{30,78 + 0}{3} \cdot \frac{x^2}{2} = 69,65 \text{ kN}$$

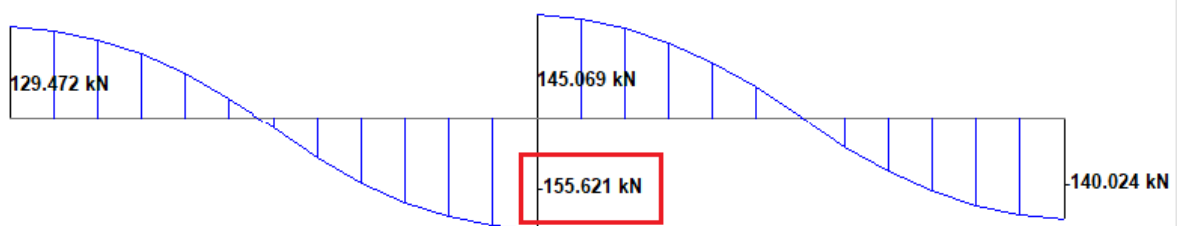
$$5,13x^2 + 3,75x - 69,68 = 0$$

$$x = 3,38 \text{ m}$$

Cijela greda armira se s $\phi 8/15$.

2. SLUČAJ (unutarnji oslonac)

Zbog mjerodavne stalne proračunske situacije, unutarnji oslonac nije potrebno dimenzionirati prema sposobnosti nosivosti. Vrijednost poprečne sile uzeta je iz anvelope poprečnih sila prikazanoj na Slici 64.



Slika 64: Anvelopa poprečnih sila

$$V_{Ed,2} = 155,62 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti tlačnih štapova

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

Za elemente s vertikalnom poprečnom armaturom ($\alpha = 90^\circ$)

$$v_1 = 0,53$$

$$V_{Rd,max} = \frac{1 \cdot 30 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 0,53 \cdot 2,0}{1,2 + \frac{1}{1,2}} = 627,12 \text{ kN}$$

$$155,62 \text{ kN} < 627,12 \text{ kN}$$

→ Nosivost tlačnih štapova zadovoljava.

Proračun minimalne armature:

1) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz uvjeta najmanje poprečne armature

$$s_{l,max} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{b_w \cdot \rho_{w,min}}$$

$$\rho_{w,min} = 0,15 \cdot \frac{2,9}{434,8} = 0,0010$$

Za $\phi 8$: $A_{sw}^1 = 0,5 \text{ cm}^2$ i reznost $m = 2$:

$$s_{l,max} = \frac{0,5 \cdot 2}{30 \cdot 0,0010} = 33,33 \text{ cm}$$

2) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz odnosa $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}}$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{155,62}{627,12} = 0,23 < 0,30$$

$$s_{l,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 44,5 = 33,38 \text{ cm} \\ 30 \text{ cm} \end{array} \right\}$$

Mjerodavna je manja vrijednost od 1) i 2).

Usvojeno: $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

Odabire se minimalna armatura $\phi 8/30 \text{ cm}$.

Proračun poprečne sile $V_{Rd,s}^{min}$ koju nose minimalne spone $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s_{l,max}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2}{30} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 69,65 \text{ kN}$$

Proračun potrebne poprečne armature

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$$

$$s \leq \frac{A_{sw}^1 \cdot m \cdot z \cdot f_{ywd}}{V_{Ed}} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48}{155,62} \cdot 1,2 = 13,42 \text{ cm}$$

Usvojeni razmak spona $\phi 8/13$ cm.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2}{13} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 160,74 \text{ kN}$$

$$155,62 \text{ kN} < 160,74 \text{ kN}$$

Odabrana armatura za unutarnji oslonac: **$\phi 8/13$** .

Proračun udaljenosti x:

$$V_{Ed} - g_{greda} \cdot x - \frac{g + \psi_2 \cdot q}{\frac{l}{2}} \cdot x \cdot \frac{x}{2} = V_{Rd,s}^{min}$$

$$155,62 - 3,75 \cdot x - \frac{30,78 + 0}{3} \cdot \frac{x^2}{2} = 69,65 \text{ kN}$$

$$5,13x^2 + 3,75x - 85,97 = 0$$

$$x = 3,74 \text{ m}$$

ZAKLJUČAK: Cijela greda armira se s $\phi 8/13$ cm.

9.2.2. Greda POZ. 215 – 215**1. SLUČAJ (unutarnji oslonac)**

Proračun momenta nosivosti za odabranu armaturu, $M_{Rd,1}$:

$$\omega_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{11,83}{30 \cdot 44,5} \cdot \frac{43,48}{2} = 0,193$$

Za $\omega_1 = 0,195$ očitano je:

$$\zeta = 0,900$$

$$M_{Rd,1} = \zeta \cdot d \cdot f_{yd} \cdot A_{s1} = 0,900 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 11,83 = 206,00 \text{ kNm}$$

Proračun $M_{Rd,2}$:

$$\omega_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{7,70}{30 \cdot 44,5} \cdot \frac{43,48}{2} = 0,125$$

Za $\omega_1 = 0,126$ očitano je:

$$\zeta = 0,935$$

$$M_{Rd,2} = \zeta \cdot d \cdot f_{yd} \cdot A_{s1} = 0,935 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 7,70 = 139,3 \text{ kNm}$$

U potresnoj proračunskoj situaciji na gredu djeluje:

$$w = g + \psi_{E,i} \cdot q$$

$$g = 7,53 \cdot \frac{6}{2} + 0,3 \cdot 0,5 \cdot 25 = 26,34 \text{ kNm}$$

$$q = 2,0 \cdot \frac{6,0}{2} = 6,0 \text{ kNm}$$

$$w = 26,34 + 0,30 \cdot 6,0 = 28,14 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed,1} = \frac{\gamma_{Rd} \cdot (M_{Rd,1} + M_{Rd,2})}{l_{cl}} + \frac{w \cdot l_{cl}}{2}$$

$$V_{Ed,1} = \frac{1,0 \cdot (206,00 + 139,3)}{5,5} + \frac{28,14 \cdot 5,5}{2} = 140,17 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti tlačnih štapova

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

$$v_1 = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{30}{250} \right] = 0,53$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{ctg\theta + tg\theta} = \frac{1 \cdot 30 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 0,53 \cdot 2,0}{1,2 + \frac{1}{1,2}} = 627,12 \text{ kN}$$

$$140,17 \text{ kN} < 627,12 \text{ kN}$$

→ Nosivost tlačnih štapova zadovoljava.

Proračun minimalne armature:

1) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz uvjeta najmanje poprečne armature

$$\rho_{w,min} = 0,15 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yd}} = 0,15 \cdot \frac{2,9}{434,8} = 0,0010$$

Za $\phi 8$: $A_{sw}^1 = 0,5 \text{ cm}^2$ i reznost $m = 2$:

$$s_{l,max} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{b_w \cdot \rho_{w,min}} = \frac{0,5 \cdot 2}{30 \cdot 0,0010} = 33,33 \text{ cm}$$

2) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz odnosa $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}}$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{140,17}{627,12} = 0,23 < 0,30$$

$$s_{l,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 44,5 = 33,38 \text{ cm} \\ 30 \text{ cm} \end{array} \right\}$$

Mjerodavna je manja vrijednost od 1) i 2).

Usvojeno: $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$.

Odabire se minimalna armatura $\phi 8/30 \text{ cm}$.

Proračun poprečne sile $V_{Rd,s}^{min}$ koju nose minimalne spona $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s_{l,max}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2}{30} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 69,65 \text{ kN}$$

Proračun potrebne poprečne armature

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$$

$$s \leq \frac{A_{sw}^1 \cdot m \cdot z \cdot f_{ywd}}{V_{Ed}} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48}{140,17} \cdot 1,2 = 14,9 \text{ cm}$$

Usvojeni razmak spona $\phi 8/14 \text{ cm}$.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2}{14} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 149,3 \text{ kN}$$

$$140,17 \text{ kN} < 149,3 \text{ kN}$$

Odabrana armatura za unutarnji oslonac: **$\phi 8/14$** .

Proračun udaljenosti x:

$$V_{Ed} - g_{greda} \cdot x - \frac{g + \psi_2 \cdot q}{\frac{l}{2}} \cdot x \cdot \frac{x}{2} = V_{Rd,s}^{min}$$

$$140,17 - 3,75 \cdot x - \frac{22,59 + 0,3 \cdot 6,0}{3} \cdot \frac{x^2}{2} = 69,65 \text{ kN}$$

$$4,1x^2 + 3,75x - 70,52 = 0$$

$$x = 3,76 \text{ m}$$

Cijela greda armira se s $\phi 8/14$.

2. SLUČAJ (vanjski oslonac)

Proračun momenta nosivosti za odabranu armaturu, $M_{Rd,1}$:

$$\omega_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{12,32}{30 \cdot 44,5} \cdot \frac{43,48}{2} = 0,200$$

Za $\omega_1 = 0,202$ očitano je:

$$\zeta = 0,869$$

$$M_{Rd,1} = \zeta \cdot d \cdot f_{yd} \cdot A_{s1} = 0,896 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 12,32 = 213,58 \text{ kNm}$$

Proračun $M_{Rd,2}$:

$$\omega_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{7,70}{30 \cdot 44,5} \cdot \frac{43,48}{2} = 0,125$$

Za $\omega_1 = 0,126$ očitano je:

$$\zeta = 0,935$$

$$M_{Rd,2} = \zeta \cdot d \cdot f_{yd} \cdot A_{s1} = 0,935 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 7,70 = 139,3 \text{ kNm}$$

U potresnoj proračunskoj situaciji na gredu djeluje:

$$w = 26,34 + 0,30 \cdot 6,0 = 28,14 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed,2} = \frac{\gamma_{Rd} \cdot (M_{Rd,1} + M_{Rd,2})}{l_{cl}} + \frac{w \cdot l_{cl}}{2}$$

$$V_{Ed,2} = \frac{1,0 \cdot (213,58 + 139,3)}{5,5} + \frac{28,14 \cdot 5,5}{2} = 141,55 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti tlačnih štapova

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

Za elemente s vertikalnom poprečnom armaturom ($\alpha = 90^\circ$)

$$v_1 = 0,53$$

$$V_{Rd,max} = \frac{1 \cdot 30 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 0,53 \cdot 2,0}{1,2 + \frac{1}{1,2}} = 627,12 \text{ kN}$$

$$141,55 \text{ kN} < 627,12 \text{ kN}$$

→ Nosivost tlačnih štapova zadovoljava.

Proračun minimalne armature:

1) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz uvjeta najmanje poprečne armature

$$s_{l,max} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{b_w \cdot \rho_{w,min}}$$

$$\rho_{w,min} = 0,15 \cdot \frac{2,9}{434,8} = 0,0010$$

Za $\phi 8$: $A_{sw}^1 = 0,5 \text{ cm}^2$ i reznost $m = 2$:

$$s_{l,max} = \frac{0,5 \cdot 2}{30 \cdot 0,0010} = 33,33 \text{ cm}$$

2) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz odnosa $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}}$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{141,55}{627,12} = 0,23 < 0,30$$

$$s_{l,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 44,5 = 33,38 \text{ cm} \\ 30 \text{ cm} \end{array} \right\}$$

Mjerodavna je manja vrijednost od 1) i 2).

Usvojeno: $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

Odabire se minimalna armatura $\phi 8/30 \text{ cm}$.

Proračun poprečne sile $V_{Rd,s}^{min}$ koju nose minimalne spone $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s_{l,max}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2}{30} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 69,65 \text{ kN}$$

Proračun potrebne poprečne armature

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$$

$$s \leq \frac{A_{sw}^1 \cdot m \cdot z \cdot f_{ywd}}{V_{Ed}} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48}{141,55} \cdot 1,2 = 14,77 \text{ cm}$$

Usvojeni razmak spona $\phi 8/14 \text{ cm}$.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2}{14} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 149,26 \text{ kN}$$

$$141,55 \text{ kN} < 149,26 \text{ kN}$$

Odabrana armatura za vanjski oslonac: **$\phi 8/14$** .

Proračun udaljenosti x:

$$141,55 - 3,75 \cdot x - \frac{28,14}{3} \cdot \frac{x^2}{2} = 69,65 \text{ kN}$$

$$4,69x^2 + 3,75x - 71,9 = 0$$

$$x = 3,58 \text{ m}$$

ZAKLJUČAK: Cijela greda armira se s $\phi 8/14 \text{ cm}$

9.2.3. Greda POZ. 115 – 115

1. SLUČAJ (unutarnji oslonac)

Proračun momenta nosivosti za odabranu armaturu, $M_{Rd,1}$:

$$\omega_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{13,84}{30 \cdot 44,5} \cdot \frac{43,48}{2} = 0,225$$

Za $\omega_1 = 0,227$ očitano je:

$$\zeta = 0,884$$

$$M_{Rd,1} = \zeta \cdot d \cdot f_{yd} \cdot A_{s1} = 0,884 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 13,84 = 236,72 \text{ kNm}$$

Proračun $M_{Rd,2}$:

$$\omega_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{9,42}{30 \cdot 44,5} \cdot \frac{43,48}{2} = 0,153$$

Za $\omega_1 = 0,153$ očitano je:

$$\zeta = 0,921$$

$$M_{Rd,2} = \zeta \cdot d \cdot f_{yd} \cdot A_{s1} = 0,921 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 9,42 = 167,86 \text{ kNm}$$

U potresnoj proračunskoj situaciji na gredu djeluje:

$$w = g + \psi_{E,i} \cdot q$$

$$g = 7,53 \cdot \frac{6}{2} + 0,3 \cdot 0,5 \cdot 25 = 26,34 \text{ kNm}$$

$$q = 2,0 \cdot \frac{6,0}{2} = 6,0 \text{ kNm}$$

$$w = 26,34 + 0,30 \cdot 6,0 = 28,14 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed,1} = \frac{\gamma_{Rd} \cdot (M_{Rd,1} + M_{Rd,2})}{l_{cl}} + \frac{w \cdot l_{cl}}{2}$$

$$V_{Ed,1} = \frac{1,0 \cdot (236,72 + 167,86)}{5,5} + \frac{28,14 \cdot 5,5}{2} = 150,95 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti tlačnih štapova

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

$$v_1 = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{30}{250} \right] = 0,53$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{ctg\theta + tg\theta} = \frac{1 \cdot 30 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 0,53 \cdot 2,0}{1,2 + \frac{1}{1,2}} = 627,12 \text{ kN}$$

$$150,95 \text{ kN} < 627,12 \text{ kN}$$

→ Nosivost tlačnih štapova zadovoljava.

Proračun minimalne armature:

1) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz uvjeta najmanje poprečne armature

$$\rho_{w,min} = 0,15 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yd}} = 0,15 \cdot \frac{2,9}{434,8} = 0,0010$$

Za $\phi 8$: $A_{sw}^1 = 0,5 \text{ cm}^2$ i reznost $m = 2$:

$$s_{l,max} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{b_w \cdot \rho_{w,min}} = \frac{0,5 \cdot 2}{30 \cdot 0,0010} = 33,33 \text{ cm}$$

2) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz odnosa $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}}$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{150,95}{627,12} = 0,23 < 0,30$$

$$s_{l,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 44,5 = 33,38 \text{ cm} \\ 30 \text{ cm} \end{array} \right\}$$

Mjerodavna je manja vrijednost od 1) i 2).

Usvojeno: $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$.

Odobire se minimalna armatura $\phi 8/30 \text{ cm}$.

Proračun poprečne sile $V_{Rd,s}^{min}$ koju nose minimalne spona $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s_{l,max}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2}{30} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 69,65 \text{ kN}$$

Proračun potrebne poprečne armature

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$$

$$s \leq \frac{A_{sw}^1 \cdot m \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta}{V_{Ed}} = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48}{150,95} \cdot 1,2 = 13,84 \text{ cm}$$

Usvojeni razmak spona $\phi 8/13 \text{ cm}$.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2}{13} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 160,74 \text{ kN}$$

$$150,95 \text{ kN} < 160,74 \text{ kN}$$

Odabrana armatura za unutarnji oslonac: $\phi 8/13$.

Proračun udaljenosti x:

$$V_{Ed} - g_{greda} \cdot x - \frac{g + \psi_2 \cdot q}{\frac{l}{2}} \cdot x \cdot \frac{x}{2} = V_{Rd,s}^{min}$$

$$150,95 - 3,75 \cdot x - \frac{22,59 + 0,3 \cdot 6,0}{3} \cdot \frac{x^2}{2} = 69,65 \text{ kN}$$

$$4,1x^2 + 3,75x - 81,3 = 0$$

$$x = 4,04 \text{ m}$$

Cijela greda armira se s $\phi 8/13 \text{ cm}$.

2. SLUČAJ (vanjski oslonac)

Proračun momenta nosivosti za odabranu armaturu, $M_{Rd,1}$:

$$\omega_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{13,21}{30 \cdot 44,5} \cdot \frac{43,48}{2} = 0,215$$

Za $\omega_1 = 0,218$ očitano je:

$$\zeta = 0,888$$

$$M_{Rd,1} = \zeta \cdot d \cdot f_{yd} \cdot A_{s1} = 0,888 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 13,21 = 226,97 \text{ kNm}$$

Proračun $M_{Rd,2}$:

$$\omega_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{9,42}{30 \cdot 44,5} \cdot \frac{43,48}{2} = 0,153$$

Za $\omega_1 = 0,153$ očitano je:

$$\zeta = 0,921$$

$$M_{Rd,2} = \zeta \cdot d \cdot f_{yd} \cdot A_{s1} = 0,921 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 9,42 = 167,86 \text{ kNm}$$

U potresnoj proračunskoj situaciji na gredu djeluje:

$$w = 26,34 + 0,30 \cdot 6,0 = 28,14 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed,2} = \frac{\gamma_{Rd} \cdot (M_{Rd,1} + M_{Rd,2})}{l_{cl}} + \frac{w \cdot l_{cl}}{2}$$

$$V_{Ed,2} = \frac{1,0 \cdot (226,97 + 167,86)}{5,5} + \frac{28,14 \cdot 5,5}{2} = 149,12 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti tlačnih štapova

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

Za elemente s vertikalnom poprečnom armaturom ($\alpha = 90^\circ$)

$$v_1 = 0,53$$

$$V_{Rd,max} = \frac{1 \cdot 30 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 0,53 \cdot 2,0}{1,2 + \frac{1}{1,2}} = 627,12 \text{ kN}$$

$$149,12 \text{ kN} < 627,12 \text{ kN}$$

→ Nosivost tlačnih štapova zadovoljava.

Proračun minimalne armature:

1) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz uvjeta najmanje poprečne armature

$$s_{l,max} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{b_w \cdot \rho_{w,min}}$$

$$\rho_{w,min} = 0,15 \cdot \frac{2,9}{434,8} = 0,0010$$

Za $\phi 8$: $A_{sw}^1 = 0,5 \text{ cm}^2$ i reznost $m = 2$:

$$s_{l,max} = \frac{0,5 \cdot 2}{30 \cdot 0,0010} = 33,33 \text{ cm}$$

2) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz odnosa $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}}$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{149,12}{627,12} = 0,24 < 0,30$$

$$s_{l,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 44,5 = 33,38 \text{ cm} \\ 30 \text{ cm} \end{array} \right\}$$

Mjerodavna je manja vrijednost od 1) i 2).

Usvojeno: $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

Odabire se minimalna armatura $\phi 8/30 \text{ cm}$.

Proračun poprečne sile $V_{Rd,s}^{min}$ koju nose minimalne spone $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s_{l,max}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2}{30} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 69,65 \text{ kN}$$

Proračun potrebne poprečne armature

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$$

$$s \leq \frac{A_{sw}^1 \cdot m \cdot z \cdot f_{ywd}}{V_{Ed}} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48}{149,12} \cdot 1,2 = 14,01 \text{ cm}$$

Usvojeni razmak spona $\phi 8/14 \text{ cm}$.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 2}{13} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 149,26 \text{ kN}$$

$$149,12 \text{ kN} < 149,26 \text{ kN}$$

Odabrana armatura za vanjski oslonac: **ϕ8/14**.

Proračun udaljenosti x:

$$149,12 - 3,75 \cdot x - \frac{28,14}{3} \cdot \frac{x^2}{2} = 69,65 \text{ kN}$$

$$4,69x^2 + 3,75x - 79,47 = 0$$

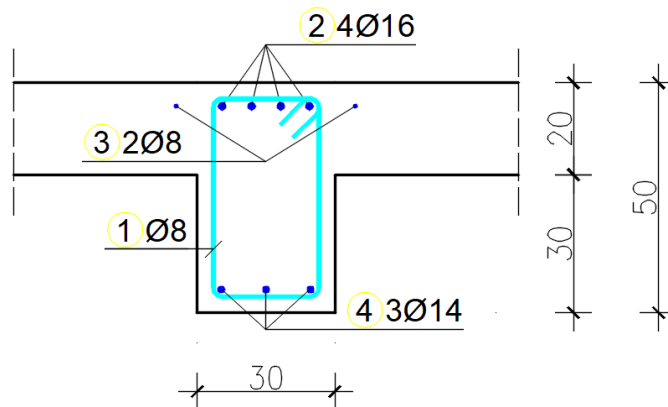
$$x = 3,76 \text{ m}$$

ZAKLJUČAK: Cijela greda armira se s ϕ8/13 cm.

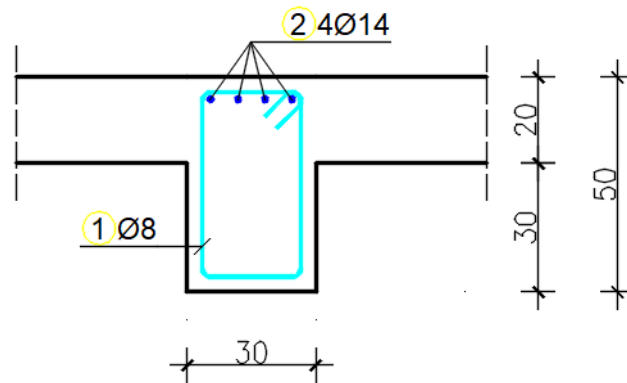
9.3. Raspodjela armature u gredama

Na Slikama 65 – 73 prikazana je raspodjela uzdužne armature u gredama.

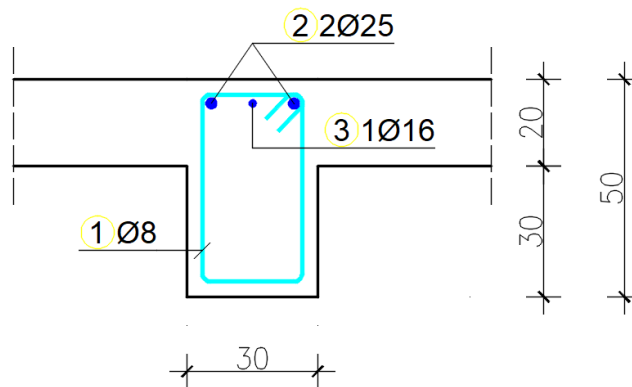
GREDA 311 (vanjski oslonac)



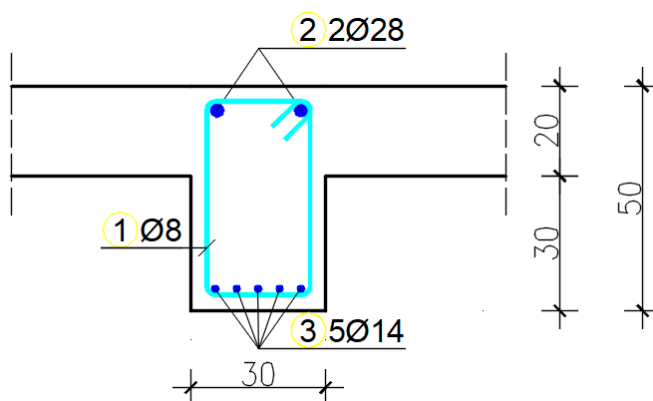
Slika 65: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 311 na vanjskom osloncu [izradio autor]

GREDA 311 (polje)

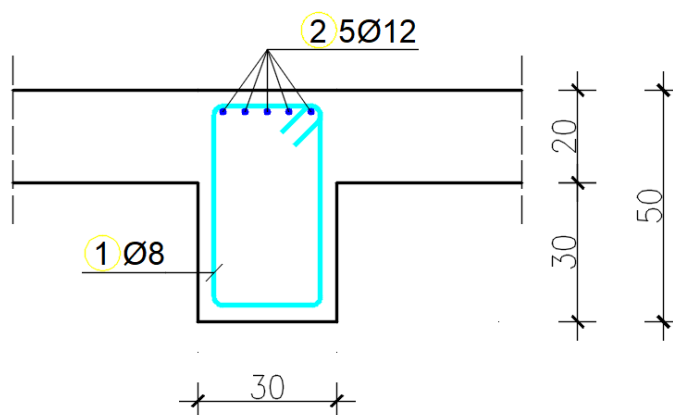
Slika 66: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 311 u polju [izradio autor]

GREDA 311 (unutarnji oslonac)

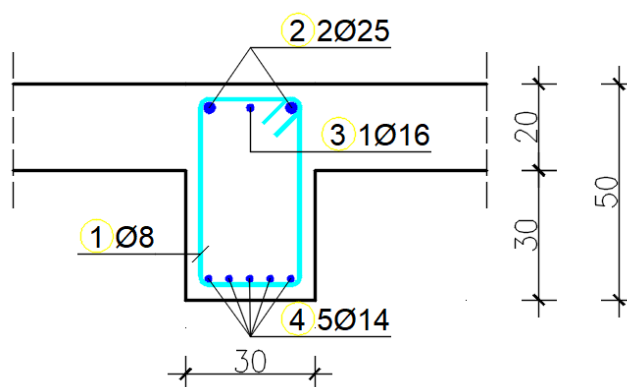
Slika 67: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 311 na unutarnjem osloncu [izradio autor]

GREDA 215 (vanjski oslonac)

