

Proračun čelične konstrukcije za podupiranje solarnih panela na tlu

Radoslović, Lea

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:157:837504>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-22**



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

Lea Radoslović

Proračun čelične konstrukcije za podupiranje solarnih panela na tlu

Završni rad

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ
Osnove čeličnih konstrukcija**

**Lea Radoslović
JMBAG: 0114035540**

Proračun čelične konstrukcije za podupiranje solarnih panela na tlu

Završni rad

Rijeka, 2024.

IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s 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.

Lea Radoslović

U Rijeci, 1.7.2024.

Sažetak:

U ovom završnom radu napravljen je projekt čelične konstrukcije za pridržavanje solarnih panela na tlu na lokaciji Zaton Obrovački. Rad obuhvaća teorijski dio o solarnim panelima i konstrukcijama za podupiranje te proračunski dio kojim je obuhvaćena analiza opterećenja prema normama- stalno, snijeg i vjetar, definiranje modela u programu „Robot Structural Analysis“ pomoću kojeg su dobivene unutarnje sile te dimenzioniranje elemenata konstrukcije prema graničnom stanju nosivosti i uporabljivosti. Oblikovan je detalj spoja stupa na temelj za koji su napravljene provjere vijčanog i zavarenog spoja. Nakon projektiranja konstrukcije, provedena je i usporedba djelovanja vjetra na pojedinačnu konstrukciju i na cijelo polje solarnih panela (10x3) koje čini niz pojedinačnih konstrukcija (10x3). Za usporedbu korišten je program „Robot Structural Analysis“ u kojem je napravljena simulacija vjetra.

Ključne riječi:

Solarni paneli, čelična konstrukcija, analiza opterećenja, dimenzioniranje, granično stanje nosivosti, granično stanje uporabljivosti, čelični spojevi

Abstract:

This final work contains project of steel structure made for supporting solar panels on the floor at the location Zaton Obrovački. Work includes theoretical part about solar panels, load determination by norms- constant load, wind and snow, defining the model in the program “Robot Structural Analysis” which was used to get internal forces and dimensioning construction elements for the ultimate limit state and the serviceability limit state. Column base connection is designed and calculated for bolts and welds that make the connection. After designing the structure, a comparison was made between wind load on single construction and the whole field of solar panels (10x3) of constructions made out of series of single constructions (10x3). Comparison is made by the program “Robot Structural Analysis” where the simulation of the wind was made.

Key words:

Solar panels, steel structure, load analysis, dimensioning, ultimate limit state, serviceability limit state, steel connections

Popis tablica:

Tablica 1: Koeficijent izloženosti za različitu topografiju [18].....	17
Tablica 2: Kategorije i parametri terena [18]	21
Tablica 3: Površine pojedinih zona za 1. vjetar	25
Tablica 4: Koeficijenti neto tlaka zraka za jednostrešne nadstrešnice [18].....	25
Tablica 5: Tlak vjetra koji djeluje na površinu 1. vjetra kao pritisak	26
Tablica 6: Tlak vjetra koji djeluje na površinu 1. vjetra kao usis	28
Tablica 7: Površine pojedinih zona za 2. slučaj vjetra	29
Tablica 8: Tlak vjetra za 2. slučaj vjetra koji djeluje kao pritisak	29
Tablica 9: Tlak vjetra za 2. slučaj vjetra koji djeluje kao usis.....	31
Tablica 10: Parcijalni faktori za kombinacije opterećenja.....	33
Tablica 11: Podaci o presjeku i opterećenjima za podrožnice.....	36
Tablica 12: Uvjeti za klasifikaciju vanjskih elemenata [16]	38
Tablica 13: Uvjeti za klasifikaciju unutarnjih elemenata [16]	39
Tablica 14: Klasifikacija poprečnog presjeka podrožnica	40
Tablica 15: Otpornost poprečnog presjeka podrožnice na tlak	41
Tablica 16: Otpornost poprečnog presjeka podrožnice na savijanje	41
Tablica 17: Otpornost poprečnog presjeka podrožnica na posmik	42
Tablica 18: Provjera razine uzdužne sile za podrožnicu	43
Tablica 19: Razina poprečne sile za podrožnicu.....	43
Tablica 20: Faktor imperfekcije za izvijanje [16]	44
Tablica 21: Otpornost na izvijanje oko osi y-y za podrožnicu	45
Tablica 22: Otpornost na izvijanje oko osi z-z za podrožnicu	46
Tablica 23: Faktori za izračun kritičnog momenta bočno torzijskog izvijanja [16]	47
Tablica 24: Otpornost na bočno torzijsko izvijanje podrožnice	48
Tablica 25: Faktor imperfekcije za bočno torzijsko izvijanje [16]	49
Tablica 26: Interakcijski faktor k_{yy} za podrožnice	49
Tablica 27: Interakcijski faktor k_{zy}	50
Tablica 28: Interakcijske formule za podrožnice	51
Tablica 29: Podaci o presjeku i opterećenju na glavne nosače.....	52
Tablica 30: Klasifikacija poprečnog presjeka glavnog nosača.....	56

Tablica 31: Otpornost na tlak poprečnog presjeka glavnog nosača	56
Tablica 32: Otpornost na savijanje poprečnog presjeka glavnog nosača	57
Tablica 33: Otpornost na posmik poprečnog presjeka glavnog nosača	57
Tablica 34: Razine uzdužne sile za glavne nosače	58
Tablica 35: Razine poprečne sile za glavne nosače	58
Tablica 36: Otpornost na izvijanje oko osi y-y glavnih nosača.....	59
Tablica 37: Otpornost na izvijanje oko osi z-z glavnih nosača	60
Tablica 38: Otpornost na bočno torzijsko izvijanje glavnih nosača.....	62
Tablica 39: Interakcijski faktor k_{yy} za glavne nosače.....	63
Tablica 40: Interakcijski faktor k_{zy} za glavne nosače	64
Tablica 41: Interakcijske formule za glavne nosače	64
Tablica 42: Podaci o presjeku i opterećenja za kosnik.....	67
Tablica 43: Klasifikacija poprečnog presjeka kosnika.....	67
Tablica 44: Otpornost na tlak poprečnog presjeka kosnika	68
Tablica 45: Otpornost na izvijanje kosnika	69
Tablica 46: Provjere za različite profile za kosnik	70
Tablica 47: Podaci o presjeku i opterećenja za stup	71
Tablica 48: Klasifikacija poprečnog presjeka stupa	74
Tablica 49: Otpornost na tlak poprečnog presjeka stupa.....	75
Tablica 50: Otpornost na savijanje poprečnog presjeka stupa	75
Tablica 51: Otpornost na posmik poprečnog presjeka stupa.....	76
Tablica 52: Razina uzdužne sile za stup	77
Tablica 53: Razine poprečne sile za stup	77
Tablica 54: Otpornost na izvijanje oko osi y-y stupa.....	78
Tablica 55: Otpornost na izvijanje oko osi z-z stupa	79
Tablica 56: Otpornost na bočno torzijsko izvijanje stupa	81
Tablica 57: Interakcijski faktor k_{yy} stupove	82
Tablica 58: Tablica 26: Interakcijski faktor k_{zy} za stupove	83
Tablica 59: Interakcijske formule za stupove	84
Tablica 60: Uvjet graničnog stanja uporabljivosti za stup.....	85
Tablica 61: Uvjet graničnog stanja uporabljivosti za glavni nosač.....	86
Tablica 62: Uvjet graničnog stanja uporabljivosti za podrožnicu.....	87

Tablica 63: Uvjet graničnog stanja uporabljivosti za kosnik	88
Tablica 64: Opterećenja na spoju stupa i temelja	89
Tablica 65: Granica popuštanja i vlačna čvrstoća za različite kvalitete vijaka [16]	91
Tablica 66: Promjer rupe i površina jezgre vijaka za vijke M12- M36 [16]	91
Tablica 67: Otpornost vijaka na posmik	93
Tablica 68: Otpornost na pritisak po omotaču rupe osnovnog materijala.....	94
Tablica 69: Otpornost vijaka na vlak	96
Tablica 70: Interakcija vlaka i posmika.....	96
Tablica 71: Otpornost zavarenog spoja	98

Popis slika:

Slika 1: Solarni paneli na krovu [1]	10
Slika 2: Solarni paneli kao pokrov nadstrešnice za auto	11
Slika 3: Solarni paneli na stupu	11
Slika 4: Polje solarnih panela [4]	12
Slika 5: Čelična konstrukcija za pridržavanje solarnih panela [5]	12
Slika 6: Drvena konstrukcija za pridržavanje solarnih panela [6]	13
Slika 7: Betonska konstrukcija za pridržavanje solarnih panela [7]	13
Slika 8: Odabrana ploča solarnog panela [9]	15
Slika 9: Zadano stalno opterećenje u programu "Robot Structural Analysis"	16
Slika 10: Graf koeficijanta nagiba krova	17
Slika 11: Karta snježnih područja Republike Hrvatske [9]	18
Slika 12: Opterećenje snijegom zadano u programu "Robot Structural Analysis"	19
Slika 13: Karta osnovne brzine vjetra Republike Hrvatske [20]	20
Slika 14: Vjetrovne zone za prvi slučaj vjetra	24
Slika 15: Slika opterećenja prvog slučaja vjetra kao pritiska	26
Slika 16: Opterećenje prvim slučajem vjetra kao pritiska zadanog u programu "Robot Structural Analysis"	27
Slika 17: Skica djelovanja vjetra na slobodnostojeću nadstrešnicu [18]	27
Slika 18: Skica djelovanja prvog slučaja vjetra kao usisa	28
Slika 19: Opterećenje prvog slučaja vjetra kao usisa zadano u programu "Robot Structural Analysis"	28
Slika 20: Zone djelovanja za drugi slučaj vjetra	29
Slika 21: Opterećenje drugog slučaja vjetra kao pritiska	30
Slika 22: Opterećenje drugog slučaja vjetra kao pritiska zadano u programu "Robot Structural Analysis"	30
Slika 23: Skica djelovanja drugog slučaja vjetra kao usisa	31
Slika 24: Djelovanje drugog slučaja vjetra kao usisa zadano u programu "Robot Structural Analysis"	32
Slika 25: Definirane kombinacije djelovanja u programu "Robot Structural Analysis"	34
Slika 26: Model konstrukcije zadan u programu "Robot Structural Analysis"	35
Slika 27: Podrožnice	35

Slika 28: Poprečni presjek podrožnica- UPE 80 [18].....	36
Slika 29: Dijagram uzdužnih sila za podrožnicu	37
Slika 30: Dijagram poprečnih sila za podrožnicu	37
Slika 31: Detaljni dijagram poprečnih sila za podrožnicu	37
Slika 32: Momentni dijagram za podrožnicu	37
Slika 33: Duljine izvijanja [16]	44
Slika 34: Momentni dijagram za određivanje faktora kritičnog momenta	47
Slika 35: Glavni nosači	51
Slika 36: Poprečni presjek glavnih nosača- UPE 80 [11]	52
Slika 37: Dijagram uzdužne sile glavnih nosača.....	53
Slika 38: Dijagram poprečnih sila za glavnih nosača.....	53
Slika 39: Momentni dijagram za glavne nosače	54
Slika 40: Kosnik.....	65
Slika 41: Dijagram uzdužnih sila za kosnik	65
Slika 42: Dijagram poprečnih sila za kosnik.....	66
Slika 43: Momentni dijagram za kosnik	66
Slika 44: Poprečni presjek kosnika- Hybox SHS 30x30x2,5 [13].....	67
Slika 45: Stupovi	70
Slika 46: Poprečni presjek stupova- HEA 100 [14].....	71
Slika 47: Dijagram uzdužnog opterećenja stupa	72
Slika 48: Dijagram poprečnih sila stupa	72
Slika 49: Momentni dijagram stupa.....	73
Slika 50: Momentni dijagram stupa za određivanje faktora kritičnog momenta bočno torzijskog izvijanja	80
Slika 51: Deformacije stupa u programu "Robot Structural Analysis"	85
Slika 52: Deformacije primarnih greda u programu "Robot Structural Analysis"	86
Slika 53: Deformacije podrožnica u programu "Robot Structural Analysis"	87
Slika 54: Deformacije kosnika u programu "Robot Structural Analysis"	88
Slika 55: Spoj stupa na temelj	89
Slika 56: Uzdužna sila na spoju stupa i temelja	90
Slika 57: Poprečna sila na spoju stupa i temelja.....	90
Slika 58: Moment savijanja na spoju stupa i temelja	91

<i>Slika 59: Tlocrt spoja</i>	92
Slika 60: Nacrt i bokocrt spoja	92
Slika 61: Komponente momenta savijanja na vijčanom spoju	95
Slika 62: Komponente momenta savijanja za zavar	97
Slika 63: Djelovanje vjetra na pojedinačnu konstrukciju u smjeru +X	99
Slika 64: Djelovanje vjetra na pojedinačnu konstrukciju u smjeru -X	100
Slika 65: Djelovanje vjetra na pojedinačnu konstrukciju u smjeru +/-Y	100
Slika 66: Zone vjetra kod simulacije vjetra u programu „Robot Structural Analysis“	101
Slika 67: Zone vjetra kod proračuna prema normi.....	102
Slika 68: Djelovanje vjetra na polje solarnih panela u smjeru +X	103
Slika 69: Djelovanje vjetra na polje solarnih panela u smjeru -X.....	103
Slika 70: Djelovanje vjetra na polje solarnih panela u smjeru +/-.....	103

Sadržaj:

1. UVOD.....	10
1.1 Solarni paneli	10
1.2. Konstrukcije za pridržavanje solarnih panela	12
2. TEHNIČKI OPIS	14
3. ANALIZA OPTEREĆENJA.....	15
3.1. Stalno djelovanje.....	15
3.2. Promjenjivo djelovanje	16
3.2.1. Snijeg	16
3.2.2. Vjetar	19
4. KOMBINACIJE OPTEREĆENJA.....	33
5. DIMENZIONIRANJE ELEMENATA KONSTRUKCIJE PREMA GRANIČNOM STANJU NOSIVOSTI .	35
5.1. Podrožnice.....	35
5.2. Glavni nosači	51
5.3. Kosnik.....	65
5.4. Stupovi	70
6. DIMENZIONIRANJE ELEMENATA KONSTRUKCIJE NA GRANIČNO STANJE UPORABLJIVOSTI .	85
6.1. Stup.....	85
6.2. Glavni nosač	86
6.3. Podrožnice.....	87
6.4. Kosnik.....	88
7. PRIKLJUČAK STUPA NA ARMIRANO BETONSKI TEMELJ.....	89
7.1. Otpornost vijaka.....	91
7.2. Otpornost zavara.....	97
8. USPOREDBA DJELOVANJE VJETRA NA SAMOSTALNU KONSTRUKCIJU I KADA ONE ČINE POLJE SOLARNIH PANELA	99
8.1. Simulacija vjetra na samostalnu konstrukciju	99
8.2. Simulacija vjetra na polje konstrukcija	102
9. ZAKLJUČAK	105
10. LITERATURA I IZVORI.....	106
10.1. Slike.....	106
10.2. Literatura	107
10.3. Norme	107
10.4. Solarni paneli	108

11. NACRTI..... 109

1. UVOD

1.1 Solarni paneli

Solarni paneli, poznati i kao fotonaponski paneli, odnosno uređaji izgrađeni od silicija čija je svrha pretvaranje sunčeve energije u električnu, postali su vrlo popularni zbog brzog isplaćivanja same konstrukcije odnosno mogućnosti ekonomičnog dobivanja električne energije. Rade na principu fotonaponskog efekta kojeg je otkrio francuski fizičar Alexandre-Edmond Becquerel 1839. godine. Dolaskom fotona na površinu solarnih panela, oni predaju svoju energiju čime izbijaju negativno nabijene elektrone iz atoma. Panel se sastoji od dvije strane- pozitivne i negativne. Kretanjem negativnih atoma prema negativnoj strani stvara se razlika potencijala, odnosno generira se električna energija.

Postoje razni oblici konstrukcija solarnih panela, a najčešće se postavljaju na krovove (Slika 1), nadstrešnice (Slika 2), stupove (Slika 3) ili kao polje solarnih panela na tlu (Slika 4).



Slika 1: Solarni paneli na krovu [1]



Slika 2: Solarni paneli kao pokrov nadstrešnice za auto [2]



Slika 3: Solarni paneli na stupu [3]



Slika 4: Polje solarnih panela [4]

1.2. Konstrukcije za pridravanje solarnih panela

Najčešće se solarni paneli pridrjavaju metalnim konstrukcijama kao što su čelične (Slika 5) i aluminijske, ali i drvene (Slika 6), a u novije vrijeme razvijaju se i betonska konstrukcijska rješenja za pridravanje (Slika 7) [23].



Slika 5: Čelična konstrukcija za pridravanje solarnih panela [5]



Slika 6: Drvena konstrukcija za pridržavanje solarnih panela [6]



Slika 7: Betonska konstrukcija za pridržavanje solarnih panela [7]

2. TEHNIČKI OPIS

Konstrukcija za pridržavanje solarnih panela smještena na lokaciji Zaton Obrovački je izgrađena od čelika klase S235, tlocrtnih dimenzija 40,55x 4,42 m. Pojedinačne konstrukcije čine polje solarnih panela 10x3. Glavna nosiva konstrukcija sastavljena je od dva stupa HEA 100, postavljena na osnovnom razmaku od 3,08 metara, dva kosnika poprečnog presjeka Hybox SHS 30x30x2,5, i nosive grede duljine 4,69m položene pod kutom od 20° poprečnog presjeka UPE 80. Glavne konstrukcije su postavljene na razmaku od 2,20 m i ukupno ih je u svakoj konstrukciji 19. Glavne nosive konstrukcije međusobno su povezane podrožnicama postavljenih preko dva raspona duljine 4,40 metara poprečnog presjeka UPE 80. Stup i temelj spojeni su upeto pomoću 4 vijka M12, k.v. 4,6 i zavara širine 5 mm. Na konstrukciju djeluje stalno opterećenje, opterećenje snijegom određeno prema normi HRN EN 1991-1-3:2012 [17] i nacionalnom dodatku HRN EN 1991-1-3:2012/NA [19], i opterećenje vjetrom određeno prema normi HRN EN 1991-1-4:2012 [18] i nacionalnom dodatku HRN EN 1991-1-4:2012/NA [20].

3. ANALIZA OPTEREĆENJA

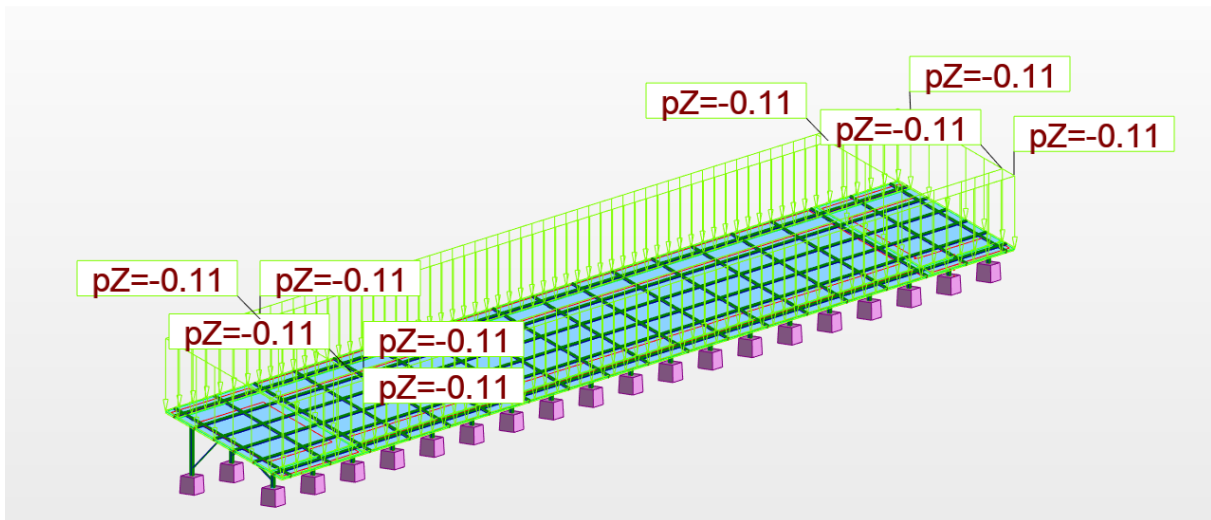
3.1. Stalno djelovanje

Stalno djelovanje sastoji se od težine čelične konstrukcije koja se zadaje u programu „Robot Structural Analysis“ i od težine solarnih panela (Slika 8). Odabran je solarni modul RSM110-8-540m, od firme ENF Solars [21].

Masa ploče iznosi 29 kilograma, a dimenzije su 2384x1096x35 mm. Težina iznosi 0,111 kN/m² (Slika 9).



Slika 8: Odabrana ploča solarnog panela [9]



Slika 9: Zadano stalno opterećenje u programu "Robot Structural Analysis"

3.2. Promjenjivo djelovanje

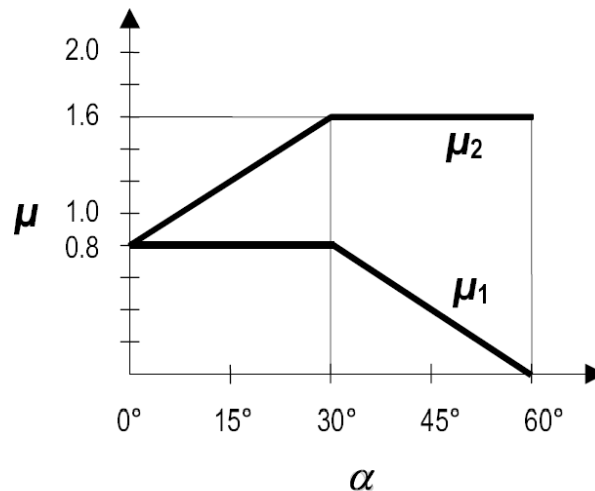
3.2.1. Snijeg

Proračun je proveden prema normi EN 1991-1-3 [17] i nacionalnom dodatku nHRN-EN-1991-1-3 [19]. Lokacija polja solarnih panela smještena je u Zatonu Obrovačkom koji je na nadmorskoj visini od 152 metara. Prema nacionalnom dodatku [19], u Republici Hrvatskoj ne određuju se iznimni uvjeti pa se s toga opterećenje snijegom određuje prema izrazu (1):

$$S = \mu_1 * C_e * C_t * S_k \quad (1)$$

u kojem S predstavlja opterećenje snijegom, μ_1 koeficijent nagiba krova, C_e koeficijent izloženosti, C_t koeficijent temperature i S_k proračunsko opterećenje snijegom na tlu.

Koeficijent nagiba krova, μ_1 određuje se pomoću grafa na Slici 10:



Slika 10: Graf koeficijanta nagiba krova [17]

Za nagib konstrukcije od 20°, μ_1 je jednak 0,8.

Koeficijent izloženosti određuje se prema Tablici 1 za različitu topografiju:

Tablica 1: Koeficijent izloženosti za različitu topografiju [18]

Topography	C_e
Windswept ^a	0,8
Normal ^b	1,0
Sheltered ^c	1,2

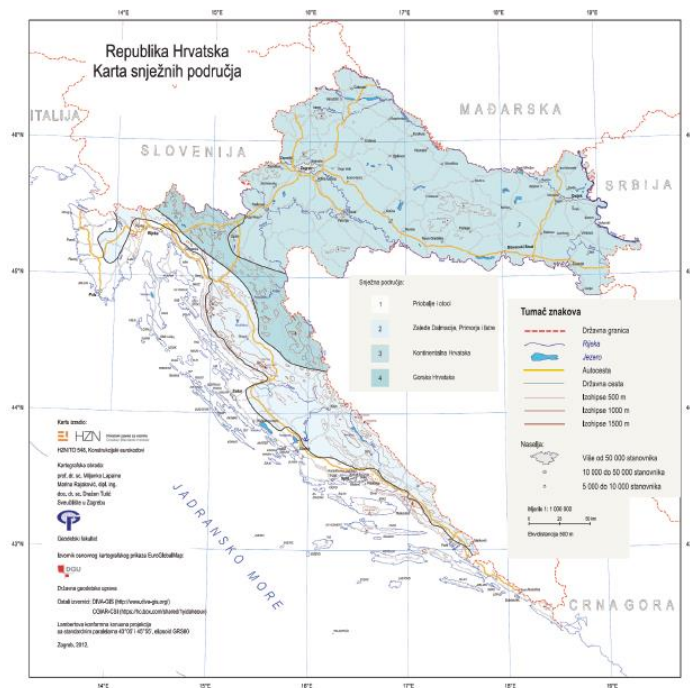
^a *Windswept topography*: flat unobstructed areas exposed on all sides without, or little shelter afforded by terrain, higher construction works or trees.

^b *Normal topography*: areas where there is no significant removal of snow by wind on construction work, because of terrain, other construction works or trees.

^c *Sheltered topography*: areas in which the construction work being considered is considerably lower than the surrounding terrain or surrounded by high trees and/or surrounded by higher construction works.

Hrvatski nacionalni dodatak [19] prihvaća vrijednosti koeficijenta izloženosti, $C_e=1$ i toplinskog koeficijenta, $C_t=1$.

Proračunsko opterećenje snijegom na tlu za područje Republike Hrvatske određuje se prema karti snježnih područja Republike Hrvatske koja se koristi u mjerilu 1:1 000 000 [19]. Lokacija Zaton Obrovački nalazi se u 2. snježnom području, na nadmorskoj visini manjoj od 300 metara nad morem pa S_k iznosi 0,75 kN/m² (Slika 11).



Slika 11: Karta snježnih područja Republike Hrvatske [9]

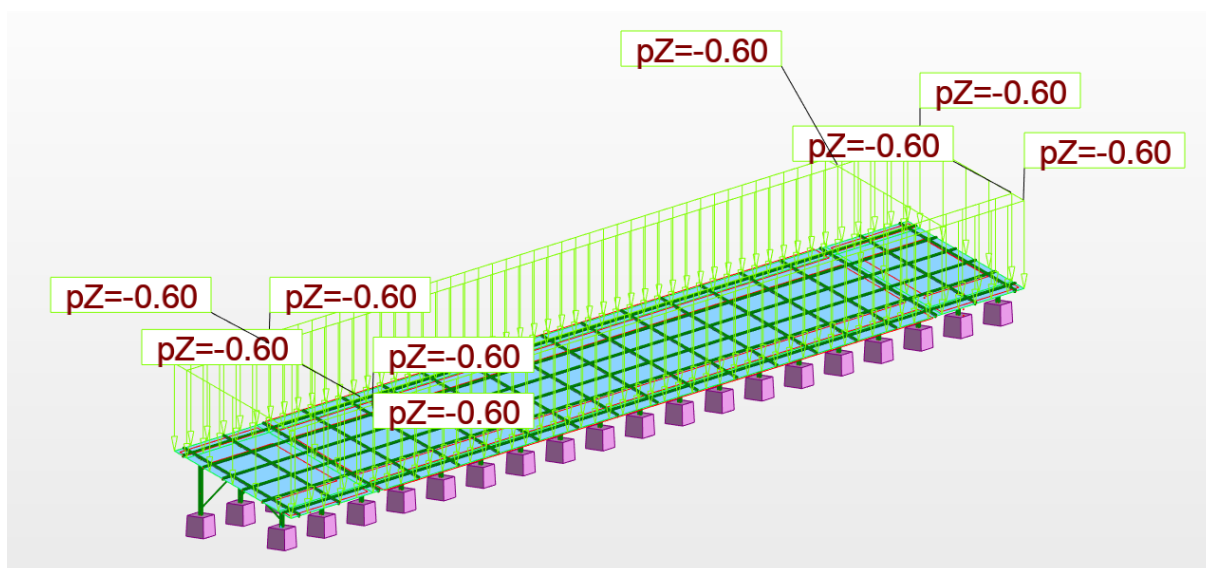
Iz poznatih vrijednosti:

$$\mu_1 = 0,8$$

$$C_e = 1$$

$$C_t = 1$$

$S_k = 0,75 \text{ kN/m}^2$, prema izrazu (1): $S = \mu_1 * C_e * C_t * S_k$, dobiveno je opterećenje snijegom koje iznosi $0,6 \text{ kN/m}^2$. Opterećenje je nanoseno na konstrukciju u programu „Robot Structural Analysis“ (Slika 12).



Slika 12: Opterećenje snijegom zadano u programu "Robot Structural Analysis"

3.2.2. Vjetar

Opterećenje vjetrom proračunato je prema normi nHRN EN 1991-1-4 [18] i nacionalnom dodatku nHRN 1991-1-4-2012_NA [20].

