

Čelična konstrukcija za natkrivanje parkirališta sa solarnim panelima

Marić, Antonio

Undergraduate thesis / Završni 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:157:165244>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**



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**

Antonio Marić

**Čelična konstrukcija za natkrivanje parkirališta sa solarnim
panelima**

Završni rad

Rijeka, rujan 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Sveučilišni prijediplomski studij

Osnove čeličnih konstrukcija

**Antonio Marić
JMBAG: 0114035150**

**Čelična konstrukcija za natkrivanje parkirališta sa solarnim
panelima**

Završni rad

Rijeka, rujan 2023.

IZJAVA

Završni/Diplomski rad izradio/izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom/mentoricom 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.

Antonio Marić

U Rijeci, Rujan 2023.

Sadržaj

1. Uvod.....	11
1.1. Općenito.....	11
1.2. Materijal.....	11
1.3. Tipovi konstrukcije nadstrešnica	12
1.4. Pokrov	12
2. Tehnički opis.....	14
3. Analiza djelovanja	15
3.1. Stalno djelovanje.....	15
3.2. Promjenjivo djelovanje	16
3.2.1. Djelovanje snijega.....	16
3.2.3. Djelovanje vjetra.....	19
4. Kombinacije djelovanja	22
5. Statički proračun	25
5.1. Dijagrami unutarnjih sila za podrožnice	25
5.2. Dijagrami unutarnjih sila za GNK	26
6. Dimenzioniranje glavnih elemenata konstrukcije za granično stanje nosivosti	27
6.1. Dimenzioniranje podrožnice	27
6.2. Dimenzioniranje desne kose prečke.....	35
6.3. Dimenzioniranje lijeve kose prečke.....	43
6.4. Dimenzioniranje lijevog kosnika	56
6.5. Dimenzioniranje desnog kosnika.....	67
6.6. Dimenzioniranje glavnog stupa	79
7. Dimenzioniranje glavnih elemenata konstrukcije za granično stanje uporabljivosti: ..	93
7.1. Provjera pomaka podrožnice.....	93
7.2. Provjera pomaka desne kose prečke	94
7.3. Provjera pomaka lijeve kose prečke	94
7.4. Provjera pomaka lijevog kosnika.....	95
7.5. Provjera pomaka desnog kosnika.....	95
7.6. Provjera pomaka glavnog stupa	96
8. Proračun spojeva konstrukcije	97
8.1. Spoj glavnog stupa s AB temeljom.....	97
8.2. Spoj glavnog stupa s desnim kosnikom:.....	102
9. Zaključak.....	108

10. Literatura.....	109
11. NACRTI.....	110

Popis slika:

Slika 1. Primjer drvene nadstrešnice. [3]

Slika 2. Primjer metalne nadstrešnice. [4]

Slika 3. primjer nadstrešnice na stupovima [5]

Slika 4. Polikarbonatne ploče. [6]

Slika 5. Limeni pokrov. [7]

Slika 6. Tlocrt, nacrt, bokocrt konstrukcije.

Slika 7. Solarni panel SUNERGY 550W. [8]

Slika 8. Karta snježnih područja Republike Hrvatske.

Slika 9. 3 slučaja opterećenja snijegom

Slika 10. Simetrično opterećenja snijega (slučaj 1)

Slika 11. Nesimetrično opterećenja snijega (slučaj 2)

Slika 12. Nesimetrično opterećenja snijega (slučaj 3)

Slika 13. Karta osnovne brzine vjetra.

Slika 14. Tlocrtni prikaz smjera puhanja vjetra za simulaciju vjetra

Slika 15. Opterećenja vjetra smjer X+

Slika 16. Opterećenja vjetra smjer Y+

Slika 17. Opterećenje vjetra smjer X-

Slika 18. Kombinacije djelovanja

Slika 19. Dijagrami momenta savijanja podrožnica za kombinaciju 106 graničnog stanja nosivosti.

Slika 20. Dijagrami poprečnih sila podrožnica za kombinaciju 106 graničnog stanja nosivosti.

Slika 21. Dijagrami momenta savijanja za GNK za kombinaciju 116 graničnog stanja nosivosti.

Slika 22. Dijagrami poprečnih sila za GNK za kombinaciju 116 graničnog stanja nosivosti.

Slika 23. Dijagrami uzdužnih sila za GNK za kombinaciju 116 graničnog stanja nosivosti.

Slika 24. Položaj najopterećenije podrožnice.

Slika 25. Vrijednost momenta savijanja M_y podrožnice. Za kombinaciju 113

Slika 26. Vrijednost momenta savijanja M_z podrožnice. Za kombinaciju 113

Slika 27. Vrijednost poprečne sile V_z podrožnice. Za kombinaciju 113

Slika 28. Vrijednost poprečne sile V_y podrožnice. Za kombinaciju 113

Slika 29. Sile i momenti koji djeluju na poprečni presjek podrožnice.

Slika 30. Položaj najopterećenije desne kose prečke.

Slika 31. Vrijednosti momenta savijanja M_y desne kose prečke za kombinaciju 113.

Slika 32. Vrijednosti poprečnih sila V_z desne kose prečke za kombinaciju 113.

Slika 33. Vrijednosti uzdužnih vlačnih sila desne kose prečke za kombinaciju 113.

Slika 34. Prikaz momenta i sila koji djeluju na poprečni presjek desne kose prečke.

Slika 35. Položaj najopterećenije lijeve kose prečke.

Slika 36. Vrijednosti momenta savijanja M_y lijeve kose prečke za kombinaciju 116.

Slika 37. Vrijednosti poprečnih sila V_z lijeve kose prečke za kombinaciju 116.

Slika 38. Vrijednosti uzdužnih tlačnih sila lijeve kose prečke za kombinaciju 116.

Slika 39. Prikaz momenta i sila koji djeluju na poprečni presjek lijeve kose prečke.

Slika 40. Duljine izvijanja za različite slučajeve oslanjanja.

Slika 41. Položaj najopterećenijeg lijevog kosnika.

Slika 42. Vrijednosti momenta savijanja M_y lijevog kosnika za kombinaciju 106.

Slika 43. Vrijednosti poprečnih sila V_z lijevog kosnika za kombinaciju 106.

Slika 44. Vrijednosti uzdužnih tlačnih sila lijevog kosnika za kombinaciju 106.

Slika 45. Prikaz momenta i sila koji djeluju na poprečni presjek lijevog kosnika.

Slika 46. Položaj najopterećenijeg desnog kosnika.

Slika 47. Vrijednosti momenta savijanja M_y desnog kosnika za kombinaciju 116.

Slika 48. Vrijednosti poprečnih sila V_z desnog kosnika za kombinaciju 116.

Slika 49. Vrijednosti uzdužnih tlačnih sila desnog kosnika za kombinaciju 116.

Slika 50. Prikaz momenta i sila koji djeluju na poprečni presjek desnog kosnika stupa.

Slika 51. Položaj najopterećenijeg glavnog stupa.

Slika 52. Vrijednosti momenta savijanja M_y glavnog stupa za kombinaciju 116.

Slika 53. Vrijednosti poprečnih sila V_z glavnog stupa za kombinaciju 116.

Slika 54. Vrijednosti uzdužnih tlačnih sila glavnog stupa za kombinaciju 116.

Slika 55. Prikaz momenta i sila koji djeluju na poprečni presjek glavnog stupa.

Slika 56. Pomaci podrožnice za kombinaciju 212 u smjeru osi z.

Slika 57. Pomaci podrožnice za kombinaciju 212 u smjeru osi y.

Slika 58. Pomaci desne kose prečke za kombinaciju 216

Slika 59. Pomaci lijeve kose prečke za kombinaciju 216

Slika 60. Pomaci lijevog kosnika za kombinaciju 208

Slika 61. Pomaci desnog kosnika za kombinaciju 216

Slika 62. Pomaci glavnog stupa za kombinaciju 216

Slika 63. Spoj glavnog stupa s AB temeljom sa silama i momentima koji djeluju na njega.

Slika 64. Djelovanje vlačne sile od momenta savijanja na spoj glavnog stupa s AB temeljom.

Slika 65. Djelovanje vlačne sile od momenta savijanja na zavar glavnog stupa s AB temeljom.

Slika 66. Spoj glavnog stupa s desnim kosnikom sa silama i momentima koji djeluju na njega.

Slika 67. Djelovanje vlačne sile od momenta savijanja na spoj glavnog stupa s desnim kosnikom.

Slika 68. Djelovanje vlačne sile od momenta savijanja na zavar glavnog stupa s desnim kosnikom.

Popis tablica:

Tablica 1. Vrijednosti karakterističnih opterećenja.

Tablica 2. Klasifikacija unutrašnjih tlačnih elemenata.

Tablica 3. Faktori C_i za izračun bočno torzijskog izvijanja.

Tablica 4. Krivulja izvijanja

Tablica 5. Klasifikacija vanjskih tlačnih elemenata.

Tablica 6. Krivulja izvijanja.

Sažetak:

Ovaj završni rad obuhvaća proračun i dimenzioniranje čelične konstrukcije za natkrivanje parkirališta sa solarnim panelima. Prvi dio rada govori općenito o nadstrešnicama te o njihovoj podjeli, vrsti pokrova i materijalu. Zatim je uz pomoć normi i nacionalnih dodataka provedena analiza djelovanja za područje Rijeke gdje su određena vlastita težina konstrukcije, opterećenje vjetra i opterećenje snijega. S dobivenim opterećenjima proračunate su mjerodavne kombinacije za granično stanje nosivosti i granično stanje uporabljivosti. Konstruiran je model konstrukcije u programu „Robot Structural Analysis“. Zatim je provedeno dimenzioniranje sekundarnih elemenata i glavne nosive konstrukcije te su zadovoljeni svi uvjeti graničnog stanja nosivosti i graničnog stanja uporabljivosti. Uz dimenzioniranje provedeni su proračuni spojeva stupa s temeljom i desnog kosog stupa s glavnim stupom. Za statički proračun korišten je program „Robot Structural Analysis“, a za izradu nacrtu korišten je „AutoCAD“.

Ključne riječi: čelična konstrukcija, solarni paneli, statički proračun, granično stanje nosivosti, granično stanje uporabljivosti.

Abstract:

This bachelor thesis includes analysis and designs a steel structure for covering a parking lot with the solar panel roofing. First part of thesis describes canopies in general, their classification, roofing and materials. Then with the help of norms and national annex, load analysis was carried for the area of Rijeka, where we determined self weight, wind load and snow load. With the obtained loads the relevant combinations for ultimate limit state and serviceability limit state were calculated. The secondary and main elements of construction were designed where the construction satisfied the ultimate limit state and serviceability limit state. The connections of the main column to the concrete foundation and the connection between slantwise column with the main column have also been calculated. The software used for statics calculations was „Robot Structural Analysis“ and the software „AutoCAD“ was used for drafting.

Key words: steel construction, solar panels, static calculation, ultimate limit state, serviceability limit state.

1.Uvod

1.1. Općenito

Nadstrešnica je pomoćni građevinski objekt koji natkriva određeni prostor. Može biti samostojeća ili povezana s postojećim objektom. Temeljna funkcija joj je zaštita vozila, ljudi, materijala i sl. od atmosferskih utjecaja. Najčešće se koriste na parkirališnim mjestima trgovačkih centara, na mjestima ulaza u javnu ustanovu i sl.

1.2. Materijal

Nadstrešnice se najviše izvode od metala (čelik, aluminij) ili od drva. Metalne nadstrešnice su u pravilu jeftinije u odnosu na drvene zbog manje potrebe za održavanjem uz to su metalne otpornije na atmosferske utjecaje.



Slika 1. Primjer drvene nadstrešnice. [3]



Slika 2. Primjer metalne nadstrešnice. [4]

1.3. Tipovi konstrukcije nadstrešnica

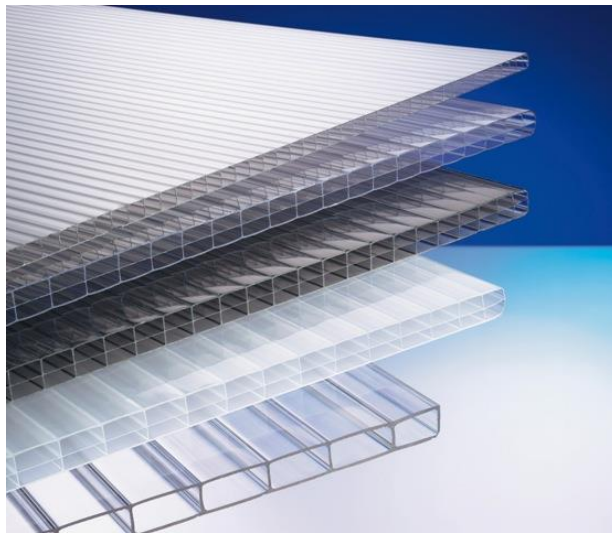
Razlikujemo dva tipa konstrukcija: konzolne nadstrešnice (slika 2) i nadstrešnice na stupovima (slika 3).



Slika 3. primjer nadstrešnice na stupovima [5]

1.4. Pokrov

Pokrov se može izvoditi od raznih materijala, ali najčešće se koristi: limeni pokrov (slika 5.), crijep, polikarbonatne ploče (slika 4.).



Slika 4. Polikarbonatne ploče. [6]



Slika 5. Limeni pokrov. [7]

Preliminarni projektni zadatak za ZAVRŠNI RAD



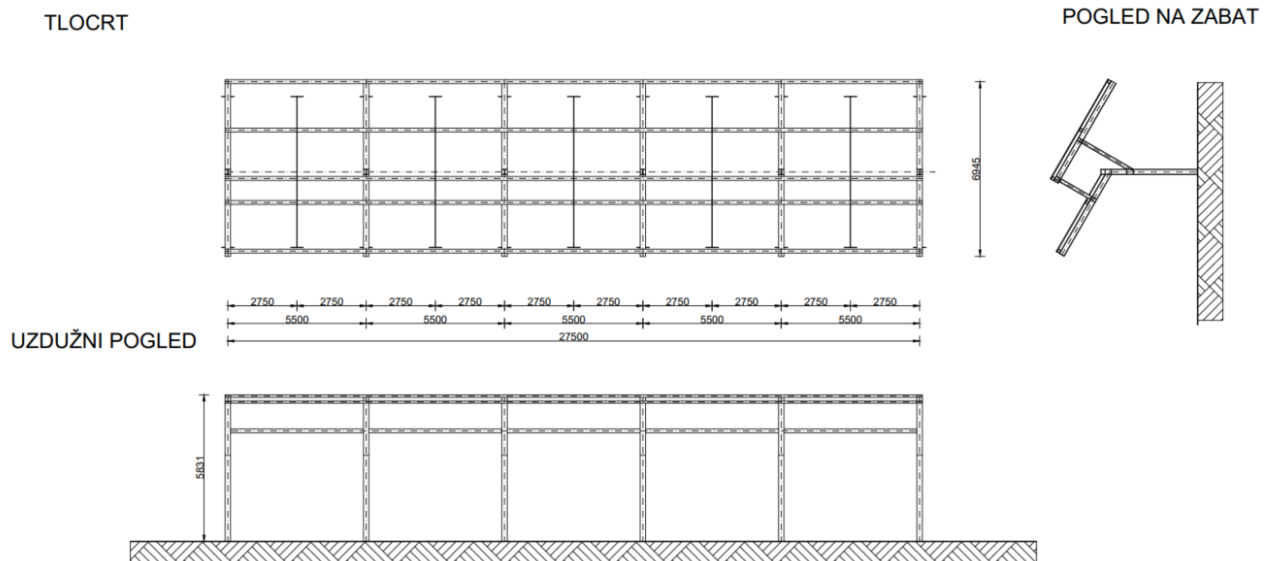
Potrebno je napraviti sljedeće:

1. Prema primjeru sa slike osmisliti konstrukciju za natkrivanje 10 automobila s djelomičnim pokrovom od solarnih panela. Razmak između dva sustava stupova odrediti ovisno o dimenzijama parkirnih mjesta za dva vozila.
2. Odabrati lokaciju na području grada Rijeke (npr. parkiralište Delta). Ovisno o lokaciji i osunčanosti, voditi računa o nagibu nadstrešnice.
3. Pronaći katalog solarnih panela zbog izračuna vlastite težine.
4. Provesti analizu djelovanja na nadstrešnicu prema važećim propisima (stalno, snijeg, vjetar).
5. Izračunati mjerodavne kombinacije djelovanja (stalno djelovanje, snijeg i vjetar) za GSN i GSU.
6. Instalirati programski paket *Robot Structural Analysis* (Autodesk). Dostupna je studentska licenca na stranici Autodesk.
7. Modelirati konstrukciju u *Robotu* i proračunati unutarnje sile.
8. Provesti dimenzioniranje glavnih elemenata konstrukcije nadstrešnice (prema graničnom stanju nosivosti (GSN) i graničnom stanju uporabivosti (GSU) koristeći se važećim propisima za projektiranje čeličnih konstrukcija (HRN EN 1991-3).
9. Riješiti detalj spajanja konstrukcije na temelj te detalj spajanja karakterističnog konstrukcijskog elementa. Napraviti proračun spoja na ruke.
10. Nacrtati dispoziciju konstrukcije te nacrt detalja spoja konstrukcije na temeljno tlo.

Napomena: Točke preliminarnog zadatka Završnog rada mogu biti podložne izmjenama u tijeku rada, koje će biti usuglašene sa studentom.

2. Tehnički opis

Konstrukcija je čelična dvostrešna nadstrešnica s pokrovom od solarnih panela tlocrtnih dimenzija 27,5 x 6,9 m koja natkriva 10 parkirnih mjesta namijenjenih za osobna vozila (slika 6.), dimenzije parkirnih mjesta su 2,75 x 6 m. Konstrukcija se nalazi na području grada Rijeke na nadmorskoj visini do 100 m. Konstrukcija se sastoji od 6 glavnih nosača na osnom razmaku od 5,5 m. Glavnu konstrukciju čine glavni vertikalni stup, poprečnog profila HEB 220, dvije kose prečke (nagib od 30°), profila HEB 220, dva kosa stupa, profila HEB 140 te sekundarni nosači (podrožnice), profila SHS 120 x 120 x 8 mm, postavljeni na razmaku prema zahtjevima solarnih panela. Svi elementi konstrukcije izrađeni su od kvalitete čelika S235. Konstrukcija će se u radioni izvoditi u 2 dijela radi lakšeg transporta te će se na gradilištu samo vršiti spojevi vijcima. Na konstrukciju djeluje stalno opterećenje (vlastita težina konstrukcije i težina solarnih panela), opterećenje snijegom i vjetrom. Djelovanje snijega određeno je u skladu s europskom normom HRN EN 1991-1-3:2012 [9] te nacionalnim dodatkom HRN EN 1991-1-3:2012/NA:2016 [11]. Djelovanje vjetra određeno je u skladu s europskom normom HRN EN 1991-1-4:2012 [10] te nacionalnim dodatkom HRN EN 1991-1-4:2012/NA:2012 [12].



Slika 6. Tlocrt, nacrt, bokocrt konstrukcije.

3. Analiza djelovanja

3.1. Stalno djelovanje

Stalno djelovanje koja djeluju na konstrukciju su težina solarnih panela i vlastita težina same konstrukcije.

Vlastita težina konstrukcije uračunata je pomoću programa Robot Structural Analysis Professional naredbom „selfweight“.

Odabrani su solarni paneli SUNERGY 550W half-cell, proizvođača SUNERGY, SAD. [8]
Težina solarnih panela iznosi 0,13 kN/m². Dimenzije solarnog panela su 2285 x 1134 x 30 mm.



Slika 7. Solarni panel SUNERGY 550W. [8]

3.2. Promjenjivo djelovanje

3.2.1. Djelovanje snijega

Za proračun djelovanja snijega na krovu koristi se izraz: $s = \mu * C_e * C_t * s_k$

s_k – karakteristična vrijednost opterećenja snijega na tlu za određeno snježno područje i nadmorske visine.

μ – koeficijent oblika opterećenja snijegom

C_e – koeficijent izloženosti (za proračun uzima se vrijednost $C_e = 1,0$)

C_t – toplinski koeficijent (za proračun uzima se vrijednost C_t)

Konstrukcija se nalazi na području Republike Hrvatske, preciznije grad Rijeka (1. područje – priobalje i otoci), na nadmorskoj visini do 100 m te karakteristična vrijednost opterećenja snijegom na tlu iznosi $s_k = 0,50 \text{ kN/m}^2$.

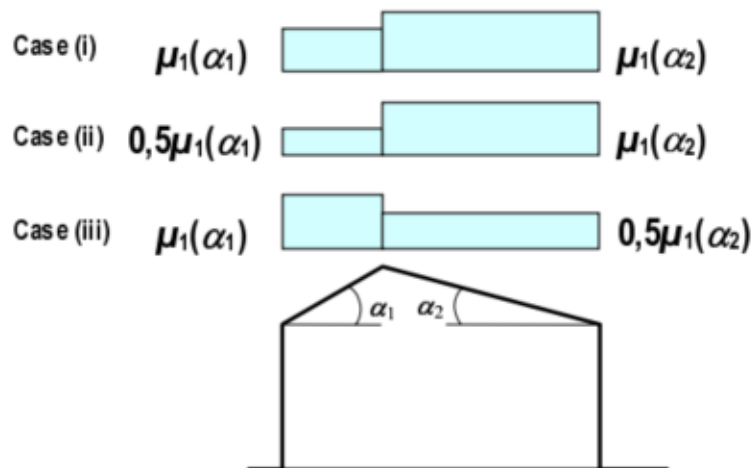


Slika 8. Karta snježnih područja Republike Hrvatske.

Nadmorska visina do [m]	1. područje – priobalje i otoci [kN/m ²]	2. područje – zaleđe Dalmacije, Primorja i Istre [kN/m ²]	3. područje – kontinentalna Hrvatska [kN/m ²]	4. područje – gorska Hrvatska [kN/m ²]
100	0,50	0,75	1,00	1,25
200	0,50	0,75	1,25	1,50
300	0,50	0,75	1,50	1,75
400	0,50	1,00	1,75	2,00
500	0,50	1,25	2,00	2,50
600	0,50	1,50	2,25	3,00
700	0,50	2,00	2,50	3,50
800	0,50	2,50	2,75	4,00
900	1,00	3,00	3,00	4,50
1 000	2,00	4,00	3,50	5,00
1 100	3,00	5,00	4,00	5,50
1 200	4,00	6,00	4,50	6,00
1 300	5,00	7,00		7,00
1 400	6,00	8,00		8,00
1 500		9,00		9,00
1 600		10,00		10,00
1 700		11,00		11,00
1 800		12,00		

Tablica 1. Vrijednosti karakterističnih opterećenja.