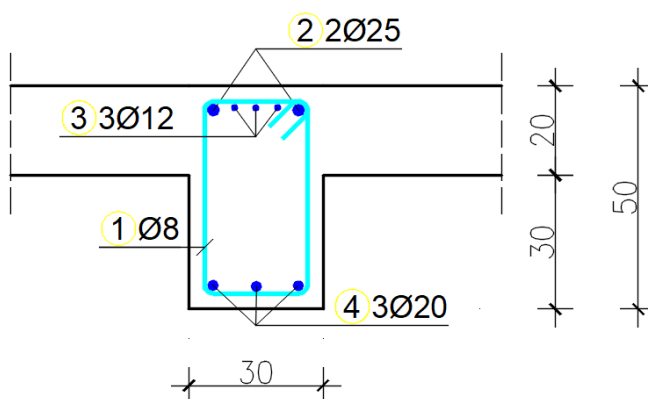
Slika 68: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 215 na vanjskom osloncu [izradio autor]

GREDA 215 (polje)

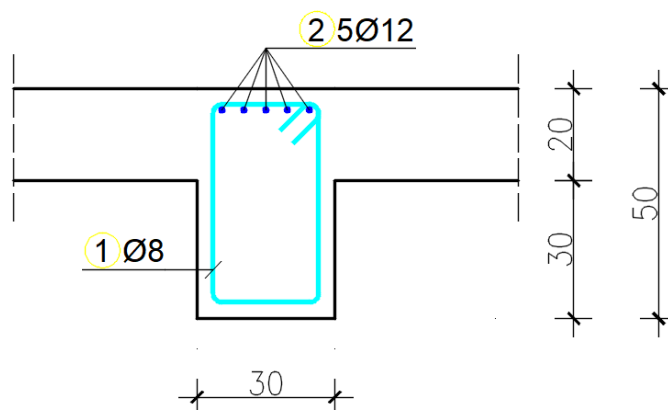
Slika 69: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 215 u polju [izradio autor]

GREDA 215 (unutarnji oslonac)

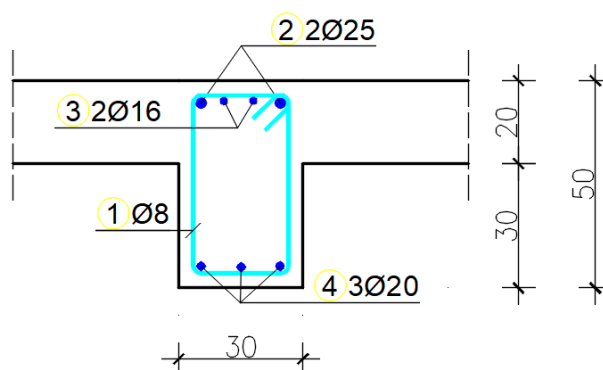
Slika 70: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 215 na unutarnjem osloncu [izradio autor]

GREDA 115 (vanjski oslonac)

Slika 71: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 115 na vanjskom osloncu [izradio autor]

GREDA 115 (polje)

Slika 72: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 115 u polju [izradio autor]

GREDA 115 (unutarnji oslonac)

Slika 73: Raspodjela uzdužne armature grede POZ. 115 na unutarnjem osloncu [izradio autor]

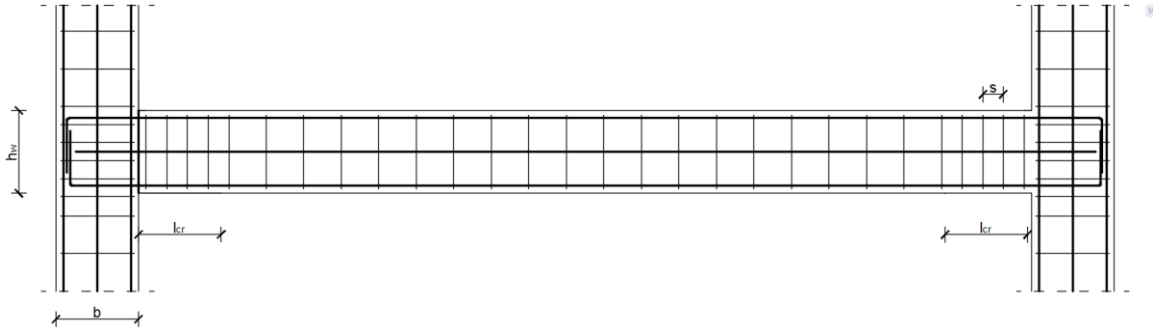
9.4. Kritično područje grede

Kritično područje grede odnosi se na područje presjeka grede do duljine l_{cr} od spoja grede i stupa zbog mogućnosti otvaranja plastičnih zglobova u slučaju potresa, odnosno jer može doći do plastičnog deformiranja [24]. Na Slici 74 nalazi se skica armiranja grede u kritičnom području.

Uvjet lokalne duktilnosti grede za DCM (srednja duktilnost) glasi [7]:

$$l_{cr} = h_w = 50 \text{ cm}$$

gdje su: l_{cr} – duljina kritičnog područja, h_w – visina poprečnog presjeka grede.



Slika 74: Armiranje kritičnog područja. Modificirano prema [7]

9.4.1. Greda POZ. 311 – 311

VANJSKI OSLOMAC

Zahtjev lokalne duktilnosti je zadovoljen kada se unutar kritičnog područja grede primjene odredbe da se u tlačnom području postavlja uzdužna armatura koja iznosi najmanje 50% količine stvarne armature, uz proračunsku potrebnu tlačnu armaturu. Također, koeficijent armiranja vlačnom armaturom ne smije prelaziti vrijednost ρ_{max} (70) [24]:

$$\rho_{max} = \rho' + \frac{0,0018}{\mu_{\Phi} \cdot \varepsilon_{sy,d}} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \quad (70)$$

gdje je:

ρ' - koeficijent armiranja tlačnom armaturom (71):

$$\rho' = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} \quad (71)$$

$$\rho' = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = \frac{4,62}{30 \cdot 44,5} = 0,0035$$

$\varepsilon_{sy,d}$ – proračunska deformacija čelika pri popuštanju (72):

$$\varepsilon_{sy,d} = \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (72)$$

$$\varepsilon_{sy,d} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{434,8}{210000} = 0,002174$$

μ_Φ – zakrivljenost ovisna o uvjetu (73), a izračunava se prema (74):

$$T_1 \geq T_c \quad (73)$$

$$T_1 \geq T_c \rightarrow 0,76 > 0,4 \text{ s}$$

$$\mu_\Phi = 2 \cdot q_0 - 1 \quad (74)$$

gdje su:

q_0 – osnovna vrijednost faktora ponašanja

T_1 – osnovni period vibracija konstrukcije

T_c – period na gornjoj granici konstantnog dijela spektra

$$\mu_\Phi = 2 \cdot q_0 - 1 = 2 \cdot 3,9 - 1 = 6,8$$

Faktor duktilnosti mora biti najmanje 1,5 puta veći u kritičnom području s uzdužnom armaturom od čelika razreda B:

$$\mu_\Phi = 1,5 \cdot (2 \cdot q_0 - 1) = 1,5 \cdot (2 \cdot 3,9 - 1) = 10,20$$

$$\rho_{max} = \rho' + \frac{0,0018}{\mu_\Phi \cdot \varepsilon_{sy,d}} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} = \rho_{max} = 0,0035 + \frac{0,0018}{10,20 \cdot 0,002174} \cdot \frac{2,0}{43,48} = 0,0072$$

Koeficijent armiranja vlačnom armaturom ρ duž cijele grede mora biti veći od ρ_{min} , a određuje se prema (75):

$$\rho_{min} = 0,5 \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right) \quad (75)$$

$$\rho_{min} = 0,5 \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right) = 0,5 \cdot \left(\frac{2,9}{500} \right) = 0,0029$$

Koeficijent armiranja vlačnom armaturom (76):

$$\rho = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} \quad (76)$$

$$\rho = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = \frac{9,05}{30 \cdot 44,5} = 0,0068$$

Treba zadovoljiti uvjet (77):

$$\rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{max} \quad (77)$$

$$0,0029 \leq 0,0068 \leq 0,0072$$

Udaljenost prve spone od rubnog presjeka grede ne smije biti manja od 50 mm. Poprečna armatura u kritičnom području grede mora zadovoljiti da promjer spone nije manji od 6 mm, a razmak spona s određuje se prema (78):

$$s = \begin{cases} \frac{h_w}{4} \\ 24 \cdot d_{bw} \\ 225 \text{ mm} \\ 8 \cdot d_{bL} \end{cases} \quad (78)$$

Gdje je:

d_{bw} - promjer spone, u mm

d_{bL} - promjer najmanje uzdužne šipke, u mm

$$s = \min \begin{cases} \frac{h_w}{4} = \frac{500}{4} = 125 \text{ cm} \\ 24 \cdot d_{bw} = 24 \cdot 6 = 11,2 \text{ cm} = 14,4 \text{ cm} \\ 225 \text{ mm} = 22,5 \text{ cm} \\ 8 \cdot d_{bL} = 8 \cdot 1,4 = 11,2 \text{ cm} \end{cases}$$

Odabrana poprečna armatura u kritičnom području: $\Phi 8/11$ cm na duljini 50 cm od vanjskog oslonca, ostalo $\Phi 8/13$.

9.4.2. Greda POZ. 215 – 215**VANJSKI OSOLONAC**

Koeficijent armiranja tlačnom armaturom:

$$\rho' = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = \frac{7,70}{30 \cdot 44,5} = 0,0058$$

$$\varepsilon_{sy,d} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{434,8}{200000} = 0,002174$$

Zakrivljenost ovisna o uvjetu (73):

$$T_1 \geq T_c \rightarrow 0,76 > 0,4 \text{ s}$$

$$\mu_\Phi = 1,5 \cdot (2 \cdot q_0 - 1) = 1,5 \cdot (2 \cdot 3,9 - 1) = 10,20$$

$$\rho_{max} = \rho' + \frac{0,0018}{\mu_\Phi \cdot \varepsilon_{sy,d}} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} = \rho_{max} = 0,0058 + \frac{0,0018}{10,20 \cdot 0,002174} \cdot \frac{2,0}{43,48} = 0,0095$$

Koeficijent armiranja vlačnom armaturom ρ duž cijele grede mora biti veći od ρ_{min} , a određuje se prema (75):

$$\rho_{min} = 0,5 \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right) = 0,5 \cdot \left(\frac{2,9}{500} \right) = 0,0029$$

Koeficijent armiranja vlačnom armaturom (76):

$$\rho = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = \frac{12,32}{30 \cdot 44,5} = 0,0092$$

Treba zadovoljiti uvjet (77):

$$0,0029 \leq 0,0092 \leq 0,0095$$

Razmak spona s određuje se prema (78):

$$s = \min \begin{cases} \frac{h_w}{4} = \frac{500}{4} = 125 \text{ cm} \\ 24 \cdot d_{bw} = 24 \cdot 6 = 14,4 \text{ cm} = 11,2 \text{ cm} \\ 225 \text{ mm} = 22,5 \text{ cm} \\ 8 \cdot d_{bL} = 8 \cdot 1,4 = 11,2 \text{ cm} \end{cases}$$

Odabrana poprečna armatura u kritičnom području: $\Phi 8/11$ cm na duljini 50 cm od vanjskog oslonca, ostalo $\Phi 8/14$.

UNUTARNJI OSOLONAC

Koeficijent armiranja tlačnom armaturom:

$$\rho' = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = \frac{7,70}{30 \cdot 44,5} = 0,0058$$

$$\varepsilon_{sy,d} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{434,8}{200000} = 0,002174$$

Zakrivljenost ovisna o uvjetu (73):

$$T_1 \geq T_c \rightarrow 0,76 > 0,4 \text{ s}$$

$$\mu_\Phi = 1,5 \cdot (2 \cdot q_0 - 1) = 1,5 \cdot (2 \cdot 3,9 - 1) = 10,20$$

$$\rho_{max} = \rho' + \frac{0,0018}{\mu_\Phi \cdot \varepsilon_{sy,d}} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} = \rho_{max} = 0,0058 + \frac{0,0018}{10,20 \cdot 0,002174} \cdot \frac{2,0}{43,48} = 0,0095$$

Koeficijent armiranja vlačnom armaturom ρ duž cijele grede mora biti veći od ρ_{min} , a određuje se prema (75):

$$\rho_{min} = 0,5 \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right) = 0,5 \cdot \left(\frac{2,9}{500} \right) = 0,0029$$

Koeficijent armiranja vlačnom armaturom (76):

$$\rho = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = \frac{11,83}{30 \cdot 44,5} = 0,0089$$

Treba zadovoljiti uvjet (77):

$$0,0029 \leq 0,0089 \leq 0,0095$$

Razmak spona s određuje se prema (78):

$$s = \min \begin{cases} \frac{h_w}{4} = \frac{500}{4} = 125 \text{ cm} \\ 24 \cdot d_{bw} = 24 \cdot 6 = 14,4 \text{ cm} = 11,2 \text{ cm} \\ 225 \text{ mm} = 22,5 \text{ cm} \\ 8 \cdot d_{bL} = 8 \cdot 1,4 = 11,2 \text{ cm} \end{cases}$$

Odabrana poprečna armatura u kritičnom području: $\Phi 8/11$ cm na duljini 50 cm od unutarnjeg oslonca, ostalo $\Phi 8/14$.

9.4.3. Greda POZ. 115 – 115

VANJSKI OSLOMAC

Koeficijent armiranja tlačnom armaturom:

$$\rho' = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = \frac{9,42}{30 \cdot 44,5} = 0,0071$$

$$\varepsilon_{sy,d} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{434,8}{200000} = 0,002174$$

Zakrivljenost ovisna o uvjetu (73):

$$T_1 \geq T_c \rightarrow 0,76 > 0,4 \text{ s}$$

$$\mu_\Phi = 1,5 \cdot (2 \cdot q_0 - 1) = 1,5 \cdot (2 \cdot 3,9 - 1) = 10,20$$

$$\rho_{max} = \rho' + \frac{0,0018}{\mu_\Phi \cdot \varepsilon_{sy,d}} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} = \rho_{max} = 0,0071 + \frac{0,0018}{10,20 \cdot 0,002174} \cdot \frac{2,0}{43,48} = 0,0102$$

Koeficijent armiranja vlačnom armaturom ρ duž cijele grede mora biti veći od ρ_{min} , a određuje se prema (75):

$$\rho_{min} = 0,5 \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right) = 0,5 \cdot \left(\frac{2,9}{500} \right) = 0,0029$$

Koeficijent armiranja vlačnom armaturom (76):

$$\rho = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = \frac{13,21}{30 \cdot 44,5} = 0,0099$$

Treba zadovoljiti uvjet (77):

$$0,0029 \leq 0,0099 \leq 0,0102$$

Razmak spona s određuje se prema (78):

$$s = \min \begin{cases} \frac{h_w}{4} = \frac{500}{4} = 125 \text{ cm} \\ 24 \cdot d_{bw} = 24 \cdot 6 = 14,4 \text{ cm} = 9,6 \text{ cm} \\ 225 \text{ mm} = 22,5 \text{ cm} \\ 8 \cdot d_{bL} = 8 \cdot 1,2 = 9,6 \text{ cm} \end{cases}$$

Odabrana poprečna armatura u kritičnom području: $\Phi 8/9$ cm na duljini 50 cm od vanjskog oslonca, ostalo $\Phi 8/13$.

UNUTARNJI OSOLONAC

Koeficijent armiranja tlačnom armaturom:

$$\rho' = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = \frac{9,42}{30 \cdot 44,5} = 0,0071$$

$$\varepsilon_{sy,d} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{434,8}{200000} = 0,002174$$

Zakrivljenost ovisna o uvjetu (73):

$$T_1 \geq T_c \rightarrow 0,76 > 0,4 \text{ s}$$

$$\mu_\Phi = 1,5 \cdot (2 \cdot q_0 - 1) = 1,5 \cdot (2 \cdot 3,9 - 1) = 10,20$$

$$\rho_{max} = \rho' + \frac{0,0018}{\mu_\Phi \cdot \varepsilon_{sy,d}} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} = \rho_{max} = 0,0058 + \frac{0,0018}{10,20 \cdot 0,002174} \cdot \frac{2,0}{43,48} = 0,0102$$

Koeficijent armiranja vlačnom armaturom ρ duž cijele grede mora biti veći od ρ_{min} , a određuje se prema (75):

$$\rho_{min} = 0,5 \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right) = 0,5 \cdot \left(\frac{2,9}{500} \right) = 0,0029$$

Koeficijent armiranja vlačnom armaturom (76):

$$\rho = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = \frac{13,84}{30 \cdot 44,5} = 0,0102$$

Treba zadovoljiti uvjet (77):

$$0,0029 \leq 0,0102 \leq 0,0102$$

Razmak spona s određuje se prema (78):

$$s = \min \begin{cases} \frac{h_w}{4} = \frac{500}{4} = 125 \text{ cm} \\ 24 \cdot d_{bw} = 24 \cdot 6 = 14,4 \text{ cm} = 12,8 \\ 225 \text{ mm} = 22,5 \text{ cm} \\ 8 \cdot d_{bL} = 8 \cdot 1,6 = 12,8 \text{ cm} \end{cases}$$

Odabrana poprečna armatura u kritičnom području: $\Phi 8/12$ cm na duljini 50 cm od unutarnjeg oslonca, ostalo $\Phi 8/13$.

9.5. Proračun vitkih elemenata okvira

Vitke elemente konstrukcije potrebno je dimenzionirati prema teoriji II. reda, odnosno u proračun je potrebno uključiti i deformacije sustava. Proračun se provodi za stup POZ. IV/100, s obzirom da se u njemu pojavljuje najveća vrijednost uzdužne tlačne sile, što može dovesti do pojave izvijanja stupova i greda [25].

Rotacijska krutost čvora određuje se prema (79) [25]:

$$k = \frac{\theta}{M} \cdot \frac{E \cdot I_{col}}{I_{col}} = \frac{\sum \frac{E \cdot I_{col}}{l_{col}}}{\sum M_R} \quad (79)$$

$$\sum M_R = 2 \cdot \left(\frac{6 \cdot E \cdot I_b''}{l_b} \right) \quad (80)$$

gdje su:

E – modul elastičnosti betona

I_{col} – moment inercije stupa, određuje se prema (81)

$$I_{col} = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (81)$$

$$I_{col} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{50 \cdot 50^3}{12} = 520833,33 \text{ cm}^4$$

I_b'' - moment inercije grede za raspucalo stanje (50% krutosti), određuje se prema (82)

$$I_b'' = 0,5 \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (82)$$

$$I_b'' = 0,5 \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} = 0,5 \cdot \frac{30 \cdot 50^3}{12} = 312500,00 \text{ cm}^4$$

l_{col} – duljina stupa

l_b – duljina grede

Rotacijska krutost čvora 5:

Za potpunu upetost stupa teoretska krutost iznosi nula ($k = 0$), no u praksi to nije česti slučaj stoga se predlaže minimalna vrijednost $k = 0,1$. Prema tome,

$$k_5 = 0,1$$

Rotacijska krutost čvora N prema (79):

$$k_6 = 2 \cdot \frac{\frac{520833,33}{350}}{12 \cdot \frac{312500,00}{600}} = 0,48$$

Efektivna duljina l_0 za nepridržane okvire određuje se prema (80) [25]:

$$l_0 = l \cdot \max \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{1 + 10 \cdot \frac{k_6 \cdot k_5}{k_6 + k_5}} \\ \left(1 + \frac{k_6}{1 + k_6}\right) \cdot \left(1 + \frac{k_2}{1 + k_2}\right) \end{array} \right. \quad (80)$$

$$l_0 = 3,5 \cdot \max \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{1 + 10 \cdot \frac{0,48 \cdot 0,1}{0,48 + 0,1}} = 1,35 \\ \left(1 + \frac{0,48}{1 + 0,48}\right) \cdot \left(1 + \frac{0,1}{1 + 0,1}\right) = 1,44 \end{array} \right. = 3,5 \cdot 1,44 = 5,04 \text{ m}$$

Maksimalna vrijednost vitkosti koja se ne smije prijeći [25]:

$$\lambda_{max} = 120$$

Vitkost se određuje prema (81):

$$\lambda = \frac{l_0}{i} = \frac{l_0}{0,289 \cdot b} \quad (81)$$

$$\lambda = \frac{l_0}{i} = \frac{l_0}{0,289 \cdot b} = \frac{504}{0,289 \cdot 50} = 34,88$$

Izraz za proračun granične vitkosti [25] (82):

$$\lambda_{lim} = 20 \cdot A \cdot B \cdot C \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (82)$$

$$n = \frac{|N_{Ed}|}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{1810,7}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = 0,36$$

Ostale vrijednosti su usvojene: $A = 0,7$; $B = 1,1$; $C = 0,7$. [25]

$$\lambda_{lim} = 20 \cdot A \cdot B \cdot C \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} = 20 \cdot 0,7 \cdot 1,1 \cdot 0,7 \cdot \frac{1}{\sqrt{0,36}} = 17,97$$

$$\lambda > \lambda_{lim}$$

$$34,88 > 17,97$$

Za proračun stupa POZ. IV/100 potrebno je uzeti učinke teorije II. reda.

9.5.1. Provjera međukatnih pomaka

Na nekim vitkim stupovima kod proračuna konstrukcija na potres ne provodi se pojednostavljeni postupak. Ako je koeficijent osjetljivosti međukatnog pomaka, θ , bude manji od 0,1 za sve katove nije potrebno uzeti u obzir učinke II. reda (83) [7]:

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h} \leq 0,1 \quad (83)$$

gdje su:

θ - koeficijent osjetljivosti međukatnog pomaka

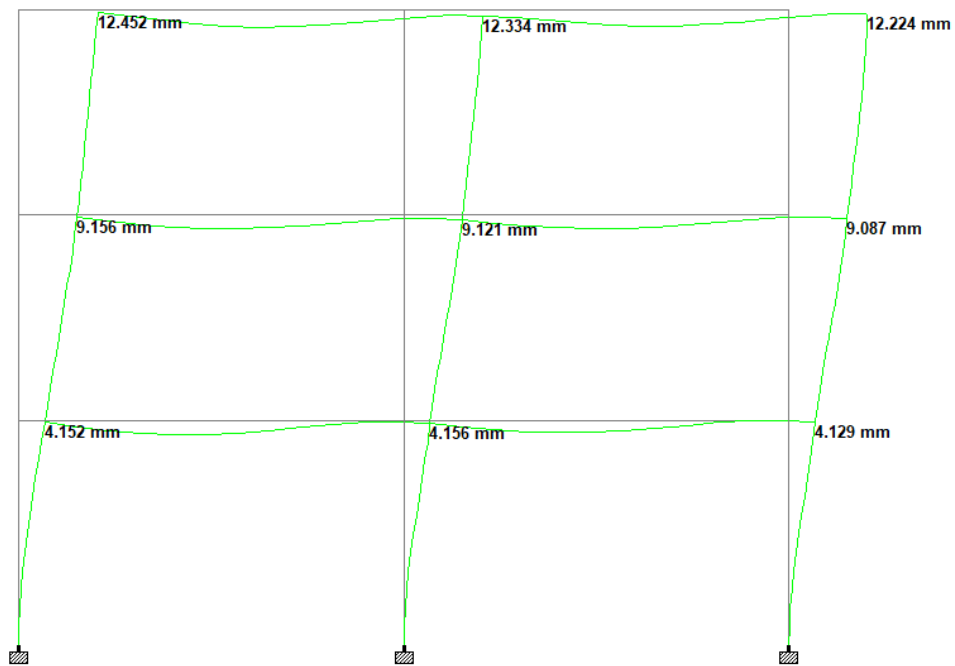
P_{tot} - ukupno vertikalno opterećenje u promatranom katu i iznad promatranog kata uzeto u obzir u potresnoj proračunskoj situaciji

d_r – proračunski katni pomak

V_{tot} - ukupna bočna sila

h - međukatna visina

Na Slici 75 prikazane su vrijednosti pomaka.



Slika 75: Vrijednosti pomaka okvirne konstrukcije

KROV (300)

$$d_{s,300} = 3,9 \cdot 12,452 = 48,56 \text{ mm}$$

$$d_{s,200} = 3,9 \cdot 9,156 = 35,71 \text{ mm}$$

$$d_r = 48,56 - 35,71 = 12,85 \text{ mm}$$

$$P_{tot} = W_2 = 3349,27 \text{ kN}$$

$$V_{tot} = F_3 = 461,52 \text{ kN}$$

$$\theta = \frac{3349,27 \cdot 1,285}{461,52 \cdot 320} \leq 1 \rightarrow 0,029 < 1,00$$

MEĐUKATNA KONSTRUKCIJA (200)

$$d_{s,200} = 3,9 \cdot 9,156 = 35,71 \text{ mm}$$

$$d_{s,100} = 3,9 \cdot 4,152 = 16,19 \text{ mm}$$

$$d_r = 35,71 - 16,9 = 18,81 \text{ mm}$$

$$P_{tot} = 8708,21 \text{ kN}$$

$$V_{tot} = 461,52 + 527,42 = 988,94 \text{ kN}$$

$$\theta = \frac{8708,21 \cdot 1,881}{988,94 \cdot 320} \leq 0,1 \rightarrow 0,052 < 0,1$$

MEĐUKATNA KONSTRUKCIJA (100)

$$d_{s,100} = 3,9 \cdot 4,152 = 18,81 \text{ mm}$$

$$d_{s,0} = 3,9 \cdot 0,00 = 0,00 \text{ mm}$$

$$d_r = 18,81 \text{ mm}$$

$$P_{tot} = 13973,99 \text{ kN}$$

$$V_{tot} = 461,52 + 527,42 + 246,36 = 1235,3 \text{ kN}$$

$$\theta = \frac{13973,99 \cdot 1,881}{1235,3 \cdot 350} \leq 0,1 \rightarrow 0,061 < 0,1$$

Nije potrebno uzeti u obzir učinke drugog reda!

9.6. Dimenzioniranje stupova okvira na moment savijanja

Okvirne konstrukcije čija je katnost ≥ 2 moraju ispuniti uvjet da zbroj svih momenata nosivosti stupova koji su priključeni u nekom čvoru bude veći od zbroja momenata greda koje su priključene u istom čvoru. Jednostavnije rečeno, momenti stupova moraju imati 30% veću vrijednost od greda koje su priključene u tom čvoru. Mora vrijediti izraz (84) [23].

$$\sum M_{Sc} \geq 1,3 \cdot \sum M_{Rd} \quad (84)$$

gdje su: M_{Sc} – vrijednosti momenata u stupu, M_{Rd} – vrijednosti momenata u gredi.