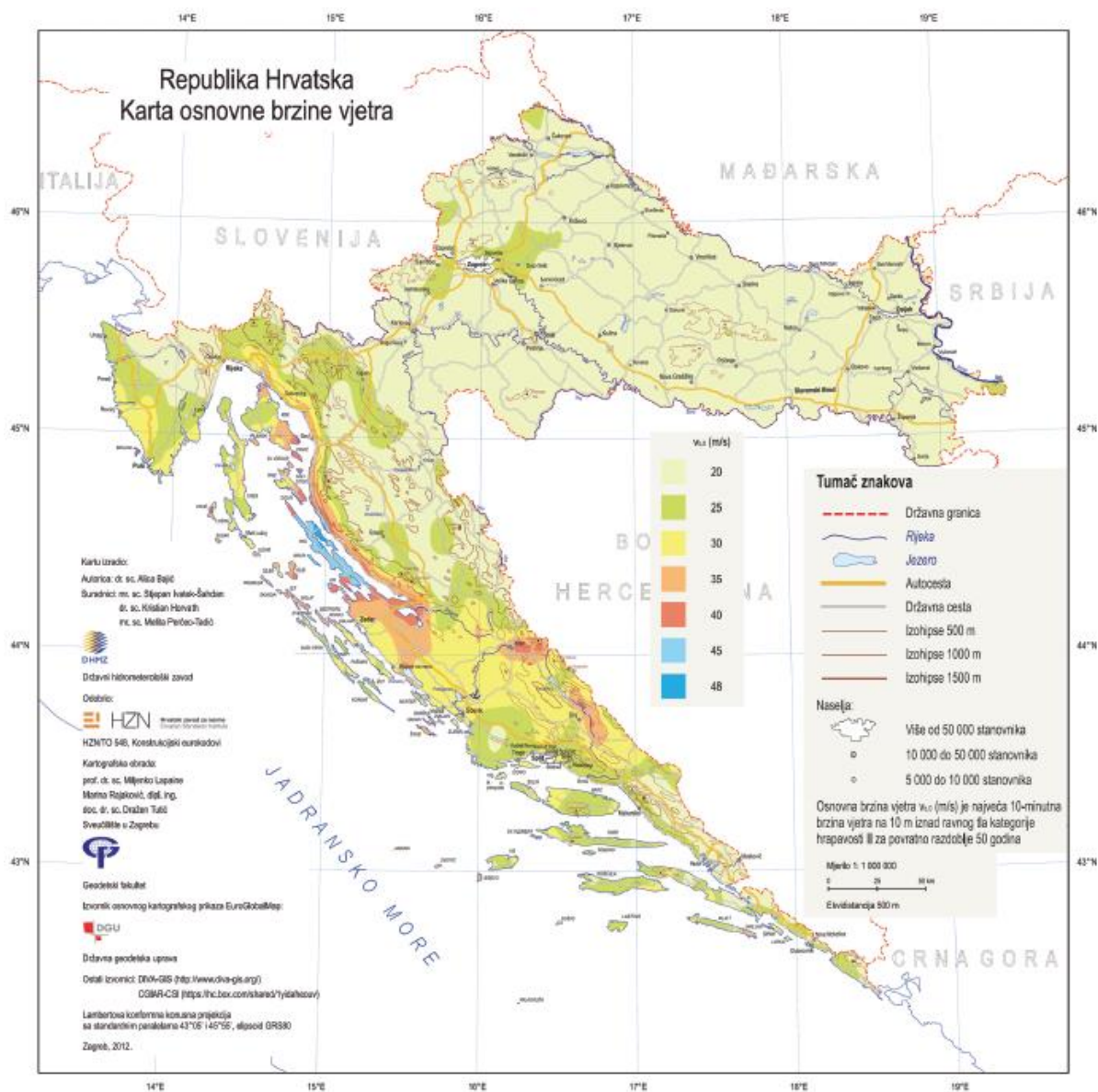
Prilikom određivanja opterećenja vjetrom, potrebno je odrediti brzinu vjetra i tlak čija vrijednost ovisi o srednjoj i promjenljivoj komponenti.

Osnovna brzina vjetra

Osnovna brzina vjetra proračunava se prema izrazu (2):

$$v_b = C_{dir} * C_{season} * V_{b,0} \quad (2)$$

u kojem v_b označava osnovnu brzinu vjetra, koja je određena kao funkcija smjera i godišnjeg doba, C_{dir} faktor smjera, C_{season} faktor godišnjeg doba i $v_{b,0}$ temeljnu vrijednost osnovne brzine vjetra. Osnovna brzina vjetra $V_{b,0}$ se određuje prema karti osnovne brzine vjetra koja se nalazi u nacionalnom dodatku normi (Slika 13) [20].



Slika 13: Karta osnovne brzine vjetra Republike Hrvatske [20]

Na lokaciji Zaton Obrovački, osnovna brzina vjetra iznosi 30m/s. Preporučena vrijednost faktora smjera, C_{dir} , kao i faktora godišnjeg doba, C_{season} iznosi 1.

Iz prethodno određenih parametra određuje se osnovna brzina vjetra V_b , po izrazu (2) i jednaka je 30m/s:

$$v_{b,0} = 30 \text{ m/s}$$

$$C_{dir} = 1$$

$$C_{season} = 1.$$

Brzina vjetra iznad terena

Brzina vjetra iznad terena mijenja se ovisno o hrapavosti terena, vertikalnoj razvedenosti i osnovnoj brzini vjetra pa ju je potrebno odrediti iz izraza (3):

$$V_m(z) = C_r(z) * C_o(z) * v_b \quad (3)$$

u kojem je $C_r(z)$ faktor hrapavosti, $C_o(z)$ faktor vertikalne razvedenosti i v_b osnovna brzina vjetra.

Prema Tablici 3, Zaton Obrovački spada u II: kategoriju pa se usvajaju vrijednosti duljine hrapavosti, $z_o = 0,05$ metara i najmanje visine, $z_{min} = 2$ metra.

Tablica 2: Kategorije i parametri terena [18]

Kategorija terena		z_o [m]	z_{min} [m]
0	More ili priobalna područja izložena otvorenom moru	0,003	1
I	Jezera ili ravna i horizontalno položena područja sa zanemarivom vegetacijom i bez prepreka	0,01	1
II	Područja s niskom vegetacijom, npr. travom, i izoliranim preprekama (drveće, zgrade) s razmakom najmanje 20 visina prepreke	0,05	2
III	Područja sa stalnim pokrovom od vegetacije ili zgrade ili područja s izoliranim preprekama s razmakom najviše 20 visina prepreke (npr. sela, predgrađa, stalna šuma)	0,3	5
IV	Područja s najmanje 15 % površine pokrivene zgradama čija prosječna visina premašuje 15 m	1,0	10

NAPOMENA: Kategorije terena prikazane su na slikama u točki A.1.

Iz prethodno određenih parametra, proračunava se faktor terena ovisan o duljini hrapavosti z_o koji je proračunat primjenom izraza (4):

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_o}{z_{o,II}} \right)^{0,07} \quad (4)$$

u kojem $z_{o,II}$ definira duljinu hrapavosti za II.: kategoriju terena i iznosi 0,05 metara. Uvrštavanjem u izraz (4) dobiva se vrijednost faktora terena, k_r koji iznosi 0,19.

Faktor hrapavosti se određuje prema izrazu (5):

$$C_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (5)$$

gdje je z visina čelične konstrukcije koja iznosi 2,133 metra. Uvrštavanjem prethodno definiranih parametara u izraz (5) dobiva se vrijednost $C_r(z)$ koja iznosi 0,713.

Faktor vertikalne vrijednosti $C_o(z)$ jednak je 1.

Određuje se brzina vjetra iznad terena prema izrazu (3)

$$v_m(z) = C_r(z) * C_o(z) * v_b. \quad (3)$$

Uvrštavanjem dobiva se izraz: $v_m(z) = 0,713 * 1 * 30 = 21,39m/s$.

Turbulencija vjetra

Intenzitet turbulencije, $I_v(z)$ na visini z određuje se prema izrazu (6):

$$I_v(z) = \frac{\delta_v}{v_m(z)} = \frac{k_1}{C_o(z) * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (6)$$

u slučaju kada vrijedi: $z_{min} < z < z_{max}$ u kojem je

- k_1 faktor turbulencije jednak 1,

- c_o faktor vertikalne razvedenosti jednak 1,

- z visina čelične konstrukcije jednaka 2,133 metara,

- z_0 duljina hrapavosti jednaka 0,05 metara.

Uvrštavanjem u izraz (6) dobiva se vrijednost intenziteta turbulencije:

$$I_v(z) = \frac{1}{1 * \ln\left(\frac{2,133}{0,05}\right)} = 0,266.$$

Tlak pri vršnoj brzini

Potrebno je odrediti tlak pri vršnoj brzini, $q_p(z)$ na visini z , koji obuhvaća srednje i kratkotrajne promjene brzine prema izrazu (7) :

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] \frac{1}{2} \rho v_m^2(z) = c_e(z) q_b \quad (7)$$

u kojem je:

- $I_v(z)$ intenzitet turbulencije jednak 0,266,

- ρ gustoća zraka ovisna o nadmorskoj visini, temperaturi i atmosferskom tlaku koji se očekuju u području tijekom oluja koja prema nacionalnom dodatku [20] iznosi $1,25 \text{ kg/m}^3$,

- $v_m(z)$ brzina vjetra iznad terena jednaka $21,39 \text{ m/s}$,

- $c_e(z)$ faktor izloženosti dan izrazom $C_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b}$,

- q_b tlak pri osnovnoj brzini dan izrazom $q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2$.

Uvrštavanjem prethodno navedenih parametara u izraz (7) dobiva se:

$$q_p(z) = [1 + 7 * 0,266] * 0,5 * 1,25 * 21,39^2 = 0,818 \text{ kN/m}^2.$$

Tlak pri osnovnoj brzini

Tlak pri osnovnoj brzini dan je izrazom (8):

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2 \quad (8)$$

gdje je

- v_b osnovna brzina vjetra koja iznosi 30 m/s .

Uvrštavanjem u izraz (8) dobiva se: $q_b = \frac{1}{2} * 1,25 * 30^2 = 0,562 \text{ kN/m}^2$.

Iz prethodno izračunatih vrijednosti tlaka zraka pri vršnoj brzini, $q_p(z) = 0,818 \text{ kN/m}^2$ i tlaka zraka pri osnovnoj brzini, $q_b = 0,562 \text{ kN/m}^2$, izračunava se koeficijent izloženosti $c_e(z)$ koji je dan izrazom (9)

$$C_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (9)$$

i nakon uvrštavanja vrijednosti u izraz (9) je jednak $C_e(z) = \frac{0,818}{0,562} = 1,456$.

Proračun koeficijenata vanjskog tlaka

Koeficijent vanjskog tlaka računa se kao konstrukcija jednostrešne nadstrešnice, odnosno krov konstrukcije koja nema stalne zidove. Proračun se dijeli na dva slučaja, kojim se obuhvaćaju sve varijante smjera puhanja vjetra budući da je konstrukcija simetrična.

Tlak vjetra koji djeluje na površinu određuje se iz izraza (10):

$$w_e = q_p(z_e) * C_{pe} \quad (10)$$

gdje je:

- $q_p(z_e)$ tlak pri vršnoj brzini jednak $0,818 \text{ kN/m}^2$,

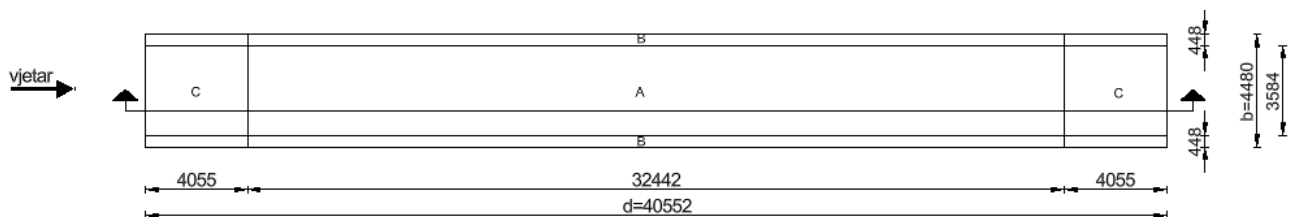
- z_e referentna visina za vanjski tlak i

- C_{pe} koeficijent tlaka za vanjski tlak.

Utjecaj trenja može se zanemariti prema normi [18] iz razloga što je ukupna ploština svih površina paralelnih ili skoro paralelnih s vjetrom jednaka ili manja četverostrukoj ploštini svih vanjskih površina okomitih na vjetar.

Prvi slučaj vjetra

Tlocrt konstrukcije sa određenim vjetrovnim zonama prikazan je Slikom 14.



Slika 14: Vjetrovne zone za prvi slučaj vjetra

Tablica 3: Površine pojedinih zona za 1. vjetar

ZONA	POVRŠINA [m ²]
A	116,28
B	14,53
C	18,36

Iščitavaju se koeficijenti $C_{p,net}$ i C_f , koji se u uzimaju za nagib krova od 20°, i vrijednost ρ koja uzima u obzir kombinirane učinke vjetra koji djeluje i na gornju i na donju površinu nadstrešnice (Tablica 4).

Tablica 4: Koeficijenti neto tlaka zraka za jednostrešne nadstrešnice [18]

		Koeficijenti neto tlaka $c_{p,net}$ tlocrt			
Nagib krova α	Zapriječenost φ	Koeficijenti sveukupne sile c_f	Područje A	Područje B	Područje C
0°	Najveća vrijednost, svi φ	+ 0,2	+ 0,5	+ 1,8	+ 1,1
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 0$	- 0,5	- 0,6	- 1,3	- 1,4
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,5	- 1,8	- 2,2
5°	Najveća vrijednost, svi φ	+ 0,4	+ 0,8	+ 2,1	+ 1,3
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 0$	- 0,7	- 1,1	- 1,7	- 1,8
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,2	- 2,5
10°	Najveća vrijednost, svi φ	+ 0,5	+ 1,2	+ 2,4	+ 1,6
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 0$	- 0,9	- 1,5	- 2,0	- 2,1
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 1$	- 1,4	AC - 1,6 AB	- 2,6	- 2,7
15°	Najveća vrijednost, svi φ	+ 0,7	+ 1,4	+ 2,7	+ 1,8
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 0$	- 1,1	- 1,8	- 2,4	- 2,5
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
20°	Najveća vrijednost, svi φ	+ 0,8	+ 1,7	+ 2,9	+ 2,1
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 0$	- 1,3	- 2,2	- 2,8	- 2,9
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
25°	Najveća vrijednost, svi φ	+ 1,0	+ 2,0	+ 3,1	+ 2,3
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 0$	- 1,6	- 2,6	- 3,2	- 3,2
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,5	- 2,5	- 2,8
30°	Najveća vrijednost, svi φ	+ 1,2	+ 2,2	+ 3,2	+ 2,4
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 0$	- 1,8	- 3,0	- 3,8	- 3,6
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,5	- 2,2	- 2,7
NAPOMENA: + vrijednosti označavaju neto djelovanje vjetra prema dolje - vrijednosti označavaju neto djelovanje vjetra prema gore					

Iz prethodnih podataka određuju se sljedeće vrijednosti:

$-C_f = +0,8$

- $C_{p,net}$: -za područje A= +1,7

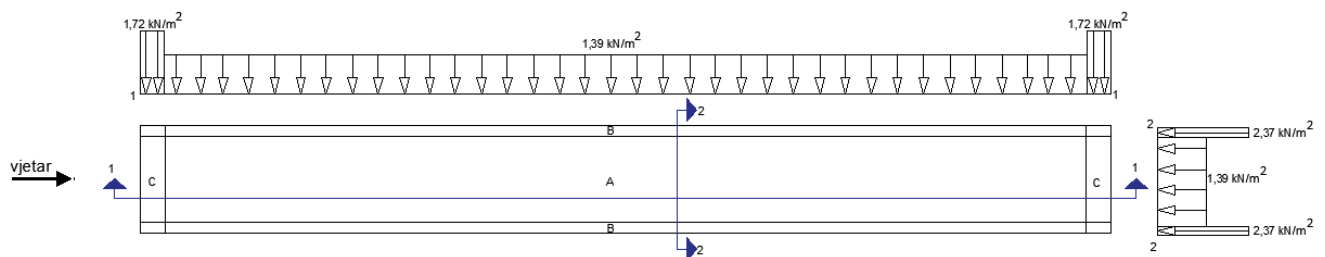
-za područje B= +2,9

-za područje C= +2,1.

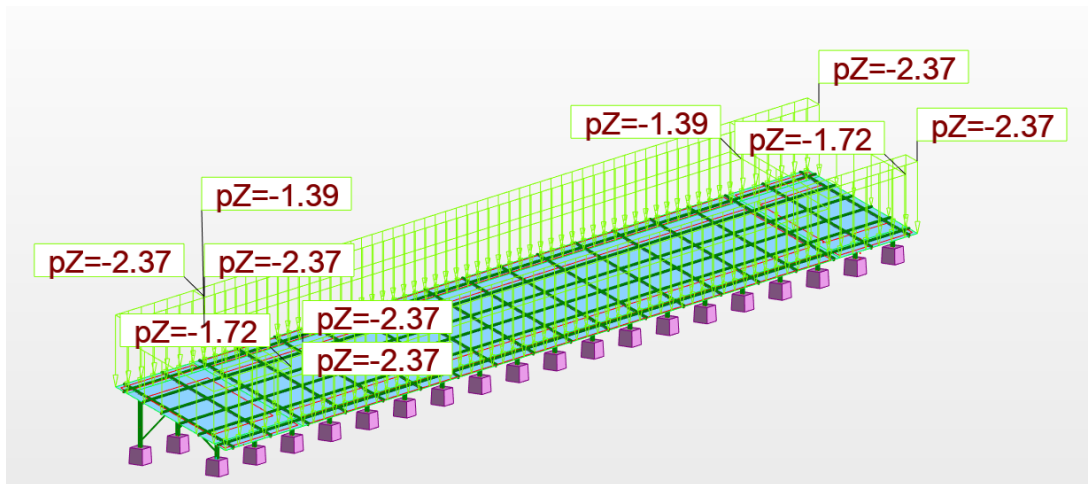
Tlak vjetra koji djeluje na površinu, primjenom izraza (10): $w_e = q_p(z_e) * C_{pe}$, kada djeluje kao pritisak prikazan je u Tablici 5 i Slici 15 i 16.

Tablica 5: Tlak vjetra koji djeluje na površinu 1. vjetra kao pritisak

ZONA	IZRAČUN	TLAK [kN/m ²]
A	$q_p(z_e) * C_{pe} = 0,818 * 1,7$	1,39
B	$q_p(z_e) * C_{pe} = 0,818 * 2,9$	2,37
C	$q_p(z_e) * C_{pe} = 0,818 * 2,1$	1,72



Slika 15: Slika opterećenja prvog slučaja vjetra kao pritiska



Slika 16: Opterećenje prvim slučajem vjetra kao pritiska zadanog u programu "Robot Structural Analysis"

Za slučaj usisa, odnosno djelovanja vjetra prema gore, uzimaju se sljedeće vrijednosti:

- $\rho = 0$ jer se radi o slobodnostojećoj nadstrešnici kao što je prikazano na Slici 17:



Slika 17: Skica djelovanja vjetra na slobodnostojeću nadstrešnicu [18]

- $C_f = -1,3$

- $C_{p,net}$: -za područje A= -2,2

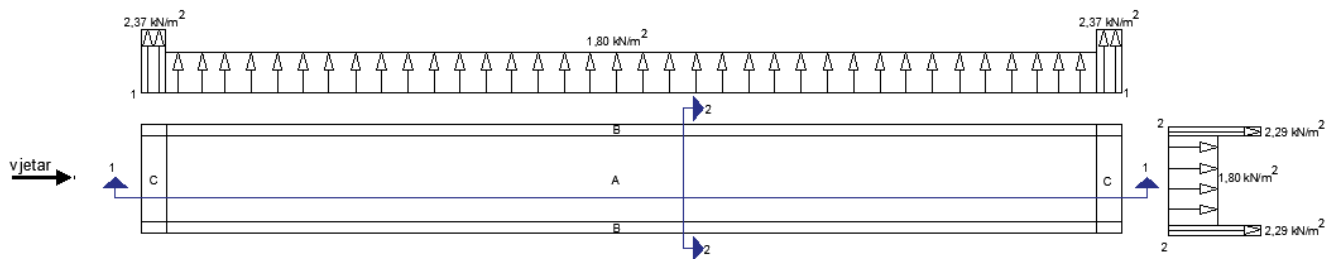
-za područje B= -2,8

-za područje C= -2,9.

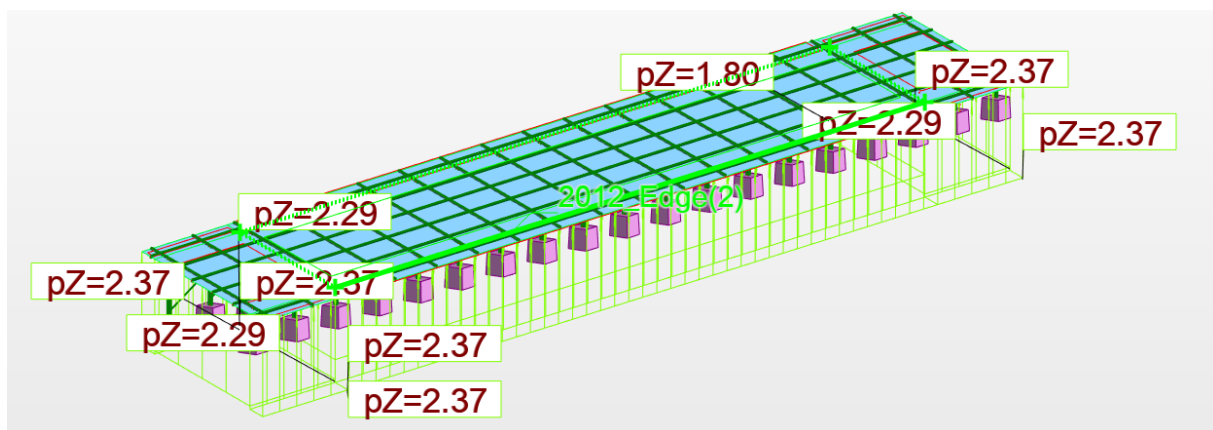
Tlak vjetra koji djeluje na površinu, po prethodno definiranom izrazu (10): $w_e = q_p(z_e) * C_{pe}$, za slučaj kada vjetar djeluje prema gore odnosno kao usis prikazan je Tablicom 7 i Slikom 18 i 19.

Tablica 6: Tlak vjetra koji djeluje na površinu 1. vjetra kao usis

ZONA	IZRAČUN	TLAK [kN/m ²]
A	$q_p(z_e) * C_{pe} = 0,818 * (-2,2)$	-1,80
B	$q_p(z_e) * C_{pe} = 0,818 * (-2,8)$	-2,29
C	$q_p(z_e) * C_{pe} = 0,818 * (-2,9)$	-2,37



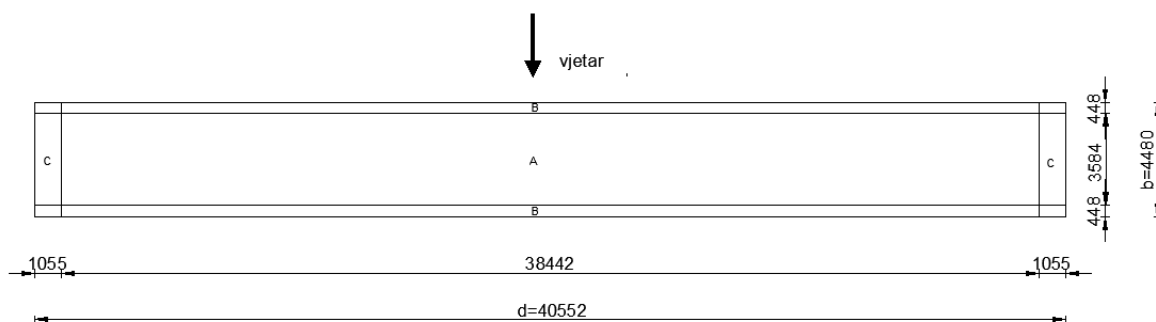
Slika 18: Skica djelovanja prvog slučaja vjetra kao usisa



Slika 19: Opterećenje prvog slučaja vjetra kao usisa zadano u programu "Robot Structural Analysis"

Drugi slučaj vjetra

Raspored zona djelovanja za drugi slučaj vjetra prikazan je Slikom 20.



Slika 20: Zone djelovanja za drugi slučaj vjetra

Tablica 7: Površine pojedinih zona za 2. slučaj vjetra

ZONA	POVRŠINA [m ²]
A	116,28
B	18,16
C	14,53

Iz prethodnih podataka određuju se sljedeće vrijednosti:

- $C_f = +0,8$

- $C_{p,net}$, iz tablice [5]: -za područje A= +1,7

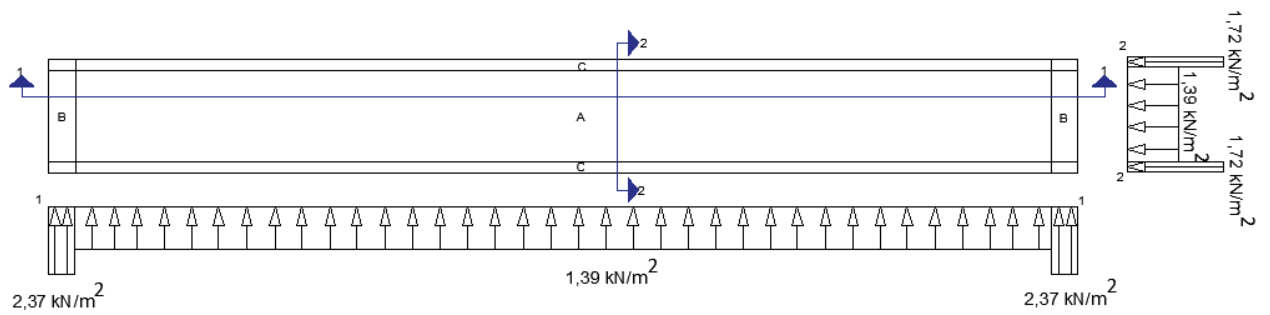
-za područje B= +2,9

-za područje C= +2,1.

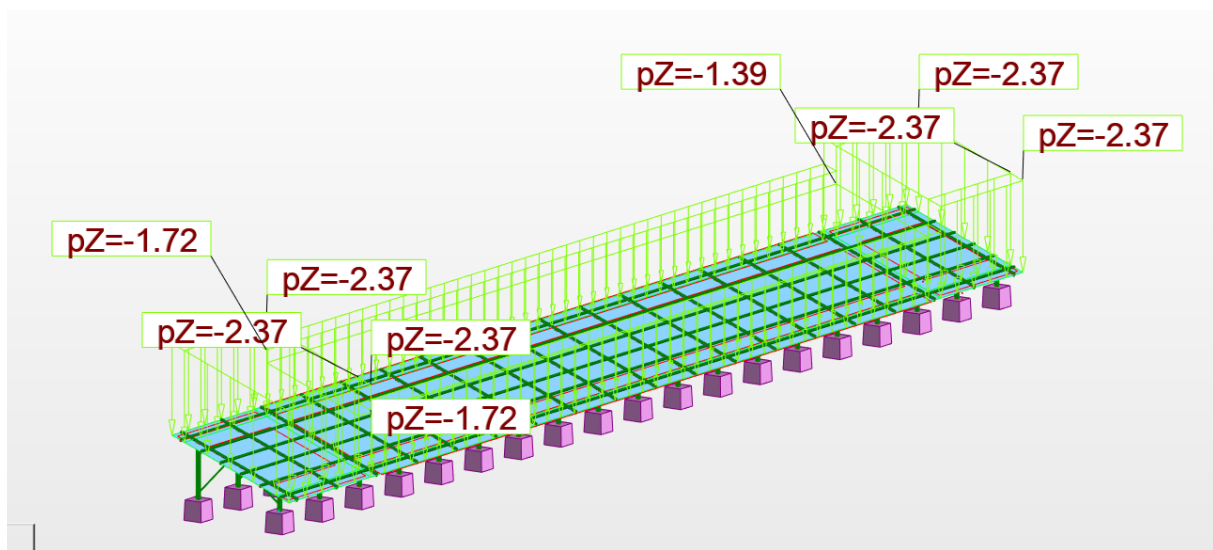
Tlak vjetra koji djeluje na površinu, po prethodno definiranom izrazu (10): $w_e = q_p(z_e) * C_{pe}$, za slučaj kada 2. vjetar djeluje kao pritisak dan je u Tablici 8 i Slici 21 i 22.

Tablica 8: Tlak vjetra za 2. slučaj vjetra koji djeluje kao pritisak

ZONA	IZRAČUN	TLAK [kN/m ²]
A	$q_p(z_e) * C_{pe} = 0,818 * 1,7$	1,39
B	$q_p(z_e) * C_{pe} = 0,818 * 2,9$	2,37
C	$q_p(z_e) * C_{pe} = 0,818 * 2,1$	1,72



Slika 21: Opterećenje drugog slučaja vjetra kao pritiska



Slika 22: Opterećenje drugog slučaja vjetra kao pritiska zadano u programu "Robot Structural Analysis"

Za slučaj usisa, odnosno djelovanja vjetra prema gore, uzimaju se sljedeće vrijednosti:

- $\rho = 0$ jer se radi o slobodnostojećoj nadstrešnici:

- $C_f = -1,3$

- $C_{p,net}$: -za područje A= -2,2

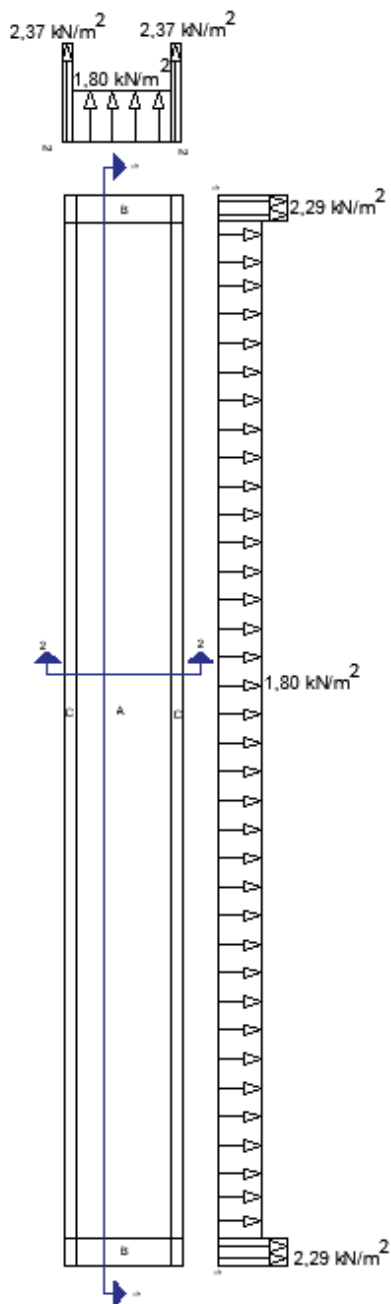
-za područje B= -2,8

-za područje C= -2,9.