Prema normi HRN EN 1991-1-3, nagibu strehe nadstrešnice (30°) i uvjeta $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$, koeficijent oblika iznosi: $\mu_1 = 0,8$



Slika 9. 3 slučaja opterećenja snijegom

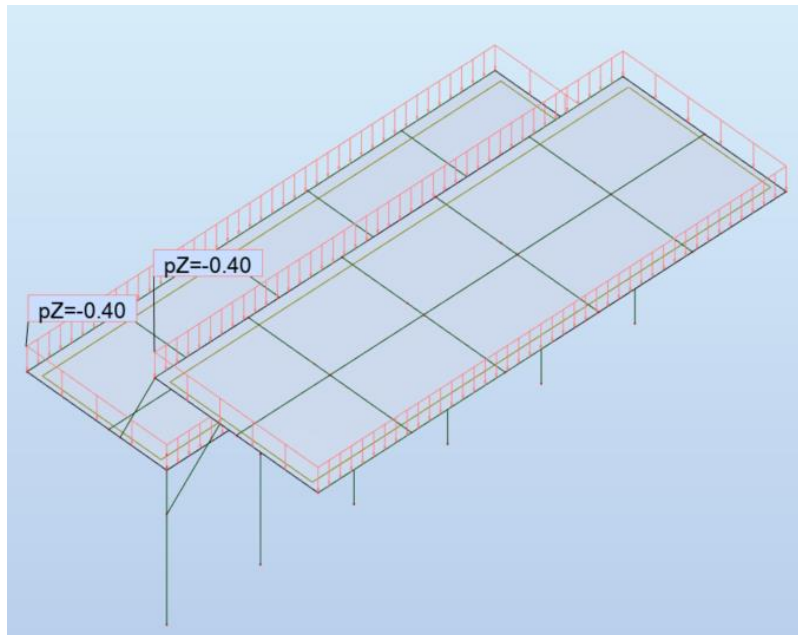
Proračun djelovanja snijega na krovu:

Slučaj 1 (simetrično opterećenje): $s_1 = \mu * C_e * C_t * s_k = 0,8 * 1 * 1 * 0,5 = 0,4 \text{ kN/m}^2$

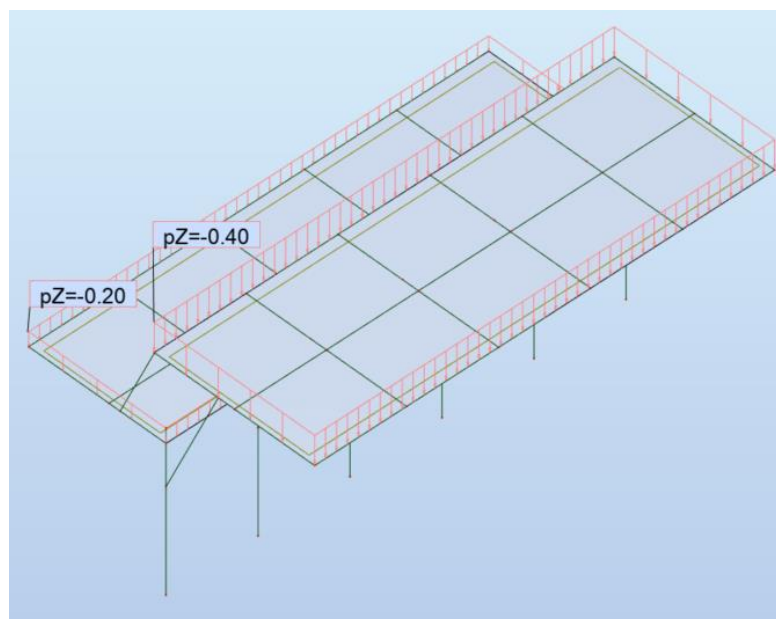
Slučaj 2,3 (nesimetrično opterećenje):

$s_2 = \mu * C_e * C_t * s_k = 0,8 * 1 * 1 * 0,5 = 0,4 \text{ kN/m}^2$

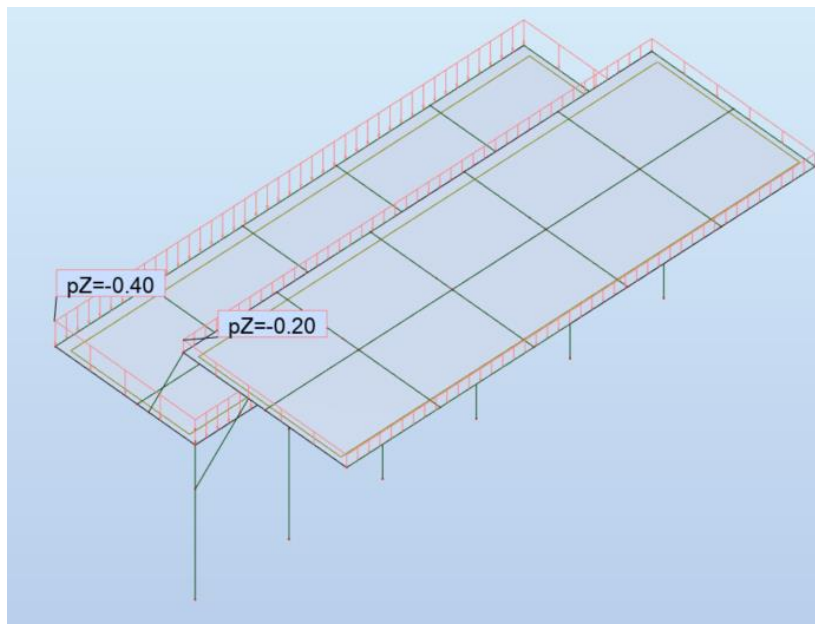
$s_3 = \mu * C_e * C_t * s_k = 0,5 * 0,8 * 1 * 1 * 0,5 = 0,2 \text{ kN/m}^2$



Slika 10. Simetrično opterećenja snijega (slučaj 1)



Slika 11. Nesimetrično opterećenja snijega (slučaj 2)



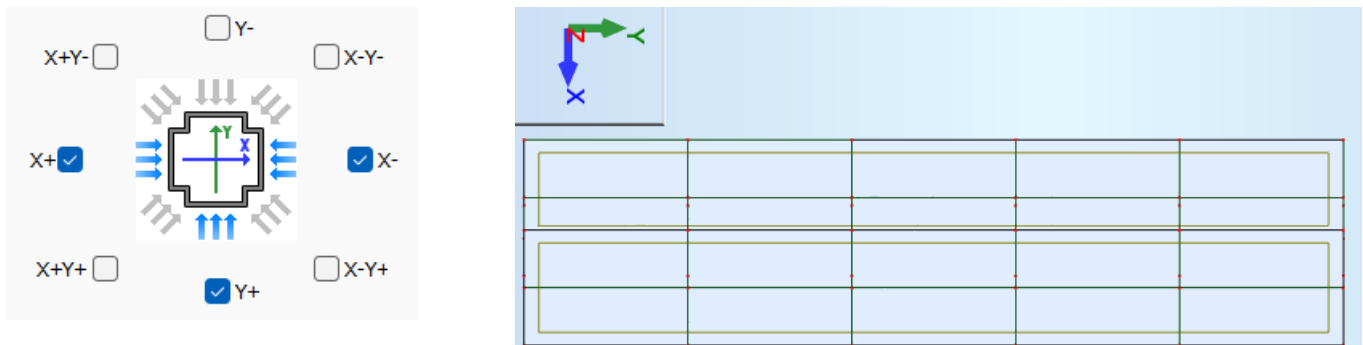
Slika 12. Nesimetrično opterećenja snijega (slučaj 3)

3.2.3. Djelovanje vjetra

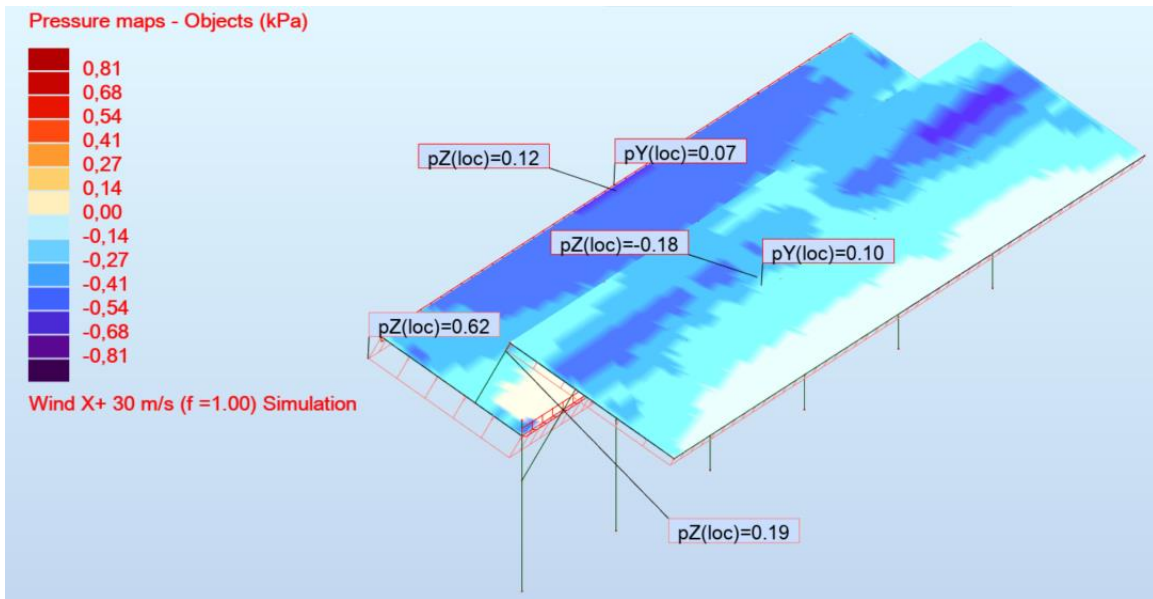
Zbog netipičnog oblika nadstrešnice djelovanje vjetra je određeno uz pomoć programa Robot Structural Analysis Professional pomoću naredbe „wind simulation“. Simulacija vjetra je provedena za 3 smjera puhanja vjetra. Za simulaciju je potrebna osnovna brzina vjetra $v_{b,0} = 30 \text{ m/s}$.



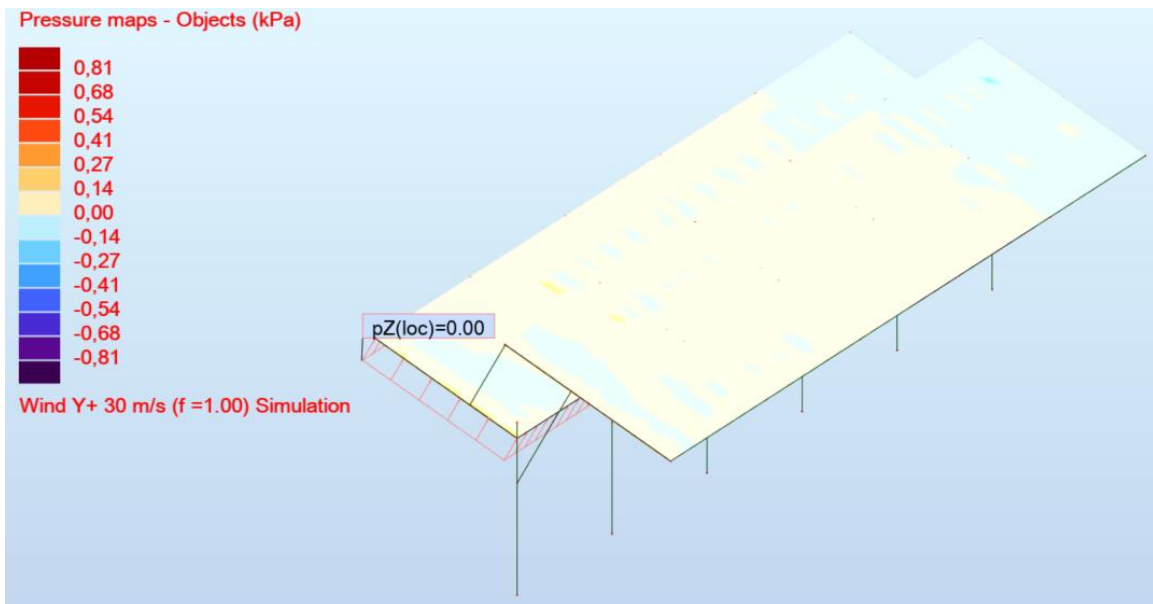
Slika 13. Karta osnovne brzine vjetra.



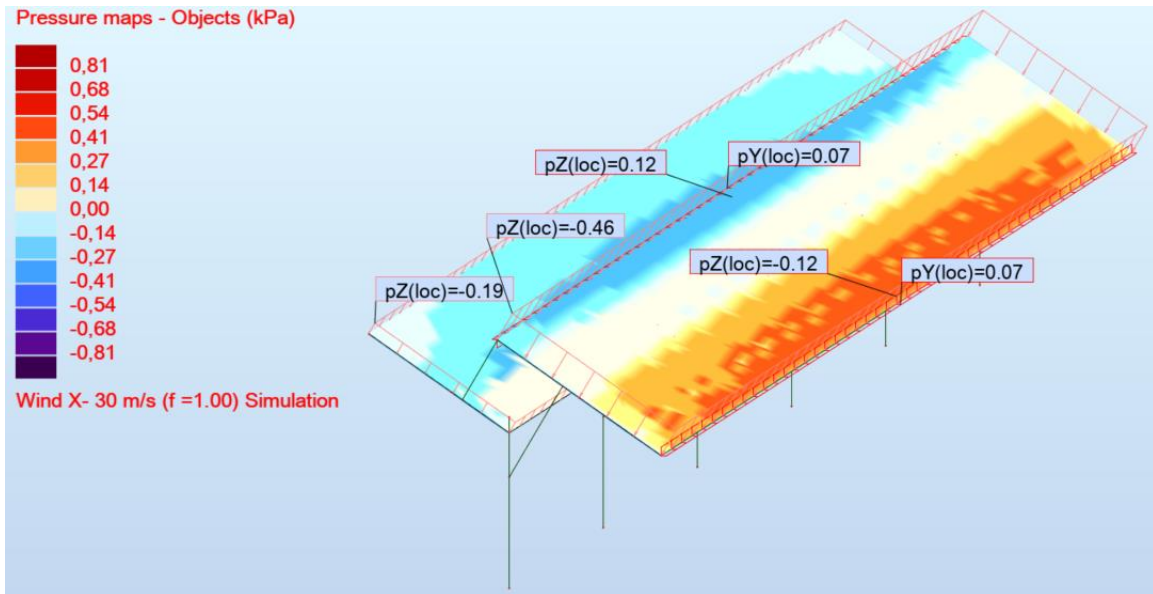
Slika 14. Tlocrtni prikaz smjera puhanja vjetra za simulaciju vjetra



Slika 15. Opterećenja vjetra smjer X+



Slika 16. Opterećenja vjetra smjer Y+



Slika 17. Opterećenje vjetra smjer X-

4. Kombinacije djelovanja

Kombinacije djelovanja definirane su za granično stanje nosivosti (GSN) i granično stanje uporabljivosti (GSU) pomoću programa Robot Structural Analysis.

Parcijalni faktori sigurnosti za granično stanje nosivosti

$\gamma_G = 1,00$ za povoljno djelovanje

$\gamma_G = 1,35$ za nepovoljno djelovanje

$\gamma_Q = 0$ za povoljno djelovanje

$\gamma_Q = 1,5$ za nepovoljno djelovanje

Parcijalni faktori sigurnosti za granično stanje uporabljivosti:

$\gamma_G = 1,00$ za povoljno djelovanje

$\gamma_G = 1,00$ za nepovoljno djelovanje

$\gamma_Q = 0$ za povoljno djelovanje

$\gamma_Q = 1,00$ za nepovoljno djelovanje

Combinations	Name	Analysis type	Combination	Case nature	Definition
101 (C)	VT+SS	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.35+2*1.50
102 (C)	VT+SN1	Linear Combinati	ULS	Structural	3*1.50+1*1.35
103 (C)	VT+SN2	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.35+4*1.50
104 (C)	VT+VJP	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.35+7*1.50
105 (C)	VT+VJO	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.00+5*1.50
106 (C)	VT+SS+VJP	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.35+2*1.50+7*0.90
107 (C)	VT+SN1+VJP	Linear Combinati	ULS	Structural	7*0.90+3*1.50+1*1.35
108 (C)	VT+SN2+VJP	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.35+4*1.50+7*0.90
109 (C)	VT+SS+VJO	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.35+2*1.50+5*0.90
110 (C)	VT+SN1+VJO	Linear Combinati	ULS	Structural	5*0.90+3*1.50+1*1.35
111 (C)	VT+SN2+VJO	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.35+4*1.50+5*0.90
112 (C)	VT+VJP+SS	Linear Combinati	ULS	Structural	7*1.50+1*1.35+2*0.75
113 (C)	VT+VJP+SN1	Linear Combinati	ULS	Structural	3*0.75+7*1.50+1*1.35
114 (C)	VT+VJP+SN2	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.35+4*0.75+7*1.50
115 (C)	VT+VJO+SS	Linear Combinati	ULS	Structural	5*1.50+1*1.00+2*0.75
116 (C)	VT+VJO+SN1	Linear Combinati	ULS	Structural	3*0.75+5*1.50+1*1.00
117 (C)	VT+VJO+SN2	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.00+4*0.75+5*1.50
201 (C)	VT+SS	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+2)*1.00
202 (C)	VT+SN1	Linear Combinati	SLS	Structural	(3+1)*1.00
203 (C)	VT+SN2	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+4)*1.00
204 (C)	VT+VJP	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+7)*1.00
205 (C)	VT+VJO	Linear Combinati	SLS	Structural	(5+1)*1.00
206 (C)	VT+SS+VJP	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+2)*1.00+7*0.60
207 (C)	VT+SN1+VJP	Linear Combinati	SLS	Structural	(3+1)*1.00+7*0.60
208 (C)	VT+SN2+VJP	Linear Combinati	SLS	Structural	7*0.60+(1+4)*1.00
209 (C)	VT+SS+VJO	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+2)*1.00+5*0.60
210 (C)	VT+SN1+VJO	Linear Combinati	SLS	Structural	5*0.60+(3+1)*1.00
211 (C)	VT+SN2+VJO	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+4)*1.00+5*0.60
212 (C)	VT+VJP+SS	Linear Combinati	SLS	Structural	(7+1)*1.00+2*0.50
213 (C)	VT+VJP+SN1	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+7)*1.00+3*0.50
214 (C)	VT+VJP+SN2	Linear Combinati	SLS	Structural	(7+1)*1.00+4*0.50
215 (C)	VT+VJO+SS	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+5)*1.00+2*0.50
216 (C)	VT+VJO+SN1	Linear Combinati	SLS	Structural	(5+1)*1.00+3*0.50
217 (C)	VT+VJO+SN2	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+5)*1.00+4*0.50

Slika 18. Kombinacije djelovanja

Kombinacije djelovanja – granično stanje nosivosti (GSN)

101 – stalno + snijeg simetrično

102 – stalno + snijeg nesimetrično 1

103 – stalno + snijeg nesimetrično 2

104 – stalno + vjetar pritiskajući

105 – stalno + vjetar odižući

106 – stalno + snijeg simetrično + vjetar pritiskajući

107 – stalno + snijeg nesimetrično 1 + vjetar pritiskajući

108 – stalno + snijeg nesimetrično 2 + vjetar pritiskajući

109 – stalno + snijeg simetrično + vjetar odižući

110 – stalno + snijeg nesimetrično 1 + vjetar odižući

111 – stalno + snijeg nesimetrično 2 + vjetar odižući

112 – stalno + vjetar odižući + snijeg simetrično

113 – stalno + vjetar odižući + snijeg nesimetrično 1

114 – stalno + vjetar odižući + snijeg nesimetrično 2

115 – stalno + vjetar odižući + snijeg simetrično

116 – stalno + vjetar odižući + snijeg nesimetrično 1

117 – stalno + vjetar odižući + snijeg nesimetrično 2

Kombinacije djelovanja – granično stanje uporabljivosti (GSU)

201 – stalno + snijeg simetrično

202 – stalno + snijeg nesimetrično 1

203 – stalno + snijeg nesimetrično 2

204 – stalno + vjetar pritiskajući

205 – stalno + vjetar odižući

206 – stalno + snijeg simetrično + vjetar pritiskajući

207 – stalno + snijeg nesimetrično 1 + vjetar pritiskajući

208 – stalno + snijeg nesimetrično 2 + vjetar pritiskajući

209 – stalno + snijeg simetrično + vjetar odižući

210 – stalno + snijeg nesimetrično 1 + vjetar odižući

211 – stalno + snijeg nesimetrično 2 + vjetar odižući

212 – stalno + vjetar odižući + snijeg simetrično

213 – stalno + vjetar odižući + snijeg nesimetrično 1

214 – stalno + vjetar odižući + snijeg nesimetrično 2

215 – stalno + vjetar odižući + snijeg simetrično

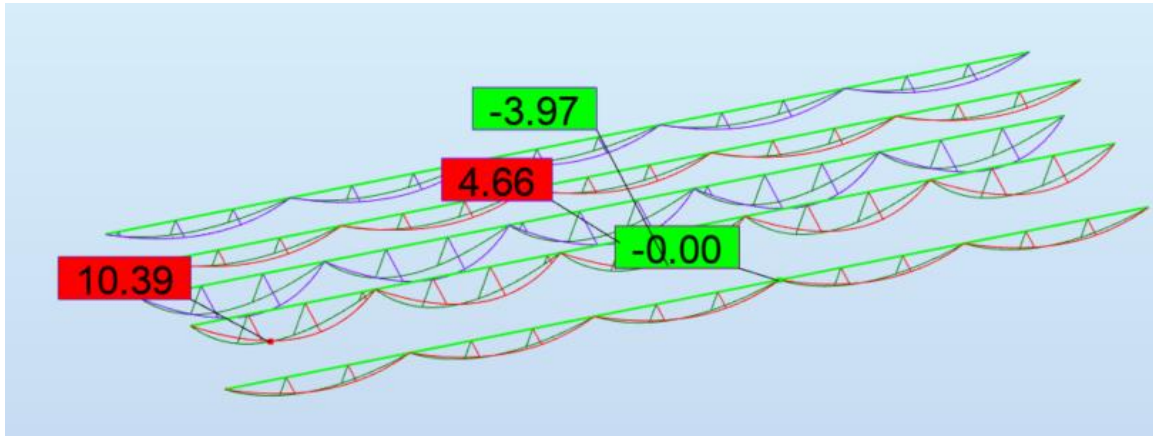
216 – stalno + vjetar odižući + snijeg nesimetrično 1

217 – stalno + vjetar odižući + snijeg nesimetrično 2

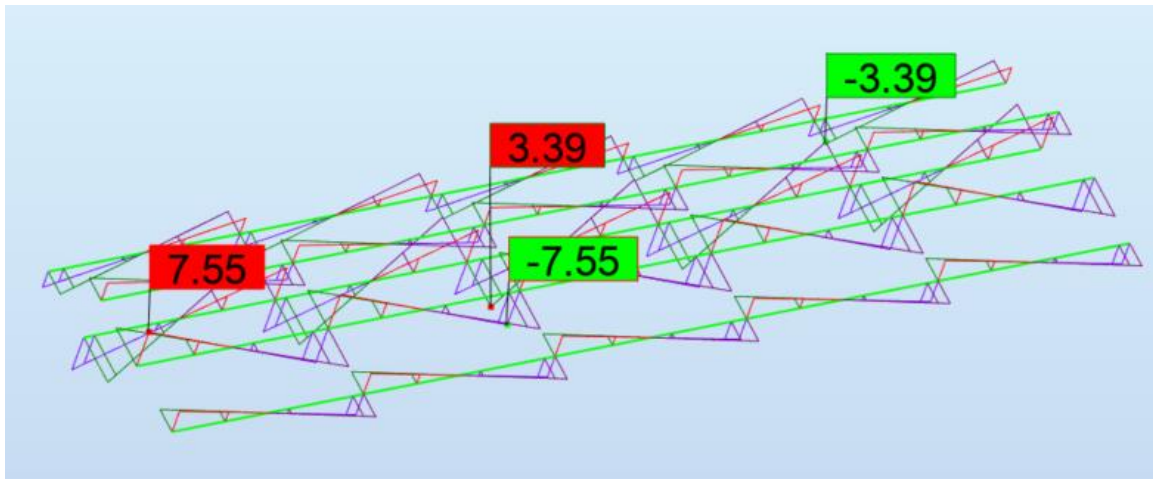
5. Statički proračun

Statički proračun sila konstrukcije nadstrešnice proveden je u programu Robot Structural Analysis Professional.

5.1. Dijagrami unutarnjih sila za podrožnice

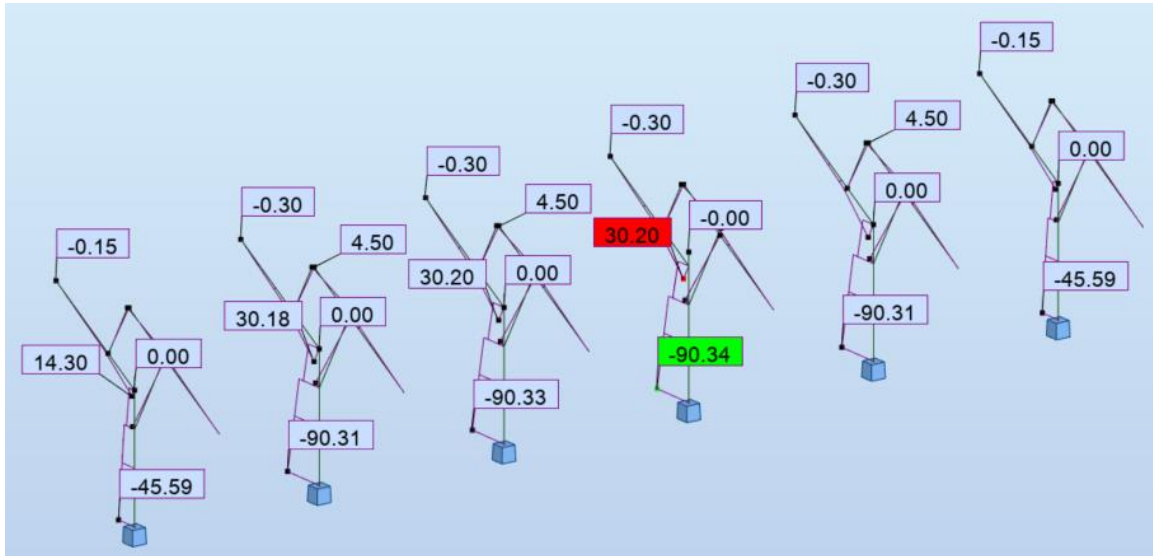


Slika 19. Dijagrami momenta savijanja podrožnica za kombinaciju 106 graničnog stanja nosivosti.

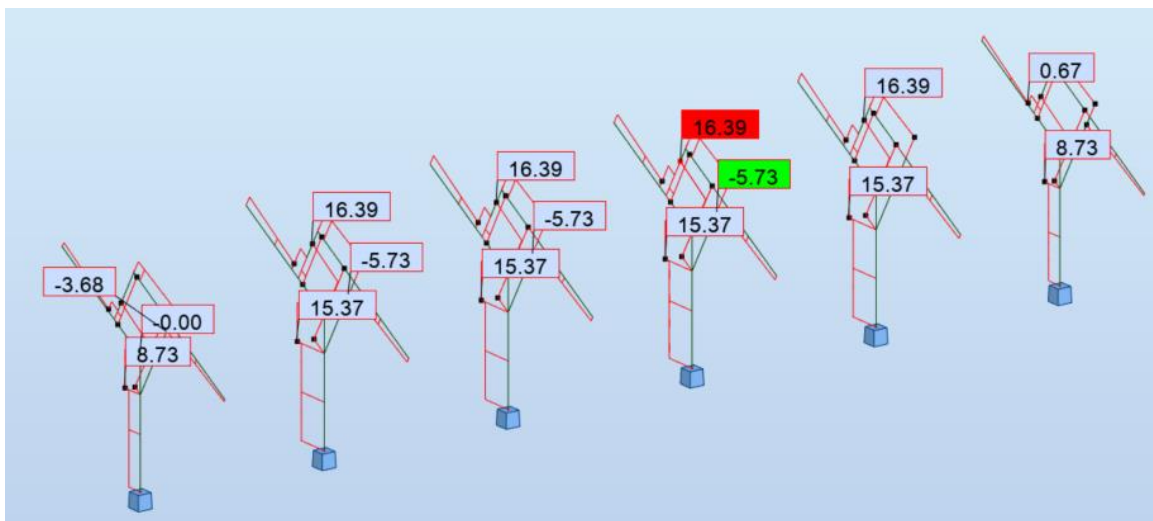


Slika 20. Dijagrami poprečnih sila podrožnica za kombinaciju 106 graničnog stanja nosivosti.

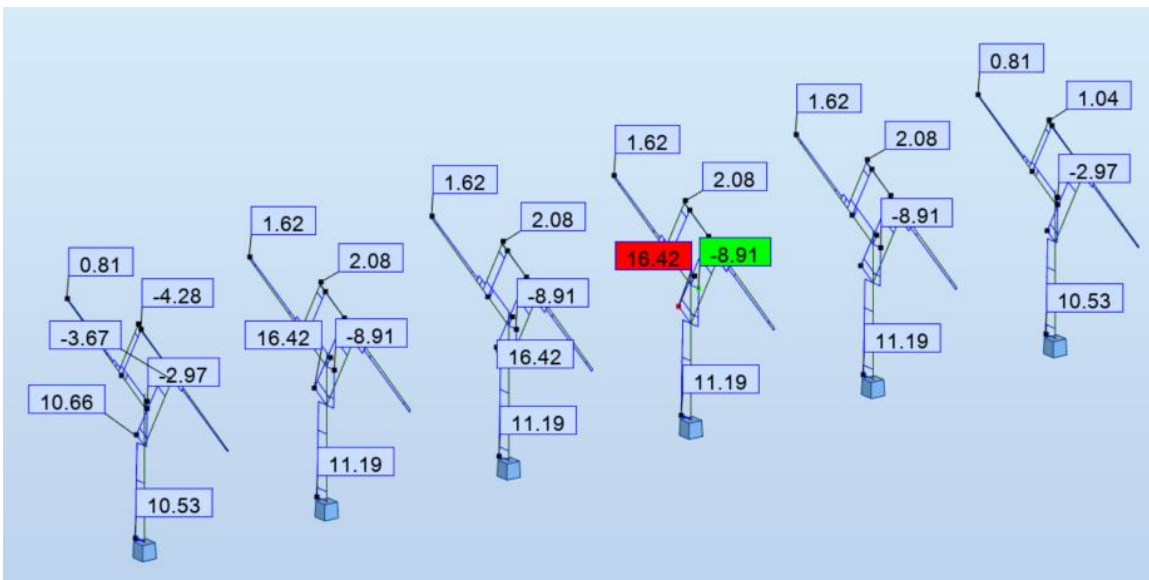
5.2. Dijagrami unutarnjih sila za GNK



Slika 21. Dijagrami momenta savijanja za GNK za kombinaciju 116 graničnog stanja nosivosti.