Za svaki smjer potresnog djelovanja potrebno je proračunati omjer (α) zbroja proračunskog momenta savijanja na jednom kraju potresne veze i većeg momenta savijanja na drugom kraju gdje nastaje plastični zglob (85):

$$\alpha_{CD} = 1,30 \cdot \frac{|M^l_{Rd}| + |M^r_{Rd}|}{|M^0_{Sc}| + |M^u_{Sc}|} \quad (85)$$

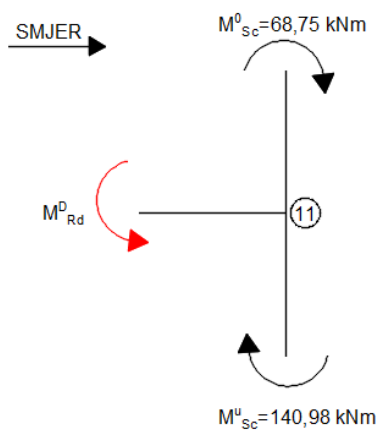
gdje su:

M^l_{Rd}, M^r_{Rd} – stvarni momenti otpornosti krajeva greda, proračunavaju se iz stvarne ploštine vlačne armature i granice popuštanja f_{yd}

M^0_{Sc}, M^u_{Sc} – momenti stupa određeni proračunom

ČVOR 11 - POZICIJA 200

Na Slici 76 nalaze se vrijednosti momenata stupa i grede u čvoru 11 za smjer 1.

SMJER 1:

Slika 76: Vrijednosti momenata u čvoru 11 za smjer 1 [izradio autor]

Odabrana armatura u gornjoj zoni za vanjske oslonce: $A_{s1} = 12,32 \text{ cm}^2$ ($2\Phi 28$).

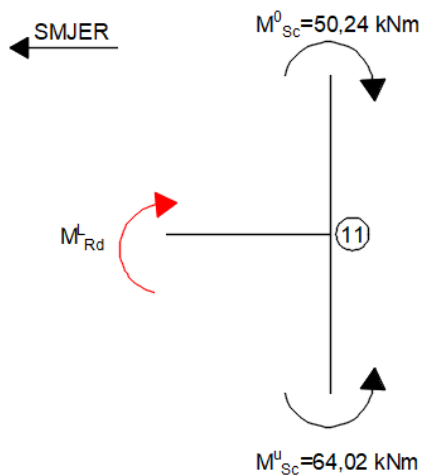
Moment nosivosti za vanjske oslonce:

$$M^D_{Rd} = 213,58 \text{ kNm}$$

$$\alpha_{CD,1} = 1,30 \cdot \frac{|M^D_{Rd}|}{|M^0_{Sc}| + |M^u_{Sc}|} = 1,3 \cdot \frac{213,58}{68,75 + 140,98} = 1,32$$

SMJER 2:

Na Slici 77 nalaze se vrijednosti momenata stupa i grede u čvoru 11 za smjer 2.



Slika 77: Vrijednosti momenata u čvoru 11 za smjer 2 [izradio autor]

Odabrana armatura u donjoj zoni za vanjske oslonce: $A_{s1} = 7,70 \text{ cm}^2$ ($4\Phi 14$).

Moment nosivosti za vanjske oslonce:

$$M^L_{Rd} = 139,3 \text{ kNm}$$

$$\alpha_{CD,2} = 1,30 \cdot \frac{|M^L_{Rd}|}{|M^0_{Sc}| + |M^u_{Sc}|} = 1,3 \cdot \frac{139,3}{50,24 + 64,02} = 1,58$$

Nove vrijednosti momenata:

$$M^O_{s1CD} = 1,32 \cdot 68,75 = 90,75 \text{ kNm}$$

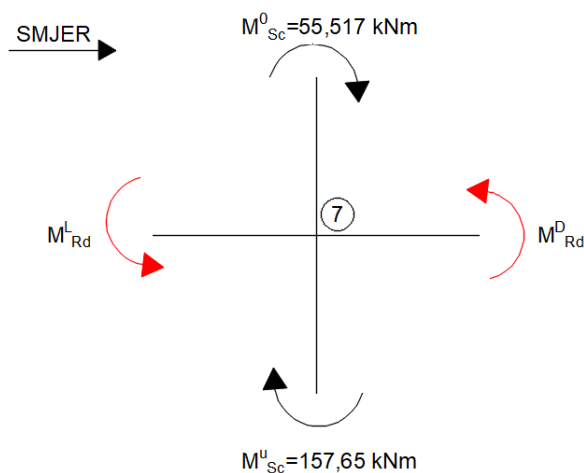
$$M^U_{s1CD} = 1,32 \cdot 140,98 = 186,09 \text{ kNm}$$

$$M^O_{s2CD} = 1,58 \cdot 50,24 = 79,38 \text{ kNm}$$

$$M^U_{s2CD} = 1,58 \cdot 64,02 = 101,15 \text{ kNm}$$

ČVOR 7 – POZICJA 200

Na Slici 78 nalaze se vrijednosti momenata stupa i greda u čvoru 7 za smjer 1.

SMJER 1

Slika 78: Vrijednosti momenata stupa i greda za smjer 1 [izradio autor]

Odabrana armatura u gornjoj zoni za unutarnje oslonce: $A_{s1} = 11,83 \text{ cm}^2$ ($2\Phi 25 + 1\Phi 16$).

Moment nosivosti za unutarnje oslonce:

$$M^D_{Rd} = 206,00 \text{ kNm}$$

Odabrana armatura u donjoj zoni za unutarnje oslonce: $A_{s1} = 7,70 \text{ cm}^2$ ($4\Phi 14$).

Moment nosivosti za unutarnje oslonce:

$$M^L_{Rd} = 139,3 \text{ kNm}$$

$$\alpha_{CD} = 1,30 \cdot \frac{|M^D_{Rd} + M^L_{Rd}|}{|M^0_{Sc}| + |M^u_{Sc}|} = 1,3 \cdot \frac{206,00 + 139,3}{55,52 + 157,65} = 2,11$$

Nove vrijednosti momenata:

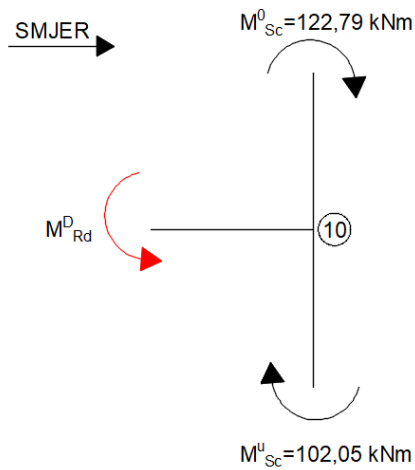
$$M^0_{S1CD} = 2,11 \cdot 55,17 = 116,41 \text{ kNm}$$

$$M^U_{S1CD} = 2,11 \cdot 157,65 = 332,64 \text{ kNm}$$

ČVOR 10 – POZICJA 100

Na Slici 79 nalaze se vrijednosti momenata stupa i grede u čvoru 10 za smjer 1.

SMJER 1



Slika 79: Vrijednosti momenata stupa i grede u čvoru 10 za smjer 1 [izradio autor]

Odabrana armatura u gornjoj zoni za vanjske oslonce: $A_{s1} = 13,21 \text{ cm}^2$ ($2\Phi 25 + 3\Phi 12$).

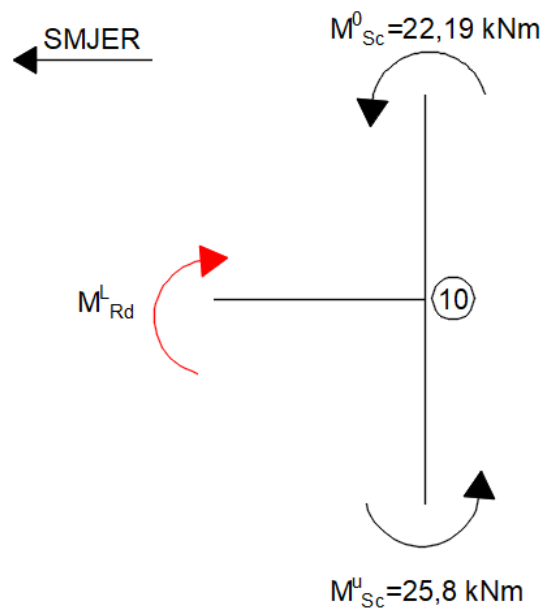
Moment nosivosti za vanjske oslonce:

$$M^D_{Rd} = 226,97 \text{ kNm}$$

$$\alpha_{CD,1} = 1,30 \cdot \frac{|M^D_{Rd}|}{|M^0_{Sc}| + |M^u_{Sc}|} = 1,3 \cdot \frac{226,97}{122,79 + 102,05} = 1,31$$

SMJER 2:

Na Slici 80 nalaze se vrijednosti momenata stupa i grede u čvoru 10 za smjer 2.



Slika 80: Vrijednosti momenata stupa i grede u čvoru 10 za smjer 2 [izradio autor]

Odabrana armatura u donjoj zoni za vanjske oslonce: $A_{s1} = 9,42 \text{ cm}^2$ ($3\Phi 20$).

Moment nosivosti za vanjske oslonce:

$$M^L_{Rd} = 167,86 \text{ kNm}$$

$$\alpha_{CD,2} = 1,30 \cdot \frac{|M^L_{Rd}|}{|M^0_{Sc}| + |M^u_{Sc}|} = 1,3 \cdot \frac{167,86}{22,19 + 25,08} = 4,61$$

Nove vrijednosti momenata:

$$M^O_{S1CD} = 1,31 \cdot 122,79 = 160,85 \text{ kNm}$$

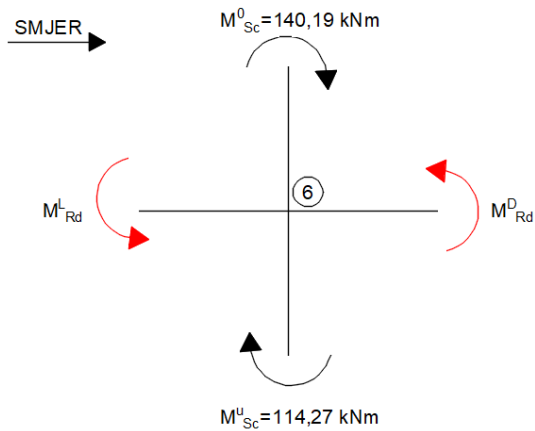
$$M^U_{S1CD} = 1,31 \cdot 102,05 = 133,69 \text{ kNm}$$

$$M^O_{S2CD} = 4,61 \cdot 22,19 = 102,3 \text{ kNm}$$

$$M^U_{S2CD} = 4,61 \cdot 25,82 = 119,17 \text{ kNm}$$

ČVOR 6 – POZ 100

Na Slici 81 nalaze se vrijednosti momenata stupova i grede u čvoru 6.



Slika 81: Vrijednosti momenata stupa i grede u čvoru 6 [izradio autor]

Odabrana armatura u gornjoj zoni za unutarnje oslonce: $A_{s1} = 13,84 \text{ cm}^2$ ($2\Phi 25 + 2\Phi 16$).

Moment nosivosti za unutarnje oslonce:

$$M^D_{Rd} = 236,72 \text{ kNm}$$

Odabrana armatura u donjoj zoni za unutarnje oslonce: $A_{s1} = 9,42 \text{ cm}^2$ ($3\Phi 20$).

Moment nosivosti za unutarnje oslonce:

$$M^L_{Rd} = 167,86 \text{ kNm}$$

$$\alpha_{CD} = 1,30 \cdot \frac{|M^D_{Rd} + M^L_{Rd}|}{|M^0_{Sc}| + |M^u_{Sc}|} = 1,3 \cdot \frac{236,72 + 167,86}{140,19 + 114,27} = 2,06$$

Nove vrijednosti momenata:

$$M^O_{s1CD} = 2,06 \cdot 140,19 = 288,79 \text{ kNm}$$

$$M^U_{s1CD} = 2,06 \cdot 114,27 = 235,4 \text{ kNm}$$

9.7. Dimenzioniranje stupova na ekscentrični tlak

Za dimenzioniranje stupova na ekscentrični tlak koriste se dijagrami profesora Tomičića, a armiranje se provodi simetrično ($A_{s1}=A_{s2}$).

9.7.1. Stup III/300 (ŠTAP 3 i 9)

a) Stalna proračunska situacija

Presjek gore (čvor 4 i 12)

$$M_{Ed} = 156,32 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -339,48 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{15632}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,063 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-339,48}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,068 \end{aligned} \right\} \omega = 0,00$$

Presjek dolje (čvor 3 i 11)

$$M_{Ed} = 83,37 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -366,49 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{8337}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,033 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-366,49}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,073 \end{aligned} \right\} \omega = 0,00$$

Mjerodavna je minimalna armatura.

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{aligned} \frac{0,15 \cdot N_{Ed}}{f_{yd}} &= \frac{0,15 \cdot 366,49}{43,48} = 1,26 \text{ cm}^2 \\ 0,003 \cdot A_c &= 0,003 \cdot 50 \cdot 50 = 7,5 \text{ cm}^2 \\ 4\Phi 12 &(4,52 \text{ cm}^2) \end{aligned} \right.$$

Odabrano: 2x2Φ16 (2x4,02 = 8,04 cm²)

b) Potresna proračunska situacija

Presjek gore (čvor 4 i 12)

$$M_{Ed} = 160,29 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -262,06 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{16029}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,064 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-262,06}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,052 \end{aligned} \right\} \omega = 0,06$$

Presjek dolje (čvor 3 i 11)

$$M_{Ed} = 90,75 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -282,06 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{9075}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,0363 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-282,06}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,056 \end{aligned} \right\} \omega = 0,03$$

Potrebna armatura:

$$A_{s1} = A_{s2} = \omega \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h = 0,06 \cdot \frac{2,0}{43,48} \cdot 50 \cdot 50 = 6,9 \text{ cm}^2$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 13,8 \text{ cm}^2$$

Minimalna armatura:

$$A_{s,min} = 0,01 \cdot b \cdot h = 0,01 \cdot 50 \cdot 50 = 25,0 \text{ cm}^2$$

Odabrano: $2 \times 4 \Phi 20$ ($2 \times 12,57 = 25,14 \text{ cm}^2$) + $2 \times 2 \Phi 16$ ($2 \times 4,02 = 8,04 \text{ cm}^2$) na bočnim stranama stupa

9.7.2. Stup IV/300 (ŠTAP 6)

a) Stalna proračunska situacija

Presjek gore (čvor 8)

$$M_{Ed} = 16,47 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -621,29 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{1647}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,006 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-621,29}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,124 \end{aligned} \right\} \omega = 0,00$$

Presjek dolje (čvor 7)

$$M_{Ed} = 13,44 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -648,29 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{1344}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,005 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-648,29}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,129 \end{aligned} \right\} \omega = 0,00$$

Mjerodavna je minimalna armatura.

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{aligned} \frac{0,15 \cdot N_{Ed}}{f_{yd}} &= \frac{0,15 \cdot 648,29}{43,48} = 2,23 \text{ cm}^2 \\ 0,003 \cdot A_c &= 0,003 \cdot 50 \cdot 50 = 7,5 \text{ cm}^2 \\ 4\Phi 12 &(4,52 \text{ cm}^2) \end{aligned} \right.$$

Odabrano: 2x2Φ16 (2x4,02 = 8,04 cm²)

b) Potresna proračunska situacija

Presjek gore (čvor 8)

$$M_{Ed} = 107,67 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -442,94 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{10767}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,043 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-442,94}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,089 \end{aligned} \right\} \omega = 0,01$$

Presjek dolje (čvor 7)

$$M_{Ed} = 116,41 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -462,94 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{11641}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,047 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-462,94}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,092 \end{aligned} \right\} \omega = 0,01$$

Potrebna armatura:

$$A_{s1} = A_{s2} = \omega \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h = 0,01 \cdot \frac{2,0}{43,48} \cdot 50 \cdot 50 = 1,15 \text{ cm}^2$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 2,3 \text{ cm}^2$$

Minimalna armatura:

$$A_{s,min} = 0,01 \cdot b \cdot h = 0,01 \cdot 50 \cdot 50 = 25,0 \text{ cm}^2$$

Odabrano: $2 \times 4 \Phi 20$ ($2 \times 12,57 = 25,14 \text{ cm}^2$) + $2 \times 2 \Phi 16$ ($2 \times 4,02 = 8,04 \text{ cm}^2$) na bočnim stranama stupa

9.7.3. Stup III/200 (ŠTAP 2 i 8)

a) Stalna proračunska situacija

Presjek gore (čvor 3 i 11)

$$M_{Ed} = 92,30 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -710,45 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{9230}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,037 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-710,84}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,142 \end{aligned} \right\} \omega = 0,00$$

Presjek dolje (čvor 2 i 10)

$$M_{Ed} = 93,45 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -737,45 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{9345}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,037 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-737,45}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,148 \end{aligned} \right\} \omega = 0,00$$

Mjerodavna je minimalna armatura.

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{aligned} \frac{0,15 \cdot N_{Ed}}{f_{yd}} &= \frac{0,15 \cdot 737,84}{434,48} = 2,55 \text{ cm}^2 \\ 0,003 \cdot A_c &= 0,003 \cdot 50 \cdot 50 = 7,5 \text{ cm}^2 \\ &4\Phi 12 (4,52 \text{ cm}^2) \end{aligned} \right.$$

Odabrano: 2x2Φ16 (2x4,02 = 8,04 cm²)

b) Potresna proračunska situacija

Presjek gore (čvor 3 i 11)

$$M_{Ed} = 186,09 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -537,62 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{18609}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,07 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-537,62}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,108 \end{aligned} \right\} \omega = 0,02$$

Presjek dolje (čvor 2 i 10)

$$M_{Ed} = 160,85 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -557,626 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{16085}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,064 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-557,626}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,111 \end{aligned} \right\} \omega = 0,01$$

Potrebna armatura:

$$A_{s1} = A_{s2} = \omega \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h = 0,02 \cdot \frac{2,0}{43,48} \cdot 50 \cdot 50 = 2,3 \text{ cm}^2$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 4,6 \text{ cm}^2$$

Minimalna armatura:

$$A_{s,min} = 0,01 \cdot b \cdot h = 0,01 \cdot 50 \cdot 50 = 25,0 \text{ cm}^2$$

Odabrano: $2 \times 4 \Phi 20$ ($2 \times 12,57 = 25,14 \text{ cm}^2$) + $2 \times 2 \Phi 16$ ($2 \times 4,02 = 8,04 \text{ cm}^2$) na bočnim stranama stupa

9.7.4. Stup IV/200 (ŠTAP 5)

a) Stalna proračunska situacija

Presjek gore (čvor 7)

$$M_{Ed} = 34,42 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -1191,96 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{3442}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,014 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-1191,96}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,238 \end{aligned} \right\} \omega = 0,00$$

Presjek dolje (čvor 6)

$$M_{Ed} = 24,73 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -1218,96 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{2473}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,010 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-1218,96}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,244 \end{aligned} \right\} \omega = 0,00$$

Mjerodavna je minimalna armatura.

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{aligned} \frac{0,15 \cdot N_{Ed}}{f_{yd}} &= \frac{0,15 \cdot 737,84}{43,48} = 2,55 \text{ cm}^2 \\ 0,003 \cdot A_c &= 0,003 \cdot 50 \cdot 50 = 7,5 \text{ cm}^2 \\ &4\Phi 12 (4,52 \text{ cm}^2) \end{aligned} \right.$$

Odabrano: 2x2Φ16 (2x4,02 = 8,04 cm²)

b) Potresna proračunska situacija

Presjek gore (čvor 7)

$$M_{Ed} = 332,64 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -800,04 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{33264}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,13 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-800,04}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,16 \end{aligned} \right\} \omega = 0,08$$

Presjek dolje (čvor 6)

$$M_{Ed} = 288,79 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -820,04 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{28879}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,12 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-820,04}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,164 \end{aligned} \right\} \omega = 0,09$$

Potrebna armatura:

$$A_{s1} = A_{s2} = \omega \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h = 0,09 \cdot \frac{2,0}{43,48} \cdot 50 \cdot 50 = 10,35 \text{ cm}^2$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 20,7 \text{ cm}^2$$

Minimalna armatura:

$$A_{s,min} = 0,01 \cdot b \cdot h = 0,01 \cdot 50 \cdot 50 = 25,0 \text{ cm}^2$$

Odabrano: $2 \times 4 \Phi 20$ ($2 \times 12,57 = 25,14 \text{ cm}^2$) + $2 \times 2 \Phi 16$ ($2 \times 4,02 = 8,04 \text{ cm}^2$) na bočnim stranama stupa

9.7.5. Stup III/100 (ŠTAP 1 i 7)

a) Stalna proračunska situacija

Presjek gore (čvor 2 i 10)

$$M_{Ed} = 86,25 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -1080,00 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{8625}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,035 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-1080}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,216 \end{aligned} \right\} \omega = 0,00$$

Presjek dolje (čvor 1 i 9)

$$M_{Ed} = 88,96 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -1115,00 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{8896}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,036 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-1011,00}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,223 \end{aligned} \right\} \omega = 0,00$$

Mjerodavna je minimalna armatura.

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{aligned} \frac{0,15 \cdot N_{Ed}}{f_{yd}} &= \frac{0,15 \cdot 737,84}{434,48} = 2,55 \text{ cm}^2 \\ 0,003 \cdot A_c &= 0,003 \cdot 50 \cdot 50 = 7,5 \text{ cm}^2 \\ 4\Phi 12 &(4,52 \text{ cm}^2) \end{aligned} \right.$$

Odabrano: 2x2Φ16 (2x4,02 = 8,04 cm²)

b) Potresna proračunska situacija

Presjek gore (čvor 2 i 10)

$$M_{Ed} = 133,69 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -818,28 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{13369}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,05 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-818,28}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,164 \end{aligned} \right\} \omega = 0,00$$

Presjek dolje (čvor 1 i 9)

$$M_{Ed} = 219,41 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -840,157 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{21941}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,088 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-840,157}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,168 \end{aligned} \right\} \omega = 0,03$$

Potrebna armatura:

$$A_{s1} = A_{s2} = \omega \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h = 0,03 \cdot \frac{2,0}{43,48} \cdot 50 \cdot 50 = 3,45 \text{ cm}^2$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 6,9 \text{ cm}^2$$

Minimalna armatura:

$$A_{s,min} = 0,01 \cdot b \cdot h = 0,01 \cdot 50 \cdot 50 = 25,0 \text{ cm}^2$$

Odabrano: $2 \times 4 \Phi 20$ ($2 \times 12,57 = 25,14 \text{ cm}^2$) + $2 \times 2 \Phi 16$ ($2 \times 4,02 = 8,04 \text{ cm}^2$) na bočnim stranama stupa

9.7.6. Stup IV/100 (ŠTAP 4)

a) Stalna proračunska situacija

Provodi se proračun stupa kao vitkog elementa, uzimajući u obzir učinke II. reda.

Ispituju se dva slučaja:

1. najveća uzdužna sila + pripadajući moment savijanja
2. najveći moment savijanja + pripadajuća uzdužna sila

1. Slučaj: najveća uzdužna sila + pripadajući moment savijanja

Mjerodavna kombinacija 4; stalno + uporabno simetrično + vjetar + snijeg

$$M_{Ed}^I = 65,02 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed}^I = 1810,7 \text{ kN}$$

Proračunski model izoliranog stupa, provodi se za najopterećeniji stup.

Koristi se metoda koja se temelji na nazivnoj zakrivljenosti prema kojoj je:

$$M_{Ed} = M_{0Ed} + M_2 \quad (86)$$

M_{0Ed} – moment savijanja po teoriji 1. reda, s uključenim efektima imperfekcije, određuje se prema (87)

M_2 – nazivni moment teorije II. reda

$$M_{0Ed} = M_{Ed}^I + |N_{Ed}^I| \cdot e_i \quad (87)$$

U slučaju izoliranih stupova, na strani sigurnosti, vrijednost ekscentriciteta iznosi:

$$e_i = \frac{l_0}{400} = \frac{568}{400} = 1,42 \text{ cm}$$

$$M_{0Ed} = M_{Ed}^I + |N_{Ed}^I| \cdot e_i = 65,02 + 1810,7 \cdot 0,0142 = 90,73 \text{ kNm}$$

Za proračun nazivnog momenta teorije II. reda koristi se izraz (88):

$$M_2 = |N_{Ed}| \cdot e_2 \quad (88)$$

Vrijednost e_2 određuje se prema sljedećem izrazu (89):

$$e_2 = \frac{1}{r} \cdot \frac{l_0^2}{c} \quad (89)$$

pri čemu su:

c – faktor ovisan o raspodjeli zakrivljenosti, za konstantni poprečni presjek, $c = 10$

$\frac{1}{r}$ – zakrivljenost, prema izrazu (90)

$$\frac{1}{r} = K_r \cdot K_\varphi \cdot \frac{1}{r_0} \quad (90)$$

K_r – faktor ovisan o osnom opterećenju

K_φ – faktor koji uzima u obzir puzanje betona

Faktor K_r definira se prema izrazu (91):

$$K_r = \frac{(n_u - n)}{(n_u - n_{bal})} \leq 1,0 \quad (91)$$

no, na strani sigurnosti uzima se da je jednak 1,0.