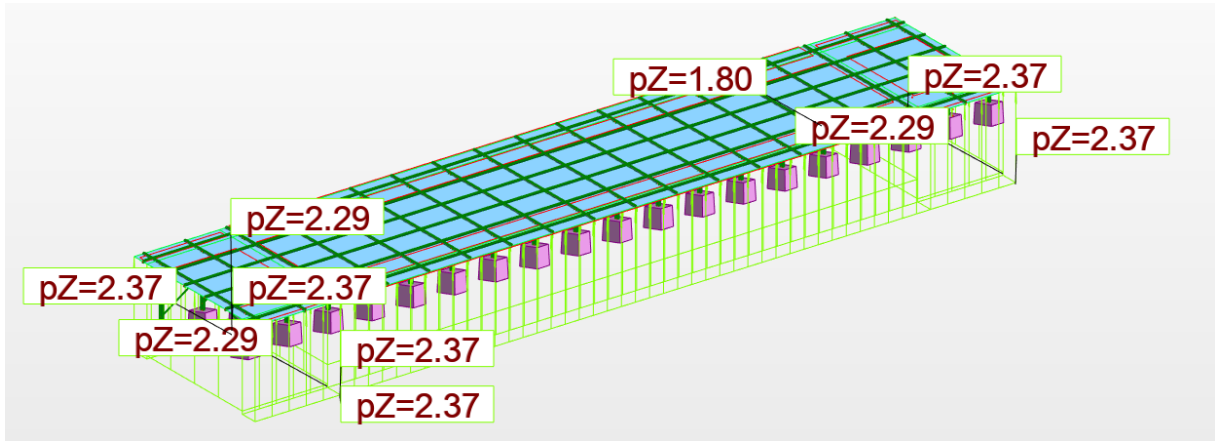
Tlak vjetra koji djeluje na površinu, po prethodno definiranom izrazu (10): $w_e = q_p(z_e) * C_{pe}$, za slučaj kada vjetar djeluje prema gore odnosno kao usis dan je Tablicom 9 i Slikom 23 i 24.

Tablica 9: Tlak vjetra za 2. slučaj vjetra koji djeluje kao usis

ZONA	IZRAČUN	TLAK [kN/m ²]
A	$q_p(z_e) * C_{pe} = 0,818 * (-2,2)$	-1,80
B	$q_p(z_e) * C_{pe} = 0,818 * (-2,8)$	-2,29
C	$q_p(z_e) * C_{pe} = 0,818 * (-2,9)$	-2,37



Slika 23: Skica djelovanja drugog slučaja vjetra kao usisa



Slika 24: Djelovanje drugog slučaja vjetra kao usisa zadano u programu "Robot Structural Analysis"

4. KOMBINACIJE OPTEREĆENJA

Kombinacije opterećenja provedene su za granično stanje uporabljivosti i granično stanje nosivosti sa parcijalnim faktorima danim tablicom [10] :

Tablica 10: Parcijalni faktori za kombinacije opterećenja

		POVOLJNO	NEPOVOLJNO
GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI	STALNO γ_G	1	1,35
	PROMIJENJIVO γ_Q	0	1,5
GRANIČNO STANJE UPORABLJIVOSTI	STALNO γ_G	1	1
	PROMIJENJIVO γ_Q	0	1

Kombinacije za granično stanje nosivosti:

1. GSN: STALNO+ SNIJEG
2. GSN: STALNO+ VJETAR1_PRITISAK
3. GSN: STALNO+ VJETAR1_USIS
4. GSN: STALNO+ VJETAR2_PRITISAK
5. GSN: STALNO+ VJETAR2_USIS
6. GSN: STALNO+ SNIJEG+ VJETAR1_PRITISAK
7. GSN: STALNO+ SNIJEG+ VJETAR1_USIS
8. GSN: STALNO+ SNIJEG+ VJETAR2_PRITISAK
9. GSN: STALNO+ SNIJEG+ VJETAR2_USIS
10. GSN: STALNO+ VJETAR1_PRITISAK+ SNIJEG
11. GSN: STALNO+ VJETAR1_USIS+ SNIJEG.
12. GSN: STALNO+ VJETAR2_PRITISAK+ SNIJEG
13. GSN: STALNO+ VJETAR2_USIS+ SNIJEG.

Kombinacije za granično stanje uporabljivosti:

14. GSU: STALNO+ SNIJEG
15. GSU: STALNO+ VJETAR1_PRITISAK

16. GSU: STALNO+ VJETAR1_USIS
17. GSU: STALNO+ VJETAR2_PRITISAK
18. GSU: STALNO+ VJETAR2_USIS
19. GSU: STALNO+ SNIJEG+ VJETAR1_PRITISAK
20. GSU: STALNO+ SNIJEG+ VJETAR1_USIS
21. GSU: STALNO+ SNIJEG+ VJETAR2_PRITISAK
22. GSU: STALNO+ SNIJEG+ VJETAR2_USIS
23. GSU: STALNO+ VJETAR1_PRITISAK+ SNIJEG
24. GSU: STALNO+ VJETAR1_USIS+ SNIJEG.
25. GSU: STALNO+ VJETAR2_PRITISAK+ SNIJEG
26. GSU: STALNO+ VJETAR2_USIS+ SNIJEG.

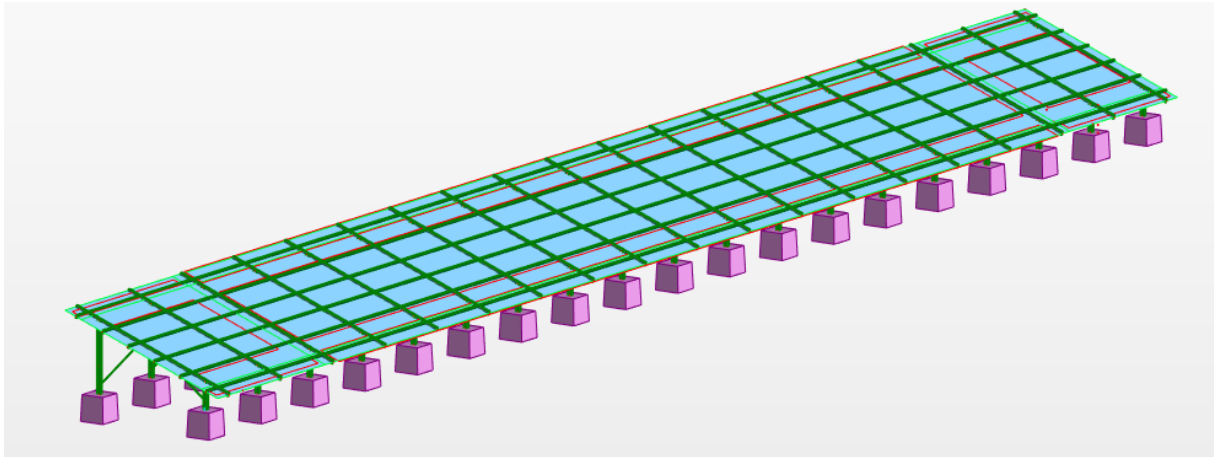
Kombinacije djelovanja zadaju se u programu „Robot Structural ANalysis“ (Slika 25).

Combinations	Name	Analysis type	Combination	Case nature	Definition
8 (C)	GSN STALNO+ SNIJEG	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.35+2*1.50
9 (C)	GSN STALNO+ VJETAR1_pritisak	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.35+3*1.50
10 (C)	GSN STALNO+ VJETAR1_usis	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.00+5*1.50
11 (C)	GSN STALNO+ VJETAR2_pritisak	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.35+6*1.50
12 (C)	GSN STALNO+ VJETAR2_usis	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.00+7*1.50
13 (C)	GSN STALNO+ SNIJEG+ VJETAR1_pritisak	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.35+2*1.50+3*0.90
14 (C)	GSN STALNO+ SNIJEG+ VJETAR1_usis	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.00+2*1.50+5*0.90
15 (C)	GSN STALNO+ SNIJEG+ VJETAR2_pritisak	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.35+2*1.50+6*0.90
16 (C)	GSN STALNO+ SNIJEG+ VJETAR2_usis	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.00+2*1.50+7*0.90
17 (C)	GSN STALNO+ VJETAR1_pritisak+ SNIJEG	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.35+3*1.50+2*0.75
18 (C)	GSN STALNO+ VJETAR1_usis+ SNIJEG	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.00+2*0.75+5*1.50
19 (C)	GSN STALNO+ VJETAR2_pritisak_ SNIJEG	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.35+6*1.50+2*0.75
20 (C)	GSN STALNO+ VJETAR2_usis+ SNIJEG	Linear Combinati	ULS	Structural	1*1.00+7*1.50+2*0.75
21 (C)	GSU STALNO+ SNIJEG	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+2)*1.00
22 (C)	GSU STALNO+ VJETAR1_pritisak	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+3)*1.00
23 (C)	GSU STALNO+ VJETAR1_usis	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+5)*1.00
24 (C)	GSU STALNO+ VJETAR2_pritisak	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+6)*1.00
25 (C)	GSU STALNO+ VJETAR2_usis	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+7)*1.00
26 (C)	GSU STALNO+ SNIJEG+ VJETAR1_pritisak	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+2)*1.00+3*0.60
27 (C)	GSU STALNO+ SNIJEG+ VJETAR1_usis	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+2)*1.00+5*0.60
28 (C)	STALNO+ SNIJEG+ VJETAR2_pritisak	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+2)*1.00+6*0.60
29 (C)	GSU STALNO+ SNIJEG+ VJETAR2_usis	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+2)*1.00+7*0.60
30 (C)	GSU STALNO+ VJETAR1_pritisak+ SNIJEG	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+3)*1.00+2*0.50
31 (C)	GSU STALNO+ VJETAR1_usis+ SNIJEG	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+5)*1.00+2*0.50
32 (C)	GSU STALNO+ VJETAR2_pritisak+ SNIJEG	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+6)*1.00+2*0.50
33 (C)	GSU STALNO+ VJETAR2_usis+ SNIJEG	Linear Combinati	SLS	Structural	(1+7)*1.00+2*0.50

Slika 25: Definirane kombinacije djelovanja u programu "Robot Structural Analysis"

5. DIMENZIONIRANJE ELEMENATA KONSTRUKCIJE PREMA GRANIČNOM STANJU NOSIVOSTI

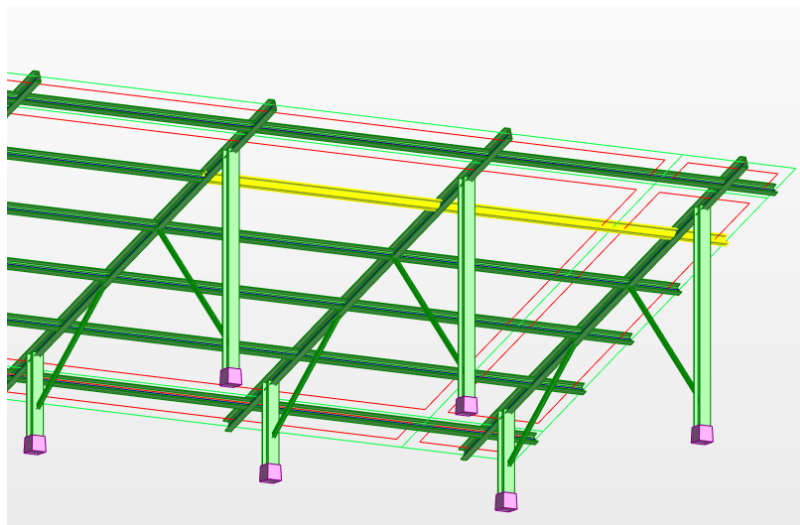
Statički proračun konstrukcije proveden je u programu Robot Structural Analysis (Slika 26). Cijela konstrukcija izvedena je od čelika klase S235 kojem je granica popuštanja, odnosno $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$.



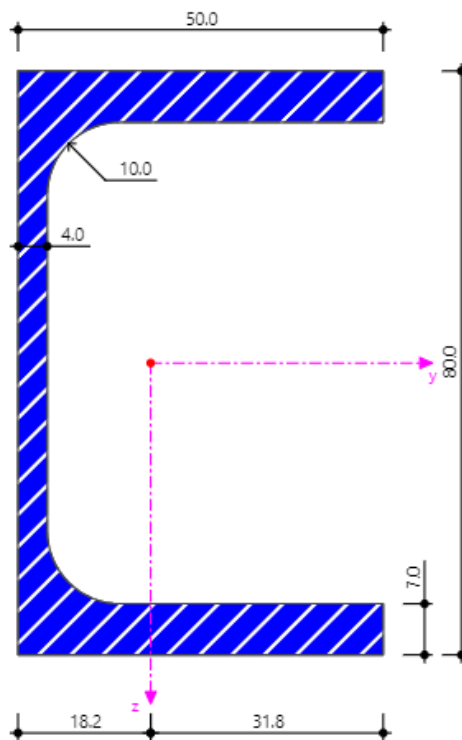
Slika 26: Model konstrukcije zadan u programu "Robot Structural Analysis"

5.1. Podrožnice

Podrožnice su postavljene preko dva raspona između osnovnih nosivih konstrukcija i dugačke su 4,40 m (Slika 27). Provedene su provjere za poprečni presjek UPE 80 (Slika 28).



Slika 27: Podrožnice

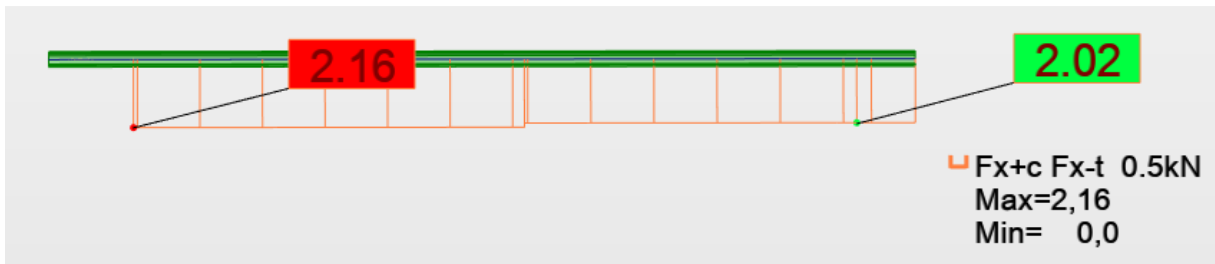


Slika 28: Poprečni presjek področnica- UPE 80 [11]

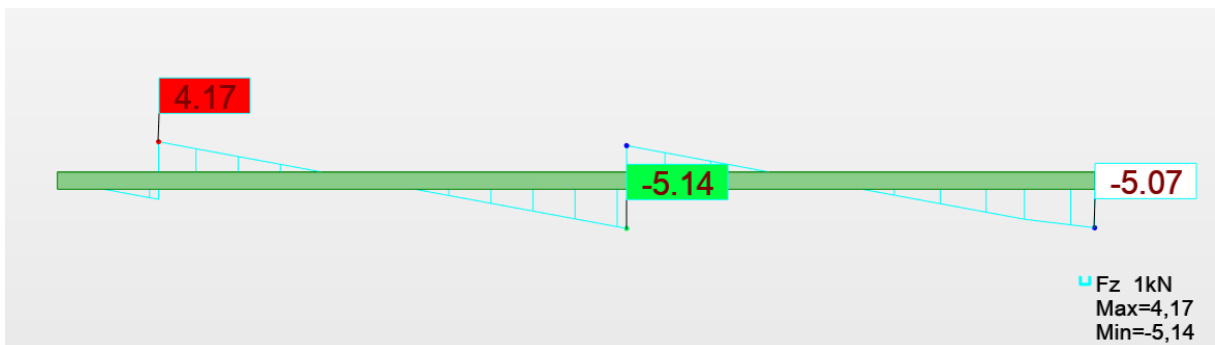
Tablica 11: Podaci o presjeku i opterećenjima za področnice

PODACI O PRESJEKU		OPTEREĆENJA	
VISINA	$h = 80 \text{ mm}$	UZDUŽNA SILA	$N_{Ed} = -2,16 \text{ kN}$
ŠIRINA	$b = 50 \text{ mm}$	POPREČNA SILA	$V_{Ed} = 8,9 \text{ kN}$
ŠIRINA HRPTA	$t_w = 4 \text{ mm}$	MOMENT	$M_{Ed} = 3,44 \text{ kNm}$
ŠIRINA POJASNICA	$t_f = 7 \text{ mm}$		
RADIJUS	$r = 10 \text{ mm}$		
POVRŠINA	$A = 10,10 \text{ cm}^2$		

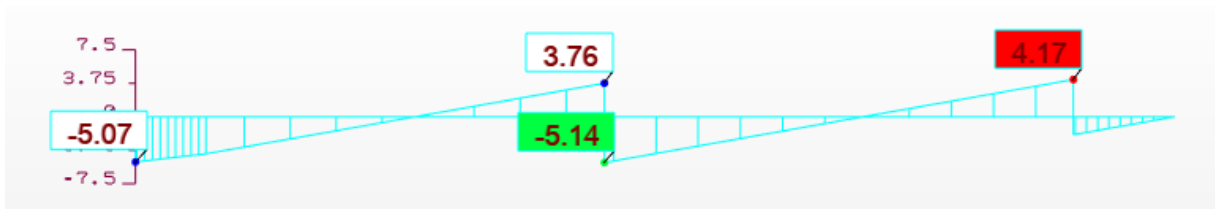
Dijagrami opterećenja za kritičnu kombinaciju 19. (Slika 29, 30, 31 i 32):



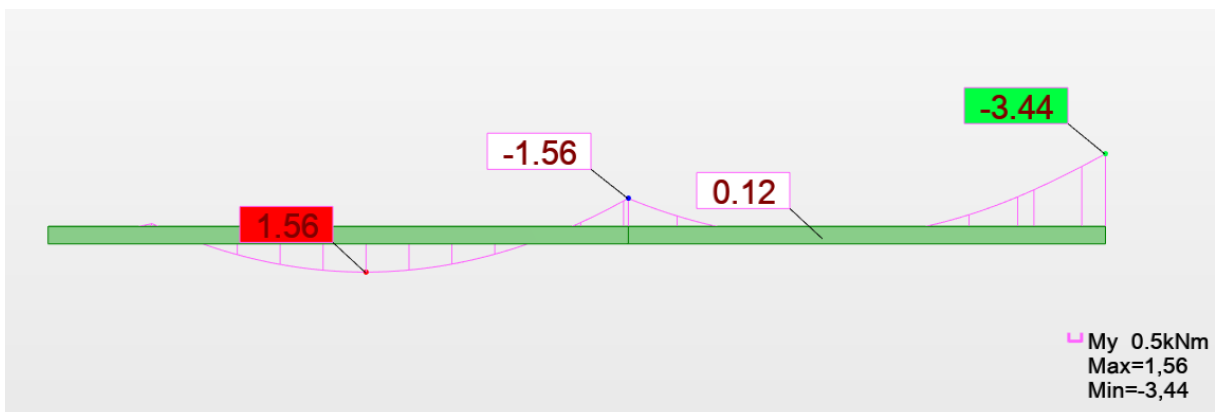
Slika 29: Dijagram uzdužnih sila za podrožnicu



Slika 30: Dijagram poprečnih sila za podrožnicu



Slika 31: Detaljni dijagram poprečnih sila za podrožnicu



Slika 32: Momentni dijagram za podrožnicu

Provedene su provjere na razini poprečnog presjeka i na razini elementa. Prvo je provedena klasifikacija poprečnog presjeka (Tablica 15), a zatim provjera otpornosti poprečnih presjeka na tlak (Tablica 16), savijanje (Tablica 17), posmičnu silu (Tablica 18) i interakciju tlaka i posmika (Tablica 19 i 20). Na razini elementa provedene su provjere na izvijanje (Tablica 22 i 23), otpornost na bočno torzijsko izvijanje (Tablica 25) i interakcija izvijanja i bočno torzijskog izvijanja (Tablica 28).

Otpornost na razini poprečnog presjeka

Tablica 12: Uvjeti za klasifikaciju vanjskih elemenata [16]

vanjski tlačni elementi					
		valjani profili		zavareni profili	
klasa	tlak	savijanje i tlak			
		rub u tlaku	rub u vlaku		
raspodjela naprezanja po elementu (tlak pozitivan)					
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	$\frac{c}{t} \leq 10\epsilon$	$\frac{c}{t} \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$\frac{c}{t} \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
raspodjela naprezanja po elementu (tlak pozitivan)					
3	$\frac{c}{t} \leq 14\epsilon$	$\frac{c}{t} \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$			

Tablica 13: Uvjeti za klasifikaciju unutarnjih elemenata [16]

Tablica 1. Klasifikacija unutrašnjih tlačnih elemenata (HRN EN 1993-1-1)

unutrašnji tlačni elementi			
klasa	savijanje	stlak	savijanje i stlak
raspodjela naprezanja po elementu (stlak pozitivan)			
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 $\alpha \leq 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$
raspodjela naprezanja po elementu (stlak pozitivan)			
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 tlačna deformacija $\epsilon_y > f_y/E$

Proračun „ α ”

Proračunava se „ α ” potrebna za određivanje uvjeta za klasifikaciju hrpta po izrazu (11):

$$\alpha = \frac{1}{d} \left(\frac{d}{2} + a \right) \quad (11)$$

u kojem se „ d ” dobiva prema izrazu (12):

$$d = h - 2 * t_f - 2 * r \quad (12)$$

$$d = 80 - 2 * 7 - 2 * 10 = 46 \text{ mm.}$$

„ a ” dobiva se prema izrazu (13) u kojem je $N_{Ed} = 2,16 \text{ kN}$:

$$a = \frac{N_{Ed}}{\frac{2 * t_w * f_y}{\gamma_{M0}}} \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{1,88}{\frac{2 * 0,4 * 23,5}{1}} = 0,11 \text{ cm}$$

Konačno uvrštavanjem u izraz (11) dobiva se:

$$\alpha = \frac{1}{46} \left(\frac{46}{2} + 0,1 \right) = 0,502 > 0,5 \text{ pa vrijedi uvjet:}$$

$$\frac{c}{t} \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1} \quad (14)$$

Tablica 14: Klasifikacija poprečnog presjeka podrožnica

KLASIFIKACIJA POJASNICE	KLASIFIKACIJA HRPTA
Pojasnica je opterećena na tlak.	Hrbat je opterećen na tlak i savijanje.
-vanjski element	-unutarnji element
UVJETI ZA PRVU KLASU:	
$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$ (15)	$\frac{c}{t} \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ (14)
Ulazni parametri:	
$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$ (16)	$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$ (16)
$c = b - (t_w + r)$ $c = 50 - (4 + 10) = 36 \text{ mm}$ (17)	$c = h - 2 * t_f - 2 * r$ $c = 80 - 2 * 7 - 2 * 10 = 46 \text{ mm}$ (18)
$t = t_f = 7 \text{ mm}$	$t = t_w = 4 \text{ mm}$
	$\alpha = 1$
Uvršteni izrazi:	
$\frac{36}{7} = 5,14 < 9 * 1 = 9$	$\frac{46}{4} = 11,5 < \frac{396 * 1}{13 * 0,502 - 1} = 71,66$
Uvjet zadovoljen, pojasnica pripada prvoj klasi.	Uvjet zadovoljen, hrbat pripada prvoj klasi.
ZAKLJUČAK: poprečni presjek pripada 1. klasi.	

Tablica 15: Otpornost poprečnog presjeka podrožnice na tlak

OTPORNOST NA TLAK	
Izraz:	$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (19)$
Ulazni parametri:	Površina, $A = 10,10 \text{ cm}^2$
	Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
	Parcijalni koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M0} = 1$
Uvršteni parametri:	$N_{c,Rd} = \frac{10,10 \cdot 23,5}{1}$
Rezultat:	$N_{c,Rd} = 237,35 \text{ kN}$
Ostvareno opterećenje:	$N_{Ed} = -2,16 \text{ kN}$
Uvjet nosivosti:	$N_{Ed} \leq N_{c,Rd}$ $2,16 < 237,35$
Iskorištenost poprečnog presjeka:	0,9%

Tablica 16: Otpornost poprečnog presjeka podrožnice na savijanje

OTPORNOST NA SAVIJANJE	
Izraz:	$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (20)$
Ulazni parametri:	Plastični moment otpora, $W_{pl,y} = 31,20 \text{ cm}^3$
	Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
	Parcijalni koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M0} = 1$
Uvršteni parametri:	$M_{c,Rd} = \frac{0,0000312 \cdot 235000}{1}$
Rezultat:	$M_{c,Rd} = 7,332 \text{ kNm}$
Ostvareno opterećenje:	$M_{Ed} = 3,44 \text{ kNm}$
Uvjet nosivosti:	$M_{Ed} \leq M_{c,Rd}$ $3,44 < 7,332$
Iskorištenost poprečnog presjeka:	46%

Tablica 17: Otpornost poprečnog presjeka podrožnica na posmik

OTPORNOST NA POSMIK	
Uvjet izbočavanja hrpta:	$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 * \frac{\varepsilon}{\eta} \quad (21)$
	$h_w = h - 2 * t_f \quad (22)$ $h_w = 80 - 2 * 7 = 66 \text{ mm}$ $t_w = 4 \text{ mm}$ $\varepsilon = 1$ $\eta = 1,2$
Uvršten uvjet:	$\frac{66}{4} = 16,5 < 72 * \frac{1}{1,2} = 60; \text{ uvjet ispunjen}$
Izraz:	$V_{pl,Rd} = A_{v,z} * \frac{f_y}{\sqrt{3}} * \frac{1}{\gamma_{M0}} \quad (23)$
Ulazni parametri:	<p>Posmična površina, $A_{v,z} = 4,08 \text{ cm}^2$ $(A_{v,z} = A - 2 * b * t_f + (t_w + r) * t_f)$ (24)</p> $A_{v,z} = 10,10 - 2 * 5 * 0,7 + (0,4 + 1) * 0,7 = 4,08 \text{ cm}^2)$
	Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
	Parcijalni koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M0} = 1$
Uvršteni parametri:	$V_{pl,Rd} = 4,08 * \frac{23,5}{\sqrt{3}} * \frac{1}{1}$
Rezultat:	$V_{pl,Rd} = 55,35 \text{ kN}$
Ostvareno opterećenje:	$V_{Ed} = 8,19 \text{ kN}$
Uvjet nosivosti:	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$ $8,19 < 55,35$
Iskorištenost poprečnog presjeka:	15%

Provjeravaju se razine uzdužne sile i poprečne sile u točki $x=0$ m . Ukoliko su uvjeti zadovoljeni, ne provodi se redukcija.

Tablica 18: Provjera razine uzdužne sile za podrožnicu

RAZINE UZDUŽNE SILE		
Uvjeti:	$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd}$ (25)	$N_{Ed} \leq \frac{0,5h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}}$ (26)
Ulazne vrijednosti:	Ostvarena uzdužna sila, $N_{Ed} = 2,02$ kN	Ostvarena uzdužna sila, $N_{Ed} = 2,02$ kN
	$N_{pl,Rd} = 237,35$ kN	$h_w = 66$ mm
		$t_w = 4$ mm
		$f_y = 235$ N/mm ²
Uvršteni uvjeti:	$N_{Ed} \leq 0,25 * 237,35$ $= 59,34$ kN	$N_{Ed} \leq \frac{0,5 * 66 * 4 * 235}{1}$ $= 31,02$ kN
	$2,02 < 59,34$	$2,02 < 31,02$
Oba uvjeta su ispunjena.		

Tablica 19: Razina poprečne sile za podrožnicu

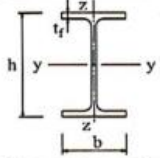
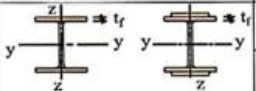

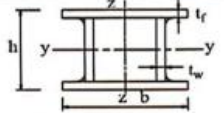
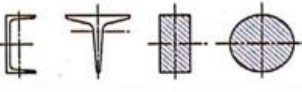

RAZINE POPREČNE SILE	
Uvjet:	$V_{Ed} \leq 0,5 * V_{pl,Rd}$ (27)
Ulazne vrijednosti:	$V_{Ed} = 5,07$ kN
	$V_{pl,Rd} = 55,35$ kN
Uvršten uvjet:	$V_{Ed} \leq 0,5 * 55,35 = 27,68$ kN
	$5,07 < 27,68$
Uvjet je ispunjen.	

Zaključak: oba uvjeta su zadovoljena te se ne provodi redukcija.

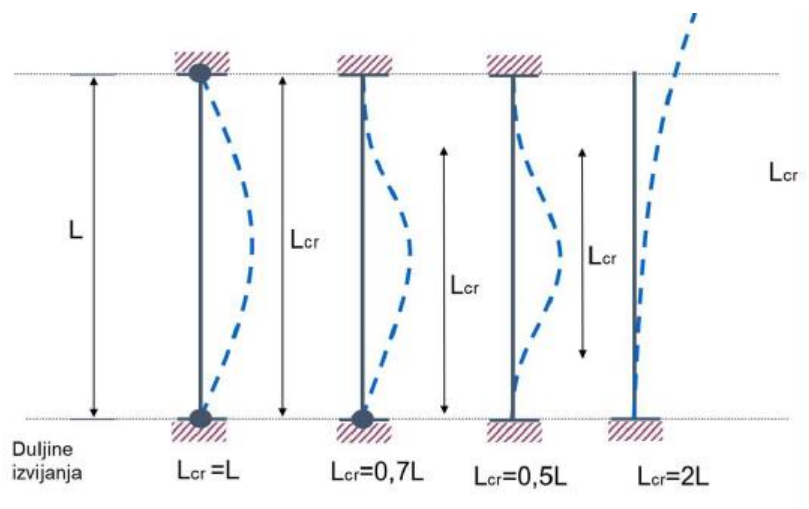
Otpornost na razini elementa

Izvijanje:

Tablica 20: Faktor imperfekcije za izvijanje [16]

Poprečni presjeci	Ograničenja	Izvijanje oko osi	Linija izvijanja	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
 Valjani presjeci	$hb > 1,2$ $t_f \leq 40 \text{ mm}$ $40 \text{ mm} < t_f \leq 100$ $t_f \leq 100 \text{ mm}$ $t_f > 100 \text{ mm}$	y-y	a	a ₀
		z-z	b	a ₀
		y-y	b	a
		z-z	c	a
 Zavareni I presjeci	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y	b	b
	$t_f > 40 \text{ mm}$	z-z	c	c
 Šupji presjeci	vruće dogotovljeni	bilo koje	a	a ₀
	hladno oblikovani	bilo koje	c	c
 Zavareni sandužasti 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



Slika 33: Duljine izvijanja [16]

Tablica 21: Otpornost na izvijanje oko osi y-y za podrožnicu

OTPORNOST NA IZVIJANJE OKO OSI y-y		
Otpornost na izvijanje računa se prema izrazu (28):		
$N_{b,Rd} = \chi \frac{A * f_y}{\gamma_{M1}} \quad (28)$		
FORMULA	ULAZNI PARAMETRI	UVRŠTEN IZRAZ I REZULTAT
Eulereva kritična duljina izvijanja, $N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I_y}{L_{cr}^2} \quad (29)$	Modul elastičnosti, $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ Moment inercije, $I_y = 107 \text{ cm}^4$ Kritična duljina izvijanja (Slika 33), $L_{cr} = L = 220 \text{ cm}$	(29) $N_{cr} = \frac{\pi^2 * 21000 * 107}{220^2} = 458,20 \text{ kN}$
Vitkost elemenata, $\lambda_y = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} \quad (30)$	Površina, $A = 10,10 \text{ cm}^2$ Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$	(30) $\lambda_y = \sqrt{\frac{10,10 * 23,5}{458,20}} = 0,719$
Faktor izvijanja, $\phi = 0,5 \left[1 + \alpha * (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^{-2} \right] \quad (31)$	Faktor imperfekcije, α određuje se iz tablice [20] i jednak je 0,49	(31) $\phi = 0,5 [1 + 0,49 * (0,719 - 0,2) + 0,719^2] = 0,886$
Faktor redukcije, $\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \leq 1 \quad (32)$		(32) $\chi = \frac{1}{0,886 + \sqrt{0,886^2 - 0,719^2}} = 0,712$
$N_{b,Rd} = \chi \frac{A * f_y}{\gamma_{M1}} \quad (28)$	Koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M1} = 1,1$	(28) $N_{b,Rd} = 0,712 \frac{10,10 * 23,5}{1,1} = 153,63 \text{ kN}$
Ostvareno opterećenje iznosi 2,16 kN, pa vrijedi uvjet nosivosti $N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$ koji nakon uvrštavanja glasi $2,16 < 153,63$, i iskorištenost iznosi 1,4%.		