Slika 22. Dijagrami poprečnih sila za GNK za kombinaciju 116 graničnog stanja nosivosti.

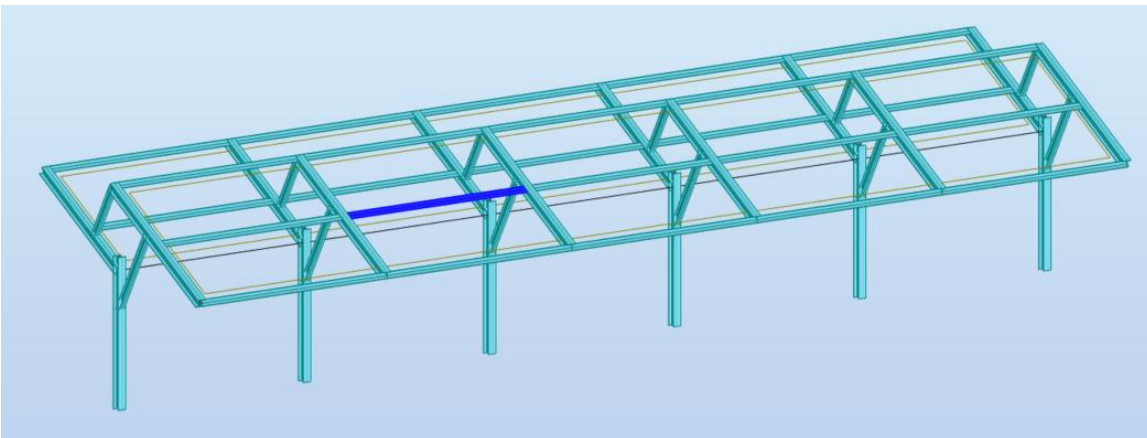


Slika 23. Dijagrami uzdužnih sila za GNK za kombinaciju 116 graničnog stanja nosivosti.

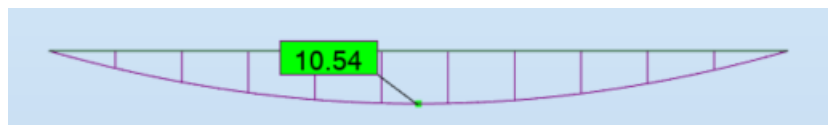
6. Dimenzioniranje glavnih elemenata konstrukcije za granično stanje nosivosti

6.1. Dimenzioniranje podrožnice

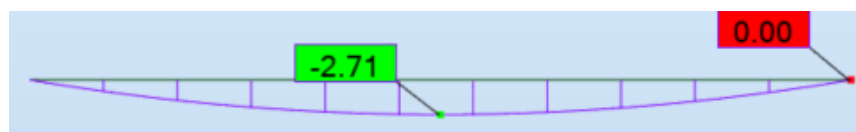
Za podrožnicu odabran je vruće valjani kvadratni cjevasti profil dimenzije 120 x 120 x 8 mm.



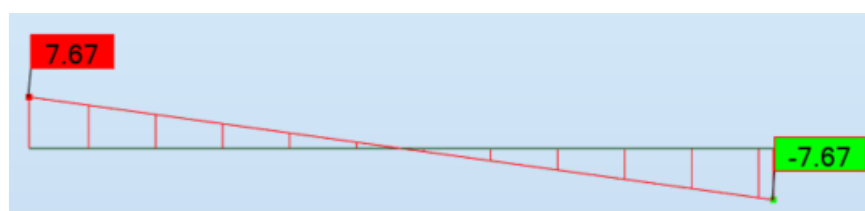
Slika 24. Položaj najopterećenije podrožnice.



Slika 25. Vrijednost momenta savijanja M_y podrožnice. Za kombinaciju 113



Slika 26. Vrijednost momenta savijanja M_z podrožnice. Za kombinaciju 113

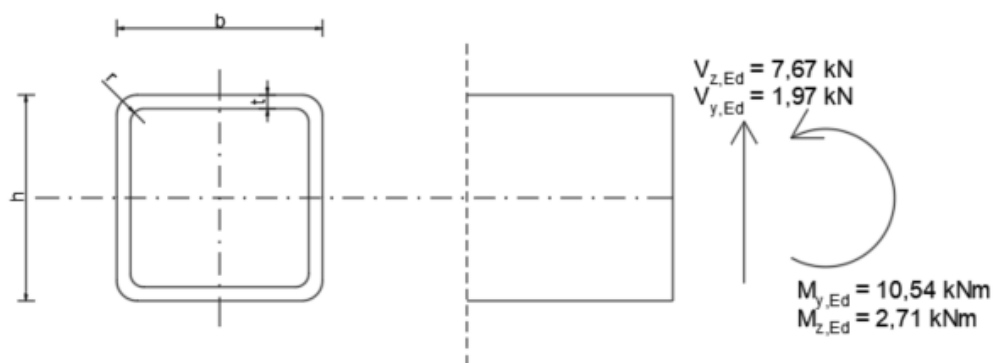


Slika 27. Vrijednost poprečne sile V_z podrožnice. Za kombinaciju 113



Slika 28. Vrijednost poprečne sile V_y podrožnice. Za kombinaciju 113

Provjera otpornosti poprečnog presjeka 120x120x8 mm



Slika 29. Sile i momenti koji djeluju na poprečni presjek podrožnice.

Karakteristike poprečnog presjeka		
h	120	mm
t	8	mm
r	8	mm
A	35,2	cm ²
I _y	726	cm ⁴
I _z	726	cm ⁴
W _{pl,y}	146	cm ³
W _{pl,z}	146	cm ³
I _t	1160	cm ⁴
I _w	6,53	cm ⁶
I _z	726	cm ⁴

Karakteristike čelika S235		
E	21000	kN/cm ²
G	8077	kN/cm ²
v	0,3	
ρ	7850	kg/m ³
f _y	235	N/mm ²
f _u	360	N/mm ²

Klasifikacija poprečnog presjeka:

unutrašnji tlačni elementi			
klasa	savijanje	tlak	savijanje i tlak
<i>raspodjela naprezanja po elementu (tlak pozitivivan)</i>			
1	$\frac{c}{t} \leq 72\epsilon$	$\frac{c}{t} \leq 33\epsilon$	za $\alpha > 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ za $\alpha \leq 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$
2	$\frac{c}{t} \leq 83\epsilon$	$\frac{c}{t} \leq 38\epsilon$	za $\alpha > 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ za $\alpha \leq 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$
<i>raspodjela naprezanja po elementu (tlak pozitivivan)</i>			
3	$\frac{c}{t} \leq 124\epsilon$	$\frac{c}{t} \leq 42\epsilon$	za $\psi > -1$: $\frac{c}{t} \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ za $\psi \leq -1$: $\frac{c}{t} \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$
* $\psi \leq -1$ primjenjuje se u slučajevima kada je tlačno naprezanje $\sigma \leq f_y$ ili kada je vlačna deformacija $\epsilon_y > f_y/E$			

Tablica 2. Klasifikacija unutrašnjih tlačnih elemenata.

Provjera hrpta:

Uvjet za klasu 1:

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{fy}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\frac{h - 2t_f - 2r}{t_w} \leq 72 \times 1$$

$$\frac{120 - 2 \times 8 - 2 \times 8}{8} \leq 72$$

11 < 72 → Uvjet zadovoljen. Hrpat je klasa 1

Provjera pojasnice:

Uvjet za klasu 1:

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{fy}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\frac{h - 2t_f - 2r}{t_w} \leq 33 \times 1$$

$$\frac{120 - 2 \times 8 - 2 \times 8}{8} \leq 33$$

11 < 33 → Uvjet zadovoljen. Pojasnica je klasa 1

Poprečni presjek je klasa 1

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje:

Za klasu 1 vrijedi

Savijanje oko osi y

$$M_{C,RD} = \frac{w_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{146 \times 23,5}{1} = 3431 \text{ kNcm} = 34,31 \text{ kNm}$$

Uvjet nosivosti:

$$M_{y,Ed} \leq M_{c,Rd}$$

10,54 kNm < 34,31 kNm Uvjet je zadovoljen.

Iskoristivost = 10,54/34,31 = 31 %

Savijanje oko osi z

$$M_{c,Rd} = \frac{w_{pl,z} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{146 \times 23,5}{1} = 3431 \text{ kNcm} = 34,31 \text{ kNm}$$

Uvjet nosivosti:

$$M_{z,Ed} \leq M_{c,Rd}$$

2,71 kNm < 34,31 kNm Uvjet je zadovoljen.

Iskoristivost = 2,71/34,31 = 7 %

Otpornost dvoosnog savijanja

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{c,Rd}} \right)^2 + \frac{M_{z,Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$0,1 + 0,07 \leq 1$$

0,17 < 1 Uvjet je zadovoljen.

$W_{pl} = 146 \text{ cm}^3$ – plastični moment otpora u smjeru y i z

$f_y = 23,5 \text{ kN/cm}^2$ – granica popuštanja čelika

$M_{y,Ed} = 10,54 \text{ kNm}$ – proračunski moment savijanja oko osi y

$M_{z,Ed} = 2,71 \text{ kNm}$ – proračunski moment savijanja oko osi z

Otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu

Provjera izbočivanja hrpta

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \times \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$\frac{h - 2t_f}{8} \leq 72 \times \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$\frac{104}{8} \leq 72 \times \frac{1}{1,2}$$

13 < 60 → Nema izbočavanja hrpta (nisu potrebne ukrute)

$h_w = 104$ mm - visina hrpta između pojasnica

$t = 8$ mm - debljina stijenke profila

$\eta = 1,2$ - faktor posmične površine (vrijednost 1,2 za valjane profile)

$\gamma_{M,0} = 1,0$ - parcijalni faktor sigurnosti

Posmična otpornost poprečnog presjeka

U smjeru osi z

$$V_{pl,Rd} = A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{\gamma_{M0}} = 17,6 \frac{23,5}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1} = 238,79 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} \leq V_{pl,Rd}$$

7,67 kN < 238,79 kN Uvjet je zadovoljen.

Iskoristivost = 7,67/238,79 = 3 %

U smjeru osi y

$$V_{pl,Rd} = A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{\gamma_{M0}} = 17,6 \frac{23,5}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1} = 238,79 \text{ kN}$$

$$V_{y,Ed} \leq V_{pl,Rd}$$

1,97 kN < 238,79 kN Uvjet je zadovoljen.

Iskoristivost = 1,97/238,79 = 1 %

$A_v = A \cdot b / (b+h) = 35,2 \cdot 12 / (12+12) = 17,6$ – posmična površina u smjeru osi y i z

$A = 35,2 \text{ cm}^2$ – površina poprečnog presjeka

$h = 12 \text{ cm}$ – visina profila

$b = 12 \text{ cm}$ – širina profila

Interakcija posmika i savijanja

U smjeru osi z:

Provjera razine poprečne sile:

$$V_{z,Ed} \leq 0,5 V_{pl,Rd}$$

$$7,67 \text{ kN} < 119,40 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen, nema redukcije plastične otpornosti na savijanje.

U smjeru osi y:

Provjera razine poprečne sile:

$$V_{y,Ed} \leq 0,5 V_{pl,Rd}$$

$$1,97 \text{ kN} < 119,40 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen, nema redukcije plastične otpornosti na savijanje.

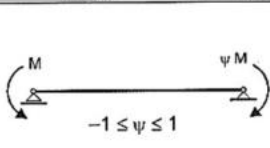
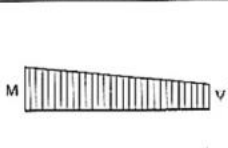
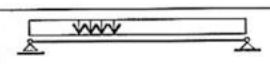

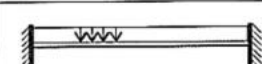

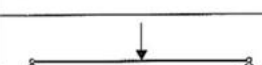



Otpornost elementa na bočno-torzijsko izvijanje:

Elastični kritični moment

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 \times G \times I_T}{\pi^2 EI_z}} + (C_2 \times z_g)^2 - C_2 \times z_g \right]$$

$C_1 = 1,13$ – faktor koji ovisi o uvjetima na ležajevima i vrsti opterećenja.

$C_2 = 0,45$ – faktor koji ovisi u uvjetima na ležajevima i vrsti opterećenja

OPTEREĆENJE I UVJETI OSLANJANJA	DIJAGRAM MOMENATA SAVIJANJA	Vrijednost faktora			
		C ₁	C ₂	C ₃	
 $-1 \leq \psi \leq 1$		ψ			
		+1,00	1,00	1,00	
		+0,75	1,14	0,99	
		+0,50	1,31	0,99	
		+0,25	1,52	0,98	
		+0,00	1,77	0,94	
		-0,25	2,05	0,85	
		-0,50	2,33	0,68	
		-0,75	2,57	0,37	
		-1,00	2,55	0,00	
			1,13	0,45	0,52
			2,57	1,55	0,75
			1,35	0,63	1,73
			1,68	1,64	2,64

Tablica 3. Faktori C_i za izračun bočno torzijskog izvijanja.

$k = k_w = 1,0$ – faktori dužine izvijanja

$z_g = h/2 = 12/2 = 6$ cm – razmak između točke djelovanja opterećenja i centra posmika

$I_z = 726$ cm⁴ – moment tromosti oko osi z

$I_t = 1160$ cm⁴ – torzijska konstanta

$I_w = 6,53$ cm⁴ – konstanta krivljenja

$E = 21000$ kN/cm² – modul elastičnosti

$G = 8077$ kN/cm² – modul posmika

$$M_{cr} = 1,13 \frac{\pi^2 21000 \times 726}{(1 \times 550)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \times \frac{6,53}{726} + \frac{(550)^2 \times 8077 \times 1160}{\pi^2 21000 \times 726} + (0,45 \times 6)^2} - 0,45 \times 6 \right]$$

$$M_{cr} = 75640,5 \text{ kNcm} = 756,41 \text{ kNm}$$

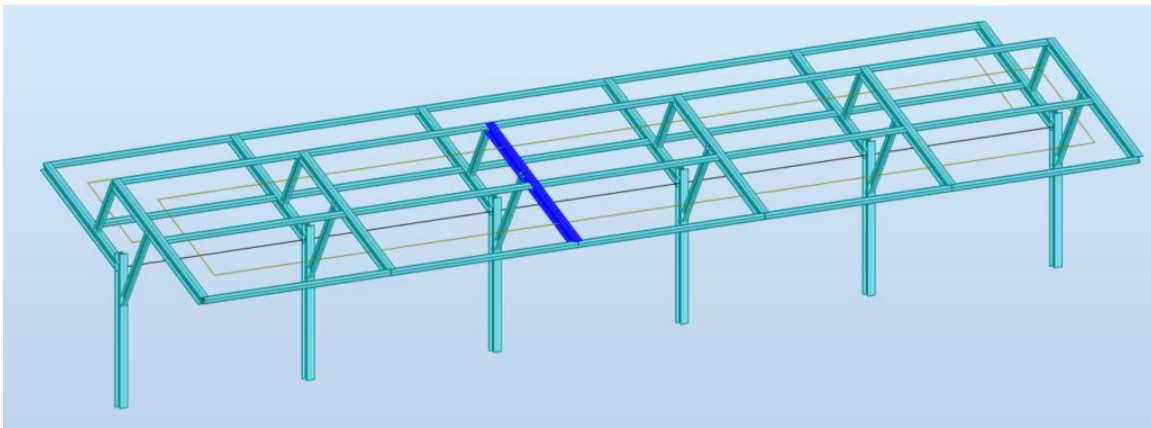
Vitkost elementa:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{146 \times 23,5}{75640,5}} = 0,21$$

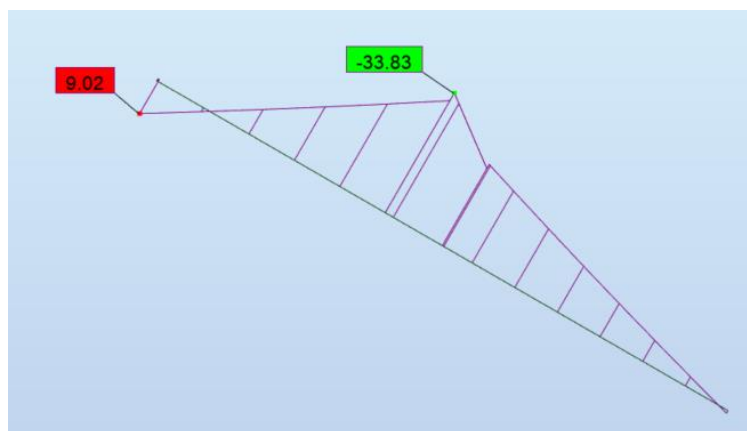
Vitkost elementa je manja od 0,4 – nosač je zdepast te nema bočno-torzijskog izvijanja, nije potreban proračun.

6.2. Dimenzioniranje desne kose prečke

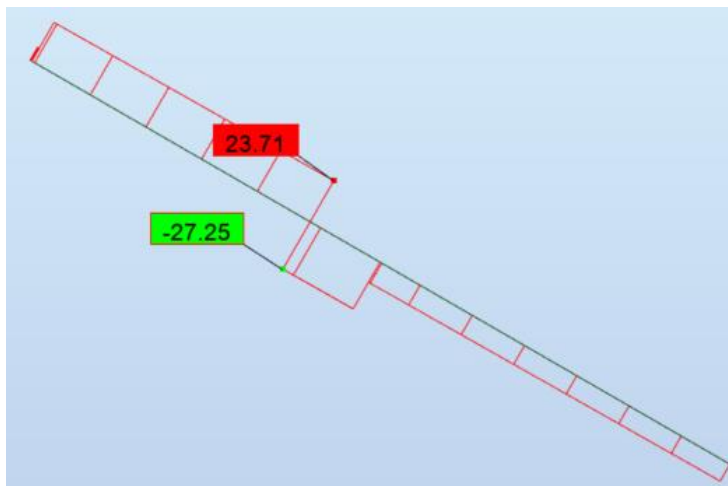
Za desnu kosu prečku odabran je vruće valjani HEB 220 profil.



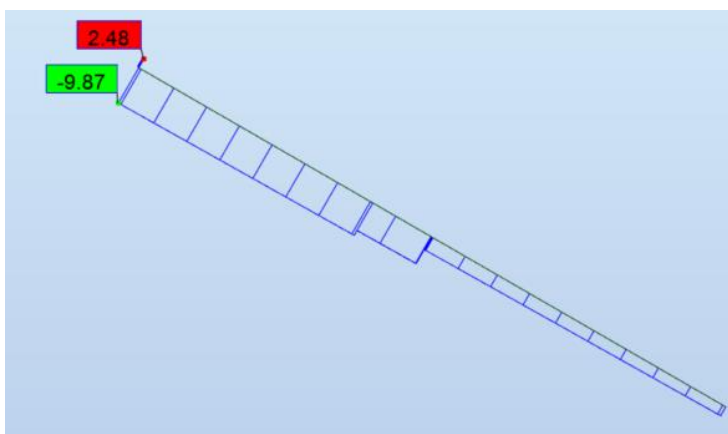
Slika 30. Položaj najopterećenije desne kose prečke.



Slika 31. Vrijednosti momenta savijanja M_y desne kose prečke za kombinaciju 113.

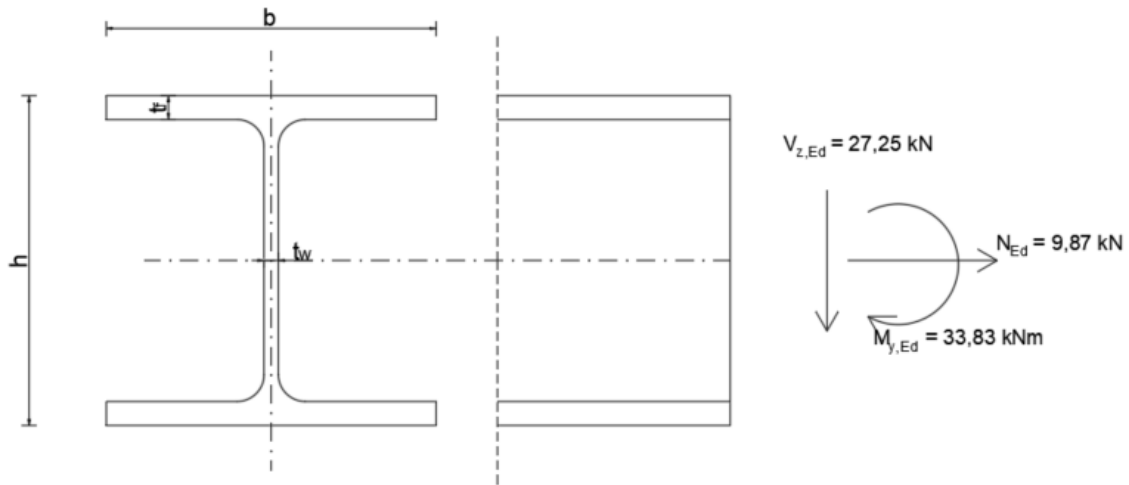


Slika 32. Vrijednosti poprečnih sila V_z desne kose prečke za kombinaciju 113.



Slika 33. Vrijednosti uzdužnih vlačnih sila desne kose prečke za kombinaciju 113.

Otpornost poprečnog presjeka



Slika 34. Prikaz momenta i sila koji djeluju na poprečni presjek desne kose prečke.

Karakteristike poprečnog presjeka		
h	220	mm
b	220	mm
t_f	16	mm
t_w	9,5	mm
r	18	mm
A	91	cm ²
I_y	8091	cm ⁴
I_z	2843	cm ⁴
$W_{pl,y}$	827	cm ³
I_t	76,57	cm ⁴
I_w	295400	cm ⁶

Karakteristike čelika S235		
E	21000	kN/cm ²
G	8077	kN/cm ²
v	0,3	
ρ	7850	kg/m ³
f_y	235	N/mm ²
f_u	360	N/mm ²

Klasifikacija poprečnog presjeka:

Provjera hrpta

Uvjet za klasu 1:

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{fy}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\frac{h - 2t_f - 2r}{t_w} \leq 72 \times 1$$

$$\frac{220 - 2 \times 16 - 2 \times 18}{9,5} \leq 72$$

16 < 72 → Uvjet zadovoljen. Hrbat je klasa 1

Provjera pojasnice

Uvjet za klasu 1:

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{fy}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\frac{\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r}{t_f} \leq 9 \times 1$$

$$\frac{110 - 4,75 - 18}{16} \leq 9$$

5,45 < 9 → Uvjet zadovoljen. Pojasnica je klasa 1

Poprečni presjek je klasa I

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje:

Za klasu 1 vrijedi

Savijanje oko osi y

$$M_{c,RD} = \frac{w_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{827 \times 23,5}{1} = 19434,5 \text{ kNcm} = 194,35 \text{ kNm}$$

Uvjet nosivosti:

$$M_{y,Ed} \leq M_{c,Rd}$$

$$33,38 \text{ kNm} < 194,35 \text{ kNm} \quad \text{Uvjet je zadovoljen.}$$

$$\text{Iskoristivost} = 33,38/194,35 = 17 \%$$

$W_{pl,y} = 827 \text{ cm}^3$ – plastični moment otpora u smjeru osi y

$f_y = 23,5 \text{ kN/cm}^2$ – granica popuštanja čelika

$M_{y,Ed} = 33,38 \text{ kNm}$ – proračunski moment savijanja oko osi y

Otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu

Provjera izbočavanja hrpta

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \times \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$\frac{h - 2t_f}{9,5} \leq 72 \times \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$\frac{188}{9,5} \leq 72 \times \frac{1}{1,2}$$

$$19,79 < 60 \quad \rightarrow \text{Nema izbočavanja hrpta (nisu potrebne ukrute)}$$

$h_w = 188 \text{ mm}$ – visina hrpta između pojasnica

$t_w = 9,5 \text{ mm}$ – debljina hrpta profila

$\eta = 1,2$ – faktor posmične površine (vrijednost 1,2 za valjane profile)

$\gamma_{M,0} = 1,0$ – parcijalni faktor sigurnosti

Posmična otpornost poprečnog presjeka

U smjeru osi z

$$V_{pl,Rd} = A_V \frac{f_y}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{\gamma_{M0}} = 27,88 \frac{23,5}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1} = 378,27 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} \leq V_{pl,Rd}$$

27,25 kN < 378,27 kN Uvjet je zadovoljen.

Iskoristivost = 27,25/378,27 = 7 %

$$A_V = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_V = 91 - 2 \cdot 22 \cdot 1,6 + (0,95 + 2 \cdot 1,8) \cdot 1,6 \geq 1,2 \cdot 18,8 \cdot 0,95$$

$$A_V = 27,88 \text{ cm}^2 \geq 21,43 \text{ cm}^2$$

$A_V = 27,88 \text{ cm}^2$ - posmična površina u smjeru osi z.

Otpornost presjeka na vlak

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{91 \times 23,5}{1} = 2138,5 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti: $N_{Ed} \leq N_{pl,Rd} \rightarrow 9,87 \text{ kN} < 2138,5 \text{ kN}$ Uvjet je zadovoljen.

Iskoristivost 9,87/2138,5 = 1%

Interakcija posmika i savijanja

Provjera razine poprečne sile:

$$V_{z,Ed} \leq 0,5 V_{pl,Rd}$$

$$27,25 \text{ kN} < 189,14 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen, nema redukcije plastične otpornosti na savijanje.

Otpornost elementa na bočno-torzijsko izvijanje:

Elastični kritični moment

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 \times G \times I_T}{\pi^2 EI_z}} \right]$$

$C_1 = 1,77$ – faktor koji ovisi o uvjetima na ležajevima i vrsti opterećenja.