Faktor K_φ jednak je (92):

$$K_\varphi = 1 + \beta \cdot \varphi_{ef} \geq 1,0 \quad (92)$$

gdje su:

$$\text{faktor } \beta = 0,35 + \frac{f_{ck}}{200} - \frac{\lambda}{150}$$

λ - vitkost

$$\varphi_{ef} - \text{proračunski koeficijent puzanja; } \varphi_{ef} = \varphi(\infty, t_0) \cdot \frac{M_{0Eqp}}{M_{0Ed}}$$

$\varphi(\infty, t_0)$ – konačni koeficijent puzanja

M_{0Eqp} - moment po teoriji I. reda za nazovistalnu kombinaciju opterećenja

M_{0Ed} – moment po teoriji I. reda za granično stanje nosivosti, s uključenim efektima imperfekcije

Omjer $\frac{1}{r_0}$ izračunava se prema izrazu (93):

$$\frac{1}{r_0} = \frac{\varepsilon_{yd}}{0,45 \cdot d} \quad (93)$$

ε_{yd} – deformacija pri popuštanju armature (94)

d – statička visina

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (94)$$

f_{yd} – granica popuštanja čelika

E_s – modul elastičnosti čelika

PRORAČUN MOMENTA PO TEORIJI II. REDA

Deformacija pri popuštanju armature:

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{43,48}{21000} = 2,070\text{‰}$$

$$\frac{1}{r_0} = \frac{\varepsilon_{yd}}{0,45 \cdot d} = \frac{0,002070}{0,45 \cdot 0,445} = 0,0103 \frac{1}{\text{m}}$$

$$K_\varphi = 1 + \beta \cdot \varphi_{ef} = 1 + 0,098 \cdot 0 = 1,0$$

$$\varphi_{ef} = \varphi(\infty, t_0) \cdot \frac{M_{0Eqp}}{M_{0Ed}} = 2,85 \cdot \frac{0}{90,73} = 0$$

$$\beta = 0,35 + \frac{f_{ck}}{200} - \frac{\lambda}{150} = 0,35 + \frac{2}{200} - \frac{39,31}{150} = 0,098$$

$$K_r = 1,00 \text{ (na strani sigurnosti)}$$

$$\frac{1}{r} = K_r \cdot K_\varphi \cdot \frac{1}{r_0} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,0103 = 0,0103 \frac{1}{\text{m}}$$

$$e_2 = \frac{1}{r} \cdot \frac{l_0^2}{c} = 0,0103 \cdot \frac{5,68^2}{10} = 0,033 = 3,33 \text{ cm}$$

$$M_2 = |N_{Ed}| \cdot e_2 = |-1810,7| \cdot 0,033 = 59,75 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = M_{0Ed} + M_2 = 90,73 + 59,75 = 150,48 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 150,48 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -1810,7 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{15048}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,060 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-1810,7}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,362 \end{aligned} \right\} \omega = 0,00$$

Mjerodavna je minimalna armatura.

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,15 \cdot N_{Ed}}{f_{yd}} = \frac{0,15 \cdot 1810,7}{438} = 6,25 \text{ cm}^2 \\ 0,003 \cdot A_c = 0,003 \cdot 50 \cdot 50 = 7,5 \text{ cm}^2 \\ 4\Phi 12 (4,52 \text{ cm}^2) \end{array} \right.$$

Odabrano: 2x2Φ16 (2x4,02 = 8,04 cm²)

2. Slučaj: najveća moment savijanja + pripadajuća uzdužna sila

Mjerodavna kombinacija 9; stalno + vjetar + uporabno nesimetrično lijevo + snijeg

$$M_{Ed}^I = 112,69 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed}^I = -1012,2 \text{ kN}$$

$$M_{0Ed} = M_{Ed}^I + |N_{Ed}^I| \cdot e_i = 112,69 + 1012,2 \cdot 0,0142 = 127,06 \text{ kNm}$$

$$M_2 = |N_{Ed}^I| \cdot e_2 = |-1012,2| \cdot 0,033 = 33,40 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = M_{0Ed} + M_2 = 127,06 + 33,40 = 160,46 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 160,46 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -1012,2 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{16046}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,064 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-1012,2}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,202 \end{aligned} \right\} \omega = 0,00$$

Mjerodavna je minimalna armatura.

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{aligned} \frac{0,15 \cdot N_{Ed}}{f_{yd}} &= \frac{0,15 \cdot 1012,2}{43,48} = 3,49 \text{ cm}^2 \\ 0,003 \cdot A_c &= 0,003 \cdot 50 \cdot 50 = 7,5 \text{ cm}^2 \\ 4\Phi 12 &(4,52 \text{ cm}^2) \end{aligned} \right.$$

Odabrano: 2x2Φ16 (2x4,02 = 8,04 cm²)

a) Potresna proračunska situacija

Presjek gore (čvor 6)

$$M_{Ed} = 235,4 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -1162,5 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{23540}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,094 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-1162,5}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,232 \end{aligned} \right\} \omega = 0,00$$

Presjek dolje (čvor 5)

$$M_{Ed} = 226,00 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -1184,4 \text{ kN}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Ed} &= \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{22600}{50 \cdot 50^2 \cdot 2,0} = 0,088 \\ \nu_{Ed} &= \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-1184,4}{50 \cdot 50 \cdot 2,0} = -0,237 \end{aligned} \right\} \omega = 0,01$$

Potrebna armatura:

$$A_{s1} = A_{s2} = \omega \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h = 0,01 \cdot \frac{2,0}{43,48} \cdot 50 \cdot 50 = 1,15 \text{ cm}^2$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 2,3 \text{ cm}^2$$

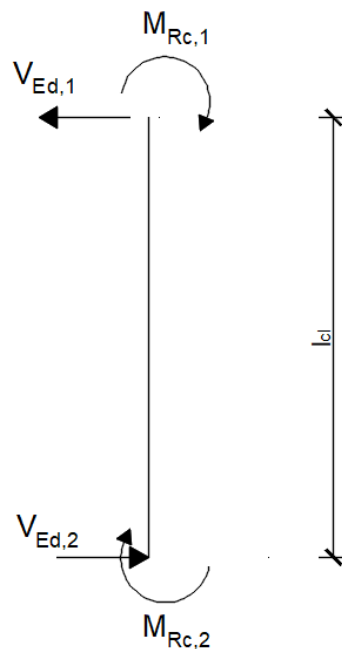
Minimalna armatura:

$$A_{s,min} = 0,01 \cdot b \cdot h = 0,01 \cdot 50 \cdot 50 = 25,0 \text{ cm}^2$$

Odabrano: $2 \times 4 \Phi 20$ ($2 \times 12,57 = 25,14 \text{ cm}^2$) + $2 \times 2 \Phi 16$ ($2 \times 4,02 = 8,04 \text{ cm}^2$) na bočnim stranama stupa

9.8. Dimenzioniranje stupova na poprečnu silu

Vrijednosti poprečnih sila dobivaju se na temelju ravnoteže momenata na krajevima stupa $M_{i,d}$ [23]. Model stupa prikazan je na Slici 82.



Slika 82: Model stupa za određivanje poprečnih sila [izradio autor]

9.8.1. Stup III/100

Poprečne sile u stupu određuju se prema pravilu o kapacitetu nosivosti (95) [23].

$$V_{Ed,1,2} = \frac{(M_{1,d} + M_{2,d})}{l_{cl}} \quad (95)$$

$M_{1,d}, M_{2,d}$ – momenti na gornjem i donjem kraju stupa

l_{cl} – svjetla visina stupa

$$l_{cl} = 3,50 - \frac{0,50}{2} = 3,25 \text{ m}$$

Armatura:

$$A_{s1} = A_{s2} = 8,04 \text{ cm}^2$$

Proračunska uzdužna sila:

$$N_{Ed1} = -1080,00 \text{ kN}$$

$$N_{Ed2} = -1115,00 \text{ kN}$$

$$A_{s1} = A_{s2} = \omega \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h$$

$$\omega = \frac{A_s}{b \cdot h} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{8,04 \cdot 43,48}{50 \cdot 50 \cdot 2} = 0,0699$$

$$v_{Ed1} = \frac{N_{Ed1}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{-1080}{50 \cdot 44,5 \cdot 2,0} = -0,242$$

$$v_{Ed2} = \frac{N_{Ed2}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{-1115,0}{50 \cdot 44,5 \cdot 2,0} = -0,251$$

$$\mu_{Ed} = \mu_{Rd}$$

$$\mu_{Ed,1} = f(\omega, v_{Ed1}) = 0,15$$

$$\mu_{Ed,2} = f(\omega, v_{Ed2}) = 0,15$$

$$M_{Rd1} = M_{Rd2} = M_{Rd}$$

$$M_{Rd} = \mu_{Ed} \cdot b \cdot h^2 \cdot f_{cd} = 0,15 \cdot 50 \cdot 50^2 \cdot 2,0 = 375,00 \text{ kNm}$$

$$\min \left(1; \frac{M^D_{Rd}}{M^o_{S1CD} + M^u_{S1CD}} \right) = \min \left(1; \frac{226,97}{160,85 + 133,69} \right) = \min(1; 0,77) = 0,77$$

$$M_{1,d} = 1,1 \cdot 375 \cdot 0,77 = 317,625 \text{ kNm}$$

$$M_{2,d} = 1,0 \cdot 375 = 375,00 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed;1,2} = \frac{(M_{1,d} + M_{2,d})}{l_{cl}} = \frac{317,625 + 375}{3,25} = 213,12 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti tlačnih štapova

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

Za elemente s vertikalnom poprečnom armaturom ($\alpha = 90^\circ$)

$$v_1 = 0,53$$

$$V_{Rd,max} = \frac{1 \cdot 50 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 0,53 \cdot 2,0}{1,2 + \frac{1}{1,2}} = 1045,20 \text{ kN}$$

$$213,2 \text{ kN} < 1045,20 \text{ kN}$$

→ Nosivost tlačnih štapova zadovoljava.

Proračun minimalne armature:

1) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz uvjeta najmanje poprečne armature

$$s_{l,max} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{b_w \cdot \rho_{w,min}}$$

$$\rho_{w,min} = 0,15 \cdot \frac{2,9}{434,8} = 0,0010$$

Za $\phi 10$: $A_{sw}^1 = 0,79 \text{ cm}^2$ i reznost $m = 4$:

$$s_{l,max} = \frac{0,79 \cdot 4}{50 \cdot 0,0010} = 63,2 \text{ cm}$$

2) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz odnosa $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}}$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{213,12}{1045,20} = 0,20 < 0,30$$

$$s_{l,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 44,5 = 33,38 \text{ cm} \\ 30 \text{ cm} \end{array} \right\}$$

Mjerodavna je manja vrijednost od 1) i 2).

Usvojeno: $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

Odabire se minimalna armatura $\phi 10/30 \text{ cm}$.

Proračun poprečne sile $V_{Rd,s}^{min}$ koju nose minimalne spona $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s_{l,max}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,79 \cdot 4}{30} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 220,11 \text{ kN}$$

Proračun potrebne poprečne armature

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$$

$$s \leq \frac{A_{sw}^1 \cdot m \cdot z \cdot f_{ywd}}{V_{Ed}} \cdot ctg\theta = \frac{0,79 \cdot 4 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48}{213,12} \cdot 1,2 = 30,98 \text{ cm}$$

Usvojeni razmak spona $\phi 10/30 \text{ cm}$.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,79 \cdot 4}{30} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 220,11 \text{ kN}$$

$$213,12 \text{ kN} < 220,11 \text{ kN}$$

Odabrana armatura: **$\phi 10/30$.**

9.8.2. Stup IV/100

$$l_{cl} = 3,25 \text{ m}$$

Armatura:

$$A_{s1} = A_{s2} = 8,04 \text{ cm}^2$$

Proračunska uzdužna sila:

$$N_{Ed1} = -1810,7 \text{ kN}$$

$$N_{Ed2} = -1781,2 \text{ kN}$$

$$A_{s1} = A_{s2} = \omega \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h$$

$$\omega = \frac{A_s}{b \cdot h} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{8,04 \cdot 43,48}{50 \cdot 50 \cdot 2} = 0,0699$$

$$v_{Ed1} = \frac{N_{Ed1}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{-1810,7}{50 \cdot 44,5 \cdot 2,0} = -0,407$$

$$v_{Ed2} = \frac{N_{Ed2}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{-1781,2}{50 \cdot 44,5 \cdot 2,0} = -0,400$$

$$\mu_{Ed} = \mu_{Rd}$$

$$\mu_{Ed,1} = f(\omega, v_{Ed1}) = 0,18$$

$$\mu_{Ed,2} = f(\omega, v_{Ed2}) = 0,18$$

$$M_{Rd1} = M_{Rd2} = M_{Rd}$$

$$M_{Rd} = \mu_{Ed} \cdot b \cdot h^2 \cdot f_{cd} = 0,18 \cdot 50 \cdot 50^2 \cdot 2,0 = 450,00 \text{ kNm}$$

$$\min \left(1; \frac{M^D_{Rd} + M^L_{Rd}}{M^o_{S1CD} + M^u_{S1CD}} \right) = \min \left(1; \frac{236,72 + 167,86}{288,79 + 235,4} \right) = \min(1; 0,77) = 0,77$$

$$M_{1,d} = 1,1 \cdot 450,00 \cdot 0,77 = 381,15 \text{ kNm}$$

$$M_{2,d} = 1,0 \cdot 450 = 450 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed;1,2} = \frac{(M_{1,d} + M_{2,d})}{l_{cl}} = \frac{381,15 + 450}{3,25} = 255,74 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti tlačnih štapova

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

Za elemente s vertikalnom poprečnom armaturom ($\alpha = 90^\circ$)

$$v_1 = 0,53$$

$$V_{Rd,max} = \frac{1 \cdot 50 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 0,53 \cdot 2,0}{1,2 + \frac{1}{1,2}} = 1045,20 \text{ kN}$$

$$255,74 \text{ kN} < 1045,20 \text{ kN}$$

→ Nosivost tlačnih štapova zadovoljava.

Proračun minimalne armature:

1) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz uvjeta najmanje poprečne armature

$$s_{l,max} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{b_w \cdot \rho_{w,min}}$$

$$\rho_{w,min} = 0,15 \cdot \frac{2,9}{434,8} = 0,0010$$

Za $\phi 8$: $A_{sw}^1 = 0,79 \text{ cm}^2$ i reznost $m = 4$:

$$s_{l,max} = \frac{0,79 \cdot 4}{50 \cdot 0,0010} = 63,2 \text{ cm}$$

2) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz odnosa $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}}$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{255,74}{1045,20} = 0,24 < 0,30$$

$$s_{l,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 44,5 = 33,38 \text{ cm} \\ 30 \text{ cm} \end{array} \right\}$$

Mjerodavna je manja vrijednost od 1) i 2).

Usvojeno: $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

Odabire se minimalna armatura $\phi 10/30 \text{ cm}$.

Proračun poprečne sile $V_{Rd,s}^{min}$ koju nose minimalne spone $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s_{l,max}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,79 \cdot 4}{30} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 220,11 \text{ kN}$$

Proračun potrebne poprečne armature

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$$

$$s \leq \frac{A_{sw}^1 \cdot m \cdot z \cdot f_{ywd}}{V_{Ed}} \cdot ctg\theta = \frac{0,79 \cdot 4 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48}{255,74} \cdot 1,2 = 25,82 \text{ cm}$$

Usvojeni razmak spona $\phi 8/25$ cm.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,79 \cdot 4}{25} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 264,13 \text{ kN}$$

$$220,11 \text{ kN} < 264,13 \text{ kN}$$

Odabrana armatura: $\phi 10/25$.

9.8.3. Stup III/200

$$l_{cl} = 2,7 \text{ m}$$

Armatura:

$$A_{s1} = A_{s2} = 8,04 \text{ cm}^2$$

Proračunska uzdužna sila:

$$N_{Ed1} = -710,45 \text{ kN}$$

$$N_{Ed2} = -737,45 \text{ kN}$$

$$A_{s1} = A_{s2} = \omega \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h$$

$$\omega = \frac{A_s}{b \cdot h} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{8,04 \cdot 43,48}{50 \cdot 50 \cdot 2} = 0,0699$$

$$v_{Ed1} = \frac{N_{Ed1}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{-710,45}{50 \cdot 44,5 \cdot 2,0} = -0,159$$

$$v_{Ed2} = \frac{N_{Ed2}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{-737,45}{50 \cdot 44,5 \cdot 2,0} = -0,166$$

$$\mu_{Ed} = \mu_{Rd}$$

$$\mu_{Ed,1} = f(\omega, v_{Ed1}) = 0,15$$

$$\mu_{Ed,2} = f(\omega, v_{Ed2}) = 0,15$$

$$M_{Rd1} = M_{Rd2} = M_{Rd}$$

$$M_{Rd} = \mu_{Ed} \cdot b \cdot h^2 \cdot f_{cd} = 0,15 \cdot 50 \cdot 50^2 \cdot 2,0 = 375,00 \text{ kNm}$$

$$\min\left(1; \frac{M^D_{Rd}}{M^o_{S1CD} + M^u_{S1CD}}\right) = \min\left(1; \frac{213,58}{186,09 + 90,75}\right) = \min(1; 0,77) = 0,77$$

$$M_{1,d} = 1,1 \cdot 375 \cdot 0,77 = 317,63 \text{ kNm}$$

$$M_{2,d} = 1,1 \cdot 375 \cdot 0,77 = 317,63 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed;1,2} = \frac{(M_{1,d} + M_{2,d})}{l_{cl}} = \frac{317,63 + 317,63}{2,7} = 235,28 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti tlačnih štapova

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

Za elemente s vertikalnom poprečnom armaturom ($\alpha = 90^\circ$)

$$v_1 = 0,53$$

$$V_{Rd,max} = \frac{1 \cdot 50 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 0,53 \cdot 2,0}{1,2 + \frac{1}{1,2}} = 1045,20 \text{ kN}$$

$$235,28 \text{ kN} < 1045,20 \text{ kN}$$

→ Nosivost tlačnih štapova zadovoljava.

Proračun minimalne armature:

1) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz uvjeta najmanje poprečne armature

$$s_{l,max} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{b_w \cdot \rho_{w,min}}$$

$$\rho_{w,min} = 0,15 \cdot \frac{2,9}{434,8} = 0,0010$$

Za $\phi 8$: $A_{sw}^1 = 0,5 \text{ cm}^2$ i reznost $m = 4$:

$$s_{l,max} = \frac{0,5 \cdot 4}{50 \cdot 0,0010} = 40,00 \text{ cm}$$

2) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz odnosa $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}}$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{235,28}{1045,20} = 0,20 < 0,30$$

$$s_{l,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 44,5 = 33,38 \text{ cm} \\ 30 \text{ cm} \end{array} \right\}$$

Mjerodavna je manja vrijednost od 1) i 2).

Usvojeno: $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

Odabire se minimalna armatura $\phi 8/30 \text{ cm}$.

Proračun poprečne sile $V_{Rd,s}^{min}$ koju nose minimalne spona $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s_{l,max}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 4}{30} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 139,31 \text{ kN}$$

Proračun potrebne poprečne armature

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$$

$$s \leq \frac{A_{sw}^1 \cdot m \cdot z \cdot f_{ywd}}{V_{Ed}} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 4 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48}{235,28} \cdot 1,2 = 17,76 \text{ cm}$$

Usvojeni razmak spona $\phi 8/17 \text{ cm}$.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 4}{17} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 245,84 \text{ kN}$$

$$235,28 \text{ kN} < 245,84 \text{ kN}$$

Odabrana armatura: **ϕ8/17**.

9.8.4. Stup IV/200

$$l_{cl} = 2,7 \text{ m}$$

Armatura:

$$A_{s1} = A_{s2} = 8,04 \text{ cm}^2$$

Proračunska uzdužna sila:

$$N_{Ed1} = -1181,96 \text{ kN}$$

$$N_{Ed2} = -1218,96 \text{ kN}$$

$$A_{s1} = A_{s2} = \omega \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h$$

$$\omega = \frac{A_s}{b \cdot h} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{8,04 \cdot 43,48}{50 \cdot 50 \cdot 2} = 0,0699$$

$$v_{Ed1} = \frac{N_{Ed1}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{-1181,96}{50 \cdot 44,5 \cdot 2,0} = -0,266$$

$$v_{Ed2} = \frac{N_{Ed2}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{-1218,96}{50 \cdot 44,5 \cdot 2,0} = -0,274$$

$$\mu_{Ed} = \mu_{Rd}$$

$$\mu_{Ed,1} = f(\omega, v_{Ed1}) = 0,15$$

$$\mu_{Ed,2} = f(\omega, v_{Ed2}) = 0,15$$

$$M_{Rd1} = M_{Rd2} = M_{Rd}$$

$$M_{Rd} = \mu_{Ed} \cdot b \cdot h^2 \cdot f_{cd} = 0,15 \cdot 50 \cdot 50^2 \cdot 2,0 = 375,00 \text{ kNm}$$

$$\min\left(1; \frac{M^D_{Rd} + M^L_{Rd}}{M^o_{S1CD} + M^u_{S1CD}}\right) = \min\left(1; \frac{139,3 + 206,00}{116,41 + 332,64}\right) = \min(1; 0,77) = 0,77$$

$$M_{1,d} = 1,1 \cdot 375 \cdot 0,77 = 317,63 \text{ kNm}$$

$$M_{2,d} = 1,1 \cdot 375 \cdot 0,77 = 317,63 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed;1,2} = \frac{(M_{1,d} + M_{2,d})}{l_{cl}} = \frac{317,63 + 317,63}{2,7} = 235,28 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti tlačnih štapova

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

Za elemente s vertikalnom poprečnom armaturom ($\alpha = 90^\circ$)

$$v_1 = 0,53$$

$$V_{Rd,max} = \frac{1 \cdot 50 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 0,53 \cdot 2,0}{1,2 + \frac{1}{1,2}} = 1045,20 \text{ kN}$$

$$235,28 \text{ kN} < 1045,20 \text{ kN}$$

→ Nosivost tlačnih štapova zadovoljava.

Proračun minimalne armature:

1) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz uvjeta najmanje poprečne armature

$$s_{l,max} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{b_w \cdot \rho_{w,min}}$$

$$\rho_{w,min} = 0,15 \cdot \frac{2,9}{434,8} = 0,0010$$

Za $\phi 8$: $A_{sw}^1 = 0,5 \text{ cm}^2$ i reznost $m = 4$:

$$s_{l,max} = \frac{0,5 \cdot 4}{50 \cdot 0,0010} = 40,00 \text{ cm}$$

2) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz odnosa $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}}$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{235,28}{1045,20} = 0,23 < 0,30$$

$$s_{l,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 44,5 = 33,38 \text{ cm} \\ 30 \text{ cm} \end{array} \right\}$$

Mjerodavna je manja vrijednost od 1) i 2).

Usvojeno: $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

Odabire se minimalna armatura $\phi 8/30 \text{ cm}$.

Proračun poprečne sile $V_{Rd,s}^{min}$ koju nose minimalne spone $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s_{l,max}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 4}{30} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 139,31 \text{ kN}$$

Proračun potrebne poprečne armature

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$$

$$s \leq \frac{A_{sw}^1 \cdot m \cdot z \cdot f_{ywd}}{V_{Ed}} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 4 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48}{235,28} \cdot 1,2 = 17,76 \text{ cm}$$

Usvojeni razmak spona $\phi 8/17 \text{ cm}$.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 4}{17} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 245,84 \text{ kN}$$

$$235,28 \text{ kN} < 245,84 \text{ kN}$$

Odabrana armatura: **$\phi 8/17$.**

9.8.5. Stup III/300

$$l_{cl} = 2,7 \text{ m}$$

Armatura:

$$A_{s1} = A_{s2} = 8,04 \text{ cm}^2$$

Proračunska uzdužna sila:

$$N_{Ed1} = -334,48 \text{ kN}$$

$$N_{Ed2} = -336,49 \text{ kN}$$

$$A_{s1} = A_{s2} = \omega \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h$$

$$\omega = \frac{A_s}{b \cdot h} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{8,04 \cdot 43,48}{50 \cdot 50 \cdot 2} = 0,0699$$

$$v_{Ed1} = \frac{N_{Ed1}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{-334,48}{50 \cdot 44,5 \cdot 2,0} = -0,075$$

$$v_{Ed2} = \frac{N_{Ed2}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{-336,49}{50 \cdot 44,5 \cdot 2,0} = -0,076$$

$$\mu_{Ed} = \mu_{Rd}$$

$$\mu_{Ed,1} = f(\omega, v_{Ed1}) = 0,1$$

$$\mu_{Ed,2} = f(\omega, v_{Ed2}) = 0,1$$

$$M_{Rd1} = M_{Rd2} = M_{Rd}$$

$$M_{Rd} = \mu_{Ed} \cdot b \cdot h^2 \cdot f_{cd} = 0,1 \cdot 50 \cdot 50^2 \cdot 2,0 = 250,00 \text{ kNm}$$

$$\min\left(1; \frac{M^D_{Rd} + M^L_{Rd}}{M^o_{S1CD} + M^u_{S1CD}}\right) = \min\left(1; \frac{160,29}{116,41}\right) = \min(1; 1,38) = 1$$

$$M_{1,d} = 1,1 \cdot 250 \cdot 1 = 275,00 \text{ kNm}$$

$$M_{2,d} = 1,0 \cdot 250 \cdot 0,77 = 192,50 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed,1,2} = \frac{(M_{1,d} + M_{2,d})}{l_{cl}} = \frac{275 + 192,5}{2,7} = 173,15 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti tlačnih štapova

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

Za elemente s vertikalnom poprečnom armaturom ($\alpha = 90^\circ$)

$$v_1 = 0,53$$

$$V_{Rd,max} = \frac{1 \cdot 50 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 0,53 \cdot 2,0}{1,2 + \frac{1}{1,2}} = 1045,20 \text{ kN}$$

$$173,15 \text{ kN} < 1045,20 \text{ kN}$$

→ Nosivost tlačnih štapova zadovoljava.

Proračun minimalne armature:

1) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz uvjeta najmanje poprečne armature

$$s_{l,max} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{b_w \cdot \rho_{w,min}}$$

$$\rho_{w,min} = 0,15 \cdot \frac{2,9}{434,8} = 0,0010$$

Za $\phi 8$: $A_{sw}^1 = 0,5 \text{ cm}^2$ i reznost $m = 4$:

$$s_{l,max} = \frac{0,5 \cdot 4}{50 \cdot 0,0010} = 40,00 \text{ cm}$$

2) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz odnosa $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}}$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{173,15}{1045,20} = 0,17 < 0,30$$

$$s_{l,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 44,5 = 33,38 \text{ cm} \\ 30 \text{ cm} \end{array} \right\}$$

Mjerodavna je manja vrijednost od 1) i 2).

Usvojeno: $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

Odabire se minimalna armatura $\phi 8/30 \text{ cm}$.