Tablica 22: Otpornost na izvijanje oko osi z-z za podrožnicu

OTPORNOST NA IZVIJANJE OKO OSI z-z		
Otpornost na izvijanje računa se prema izrazu (28):		
$N_{b,Rd} = \chi \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (28)$		
FORMULA	ULAZNI PARAMETRI	UVRŠTEN IZRAZ I REZULTAT
Eulereva kritična duljina izvijanja, $N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2} \quad (29)$	Modul elastičnosti, $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$	(29)
	Moment inercije, $I_z = 25,50 \text{ cm}^4$	$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 25,50}{220^2} = 109,20 \text{ kN}$
	Kritična duljina izvijanja, $L_{cr} = L = 220 \text{ cm}$	
Vitkost elemenata, $\lambda_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (30)$	Površina, $A = 10,10 \text{ cm}^2$ Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$	(30) $\lambda_z = \sqrt{\frac{10,10 \cdot 23,5}{109,20}} = 1,47$
Faktor izvijanja, $\phi = 0,5 \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] \quad (31)$	Faktor imperfekcije, α određuje se iz tablice [20] i jednak je 0,49	(31) $\phi = 0,5 [1 + 0,49 \cdot (1,47 - 0,2) + 1,47^2] = 1,89$
Faktor redukcije, $\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_z^2}} \leq 1 \quad (32)$		(32) $\chi = \frac{1}{1,89 + \sqrt{1,89^2 - 1,47^2}} = 0,32$
$N_{b,Rd} = \chi \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (28)$	Koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M1} = 1,1$	(28) $N_{b,Rd} = 0,32 \frac{10,10 \cdot 23,5}{1,1} = 69,05 \text{ kN}$
Ostvareno opterećenje iznosi 2,16 kN, pa vrijedi uvjet nosivosti $N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$ koji nakon uvrštavanja glasi $2,16 < 69,05$, i iskorištenost iznosi 3%.		

Bočno torzijsko izvijanje:

Proračun elastičnog kritičnog momenta bočno torzijskog izvijanja:

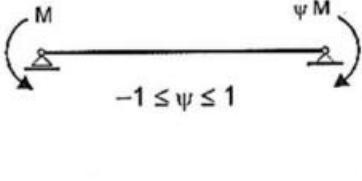
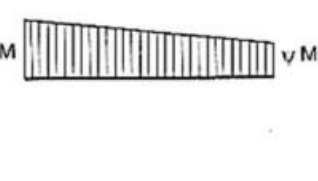
Elastični kritični moment bočno torzijskog izvijanja, M_{cr} se računa prema formuli (32):

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} \right] \quad (32)$$

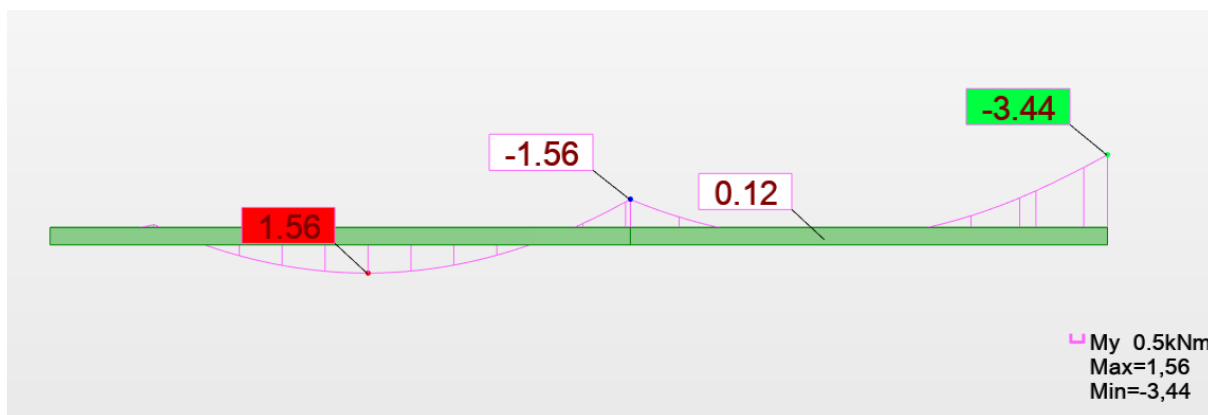
u kojoj je:

- C_1 faktor za izračun kritičnog momenta bočno torzijskog izvijanja koji se određuje iz tablica:

Tablica 23: Faktori za izračun kritičnog momenta bočno torzijskog izvijanja [16]

OPTEREĆENJE I UVJETI OSLANJANJA	DIJAGRAM MOMENATA SAVIJANJA	Vrijednost faktora		
		C_1	C_2	C_3
		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

$$-\psi = \frac{M_1}{M_2} = \frac{1,56}{3,44} = 0,45; \text{ interpolacijom dobiva se vrijednost } C_1 = 1,35$$



Slika 34: Momentni dijagram za određivanje faktora kritičnog momenta

- modul elastičnosti, $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$
- moment inercije, $I_z = 25,50 \text{ cm}^4$
- faktori krivljenja, $k, k_w = 1$
- razmak točaka bočnog pridržanja, $L = 220 \text{ cm}$
- konstanta krivljenja, $I_w = 220 \text{ cm}^6$
- modul posmika, $G = 8077 \text{ kN/cm}^2$
- torzijska konstanta, $I_t = 1,47 \text{ cm}^4$.

Uvrštavanjem u izraz (32) dobiva se:

$$M_{cr} = 1,35 \frac{\pi^2 * 21000 * 25,50}{220^2} \left[\sqrt{\frac{220}{25,50} * \frac{220^2 * 8077 * 1,47}{\pi^2 * 21000 * 25,50}} \right] = 4515,08 \text{ kNcm};$$

Tablica 24: Otpornost na bočno torzijsko izvijanje podrožnice

OTPORNOST NA BOČNO TORZIJSKO IZVIJANJE		
Otpornost na izvijanje računa se prema izrazu (33):		
$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W * f_y}{\gamma_{M1}} \quad (33)$		
FORMULA	ULAZNI PARAMETRI	UVRŠTEN IZRAZ I REZULTAT
Elastični kritični moment B-T izvijanja, M_{cr}	-prethodno određeno	$M_{cr} = 4515,08 \text{ kNcm}$
Bezdimenzionalna vitkost elemenata, $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} * f_y}{M_{cr}}} \quad (34)$	Moment otpora u smjeru y, $W_{pl,y} = 31,20 \text{ cm}^3$ Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$	(34) $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{31,20 * 23,5}{4515,08}}$ $= 0,40$
Faktor B-T izvijanja, $\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha * (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] \quad (35)$	Faktor imperfekcije, α određuje se iz tablice [25] i jednak je 0,76	(35) $\phi = 0,5 [1 + 0,76 * (0,40 - 0,2) + 0,40^2] = 0,66$
Faktor redukcije, $\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \quad (36)$		(36) $\chi_{LT} = \frac{1}{0,66 + \sqrt{0,66^2 - 0,4^2}}$ $= 0,95$
$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W * f_y}{\gamma_{M1}} \quad (33)$	Koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M1} = 1,1$	(33) $M_{b,Rd} = 0,95 \frac{31,20 * 23,5}{1,1}$ $= 633,22 \text{ kNcm}$
Ostvareno opterećenje $M_{y,Ed}$ iznosi 3,44 kNm, pa vrijedi uvjet nosivosti $M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$ koji nakon uvrštavanja glasi $3,44 < 6,33$, i iskorištenost iznosi 54%.		

Tablica 25: Faktor imperfekcije za bočno torzijsko izvijanje [16]

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

Faktori imperfekcije α_{LT} zavisi od krivulje izvijanja

Krivulja izvijanja	a	b	c	d
Faktor imperfekcije α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Interakcija izvijanja i bočne torzije

Tablica 26: Interakcijski faktor k_{yy} za podrožnice

INTERAKCIJSKI FAKTOR k_{yy}	
Formula za interakcijski faktor k_{yy} (37):	$k_{yy} = C_{my} \left[1 + (\lambda_y - 0,2) * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] \leq C_{my} \left[1 + 0,8 * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] \quad (37)$
	$\lambda_y = 0,72$
	$N_{Ed} = 2,16 \text{ kN}$
	$\chi_y = 0,71$
	$N_{Rk} = 153,63 \text{ kN}$
	$\gamma_{M1} = 1,1$
Pomoćne formule:	$C_{my} = 0,1 * (1 - \psi) - 0,8\alpha_s \quad (38)$
	$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{-1,56}{1,56} = -1 \quad (39)$
	$\psi = \frac{1,56}{3,44} = 0,45$
	Uvršteno i rezultat: $C_{my} = 0,1 * (1 - 0,45) + 0,8 * 1 = 0,86 > 0,4$
Uvršteno i rezultat ():	$0,86 \left[1 + (0,72 - 0,2) * \frac{2,16}{0,71 * 153,63 / 1,1} \right] \leq 0,86 \left[1 + 0,8 * \frac{2,16}{0,71 * 153,63 / 1,1} \right]$ $0,86 < 0,87 \rightarrow k_{yy} = 0,86$

Tablica 27: Interakcijski faktor k_{zy}

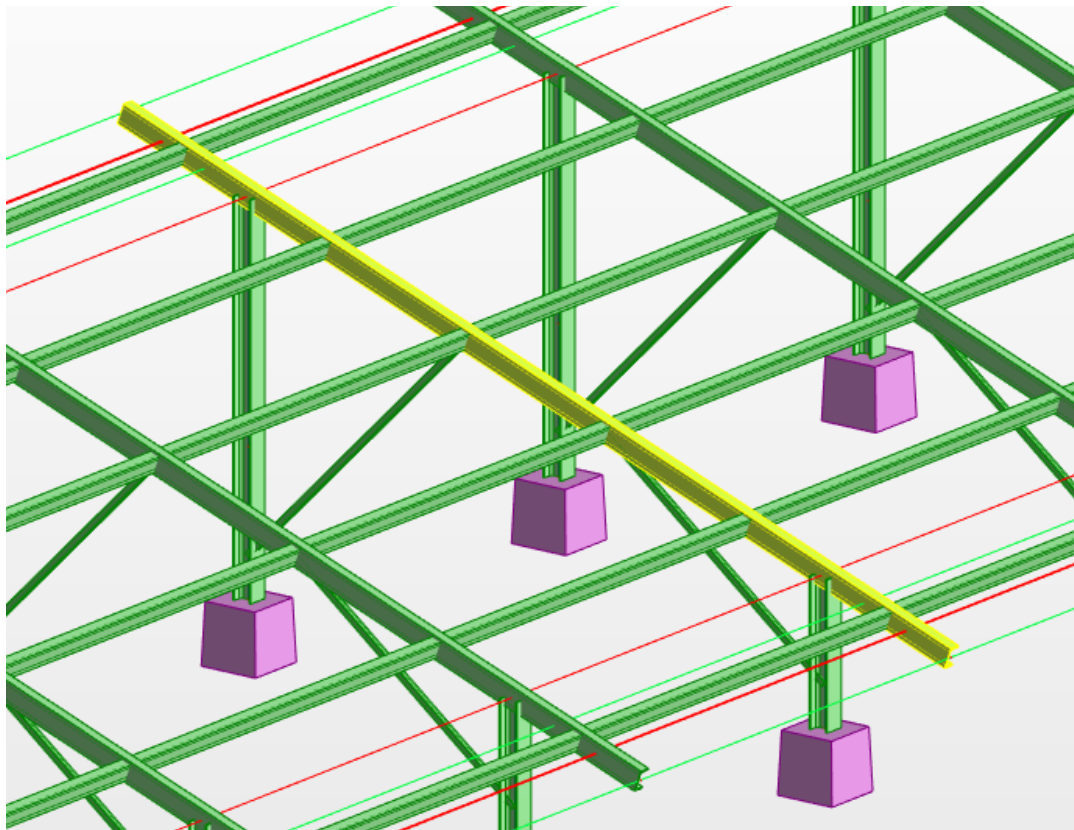
INTERAKCIJSKI FAKTOR k_{zy}	
Formula za interakcijski faktor k_{zy} ():	$\left[\begin{array}{l} 1 - \frac{0,1 * \lambda_z}{(C_{mLT} - 0,25)} * \frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \\ 1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} * \frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \end{array} \right] \geq \quad (40)$
	$\lambda_z = 1,47$
	$N_{Ed} = 2,16 \text{ kN}$
	$\chi_z = 0,32$
	$N_{Rk} = 69,05 \text{ kN}$
	$\gamma_{M1} = 1,1$
Pomoćne formule:	$C_{mLT} = 0,1 * (1 - \psi) - 0,8\alpha_s \quad (41)$
	$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{-1,56}{1,56} = -1 \quad (39)$
	$\psi = \frac{1,56}{3,44} = 0,45$
	Uvršteno i rezultat: $C_{my} = 0,1 * (1 - 0,45) + 0,8 * 1 = 0,86 > 0,4$
Uvršteno i rezultat ():	$\left[\begin{array}{l} 1 - \frac{0,1 * 1,47}{(0,86 - 0,25)} * \frac{2,16}{0,32 * 69,05 / 1,1} \\ 1 - \frac{0,1}{(0,86 - 0,25)} * \frac{2,16}{0,32 * 69,05 / 1,1} \end{array} \right] \geq$ $0,97 < 0,98 \rightarrow k_{yz} = 0,98$

Tablica 28: Interakcijske formule za podrožnice

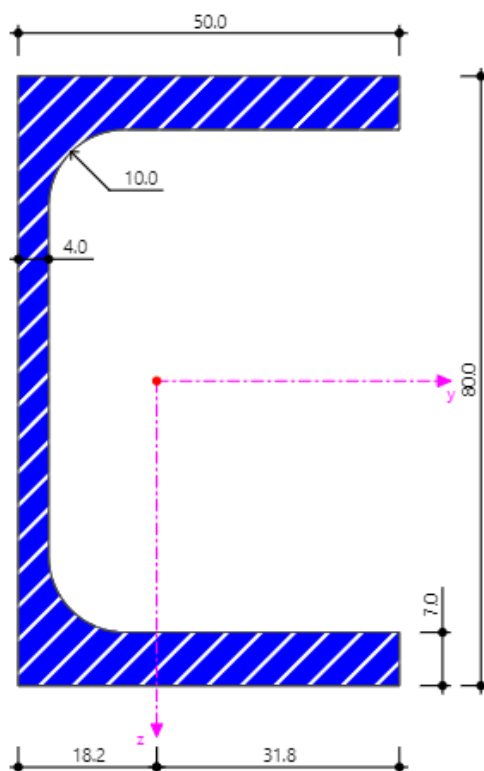
INTERAKCIJSKE FORMULE	
1. Interakcijska formula():	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} * \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (42)$
Uvršteno:	$\frac{2,16}{0,71 * 153,63 / 1,1} + 0,86 * \frac{3,44}{0,95 * 6,33 / 1,1} \leq 1$ $0,56 < 1 \rightarrow \text{uvjet zadovoljen}$
2. Interakcijska formula ():	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} * \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (43)$
Uvršteno:	$\frac{2,16}{0,32 * 69,05 / 1,1} + 0,86 * \frac{3,44}{0,95 * 6,33 / 1,1} \leq 1$ $0,72 < 1 \rightarrow \text{uvjet zadovoljen}$

5.2. Glavni nosači

Provedene su provjere glavnih nosača (Slika 35) poprečnog profila UPE 80 (Slika 36), i duljine 4,69 m.



Slika 35: Glavni nosači

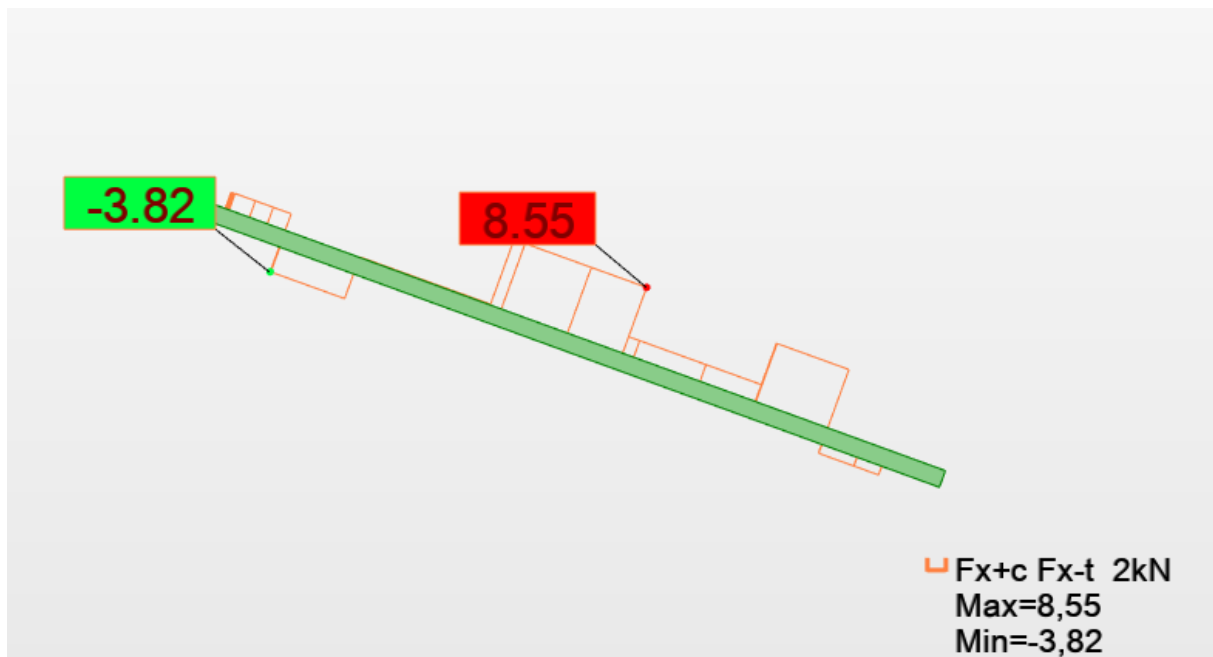


Slika 36: Poprečni presjek glavnih nosača- UPE 80 [11]

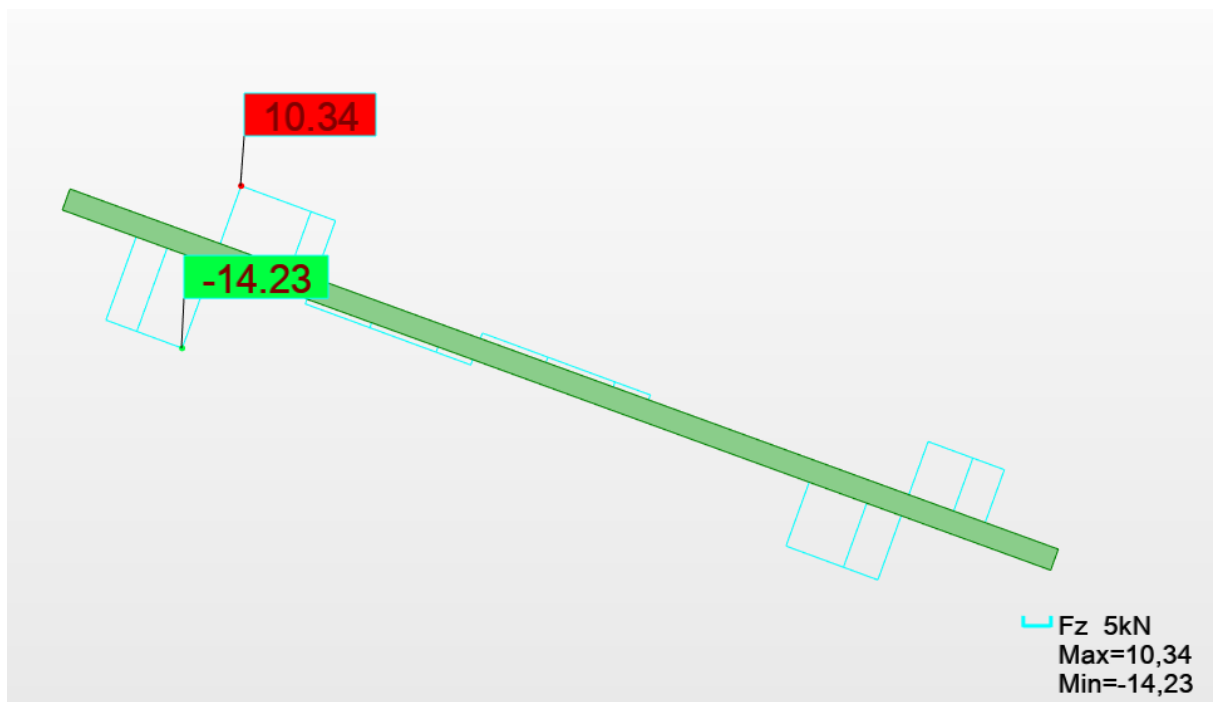
Tablica 29: Podaci o presjeku i opterećenju na glavne nosače

PODACI O PRESJEKU		OPTEREĆENJA	
VISINA	$h = 80 \text{ mm}$	UZDUŽNA SILA	$N_{Ed} = -8,55 \text{ kN}$
ŠIRINA	$b = 50 \text{ mm}$	POPREČNA SILA	$V_{Ed} = 24,57 \text{ kN}$
ŠIRINA HRPTA	$t_w = 4 \text{ mm}$	MOMENT	$M_{Ed} = 5,16 \text{ kNm}$
ŠIRINA POJASNICA	$t_f = 7 \text{ mm}$		
RADIJUS	$r = 10 \text{ mm}$		
POVRŠINA	$A = 10,10 \text{ cm}^2$		

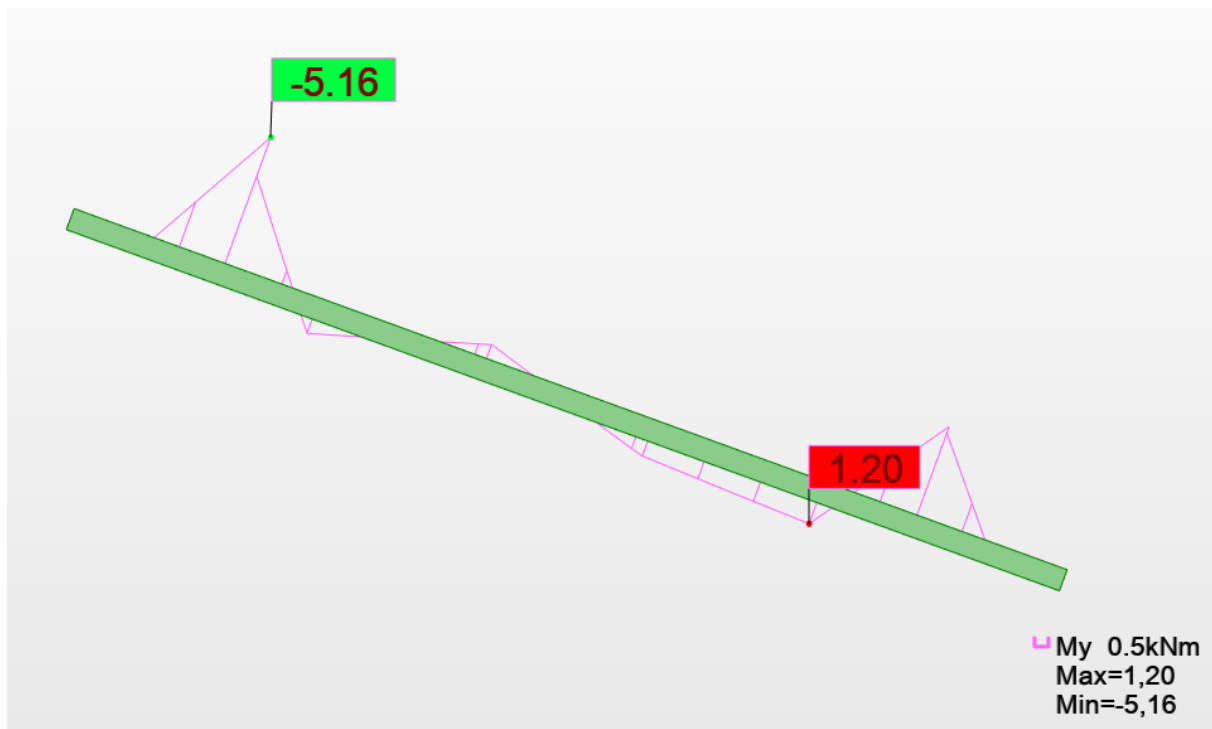
Dijagrami opterećenja za kritičnu kombinaciju 17. (Slika 37, 38 i 39):



Slika 37: Dijagram uzdužne sile glavnih nosača



Slika 38: Dijagram poprečnih sila za glavnih nosača



Slika 39: Momentni dijagram za glavne nosače

Provedene su provjere na razini poprečnog presjeka i na razini elementa. Prvo je provedena klasifikacija poprečnog presjeka (Tablica 30), a zatim provjera otpornosti na tlak (Tablica 31), savijanje (Tablica 32), posmičnu silu (Tablica 33) i interakciju tlaka i posmika (Tablica 34 i 35). Na razini elementa provedene su provjere na izvijanje (Tablica 36 i 37), otpornost na bočno torzijsko izvijanje (Tablica 38) i interakcija izvijanja i bočno torzijskog izvijanja (Tablica 41).

Otpornost na razini poprečnog presjeka

Klasifikacija poprečnog presjeka:

Proračun „ α ”

Proračunava se „ α ” potrebna za određivanje uvjeta za klasifikaciju hrpta po izrazu (11):

$$\alpha = \frac{1}{d} \left(\frac{d}{2} + a \right) \quad (11)$$

u kojem se „ d ” dobiva prema izrazu (12):

$$d = h - 2 * t_f - 2 * r \quad (12)$$

$$d = 80 - 2 * 7 - 2 * 10 = 46 \text{ mm.}$$

„ a ” dobiva se prema izrazu (13):

$$a = \frac{N_{Ed}}{\frac{2 * t_w * f_y}{\gamma_{M0}}} \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{8,55}{\frac{2 * 0,4 * 23,5}{1}} = 0,45 \text{ cm}$$

Konačno uvrštavanjem u izraz (11) dobiva se:

$$\alpha = \frac{1}{46} \left(\frac{46}{2} + 0,45 \right) = 0,509 > 0,5 \text{ pa vrijedi uvjet:}$$

$$\frac{c}{t} \leq \frac{396 \varepsilon}{13 \alpha - 1} \quad (14).$$

Tablica 30: Klasifikacija poprečnog presjeka glavnog nosača

KLASIFIKACIJA POJASNICE	KLASIFIKACIJA HRPTA
Pojasnica je opterećena na tlak.	Hrbat je opterećen na tlak i savijanje.
-vanjski element	-unutarnji element
UVJETI ZA PRVU KLASU:	
$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$ (15)	$\frac{c}{t} \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha-1}$ (14)
Ulazni parametri:	
$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$ (16)	$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$ (16)
$c = b - (t_w + r)$ $c = 50 - (4 + 10) = 36 \text{ mm}$ (17)	$c = h - 2 * t_f - 2 * r$ $c = 80 - 2 * 7 - 2 * 10$ $= 46 \text{ mm}$ (18)
$t = t_f = 7 \text{ mm}$	$t = t_w = 4 \text{ mm}$
	$\alpha = 1$
Uvršteni izrazi:	
$\frac{36}{7} = 5,14 < 9 * 1 = 9$	$\frac{46}{4} = 11,5 < \frac{396 * 1}{13 * 0,508 - 1} = 70,66$
Uvjet zadovoljen, pojasnica pripada prvoj klasi.	Uvjet zadovoljen, hrbat pripada prvoj klasi.
ZAKLJUČAK: poprečni presjek pripada 1. klasi.	