$C_2 = 0$ – faktor koji ovisi u uvjetima na ležajevima i vrsti opterećenja

$k = k_w = 1,0$ – faktori dužine izvijanja

$z_g = h/2 = 22/2 = 11$ cm – razmak između točke djelovanja opterećenja i centra posmika

$I_z = 2843$ cm⁴ – moment tromosti oko osi z

$I_t = 76,57$ cm⁴ – torzijska konstanta

$I_w = 295400$ cm⁴ – konstanta krivljenja

$E = 21000$ kN/cm² – modul elastičnosti

$G = 8077$ kN/cm² – modul posmika

$$M_{cr} = 1,77 \frac{\pi^2 \times 21000 \times 2843}{(445)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \times \frac{295400}{2843} + \frac{(445)^2 \times 8077 \times 76,57}{\pi^2 21000 \times 2843}} \right]$$

$M_{cr} = 92992,9$ kNcm = 929,93 kNm

Vitkost elementa:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{827 \times 23,5}{92992,9}} = 0,46$$

Faktor imperfekcije α_{LT}

Poprečni presjek	Ograničenja	Krivulja izvijanja
Valjani I presjeci	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Zavareni I presjeci	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Ostali presjeci	-	d

Tablica 4. Krivulja izvijanja

$h/b = 1 \rightarrow$ Krivulja izvijanja a \rightarrow faktor imperfekcije $\alpha_{LT} = 0,21$

Bočno-torzijsko izvijanje:

$$\Phi_{LT} = 0,5 [1 + \alpha_{LT}(\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2] = 0,5[1 + 0,21(0,46 - 0,2) + 0,46^2] = 0,63$$

Faktor redukcije:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = \frac{1}{0,63 + \sqrt{0,63^2 - 0,46^2}} = 0,94 < 1$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{w_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,94 \frac{827 \times 23,5}{1,1} = 16607,66 \text{ kNm} = 166,08 \text{ kNm}$$

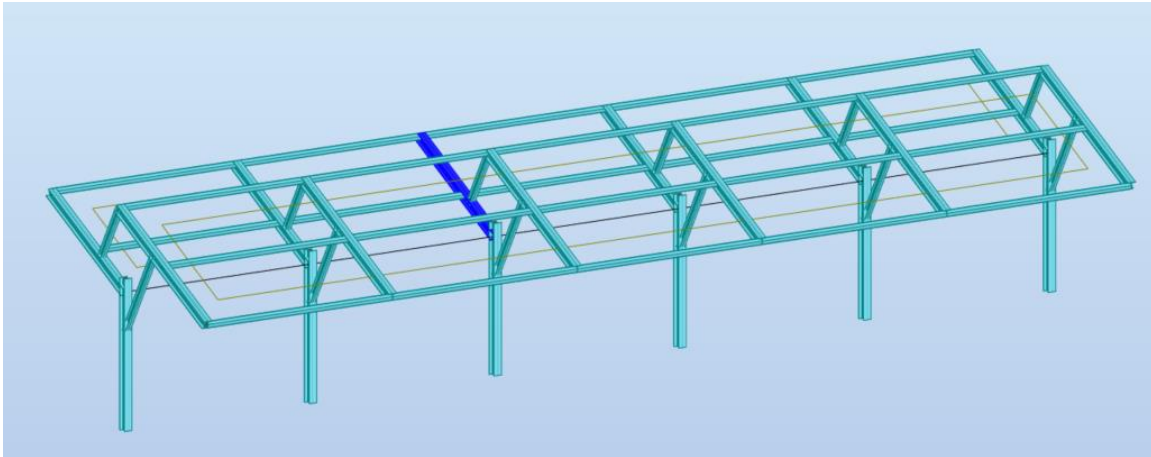
Uvjet nosivosti:

$$M_{y,Ed} \leq M_{b,Rd} \rightarrow 33,38 < 166,08 \rightarrow \text{nema bočno-torzijskog izvijanja}$$

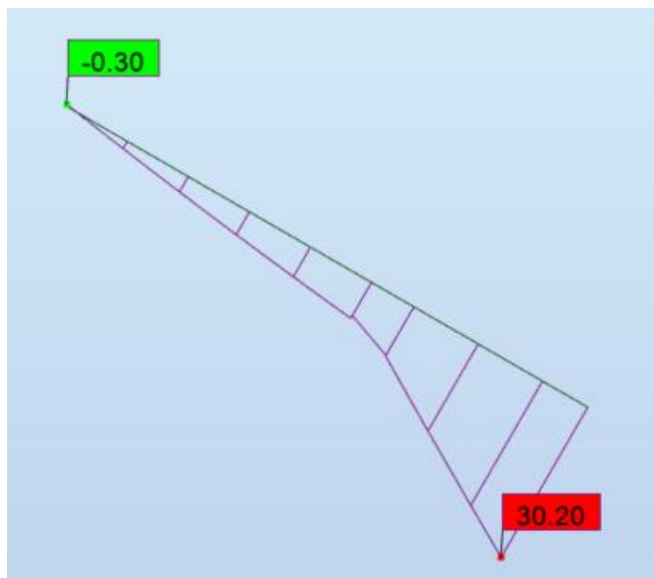
Iskoristivost = 20 %

6.3. Dimenzioniranje lijeve kose prečke

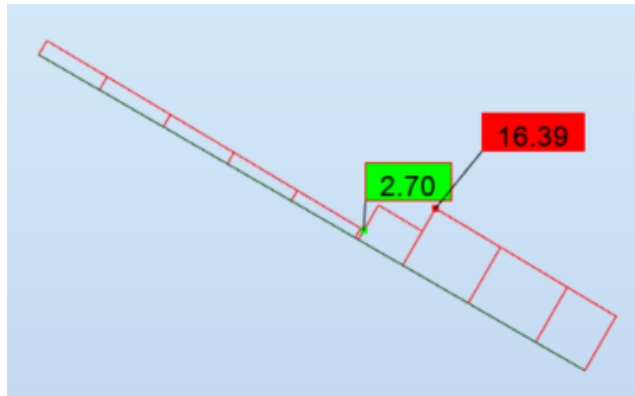
Za lijevu kosu prečku odabran je vruće valjani HEB 220 profil.



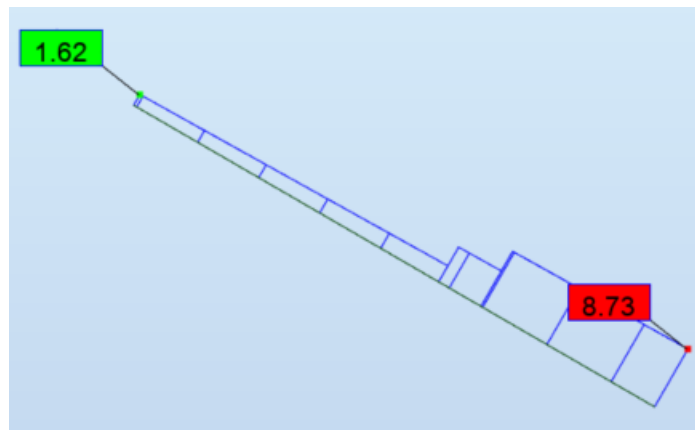
Slika 35. Položaj najopterećenije lijeve kose prečke.



Slika 36. Vrijednosti momenta savijanja M_y lijeve kose prečke za kombinaciju 116.

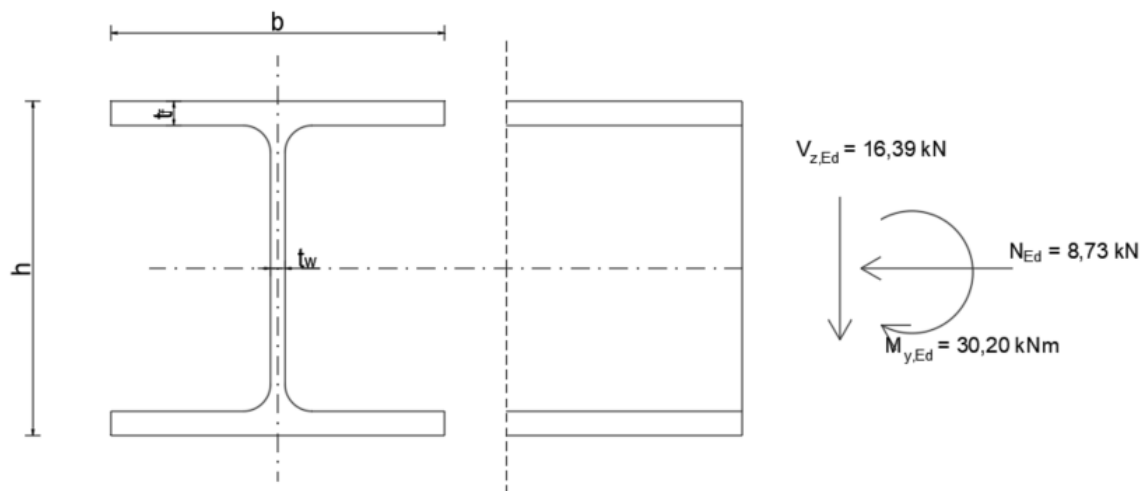


Slika 37. Vrijednosti poprečnih sila V_z lijeve kose prečke za kombinaciju 116.



Slika 38. Vrijednosti uzdužnih tlačnih sila lijeve kose prečke za kombinaciju 116.

Otpornost poprečnog presjeka



Slika 39. Prikaz momenta i sila koji djeluju na poprečni presjek lijeve kose prečke.

Karakteristike poprečnog presjeka		
h	220	mm
b	220	mm
t _f	16	mm
t _w	9,5	mm
r	18	mm
A	91	cm ²
I _y	8091	cm ⁴
I _z	2843	cm ⁴
W _{pl,y}	827	cm ³
I _t	76,57	cm ⁴
I _w	295400	cm ⁶

Karakteristike čelika S235		
E	21000	kN/cm ²
G	8077	kN/cm ²
v	0,3	
ρ	7850	kg/m ³
f _y	235	N/mm ²
f _u	360	N/mm ²

Klasifikacija poprečnog presjeka:

Provjera hrpta:

Uvjet za klasu 1:

$$\frac{c}{t} \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$a = \frac{N_{Ed}}{\frac{2 \times t_w \times f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{8,73}{\frac{2 \times 0,95 \times 23,5}{1}} = 0,20 \text{ cm}$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \times \left(\frac{d}{2} + a \right) = \frac{1}{152} \times \left(\frac{152}{2} + 2 \right) = 0,51$$

$$\frac{152}{9,5} \leq \frac{36}{0,51}$$

16 < 70,59 → Uvjet zadovoljen. Hrbat je klasa 1.

a = 0,20 cm – visina hrpta na koju djeluje moment savijanja i uzdužna tlačna sila.

N_{Ed} = 8,73 kN – uzdužna tlačna sila.

t_w = 9,5 mm – debljina hrpta.

f_y = 23,5 kN/cm² – granica popuštanja čelika.

γ_{M0} = 1,0 – parcijalni faktor sigurnosti.

Provjera pojasnice:

vanjski tlačni elementi			
		savijanje i tlak	
klasa	tlak	rub u tlaku	rub u vlaku
1	$\frac{c}{t} \leq 9\epsilon$	$\frac{c}{t} \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$\frac{c}{t} \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$\frac{c}{t} \leq 10\epsilon$	$\frac{c}{t} \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$\frac{c}{t} \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
3	$\frac{c}{t} \leq 14\epsilon$	$\frac{c}{t} \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$	

Tablica 5. Klasifikacija vanjskih tlačnih elemenata.

Uvjet za klasu 1:

$$\frac{c}{t} \leq 9\epsilon$$

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{fy}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\frac{\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r}{t_f} \leq 9 \times 1$$

$$\frac{110 - 4,75 - 18}{16} \leq 9$$

5,45 < 9 → Uvjet zadovoljen. Pojasnica je klasa 1

Poprečni presjek je klasa I

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje:

Za klasu 1 vrijedi

Savijanje oko osi y

$$M_{c,RD} = \frac{w_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{827 \times 23,5}{1} = 19434,5 \text{ kNcm} = 194,35 \text{ kNm}$$

Uvjet nosivosti:

$$M_{y,Ed} \leq M_{c,Rd}$$

30,20 kNm < 194,35 kNm Uvjet je zadovoljen.

Iskoristivost = 30,20/194,35 = 16 %

$w_{pl,y} = 827 \text{ cm}^3$ – plastični moment otpora u smjeru osi y

$f_y = 23,5 \text{ kN/cm}^2$ – granica popuštanja čelika

$M_{y,Ed} = 30,20 \text{ kNm}$ – proračunski moment savijanja oko osi y

Otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu

Provjera izbočavanja hrpta

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \times \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$\frac{h - 2t_f}{9,5} \leq 72 \times \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$\frac{188}{9,5} \leq 72 \times \frac{1}{1,2}$$

19,79 < 60 → Nema izbočavanja hrpta (nisu potrebne ukrute)

$h_w = 188 \text{ mm}$ – visina hrpta između pojasnica

$t_w = 9,5 \text{ mm}$ – debljina hrpta profila

$\eta = 1,2$ – faktor posmične površine (vrijednost 1,2 za valjane profile)

$\gamma_{M,0} = 1,0$ – parcijalni faktor sigurnosti

Posmična otpornost poprečnog presjeka

U smjeru osi z

$$V_{pl,Rd} = A_V \frac{f_y}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{\gamma_{M0}} = 27,88 \frac{23,5}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1} = 378,27 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} \leq V_{pl,Rd}$$

16,39 kN < 378,27 kN Uvjet je zadovoljen.

Iskoristivost = 16,39/378,27 = 4 %

$$A_V = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_V = 91 - 2 \cdot 22 \cdot 1,6 + (0,95 + 2 \cdot 1,8) \cdot 1,6 \geq 1,2 \cdot 18,8 \cdot 0,95$$

$$A_V = 27,88 \text{ cm}^2 \geq 21,43 \text{ cm}^2$$

$A_V = 27,88 \text{ cm}^2$ - posmična površina u smjeru osi z.

Otpornost presjeka na tlak

$$N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{91 \times 23,5}{1} = 2138,5 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti: $N_{Ed} \leq N_{c,Rd} \rightarrow 8,73 \text{ kN} < 2138,5 \text{ kN}$ Uvjet je zadovoljen.

Iskoristivost 8,73/2138,5 = 1%

Interakcija posmika i savijanja

Provjera razine poprečne sile:

$$V_{z,Ed} \leq 0,5 V_{pl,Rd}$$

$$27,25 \text{ kN} < 189,14 \text{ kN}$$

Interakcija tlaka i savijanja

$$N_{Ed} \leq 0,25 N_{pl,Rd}$$

$$8,73 \text{ kN} < 534,63 \text{ kN} \rightarrow \text{Uvjet je zadovoljen.}$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 \times h_w \times t_w \times f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$8,73 \leq \frac{0,5 \times 18,8 \times 0,95 \times 23,5}{1,0}$$

$$8,73 \text{ kN} \leq 209,86 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen, nema redukcije plastične otpornosti na savijanje.

Otpornost elementa na bočno-torzijsko izvijanje:

Elastični kritični moment

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(kL)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 \times G \times I_T}{\pi^2 E I_z}} \right]$$

$C_1 = 1,77$ – faktor koji ovisi o uvjetima na ležajevima i vrsti opterećenja.

$C_2 = 0$ – faktor koji ovisi u uvjetima na ležajevima i vrsti opterećenja

$k = k_w = 1,0$ – faktori dužine izvijanja

$z_g = h/2 = 22/2 = 11 \text{ cm}$ – razmak između točke djelovanja opterećenja i centra posmika

$I_z = 2843 \text{ cm}^4$ – moment tromosti oko osi z

$I_t = 76,57 \text{ cm}^4$ – torzijska konstanta

$I_w = 295400 \text{ cm}^4$ – konstanta krivljenja

$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ – modul elastičnosti

$G = 8077 \text{ kN/cm}^2$ – modul posmika

$$M_{cr} = 1,77 \frac{\pi^2 \times 21000 \times 2843}{(380)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \times \frac{295400}{2843} + \frac{(380)^2 \times 8077 \times 76,57}{\pi^2 21000 \times 2843}} \right]$$

$$M_{cr} = 115442,5 \text{ kNcm} = 1154,43 \text{ kNm}$$

Vitkost elementa:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{827 \times 23,5}{115442,5}} = 0,41$$

Faktor imperfekcije α_{LT}

$h/b = 1 \rightarrow$ Krivulja izvijanja a \rightarrow faktor imperfekcije $\alpha_{LT} = 0,21$

Bočno-torzijsko izvijanje:

$$\Phi_{LT} = 0,5 [1 + \alpha_{LT}(\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2] = 0,5[1 + 0,21(0,41 - 0,2) + 0,41^2] = 0,61$$

Faktor redukcije:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = \frac{1}{0,61 + \sqrt{0,61^2 - 0,41^2}} = 0,94 < 1$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{w_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,94 \frac{827 \times 23,5}{1,1} = 16607,66 \text{ kNcm} = 166,08 \text{ kNm}$$

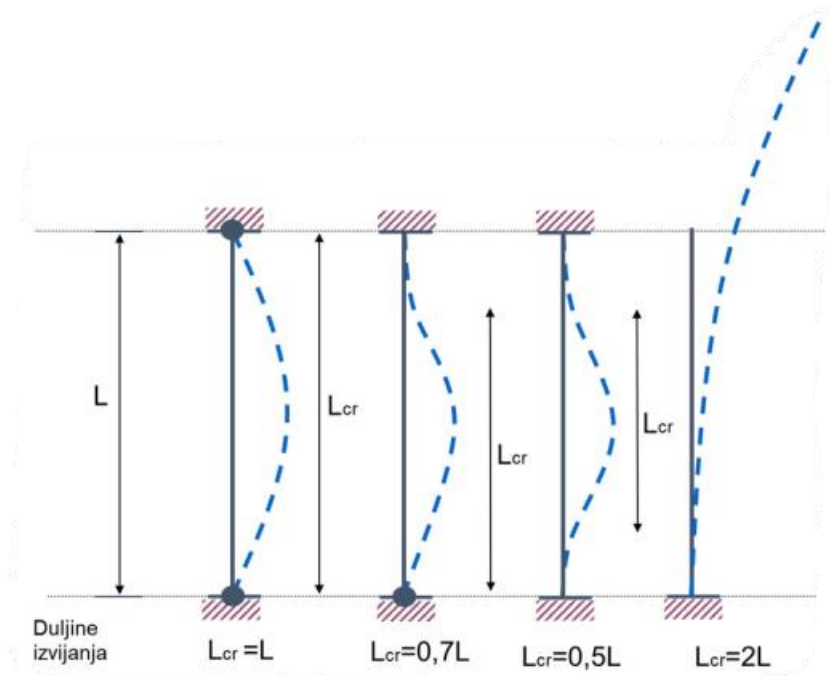
Uvjet nosivosti:

$M_{y,Ed} \leq M_{b,Rd} \rightarrow 30,20 < 166,08 \rightarrow$ nema bočno-torzijskog izvijanja

Iskoristivost = 18 %

Otpornost elementa na izvijanje:

Duljina izvijanja L_{cr} :



Slika 40. Duljine izvijanja za različite slučajeve oslanjanja.

Duljina izvijanja elementa lijeve kose prečke iznosi: $L_{cr,y} = 2,20 \text{ m}$, $L_{cr,z} = 2,20 \text{ m}$

Otpornost na izvijanje oko osi y-y

Kritična sila izvijanja

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 21000 \times 8091}{220^2} = 34647,82 \text{ kN}$$

$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ – modul elastičnosti.

$I_y = 8091 \text{ cm}^4$ – moment tromosti oko osi y.

$L_{cr} = 220 \text{ cm}$ – kritična duljina izvijanja.

Vitkosti elementa

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{91 \times 23,5}{34647,82}} = 0,25$$

Faktor imperfekcije α

Poprečni presjeci		Ograničenja	Izvijanje oko osi	Linija izvijanja		
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
Valjani presjeci		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40$ mm	y-y	a	a_0
			$40 < t_f \leq 100$	z-z	b	a_0
			$t_f \leq 100$ mm	y-y	b	a
			$t_f > 100$ mm	z-z	c	a
Zavareni I profili		$t_f \leq 40$ mm	y-y	b	b	
			z-z	c	c	
Šuplji presjeci		vruće dogotovljeni	bilo koje	a	a_0	
		hladno oblikovani	bilo koje	c	c	
Zavareni sandu-časti presjeci		općenito (osim kao ispod)	bilo koje	b	b	
		debljina vara: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $b/t_w < 30$	bilo koje	c	c	
U-, T- i puni presjeci			bilo koje	c	c	
L - presjeci			bilo koje	b	b	

Krivulja izvijanja	a_0	a	b	c	d
Faktor imperfekcije α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Tablica 6. Krivulja izvijanja.

$h/b = 1, t_f < 100$ mm \rightarrow Krivulja izvijanja b \rightarrow faktor imperfekcije $\alpha = 0,34$

Izvijanje:

$$\Phi_y = 0,5 [1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 0,5[1 + 0,34(0,25 - 0,2) + 0,25^2] = 0,54$$

Faktor redukcije:

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,54 + \sqrt{0,54^2 - 0,25^2}} = 0,98 < 1$$

Otpornost elementa na izvijanje

$$N_{b,Rd} = \chi_y \frac{A \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,98 \frac{91 \times 23,5}{1,1} = 1905,21 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \rightarrow 8,79 \text{ kN} < 1905,21 \text{ kN} \rightarrow \text{nema izvijanja}$$

Iskoristivost = 1 %

Otpornost na izvijanje oko osi z-z

Kritična sila izvijanja

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 21000 \times 2843}{220^2} = 12174,48 \text{ kN}$$

E= 21000 kN/cm² – modul elastičnosti.

I_z = 2843 cm⁴ – moment tromosti oko osi z.

L_{cr} = 220 cm – kritična duljina izvijanja.

Vitkosti elementa

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{91 \times 23,5}{12174,48}} = 0,42$$

Faktor imperfekcije α

h/b = 1, t_f < 100 mm → Krivulja izvijanja c → faktor imperfekcije $\alpha = 0,49$

Izvijanje:

$$\Phi_z = 0,5 [1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 0,5[1 + 0,49(0,42 - 0,2) + 0,42^2] = 0,64$$

Faktor redukcije:

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,64 + \sqrt{0,64^2 - 0,42^2}} = 0,89 < 1$$

Otpornost elementa na izvijanje

$$N_{b,Rd} = \chi_z \frac{A \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,89 \frac{91 \times 23,5}{1,1} = 1730,24 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \rightarrow 8,79 \text{ kN} < 1730,24 \text{ kN} \rightarrow \text{nema izvijanja}$$

Iskoristivost = 1 %

Otpornost elementa na izvijanje + bočno-torzijsko izvijanje:

Da bi element zadovoljio traženu otpornost mora zadovoljiti sljedeća dva uvjeta:

Izvijanje u ravnini:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{pl,Rd}} + k_y \frac{C_{my} \times M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \times M_{pl,y,Rd}} \leq 1$$

Izvijanje izvan ravnine:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{pl,Rd}} + k_{LT} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \times M_{pl,y,Rd}} \leq 1$$

Interakcijski faktor k_{ij} određuje se pomoću Metode 2 (Dodatak A u EN 1993-1-1)

Za klase poprečnog presjeka 1 i 2:

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\lambda_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{pl,Rd}} \right) \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{pl,Rd}} \right)$$

$$\lambda_z = 0,42 > 0,4$$

$$k_{zy} = \left(1 - \frac{0,1\lambda_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{pl,Rd}}\right) \geq \left(1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{pl,Rd}}\right)$$

k_{yz} i k_{zz} nije potrebno računati jer jer $M_{z,Ed} = 0$ kNm.

$$C_{my} = C_{mLT} = 0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$$

$$C_{my} = C_{mLT} = 0,6 + 0,4 \cdot 0 = 0,6 \geq 0,4$$

$$k_{LT} = 1 - \frac{0,1\lambda_z \times n_z}{C_{mLT} - 0,25} \geq 1 - \frac{0,1 \times n_z}{C_{mLT} - 0,25}$$

$$n_z = \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{pl,Rd}} = \frac{8,73}{0,89 \times 2138,5} = 0,01$$

$$k_{LT} = 1 - \frac{0,1 \times 0,42 \times 0,01}{0,6 - 0,25} \geq 1 - \frac{0,1 \times 0,01}{0,6 - 0,25}$$

$$k_{LT} = 0,99 \geq 0,99$$

$$k_{yy} = 0,6 \left(1 + (0,25 - 0,2) \frac{8,73}{0,98 \times 2138,5}\right) \leq 0,6 \left(1 + 0,8 \frac{8,73}{0,98 \times 2138,5}\right)$$

$$k_{yy} = 0,60 \leq 0,60$$

$$k_{zy} = \left(1 - \frac{0,1 \times 0,42}{(0,6 - 0,25)} \frac{8,73}{0,89 \times 2138,5}\right) \geq \left(1 - \frac{0,1}{(0,6 - 0,25)} \frac{8,73}{0,89 \times 2138,5}\right)$$

$$k_{zy} = 0,99 \geq 0,99$$

Izvijanje u ravnini:

$$\frac{8,73}{0,98 \times 2138,5} + 0,6 \frac{0,6 \times 30,2}{0,95 \times 194,35} \leq 1$$

$0,06 < 1$ Uvjet zadovoljen. Nema izvijanja u ravnini.