Proračun poprečne sile $V_{Rd,s}^{min}$ koju nose minimalne sponne $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s_{l,max}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 4}{30} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 139,31 \text{ kN}$$

Proračun potrebne poprečne armature

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$$

$$s \leq \frac{A_{sw}^1 \cdot m \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta}{V_{Ed}} = \frac{0,5 \cdot 4 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48}{173,15} \cdot 1,2 = 24,14 \text{ cm}$$

Usvojeni razmak spona $\phi 8/24 \text{ cm}$.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 4}{24} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 174,14 \text{ kN}$$

$$173,15 \text{ kN} < 174,14 \text{ kN}$$

Odabrana armatura: **$\phi 8/24$.**

9.8.6. Stup IV/300

Proračun momenta nosivosti za odabranu armaturu, $M_{Rd,1}$:

$$\omega_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{11,83}{30 \cdot 44,5} \cdot \frac{43,48}{2} = 0,193$$

Za $\omega_1 = 0,195$ očitano je:

$$\zeta = 0,900$$

$$M_{Rd,1} = \zeta \cdot d \cdot f_{yd} \cdot A_{s1} = 0,900 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 11,83 = 206,00 \text{ kNm}$$

$$l_{cl} = 2,7 \text{ m}$$

Armatura:

$$A_{s1} = A_{s2} = 8,04 \text{ cm}^2$$

Proračunska uzdužna sila:

$$N_{Ed1} = -621,29 \text{ kN}$$

$$N_{Ed2} = -648,29 \text{ kN}$$

$$A_{s1} = A_{s2} = \omega \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h$$

$$\omega = \frac{A_s}{b \cdot h} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{8,04 \cdot 43,48}{50 \cdot 50 \cdot 2} = 0,0699$$

$$v_{Ed1} = \frac{N_{Ed1}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{-621,29}{50 \cdot 44,5 \cdot 2,0} = -0,139$$

$$v_{Ed2} = \frac{N_{Ed2}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{-648,29}{50 \cdot 44,5 \cdot 2,0} = -0,146$$

$$\mu_{Ed} = \mu_{Rd}$$

$$\mu_{Ed,1} = f(\omega, v_{Ed1}) = 0,12$$

$$\mu_{Ed,2} = f(\omega, v_{Ed2}) = 0,12$$

$$M_{Rd1} = M_{Rd2} = M_{Rd}$$

$$M_{Rd} = \mu_{Ed} \cdot b \cdot h^2 \cdot f_{cd} = 0,12 \cdot 50 \cdot 50^2 \cdot 2,0 = 300,00 \text{ kNm}$$

$$\min\left(1; \frac{M^D_{Rd} + M^L_{Rd}}{M^o_{S1CD} + M^u_{S1CD}}\right) = \min\left(1; \frac{206}{116,41}\right) = \min(1; 1,76) = 1$$

$$M_{1,d} = 1,1 \cdot 300 \cdot 1 = 300,00 \text{ kNm}$$

$$M_{2,d} = 1,0 \cdot 300 \cdot 0,77 = 231,00 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed,1,2} = \frac{(M_{1,d} + M_{2,d})}{l_{cl}} = \frac{300 + 231}{2,7} = 196,67 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti tlačnih štapova

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

Za elemente s vertikalnom poprečnom armaturom ($\alpha = 90^\circ$)

$$v_1 = 0,53$$

$$V_{Rd,max} = \frac{1 \cdot 50 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 0,53 \cdot 2,0}{1,2 + \frac{1}{1,2}} = 1045,20 \text{ kN}$$

$$177 \text{ kN} < 1045,20 \text{ kN}$$

→ Nosivost tlačnih štapova zadovoljava.

Proračun minimalne armature:

1) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz uvjeta najmanje poprečne armature

$$s_{l,max} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{b_w \cdot \rho_{w,min}}$$

$$\rho_{w,min} = 0,15 \cdot \frac{2,9}{434,8} = 0,0010$$

Za $\phi 8$: $A_{sw}^1 = 0,5 \text{ cm}^2$ i reznost $m = 4$:

$$s_{l,max} = \frac{0,5 \cdot 4}{50 \cdot 0,0010} = 40,00 \text{ cm}$$

2) Najveći uzdužni razmak poprečne armature $s_{l,max}$ iz odnosa $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}}$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{196,67}{1045,20} = 0,19 < 0,30$$

$$s_{l,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 44,5 = 33,38 \text{ cm} \\ 30 \text{ cm} \end{array} \right\}$$

Mjerodavna je manja vrijednost od 1) i 2).

Usvojeno: $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

Odabire se minimalna armatura $\phi 8/30 \text{ cm}$.

Proračun poprečne sile $V_{Rd,s}^{min}$ koju nose minimalne spone $s_{l,max} = 30 \text{ cm}$

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s_{l,max}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 4}{30} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 139,31 \text{ kN}$$

Proračun potrebne poprečne armature

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$$

$$s \leq \frac{A_{sw}^1 \cdot m \cdot z \cdot f_{ywd}}{V_{Ed}} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 4 \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48}{196,67} \cdot 1,2 = 21,25 \text{ cm}$$

Usvojeni razmak spona $\phi 8/21 \text{ cm}$.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{0,5 \cdot 4}{21} \cdot 0,9 \cdot 44,5 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 199,01 \text{ kN}$$

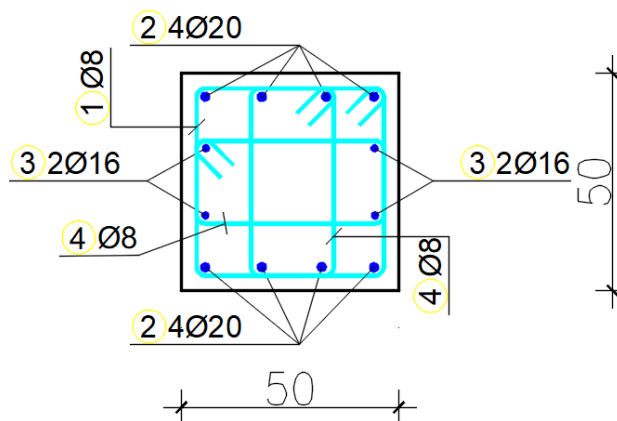
$$196,67 \text{ kN} < 199,01 \text{ kN}$$

Odabrana armatura: $\phi 8/21$.

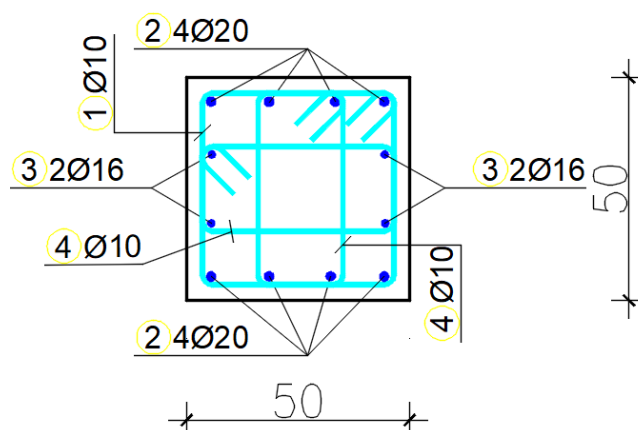
9.9. Raspodjela armature u stupovima

Na Slikama 83 i 84 nalazi se raspodjela uzdužne armature u stupovima.

STUPOVI POZ. III/200, III/300, IV/200, IV/300



Slika 83: Raspodjela uzdužne armature u stupovima POZ. III/200, III/300, IV/200, IV/300 [izradió autor]

STUPOVI POZ. III/100, IV/100

Slika 84: Raspodjela uzdužne armature u stupovima POZ. III/100, IV/100 [izradio autor]

9.10. Kritično područje stupa

Kritičnim područjem stupa smatra se područje do udaljenosti l_{cr} od oba kraja stupa. [24]

Za razred duktilnosti DCM određuje se prema izrazu (96):

$$l_{cr} = \max \left\{ \begin{array}{l} h_c \\ \frac{l_{cl}}{6} \\ 0,45 \text{ m} \end{array} \right. \quad (96)$$

gdje su:

h_c – najveća izmjera presjeka stupa

l_{cl} – svijetla duljina stupa

Za slučaj kada je $\frac{l_{cl}}{h_c} < 3$, cijela visina stupa postaje kritično područje te se u skladu s tim i armira.

Ukupni koeficijent uzdužnog armiranja ρ_l mora biti vrijednost između (97):

$$0,01 < \rho_l < 0,04 \quad (97)$$

U simetričnim presjecima predviđena je simetrična armatura ($\rho = \rho'$). Kako bi se povećala cjelovitost čvora greda – stup, potrebno je predvidjeti najmanje jednu međušipku između šipki u kutovima na svakoj stranici stupa.

Bezdimenzijska uzdužna sila, v_d za DCM mora imati manju vrijednost od (98)

$$v_d < 0,65 \quad (98)$$

Uvjeti koje trebaju zadovoljiti spona u kritičnom području [7]:

- kako bi se osigurala najmanja duktilnost i spriječilo lokalno izvijanje, najmanja vrijednost promjera spona mora biti 6 mm na razmacima s
- oblik spona potrebno je odabrati tako da poboljša svojstva presjeka zbog troosnog stanja naprezanja koje prouzrokuju spona

Maksimalni razmak između susjednih uzdužnih šipki pridržanih sponama za DCM:

$$s_{max} = 200 \text{ mm}$$

Razmak spona u kritičnom području (DCM) određuje se prema (99):

$$s = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{b_0}{2} \\ 175 \text{ mm} \\ 8 \cdot d_{bL} \end{array} \right. \quad (99)$$

pri čemu su:

b_0 – najmanja izmjera betonske jezgre

d_{bL} – najmanji promjer uzdužne armature

Izvan kritičnog područja, ali u području prijeklopa, minimalna razmak spona iznosi (100)

$$s = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{h}{4} \\ 100 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (100)$$

h - visina presjeka

Razmak na preostaloj duljini stupa određuje se prema (101):

$$s_{max} = 12 \cdot d_{bl,min} \quad (101)$$

$d_{bl,min}$ – najmanji promjer uzdužne šipke

POZICIJA 100

S obzirom da je u svim stupovima predviđena poprečna armatura $\Phi 10$, duljina kritičnog područje prema (96) iznosi:

$$l_{cr} = \max \left\{ \begin{array}{l} h_c \\ \frac{l_{cl}}{6} \\ 0,45 \text{ m} \end{array} \right. = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \text{ m} \\ \frac{3,25}{6} = 0,54 \text{ m} \\ 0,45 \text{ m} \end{array} \right. = 0,55 \text{ m} = 55 \text{ cm}$$

Minimalni razmak poprečne armature prema (99):

$$s = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{b_0}{2} = \frac{43,4}{2} = 217 \text{ mm} \\ 175 \text{ mm} \\ 8 \cdot d_{bL} = 8 \cdot 16 = 128 \text{ mm} \end{array} \right. = 128 \text{ mm} = 12,8 \text{ cm}$$

Odabrana poprečna armatura: $\Phi 10/10$ cm na $l_{cr} = 55$ cm.

Izvan kritičnog područja, ali u području preklopa razmak s određuje se prema (100):

$$s = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{h}{4} = \frac{50}{4} = 125,00 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} \end{array} \right. = 100 \text{ mm} = 10 \text{ cm}$$

Odabrana poprečna armatura: $\Phi 8/10$ cm.

Maksimalni razmak na preostaloj duljini stupa određuje se prema (101):

$$s_{max} = 12 \cdot d_{bl,min} = 12 \cdot 1,6 = 19,2 \text{ cm.}$$

Odabrana poprečna armatura: $\Phi 8/19$ cm.

Za $T_1 \geq T_c$, koeficijent duktilnosti s obzirom na zakrivljenost izračunava se prema izrazu (102):

$$T_1 \geq T_c \rightarrow 0,76 s > 0,4 s$$

$$\mu_\phi = 2 \cdot q_0 - 1 \quad (102)$$

q_0 – osnovna vrijednost faktora ponašanja

T_1 – osnovna vrijednost perioda vibracija konstrukcije

T_c – period na gornjoj granici spektra

$$\mu_\phi = 2 \cdot q_0 - 1 = 2 \cdot 3,9 - 1 = 6,8$$

U kritičnim područjima s uzdužnom armaturom od čelika razreda B, faktor duktilnosti s obzirom na zakrivljenost mora biti najmanje 1,5 puta veći (103):

$$\mu_\phi = 1,5 \cdot (2 \cdot q_0 - 1) \quad (103)$$

$$\mu_\phi = 1,5 \cdot (2 \cdot q_0 - 1) = 1,5 \cdot (2 \cdot 3,9 - 1) = 10,20$$

Potrebno je zadovoljiti sljedeći izraz (104):

$$\alpha \cdot \omega_{wd} \geq 30 \cdot \mu_\phi \cdot v_d \cdot \varepsilon_{sy,d} \cdot \frac{b_c}{b_0} - 0,035 \quad (104)$$

α – faktor djelotvornosti za pravokutni presjek, izračunava se prema (105):

$$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s \quad (105)$$

$$\alpha_n = 1 - \sum_n \frac{b_i^2}{6 \cdot b_0 \cdot h_0}$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2 \cdot b_0}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{2 \cdot h_0}\right)$$

n – ukupan broj šipki uzdužne armature ovijen sponama

b_i – razmak između susjednih ovijenih šipki uzdužne armature

b_0 – širina ovijene jezgre

h_0 – visina ovijene jezgre

b_c – širina poprečnog presjeka

ω_{wd} – mehanički volumenski omjer spona unutar kritičnog područja

$$\alpha_n = 1 - \sum_n \frac{b_i^2}{6 \cdot b_0 \cdot h_0} = 1 - \frac{12 \cdot 13,0^2}{6 \cdot 42,0 \cdot 42,0} = 0,80$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2 \cdot b_0}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{2 \cdot h_0}\right) = \left(1 - \frac{10}{2 \cdot 42,0}\right) \cdot \left(1 - \frac{10}{2 \cdot 42,0}\right) = 0,78$$

$$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s = 0,80 \cdot 0,78 = 0,68$$

Mehanički koeficijent armiranja

$$\omega_{wd} = \frac{\text{volumen ovijenih spona}}{\text{volumen betonske jezgre}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$$

$$\omega_{wd} = \frac{496 \cdot 0,79}{42 \cdot 42 \cdot 10} \cdot \frac{43,48}{2,0} = 0,48$$

$$\omega_{wd} \geq \omega_{wd,lim}$$

$$0,48 > 0,08 \rightarrow \text{ZADOVOLJAVA!}$$

v_d – normalizirana proračunska osna sila:

$$v_d = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}}$$

Vrijednost normalizirane proračunske sile iznosi:

$$v_d = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{1810,7}{2500 \cdot 2} = 0,36 < 0,65$$

$$\alpha \cdot \omega_{wd} \geq 30 \cdot \mu_\phi \cdot v_d \cdot \varepsilon_{sy,d} \cdot \frac{b_c}{b_0} - 0,035$$

$$0,68 \cdot 0,48 \geq 30 \cdot 10,20 \cdot 0,36 \cdot 0,002174 \cdot \frac{50}{42} - 0,035$$

$$0,32 > 0,25 \rightarrow \text{ZADOVOLJAVA!}$$

POZICIJA 200 i 300

S obzirom da je u ovim stupovima predviđena poprečna armatura $\Phi 8$, duljina kritičnog područje prema (96) iznosi:

$$l_{cr} = \max \left\{ \begin{array}{l} h_c \\ \frac{l_{cl}}{6} \\ 0,45 \text{ m} \end{array} \right. = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \text{ m} \\ \frac{2,7}{6} = 0,45 \text{ m} \\ 0,45 \text{ m} \end{array} \right. = 0,45 \text{ m} = 45 \text{ cm}$$

Minimalni razmak poprečne armature prema (99):

$$s = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{b_0}{2} = \frac{430}{2} = 215 \text{ mm} \\ 175 \text{ mm} \\ 8 \cdot d_{bl} = 8 \cdot 16 = 128 \text{ mm} \end{array} \right. = 128 \text{ mm} = 12,8 \text{ cm}$$

Odabrana poprečna armatura: $\Phi 8/10$ cm na $l_{cr} = 45$ cm.

Izvan kritičnog područja, ali u području preklopa razmak s određuje se prema (100):

$$s = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{h}{4} = \frac{50}{4} = 125,00 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} \end{array} \right. = 100 \text{ mm} = 10 \text{ cm}$$

Odabrana poprečna armatura: $\Phi 8/10$ cm.

Maksimalni razmak na preostaloj duljini stupa određuje se prema (101):

$$s_{max} = 12 \cdot d_{bl,min} = 12 \cdot 1,6 = 19,2 \text{ cm.}$$

Odabrana poprečna armatura: $\Phi 8/19$ cm.

$$\alpha_n = 1 - \sum_n \frac{b_i^2}{6 \cdot b_0 \cdot h_0} = 1 - \frac{12 \cdot 13,3^2}{6 \cdot 42,2 \cdot 4,2} = 0,80$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2 \cdot b_0}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{2 \cdot h_0}\right) = \left(1 - \frac{10}{2 \cdot 42,2}\right) \cdot \left(1 - \frac{10}{2 \cdot 42,2}\right) = 0,77$$

$$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s = 0,8 \cdot 0,77 = 0,62$$

Mehanički koeficijent armiranja

$$\omega_{wd} = \frac{\text{volumen ovijenih spona}}{\text{volumen betonske jezgre}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$$

$$\omega_{wd} = \frac{496 \cdot 0,5}{42,2 \cdot 42,2 \cdot 10} \cdot \frac{43,48}{2,0} = 0,30$$

$$\omega_{wd} \geq \omega_{wd,lim}$$

$$0,30 > 0,08 \rightarrow \text{ZADOVOLJAVA!}$$

v_d – normalizirana proračunska osna sila:

$$v_d = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}}$$

Vrijednost normalizirane proračunske sile iznosi:

$$v_d = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{1218,3}{2500 \cdot 2} = 0,24 < 0,65$$

$$\alpha \cdot \omega_{wd} \geq 30 \cdot \mu_\phi \cdot v_d \cdot \varepsilon_{sy,d} \cdot \frac{b_c}{b_0} - 0,035$$

$$0,62 \cdot 0,30 \geq 30 \cdot 10,20 \cdot 0,24 \cdot 0,002174 \cdot \frac{50}{42,2} - 0,035$$

$$0,186 > 0,16 \rightarrow \text{ZADOVOLJAVA!}$$

10. METODA POSTUPNOG GURANJA

Kako bi se smanjile velike rezerve kod nosivosti stupova i greda, metodom bočnih sila svi elementi su racionalnije dimenzionirani te je ponovljeni proračun metodom postupnog guranja s reduciranom armaturom.

Nove količine armature prikazane su u Tablici 26 (armatura stupova), Tablici 27 (uzdužna armatura grede) i Tablici 28 (poprečna armatura grede). Narančasto osjenčano je armatura korištena u *SeismoStructu* s obzirom da softver nema mogućnost korištenja različitih vrijednosti armatura. Nastavno na prethodnu izjavu, poprečni presjek grede ima različitu količinu uzdužne armature na vanjskom osloncu, na unutarnjem osloncu i u polju, dok se razmak poprečne armature razlikuje na duljini kritičnog područja i na preostaloj duljini grede. Što se tiče stupova, oni imaju jednaku količinu uzdužne armature po cijeloj duljini, no razlika je u razmaku poprečne armature u kritičnom području stupa te u preostaloj duljini stupa. Dakle, u *SeismoStructu* moguće je koristiti samo jedan poprečni presjek te za njega definirati raspored armature. Razlike u količinama armature nisu velike, stoga je korištena veća vrijednost armature.

Tablica 26. Armatura stupova

STUPOVI				
POZICIJA	UZDUŽNA ARMATURA	POPREČNA ARMATURA	KRITIČNO PODRUČJE	
III/300	2x4Φ20+2x2Φ16*	Φ8/19 cm	l=45 cm	Φ8/10 cm
IV/300	2x4Φ20+2x2Φ16*	Φ8/19 cm	l=45 cm	Φ8/10 cm
III/200	2x4Φ20+2x2Φ16*	Φ8/17 cm	l=55 cm	Φ8/10 cm
IV/200	2x4Φ20+2x2Φ16*	Φ8/17 cm	l=55 cm	Φ8/10 cm
III/100	2x4Φ20+2x2Φ16*	Φ10/19 cm	l=55 cm	Φ10/10 cm
IV/100	2x4Φ20+2x2Φ16*	Φ10/19 cm	l=55 cm	Φ10/10 cm

*na bočnim stranama stupa

Tablica 27. Uzdužna armatura grede

GREDE - UZDUŽNA ARMATURA			
POZICIJA	VANJSKI OSOLONAC		
	Armatura gornja zona	Armatura donja zona	Ploština presjeka armature
311-311	4Φ16+2Φ8	3Φ14	13,67 cm ²
215-215	2Φ25	5Φ14	20 cm ²
115-115	2Φ25+3Φ12	3Φ20	22,63 cm ²
POZICIJA	UNUTARNJI OSOLONAC		
	Armatura gornja zona	Armatura donja zona	Ploština presjeka armature
311-311	2Φ25+1Φ16	/	11,83 cm ²
215-215	2Φ25+Φ16	5Φ14	19,53 cm ²
115-115	2Φ25+2Φ16	3Φ20	23,09 cm ²
POZICIJA	POLJE		Ploština presjeka armature
	Armatura		
311-311	4Φ14		6,16 cm ²
215-215	5Φ12		5,36 cm ²
115-115	5Φ12		5,36 cm ²

Tablica 28. Poprečna armatura grede

GREDE			
POZICIJA	POPREČNA ARMATURA	KRITIČNO PODRUČJE	
III/300	Φ8/13 cm	l=50 cm	Φ8/11 cm
IV/300	Φ8/14 cm	l=50 cm	Φ8/11 cm
III/200	Φ8/13 cm	l=50 cm	Φ8/12 cm (V) Φ8/9 cm (U)

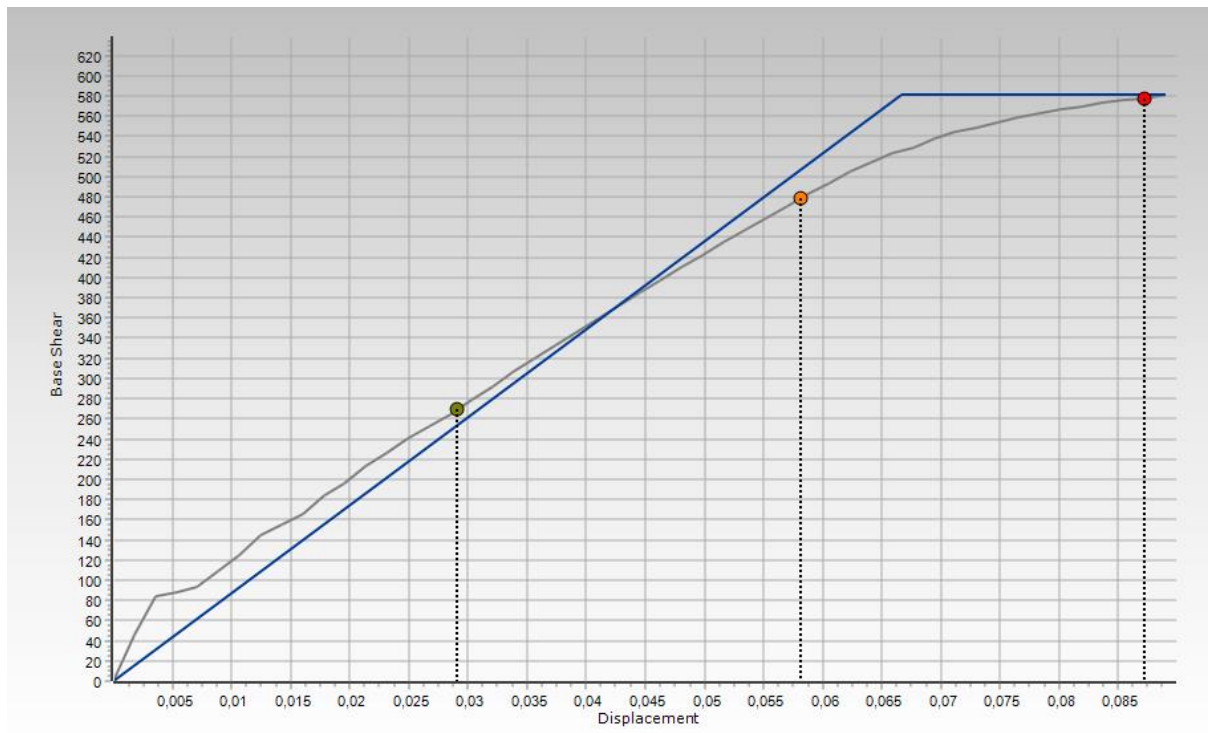
V – vanjski oslonac, U – unutarnji oslonac

10.1. Rezultati proračuna

Rezultati proračuna provedenog metodom postupnog guranja prikazani su u nastavku.

Na Slici 85 nalazi se krivulja sposobnosti nosivosti sa graničnim stanjima OO, ZO i BR (s lijeva na desno), označeni kružićem. Deformiranje započinje linearno, no kod vrijednosti sile od 84 kN naglo se gubi krutost zbog početka raspucavanja. Vrijednost poprečne sile je 581,10 kN s vrijednošću ciljanog pomaka 0,087 m. Konstrukcija nije prešla u stanje

formiranja plastičnog mehanizma. Na Slici 86 prikazani su ciljani pomaci za svako granično stanje.