Tablica 31: Otpornost na tlak poprečnog presjeka glavnog nosača

OTPORNOST NA TLAK	
Izraz:	$N_c, R_d = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}}$ (19)
Ulazni parametri:	Površina, $A = 10,10 \text{ cm}^2$
	Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
	Parcijalni koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M0} = 1$
Uvršteni parametri:	$N_c, R_d = \frac{10,10 * 23,5}{1}$
Rezultat:	$N_c, R_d = 237,35 \text{ kN}$
Ostvareno opterećenje:	$N_{Ed} = 8,55 \text{ kN}$
Uvjet nosivosti:	$N_{Ed} \leq N_{c,Rd}$ $8,55 < 237,35$
Iskorištenost poprečnog presjeka:	3%

Tablica 32: Otpornost na savijanje poprečnog presjeka glavnog nosača

OTPORNOST NA SAVIJANJE	
Izraz:	$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M0}} \quad (20)$
Ulazni parametri:	Plastični moment otpora, $W_{pl,y} = 31,20 \text{ cm}^3$
	Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
	Parcijalni koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M0} = 1$
Uvršteni parametri:	$M_{c,Rd} = \frac{0,0000312 * 235000}{1}$
Rezultat:	$M_{c,Rd} = 7,332 \text{ kNm}$
Ostvareno opterećenje:	$M_{Ed} = 5,16 \text{ kNm}$
Uvjet nosivosti:	$M_{Ed} \leq M_{c,Rd}$ $5,16 < 7,332$
Iskorištenost poprečnog presjeka:	70%

Tablica 33: Otpornost na posmik poprečnog presjeka glavnog nosača

OTPORNOST NA POSMIK	
Uvjet izbočavanja hrpta:	$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 * \frac{\varepsilon}{\eta} \quad (21)$
	$h_w = h - 2 * t_f \quad (22)$
	$h_w = 80 - 2 * 7 = 66 \text{ mm}$
	$t_w = 4 \text{ mm}$
	$\varepsilon = 1$ $\eta = 1,2$
Uvršten uvjet:	$\frac{66}{4} = 16,5 < 72 * \frac{1}{1,2} = 60$; uvjet ispunjen
Izraz:	$V_{pl,Rd} = A_{v,z} * \frac{f_y}{\sqrt{3}} * \frac{1}{\gamma_{M0}} \quad (23)$
Ulazni parametri:	Posmična površina, $A_{v,z} = 4,08 \text{ cm}^2$ ($A_{v,z} = A - 2 * b * t_f + (t_w + r) * t_f$ (24) $A_{v,z} = 10,10 - 2 * 5 * 0,7 + (0,4 + 1) * 0,7$ $= 4,08 \text{ cm}^2$)
	Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
	Parcijalni koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M0} = 1$
Uvršteni parametri:	$V_{pl,Rd} = 4,08 * \frac{23,5}{\sqrt{3}} * \frac{1}{1}$
Rezultat:	$V_{pl,Rd} = 55,35 \text{ kN}$
Ostvareno opterećenje:	$V_{Ed} = 24,57 \text{ kN}$
Uvjet nosivosti:	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$ $24,57 < 55,35$
Iskorištenost poprečnog presjeka:	44%

Provjeravaju se razine uzdužne sile i poprečne sile u točki $x=3,9\text{m}$. Ukoliko su uvjeti zadovoljeni, ne provodi se redukcija.

Tablica 34: Razine uzdužne sile za glavne nosače

RAZINE UZDUŽNE SILE		
Uvjeti:	$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd}$ (25)	$N_{Ed} \leq \frac{0,5h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}}$ (26)
Ulazne vrijednosti:	Ostvarena uzdužna sila, $N_{Ed} = 3,82 \text{ kN}$	Ostvarena uzdužna sila, $N_{Ed} = 3,82 \text{ kN}$
	$N_{pl,Rd} = 237,35 \text{ kN}$	$h_w = 66 \text{ mm}$
		$t_w = 4 \text{ mm}$
		$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
Uvršteni uvjeti:	$N_{Ed} \leq 0,25 * 237,35 = 59,34 \text{ kN}$	$N_{Ed} \leq \frac{0,5 * 66 * 4 * 235}{1}$ $= 31,02 \text{ kN}$
	$3,82 < 59,34$	$3,82 < 31,02$
Oba uvjeta su ispunjena.		

Tablica 35: Razine poprečne sile za glavne nosače

RAZINE POPREČNE SILE	
Uvjet:	$V_{Ed} \leq 0,5 * V_{pl,Rd}$ (27)
Ulazne vrijednosti:	$V_{Ed} = 24,57 \text{ kN}$
	$V_{pl,Rd} = 55,35 \text{ kN}$
Uvršten uvjet:	$V_{Ed} \leq 0,5 * 55,35 = 27,68 \text{ kN}$
	$24,57 < 27,68$
Uvjet je ispunjen.	

Zaključak: oba uvjeta su zadovoljena te se ne provodi redukcija.

Otpornost na razini elementa

Otpornost na izvijanje:

Tablica 36: Otpornost na izvijanje oko osi y-y glavnih nosača

OTPORNOST NA IZVIJANJE OKO OSI y-y		
Otpornost na izvijanje računa se prema izrazu (28):		
$N_{b,Rd} = \chi \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (28)$		
FORMULA	ULAZNI PARAMETRI	UVRŠTEN IZRAZ I REZULTAT
Eulereva kritična duljina izvijanja, $N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2} \quad (29)$	Modul elastičnosti, $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ Moment inercije, $I_y = 107 \text{ cm}^4$ Kritična duljina izvijanja, $L_{cr} = L = 80 \text{ cm}$	(29) $N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 107}{80^2} = 3465,16 \text{ kN}$
Vitkost elemenata, $\lambda_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (30)$	Površina, $A = 10,10 \text{ cm}^2$ Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$	(30) $\lambda_y = \sqrt{\frac{10,10 \cdot 23,5}{3465,16}} = 0,26$
Faktor izvijanja, $\phi = 0,5 \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] \quad (31)$	Faktor imperfekcije, α određuje se iz tablice [20] i jednak je 0,49	(31) $\phi = 0,5 [1 + 0,49 \cdot (0,26 - 0,2) + 0,26^2] = 0,55$
Faktor redukcije, $\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \leq 1 \quad (32)$		(32) $\chi = \frac{1}{0,55 + \sqrt{0,55^2 - 0,26^2}} = 0,96$
$N_{b,Rd} = \chi \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (28)$	Koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M1} = 1,1$	(28) $N_{b,Rd} = 0,96 \frac{10,10 \cdot 23,5}{1,1} = 207,14 \text{ kN}$
Ostvareno opterećenje iznosi 8,55 kN, pa vrijedi uvjet nosivosti $N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$ koji nakon uvrštavanja glasi $8,55 < 207,14$, i iskorištenost iznosi 3%.		

Tablica 37: Otpornost na izvijanje oko osi z-z glavnih nosača

OTPORNOST NA IZVIJANJE OKO OSI z-z		
Otpornost na izvijanje računa se prema izrazu (28):		
$N_{b,Rd} = \chi \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (28)$		
FORMULA	ULAZNI PARAMETRI	UVRŠTEN IZRAZ I REZULTAT
Eulereva kritična duljina izvijanja, $N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2} \quad (29)$	Modul elastičnosti, $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ Moment inercije, $I_z = 25,50 \text{ cm}^4$ Kritična duljina izvijanja, $L_{cr} = L = 80 \text{ cm}$	$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 25,50}{80^2} = 825,80 \text{ kN} \quad (29)$
Vitkost elemenata, $\lambda_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (30)$	Površina, $A = 10,10 \text{ cm}^2$ Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$	$\lambda_z = \sqrt{\frac{10,10 \cdot 23,5}{825,80}} = 0,54 \quad (30)$
Faktor izvijanja, $\phi = 0,5 \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^{-2} \right] \quad (31)$	Faktor imperfekcije, α određuje se iz tablice [20] i jednak je 0,49	$\phi = 0,5 [1 + 0,49 \cdot (0,54 - 0,2) + 0,54^2] = 0,73 \quad (31)$
Faktor redukcije, $\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_z^2}} \leq 1 \quad (32)$		$\chi = \frac{1}{0,73 + \sqrt{0,73^2 - 0,54^2}} = 0,82 \quad (32)$
$N_{b,Rd} = \chi \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (28)$	Koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M1} = 1,1$	$N_{b,Rd} = 0,82 \frac{10,10 \cdot 23,5}{1,1} = 176,93 \text{ kN} \quad (28)$
Ostvareno opterećenje iznosi 8,55 kN, pa vrijedi uvjet nosivosti $N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$ koji nakon uvrštavanja glasi $8,55 < 176,93$, i iskorištenost iznosi 4%.		

Otpornost na bočno torzijsko izvijanje:

Proračun elastičnog kritičnog momenta bočno torzijskog izvijanja:

Elastični kritični moment bočno torzijskog izvijanja, M_{cr} se računa prema formuli (32):

$$M_{cr} = C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * L)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 * \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k * L)^2 * G * I_t}{\pi^2 * E * I_z}} \right] \quad (32)$$

u kojoj je:

$$-\psi = \frac{M_1}{M_2} = \frac{-0,93}{0,93} = -1; C_1 = 2,55, C_2 = 0, \text{ prema tablici [24]}$$

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

- moment inercije, $I_z = 25,50 \text{ cm}^4$

- faktori krivljenja, $k, k_w = 1$

- razmak točaka bočnog pridržanja, $L = 80 \text{ cm}$

- konstanta krivljenja, $I_w = 220 \text{ cm}^6$

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

- torzijska konstanta, $I_t = 1,47 \text{ cm}^4$.

Uvrštavanjem u izraz (32) dobiva se:

$$M_{cr} = 2,55 \frac{\pi^2 * 21000 * 25,50}{80^2} \left[\sqrt{\frac{220}{107} * \frac{80^2 * 8077 * 1,47}{\pi^2 * 21000 * 25,50}} \right] = 11449,41 \text{ kNcm};$$

Tablica 38: Otpornost na bočno torzijsko izvijanje glavnih nosača

OTPORNOST NA BOČNO TORZIJSKO IZVIJANJE OKO OSI y-y		
Otpornost na izvijanje računa se prema izrazu (33):		
$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W^* f_y}{\gamma_{M1}} \quad (33)$		
FORMULA	ULAZNI PARAMETRI	UVRŠTEN IZRAZ I REZULTAT
Elastični kritični moment B-T izvijanja, M_{cr}	-prethodno određeno	$M_{cr} = 11449,41 \text{ kNcm}$
Bezdimenzionalna vitkost elemenata, $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y}^* f_y}{M_{cr}}} \quad (34)$	Moment otpora u smjeru y, $W_{pl,y} = 31,20 \text{ cm}^3$ Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$	(34) $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{31,20 * 23,5}{11449,41}}$ $= 0,25$
Faktor B-T izvijanja, $\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha * (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] \quad (35)$	Faktor imperfekcije, α određuje se iz tablice [25] i jednak je 0,76	(35) $\phi = 0,5 [1 + 0,76 * (0,25 - 0,2) + 0,25^2] = 0,55$
Faktor redukcije, $\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \quad (36)$		(36) $\chi_{LT} = \frac{1}{0,55 + \sqrt{0,55^2 - 0,25^2}}$ $= 0,96$
$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W^* f_y}{\gamma_{M1}} \quad (33)$	Koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M1} = 1,1$	(33) $M_{b,Rd} = 0,96 \frac{31,20 * 23,5}{1,1}$ $= 639,88 \text{ kNcm}$
Ostvareno opterećenje iznosi 5,16 kNm, pa vrijedi uvjet nosivosti $M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$ koji nakon uvrštavanja glasi $5,1 < 6,39$, i iskorištenost iznosi 81%.		

Interakcija izvijanja i bočne torzije

Tablica 39: Interakcijski faktor k_{yy} za glavne nosače

INTERAKCIJSKI FAKTOR k_{yy}	
Formula za interakcijski faktor k_{yy} ():	$k_{yy} = C_{my} \left[1 + (\lambda_y - 0,2) * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] \leq$ $C_{my} \left[1 + 0,8 * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] \quad (37)$
	$\lambda_y = 0,26$
	$N_{Ed} = 8,55 \text{ kN}$
	$\chi_y = 0,96$
	$N_{Rk} = 207,14 \text{ kN}$
	$\gamma_{M1} = 1,1$
Pomoćne formule:	$C_{my} = 0,1 * (1 - \psi) - 0,8\alpha_s \quad (38)$
	$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{-0,95}{1,20} = -0,79 \quad (39)$
	$\psi = \frac{-1,20}{3,40} = -0,35$
	Uvršteno i rezultat: $C_{my} = 0,1 * (1 + 0,35) + 0,8 * 0,79 = 0,77 > 0,4$
Uvršteno i rezultat ():	$0,77 \left[1 + (0,26 - 0,2) * \frac{8,55}{0,96 * 207,14 / 1,1} \right] \leq$ $0,77 \left[1 + 0,8 * \frac{8,55}{0,96 * 207,14 / 1,1} \right]$ $0,77 < 0,79 \rightarrow k_{yy} = 0,77$

Tablica 40: Interakcijski faktor k_{zy} za glavne nosače

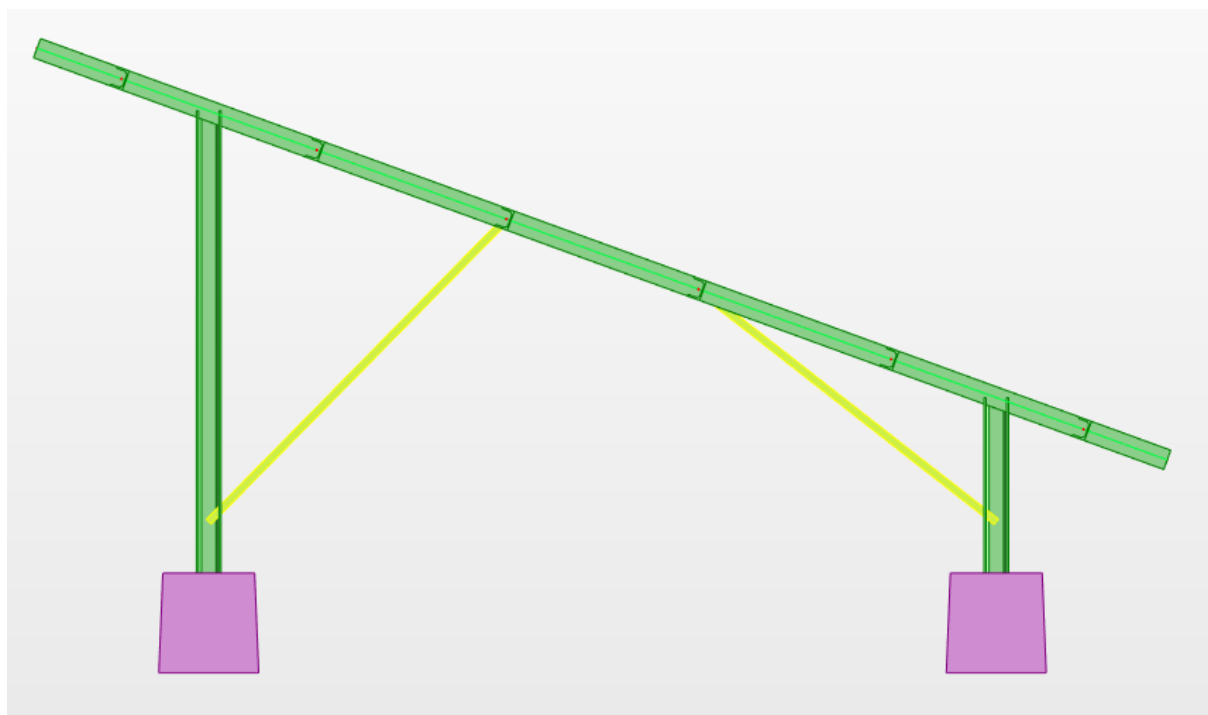
INTERAKCIJSKI FAKTOR k_{zy}	
Formula za interakcijski faktor k_{zy} ():	$\left[1 - \frac{0,1 * \lambda_z}{(C_{mLT} - 0,25)} * \frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] \geq$ $\left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} * \frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] \quad (40)$
	$\lambda_z = 0,54$
	$N_{Ed} = 8,55 kN$
	$\chi_z = 0,82$
	$N_{Rk} = 176,93 kN$
	$\gamma_{M1} = 1,1$
Pomoćne formule:	$C_{mLT} = 0,1 * (1 - \psi) - 0,8\alpha_s \quad (41)$
	$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{-0,95}{1,20} = -0,79 \quad (39)$
	$\psi = \frac{-1,20}{3,40} = -0,35$
	Uvršteno i rezultat: $C_{my} = 0,1 * (1 + 0,35) + 0,8 * 0,79 = 0,77 > 0,4$
Uvršteno i rezultat ():	$\left[1 - \frac{0,1 * 0,54}{(0,77 - 0,25)} * \frac{8,55}{0,54 * 176,93 / 1,1} \right] \geq$ $\left[1 - \frac{0,1}{(0,77 - 0,25)} * \frac{8,55}{0,54 * 176,93 / 1,1} \right]$ $0,989 > 0,981 \rightarrow k_{yz} = 0,989$

Tablica 41: Interakcijske formule za glavne nosače

INTERAKCIJSKE FORMULE	
1. Interakcijska formula():	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} * \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (42)$
Uvršteno i rezultat:	$\frac{8,55}{0,96 * 207,14 / 1,1} + 0,77 * \frac{5,16}{0,96 * 6,39 / 1,1} \leq 1$ $0,77 < 1 \rightarrow \text{uvjet zadovoljen}$
2. Interakcijska formula ():	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} * \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (43)$
Uvršteno i rezultat:	$\frac{8,55}{0,82 * 176,93 / 1,1} + 0,77 * \frac{5,16}{0,96 * 6,39 / 1,1} \leq 1$ $0,78 < 1 \rightarrow \text{uvjet zadovoljen}$

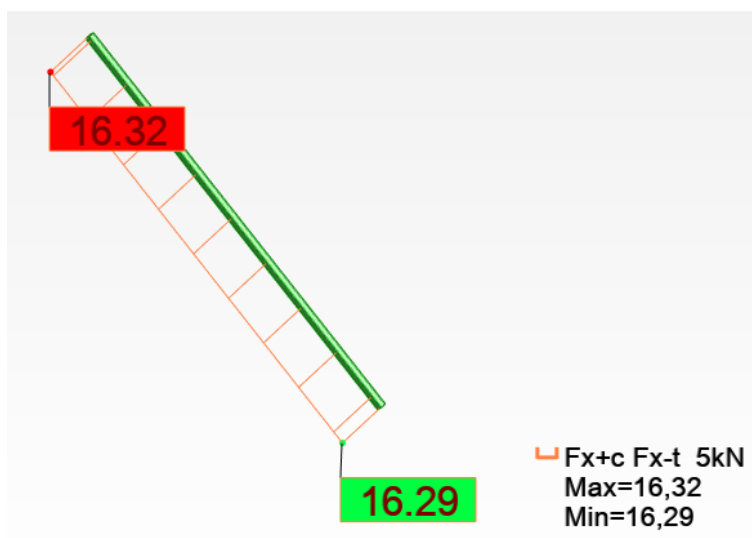
5.3. Kosnik

Provedeno je dimenzioniranje kosnika (Slika 40), poprečnog presjeka Hybox SHS 30x30x2,5 (Slika 44).

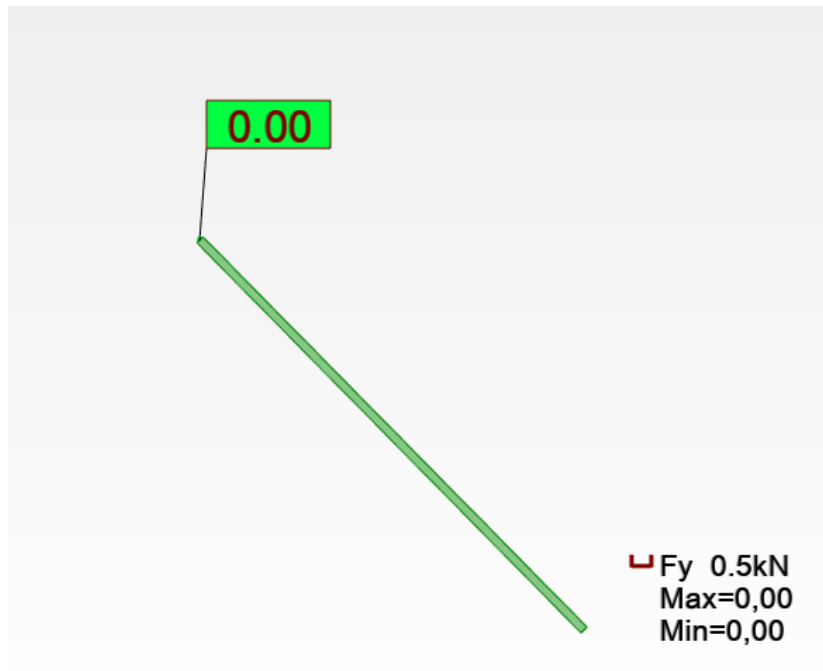


Slika 40: Kosnik

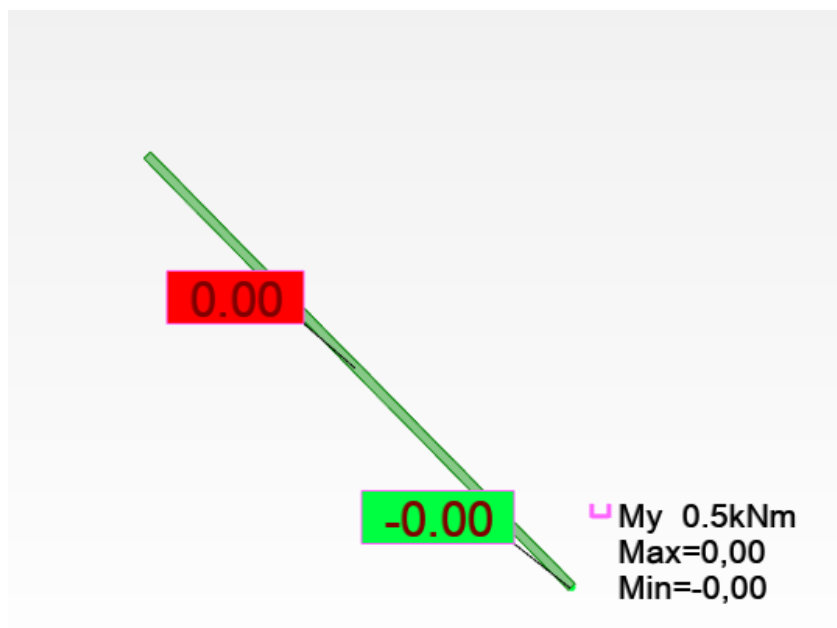
Dijagrami opterećenja za kosnik (Slika 41, 42 i 43):



Slika 41: Dijagram uzdužnih sila za kosnik

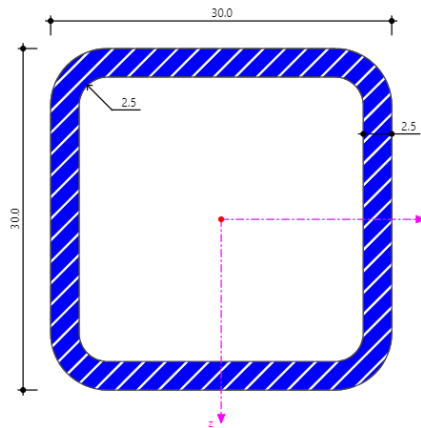


Slika 42: Dijagram poprečnih sila za kosnik



Slika 43: Momentni dijagram za kosnik

Provedene su provjere na razini poprečnog presjeka i na razini elementa. Na razini poprečnog presjeka provela se klasifikacija poprečnog presjeka (Tablica 43) i provjera otpornosti poprečnog presjeka na tlak (Tablica 44). Na razini elementa provela se provjera na izvijanje (Tablica 45).



Slika 44: Poprečni presjek kosnika- Hybox SHS 30x30x2,5 [13]

Tablica 42: Podaci o presjeku i opterećenja za kosnik

PODACI O PRESJEKU		OPTEREĆENJA	
VISINA	$h = 30 \text{ mm}$	UZDUŽNA SILA	$N_{Ed} = -16,32 \text{ kN}$
ŠIRINA	$b = 30 \text{ mm}$	POPREČNA SILA	$V_{Ed} = 0,00 \text{ kN}$
DEBLJINA STJENKI	$t = 2,5 \text{ mm}$	MOMENT	$M_{Ed} = 0,00 \text{ kNm}$
POVRŠINA	$A = 2,59 \text{ cm}^2$		
RADIJUS	$r = 2,5 \text{ mm}$		

Otpornost na razini poprečnog presjeka

Klasifikacija poprečnog presjeka:

Tablica 43: Klasifikacija poprečnog presjeka kosnika

KLASIFIKACIJA	
Unutarnji elementi opterećeni na tlak.	
UVJET ZA PRVU KLASU:	$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$ (44)
Ulazni parametri:	$c = h - 2 * t - 2 * r$ (45)
	$c = 30 - 2 * 2,5 - 2 * 2,5 = 20 \text{ mm}$
	$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$ (16)
	$t = 2,5 \text{ mm}$
Uvršten izraz:	$\frac{20}{2,5} = 8 < 33 * 1 = 33$
Uvjet zadovoljen, poprečni presjek pripada prvoj klasi.	

Tablica 44: Otpornost na tlak poprečnog presjeka kosnika

OTPORNOST NA TLAK	
Izraz:	$N_c, R_d = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (19)$
Ulazni parametri:	Površina, $A = 2,59 \text{ cm}^2$
	Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
	Parcijalni koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M0} = 1$
Uvršteni parametri:	$N_c, R_d = \frac{2,59 \cdot 23,5}{1}$
Rezultat:	$N_c, R_d = 60,87 \text{ kN}$
Ostvareno opterećenje:	$N_{Ed} = 16,32 \text{ kN}$
Uvjet nosivosti:	$N_{Ed} \leq N_{c,Rd}$ $16,32 < 60,87$
Iskorištenost poprečnog presjeka:	26%

Otpornost na razini elementa

Otpornost na izvijanje:

Tablica 45: Otpornost na izvijanje kosnika

OTPORNOST NA IZVIJANJE		
Otpornost na izvijanje računa se prema izrazu (28):		
$N_{b,Rd} = \chi \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (28)$		
FORMULA	ULAZNI PARAMETRI	UVRŠTEN IZRAZ I REZULTAT
Eulereva kritična duljina izvijanja, $N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2} \quad (29)$	Modul elastičnosti, $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ Moment inercije, $I_y = 3,16 \text{ cm}^4$ Kritična duljina izvijanja, $L_{cr} = L = 166 \text{ cm}$	(29) $N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 3,16}{166^2} = 23,77 \text{ kN}$
Vitkost elemenata, $\lambda_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (30)$	Površina, $A = 2,59 \text{ cm}^2$ Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$	(30) $\lambda_y = \sqrt{\frac{2,59 \cdot 23,5}{23,77}} = 1,6$
Faktor izvijanja, $\phi = 0,5 \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] \quad (31)$	Faktor imperfekcije, α određuje se iz tablice [20] za vruće dogotovljene šuplje presjeke i jednak je 0,21	(31) $\phi = 0,5 \left[1 + 0,21 \cdot (1,6 - 0,2) + 1,6^2 \right] = 1,93$
Faktor redukcije, $\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \leq 1 \quad (32)$		(32) $\chi = \frac{1}{1,93 + \sqrt{1,93^2 - 1,6^2}} = 0,33$
$N_{b,Rd} = \chi \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (28)$	Koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M1} = 1,1$	(28) $N_{b,Rd} = 0,33 \frac{2,59 \cdot 23,5}{1,1} = 18,26 \text{ kN}$
Ostvareno opterećenje iznosi 16,32 kN, pa vrijedi uvjet nosivosti $N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$ koji nakon uvrštavanja glasi $16,32 < 18,26$, i iskorištenost iznosi 89%.		

Profil Hybox 355 SHS 30x30x2,5 ispunjava sve uvjete te se njega izabire.

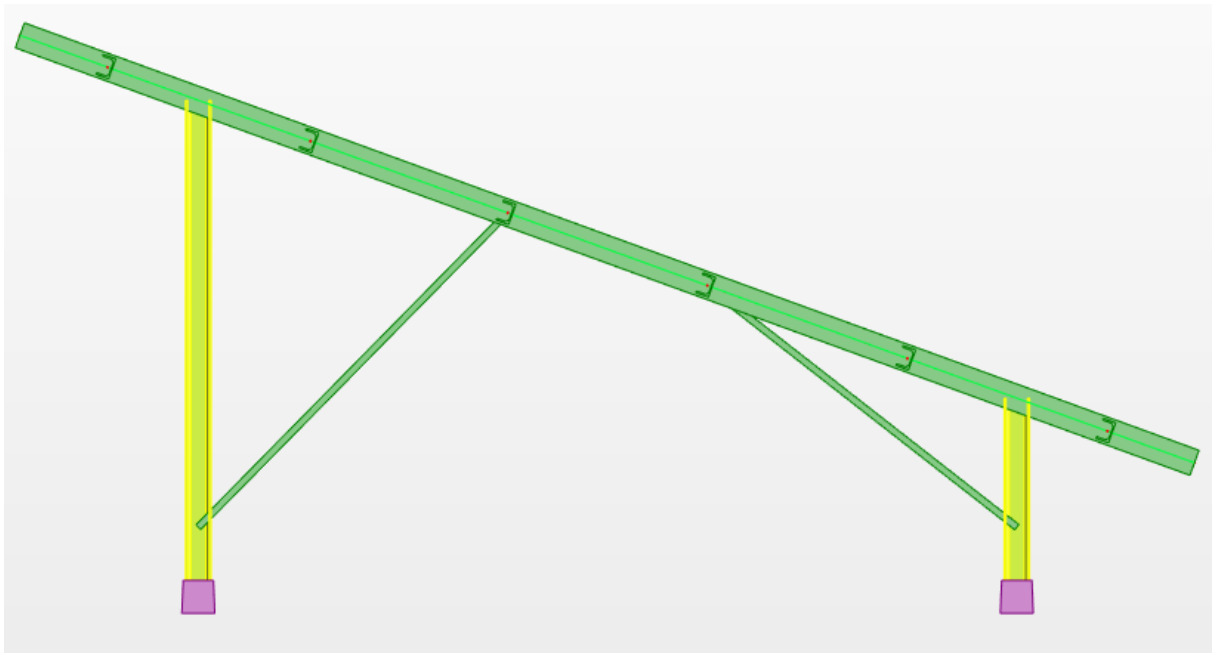
Prije izabiranja profila, provedene su i provjere za manje profile, koji nisu ispunili uvjete, a njihovi su uvjeti nosivosti prikazani u Tablici 46:

PROFIL	OTPORNOST NA TLAK- uvjet nosivosti:	OTPORNOST NA IZVIJANJE- uvjet nosivosti:	STATUS:
Hybox SHS 25x25x2,5	$N_{Ed} \leq N_{c.Rd}$ 16,32 < 49,12	$N_{Ed} \leq N_{b.Rd}$ 16,32 > 10,72	Profil nije zadovoljio.
Hybox SHS 30x30x2	$N_{Ed} \leq N_{c.Rd}$ 16,32 < 50,29	$N_{Ed} \leq N_{b.Rd}$ 16,32 > 15,54	Profil nije zadovoljio.
Hybox SHS 30x30x2,5	$N_{Ed} \leq N_{c.Rd}$ 16,32 < 60,87	$N_{Ed} \leq N_{b.Rd}$ 16,32 > 18,26	Profil je odgovarajući.