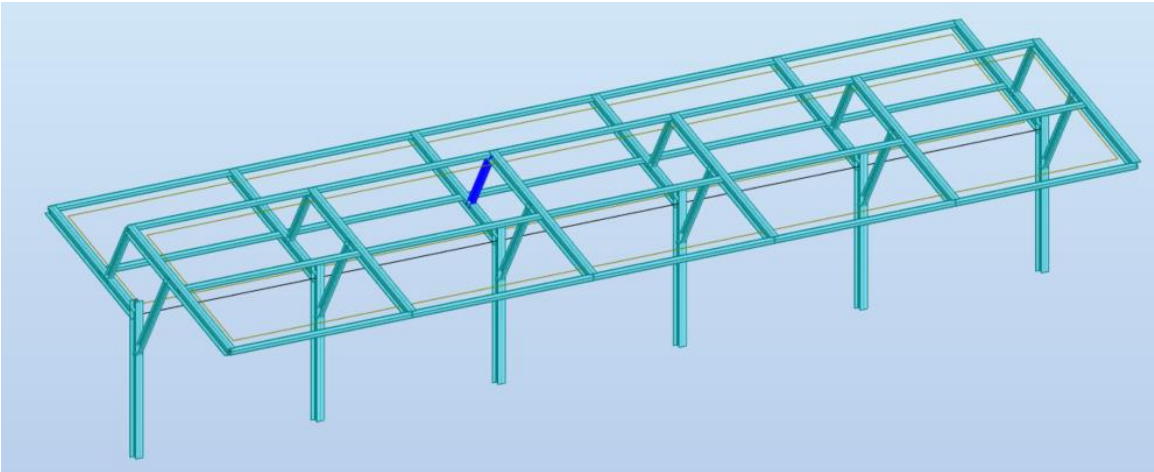
Izvijanje izvan ravnine:

$$\frac{8,73}{0,89 \times 2138,5} + 0,99 \frac{30,2}{0,95 \times 194,35} \leq 1$$

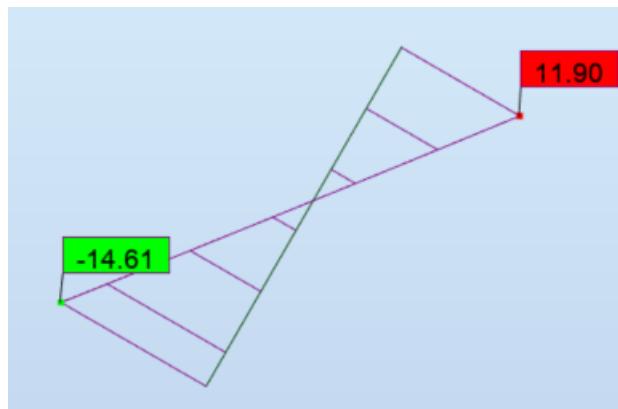
$0,17 < 1$ Uvjet zadovoljen. Nema izvijanja izvan ravnine.

6.4. Dimenzioniranje lijevog kosnika

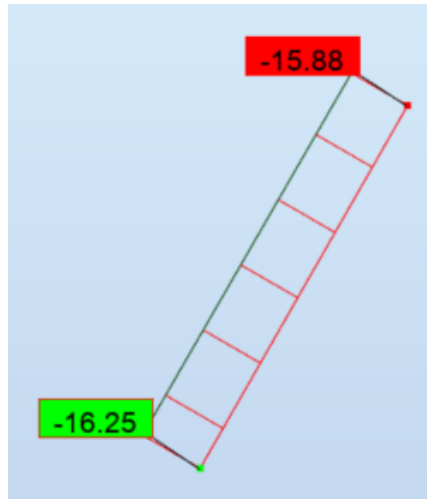
Za lijevi kosnik odabran je vruće valjani HEB 140 profil.



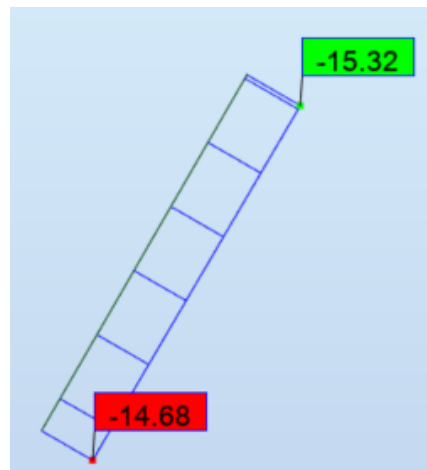
Slika 41. Položaj najopterećenijeg lijevog kosnika.



Slika 42. Vrijednosti momenta savijanja M_y lijevog kosnika za kombinaciju 106.

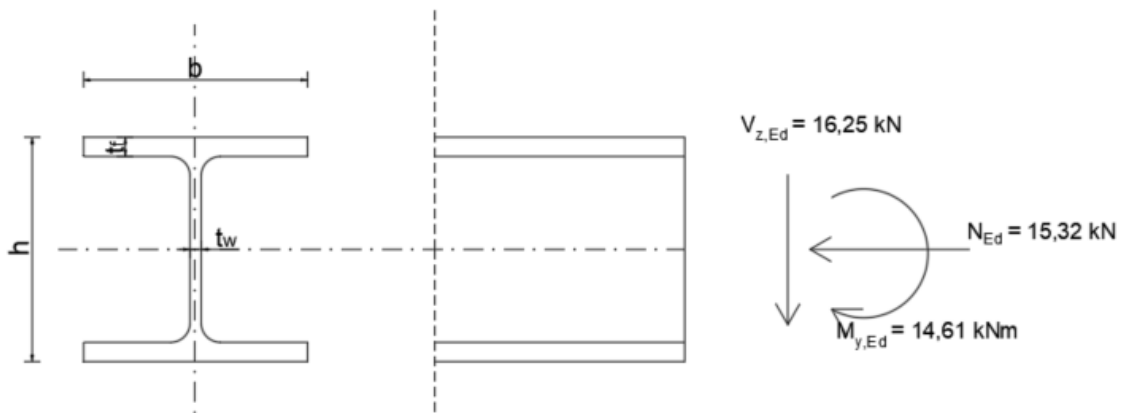


Slika 43. Vrijednosti poprečnih sila V_z lijevog kosnika za kombinaciju 106.



Slika 44. Vrijednosti uzdužnih tlačnih sila lijevog kosnika za kombinaciju 106.

Otpornost poprečnog presjeka



Slika 45. Prikaz momenta i sila koji djeluju na poprečni presjek lijevog kosnika.

Karakteristike poprečnog presjeka		
h	140	mm
b	140	mm
t _f	12	mm
t _w	7	mm
r	12	mm
A	43	cm ²
I _y	1509	cm ⁴
I _z	549,7	cm ⁴
W _{ply}	245,4	cm ³
I _t	20,06	cm ⁴
I _w	22480	cm ⁶

Karakteristike čelika S235		
E	21000	kN/cm ²
G	8077	kN/cm ²
v	0,3	
ρ	7850	kg/m ³
f _y	235	N/mm ²
f _u	360	N/mm ²

Klasifikacija poprečnog presjeka:

Provjera hrpta:

Uvjet za klasu 1:

$$\frac{c}{t} \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$a = \frac{N_{Ed}}{\frac{2 \times t_w \times f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{15,32}{\frac{2 \times 0,7 \times 23,5}{1}} = 0,47 \text{ cm}$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \times \left(\frac{d}{2} + a \right) = \frac{1}{92} \times \left(\frac{92}{2} + 4,7 \right) = 0,55$$

$$\frac{92}{7} \leq \frac{36}{0,55}$$

13,14 < 65,45 → Uvjet zadovoljen. Hrbat je klasa 1.

a = 0,47 cm – visina hrpta na koju djeluje moment savijanja i uzdužna tlačna sila.

N_{Ed} = 15,32 kN – uzdužna tlačna sila.

t_w = 7 mm – debljina hrpta.

f_y = 23,5 kN/cm² – granica popuštanja čelika.

γ_{M0} = 1,0 – parcijalni faktor sigurnosti.

Provjera pojasnice:

Uvjet za klasu 1:

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{fy}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\frac{\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r}{t_f} \leq 9 \times 1$$

$$\frac{70 - 3,5 - 12}{12} \leq 9$$

4,54 < 9 → Uvjet zadovoljen. Pojasnica je klasa 1

Poprečni presjek je klasa I

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje:

Za klasu 1 vrijedi

Savijanje oko osi y

$$M_{c,RD} = \frac{w_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{245,4 \times 23,5}{1} = 5766,9 \text{ kNcm} = 57,67 \text{ kNm}$$

Uvjet nosivosti:

$$M_{y,Ed} \leq M_{c,Rd}$$

$$14,61 \text{ kNm} < 57,67 \text{ kNm} \quad \text{Uvjet je zadovoljen.}$$

$$\text{Iskoristivost} = 14,61/57,67 = 25 \%$$

$W_{pl,y} = 245,4 \text{ cm}^3$ – plastični moment otpora u smjeru osi y

$f_y = 23,5 \text{ kN/cm}^2$ – granica popuštanja čelika

$M_{y,Ed} = 14,61 \text{ kNm}$ – proračunski moment savijanja oko osi y

Otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu

Provjera izbočivanja hrpta

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \times \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$\frac{h - 2t_f}{7} \leq 72 \times \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$\frac{116}{7} \leq 72 \times \frac{1}{1,2}$$

$$16,57 < 60 \quad \rightarrow \text{Nema izbočavanja hrpta (nisu potrebne ukrute)}$$

$h_w = 116 \text{ mm}$ – visina hrpta između pojasnica

$t_w = 7 \text{ mm}$ – debljina hrpta profila

$\eta = 1,2$ – faktor posmične površine (vrijednost 1,2 za valjane profile)

$\gamma_{M,0} = 1,0$ – parcijalni faktor sigurnosti

Posmična otpornost poprečnog presjeka

U smjeru osi z

$$V_{pl,Rd} = A_V \frac{f_y}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{\gamma_{M0}} = 13,12 \frac{23,5}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1} = 178 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} \leq V_{pl,Rd}$$

16,25 kN < 178 kN Uvjet je zadovoljen.

$$\text{Iskoristivost} = 16,25/178 = 9 \%$$

$$A_v = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_v = 43 - 2 \cdot 14 \cdot 1,2 + (0,7 + 2 \cdot 1,2) \cdot 1,2 \geq 1,2 \cdot 11,6 \cdot 0,7$$

$$A_v = 13,12 \text{ cm}^2 \geq 9,74 \text{ cm}^2$$

$A_v = 13,12 \text{ cm}^2$ - posmična površina u smjeru osi z.

Otpornost presjeka na tlak

$$N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{43 \times 23,5}{1} = 1010,5 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti: $N_{Ed} \leq N_{c,Rd} \rightarrow 15,32 \text{ kN} < 1010,5 \text{ kN}$

Uvjet je zadovoljen.

Iskoristivost $15,32/1010,5 = 2\%$

Interakcija posmika i savijanja

Provjera razine poprečne sile:

$$V_{z,Ed} \leq 0,5 V_{pl,Rd}$$

$$16,25 \text{ kN} < 89 \text{ kN}$$

Interakcija tlaka i savijanja

$$N_{Ed} \leq 0,25 N_{pl,Rd}$$

$$15,32 \text{ kN} < 252,63 \text{ kN} \rightarrow \text{Uvjet je zadovoljen.}$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 \times h_w \times t_w \times f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$15,32 \leq \frac{0,5 \times 11,6 \times 0,7 \times 23,5}{1,0}$$

$$15,32 \text{ kN} \leq 95,41 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen, nema redukcije plastične otpornosti na savijanje.

Otpornost elementa na bočno-torzijsko izvijanje:

Elastični kritični moment

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 \times G \times I_T}{\pi^2 EI_z}} \right]$$

$C_1 = 2,57$ – faktor koji ovisi o uvjetima na ležajevima i vrsti opterećenja.

$C_2 = 0$ – faktor koji ovisi u uvjetima na ležajevima i vrsti opterećenja

$k = k_w = 1,0$ – faktori dužine izvijanja

$z_g = h/2 = 14/2 = 7 \text{ cm}$ – razmak između točke djelovanja opterećenja i centra posmika

$I_z = 549,7 \text{ cm}^4$ – moment tromosti oko osi z

$I_t = 20,06 \text{ cm}^4$ – torzijska konstanta

$I_w = 22480 \text{ cm}^4$ – konstanta krivljenja

$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ – modul elastičnosti

$G = 8077 \text{ kN/cm}^2$ – modul posmika

$$M_{cr} = 2,57 \frac{\pi^2 \times 21000 \times 549,7}{(165)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \times \frac{22480}{549,7} + \frac{(165)^2 \times 8077 \times 20,06}{\pi^2 21000 \times 549,7}} \right]$$

$$M_{cr} = 95962 \text{ kNcm} = 959,62 \text{ kNm}$$

Vitkost elementa:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{245,4 \times 23,5}{95962}} = 0,25$$

Faktor imperfekcije α_{LT}

$h/b = 1 \rightarrow$ Krivulja izvijanja a \rightarrow faktor imperfekcije $\alpha_{LT} = 0,21$

Bočno-torzijsko izvijanje:

$$\Phi_{LT} = 0,5 [1 + \alpha_{LT}(\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2] = 0,5[1 + 0,21(0,25 - 0,2) + 0,25^2] = 0,54$$

Faktor redukcije:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = \frac{1}{0,54 + \sqrt{0,54^2 - 0,25^2}} = 0,98 < 1$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{w_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,98 \frac{245,4 \times 23,5}{1,1} = 5137,78 \text{ kNcm} = 51,38 \text{ kNm}$$

Uvjet nosivosti:

$M_{y,Ed} \leq M_{b,Rd} \rightarrow 14,61 < 51,38 \rightarrow$ nema bočno-torzijskog izvijanja

Iskoristivost = 28 %

Otpornost elementa na izvijanje:

Duljina izvijanja elementa lijevog kosnika iznosi: $L_{cr,y} = 0,825 \text{ m}$, $L_{cr,z} = 0,825 \text{ m}$

Otpornost na izvijanje oko osi y-y

Kritična sila izvijanja

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 21000 \times 1509}{82,5^2} = 45951,57 \text{ kN}$$

$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ – modul elastičnosti.

$I_y = 1509 \text{ cm}^4$ – moment tromosti oko osi y.

$L_{cr} = 82,5 \text{ cm}$ – kritična duljina izvijanja.

Vitkosti elementa

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{43 \times 23,5}{45951,57}} = 0,15$$

Faktor imperfekcije α

$h/b = 1$, $t_f < 100 \text{ mm}$ → Krivulja izvijanja b → faktor imperfekcije $\alpha = 0,34$

Izvijanje:

$$\phi_y = 0,5 [1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 0,5 [1 + 0,34(0,15 - 0,2) + 0,15^2] = 0,50$$

Faktor redukcije:

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,50 + \sqrt{0,50^2 - 0,15^2}} = 0,98 < 1$$

Otpornost elementa na tlačno izvijanje

$$N_{b,Rd} = \chi_y \frac{A \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,98 \frac{43 \times 23,5}{1,1} = 900,26 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$ → $14,11 \text{ kN} < 900,26 \text{ kN}$ → nema izvijanja

Iskoristivost = 2 %

Otpornost na izvijanje oko osi z-z

Kritična sila izvijanja

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 21000 \times 549,7}{82,5^2} = 16739,28 \text{ kN}$$

$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ – modul elastičnosti.

$I_z = 549,7 \text{ cm}^4$ – moment tromosti oko osi z.

$L_{cr} = 82,5 \text{ cm}$ – kritična duljina izvijanja.

Vitkosti elementa

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{43 \times 23,5}{16739,28}} = 0,25$$

Faktor imperfekcije α

$h/b = 1$, $t_f < 100 \text{ mm}$ → Krivulja izvijanja c → faktor imperfekcije $\alpha = 0,49$

Izvijanje:

$$\Phi_z = 0,5 [1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 0,5 [1 + 0,49(0,25 - 0,2) + 0,25^2] = 0,54$$

Faktor redukcije:

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,54 + \sqrt{0,54^2 - 0,25^2}} = 0,98 < 1$$

Otpornost elementa na tlačno izvijanje

$$N_{b,Rd} = \chi_z \frac{A \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,98 \frac{43 \times 23,5}{1,1} = 900,26 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$ → $14,11 \text{ kN} < 900,26 \text{ kN}$ → nema izvijanja

Iskoristivost = 2 %

Otpornost elementa na izvijanje + bočno-torzijsko izvijanje:

Da bi element zadovoljio traženu otpornost mora zadovoljiti sljedeća dva uvjeta:

Izvijanje u ravnini:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{pl,Rd}} + k_y \frac{C_{my} \times M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \times M_{pl,y,Rd}} \leq 1$$

Izvijanje izvan ravnine:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{pl,Rd}} + k_{LT} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \times M_{pl,y,Rd}} \leq 1$$

Interakcijski faktor k_{ij} određuje se pomoću Metode 2 (Dodatak A u EN 1993-1-1)

Za klase poprečnog presjeka 1 i 2:

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\lambda_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{pl,Rd}} \right) \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{pl,Rd}} \right)$$

$$\lambda_z = 0,25 < 0,4$$

$$k_{zy} = 0,6 + \lambda_z \leq \left(1 - \frac{0,1\lambda_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{pl,Rd}} \right)$$

k_{yz} i k_{zz} nije potrebno računati jer $M_{z,Ed} = 0$ kNm.

$$C_{my} = C_{mLT} = 0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$$

$$C_{my} = C_{mLT} = 0,6 + 0,4*(-0,4) = 0,44 \geq 0,4$$

$$k_{LT} = 0,6 + \lambda_z = 0,6 + 0,25 = 0,85$$

$$k_{yy} = 0,44 \left(1 + (0,15 - 0,2) \frac{15,32}{0,98 \times 1010,5} \right) \leq 0,44 \left(1 + 0,8 \frac{15,32}{0,98 \times 1010,5} \right)$$

$$k_{yy} = 0,44 \leq 0,45$$

$$k_{zy} = 0,6 + 0,25 \leq \left(1 - \frac{0,1 \times 0,25}{(0,44 - 0,25)} \frac{15,32}{0,98 \times 1010,5} \right)$$

$$k_{zy} = 0,85 \leq 0,99$$

Izvijanje u ravnini:

$$\frac{15,32}{0,98 \times 1010,5} + 0,44 \frac{0,44 \times 14,61}{0,98 \times 57,67} \leq 1$$

$0,07 < 1$ Uvjet zadovoljen. Nema izvijanja u ravnini.

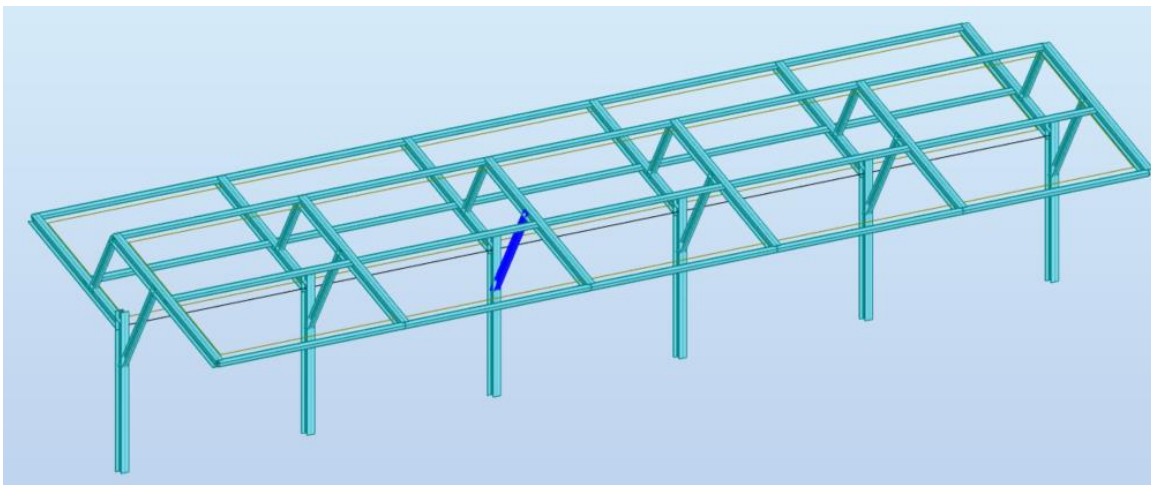
Izvijanje izvan ravnine:

$$\frac{15,32}{0,98 \times 1010,5} + 0,85 \frac{14,61}{0,98 \times 57,67} \leq 1$$

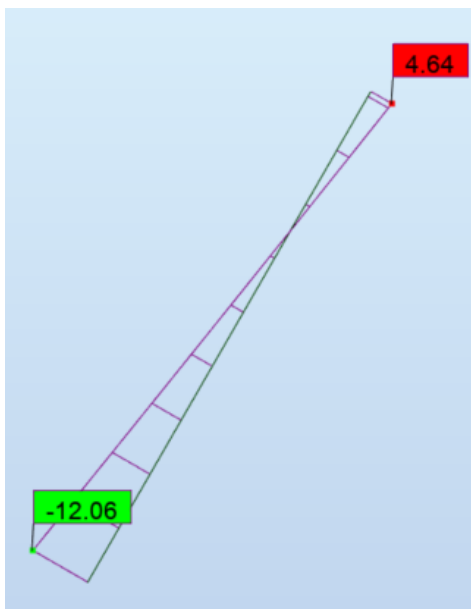
0,24 < 1 Uvjet zadovoljen. Nema izvijanja izvan ravnine.

6.5. Dimenzioniranje desnog kosnika

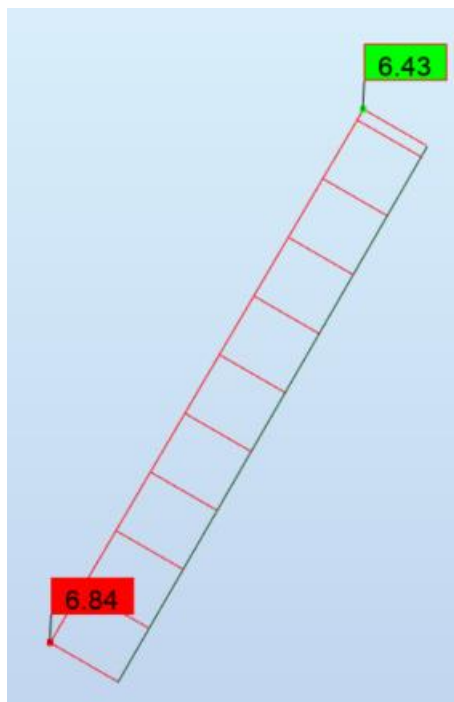
Za desni kosnik odabran je vruće valjani HEB 140 profil.



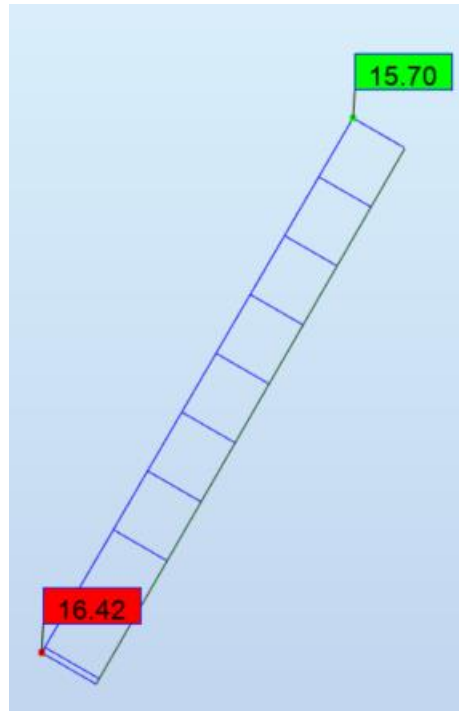
Slika 46. Položaj najopterećenijeg desnog kosnika.



Slika 47. Vrijednosti momenta savijanja M_y desnog kosnika za kombinaciju 116.

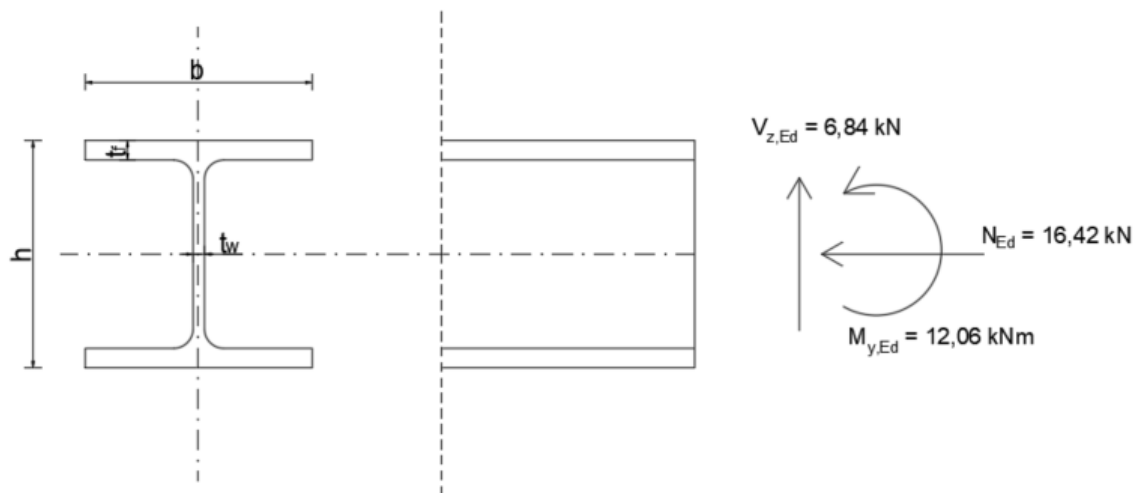


Slika 48. Vrijednosti poprečnih sila V_z desnog kosnika za kombinaciju 116.



Slika 49. Vrijednosti uzdužnih tlačnih sila desnog kosnika za kombinaciju 116.

Otpornost poprečnog presjeka



Slika 50. Prikaz momenta i sila koji djeluju na poprečni presjek desnog kosnika stupa.

Karakteristike poprečnog presjeka		
h	140	mm
b	140	mm
t _f	12	mm
t _w	7	mm
r	12	mm
A	43	cm ²
I _y	1509	cm ⁴
I _z	549,7	cm ⁴
W _{pl,y}	245,4	cm ³
I _t	20,06	cm ⁴
I _w	22480	cm ⁶

Karakteristike čelika S235		
E	21000	kN/cm ²
G	8077	kN/cm ²
v	0,3	
ρ	7850	kg/m ³
f _y	235	N/mm ²
f _u	360	N/mm ²

Klasifikacija poprečnog presjeka:

Provjera hrpta:

Uvjet za klasu 1:

$$\frac{c}{t} \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$a = \frac{N_{Ed}}{2 \times t_w \times f_y \times \gamma_{M0}} = \frac{16,42}{2 \times 0,7 \times 23,5 \times 1} = 0,49 \text{ cm}$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \times \left(\frac{d}{2} + a \right) = \frac{1}{92} \times \left(\frac{92}{2} + 4,9 \right) = 0,55$$

$$\frac{92}{7} \leq \frac{36}{0,55}$$

13,14 < 65,45 → Uvjet zadovoljen. Hrbat je klasa 1.

a = 0,49 cm – visina hrpta na koju djeluje moment savijanja i uzdužna tlačna sila.

N_{Ed} = 16,42 kN – uzdužna tlačna sila.

t_w = 7 mm – debljina hrpta.

f_y = 23,5 kN/cm² – granica popuštanja čelika.