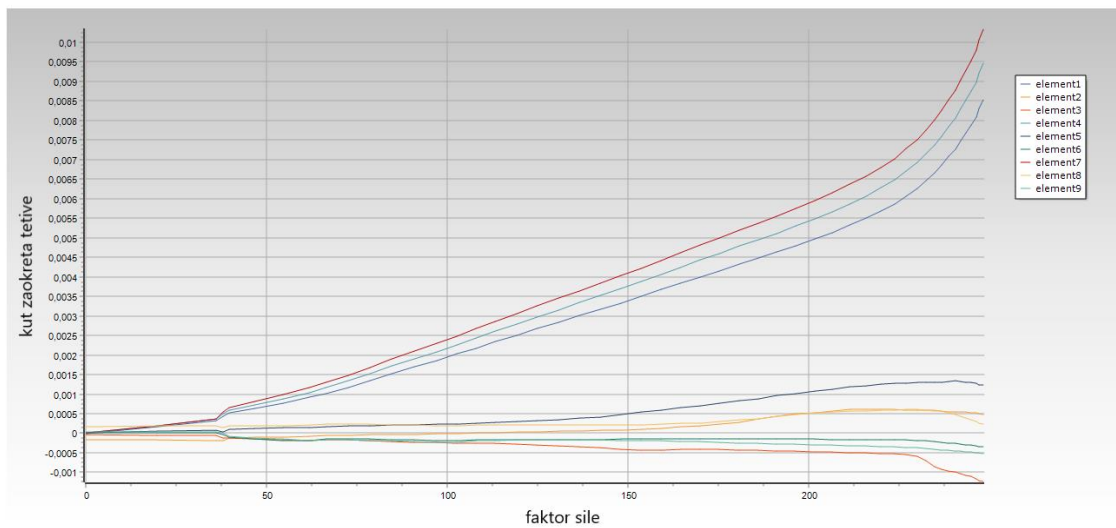


Slika 85: Krivulja sposobnosti po graničnim stanjima

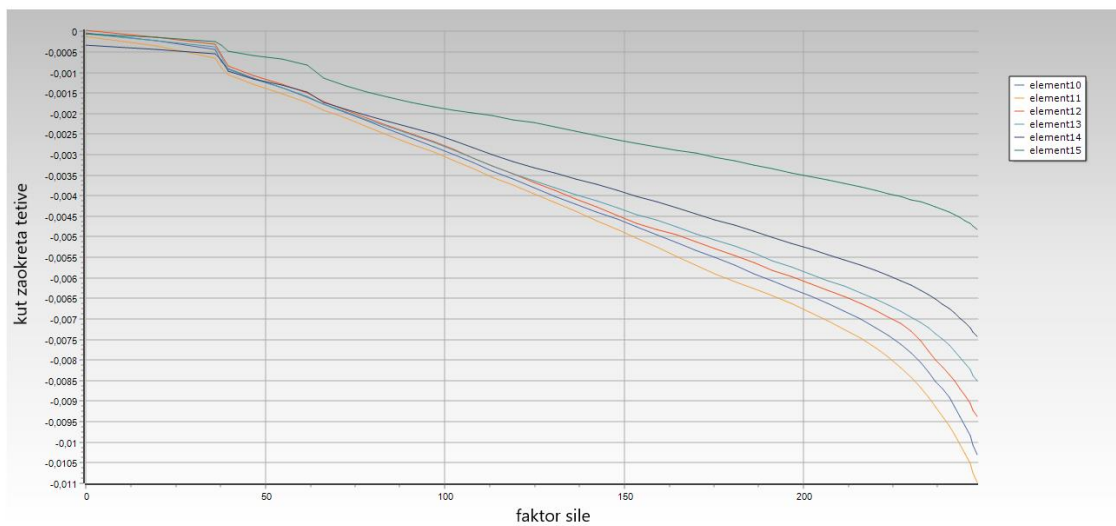
Target Displacement	
Damage Limitation (DL)	0,02907469
Significant Damage (SD)	0,05814937
Near Collapse (NC)	0,08722406

Slika 86: Vrijednosti pomaka po graničnim stanjima

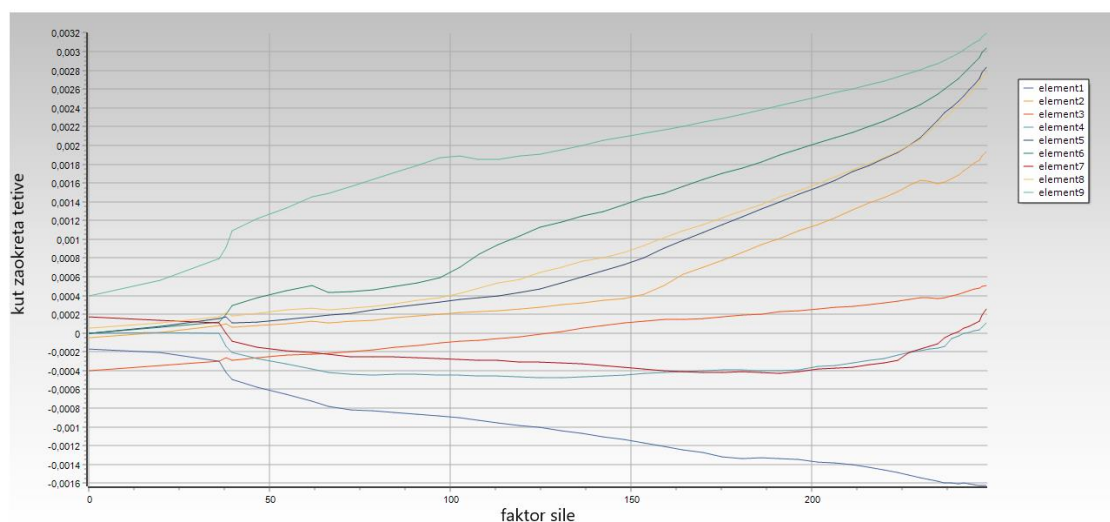
Na grafu 18 prikazan je odnos kuta zaokreta tetive stupova (elementi 1 - 9), a na grafu 19 za grede (elementi 10 – 14) s obzirom na opterećenje (silu) koja se povećavala svakim korakom tijekom provedbe metode postupnim guranjem u položaju A. Isto to prikazano je na grafu 20 (stupovi) i grafu 21 (grede) u položaju B.



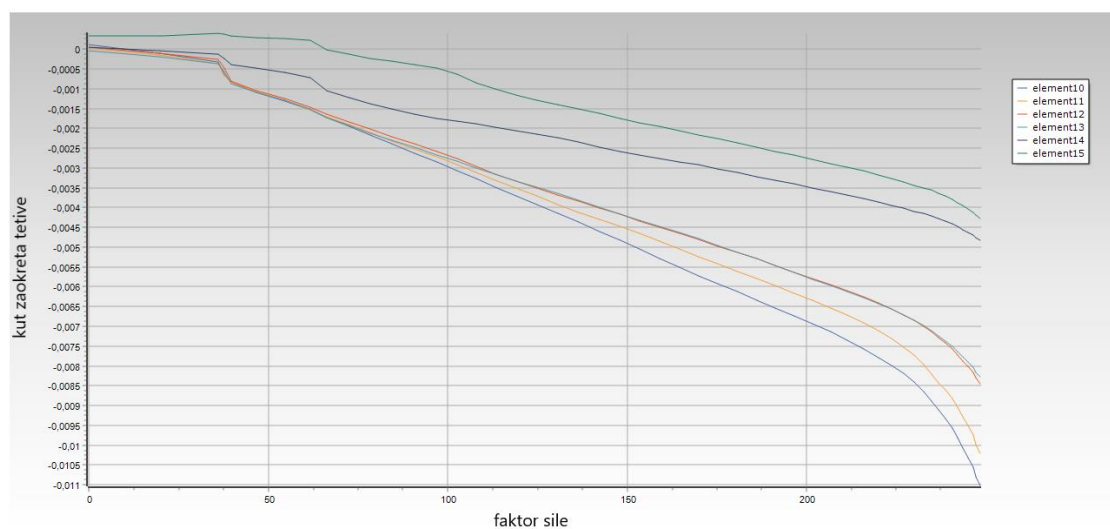
Graf 18: Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u stupovima, položaj A



Graf 19: Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u gredama, položaj A



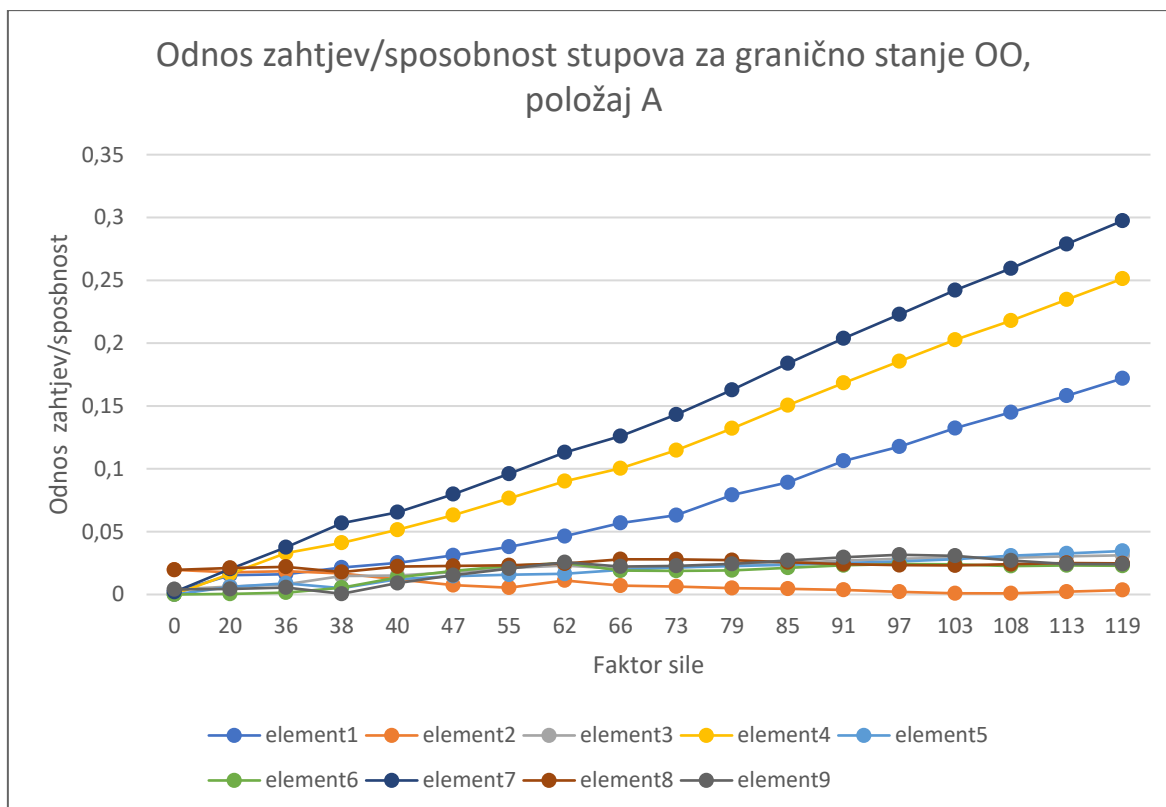
Graf 20: Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u stupovima, položaj B



Graf 21: Ovisnost kut zaokreta - faktor sile u gredama, položaj B

GRANIČNO STANJE OGRANIČENOG OŠTEĆENJA

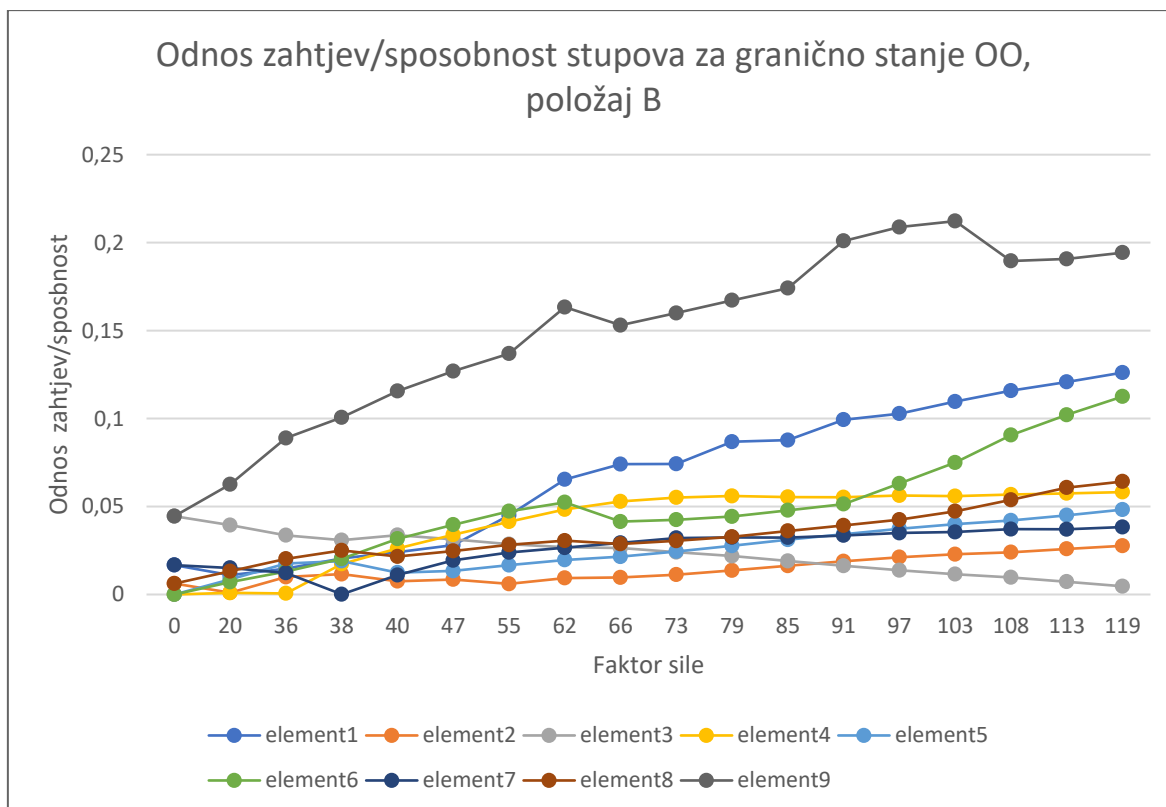
Na grafovima 22 i 23 prikazan je odnos zahtjev/sposobnost deformiranja čvorova stupova konstrukcije za granično stanje ograničenog oštećenja. Vrijednosti odnosa zahtjeva i sposobnosti za iznos sile 273,87 kN koja odgovara zahtijevanom pomaku od 0,029 m za granično stanje ograničenog oštećenja, izražene u %, prikazane su u Tablicama 29 i 30. Grafovi 24 i 25 te Tablice 31 i 32 prikazuju iste parametre, samo za grede.



Graf 22: Odnos zahtjev/spособnost stupova za granično stanje OO, položaj A

Tablica 29: Odnos zahtjev/spособnost [%] stupova za granično stanje OO,
položaj A

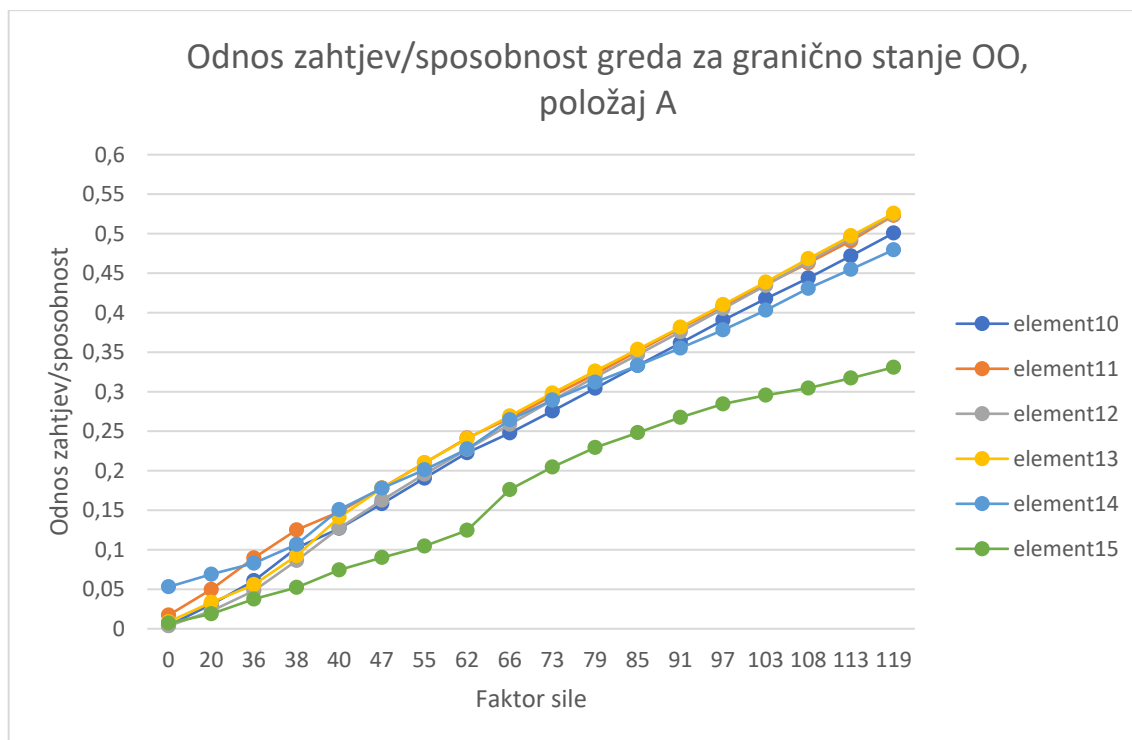
ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 1	17,20
ELEMENT 2	0,35
ELEMENT 3	3,12
ELEMENT 4	25,13
ELEMENT 5	3,46
ELEMENT 6	2,28
ELEMENT 7	29,74
ELEMENT 8	2,48
ELEMENT 9	2,42



Graf 23: Odnos zahtjev/spособnost stupova za granično stanje OO, položaj B

Tablica 30: Odnos zahtjev/spособnost [%] stupova za granično stanje OO,
položaj B

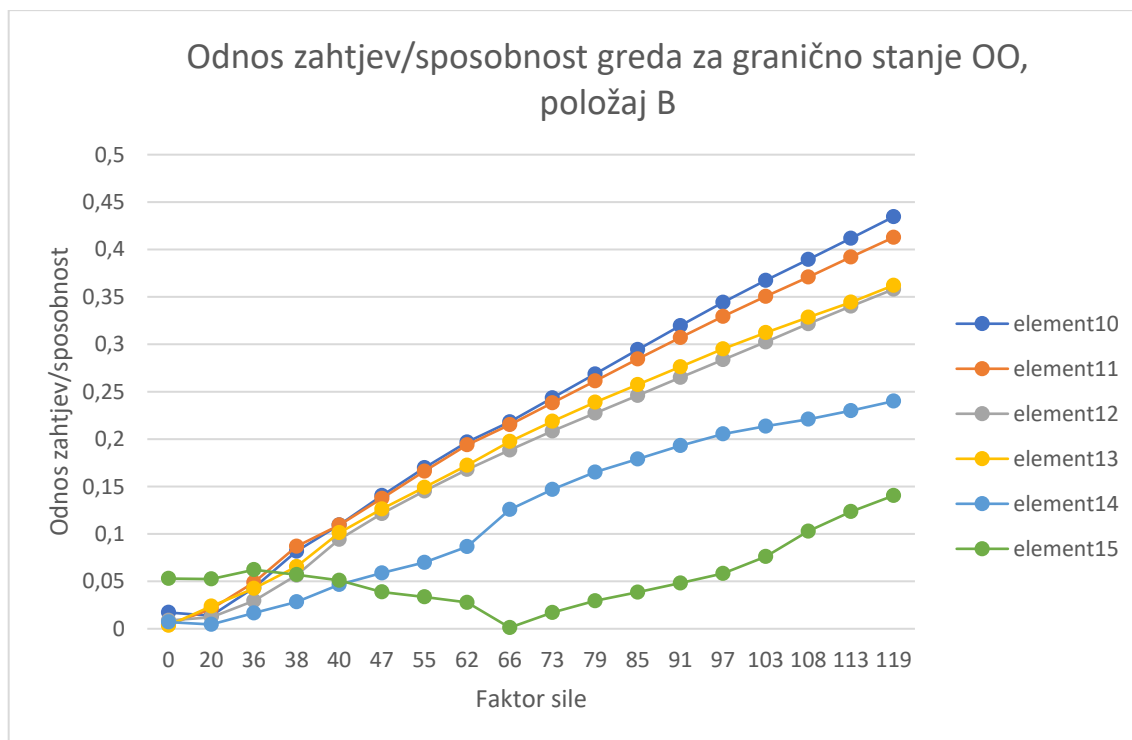
ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 1	12,61
ELEMENT 2	2,77
ELEMENT 3	0,47
ELEMENT 4	5,82
ELEMENT 5	4,82
ELEMENT 6	11,25
ELEMENT 7	3,83
ELEMENT 8	6,42
ELEMENT 9	19,43



Graf 24: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje OO, položaj A

Tablica 31: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje OO,
položaj A

ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 10	50,07
ELEMENT 11	52,31
ELEMENT 12	52,41
ELEMENT 13	52,56
ELEMENT 14	47,96
ELEMENT 15	33,09



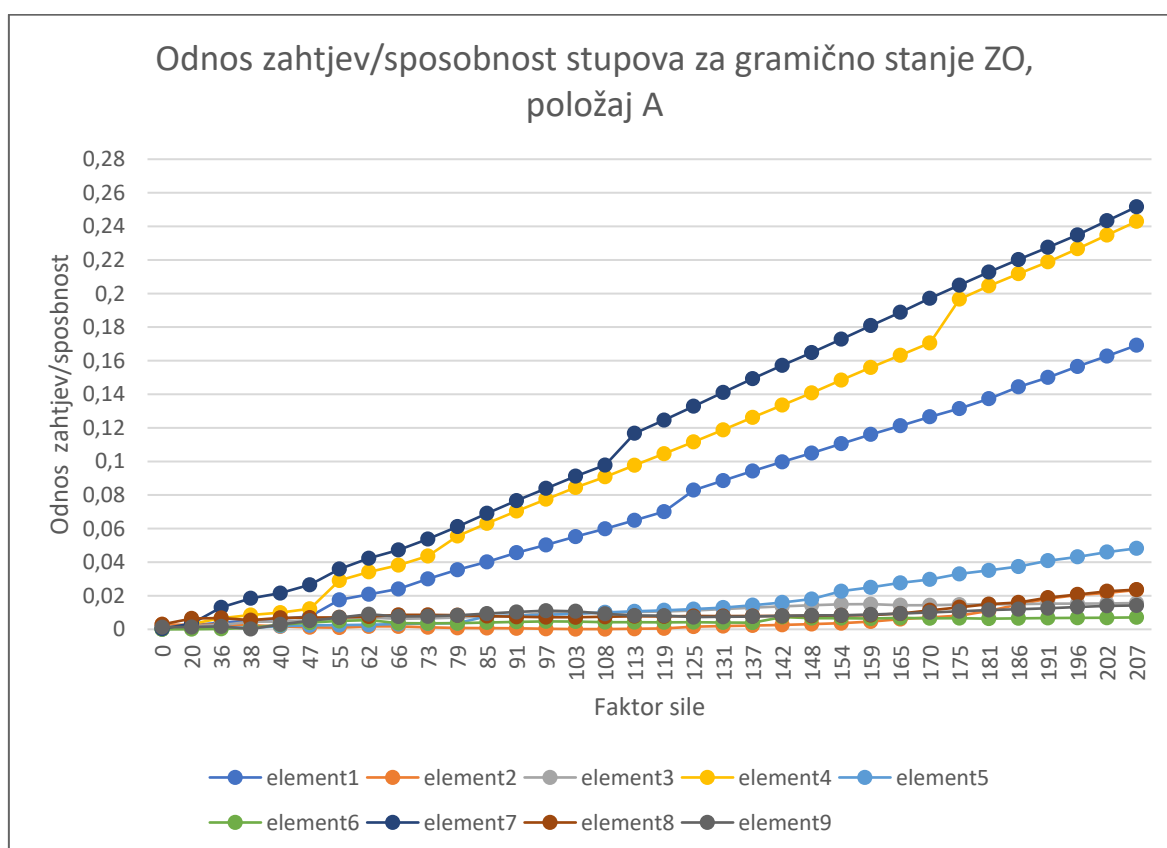
Graf 25: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje OO, položaj B

Tablica 32: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje OO, položaj B

ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 10	43,45
ELEMENT 11	41,28
ELEMENT 12	35,81
ELEMENT 13	36,22
ELEMENT 14	24,01
ELEMENT 15	14,05

GRANIČNO STANJE ZNATNOG OŠTEĆENJA

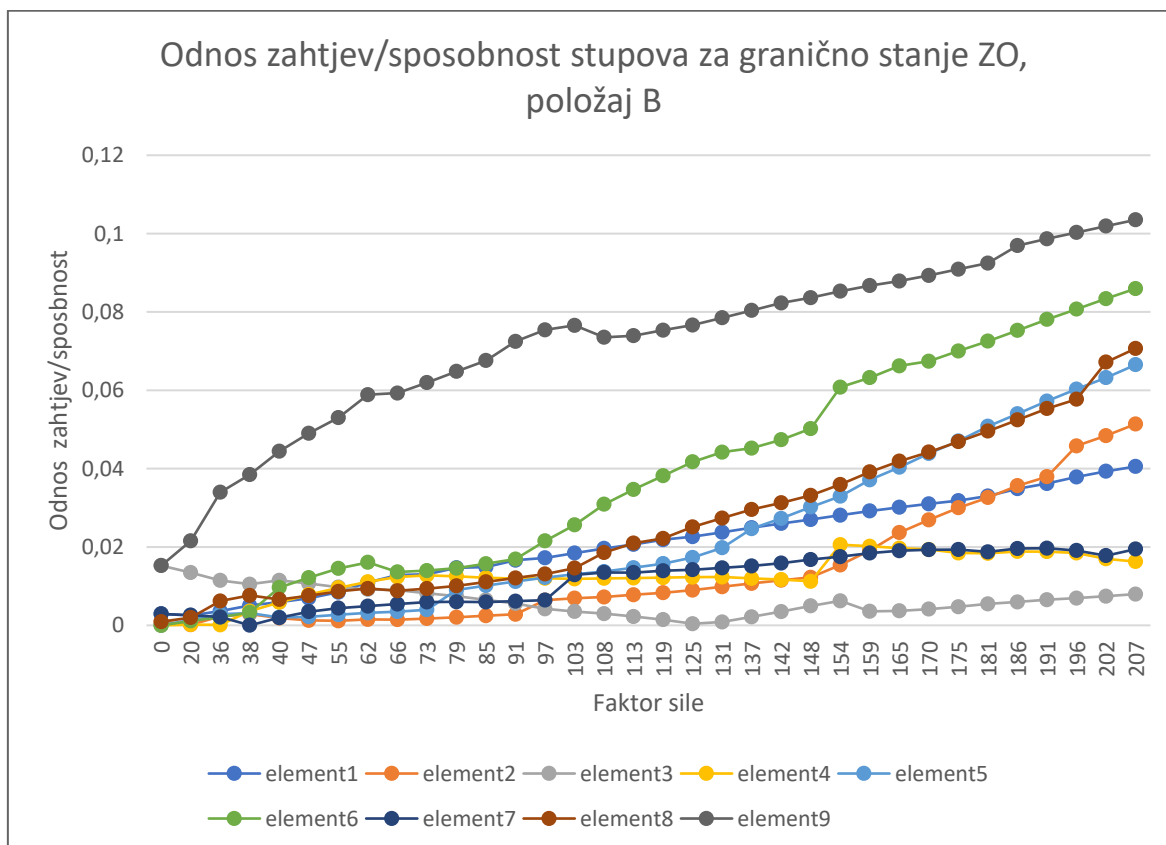
Na grafovima 26 i 27 prikazan je odnos zahtjev/sposobnost deformiranja čvorova stupova konstrukcije za granično stanje znatnog oštećenja. Vrijednosti odnosa zahtjeva i sposobnosti za iznos sile 483,11 kN koja odgovara zahtijevanom pomaku od 0,058 m za granično stanje znatnog oštećenja, izražene u %, prikazane su u Tablicama 33 i 34. Grafovi 28 i 29 te Tablice 35 i 36 prikazuju iste parametre, samo za grede.