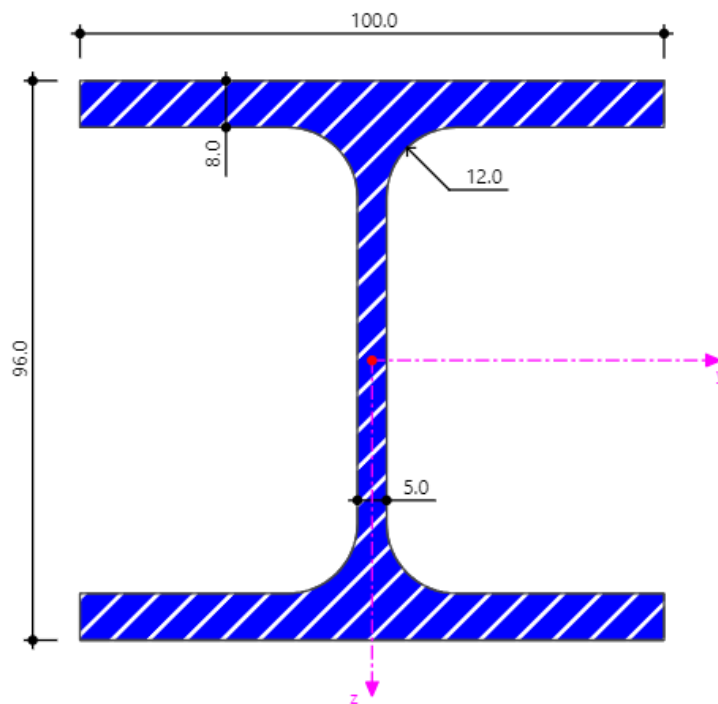
Tablica 46: Provjere za različite profile za kosnik

5.4. Stupovi

Provedene su provjere za stupove (Slika 45), poprečnog presjeka HEA 100 (Slika 46).



Slika 45: Stupovi

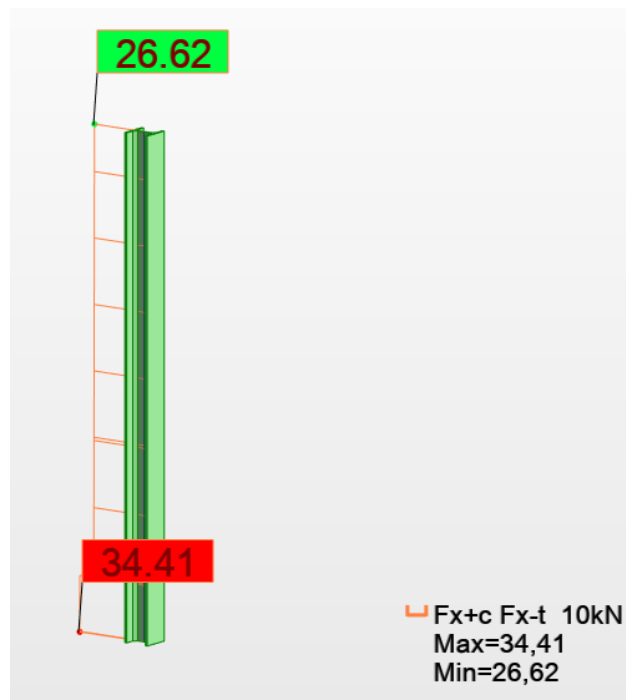


Slika 46: Poprečni presjek stupova- HEA 100 [14]

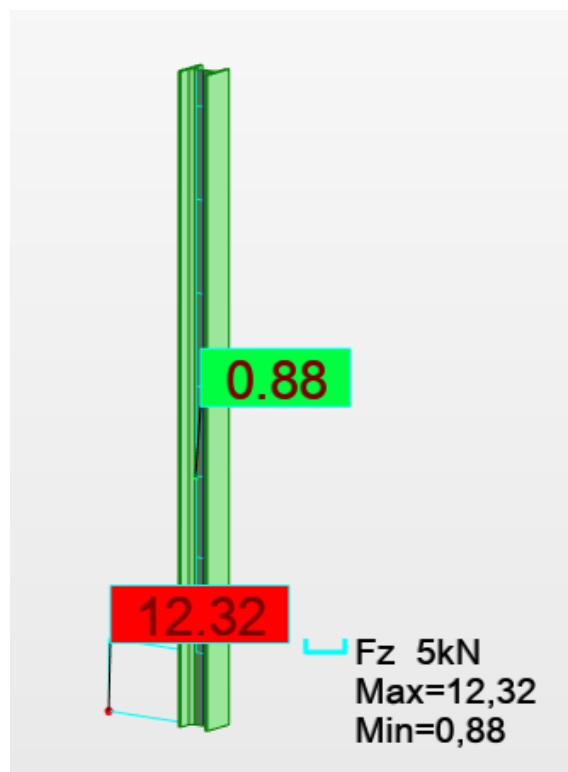
Tablica 47: Podaci o presjeku i opterećenja za stup

PODACI O PRESJEKU		OPTEREĆENJA	
VISINA	$h = 96 \text{ mm}$	UZDUŽNA SILA	$N_{Ed} = -34,41 \text{ kN}$
ŠIRINA	$b = 100 \text{ mm}$	POPREČNA SILA	$V_{Ed} = 12,32 \text{ kN}$
ŠIRINA HRPTA	$t_w = 5 \text{ mm}$	MOMENT	$M_{Ed} = 2,65 \text{ kNm}$
ŠIRINA POJASNICA	$t_f = 8 \text{ mm}$		
RADIJUS	$r = 12 \text{ mm}$		
POVRŠINA	$A = 21,20 \text{ cm}^2$		

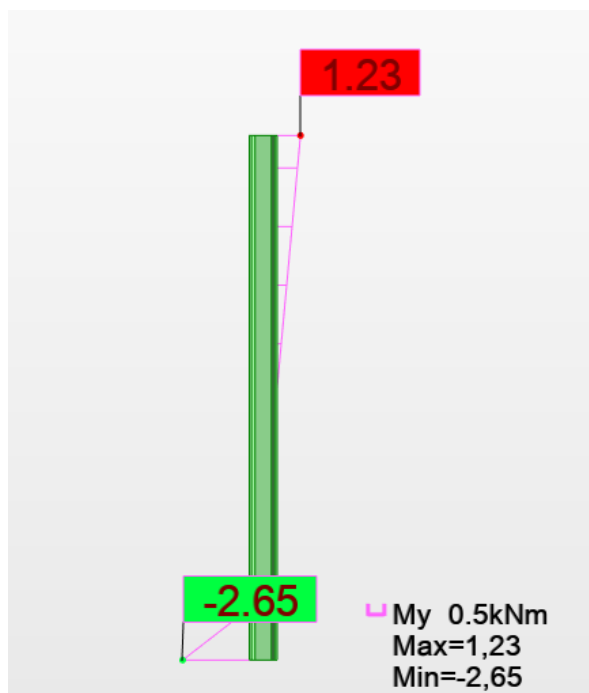
Dijagrami opterećenja za stupove (Slika 47,48 i 49):



Slika 47: Dijagram uzdužnog opterećenja stupa



Slika 48: Dijagram poprečnih sila stupa



Slika 49: Momentni dijagram stupa

Provedene su provjere na razini poprečnog presjeka i na razini elementa. Na razini poprečnog presjeka prvo se provela klasifikacija poprečnog presjeka (Tablica 48), a zatim provjera otpornosti poprečnog presjeka na tlak (Tablica 49), savijanje (Tablica 50), posmičnu silu (Tablica 51) i interakciju tlaka i posmika (Tablica 52 i 53). Na razini elementa provele su se provjere na izvijanje (Tablica 54 i 55), otpornost na bočno torzijsko izvijanje (Tablica 56) i interakcija izvijanja i bočno torzijskog izvijanja (Tablica 59).

Otpornost na razini poprečnog presjeka

Klasifikacija poprečnog presjeka:

Proračun „ α ”

Proračunava se „ α ” potrebna za određivanje uvjeta za klasifikaciju hrpta po izrazu (11):

$$\alpha = \frac{1}{d} \left(\frac{d}{2} + a \right) \quad (11)$$

u kojem se „ d ” dobiva prema izrazu (12):

$$d = h - 2 * t_f - 2 * r \quad (12)$$

$$d = 80 - 2 * 8 - 2 * 12 = 40 \text{ mm.}$$

„ α “ dobiva se prema izrazu (13) u kojem je uzdužna sila $N_{Ed} = 34,41 \text{ kN}$:

$$\alpha = \frac{N_{Ed}}{\frac{2 \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}}} \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{34,41}{\frac{2 \cdot 0,5 \cdot 23,5}{1}} = 1,45 \text{ cm}$$

Konačno uvrštavanjem u izraz (11) dobiva se:

$$\alpha = \frac{1}{46} \left(\frac{46}{2} + 1,45 \right) = 0,53 > 0,5 \text{ pa vrijedi uvjet:}$$

$$\frac{c}{t} \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1} \quad (14)$$

Tablica 48: Klasifikacija poprečnog presjeka stupa

KLASIFIKACIJA POJASNICE	KLASIFIKACIJA HRPTA
Pojasnica je opterećena na tlak.	Hrbat je opterećen na tlak i savijanje.
-vanjski element	-unutarnji element
UVJETI ZA PRVU KLASU:	
$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$ (15)	$\frac{c}{t} \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ (14)
Ulazni parametri:	
$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$ (16)	$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$ (16)
$c = \frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r$ (39) $c = \frac{100}{2} - \frac{5}{2} - 12 = 35,5$	$c = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r$ (18) $c = 96 - 2 \cdot 8 - 2 \cdot 12 = 56 \text{ mm}$
$t = t_f = 8 \text{ mm}$	$t = t_w = 5 \text{ mm}$
	$\alpha = 0,53$
Uvršteni izrazi:	
$\frac{35,5}{8} = 4,44 < 9 \cdot 1 = 9$	$\frac{56}{5} = 11,2 < \frac{396 \cdot 1}{13 \cdot 0,53 - 1} = 67,23$
Uvjet zadovoljen, pojasnica pripada prvoj klasi.	Uvjet zadovoljen, hrbat pripada prvoj klasi.
ZAKLJUČAK: poprečni presjek pripada 1. klasi.	

Tablica 49: Otpornost na tlak poprečnog presjeka stupa

OTPORNOST NA TLAK	
Izraz:	$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (19)$
Ulazni parametri:	Površina, $A = 21,20 \text{ cm}^2$
	Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
	Parcijalni koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M0} = 1$
Uvršteni parametri:	$N_{c,Rd} = \frac{21,20 \cdot 235}{1}$
Rezultat:	$N_{c,Rd} = 498,2 \text{ kN}$
Ostvareno opterećenje:	$N_{Ed} = 34,41 \text{ kN}$
Uvjet nosivosti:	$N_{Ed} \leq N_{c,Rd}$ $34,41 < 498,2$
Iskorištenost poprečnog presjeka:	7%

Tablica 50: Otpornost na savijanje poprečnog presjeka stupa

OTPORNOST NA SAVIJANJE	
Izraz:	$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (20)$
Ulazni parametri:	Plastični moment otpora, $W_{pl,y} = 83 \text{ cm}^3$
	Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
	Parcijalni koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M0} = 1$
Uvršteni parametri:	$M_{c,Rd} = \frac{0,000083 \cdot 235000}{1}$
Rezultat:	$M_{c,Rd} = 19,51 \text{ kNm}$
Ostvareno opterećenje:	$M_{Ed} = 2,65 \text{ kNm}$
Uvjet nosivosti:	$M_{Ed} \leq M_{c,Rd}$ $2,65 < 19,51$
Iskorištenost poprečnog presjeka:	13,5%

Tablica 51: Otpornost na posmik poprečnog presjeka stupa

OTPORNOST NA POSMIK	
Uvjet izbočavanja hrpta:	$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 * \frac{\varepsilon}{\eta} \quad (21)$
	$h_w = h - 2 * t_f \quad (22)$ $h_w = 96 - 2 * 8 = 80 \text{ mm}$ $t_w = 5 \text{ mm}$ $\varepsilon = 1$ $\eta = 1,2$
Uvršten uvjet:	$\frac{80}{5} = 16 < 72 * \frac{1}{1,2} = 60; \text{ uvjet ispunjen}$
Izraz:	$V_{pl,Rd} = A_{v,z} * \frac{f_y}{\sqrt{3}} * \frac{1}{\gamma_{M0}} \quad (23)$
Ulazni parametri:	Posmična površina, $A_{v,z} = 4,08 \text{ cm}^2$ $(A_{v,z} = A - 2 * b * t_f + (t_w + 2r) * t_f) \quad (24)$ $A_{v,z} = 21,20 - 2 * 10 * 0,8 + (0,5 + 2 * 1,2) * 0,8 = 7,52 \text{ cm}^2)$
	Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
	Parcijalni koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M0} = 1$
Uvršteni parametri:	$V_{pl,Rd} = 7,52 * \frac{23,5}{\sqrt{3}} * \frac{1}{1}$
Rezultat:	$V_{pl,Rd} = 102,03 \text{ kN}$
Ostvareno opterećenje:	$V_{Ed} = 12,32 \text{ kN}$
Uvjet nosivosti:	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$ $12,32 < 102,03$
Iskorištenost poprečnog presjeka:	12%

Interakcija savijanja, uzdužne sile i posmika:

Provjeravaju se razine uzdužne sile i poprečne sile u točki x=3,9m (Tablica 52 i 53). Ukoliko su uvjeti zadovoljeni, ne provodi se redukcija.

Tablica 52: Razina uzdužne sile za stup

RAZINE UZDUŽNE SILE		
Uvjeti:	$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd}$ (25)	$N_{Ed} \leq \frac{0,5h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}}$ (26)
Ulazne vrijednosti:	Ostvarena uzdužna sila, $N_{Ed} = 34,41 \text{ kN}$	Ostvarena uzdužna sila, $N_{Ed} = 34,41 \text{ kN}$
	$N_{pl,Rd} = 498,2 \text{ kN}$	$h_w = 80 \text{ mm}$
		$t_w = 5 \text{ mm}$
		$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
		$\gamma_{M0} = 1$
Uvršteni uvjeti:	$N_{Ed} \leq 0,25 * 498,2 = 124,55 \text{ kN}$	$N_{Ed} \leq \frac{0,5 * 80 * 5 * 235}{1}$ $= 47 \text{ kN}$
	$34,41 < 124,55$	$34,41 < 47$
Oba uvjeta su ispunjena.		

Tablica 53: Razine poprečne sile za stup

RAZINE POPREČNE SILE	
Uvjet:	$V_{Ed} \leq 0,5 * V_{pl,Rd}$ (27)
Ulazne vrijednosti:	$V_{Ed} = 12,32 \text{ kN}$
	$V_{pl,Rd} = 102,03 \text{ kN}$
Uvršten uvjet:	$V_{Ed} \leq 0,5 * 102,03 = 51,01 \text{ kN}$
	$12,32 < 51,01$
Uvjet je ispunjen.	

Zaključak: oba uvjeta su zadovoljena te se ne provodi redukcija.

Otpornost na razini elementa

Otpornost na izvijanje:

Otpornost na izvijanje oko osi y-y

$$\frac{h}{b} = \frac{96}{100} = 0,96 < 1,2; t_f < 100; \text{ vrijedi krivulja b.}$$

Tablica 54: Otpornost na izvijanje oko osi y-y stupa

OTPORNOST NA IZVIJANJE OKO OSI y-y		
Otpornost na izvijanje računa se prema izrazu (28):		
$N_{b,Rd} = \chi \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (28)$		
FORMULA	ULAZNI PARAMETRI	UVRŠTEN IZRAZ I REZULTAT
Eulereva kritična duljina izvijanja, $N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2} \quad (29)$	Modul elastičnosti, $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ Moment inercije, $I_y = 349 \text{ cm}^4$ Kritična duljina izvijanja, $L_{cr} = L = 181 \text{ cm}$	(29) $N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 349}{181^2} = 2207,94 \text{ kN}$
Vitkost elemenata, $\lambda_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (30)$	Površina, $A = 21,20 \text{ cm}^2$ Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$	(30) $\lambda_y = \sqrt{\frac{21,20 \cdot 23,5}{2207,94}} = 0,475$
Faktor izvijanja, $\phi = 0,5 \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^{-2} \right] \quad (31)$	Faktor imperfekcije, α određuje se iz tablice [20] i jednak je 0,34	(31) $\phi = 0,5 [1 + 0,34 \cdot (0,475 - 0,2) + 0,475^2] = 0,66$
Faktor redukcije, $\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \leq 1 \quad (32)$		(32) $\chi = \frac{1}{0,66 + \sqrt{0,66^2 - 0,475^2}} = 0,712$
$N_{b,Rd} = \chi \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (28)$	Koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M1} = 1,1$	(28) $N_{b,Rd} = 0,89 \frac{21,20 \cdot 23,5}{1,1} = 403,09 \text{ kN}$
Ostvareno opterećenje iznosi 34,41 kN, pa vrijedi uvjet nosivosti $N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$ koji nakon uvrštavanja glasi $34,41 < 403,09$, i iskorištenost iznosi 7%.		

Otpornost na izvijanje oko osi z-z

$$\frac{h}{b} = \frac{96}{100} = 0,96 < 1,2; t_f < 100; \text{ vrijedi krivulja c.}$$

Tablica 55: Otpornost na izvijanje oko osi z-z stupa

OTPORNOST NA IZVIJANJE OKO OSI z-z		
Otpornost na izvijanje računa se prema izrazu (28):		
$N_{b,Rd} = \chi \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (28)$		
FORMULA	ULAZNI PARAMETRI	UVRŠTEN IZRAZ I REZULTAT
Eulereva kritična duljina izvijanja, $N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2} \quad (29)$	Modul elastičnosti, $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ Moment inercije, $I_z = 134 \text{ cm}^4$ Kritična duljina izvijanja, $L_{cr} = L = 181 \text{ cm}$	(29) $N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 134}{181^2} = 847,75 \text{ kN}$
Vitkost elemenata, $\lambda_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (30)$	Površina, $A = 21,20 \text{ cm}^2$ Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$	(30) $\lambda_z = \sqrt{\frac{21,20 \cdot 23,5}{847,75}} = 0,767$
Faktor izvijanja, $\phi = 0,5 \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] \quad (31)$	Faktor imperfekcije, α određuje se iz tablice [20] i jednak je 0,49	(31) $\phi = 0,5 [1 + 0,49 \cdot (0,767 - 0,2) + 0,767^2] = 0,93$
Faktor redukcije, $\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \leq 1 \quad (32)$		(32) $\chi = \frac{1}{0,93 + \sqrt{0,93^2 - 0,767^2}} = 0,67$
$N_{b,Rd} = \chi \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (28)$	Koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M1} = 1,1$	(28) $N_{b,Rd} = 0,67 \frac{21,20 \cdot 23,5}{1,1} = 303,45 \text{ kN}$
Ostvareno opterećenje iznosi 34,41 kN, pa vrijedi uvjet nosivosti $N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$ koji nakon uvrštavanja glasi $34,41 < 303,45$, i iskorištenost iznosi 11%.		

Otpornost na bočno torzijsko izvijanje:

Proračun elastičnog kritičnog momenta bočno torzijskog izvijanja:

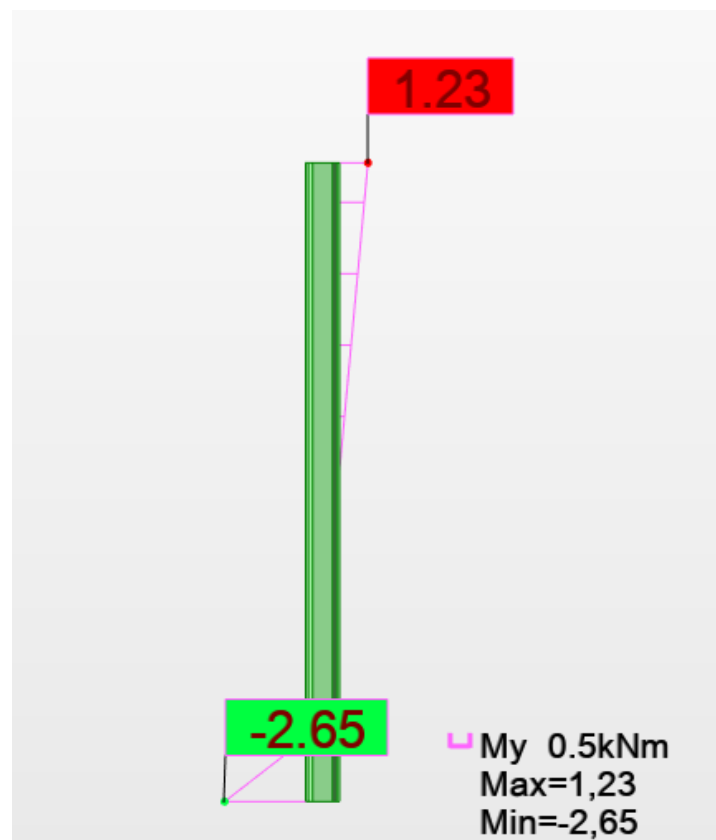
Elastični kritični moment bočno torzijskog izvijanja, M_{cr} se računa prema formuli (32):

$$M_{cr} = C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * L)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 * \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k * L)^2 * G * I_t}{\pi^2 * E * I_z}} \right] \quad (32)$$

u kojoj je:

- C_1 faktor za izračun kritičnog momenta bočno torzijskog izvijanja koji se određuje iz tablice [24]:

$$-\psi = \frac{M_1}{M_2} = \frac{1,23}{-2,65} = 0,46; \text{ interpolacijom se dobiva vrijednost } C_1 = 1,36, C_2 = 0$$



Slika 50: Momentni dijagram stupa za određivanje faktora kritičnog momenta bočno torzijskog izvijanja

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

- moment inercije, $I_z = 134 \text{ cm}^4$

- faktori krivljenja, $k, k_w=1$

- razmak točaka bočnog pridržanja, $L= 181 \text{ cm}$

- konstanta krivljenja, $I_w=2581 \text{ cm}^6$

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

- torzijska konstanta, $I_t=5,26 \text{ cm}^4$.

Uvrštavanjem u izraz dobiva se:

$$M_{cr} = 1,36 \frac{\pi^2 * 21000 * 134}{181^2} \left[\sqrt{\frac{2581}{134} * \frac{181^2 * 8077 * 5,26}{\pi^2 * 21000 * 134}} \right] = 9481,89 \text{ kNcm};$$

Tablica 56: Otpornost na bočno torzijsko izvijanje stupa

OTPORNOST NA BOČNO TORZIJSKO IZVIJANJE		
Otpornost na izvijanje računa se prema izrazu (33):		
$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W * f_y}{\gamma_{M1}}$ (33)		
FORMULA	ULAZNI PARAMETRI	UVRŠTEN IZRAZ I REZULTAT
Elastični kritični moment B-T izvijanja, M_{cr}	-prethodno određeno	$M_{cr} = 9481,89 \text{ kNcm}$
Bezdimenzionalna vitkost elemenata, $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} * f_y}{M_{cr}}} \quad (34)$	Moment otpora u smjeru y, $W_{pl,y} = 83 \text{ cm}^3$ Granica popuštanja, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$	(34) $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{83 * 23,5}{9481,89}} = 0,45$
Faktor B-T izvijanja, $\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha * (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] \quad (35)$	Faktor imperfekcije, α određuje se iz tablice [25] i jednak je 0,21	(35) $\phi = 0,5 [1 + 0,21 * (0,45 - 0,2) + 0,45^2] = 0,63$
Faktor redukcije, $\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \quad (36)$		(36) $\chi_{LT} = \frac{1}{0,63 + \sqrt{0,63^2 - 0,45^2}} = 0,93$
$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W * f_y}{\gamma_{M1}} \quad (33)$	Koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M1} = 1,1$	(33) $M_{b,Rd} = 0,93 \frac{83 * 23,5}{1,1} = 1649,06 \text{ kNcm}$
Ostvareno opterećenje iznosi 2,65 kNm, pa vrijedi uvjet nosivosti $M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$ koji nakon uvrštavanja glasi $2,65 < 16,49$, i iskorištenost iznosi 16%.		

Interakcija izvijanja i bočne torzije

Tablica 57: Interakcijski faktor k_{yy} stupove

INTERAKCIJSKI FAKTOR k_{yy}	
Formula za interakcijski faktor k_{yy} ():	$k_{yy} = C_{my} \left[1 + (\lambda_y - 0,2) * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] \leq$ $C_{my} \left[1 + 0,8 * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] \quad (37)$
	$\lambda_y = 0,48$
	$N_{Ed} = 34,41 \text{ kN}$
	$\chi_y = 0,71$
	$N_{Rk} = 403,09 \text{ kN}$
	$\gamma_{M1} = 1,1$
Pomoćne formule:	$C_{my} = 0,1 * (1 - \psi) - 0,8\alpha_s > 0,4 \quad (38)$
	$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{-0,63}{1,23} = -0,51 \quad (39)$
	$\psi = \frac{-1,20}{2,65} = -0,45$
	Uvršteno i rezultat: $C_{my} = 0,1 * (1 + 0,45) + 0,8 * 0,51 = 0,55 > 0,4$
Uvršteno i rezultat ():	$0,55 \left[1 + (0,48 - 0,2) * \frac{34,61}{0,71 * 403,09 / 1,1} \right] \leq$ $0,55 \left[1 + 0,8 * \frac{8,55}{0,71 * 403,09 / 1,1} \right]$ $0,57 < 0,60 \rightarrow k_{yy} = 0,57$

Tablica 58: Tablica 26: Interakcijski faktor k_{zy} za stupove

INTERAKCIJSKI FAKTOR k_{zy}	
Formula za interakcijski faktor k_{zy} ():	$\left[1 - \frac{0,1 * \lambda_z}{(C_{mLT} - 0,25)} * \frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] \geq$ $\left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} * \frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] \quad (40)$
	$\lambda_z = 0,77$
	$N_{Ed} = 34,61 \text{ kN}$
	$\chi_z = 0,67$
	$N_{Rk} = 303,45 \text{ kN}$
	$\gamma_{M1} = 1,1$
Pomoćne formule:	$C_{mLT} = 0,1 * (1 - \psi) - 0,8\alpha_s \quad (41)$
	$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{-0,63}{1,23} = -0,51 \quad (39)$
	$\psi = \frac{-1,20}{2,65} = -0,45$
	Uvršteno i rezultat: $C_{my} = 0,1 * (1 + 0,45) + 0,8 * 0,51 = 0,55 > 0,4$
Uvršteno i rezultat ():	$\left[1 - \frac{0,1 * 0,77}{(0,55 - 0,25)} * \frac{34,41}{0,67 * 303,45 / 1,1} \right] \geq$ $\left[1 - \frac{0,1}{(0,55 - 0,25)} * \frac{34,41}{0,67 * 303,45 / 1,1} \right]$ $0,95 > 0,93 \rightarrow k_{yz} = 0,95$

Tablica 59: Interakcijske formule za stupove

INTERAKCIJSKE FORMULE	
1. Interakcijska formula():	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} * \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (42)$
Uvršteno:	$\frac{34,41}{0,48 * 403,09 / 1,1} + 0,57 * \frac{2,65}{0,93 * 16,49 / 1,1} \leq 1$ <p style="text-align: center;">$0,30 < 1 \rightarrow$ uvjet zadovoljen</p>
2. Interakcijska formula ():	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} * \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (43)$
Uvršteno:	$\frac{34,41}{0,67 * 303,45 / 1,1} + 0,95 * \frac{2,65}{0,93 * 16,49 / 1,1} \leq 1$ <p style="text-align: center;">$0,37 < 1 \rightarrow$ uvjet zadovoljen</p>

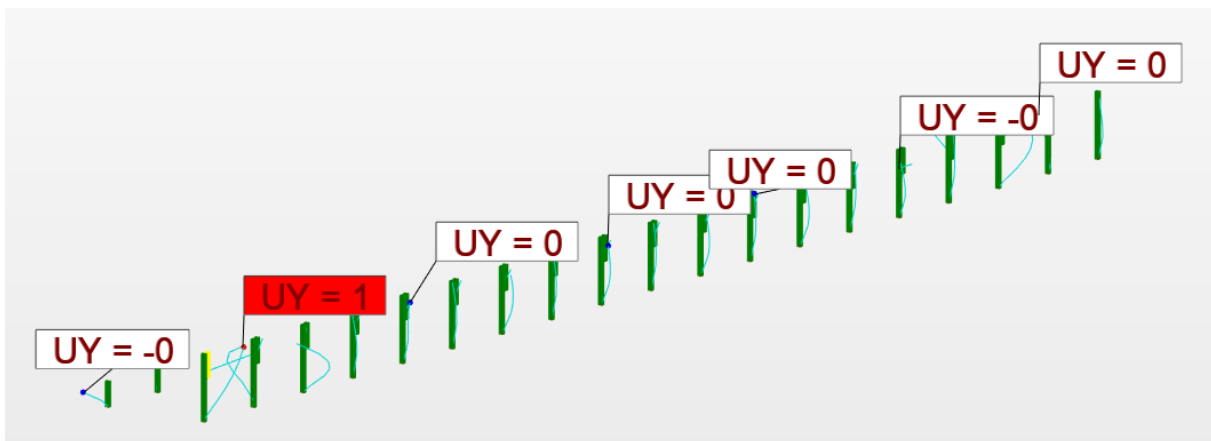
6. DIMENZIONIRANJE ELEMENATA KONSTRUKCIJE NA GRANIČNO STANJE UPORABLJIVOSTI

Granično stanje uporabljivosti računa se prema normi EN 1993-1-1:2005, a progibi i pomaci konstrukcije dobiveni su u programu „Robot Structural Analysis“ (Slika 51, 52, 53 i 54). Provodi se za sve elemente: stupove (Tablica 60), podrožnice (Tablica 61), kosnike (Tablica 62) i primarne grede (Tablica 63).