γ_{M0} = 1,0 – parcijalni faktor sigurnosti.

Provjera pojasnice:

Uvjet za klasu 1:

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\frac{\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r}{t_f} \leq 9 \times 1$$

$$\frac{70 - 3,5 - 12}{12} \leq 9$$

4,54 < 9 → Uvjet zadovoljen. Pojasnica je klasa 1

Poprečni presjek je klasa I

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje:

Za klasu 1 vrijedi

Savijanje oko osi y

$$M_{c,RD} = \frac{w_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{245,4 \times 23,5}{1} = 5766,9 \text{ kNcm} = 57,67 \text{ kNm}$$

Uvjet nosivosti:

$$M_{y,Ed} \leq M_{c,Rd}$$

12,06 kNm < 57,67 kNm Uvjet je zadovoljen.

Iskoristivost = 12,06/57,67 = 21 %

$w_{pl,y} = 245,4 \text{ cm}^3$ – plastični moment otpora u smjeru osi y

$f_y = 23,5 \text{ kN/cm}^2$ – granica popuštanja čelika

$M_{y,Ed} = 12,06 \text{ kNm}$ – proračunski moment savijanja oko osi y

Otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu

Provjera izbočivanja hrpta

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \times \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$\frac{h - 2t_f}{7} \leq 72 \times \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$\frac{116}{7} \leq 72 \times \frac{1}{1,2}$$

16,57 < 60 → Nema izbočavanja hrpta (nisu potrebne ukrute)

$h_w = 116$ mm – visina hrpta između pojasnica

$t_w = 7$ mm – debljina hrpta profila

$\eta = 1,2$ – faktor posmične površine (vrijednost 1,2 za valjane profile)

$\gamma_{M,0} = 1,0$ – parcijalni faktor sigurnosti

Posmična otpornost poprečnog presjeka

U smjeru osi z

$$V_{pl,Rd} = A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{\gamma_{M0}} = 13,12 \frac{23,5}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1} = 178 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} \leq V_{pl,Rd}$$

6,84 kN < 178 kN Uvjet je zadovoljen.

Iskoristivost = 6,84/178 = 4 %

$$A_v = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_v = 43 - 2 \cdot 14 \cdot 1,2 + (0,7 + 2 \cdot 1,2) \cdot 1,2 \geq 1,2 \cdot 11,6 \cdot 0,7$$

$$A_v = 13,12 \text{ cm}^2 \geq 9,74 \text{ cm}^2$$

$A_v = 13,12 \text{ cm}^2$ - posmična površina u smjeru osi z.

Otpornost presjeka na tlak

$$N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{43 \times 23,5}{1} = 1010,5 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti: $N_{Ed} \leq N_{c,Rd} \rightarrow 16,42 \text{ kN} < 1010,5 \text{ kN}$ Uvjet je zadovoljen.
 Iskoristivost $16,42/1010,5 = 2\%$

Interakcija posmika i savijanja

Provjera razine poprečne sile:

$$V_{z,Ed} \leq 0,5 V_{pl,Rd}$$

$$6,84 \text{ kN} < 89 \text{ kN}$$

Interakcija tlaka i savijanja

$$N_{Ed} \leq 0,25 N_{pl,Rd}$$

$$16,42 \text{ kN} < 252,63 \text{ kN} \rightarrow \text{Uvjet je zadovoljen.}$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 \times h_w \times t_w \times f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$16,42 \leq \frac{0,5 \times 11,6 \times 0,7 \times 23,5}{1,0}$$

$$16,42 \text{ kN} \leq 95,41 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen, nema redukcije plastične otpornosti na savijanje.

Otpornost elementa na bočno-torzijsko izvijanje:

Elastični kritični moment

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 \times G \times I_T}{\pi^2 EI_z}} \right]$$

$C_1 = 2,33$ – faktor koji ovisi o uvjetima na ležajevima i vrsti opterećenja.

$C_2 = 0$ – faktor koji ovisi u uvjetima na ležajevima i vrsti opterećenja

$k = k_w = 1,0$ – faktori dužine izvijanja

$z_g = h/2 = 14/2 = 7$ cm – razmak između točke djelovanja opterećenja i centra posmika

$I_z = 549,7$ cm⁴ – moment tromosti oko osi z

$I_t = 20,06$ cm⁴ – torzijska konstanta

$I_w = 22480$ cm⁴ – konstanta krivljenja

$E = 21000$ kN/cm² – modul elastičnosti

$G = 8077$ kN/cm² – modul posmika

$$M_{cr} = 2,33 \frac{\pi^2 \times 21000 \times 549,7}{(252)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \times \frac{22480}{549,7} + \frac{(252)^2 \times 8077 \times 20,06}{\pi^2 21000 \times 549,7}} \right]$$

$$M_{cr} = 47882,34 \text{ kNcm} = 478,82 \text{ kNm}$$

Vitkost elementa:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{245,4 \times 23,5}{47882,34}} = 0,35$$

Faktor imperfekcije α_{LT}

$h/b = 1 \rightarrow$ Krivulja izvijanja a \rightarrow faktor imperfekcije $\alpha_{LT} = 0,21$

Bočno-torzijsko izvijanje:

$$\Phi_{LT} = 0,5 [1 + \alpha_{LT}(\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2] = 0,5[1 + 0,21(0,35 - 0,2) + 0,35^2] = 0,58$$

Faktor redukcije:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = \frac{1}{0,58 + \sqrt{0,58^2 - 0,35^2}} = 0,97 < 1$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{w_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,97 \frac{245,4 \times 23,5}{1,1} = 5085,36 \text{ kNcm} = 50,85 \text{ kNm}$$

Uvjet nosivosti:

$M_{y,Ed} \leq M_{b,Rd} \rightarrow 12,06 < 50,85 \rightarrow$ nema bočno-torzijskog izvijanja

Iskoristivost = 24 %

Otpornost elementa na izvijanje:

Duljina izvijanja elementa desnog kosnika iznosi: $L_{cr,y} = 1,26 \text{ m}$, $L_{cr,z} = 1,26 \text{ m}$

Otpornost na izvijanje oko osi y-y

Kritična sila izvijanja

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 21000 \times 1509}{126^2} = 19700,04 \text{ kN}$$

$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ – modul elastičnosti.

$I_y = 1509 \text{ cm}^4$ – moment tromosti oko osi y.

$L_{cr} = 126 \text{ cm}$ – kritična duljina izvijanja.

Vitkosti elementa

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{43 \times 23,5}{19700,04}} = 0,23$$

Faktor imperfekcije α

$h/b = 1$, $t_f < 100 \text{ mm} \rightarrow$ Krivulja izvijanja b \rightarrow faktor imperfekcije $\alpha = 0,34$

Izvijanje:

$$\Phi_y = 0,5 [1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 0,5 [1 + 0,34(0,23 - 0,2) + 0,23^2] = 0,53$$

Faktor redukcije:

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,53 + \sqrt{0,53^2 - 0,23^2}} = 0,99 < 1$$

Otpornost elementa na tlačno izvijanje

$$N_{b,Rd} = \chi_y \frac{A \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,99 \frac{43 \times 23,5}{1,1} = 909,45 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \rightarrow 16,42 \text{ kN} < 909,45 \text{ kN} \rightarrow \text{nema izvijanja}$$

Iskoristivost = 2 %

Otpornost na izvijanje oko osi z-z

Kritična sila izvijanja

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 21000 \times 549,7}{126^2} = 7176,35 \text{ kN}$$

E= 21000 kN/cm² – modul elastičnosti.

I_z = 549,7 cm⁴ – moment tromosti oko osi z.

L_{cr} = 126 cm – kritična duljina izvijanja.

Vitkosti elementa

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{43 \times 23,5}{7176,35}} = 0,38$$

Faktor imperfekcije α

h/b = 1, t_f < 100 mm → Krivulja izvijanja c → faktor imperfekcije α = 0,49

Izvijanje:

$$\Phi_z = 0,5 [1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 0,5 [1 + 0,49(0,38 - 0,2) + 0,38^2] = 0,62$$

Faktor redukcije:

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,62 + \sqrt{0,62^2 - 0,38^2}} = 0,90 < 1$$

Otpornost elementa na izvijanje

$$N_{b,Rd} = \chi_z \frac{A \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,90 \frac{43 \times 23,5}{1,1} = 826,77 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \rightarrow 16,42 \text{ kN} < 826,77 \text{ kN} \rightarrow \text{nema izvijanja}$$

Iskoristivost = 2 %

Otpornost elementa na izvijanje + bočno-torzijsko izvijanje:

Da bi element zadovoljio traženu otpornost mora zadovoljiti sljedeća dva uvjeta:

Izvijanje u ravnini:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{pl,Rd}} + k_y \frac{C_{my} \times M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \times M_{pl,y,Rd}} \leq 1$$

Izvijanje izvan ravnine:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{pl,Rd}} + k_{LT} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \times M_{pl,y,Rd}} \leq 1$$

Interakcijski faktor k_{ij} određuje se pomoću Metode 2 (Dodatak A u EN 1993-1-1)

Za klase poprečnog presjeka 1 i 2:

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\lambda_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{pl,Rd}} \right) \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{pl,Rd}} \right)$$

$$\lambda_z = 0,38 < 0,4$$

$$k_{zy} = 0,6 + \lambda_z \leq \left(1 - \frac{0,1\lambda_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{pl,Rd}} \right)$$

k_{yz} i k_{zz} nije potrebno računati jer jer $M_{z,Ed} = 0$ kNm.

$$C_{my} = C_{mLT} = 0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$$

$$C_{my} = C_{mLT} = 0,6 + 0,4*(-0,4) = 0,44 \geq 0,4$$

$$k_{LT} = 0,6 + \lambda_z = 0,6 + 0,38 = 0,98$$

$$k_{yy} = 0,44 \left(1 + (0,23 - 0,2) \frac{16,42}{0,99 \times 1010,5} \right) \leq 0,44 \left(1 + 0,8 \frac{16,42}{0,99 \times 1010,5} \right)$$

$$k_{yy} = 0,44 \leq 0,45$$

$$k_{zy} = 0,6 + 0,38 \leq \left(1 - \frac{0,1 \times 0,38}{(0,44 - 0,25)} \frac{16,42}{0,99 \times 1010,5} \right)$$

$$k_{zy} = 0,98 \leq 0,99$$

Izvijanje u ravnini:

$$\frac{16,42}{0,99 \times 1010,5} + 0,44 \frac{0,44 \times 12,06}{0,97 \times 57,67} \leq 1$$

$0,06 < 1$ Uvjet zadovoljen. Nema izvijanja u ravnini.

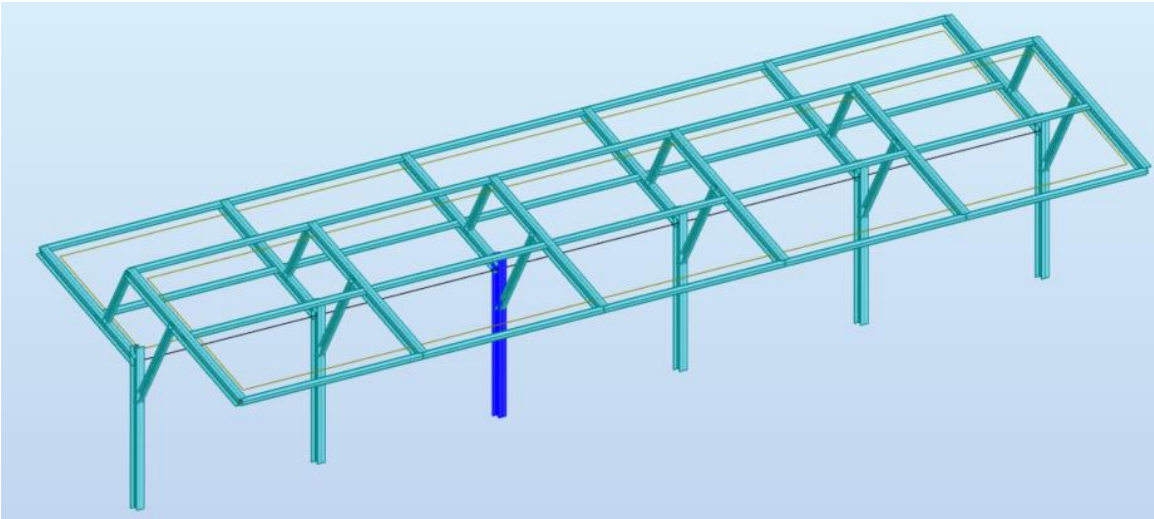
Izvijanje izvan ravnine:

$$\frac{16,42}{0,90 \times 1010,5} + 0,98 \frac{12,06}{0,97 \times 57,67} \leq 1$$

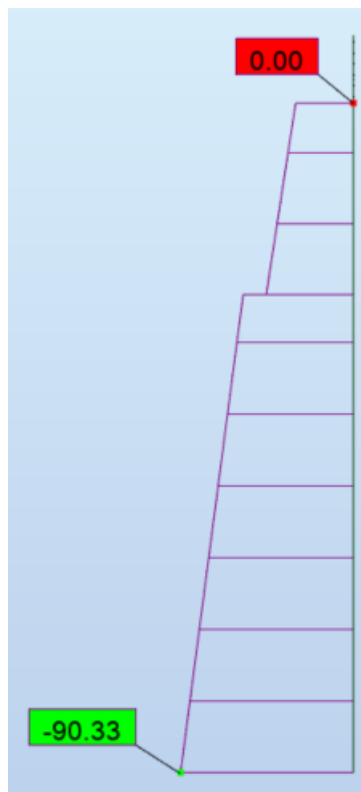
$0,23 < 1$ Uvjet zadovoljen. Nema izvijanja izvan ravnine.

6.6. Dimenzioniranje glavnog stupa

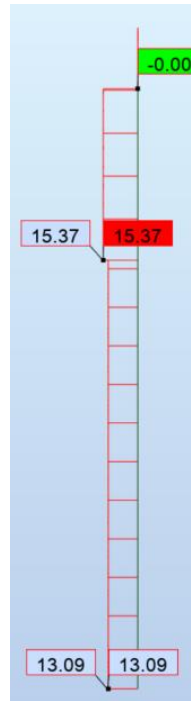
Za glavni stup odabran je vruće valjani HEB 220 profil.



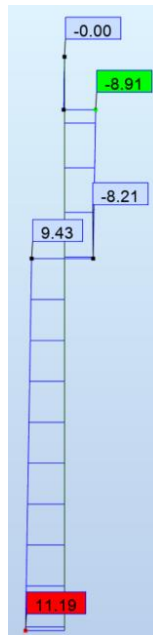
Slika 51. Položaj najopterećenijeg glavnog stupa.



Slika 52. Vrijednosti momenta savijanja M_y glavnog stupa za kombinaciju 116.

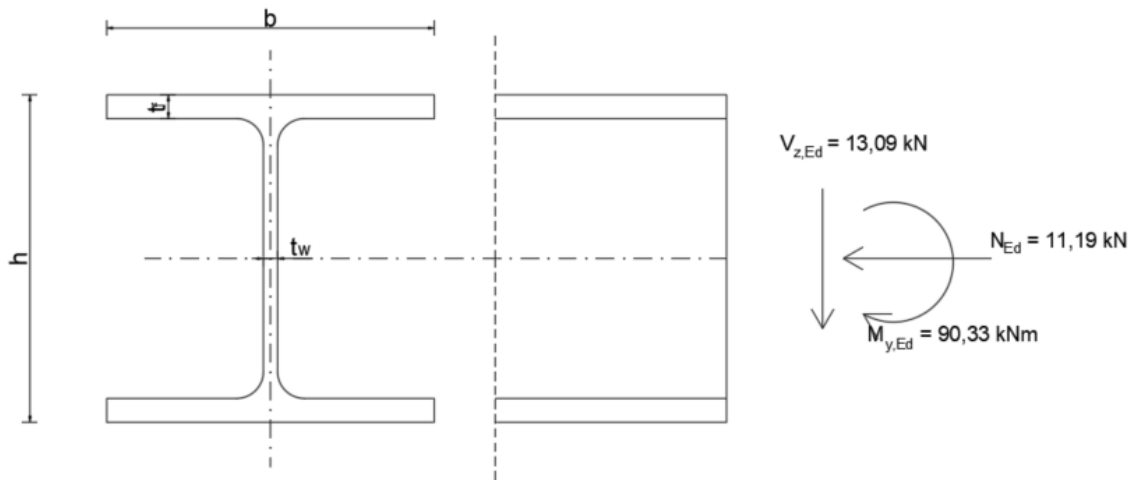


Slika 53. Vrijednosti poprečnih sila V_z glavnog stupa za kombinaciju 116.



Slika 54. Vrijednosti uzdužnih tlačnih sila glavnog stupa za kombinaciju 116.

Otpornost poprečnog presjeka



Slika 55. Prikaz momenta i sila koji djeluju na poprečni presjek glavnog stupa.

Karakteristike poprečnog presjeka		
h	220	mm
b	220	mm
t_f	16	mm
t_w	9,5	mm
r	18	mm
A	91	cm ²
I_y	8091	cm ⁴
I_z	2843	cm ⁴
$W_{pl,y}$	827	cm ³
I_t	76,57	cm ⁴
I_w	295400	cm ⁶

Karakteristike čelika S235		
E	21000	kN/cm ²
G	8077	kN/cm ²
ν	0,3	
ρ	7850	kg/m ³
f_y	235	N/mm ²
f_u	360	N/mm ²

Klasifikacija poprečnog presjeka:

Provjera hrpta:

Uvjet za klasu 1:

$$\frac{c}{t} \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{fy}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$a = \frac{N_{Ed}}{\frac{2 \times t_w \times fy}{\gamma_{M0}}} = \frac{11,19}{\frac{2 \times 0,95 \times 23,5}{1}} = 0,25 \text{ cm}$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \times \left(\frac{d}{2} + a \right) = \frac{1}{152} \times \left(\frac{152}{2} + 2,5 \right) = 0,52$$

$$\frac{152}{9,5} \leq \frac{36}{0,52}$$

16 < 69,23 → Uvjet zadovoljen. Hrbat je klasa 1.

a = 0,25 cm – visina hrpta na koju djeluje moment savijanja i uzdužna tlačna sila.

N_{Ed} = 11,19 kN – uzdužna tlačna sila.

t_w = 9,5 mm – debljina hrpta.

f_y = 23,5 kN/cm² – granica popuštanja čelika.

γ_{M0} = 1,0 – parcijalni faktor sigurnosti.

Provjera pojasnice:

Uvjet za klasu 1:

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{fy}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\frac{\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r}{t_f} \leq 9 \times 1$$

$$\frac{110 - 4,75 - 18}{16} \leq 9$$

5,45 < 9 → Uvjet zadovoljen. Pojasnica je klasa 1

Poprečni presjek je klasa I

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje:

Za klasu 1 vrijedi

Savijanje oko osi y

$$M_{c,RD} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{827 \times 23,5}{1} = 19434,5 \text{ kNcm} = 194,35 \text{ kNm}$$

Uvjet nosivosti:

$$M_{y,Ed} \leq M_{c,Rd}$$

90,33 kNm < 194,35 kNm Uvjet je zadovoljen.

Iskoristivost = 90,33/194,35 = 46 %

$W_{pl,y} = 827 \text{ cm}^3$ – plastični moment otpora u smjeru osi y

$f_y = 23,5 \text{ kN/cm}^2$ – granica popuštanja čelika

$M_{y,Ed} = 90,33 \text{ kNm}$ – proračunski moment savijanja oko osi y

Otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu

Provjera izbočivanja hrpta

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \times \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$\frac{h - 2t_f}{9,5} \leq 72 \times \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$\frac{188}{9,5} \leq 72 \times \frac{1}{1,2}$$

19,79 < 60 → Nema izbočavanja hrpta (nisu potrebne ukrute)

$h_w = 188 \text{ mm}$ – visina hrpta između pojasnica

$t_w = 9,5 \text{ mm}$ – debljina hrpta profila

$\eta = 1,2$ – faktor posmične površine (vrijednost 1,2 za valjane profile)

$\gamma_{M,0} = 1,0$ – parcijalni faktor sigurnosti

Posmična otpornost poprečnog presjeka

U smjeru osi z

$$V_{pl,Rd} = A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{\gamma_{M0}} = 27,88 \frac{23,5}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1} = 378,27 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} \leq V_{pl,Rd}$$

$13,09 \text{ kN} < 378,27 \text{ kN}$ Uvjet je zadovoljen.

Iskoristivost = $13,09/378,27 = 3 \%$

$$A_v = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_v = 91 - 2 \cdot 22 \cdot 1,6 + (0,95 + 2 \cdot 1,8) \cdot 1,6 \geq 1,2 \cdot 18,8 \cdot 0,95$$

$$A_v = 27,88 \text{ cm}^2 \geq 21,43 \text{ cm}^2$$

$A_v = 27,88 \text{ cm}^2$ - posmična površina u smjeru osi z.

Otpornost presjeka na tlak

$$N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{91 \times 23,5}{1} = 2138,5 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti: $N_{Ed} \leq N_{c,Rd} \rightarrow 11,19 \text{ kN} < 2138,5 \text{ kN}$

Uvjet je zadovoljen.

Iskoristivost $11,19/2138,5 = 1\%$

Interakcija posmika i savijanja

Provjera razine poprečne sile:

$$V_{z,Ed} \leq 0,5 V_{pl,Rd}$$

$13,09 \text{ kN} < 189,14 \text{ kN}$

Interakcija tlaka i savijanja

$$N_{Ed} \leq 0,25 N_{pl,Rd}$$

11,19 kN < 534,63 kN → Uvjet je zadovoljen.

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 \times h_w \times t_w \times f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$11,19 \leq \frac{0,5 \times 18,8 \times 0,95 \times 23,5}{1,0}$$

$$11,19 \text{ kN} \leq 209,86 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen, nema redukcije plastične otpornosti na savijanje.

Otpornost elementa na bočno-torzijsko izvijanje:

Provjera za segment temelj-spoj s desnim kosnikom:

Elastični kritični moment

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 \times G \times I_T}{\pi^2 EI_z}} \right]$$

$C_1 = 1,14$ – faktor koji ovisi o uvjetima na ležajevima i vrsti opterećenja.

$C_2 = 0$ – faktor koji ovisi u uvjetima na ležajevima i vrsti opterećenja

$k = k_w = 1,0$ – faktori dužine izvijanja

$z_g = h/2 = 22/2 = 11$ cm – razmak između točke djelovanja opterećenja i centra posmika

$I_z = 2843$ cm⁴ – moment tromosti oko osi z

$I_t = 76,57$ cm⁴ – torzijska konstanta

$I_w = 295400$ cm⁴ – konstanta krivljenja

$E = 21000$ kN/cm² – modul elastičnosti

$G = 8077$ kN/cm² – modul posmika

$$M_{cr} = 1,14 \frac{\pi^2 \times 21000 \times 2843}{(250)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \times \frac{295400}{2843} + \frac{(386)^2 \times 8077 \times 76,57}{\pi^2 21000 \times 2843}} \right]$$

$$M_{cr} = 203281,7 \text{ kNcm} = 2032,82 \text{ kNm}$$

Vitkost elementa:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{827 \times 23,5}{203281,7}} = 0,31$$

Faktor imperfekcije α_{LT}

$h/b = 1 \rightarrow$ Krivulja izvijanja a \rightarrow faktor imperfekcije $\alpha_{LT} = 0,21$

Bočno-torzijsko izvijanje:

$$\Phi_{LT} = 0,5 [1 + \alpha_{LT}(\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2] = 0,5[1 + 0,21(0,31 - 0,2) + 0,31^2] = 0,56$$

Faktor redukcije:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = \frac{1}{0,56 + \sqrt{0,56^2 - 0,31^2}} = 0,98 < 1$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{w_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,98 \frac{827 \times 23,5}{1,1} = 17314,37 \text{ kNcm} = 173,14 \text{ kNm}$$

Uvjet nosivosti:

$M_{y,Ed} \leq M_{b,Rd} \rightarrow 90,33 < 173,14 \rightarrow$ nema bočno-torzijskog izvijanja

Iskoristivost = 52 %

Provjera za segment od spoja desnog kosnika do vrha:

Elastični kritični moment

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 \times G \times I_T}{\pi^2 EI_z}} \right]$$

$C_1 = 1,31$ – faktor koji ovisi o uvjetima na ležajevima i vrsti opterećenja.

$C_2 = 0$ – faktor koji ovisi u uvjetima na ležajevima i vrsti opterećenja

$k = k_w = 1,0$ – faktori dužine izvijanja

$z_g = h/2 = 22/2 = 11$ cm – razmak između točke djelovanja opterećenja i centra posmika

$I_z = 2843$ cm⁴ – moment tromosti oko osi z

$I_t = 76,57$ cm⁴ – torzijska konstanta

$I_w = 295400$ cm⁴ – konstanta krivljenja

$E = 21000$ kN/cm² – modul elastičnosti

$G = 8077$ kN/cm² – modul posmika

$$M_{cr} = 1,31 \frac{\pi^2 \times 21000 \times 2843}{(136)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \times \frac{295400}{2843} + \frac{(386)^2 \times 8077 \times 76,57}{\pi^2 21000 \times 2843}} \right]$$

$M_{cr} = 688611,3$ kNcm = 6886,11 kNm

Vitkost elementa:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{827 \times 23,5}{6886,11}} = 0,17$$

Faktor imperfekcije α_{LT}

$h/b = 1 \rightarrow$ Krivulja izvijanja a \rightarrow faktor imperfekcije $\alpha_{LT} = 0,21$

Bočno-torzijsko izvijanje:

$$\Phi_{LT} = 0,5 [1 + \alpha_{LT}(\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2] = 0,5[1 + 0,21(0,17 - 0,2) + 0,17^2] = 0,51$$

Faktor redukcije:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = \frac{1}{0,51 + \sqrt{0,51^2 - 0,17^2}} = 1 < 1$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{w_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M1}} = 1 \frac{827 \times 23,5}{1,1} = 17667,73 \text{ kNcm} = 176,68 \text{ kNm}$$

Uvjet nosivosti:

$$M_{y,Ed} \leq M_{b,Rd} \rightarrow 57,62 < 176,68 \rightarrow \text{nema bočno-torzijskog izvijanja}$$

Iskoristivost = 33 %

Otpornost elementa na izvijanje:

Duljina izvijanja elementa glavnog stupa iznosi: $L_{cr,y} = 2,7 \text{ m}$, $L_{cr,z} = 2,7 \text{ m}$

Otpornost na izvijanje oko osi y-y

Kritična sila izvijanja

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 21000 \times 8091}{270^2} = 23003,49 \text{ kN}$$

$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ – modul elastičnosti.