Graf 26: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje ZO, položaj A

Tablica 33: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje ZO, položaj A

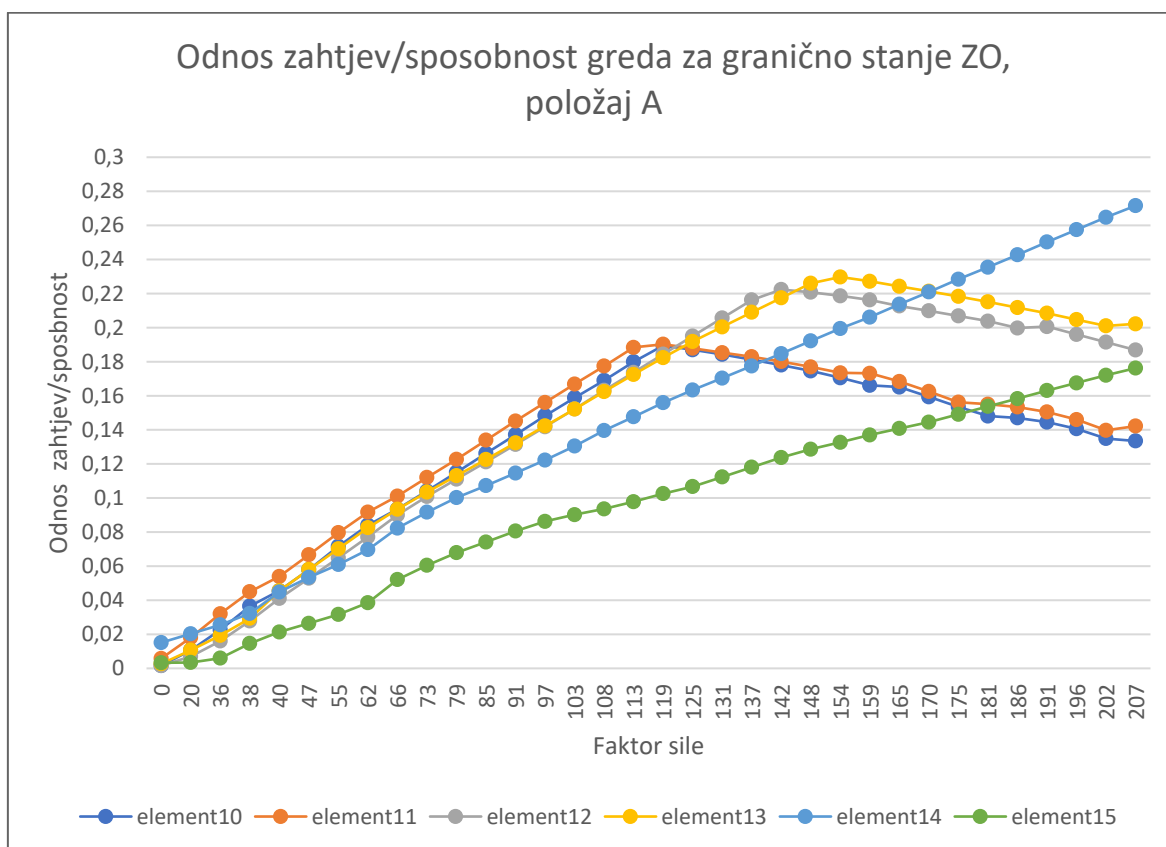
ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 1	16,92
ELEMENT 2	2,34
ELEMENT 3	1,56
ELEMENT 4	24,30
ELEMENT 5	4,82
ELEMENT 6	0,71
ELEMENT 7	25,17
ELEMENT 8	2,37
ELEMENT 9	1,42



Graf 27: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje ZO, položaj B

Tablica 34: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje ZO, položaj B

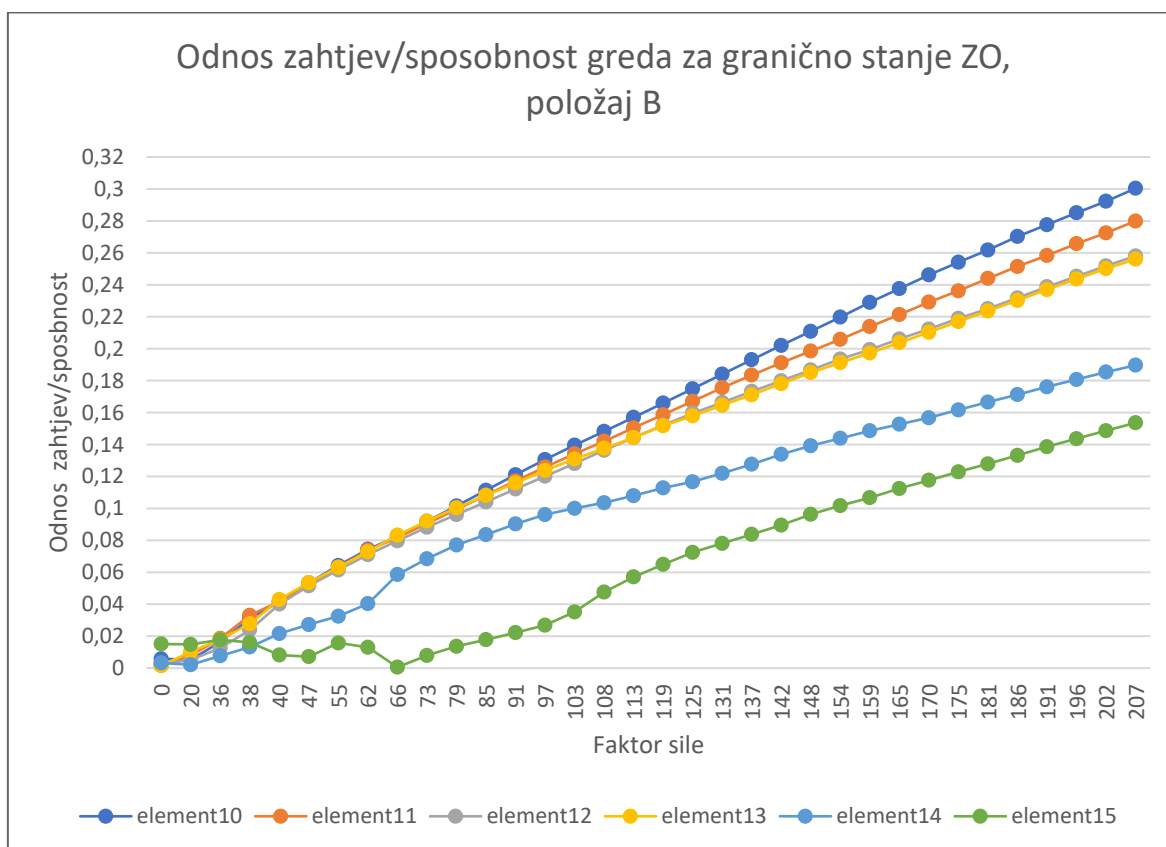
ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 1	4,06
ELEMENT 2	5,14
ELEMENT 3	0,80
ELEMENT 4	1,63
ELEMENT 5	6,65
ELEMENT 6	8,60
ELEMENT 7	1,95
ELEMENT 8	7,07
ELEMENT 9	10,35



Graf 28: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje ZO, položaj A

Tablica 35: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje ZO, položaj A

ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 10	13,35
ELEMENT 11	14,22
ELEMENT 12	18,68
ELEMENT 13	20,22
ELEMENT 14	27,16
ELEMENT 15	17,62



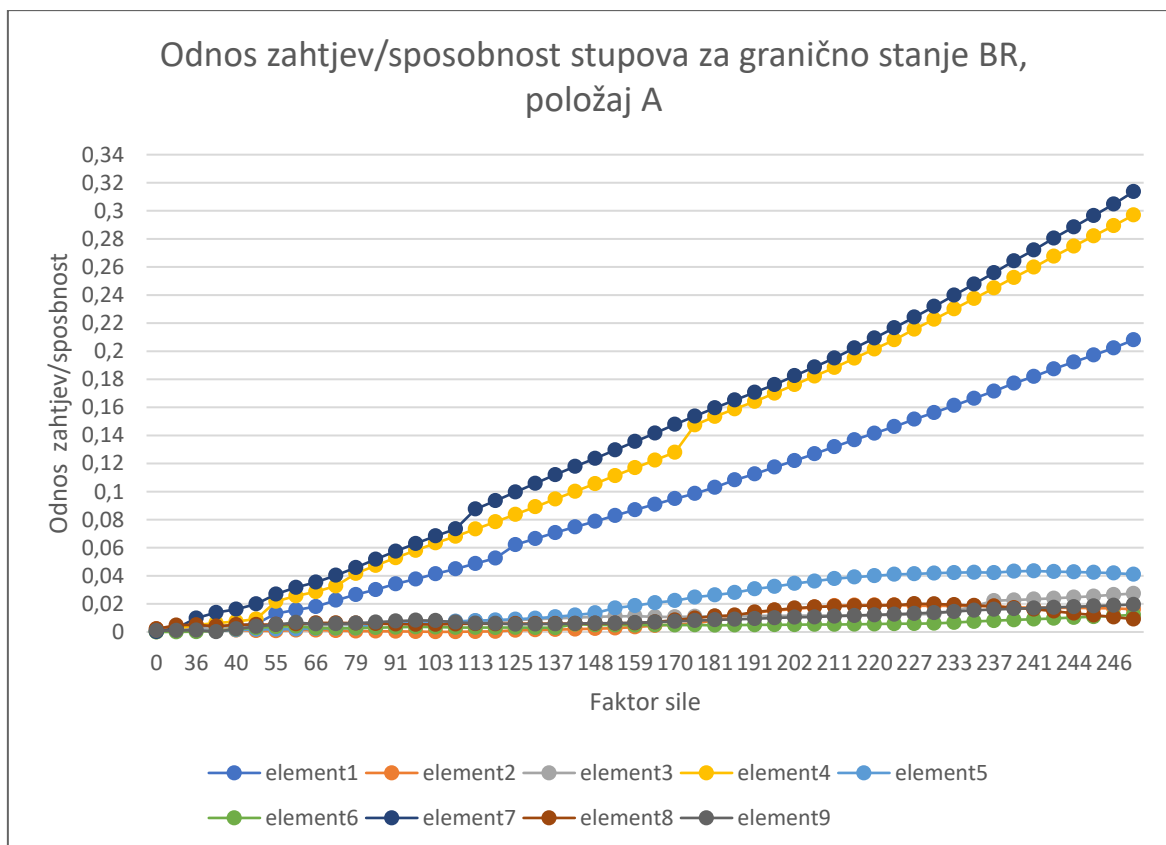
Graf 29: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje ZO, položaj B

Tablica 36: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje ZO, položaj B

ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 10	30,04
ELEMENT 11	27,99
ELEMENT 12	25,81
ELEMENT 13	25,60
ELEMENT 14	18,97
ELEMENT 15	15,36

GRANIČNO STANJE BLIZU RUŠENJA

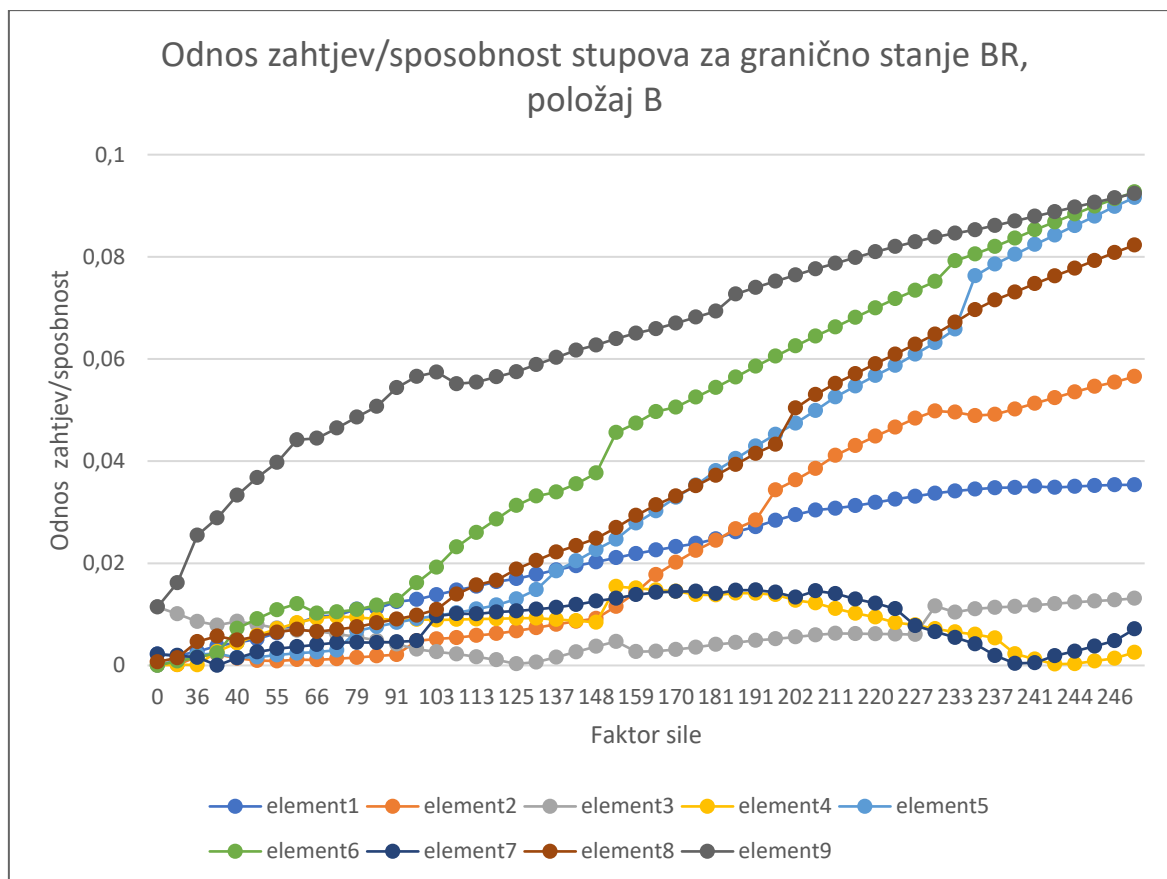
Na grafovima 30 i 31 prikazan je odnos zahtjev/sposobnost deformiranja čvorova stupova konstrukcije za granično stanje blizu rušenja. Vrijednosti odnosa zahtjeva i sposobnosti za iznos sile 577,62 kN koja odgovara zahtijevanom pomaku od 0,087 m za granično stanje blizu rušenja, izražene u %, prikazane su u Tablicama 37 i 38. Grafovi 32 i 33 te Tablice 39 i 40 prikazuju iste parametre, samo za grede.



Graf 30: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje BR, položaj A

Tablica 37: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje BR,
položaj A

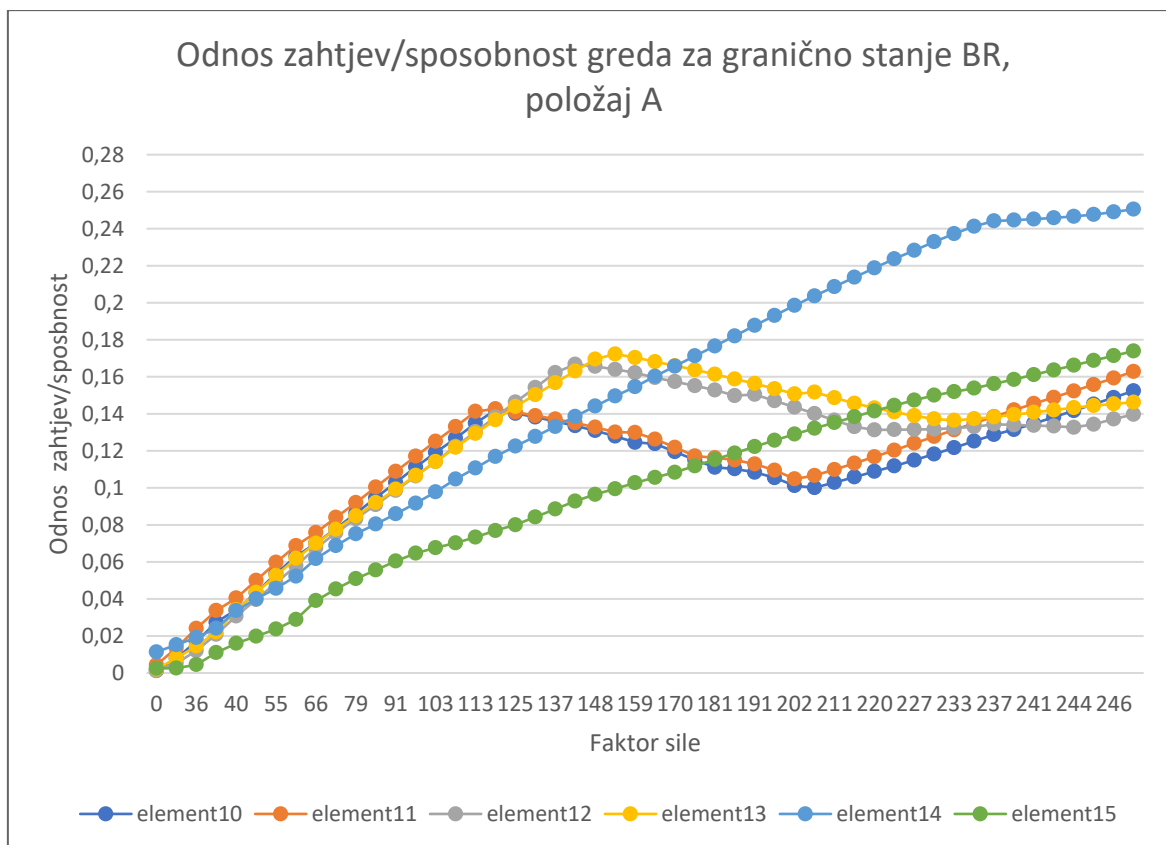
ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 1	20,81
ELEMENT 2	1,62
ELEMENT 3	2,74
ELEMENT 4	29,70
ELEMENT 5	4,11
ELEMENT 6	1,21
ELEMENT 7	31,37
ELEMENT 8	0,92
ELEMENT 9	1,95



Graf 31: Odnos zahtjev/sposobnost stupova za granično stanje BR, položaj B

Tablica 38: Odnos zahtjev/sposobnost [%] stupova za granično stanje BR,
položaj B

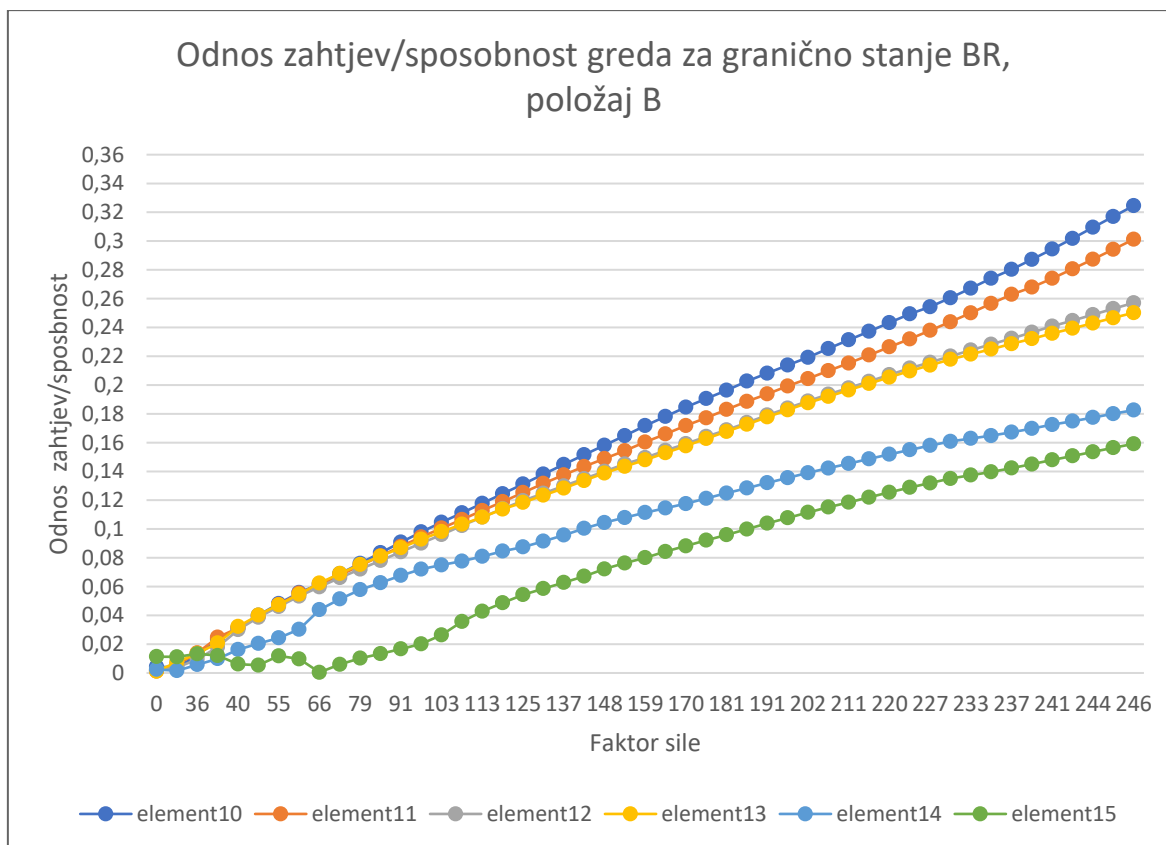
ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 1	3,54
ELEMENT 2	5,66
ELEMENT 3	1,31
ELEMENT 4	0,26
ELEMENT 5	9,16
ELEMENT 6	9,27
ELEMENT 7	0,71
ELEMENT 8	8,23
ELEMENT 9	9,24



Graf 32: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje BR, položaj A

Tablica 39: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje BR,
položaj A

ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 10	14,88
ELEMENT 11	15,93
ELEMENT 12	13,72
ELEMENT 13	14,54
ELEMENT 14	25,10
ELEMENT 15	17,14



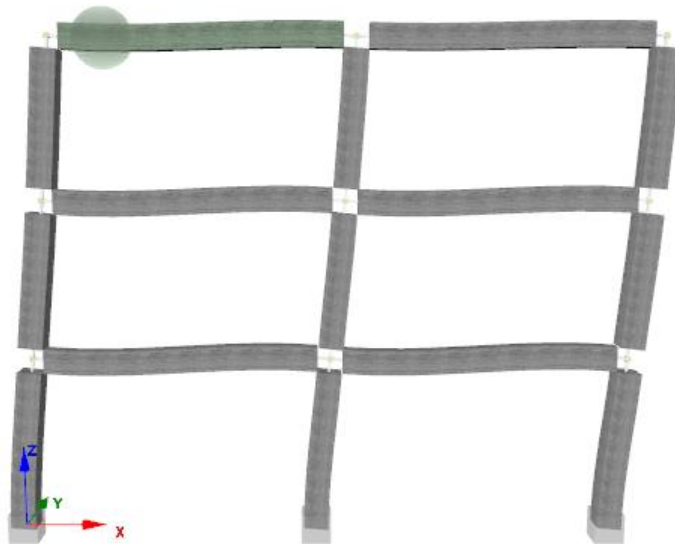
Graf 33: Odnos zahtjev/sposobnost greda za granično stanje BR, položaj B

Tablica 40: Odnos zahtjev/sposobnost [%] greda za granično stanje BR,
položaj B

ELEMENT	ODNOS ZAHTJEV/SPOSOBNOST [%]
ELEMENT 10	32,46
ELEMENT 11	30,12
ELEMENT 12	25,71
ELEMENT 13	25,02
ELEMENT 14	18,26
ELEMENT 15	15,92

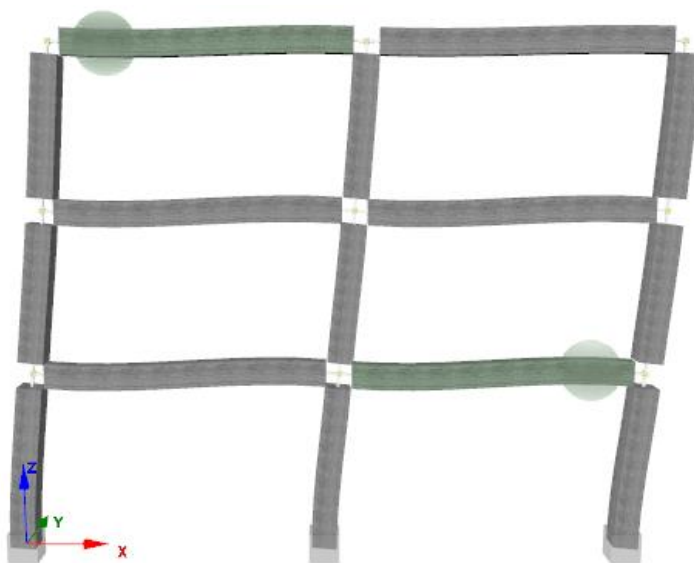
Plastični zglobovi otvorili su se kod proračuna graničnog stanja ograničenog oštećenja, no kod vrijednosti pomaka koji je veći od zahtijevanog za to stanje (0,029 m), stoga granično stanje ograničenog oštećenja nije prekoračeno. Također, nisu prekoračena niti granično stanje znatnog oštećenja niti blizu rušenja.