6.1. Stup

Tablica 60: Uvjet graničnog stanja uporabljivosti za stup

DOPUŠTENI POMAK STUPA	
Izraz:	$p_1 = \frac{L}{150} \quad (46)$
Vrijednost parametra:	$L = 181 \text{ cm}$
Uvršten izraz:	$p_1 = \frac{181}{150}$
Dopušten pomak:	$p_1 = 1,21 \text{ cm}$
Ostvaren pomak:	0,1 cm
0,1 < 1,21, uvjet je zadovoljen.	

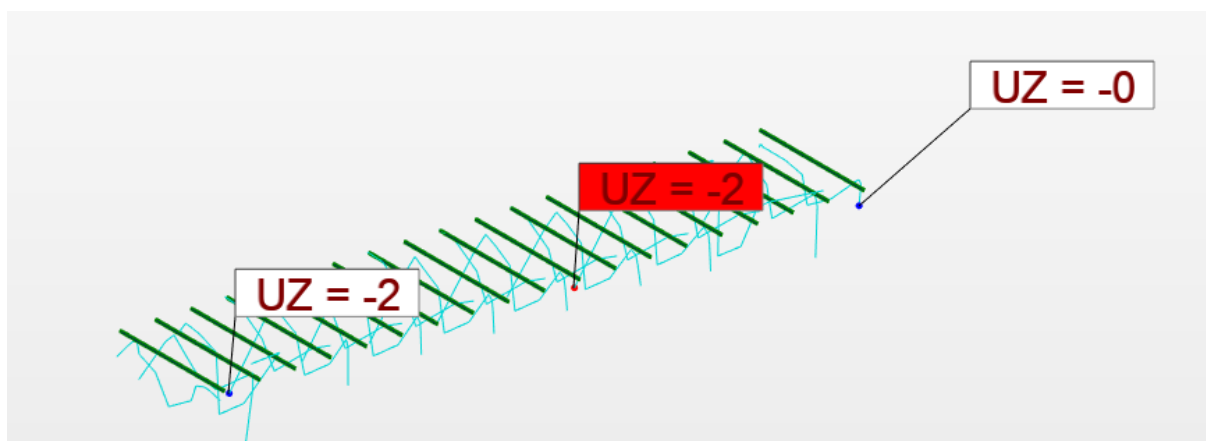


Slika 51: Deformacije stupa u programu "Robot Structural Analysis"

6.2. Glavni nosač

Tablica 61: Uvjet graničnog stanja uporabljivosti za glavni nosač

DOPUŠTENI POMAK GLAVNOG NOSAČA	
Izraz:	$p_2 = \frac{L}{200}$ (47)
Vrijednost parametra:	$L = 470 \text{ cm}$
Uvršten izraz:	$p_2 = \frac{470}{150}$
Dopušten pomak:	$p_2 = 2,35 \text{ cm}$
Ostvaren pomak:	0,2 cm
0,2 < 2,35, uvjet je zadovoljen.	

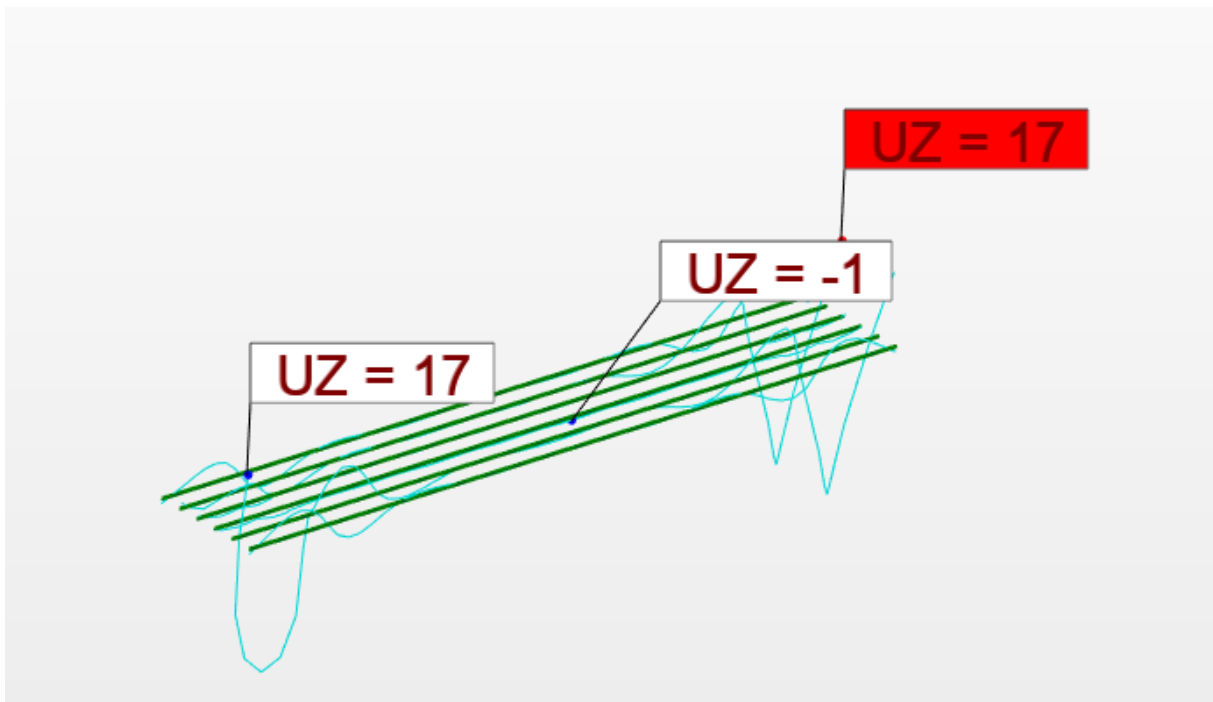


Slika 52: Deformacije primarnih greda u programu "Robot Structural Analysis"

6.3. Podrožnice

Tablica 62: Uvjet graničnog stanja uporabljivosti za podrožnicu

DOPUŠTENI POMAK PODROŽNICA	
Izraz:	$p_3 = \frac{L}{200}$ (48)
Vrijednost parametra:	$L = 440 \text{ cm}$
Uvršten izraz:	$p_3 = \frac{440}{150}$
Dopušten pomak:	$p_3 = 2,2 \text{ cm}$
Ostvaren pomak:	1,7 cm
1,7 < 2,2, uvjet je zadovoljen.	

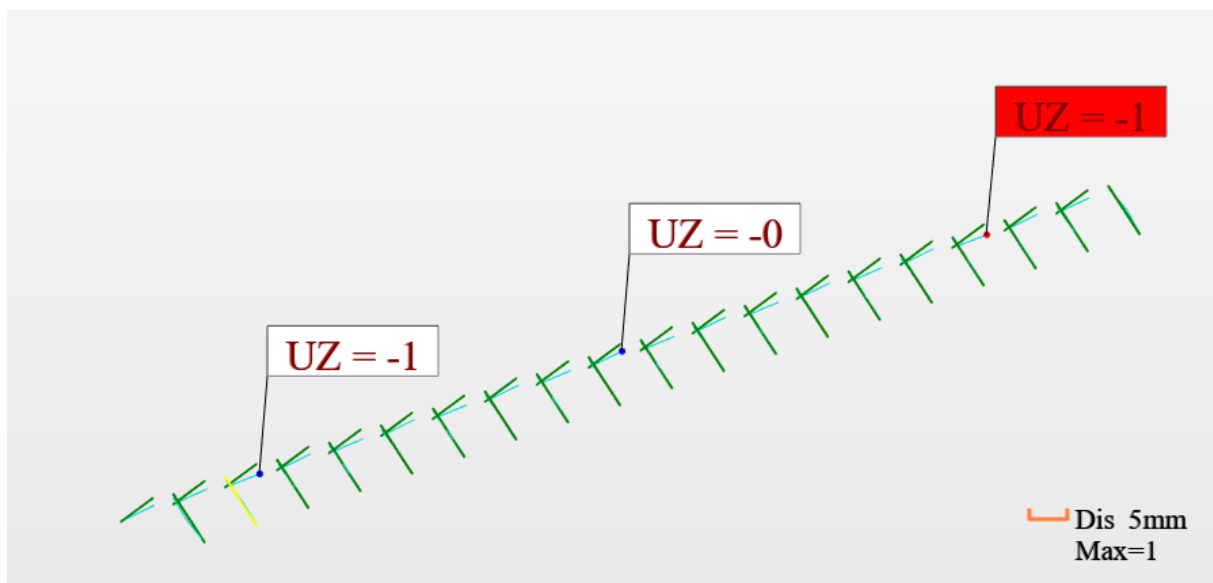


Slika 53: Deformacije podrožnica u programu "Robot Structural Analysis"

6.4. Kosnik

Tablica 63: Uvjet graničnog stanja uporabljivosti za kosnik

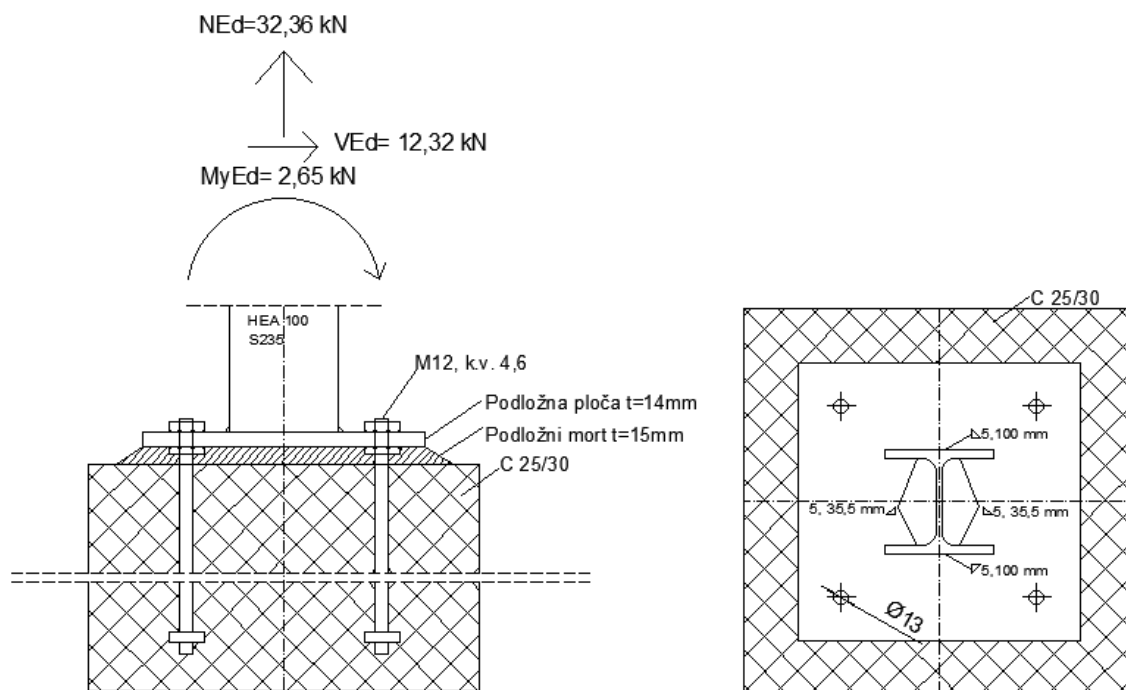
DOPUŠTENI POMAK KOSNIKA	
Izraz:	$p_4 = \frac{L}{150}$ (49)
Vrijednost parametra:	$L = 166 \text{ cm}$
Uvršten izraz:	$p_4 = \frac{166}{150}$
Dopušten pomak:	$p_4 = 1,1 \text{ cm}$
Ostvaren pomak:	0,1 cm
0,1 < 1,1, uvjet je zadovoljen.	



Slika 54: Deformacije kosnika u programu "Robot Structural Analysis"

7. PRIKLJUČAK STUPA NA ARMIRANO BETONSKI TEMELJ

Provodi se provjera zavara i vijaka u priključku stupa na armirano betonski temelj (Slika 55).

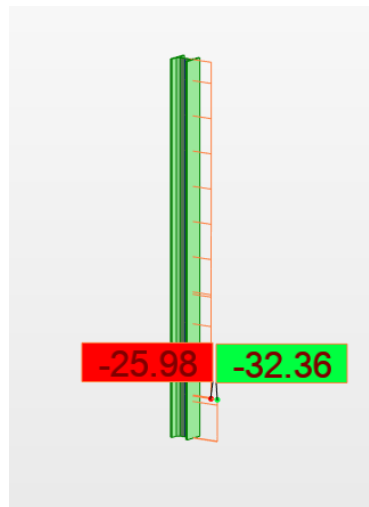


Slika 55: Spoj stupa na temelj

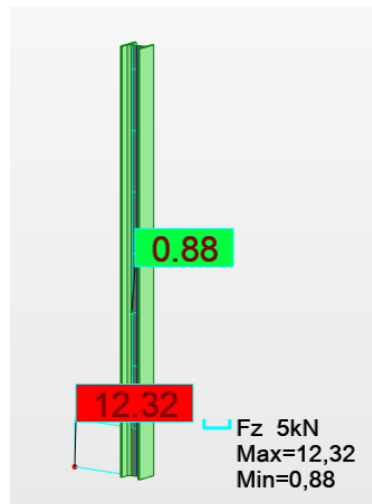
Tablica 64: Opterećenja na spoju stupa i temelja

SILE KOJE DJELUJU U NAJOPTEREĆENIJEM PRIKLJUČKU STUPA I TEMELJA	
UZDUŽNA SILA (VLAK)	$N_{Ed} = 32,36 \text{ kN}$
POPREČNA SILA	$V_{Ed} = 12,32 \text{ kN}$
MOMENT	$M_{Ed} = 2,65 \text{ kNm}$

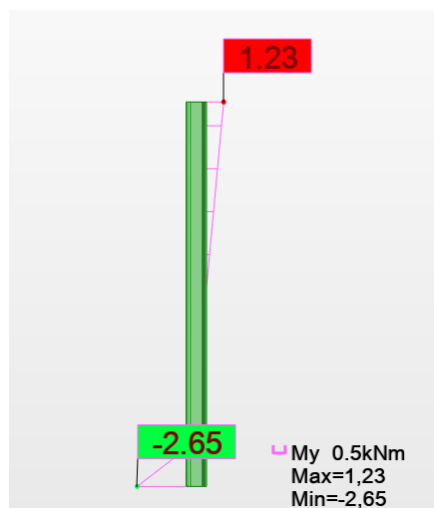
Dijagrami opterećenja na spoju (Slika 56, 57 i 58):



Slika 56: Uzdužna sila na spoju stupa i temelja



Slika 57: Poprečna sila na spoju stupa i temelja



Slika 58: Moment savijanja na spoju stupa i temelja

Provode se provjere za vijke i zavar. Vijci se provjeravaju na posmik (Tablica 67), pritisak po omotaču rupe (Tablica 68), vlak (Tablica 69) i interakciju posmika i vlaka (Tablica 70). Otpornost zavora proračunata je u Tablici 71.

7.1. Otpornost vijaka

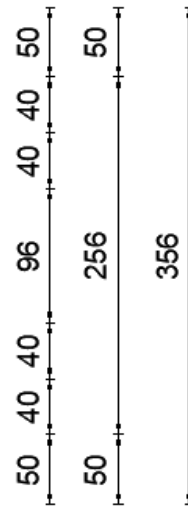
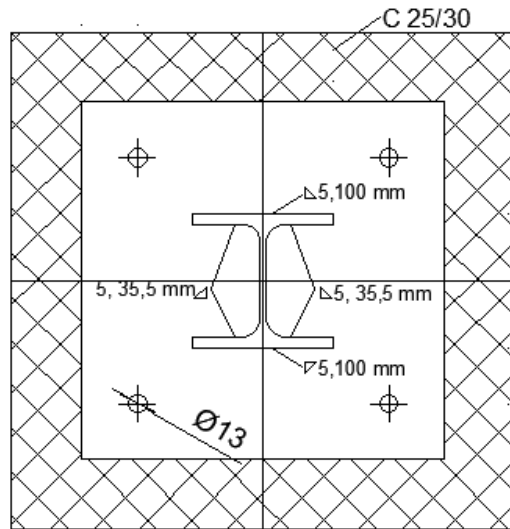
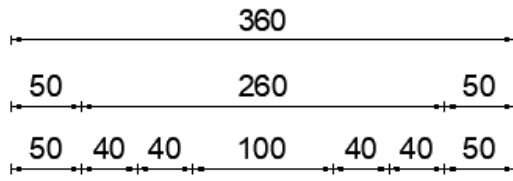
Spoj je sastavljen od 4 vijka M12, kvalitete 4,6 i jedne rezne površine (Slika 59 i 60).

Tablica 65: Granica popuštanja i vlačna čvrstoća za različite kvalitete vijaka [16]

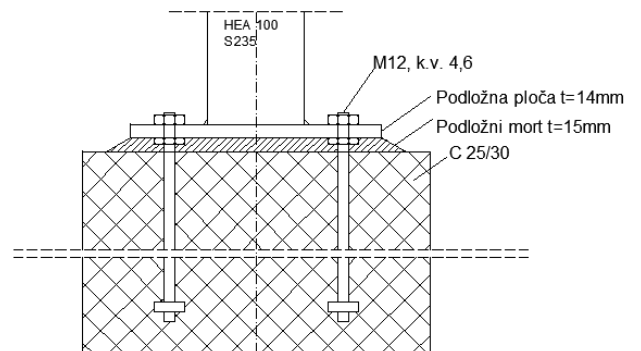
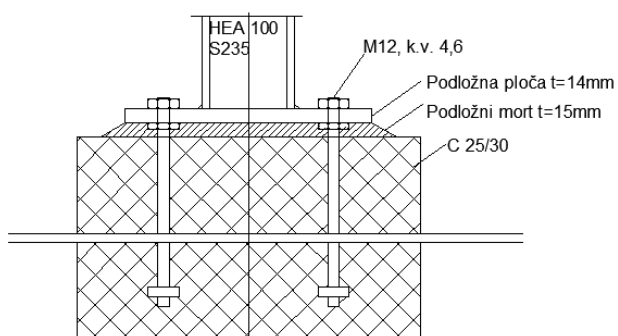
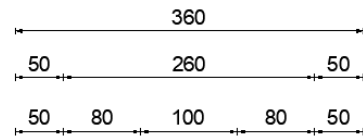
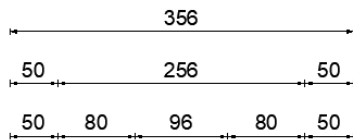
Kvaliteta vijaka	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
Granica popuštanja f_{yb} [N/mm^2]	240	320	300	400	480	640	900
Vlačna čvrstoća f_{ub} [N/mm^2]	400	400	500	500	600	800	1000

Tablica 66: Promjer rupe i površina jezgre vijaka za vijke M12- M36 [16]

VIJCI M12 - M36									
PROMJER VIJKA	d [mm]	12	16	20	22	24	27	30	36
PROMJER RUPE	d_o [mm]	13	18	22	24	26	30	33	39
POVRŠINA JEZGRE VIJKA	As [mm ²]	84,3	157	245	303	353	459	561	817



Slika 59: Tlocrt spoja



Slika 60: Nacrt i bokocrt spoja

Tablica 67: Otpornost vijaka na posmik

OTPORNOST VIJAKA NA POSMIK		
FORMULA	ULAZNI PARAMETRI	UVRŠTEN IZRAZ I REZULTAT
<p>Otpornost jednog vijka:</p> $F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} \quad (50)$	<p>Koeficijent za posmičnu čvrstoću vijka kada posmična površina prolazi kroz dio vijka s navojem i k.v. 4,6, $\alpha_v = 0,6$</p>	<p>(50)</p> $F_{v,Rd} = \frac{0,6 * 400 * 84,3}{1,25} = 16,19 \text{ kN}$
	<p>Čvrstoća vijka, $f_{ub} = 400 \text{ N/mm}^2$</p>	
	<p>Parcijalni koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M2} = 1,25$</p>	
	<p>Površina jezgre vijka, $A_s = 84,3 \text{ mm}^2$</p>	
<p>Otpornost vijaka u spoju, $\overline{F}_{v,Rd} = n * m * F_{v,Rd} \quad (51)$</p>	<p>Broj vijaka, $n = 4$</p>	<p>(51)</p> $\overline{F}_{v,Rd} = 4 * 1 * 16,19 = 64,76 \text{ kN}$
	<p>Broj reznih površina, $m = 1$</p>	
<p>Ostvareno opterećenje $V_{z,Ed}$ iznosi 12,32 kN, pa vrijedi uvjet nosivosti $V_{z,Ed} \leq \overline{F}_{v,Rd}$, koji nakon uvrštavanja glasi $12,32 < 64,76$ i iskorištenost iznosi 19%.</p>		

Tablica 68: Otpornost na pritisak po omotaču rupe osnovnog materijala

OTPORNOST NA PRITISAK PO OMOTAČU RUPE OSNOVNOG MATERIJALA		
IZRAZ:	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (52)$	
Značenje oznaka:	Koeficijenti: k_1 i α_b	
	Čvrstoća osnovnog materijala: $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$	
	Promjer vijka, $d = 12 \text{ mm}$	
	Najtanji lim u spoju, $t = 14 \text{ mm}$	
	Parcijalni koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M2} = 1,25$	
Koeficijent α_d (u smjeru naprezanja)		
IZRAZ ZA KRAJNJE VIJKE:	Ulazni parametri:	Uvršteni izraz i rezultat:
$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} \quad (53)$	Razmak vijaka od ruba paralelno s djelovanjem sile, $e_1 = 45 \text{ mm}$	$\alpha_d = \frac{45}{3 \cdot 12} = 1,25$
	Promjer rupe za vijak, $d_0 = 13 \text{ mm}$	
$\alpha_b = \min\left(\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1\right) \quad (54)$	$\alpha_b = \min\left(1,25; \frac{400}{360} = 1,11; 1\right) = 1$	
Koeficijent k_1 (okomito na smjer naprezanja)		
IZRAZ ZA KRAJNJE VIJKE:	Ulazni parametri:	Uvršteni izraz i rezultat:
$k_1 = \min\left(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right) \quad (55)$	Promjer rupe za vijak, $d_0 = 13 \text{ mm}$	$k_1 = \min\left(2,8 \frac{45}{13} - 1,7 = 7,99; 2,5\right) = 2,5$
	Razmak između vijaka i ruba u smjeru okomito na djelovanje sile, $e_2 = 45 \text{ mm}$	
Uvršteni izraz za otpornost po omotaču rupe osnovnog materijala:		Rezultat:
$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot 1 \cdot 360 \cdot 12 \cdot 14}{1,25}$		$F_{b,Rd} = 120,96 \text{ kN}$
Izraz za ukupnu otpornost:		Rezultat:
$\overline{F}_{b,Rd} = n \cdot F_{b,Rd} \quad (56)$		$\overline{F}_{b,Rd} = 4 \cdot 120,96 = 483,84 \text{ kN}$
Uvjet nosivosti:		Uvršteno i iskorištenost:
$V_{z,Ed} \leq \overline{F}_{b,Rd}$		$12,32 < 483,84, 2,5\%$

Otpornost vijaka na vlak:

Proračun sile N_1 na način da se moment razdvaja na komponente sile N koje djeluju na kraku x (Slika 61), odnosno izrazom (57):

$$M_y = 2,65 \text{ kNm}$$

$$M_y = N_1 * x_1 + N_2 * x_2 \quad (57)$$

N_1 i N_2 – komponente momenta savijanja M_y

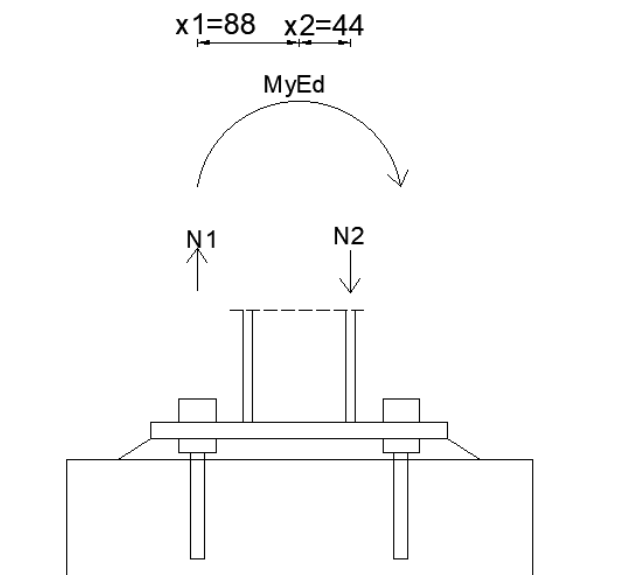
$$\frac{N_1}{x_1} = \frac{N_2}{x_2}; N_2 = \frac{N_1 * x_2}{x_1}$$

$x_1 = 88 \text{ mm}$, krak sile N_1

$x_2 = 44 \text{ mm}$, krak sile N_2

$$M_y = N_1 * x_1 + \frac{N_1 * x_2}{x_1} * x_2$$

$$N_1 = 18,62 \text{ kN}$$



Slika 61: Komponente momenta savijanja na vijčanom spoju

Tablica 69: Otpornost vijaka na vlak

OTPORNOST VIJAKA NA VLAK	
Izraz za otpornost jednog vijka na vlak:	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 * A_s * f_{ub}}{\gamma_{M2}}$ (58)
Značenje oznaka:	Koeficijent $k_2 = 0,9$ za vijke koji nemaju upuštenu glavu
	Površina jezgre vijka, $A_s = 84,3 \text{ mm}^2$
	Čvrstoća vijka, $f_{ub} = 400 \text{ N/mm}^2$
	Parcijalni koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M2} = 1,25$
Uvršteno i rezultat:	(58) $F_{t,Rd} = \frac{0,9 * 84,3 * 400}{1,25} = 24,278 \text{ kN}$
Otpornost za 2 vijka u spoju opterećena na vlak:	$\overline{F}_{t,Rd} = 2 * F_{t,Rd}$ $\overline{F}_{t,Rd} = 48,55 \text{ kN}$ (59)
Uvjet nosivosti:	$N_1 + \frac{F_{x,Ed}}{2} \leq \overline{F}_{b,Rd}$
Računsko opterećenje:	$N_1 + F_{x,Ed}/2 = 18,62 + 16,18 = 34,8 \text{ kN}$
Uvršten uvjet nosivosti:	$34,8 < 48,55$
Uvjet je ispunjen.	

Tablica 70: Interakcija vlaka i posmika

INTERAKCIJA VLAKA I POSMIKA	
Izraz:	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 * F_{t,Rd}} \leq 1$ (60)
Vrijednosti:	$F_{v,Ed} = \frac{12,32}{4} = 3,08 \text{ kN}$
	$F_{v,Rd} = 16,19 \text{ kN}$
	$F_{t,Ed} = \frac{34,8}{2} = 17,4 \text{ kN}$
	$F_{t,Rd} = 24,28 \text{ kN}$
Uvršteno:	(60) $\frac{3,08}{16,19} + \frac{17,4}{1,4 * 24,28} \leq 1$
Rezultat:	$0,702 < 1$
Uvjet je zadovoljen.	