$I_y = 8091 \text{ cm}^4$ – moment tromosti oko osi y.

$L_{cr} = 270 \text{ cm}$ – kritična duljina izvijanja.

Vitkosti elementa

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{91 \times 23,5}{23003,49}} = 0,30$$

Faktor imperfekcije α

$h/b = 1$, $t_f < 100$ mm \rightarrow Krivulja izvijanja b \rightarrow faktor imperfekcije $\alpha = 0,34$

Izvijanje:

$$\Phi_y = 0,5 [1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 0,5[1 + 0,34(0,30 - 0,2) + 0,30^2] = 0,56$$

Faktor redukcije:

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,56 + \sqrt{0,56^2 - 0,30^2}} = 0,97 < 1$$

Otpornost elementa na tlačno izvijanje

$$N_{b,Rd} = \chi_y \frac{A \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,97 \frac{91 \times 23,5}{1,1} = 1885,77 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \rightarrow 11,19 \text{ kN} < 1885,77 \text{ kN} \rightarrow$ nema izvijanja

Iskoristivost = 1 %

Otpornost na izvijanje oko osi z-z

Kritična sila izvijanja

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 21000 \times 2843}{270^2} = 8082,92 \text{ kN}$$

$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ – modul elastičnosti.

$I_z = 2843 \text{ cm}^4$ – moment tromosti oko osi z.

$L_{cr} = 270 \text{ cm}$ – kritična duljina izvijanja.

Vitkosti elementa

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{91 \times 23,5}{8082,92}} = 0,51$$

Faktor imperfekcije α

$h/b = 1$, $t_f < 100$ mm \rightarrow Krivulja izvijanja c \rightarrow faktor imperfekcije $\alpha = 0,49$

Izvijanje:

$$\Phi_z = 0,5 [1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 0,5 [1 + 0,49(0,51 - 0,2) + 0,51^2] = 0,71$$

Faktor redukcije:

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,71 + \sqrt{0,71^2 - 0,51^2}} = 0,83 < 1$$

Otpornost elementa na tlačno izvijanje

$$N_{b,Rd} = \chi_z \frac{A \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,83 \frac{91 \times 23,5}{1,1} = 1613,6 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \rightarrow 11,19 \text{ kN} < 1613,6 \text{ kN} \rightarrow$ nema izvijanja

Iskoristivost = 1 %

Otpornost elementa na izvijanje + bočno-torzijsko izvijanje:

Da bi element zadovoljio traženu otpornost mora zadovoljiti sljedeća dva uvjeta:

Izvijanje u ravnini:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{pl,Rd}} + k_y \frac{C_{my} \times M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \times M_{pl,y,Rd}} \leq 1$$

Izvijanje izvan ravnine:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{pl,Rd}} + k_{LT} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \times M_{pl,y,Rd}} \leq 1$$

Interakcijski faktor k_{ij} određuje se pomoću Metode 2 (Dodatak A u EN 1993-1-1)

Za klase poprečnog presjeka 1 i 2:

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\lambda_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{pl,Rd}} \right) \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{pl,Rd}} \right)$$

$$\lambda_z = 0,51 > 0,4$$

$$k_{zy} = \left(1 - \frac{0,1\lambda_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{pl,Rd}} \right) \geq \left(1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{pl,Rd}} \right)$$

k_{yz} i k_{zz} nije potrebno računati jer $M_{z,Ed} = 0$ kNm.

$$C_{my} = C_{mLT} = 0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$$

$$C_{my} = C_{mLT} = 0,6 + 0,4 \cdot 0 = 0,6 \geq 0,4$$

$$k_{LT} = 1 - \frac{0,1\lambda_z \times n_z}{C_{mLT} - 0,25} \geq 1 - \frac{0,1 \times n_z}{C_{mLT} - 0,25}$$

$$n_z = \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{pl,Rd}} = \frac{11,19}{0,83 \times 2138,5} = 0,01$$

$$k_{LT} = 1 - \frac{0,1 \times 0,51 \times 0,01}{0,6 - 0,25} \geq 1 - \frac{0,1 \times 0,01}{0,6 - 0,25}$$

$$k_{LT} = 0,99 \geq 0,99$$

$$k_{yy} = 0,6 \left(1 + (0,30 - 0,2) \frac{11,19}{0,97 \times 2138,5} \right) \leq 0,6 \left(1 + 0,8 \frac{11,19}{0,97 \times 2138,5} \right)$$

$$k_{yy} = 0,60 \leq 0,60$$

$$k_{zy} = \left(1 - \frac{0,1 \times 0,51}{(0,6 - 0,25)} \frac{11,19}{0,83 \times 2138,5} \right) \geq \left(1 - \frac{0,1}{(0,6 - 0,25)} \frac{11,19}{0,83 \times 2138,5} \right)$$

$$k_{zy} = 0,99 \geq 0,99$$

Izvijanje u ravnini:

$$\frac{11,19}{0,97 \times 2138,5} + 0,6 \frac{0,6 \times 90,33}{0,96 \times 194,34} \leq 1$$

$0,18 < 1$ Uvjet zadovoljen. Nema izvijanja u ravnini.

Izvijanje izvan ravnine:

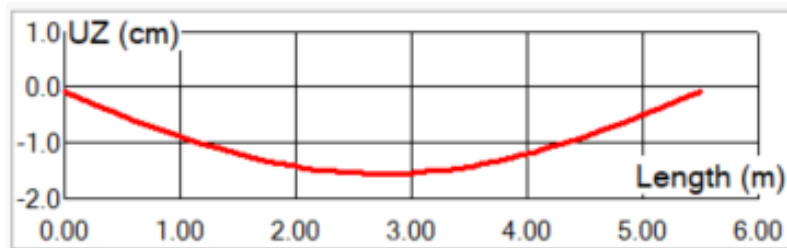
$$\frac{11,19}{0,83 \times 2138,5} + 0,99 \frac{90,33}{0,96 \times 194,34} \leq 1$$

$0,49 < 1$ Uvjet zadovoljen. Nema izvijanja u ravnini.

7. Dimenzioniranje glavnih elemenata konstrukcije za granično stanje uporabljivosti:

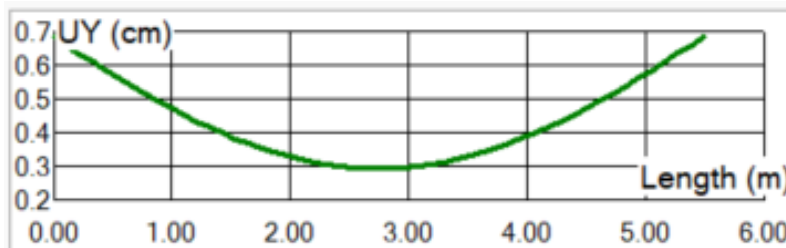
7.1. Provjera pomaka podrožnice

Pomak podrožnice u smjeru osi z za mjerodavnu kombinaciju 212 iznosi: 1,5 cm



Slika 56. Pomaci podrožnice za kombinaciju 212 u smjeru osi z.

Pomak podrožnice u smjeru osi y za mjerodavnu kombinaciju 212 iznosi: 0,4 cm



Slika 57. Pomaci podrožnice za kombinaciju 212 u smjeru osi y.

Uvjet nosivosti smjer z:

$$\delta \leq L/250$$

$$1,5 \leq 550/250$$

$$1,5 \leq 2,2 \quad \text{Uvjet zadovoljen}$$

Uvjet nosivosti smjer y:

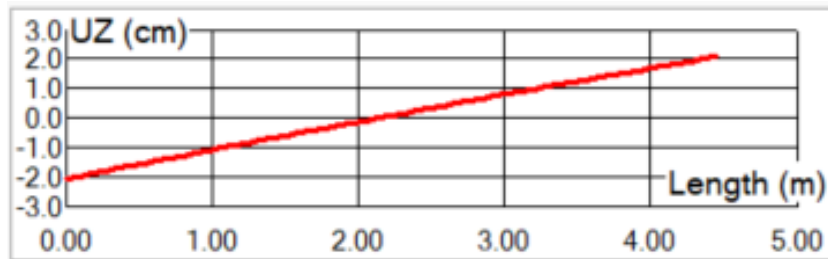
$$\delta \leq L/250$$

$$0,4 \leq 550/250$$

$$0,4 \leq 2,2 \quad \text{Uvjet zadovoljen}$$

7.2. Provjera pomaka desne kose prečke

Pomak desne kose prečke za mjerodavnu kombinaciju 216 iznosi: 4,2 cm



Slika 58. Pomaci desne kose prečke za kombinaciju 216

Uvjet nosivosti:

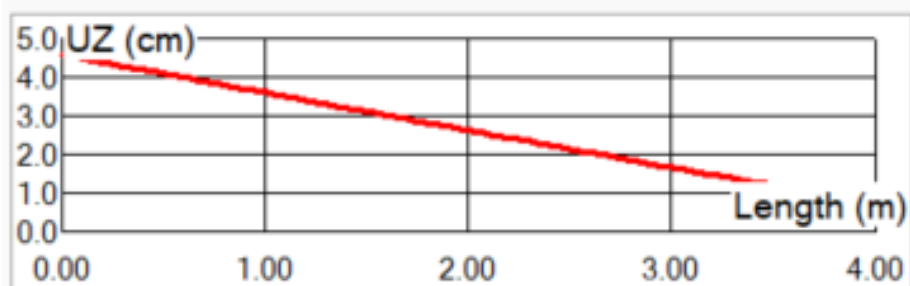
$$\delta \leq L/100$$

$$4,2 \leq 458/100$$

$$4,2 \leq 4,58 \quad \text{Uvjet zadovoljen}$$

7.3. Provjera pomaka lijeve kose prečke

Pomak lijeve kose prečke za mjerodavnu kombinaciju 216 iznosi: 3,7 cm



Slika 59. Pomaci lijeve kose prečke za kombinaciju 216

Uvjet nosivosti:

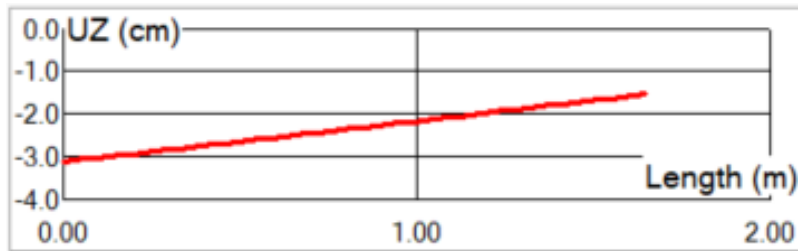
$$\delta \leq L/100$$

$$3,7 \leq 381/100$$

$$3,7 \leq 3,81 \quad \text{Uvjet zadovoljen}$$

7.4. Provjera pomaka lijevog kosnika

Pomak lijevog kosnika za mjerodavnu kombinaciju 208 iznosi: 0 cm



Slika 60. Pomaci lijevog kosnika za kombinaciju 208

Uvjet nosivosti:

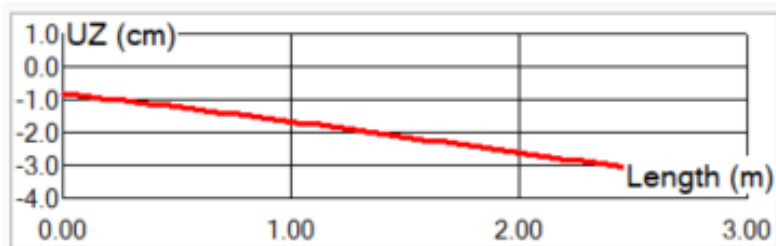
$$\delta \leq L/250$$

$$0 \leq 165/250$$

$$0 \leq 0,7 \quad \text{Uvjet zadovoljen}$$

7.5. Provjera pomaka desnog kosnika

Pomak desnog kosnika za mjerodavnu kombinaciju 216 iznosi: 0,1 cm



Slika 61. Pomaci desnog kosnika za kombinaciju 216

Uvjet nosivosti:

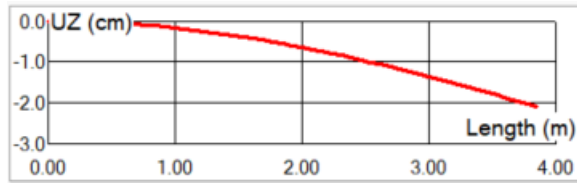
$$\delta \leq L/250$$

$$0 \leq 252/250$$

$$0,1 \leq 1,0 \quad \text{Uvjet zadovoljen}$$

7.6. Provjera pomaka glavnog stupa

Pomak glavnog stupa za mjerodavnu kombinaciju 216 iznosi: 0,5 cm



Slika 62. Pomaci glavnog stupa za kombinaciju 216

Uvjet nosivosti:

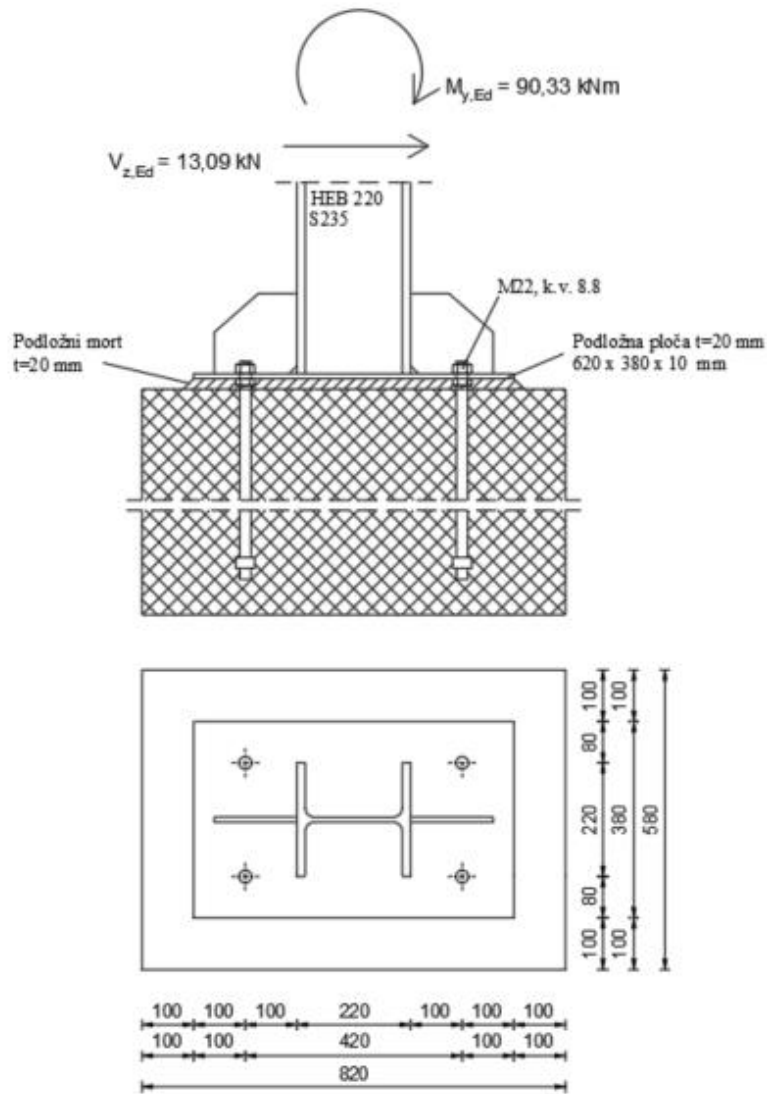
$$\delta \leq L/150$$

$$0 \leq 386/150$$

$$0,5 \leq 2,57 \quad \text{Uvjet zadovoljen}$$

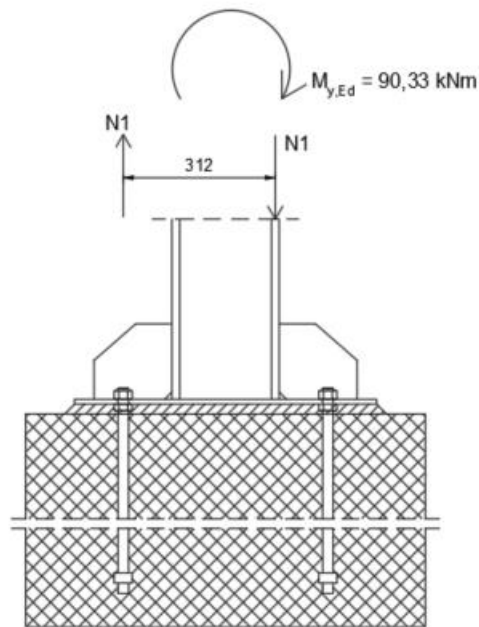
8. Proračun spojeva konstrukcije

8.1. Spoj glavnog stupa s AB temeljom



Slika 63. Spoj glavnog stupa s AB temeljom sa silama i momentima koji djeluju na njega.

Karakteristike vijaka M22 k.v.8.8		
f_{yb}	640	N/mm^2
F_{ub}	800	N/mm^2
d	22	mm
d_0	24	mm
A_s	303	mm^2



Slika 64. Djelovanje vlačne sile od momenta savijanja na spoj glavnog stupa s AB temeljom.

Sila N1 jednaka je: $N1 = \frac{90,33 \times 10^3}{312} = 289,52 \text{ kN}$

Otpornost vijaka na posmik (odrez)

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha_v \times f_{ub} \times A}{\gamma_{M2}}$$

(1 vijak 1 rezna površina)

$\alpha_v = 0,6$ (posmična površina prolazi kroz dio vijka s navojem i kvaliteta vijka je k.v.8.8)

$f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$ – vlačna čvrstoća vijka

$A = A_s = 303 \text{ mm}^2$ – površina jezgre vijka

$\gamma_{M2} = 1,25$ – parcijalni faktor sigurnosti za spajala

$$F_{V,Rd} = \frac{0,6 \times 800 \times 303}{1,25} = 116352 \text{ N} = 116,35 \text{ kN}$$

$$\overline{F}_{v,Rd} = m \cdot n \cdot F_{v,Rd} = 1 \cdot 4 \cdot 116,35 = 465,4 \text{ kN} \quad (\text{m-broj reznih površina, n-broj vijaka})$$

Uvjet nosivosti:

$$V_{Ed} \leq \overline{F}_{v,Rd} \quad \rightarrow \quad 13,09 \text{ kN} < 465,4 \text{ kN} \quad \text{Uvjet je zadovoljen. (Iskoristivost 3 \%)}$$

Otpornost na pritisak po omotaču rupe osnovnog materijala

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \times \alpha_v \times f_u \times d \times t}{\gamma_{M2}}$$

(otpornost za 1 rupu)

$$k_1 = \min\left(2,8 \times \frac{e_2}{3d_0} - 1,7; 2,5\right) = \min\left(2,8 \times \frac{80}{3 \times 24} - 1,7; 2,5\right) = \min(4,67; 2,5) = 2,5$$

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1\right) = \min\left(\frac{100}{3 \times 24}; \frac{800}{360}; 1\right) = \min(1,39; 2,22; 1) = 1$$

$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$ (S235) – vlačna čvrstoća čelika.

$d = 22 \text{ mm}$ – promjer vijka

$t = 10 \text{ mm}$ – debljina najtanje ploče u spoju.

$\gamma_{M2} = 1,25$ – parcijalni faktor sigurnosti za spajala.

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \times 1 \times 360 \times 22 \times 20}{1,25} = 316800 \text{ N} = 316,8 \text{ kN}$$

$$\overline{F}_{b,Rd} = 4 \cdot F_{b,Rd} = 4 \cdot 316,8 = 1267,2 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$V_{Ed} \leq \overline{F}_{b,Rd} \quad \rightarrow \quad 13,09 \text{ kN} < 1267,2 \text{ kN} \quad \text{Uvjet je zadovoljen. (Iskoristivost 1 \%)}$$

Otpornost vijka na vlak:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \times f_{ub} \times A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$k_2 = 0,9$$

$f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$ - vlačna čvrstoća vijka.

$A_s = 303 \text{ mm}^2$ - površina jezgre vijka

$\gamma_{M2} = 1,25$ - parcijalni faktor sigurnosti za spajala

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \times 800 \times 303}{1,25} = 174528 \text{ N} = 174,53 \text{ kN}$$

$$\overline{F_{t,Rd}} = 2 * F_{t,Rd} = 2 * 174,53 = 349,06 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$N1 \leq \overline{F_{t,Rd}} \quad \rightarrow \quad 289,52 \text{ kN} < 349,06 \text{ kN} - \text{Uvjet je zadovoljen. (Iskoristivost 83 \%)}$$

Interakcija posmika i vlaka

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$F_{v,Ed} = \frac{V_{z,Ed}}{4} = \frac{13,09}{4} = 3,27 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd} = 116,35 \text{ kN}$$

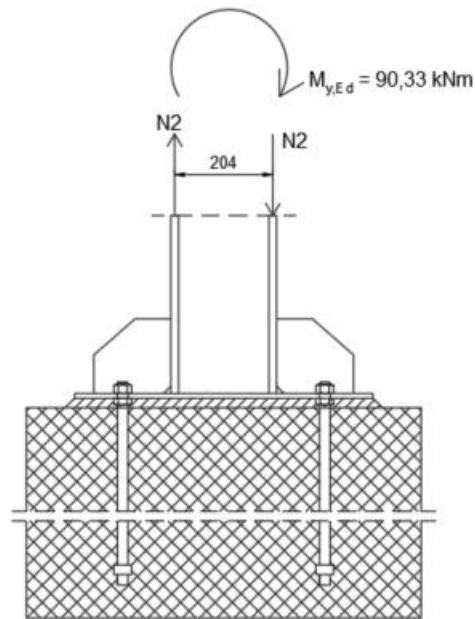
$$F_{t,Ed} = \frac{N1}{2} = \frac{289,52}{2} = 144,76 \text{ kN}$$

$$F_{t,Rd} = 174,53 \text{ kN}$$

$$\frac{3,27}{116,35} + \frac{144,76}{174,53} \leq 1$$

$$0,86 < 1 \quad \text{Uvjet je zadovoljen.}$$

Proračun zavarenog spoja



Slika 65. Djelovanje vlačne sile od momenta savijanja na zavar glavnog stupa s AB temeljom.

Sila N_2 jednaka je:
$$N_2 = \frac{90,33 \times 10^3}{204} = 442,79 \text{ kN}$$

Ukupno djelovanje na zavar:

$$F_{w,Ed} = \sqrt{\left(\frac{V_{Z,Ed}}{2}\right)^2 + N_2^2} = \sqrt{\left(\frac{13,09}{2}\right)^2 + 442,79^2} = 442,84 \text{ kN}$$

Otpornost jednog centimetra kutnog zavora:

$$F_{w,Rd} = \frac{\frac{f_u}{\sqrt{3}} \beta_w \times a}{\gamma_{M2}}$$

$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$ (S235) – vlačna čvrstoća čelika.

$a = 5 \text{ mm}$ – debljina zavora.

$\beta_w = 0,80$ (S235) – korelacijski koeficijent.

$$F_{w,Rd} = \frac{f_u \times a}{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360 \times 5}{\sqrt{3} \times 0,80 \times 4} = 1039 \text{ N} = 10,39 \text{ kN} - \text{vrijednost za 1 cm zavora}$$

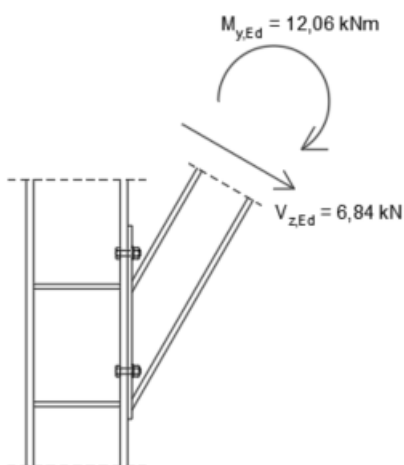
$$\Sigma L = 160 \times 2 + 210 + 2 \times 87 + 2 \times 76 = 856 \text{ mm} = 85,6 \text{ cm}$$

$$\overline{F_{w,Rd}} = F_{w,Rd} \times \Sigma L = 10,39 \times 85,6 = 889,38 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

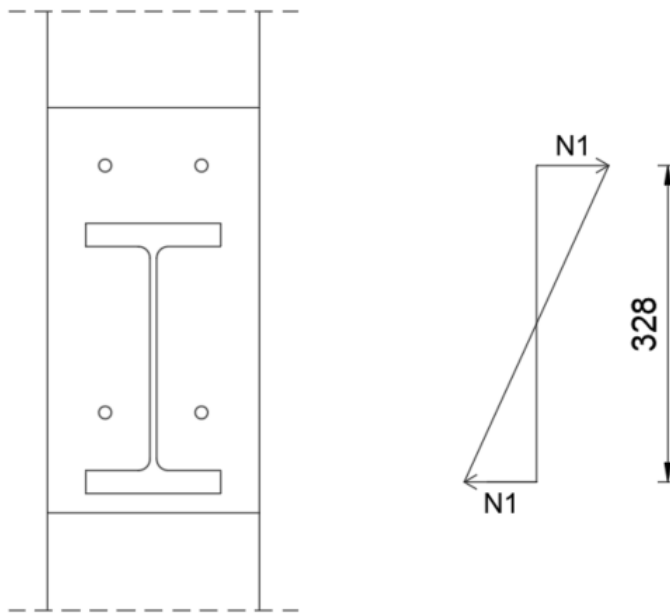
$$F_{w,Ed} \leq \overline{F_{w,Rd}} \rightarrow 442,84 \text{ kN} < 889,38 \text{ kN} \quad \text{Uvjet je zadovoljen. (Iskoristivost 50 \%)}$$

8.2. Spoj glavnog stupa s desnim kosnikom:



Slika 66. Spoj glavnog stupa s desnim kosnikom sa silama i momentima koji djeluju na njega.

Karakteristike vijaka M12 k.v.4.6		
f_{yb}	240	N/mm ²
F_{ub}	400	N/mm ²
d	12	mm
d_0	13	mm
A_s	84,3	mm ²



Slika 67. Djelovanje vlačne sile od momenta savijanja na spoj glavnog stupa s desnim kosnikom.