Prvi plastični zglob otvorio se u elementu 14 (vanjski oslonac grede POZ. 311) pri pomaku u iznosu od 0,078 m i opterećenju od 562,91 kN. Položaj plastičnog zgloba nalazi se na Slici 87.



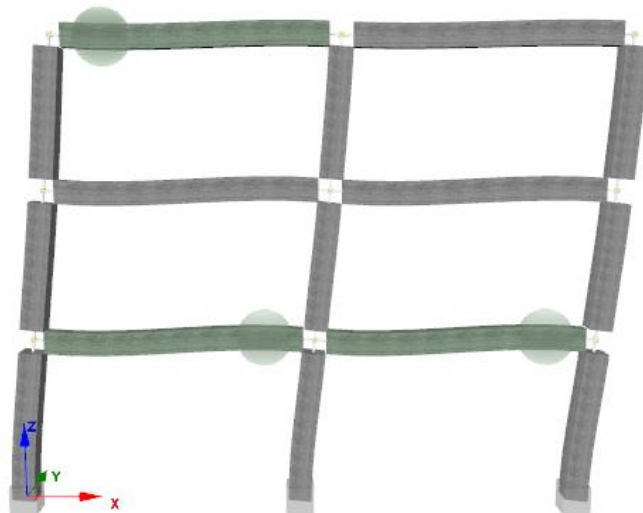
Slika 87: Plastični zglob na vanjskom osloncu grede POZ. 311

Sljedeći plastični zglob otvorio se elementu 10, odnosno vanjskom osloncu grede POZ. 115. Vrijednost pomaka pri kojoj je došlo do pojave plastičnog zgloba iznosi 0,081 m, a opterećenja 566,27 kN. Nastali zglobovi prikazani su na Slici 88.



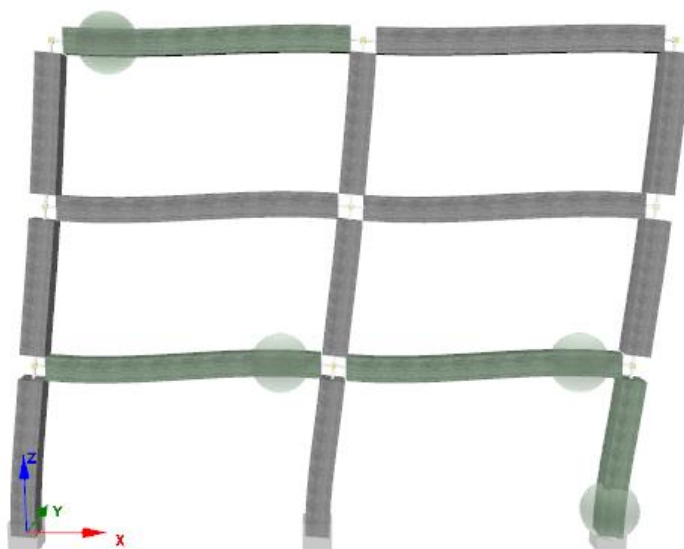
Slika 88: Plastični zglobovi na vanjskim osloncima POZ. 311 i POZ. 115

Nadalje, treći plastični zglob pojavio se u elementu 11, na unutarnjem osloncu grede POZ. 115. Vrijednost opterećenja za pojavu ovog zgloba iznosi 577,62 kN, a pomaka 0,087 m. Plastični zglobovi prikazani su na Slici 89.



Slika 89: Plastični zglobovi na vanjskom osloncu POZ. 311 i gredi POZ. 115

Zadnji plastični zglob pojavio se u elementu, odnosno podnožju stupa POZ. III/100. Vrijednost opterećenja za pojavu ovog zgloba iznosi 581,1 kN, a pomaka 0,089 m. Plastični zglobovi prikazani su na Slici 90.



Slika 90: Plastični zglobovi na vanjskim osloncima POZ. 311, POZ. 115 i stupu III/100

11. ZAKLJUČAK

Najprije je provedena metoda postupnog guranja armiranobetonskog okvira katnosti P+2, koji je dimenzioniran u diplomskom radu [17] za potrebe usporedbe rezultata s diplomskim radom [22]. Rezultati analize metode postupnog guranja provedene u ovom radu i rezultati prema [22] nemaju bitnu razliku što se tiče vrijednosti poprečne sile u podnožju i ciljanog pomaka po graničnim stanjima. Vrijednost poprečne sile dobivene u ovom radu iznosi 683,00 kN, dok prema [22] iznosi 602,5 kN, što čini razliku od oko 12%. Vrijednosti ciljanog pomaka su gotovo jednake, za granično stanje BR razlika je oko 1 cm i to je najveća vrijednost razlike. Razlika je u formiranju plastičnog mehanizma, u ovom radu plastični zglob otvorio se u samo u gredi 115, dok su se u [22] otvorili u svim gredama i stupovima prizemlja, no plastični zglobovi imali su velike rezerve. Oba načina provođenja *pushover* analize dokazali su da je konstrukcija uvelike predimenzionirana. Za oba načina proračuna nije prekoračeno ni jedno granično stanje.

Sa stvarnim periodom koji je dobiven iz *Seismostructa* – taj rezultat je potrebno proračunati za raspucani presjek ($T_1=0,76$ s) konstrukcija je ponovno dimenzionirana s racionalnim odabirom armature, no poštujući odredbe Eurokoda 8. S novom armaturom je ponovno provedena metoda postupnog guranja. Vrijednost poprečne sile u podnožju se smanjila za oko 15%, nova vrijednost je 581,10 kN. Vrijednosti ciljanog pomaka nisu se bitno promijenile. Međutim, nije se postiglo ni preveliko smanjenje rezerva u novim elementima okvira. Iako se povećao broj plastičnih zglobova, oni se nisu otvorili u svim gredama. Prvi plastični zglob otvorio se u gredi POZ. 311 (vanjski oslonac), zatim gredi POZ. 115 (oba oslonca) te zadnji u podnožju stupa POZ. III/100. No, plastični zglobovi i dalje se nisu otvorili u stupovima POZ. 200 i 300, što znači da je konstrukcija pravilno dimenzionirana – jaki stup, slaba greda.

Razlog tome što se nisu rezerve još više smanjile može biti i sam softver *Seismostruct* koji ne dopušta da se elementi pravilno armiraju – različita uzdužna armatura na osloncima i u polju, razmaci poprečne armature u kritičnim područjima, razmak u preostalom dijelu elementa, ne može se definirati duljina kritičnog područja. Sve su to parametri koji utječu na formiranje plastičnih zglobova, odnosno osiguranje duktilnog ponašanja konstrukcije.

Također, razlog može biti i tlačna armatura u gredama - prema potrebnoj armaturi (minimalno 50%) bila bi dovoljna manja armatura, no ona nije zadovoljila provjeru odnosa

koeficijenta armiranja stoga je usvojena dosta veća armatura od potrebne čime smo morali povećati nosivost.

LITERATURA

- [1] Chopra, Anil K., *Dynamic of structures*, Sveučilište u Kaliforniji, Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.
- [2] Čaušević, M., *Dinamika konstrukcija*, Golden marketing – tehnička knjiga, 2010.
- [3] Mitrović, S., Predavanje, *Primjena nelinearnog statičkog proračuna u seizmičkoj analizi postojećih konstrukcija*, Obnova grada Zagreba nakon potresa – Ciklus predavanja, 2020.
- [4] Skrinar, M., *Osnove potresnega inženirstva*, Učbenik, Univerzitetna založba, Univerze v Mariboru, 2021.
- [5] Grandić, D., Predavanje, kolegij Potresno inženjerstvo, *Potresi i gibanje tla u potresu*, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2022.
- [6] Kuk, K., Ivančić, I., Sović, I., Mustać, M., Fiket, T., Šariri, K., *Priručnik za integraciju seizmoloških podataka u sustav prostornog planiranja Republike Hrvatske na lokalnoj i regionalnoj razini*, Zagreb, 2023.
- [7] HRN EN 1998-1:2011, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. Dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade
- [8] Tomičić, I., *Betonske konstrukcije*, Zagreb, 1996.
- [9] Raduka, V., Nikolić, M., *Utjecaj slučajne torzije na seizmički odziv simetričnih konstrukcija*, Građevinar, 62 (10), str. 951. - 957., 2010.
- [10] Mitrović, S., Čaušević, M., *Nelinearni statički seizmički proračuni konstrukcija*, Građevinar, 61(6), str. 521.- 531, 2009.
- [11] HRN EN 1990:2011: Eurokod: Osnove projektiranja konstrukcija (EN 1990:2002+A1:2005+A1:2005/AC:2010)
- [12] Draganić, H., Hadzima, Nyarko, M., Morić, D., *Usporedba perioda vibracija AB okvirnih konstrukcija s empirijskim izrazima danim u Euronormi 8*, Tehcnical Hazette 17, (1), str. 93. – 100., 2010.
- [13] Urbanski, A., Spacone, E., Belgasmia, M., Sarf, J.-L., Zimmermann, T., *Static pushover analysis*, ZSoil. PC 070202 Report, Lausanne, Švicarska

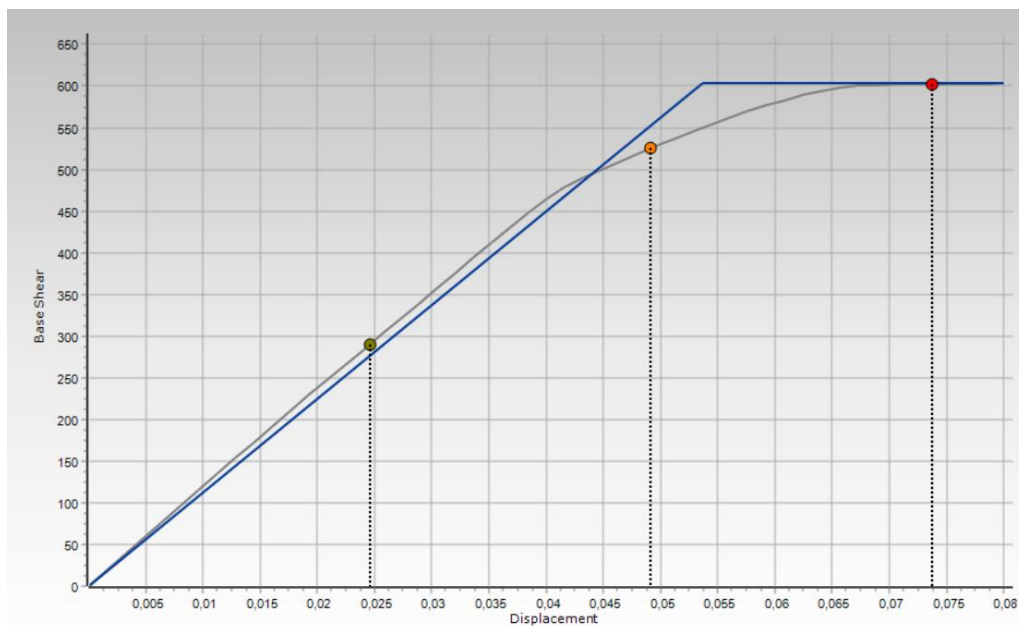
- [14] Fajfar, P., *The Story of the N2 Method*, Internacional Association for Earthquake Engineering, 2021.
- [15] Grandić, D., Predavanje, kolegij Potresno inženjerstvo, *Nelinearna statička metoda postupnog guranja*, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2022.
- [16] Cerovečki, A., Kraus, I., Morić, D., *Metoda N2 za projektiranje zgrada*, Građevinar, 70(6), str. 509.- 518, 2018.
- [17] Rušidi, T., *Potresni proračun i dimenzioniranje armiranobetonske zgrade*, Diplomski rad, Građevinski fakultet u Rijeci, 2018.
- [18] *SeismoStruct* (www.seismosoft.com)
- [19] Zamolo, M., *Utvrdjivanje stanja zgrada nakon potresa i dokumentacija*, Stručna online konferencija (chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.hcpi.hr/sites/default/files/inline-files/04_POTRES%20%26%20ODR%C5%BDIVA%20GRADNJA_MIHAELA%20ZAMOLO_HIS.pdf, datum pristupa: 28.08.2023.)
- [20] prEN 1998-1-1:2022, Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 1-1: General rules and seismic action
- [21] Uroš, M., suradnici, *Potresno inženjerstvo – obnova zidanih zgrada*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2021.
- [22] Brnić, D., *Nelinearni statički proračun potresne otpornosti armiranobetonskog višekratnog okvira*, Diplomski rad, Građevinski fakultet u Rijeci, 2023.
- [23] Grandić D., Šćulac P., *Proračun potresno otpornih konstrukcija prema sposobnosti nosivosti*, Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva, Opatija, 2017.
- [24] Grandić, D., Predavanja iz predmeta Potresno inženjerstvo; *Posebna pravila za projektiranje betonskih konstrukcija*, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka 2022.
- [25] Grandić, D., Predavanja iz predmeta Betonske i zidane konstrukcija 1; *Vitki elementi*, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka 2020.

PRILOZI

PRILOG 1: Izvadak rezultata potresnog proračuna metodom postupnog guranja iz diplomskog rada [22]

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.

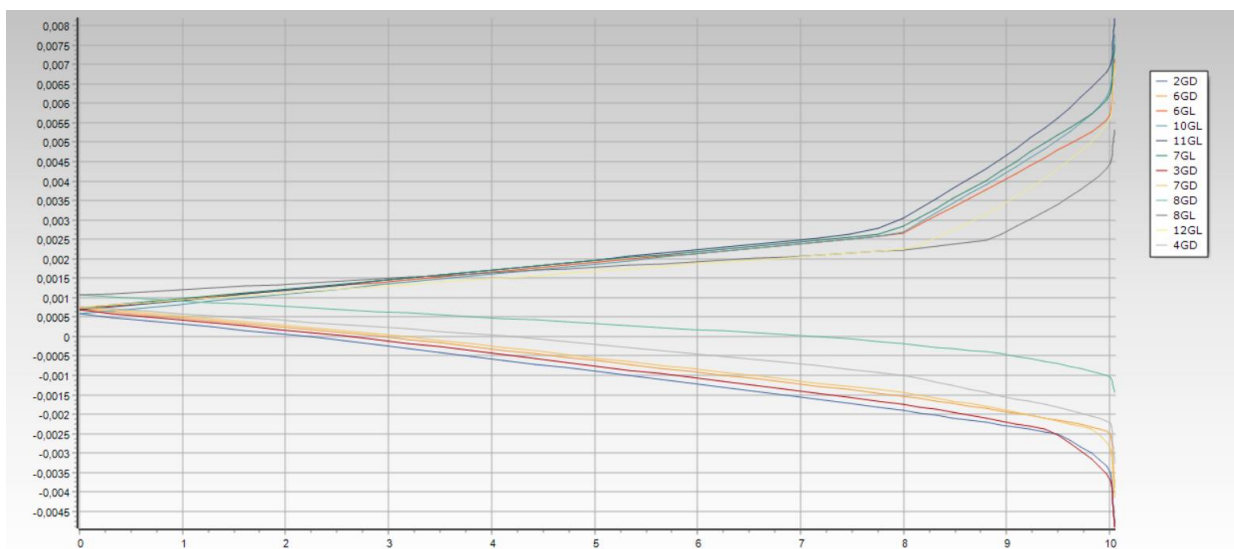


Slika 56. Krivulja sposobnosti nosivosti

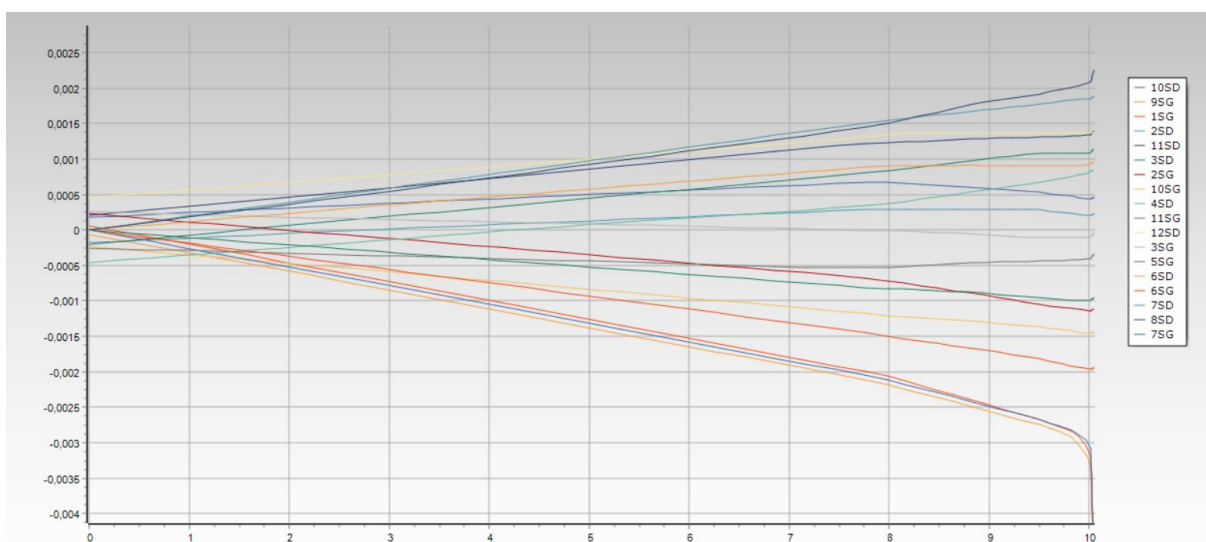
Target Displacement	
Damage Limitation (DL)	0,02458187
Significant Damage (SD)	0,04916374
Near Collapse (NC)	0,07374562

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)

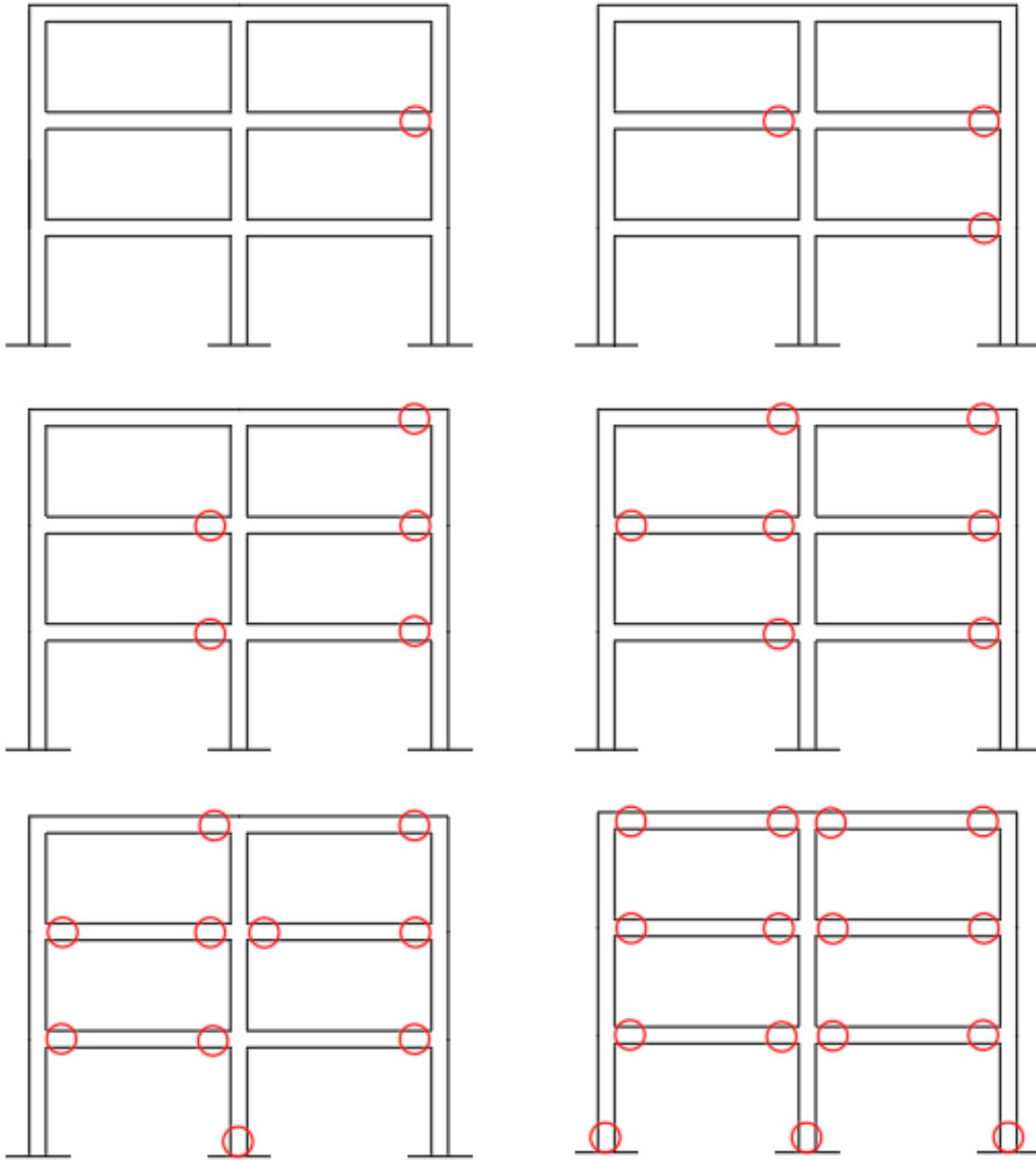
Plastični zglobovi (link elementi)	1SG	2GD	2SG	2SD	3SD
zahtjev	-0,00419	-0,00319	0,00643	0,00709	0,00758
sposobnost	-0,0216	-0,0204	0,021	0,0216	0,021
zahtjev /sposobnost [%]	19,41	15,64	30,63	32,83	36,07
Plastični zglobovi (link elementi)	3GD	3SG	4SD	4GD	5SG
zahtjev	0,00689	-0,00430	-0,00352	-0,00124	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).

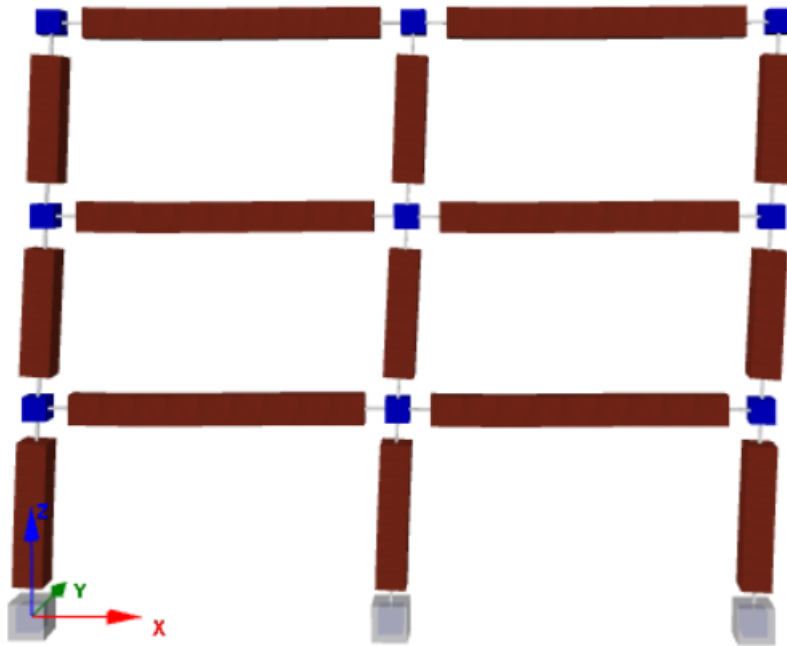
MODAL Mode	PERIODS Period (sec)	AND Frequency (Hertz)	FREQUENCIES Angular Frequency (rad/sec)
1	0,75185176	1,33004942	8,35694699
2	0,21862271	4,57409025	28,73985664
3	0,11518716	8,68152341	54,54762034
4	0,05274676	18,95850950	119,11982832
5	0,04057337	24,64670497	154,85981451
6	0,04054630	24,66316314	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

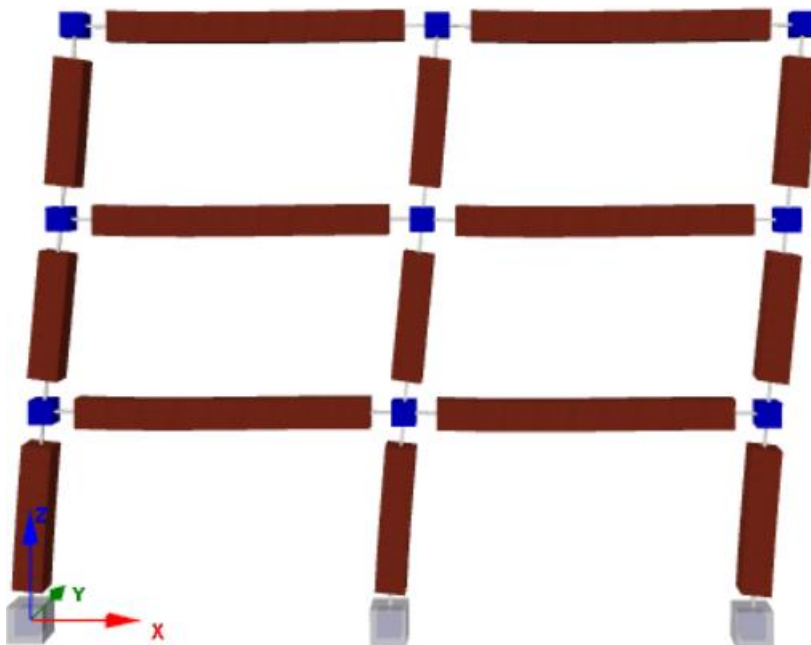
Na slici 61 prikazan je redosljed otvaranja plastičnih zglobova konstrukcije uslijed potresnog opterećenja. Plastični zglobovi su označeni crvenim krugovima. Na slikama 62, 63 prikazani su pomaci konstrukcije uslijed povećanja sila.



Slika 61. Redosljed otvaranja plastičnih zglobova



Slika 62. Pomak konstrukcije pri opterećenju 448 kN



Slika 63. Pomak konstrukcije pri sili 603 kN