Sila N1 jednaka je: $N1 = \frac{12,06 \times 10^3}{328} = 36,77 \text{ kN}$

Otpornost vijaka na posmik (odrez)

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha_v \times f_{ub} \times A}{\gamma_{M2}}$$

(1 vijak 1 rezna površina)

$\alpha_v = 0,6$ (posmična površina prolazi kroz dio vijka s navojem i kvaliteta vijka je k.v.4.6)

$f_{ub} = 400 \text{ N/mm}^2$ – vlačna čvrstoća vijka

$A = A_s = 84,3 \text{ mm}^2$ – površina jezgre vijka

$\gamma_{M2} = 1,25$ – parcijalni faktor sigurnosti za spajala

$$F_{V,Rd} = \frac{0,6 \times 400 \times 84,3}{1,25} = 16185,6 \text{ N} = 16,19 \text{ kN}$$

$$\overline{F_{v,Rd}} = m \cdot n \cdot F_{v,Rd} = 1 \cdot 4 \cdot 16,19 = 64,76 \text{ kN} \quad (\text{m-broj reznih površina, n-broj vijaka})$$

Uvjet nosivosti:

$$V_{Ed} \leq \overline{F_{v,Rd}} \quad \rightarrow \quad 6,84 \text{ kN} < 64,76 \text{ kN} \quad \text{Uvjet je zadovoljen. (Iskoristivost 11 \%)}$$

Otpornost na pritisak po omotaču rupe osnovnog materijala

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \times \alpha_v \times f_u \times d \times t}{\gamma_{M2}}$$

(otpornost za 1 rupu)

$$k_1 = \min\left(2,8 \times \frac{e_2}{3d_0} - 1,7; 2,5\right) = \min\left(2,8 \times \frac{60}{3 \times 13} - 1,7; 2,5\right) = \min(4,31; 2,5) = 2,5$$

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1\right) = \min\left(\frac{60}{3 \times 13}; \frac{400}{360}; 1\right) = \min(1,54; 1,11; 1) = 1$$

$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$ (S235) – vlačna čvrstoća čelika.

$d = 12 \text{ mm}$ – promjer vijka

$t = 10 \text{ mm}$ – debljina najtanje ploče u spoju.

$\gamma_{M2} = 1,25$ – parcijalni faktor sigurnosti za spajala.

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \times 1 \times 360 \times 12 \times 10}{1,25} = 86400 \text{ N} = 86,4 \text{ kN}$$

$$\overline{F_{b,Rd}} = 4 * F_{b,Rd} = 4 * 86,4 = 345,6 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$V_{Ed} \leq \overline{F_{b,Rd}} \quad \rightarrow \quad 6,84 \text{ kN} < 345,6 \text{ kN} \quad \text{Uvjet je zadovoljen. (Iskoristivost 2 \%)}$$

Otpornost vijka na vlak:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \times f_{ub} \times A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$k_2 = 0,9$$

$f_{ub} = 400 \text{ N/mm}^2$ - vlačna čvrstoća vijka.

$A_s = 84,3 \text{ mm}^2$ - površina jezgre vijka

$\gamma_{M2} = 1,25$ - parcijalni faktor sigurnosti za spajala

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \times 400 \times 84,33}{1,25} = 24019,2 \text{ N} = 24,02 \text{ kN}$$

$$\overline{F_{t,Rd}} = 2 * F_{t,Rd} = 2 * 24,02 = 48,04 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$N1 \leq \overline{F_{t,Rd}} \quad \rightarrow \quad 36,77 \text{ kN} < 48,04 \text{ kN} - \text{Uvjet je zadovoljen. (Iskoristivost 77 \%)}$$

Interakcija posmika i vlaka

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$F_{v,Ed} = \frac{V_{z,Ed}}{4} = \frac{6,84}{4} = 1,71 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd} = 16,19 \text{ kN}$$

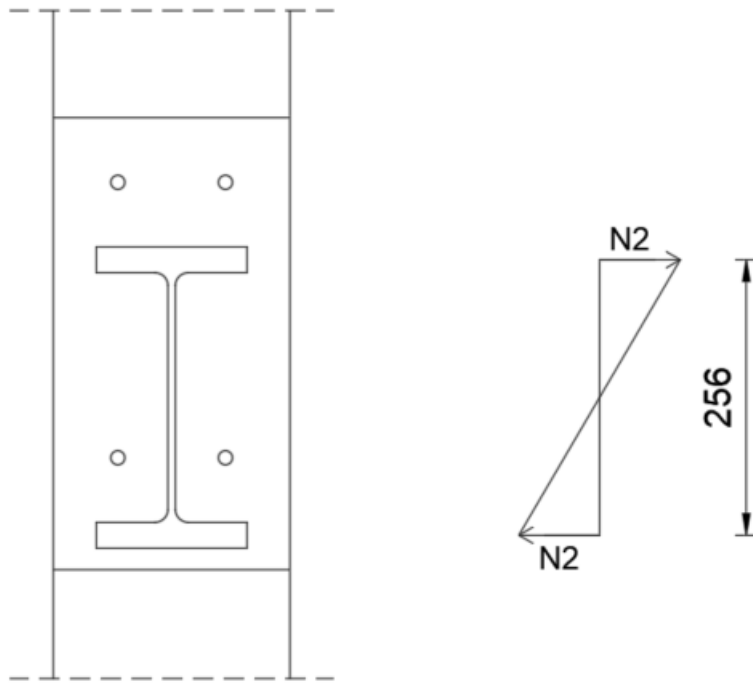
$$F_{t,Ed} = \frac{N1}{2} = \frac{36,77}{2} = 18,39 \text{ kN}$$

$$F_{t,Rd} = 24,02 \text{ kN}$$

$$\frac{1,71}{16,19} + \frac{18,39}{24,02} \leq 1$$

$$0,87 < 1 \quad \text{Uvjet je zadovoljen.}$$

Proračun zavarenog spoja



Slika 68. Djelovanje vlačne sile od momenta savijanja na zavar glavnog stupa s desnim kosnikom.

Sila N_2 jednaka je: $N_2 = \frac{12,06 \times 10^3}{256} = 47,11 \text{ kN}$

Ukupno djelovanje na zavar:

$$F_{w,Ed} = \sqrt{\left(\frac{V_{z,Ed}}{2}\right)^2 + N_2^2} = \sqrt{\left(\frac{6,84}{2}\right)^2 + 47,11^2} = 47,23 \text{ kN}$$

Otpornost jednog centimetra kutnog zavara:

$$F_{w,Rd} = \frac{\frac{f_u}{\sqrt{3}} \times a}{\gamma_{M2}}$$

$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$ (S235) – vlačna čvrstoća čelika.

$a = 5 \text{ mm}$ – debljina zavara.

$\beta_w = 0,80$ (S235) – korelacijski koeficijent.

$$F_{w,Rd} = \frac{f_u}{\sqrt{3}\beta_w} \times a = \frac{360}{\sqrt{3} \times 0,80} \times 5 = 1039 \text{ N} = 10,39 \text{ kN} - \text{vrijednost za 1 cm zavora}$$

$$\Sigma L = 140 + 55 \times 2 + 104 \times 2 = 458 \text{ mm} = 45,8 \text{ cm}$$

$$\overline{F_{w,Rd}} = F_{w,Rd} \times \Sigma L = 10,39 \times 45,8 = 475,86 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$F_{w,Ed} \leq \overline{F_{w,Rd}} \rightarrow 47,23 \text{ kN} < 475,86 \text{ kN} \quad \text{Uvjet je zadovoljen. (Iskoristivost 10 \%)}$$

9. Zaključak

U radu je prikazan proračun i dimenzioniranje čelične konstrukcije nadstrešnice sa solarnim panelima. Prije samog proračuna bilo potrebno odrediti dimenzije konstrukcije te je odabrano tako da između dvije glavne nosive konstrukcije postoji mogućnost parkiranja dvaju vozila. Konstrukcija je modelirana u programu Robot Structural Analysis Professional. Provedene su analize djelovanja za stalno i promjenjivo djelovanje te su dobivene mjerodavne proračunske kombinacije za granično stanje nosivosti i granično stanje uporabljivosti. Pomoću programa Robot Structural Analysis Professional proveden je statički proračun konstrukcije. Dimenzioniranje je provedeno za najopterećenije elemente konstrukcije prema graničnom stanju nosivosti i graničnom stanju uporabljivosti. Svi elementi zadovoljili su tražene uvjete nosivosti i uporabljivosti. Riješena su dva detalja spajanja elemenata konstrukcije (spoj glavnog stupa s AB temeljom i spoj glavnog stupa s desnim kosnikom). Spojevi su izvedeni kombinacijom vijaka i zavora. Proračunata je otpornost vijaka i zavora na tražene uvjete te su ti uvjeti zadovoljeni.

10. Literatura

[1] Androić B., Dujmović D., Džeba I., Čelične konstrukcije 1, IA Projektiranje, Zagreb, 2009.

[2] Krolo P., Materijali s predavanja i vježbi, Osnove čeličnih konstrukcija, Građevinski fakultet, sveučilište u Rijeci, 2022.

Slike:

[3] <https://hourstrong.com/kako-napraviti-nadstrenicu-od-ipke-vlastitim/>

[4] <https://www.auto-nadstresnice.hr/konzolne-nadstresnice.html>

[5] <https://www.auto-nadstresnice.hr/nadstresnice-za-automobile-na-cetiri-stupa.html>

[6] <https://ljiljan-s.hr/shop/krov/ostali-pokrovi/ploce-gutttaglis-dual-prozirna/>

[7] <https://pevex.hr/limeni-pokrov-ploca-crijep-pcb-ral3009-200x119-1cm-2-382m2-crvena-z112-5>

[8] <https://www.solarno.hr/katalog/proizvod/SUNERGY550/sunergy-550w-half-cell-bifacial-mono>

Norme:

[9] HRN EN 1991-1-3:2012 Eurocod 1: Djelovanja na konstrukcije - Dio 1-3: Opća djelovanja – Opterećenje snijegom, Zagreb: HZN/TO 548, Konstrukcijski eurokodovi, 2012

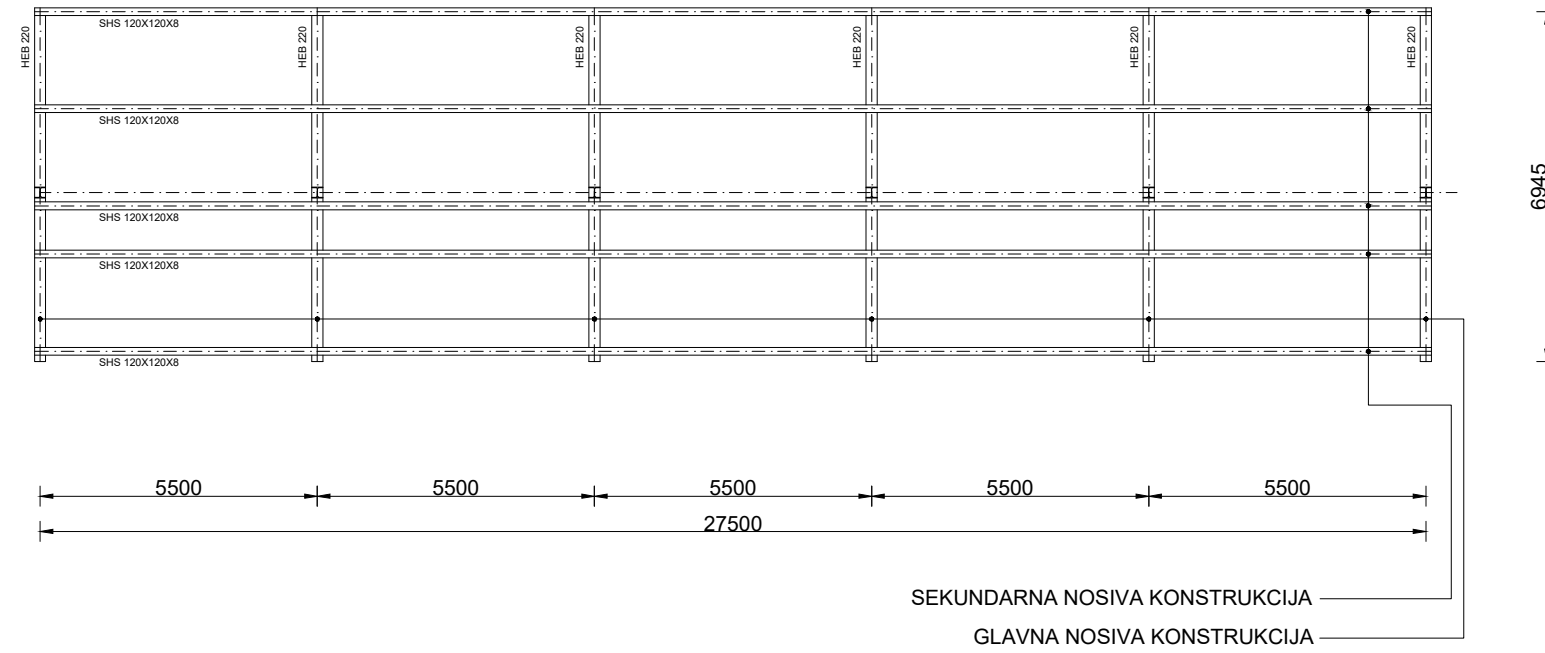
[10] HRN EN 1991-1-4:2012 Eurocod 1: Djelovanja na konstrukcije - Dio 1-4: Opća djelovanja – Djelovanje vjetra, Zagreb: HZN/TO 548, Konstrukcijski eurokodovi, 2012

[11] HRN EN 1991-1-3:2012/NA Eurocod 1: Djelovanja na konstrukcije - Dio 1- 3: Opća djelovanja – Opterećenje snijegom – Nacionalni dodatak

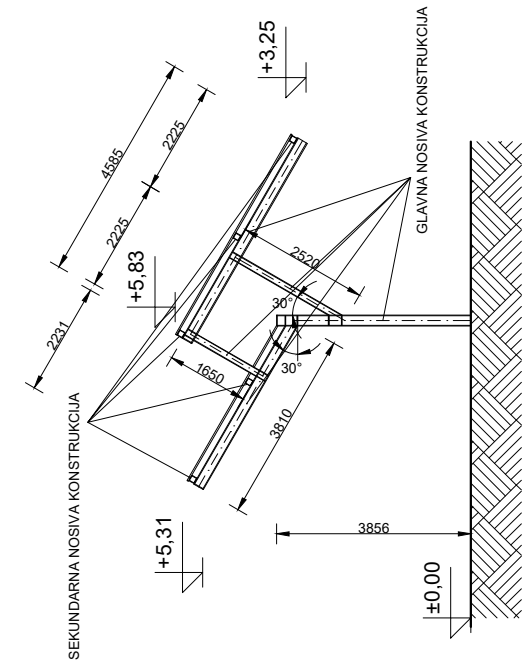
[12] HRN EN 1991-1-4:2012/NA:2012 Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-4: Opća djelovanja -- Djelovanja vjetra -- Nacionalni dodatak

11. NACRTI

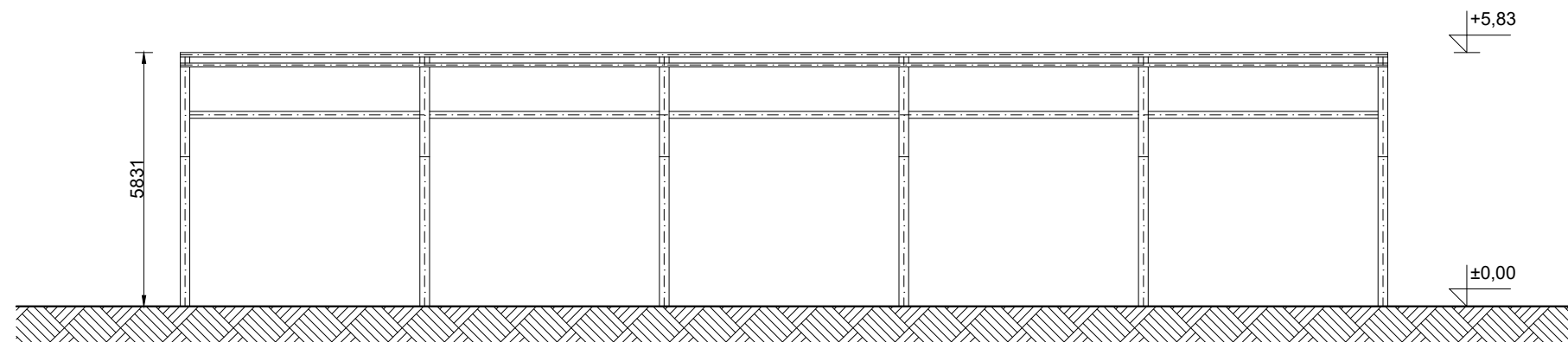
TLOCRT



POGLED NA ZABAT



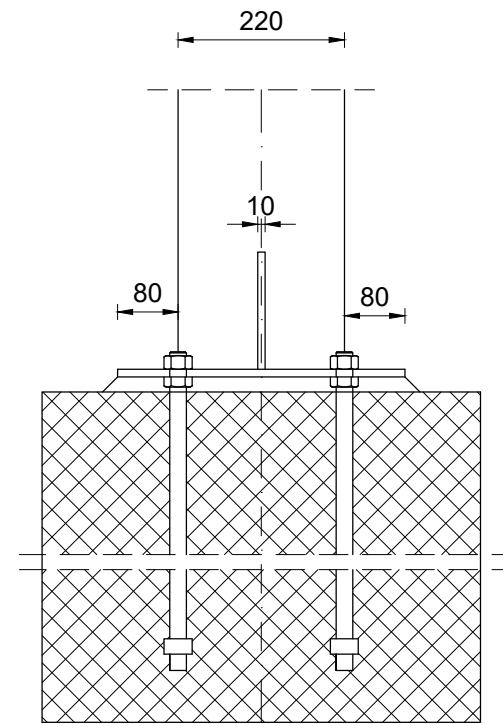
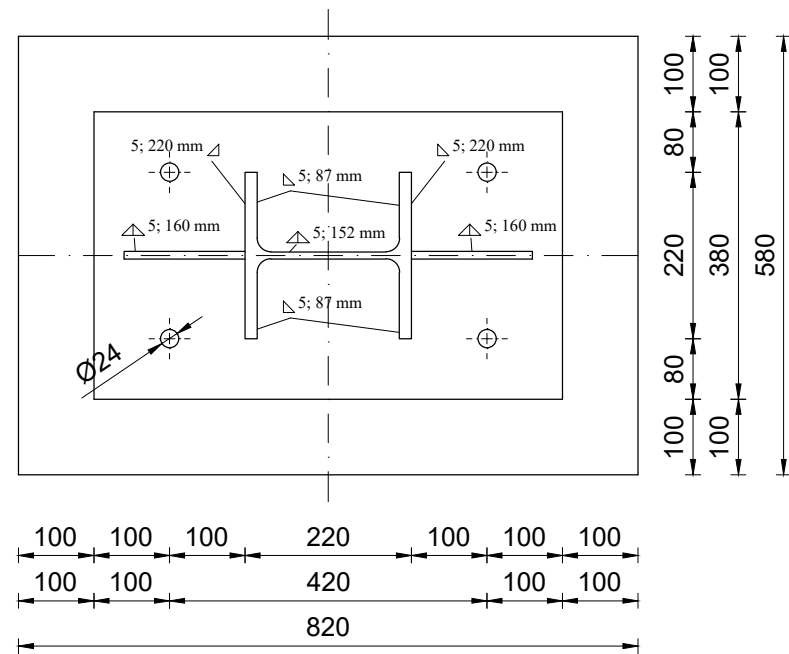
UZDUŽNI POGLED



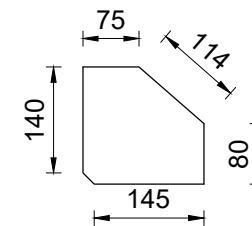
G F GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
ZAVRŠNI RAD		SADRŽAJ NACRTA: Dispozicija čelične nadstrešnice	
STUDENT: Antonio Marić		KOLEGIJ: OSNOVE ČELIČNIH KONSTRUKCIJA	
MENTOR: Doc.dr.sc. Paulina Krolo	DATUM PREDAJE: 9.2023.	MJERILO: 1:150	LIST: 1.

DETALJ SPOJA GLAVNOG STUPA NA TEMELJ

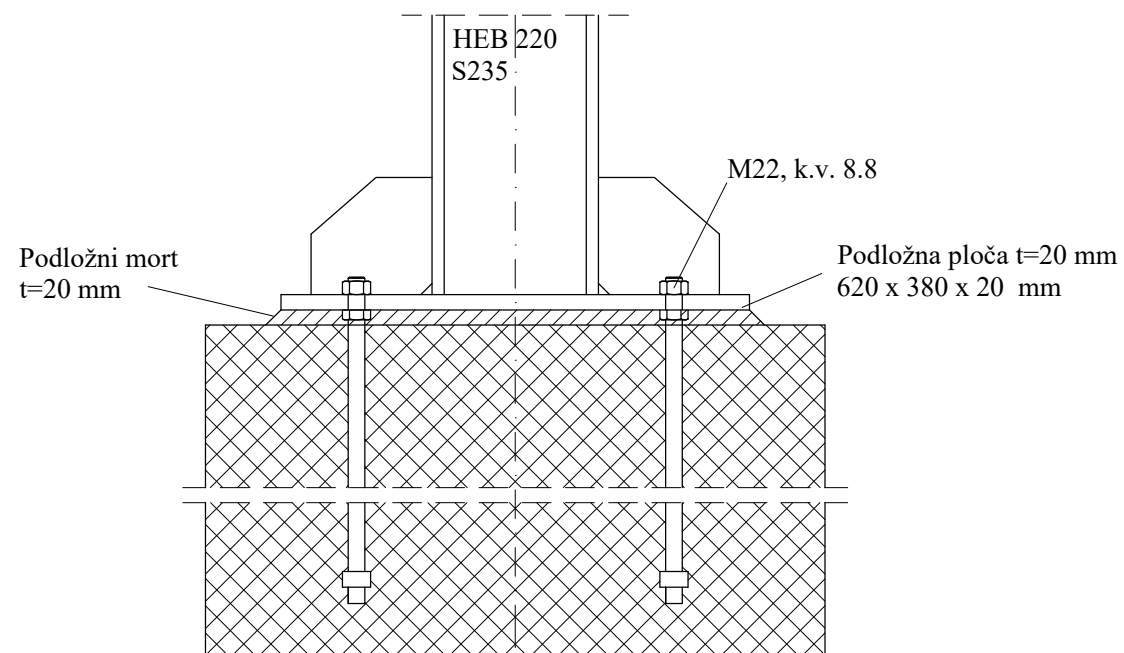
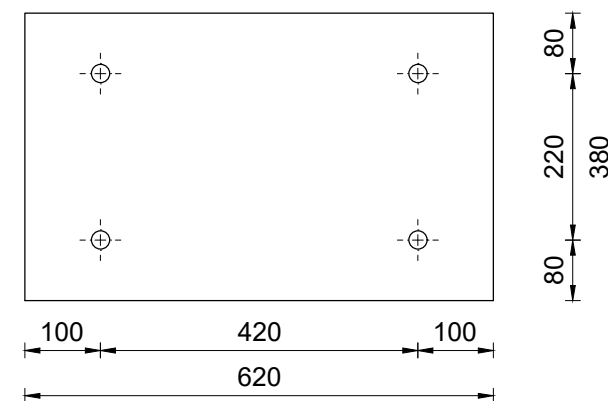
M 1:10



DIMENZIJE UKRUTE



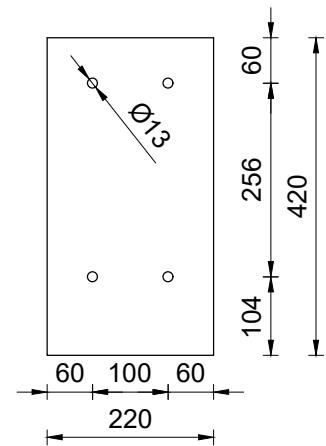
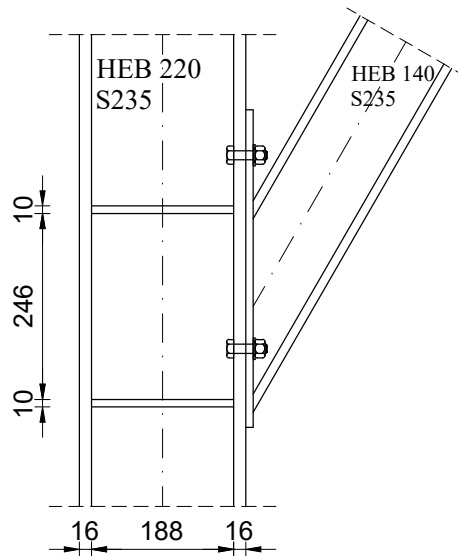
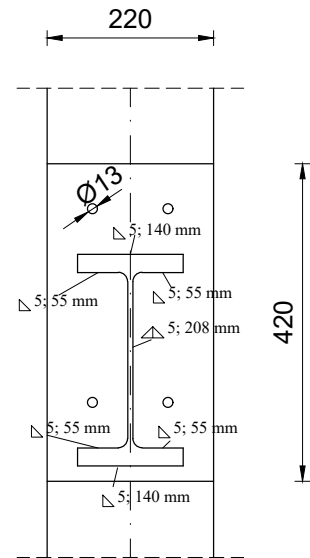
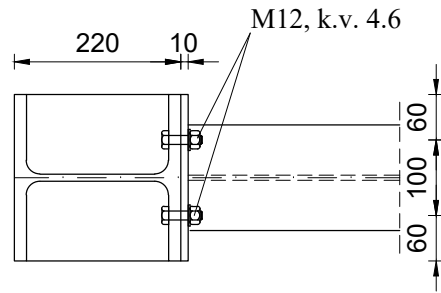
DIMENZIJE PLOČE




GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
ZAVRŠNI RAD	SADRŽAJ NACRTA: Detalj spoja stupa s temeljom		
STUDENT: Antonio Marić	KOLEGIJ: OSNOVE ČELIČNIH KONSTRUKCIJA		
MENTOR: Doc.dr.sc. Paulina Krolo	DATUM PREDAJE: 9.2023	MJERILO: 1:10	LIST: 2.

DETALJ SPOJA GLAVNOG STUPA I DESNOG KOSOG STUPA

M 1:10



 GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
ZAVRŠNI RAD	SADRŽAJ NACRTA: Detalj spoja glavnog stupa i desnog kosog stupa		
STUDENT: Antonio Marić	KOLEGIJ: OSNOVE ČELIČNIH KONSTRUKCIJA		
MENTOR: Doc.dr.sc. Paulina Krolo	DATUM PREDAJE: 9.2023.	MJERILO: 1:10	LIST: 3.