7.2. Otpornost zavora

Proračun sile N_2 na način da se moment razdvaja na komponente sile N koje djeluju na kraku x , odnosno prema izrazu (61):

$$M_y = 2,65 \text{ kNm}$$

$$M_y = N_1 * x_1 + N_2 * x_2 \quad (61)$$

N_1 i N_2 – komponente momenta savijanja M_y

$$N_1 = N_2$$

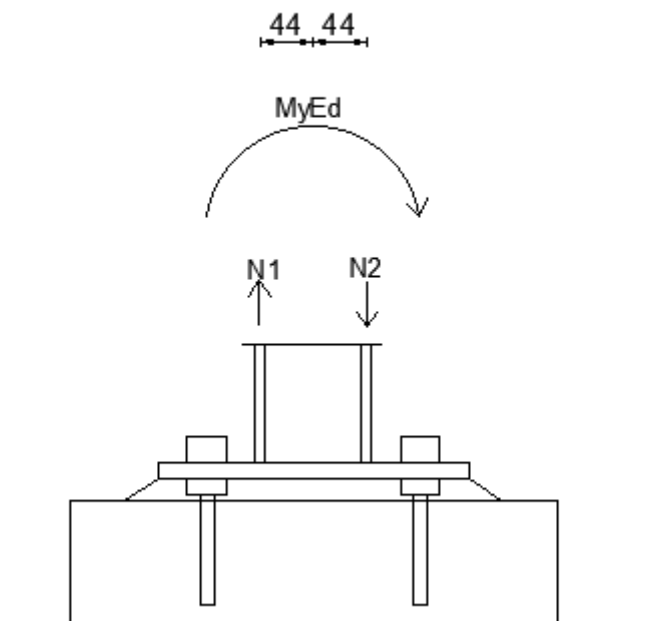
$x_1 = 44 \text{ mm}$, krak sile N_1

$$x_1 = x_2$$

$x_2 = 44 \text{ mm}$, krak sile N_2

$$M_y = 2 * N_2 * x$$

$$N_2 = 30,12 \text{ kN}$$



Slika 62: Komponente momenta savijanja za zavar

Tablica 71: Otpornost zavarenog spoja

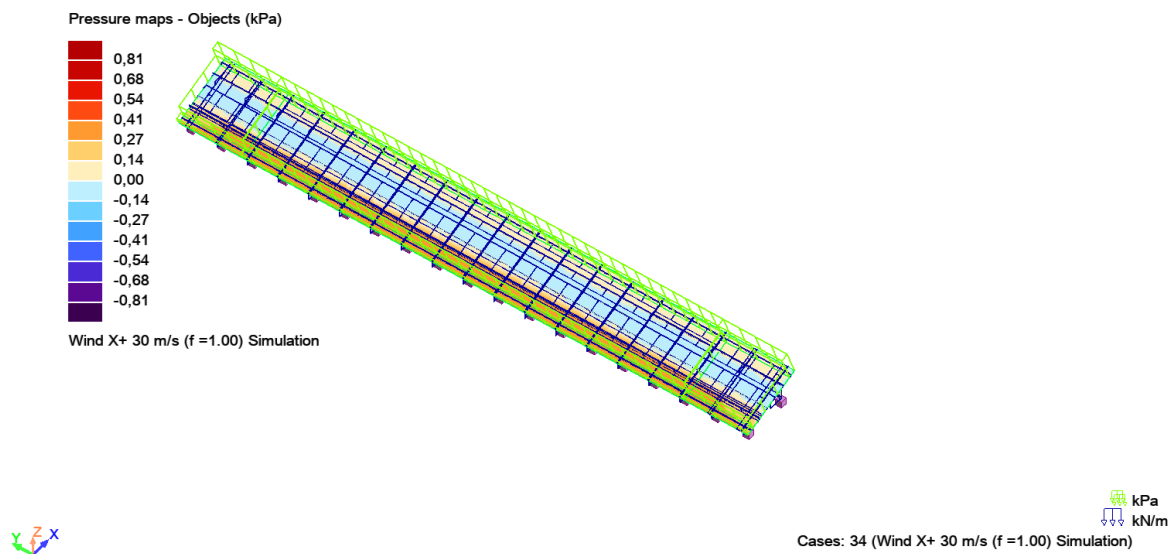
OTPORNOST ZAVARENOG SPOJA	
Izraz za otpornost zavora na jednom cm'	$F_{w,Rd} = \frac{f_u a}{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{M2}} \quad (62)$
Značenje oznaka:	<p>Čvrstoća osnovnog materijala: $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$</p> <p>Korelacijski koeficijent za S235, $\beta_w = 0,80$</p> <p>Parcijalni koeficijent sigurnosti, $\gamma_{M2} = 1,25$</p> <p>Debljina zavora, $a = 5 \text{ mm}$</p>
Uvršten izraz:	(56) $F_{w,Rd} = \frac{360}{\sqrt{3} \cdot 0,80} \cdot 5$
Rezultat:	(56) $F_{w,Rd} = 1,039 \text{ kN}$
Ukupna otpornost kutnog zavora:	$\overline{F_{w,Rd}} = F_{w,Rd} * \sum L \quad (63)$
Ukupna duljina zavora:	$\sum L = b + b - (t_w - 2r) \quad (64)$ $\sum L = 17,1 \text{ cm}$
Rezultat:	$\overline{F_{w,Rd}} = 169,36 \text{ kN} \quad (65)$
Izraz za proračun djelovanja na zavar:	$F_{w,Ed} = \sqrt{(N_2 + F_{x,Ed}/2)^2 + (V_{z,Ed}/2)^2} \quad (59)$
Vrijednosti sila:	<p>Uzdužna vlačna sila, $\frac{F_{x,Ed}}{2} = 16,18 \text{ kN}$</p> <p>Poprečna u smjeru osi $V_z = 12,32 \text{ kN}$</p> <p>Vlačna komponenta momenta savijanja, $N_2 = 30,12 \text{ kN}$</p>
Uvršten izraz i rezultat:	$F_{w,Ed} = \sqrt{(16,18 + 30,12)^2 + 12,32^2} = 47,91 \text{ kN} \quad (66)$
Uvjet nosivosti:	$F_{w,Ed} \leq \overline{F_{w,Rd}}$
Uvršteno:	$47,91 < 169,36$
Iskorištenost:	28%
Uvjet je zadovoljen.	

8. USPOREDBA DJELOVANJE VJETRA NA SAMOSTALNU KONSTRUKCIJU I KADA ONE ČINE POLJE SOLARNIH PANELA

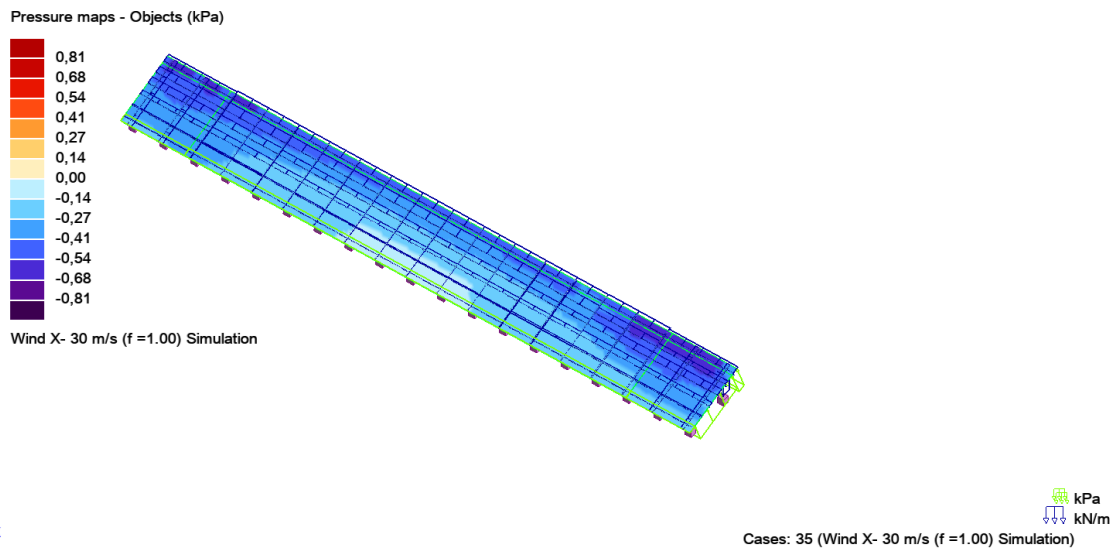
Nakon provedenog projektiranja čelične konstrukcije za podupiranje solarnih panela na tlu, u kojem su se analize opterećenja određivale preko normi, bez korištenja softwera, provodi se i analiza djelovanja vjetra u programu Robot Structural Analysis. Cilj analize je utvrditi postoji li razlika u opterećenju vjetra kada konstrukcija stoji sama i kada je više konstrukcija nanizano budući da se često događaju havarije kojima nije poznat točan uzrok. Postoji mogućnost da je razlog tome što je djelovanje vjetra veće u slučaju više nanizanih konstrukcija jer one mijenjaju način strujanja vjetra, pa je onda točnost proračuna jedne samostalne konstrukcije upitan.

8.1. Simulacija vjetra na samostalnu konstrukciju

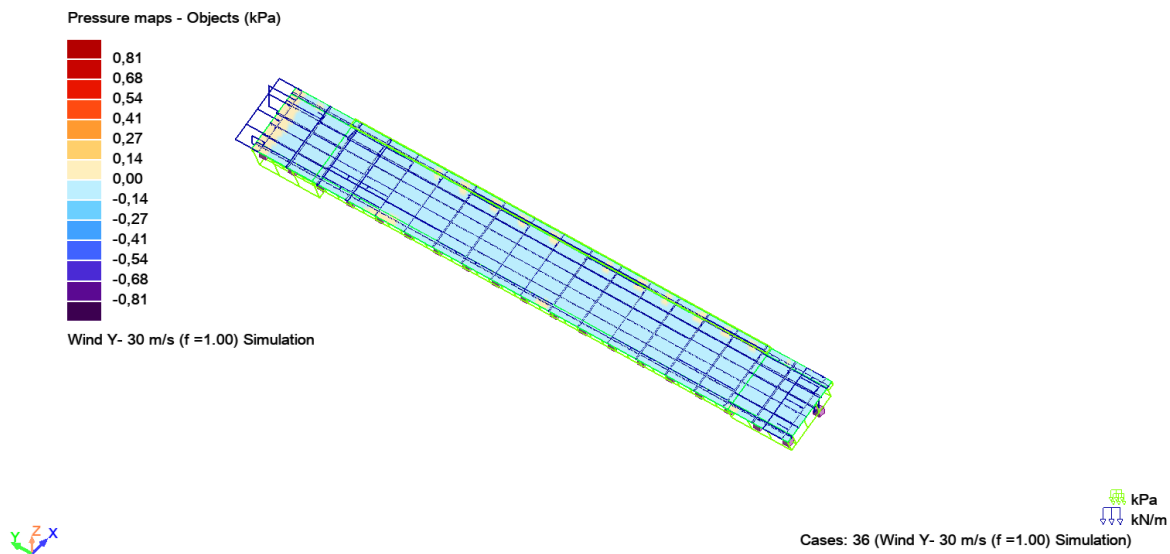
Prvo je napravljena simulacija prethodno određenog vjetra na jednu konstrukciju u svim smjerovima odnosno u smjeru +X (Slika 63), -X (Slika 64) i Y (Slika 65).



Slika 63: Djelovanje vjetra na pojedinačnu konstrukciju u smjeru +X

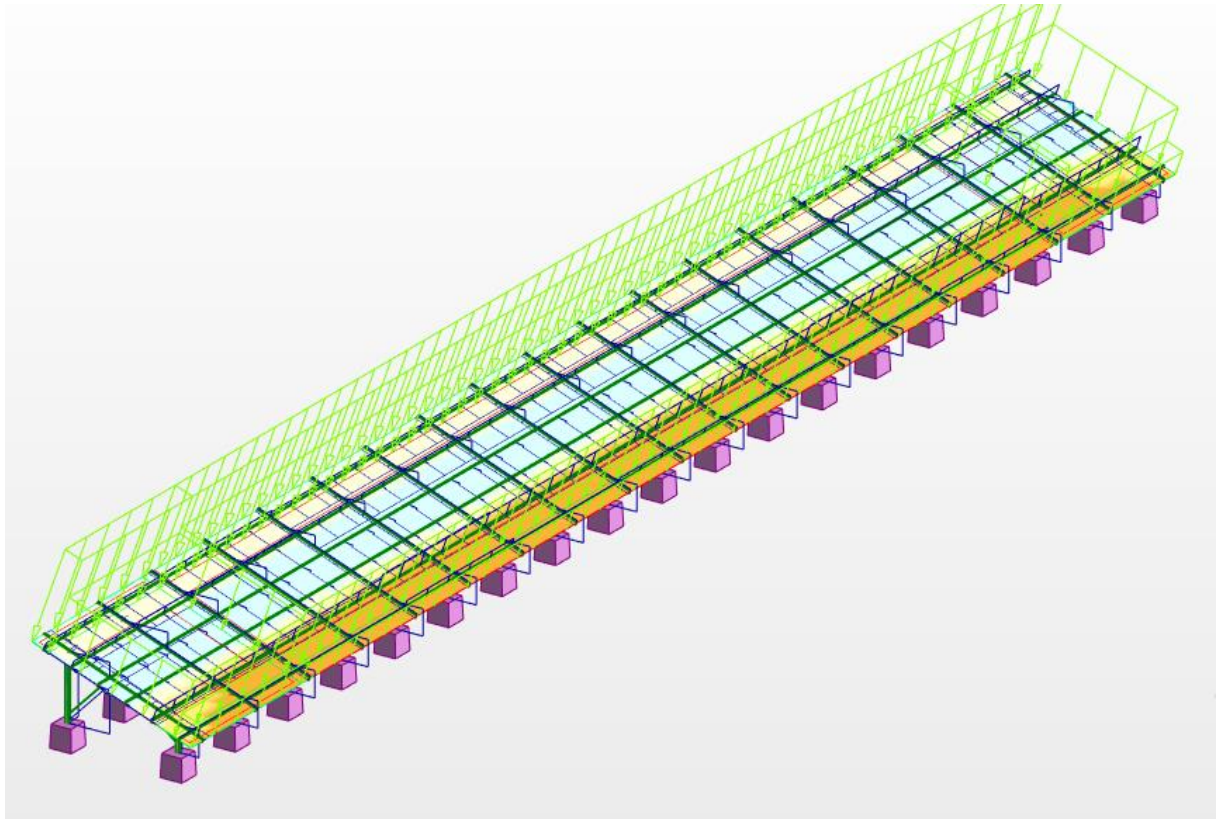


Slika 64: Djelovanje vjetra na pojedinačnu konstrukciju u smjeru -X

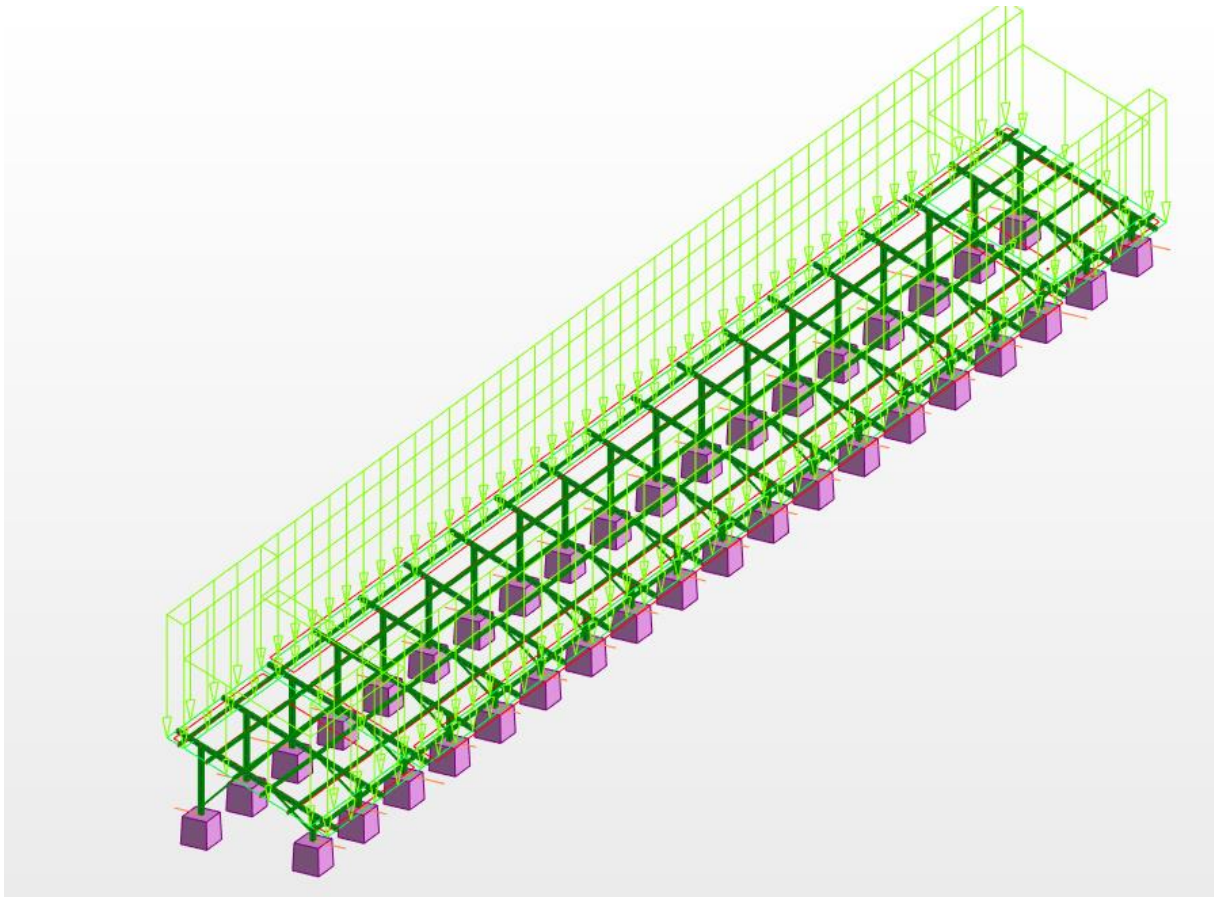


Slika 65: Djelovanje vjetra na pojedinačnu konstrukciju u smjeru +/-Y

Kao rezultat dobiveni su dijagrami pritiska na kojem se vide zone puhanja koje se podudaraju sa onima određenim normom (Slika 66 i 67) i vrijednostima sličnim oni proračunatim bez korištenja softwera.



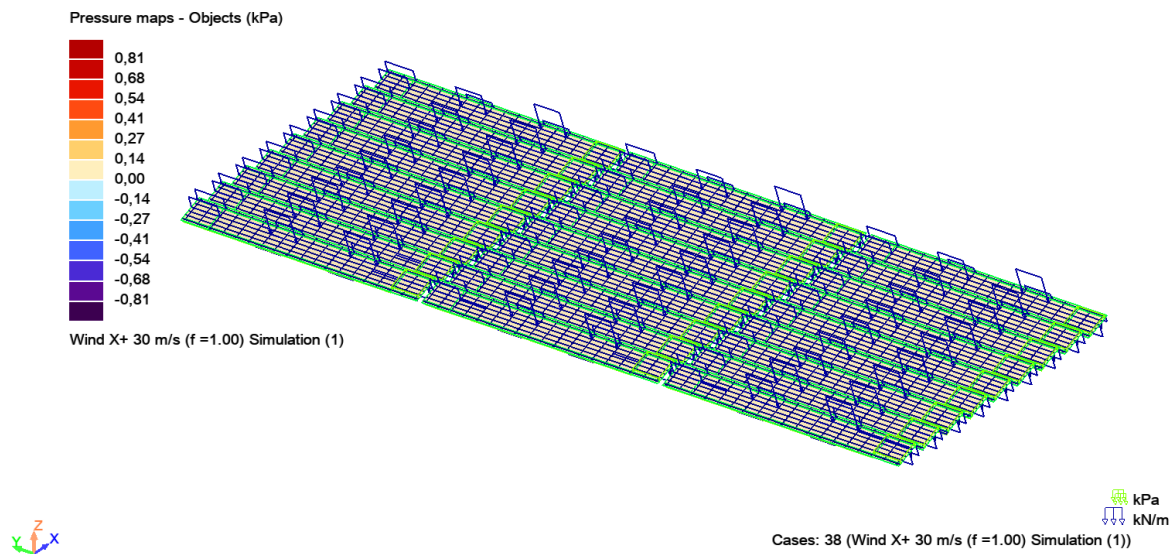
Slika 66: Zone vjetra kod simulacije vjetra u programu „Robot Structural Analysis“



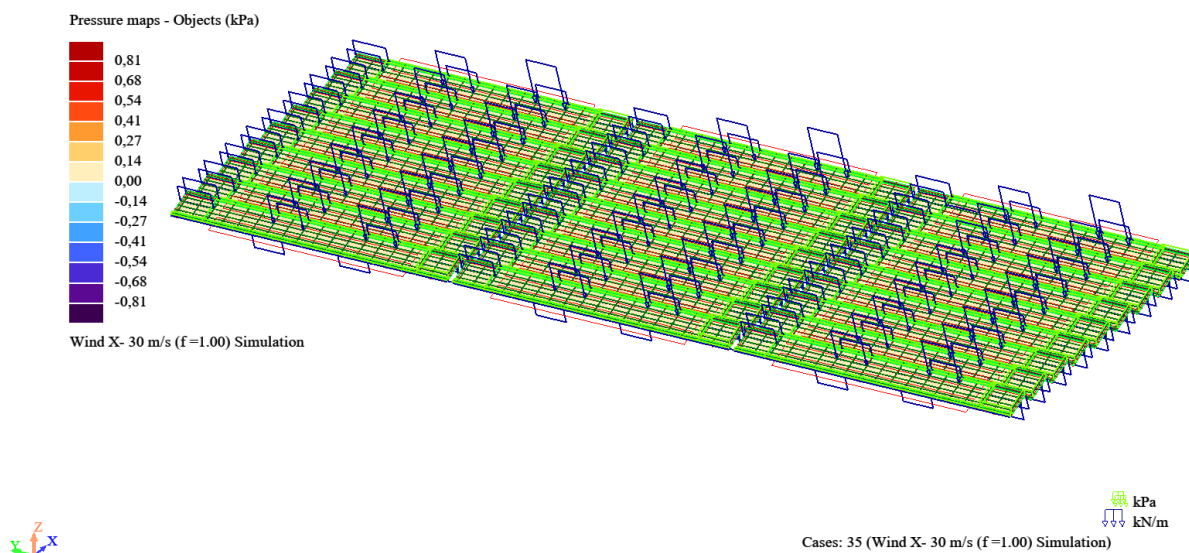
Slika 67: Zone vjetra kod proračuna prema normi

8.2. Simulacija vjetra na polje konstrukcija

U programu se kopirala konstrukcija na način da čini polje solarnih panela (10x3) te se ponovno napravila simulacija vjetra u smjerovima +X (Slika 68), -X (Slika 69) i Y (Slika 70) nakon čega su se usporedili rezultati.

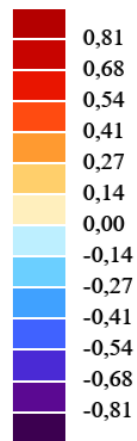


Slika 68: Djelovanje vjetra na polje solarnih panela u smjeru +X

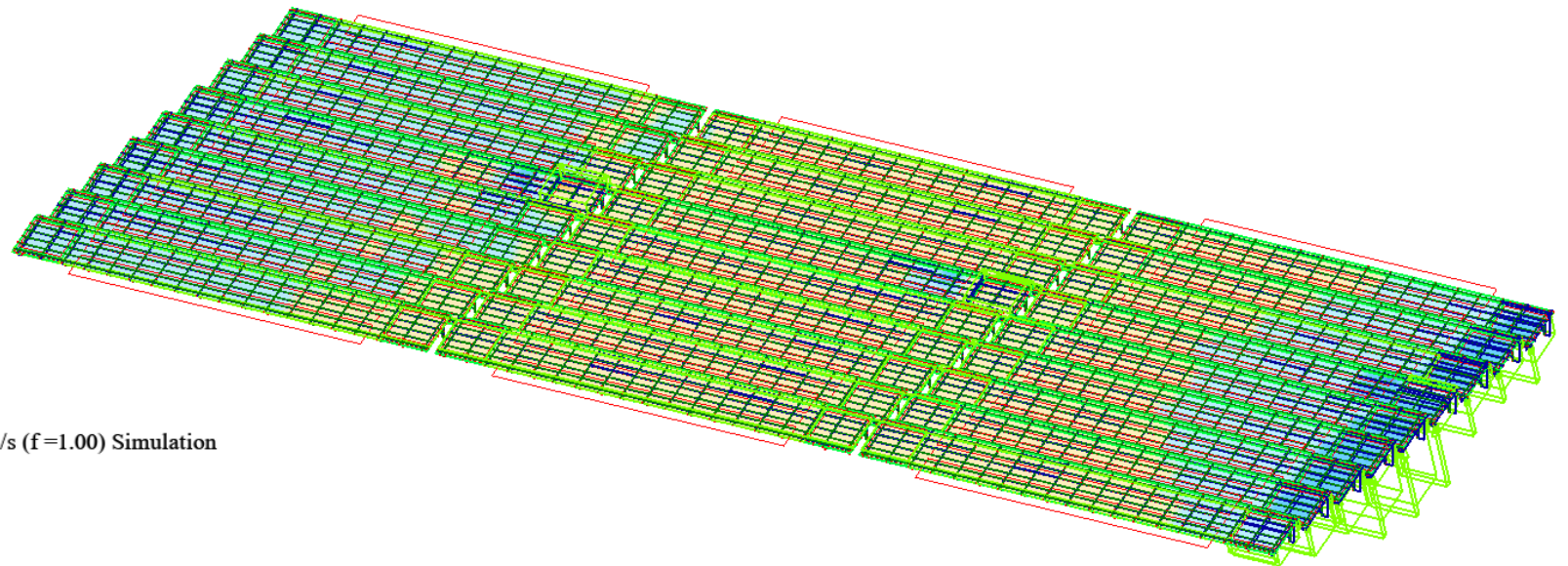


Slika 69: Djelovanje vjetra na polje solarnih panela u smjeru -X

Pressure maps - Objects (kPa)



Wind Y+ 30 m/s (f=1.00) Simulation



kPa
kN/m

Cases: 36 (Wind Y+ 30 m/s (f=1.00) Simulation)

Slika 70: Djelovanje vjetra na polje solarnih panela u smjeru +/-

9. ZAKLJUČAK

Prema zadatku ovog završnog rada napravljen je projekt čelične konstrukcije koja služi za pridržavanje solarnih panela na tlu na lokaciji Zaton Obrovački, prema primjeru postojeće konstrukcije. Cijela je konstrukcija izgrađena od čelika kvalitete S235.

Provedena je analiza djelovanja, koja se potom obradila u programu „Robot Structural Analysis“ na definiranom modelu konstrukcije, u kojem su dobiveni dijagrami opterećenja za sve elemente. Provedeno je dimenzioniranje elemenata na granično stanje nosivosti, pri čemu je za podrožnice i glavne nosače izabran poprečni presjek UPE 80, za kosnike Hybox SHS 30x30x2,5, i za stupove HEA 100. Budući da je konstrukcija izvedena od vruće valjanih profila, a prema uzoru na postojeće hladno oblikovane koji imaju manju čvrstoću, zaključeno je da bi se mogao napraviti veći razmak između sekundarnih i glavnih elemenata nosive konstrukcije jer su izabrani presjeci maleni, a i dalje predimenzionirani čemu su uzrok mala opterećenja. Svi su elementi zadovoljili provjeru na granično stanje uporabljivosti, za koju su pomaci i progibi također dobiveni u programu „Robot Structural Analysis“. Projektiran je spoj stupa na armirano betonski temelj, za koji je izabran upeti spoj sastavljen od četiri vijka M12 i zavara uz dno stupa presjeka HEA100. Provedene su provjere vijaka na vlak, posmik i interakciju posmika i vlaka te također provjera zavara. Zaključak je da je projektirani priključak zadovoljio sve uvjete.

Sam cilj ovog projekta bila je usporedba djelovanja vjetra na jednu samostalnu konstrukciju (kao što se prema normi projektira) i djelovanja vjetra kada se više takvih pojedinačnih konstrukcija nalaze na maloj udaljenosti pa čine polje. Napravljena je simulacija vjetra u programu „Robot Structural Analysis“ prvo na pojedinačnu konstrukciju, a zatim na konstrukcije koje su postavljene kao polje solarnih panela (10x3). Rezultat je pokazao da konstrukcije međusobno uvelike utječu jedna na drugu i da se počinju ponašati slično kao jedna samostalna konstrukcija. Vanjske zone vjetra, odnosno one najopterećenije se kod polja konstrukcija nalaze po cijelom rubu pa tako obuhvaćaju i po cijele samostalne konstrukcije, ali također nisu potpuno pravilne zone kao što se dobije proračunom prema normi za djelovanje vjetra. Zaključak je da bi se kod sličnih projekata trebao uzeti u obzir utjecaj susjednih konstrukcija, jer one uvelike mijenjaju smjer i intenzitet djelovanja vjetra, što bi mogao biti uzrok mnogih havarija koje se događaju na sličnim konstrukcijama.

10. LITERATURA I IZVORI

10.1. Slike

- [1] Dubravko Grakalić: Solarna energija za svaki krov, <https://www.glasistre.hr/tehnologija/struja-iz-sunca-investicija-je-isplativa-u-roku-od-sest-do-osam-godina-605576> , pristup:25.06.2024.
- [2] Automania: Solarna parkirališta su energetska ideja koja pobjeđuje, <https://automania.hr/solarna-parkiralista-su-energetska-ideja-koja-pobjeđuje-zasto-onda-nisu-norma-video/> , pristup: 20.06.2024
- [3] WANHOS: Stupni sustavi za ugradnju aluminjskih solarnih panela <https://hr.pv-mounting.com/roof-mounting-system/pole-mounting-systems-aluminum-solar-panels.html> , pristup: 20.06.2024.
- [4] Sandro Vrbanus: U Obrovcu otvorena najveća solarna elektrana u Hrvatskoj, <https://www.bug.hr/energetika/u-obrovcu-otvorena-najveca-solarna-elektrana-u-hrvatskoj-33397> , pristup: 21.06.2024.
- [5] DS New Energy: Pet osnovnih konstrukcija za solarno montiranje, <https://ba.dnsolar.com/info/five-basic-solar-mounting-structures-54470208.html> , pristup: 21.04.2024.
- [6] YBYSolar: Nadstrešnica za kućne solarne ploče, <https://ba.ybysolar.com/solar-carport/home-solar-panel-carport.html> , pristup: 21.06.2024.
- [7] Solar Projekt, Betonske konstrukcije za fotonaponske sustave na ravnim krovovima, https://solarprojekt.hr/nosive-konstrukcije/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw-O6zBhASEiwAOHeGxZkDbDvUJVHEZHRs_i7E8eTeiklW0AmxYITLEAn-3Fq9OkWXMW3WexoCowIQAvD_BwE , pristup 21.06.2024.
- [8] ENF: Solar Panel Directory, <https://www.ensolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/55660> , pristup: 22.06.2024.
- [9] Marina Rajaković: O kartama uz Eurokodove, <https://hrcak.srce.hr/file/144303> , pristup: 23.06.2024.
- [10] Alica Bajić: Karta osnovne brzine vjetrova, https://www.kartografija.hr/tl_files/Hkd/dogadjaji/Svjetski%20dan%20GISa/prezentacije/04Bajic-2012-11-14-GIS-dan-karta%20vjetra.pdf , pristup: 23.06.2024.

[11] Dlubal, Cross sections, <https://www.dlubal.com/en/cross-section-properties/upe-80-en-10365-2017-arcelormittal-2018> , pristup: 23.06.2024.

[12] Mavro Markulin Grgić¹, Branimir Markulin Grgić¹, Vladimir Markulin Grgić², Hrvoje Rakić: Dimenzioniranje i analiza štapova s obzirom na izvijanje, <https://hrcak.srce.hr/file/398799> , pristup: 20.06.2024.

[13] Dlubal, Cross sections ,<https://www.dlubal.com/en/cross-section-properties/hybox-355-shs-30x30x2-5-en-10219-2-2006-04-tata-steel> , pristup: 25.06.2024.

[14] Dlubal, Cross sections , <https://www.dlubal.com/en/cross-section-properties/hea-100-euronorm-53-62-din-1025-3-szs> , pristup: 27.06.2024.

10.2. Literatura

[15] B. Androić, D. Dujmović i I. Džeba , Čelične konstrukcije 1: , Sajema, Zagreb, 2007.

[16] Krolo P., Materijali s predavanja i vježbi, Osnove čeličnih konstrukcija, Građevinski fakultet, sveučilište u Rijeci, 2023.

10.3. Norme

[17] 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

[18] 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

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

[20] HRN EN 1991-1-4:2012/NA:2012 Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-4: Opća djelovanja -- Djelovanja vjetra -- Nacionalni dodatak, Zagreb: HZN/TO 548, Konstrukcijski eurokodovi, 2012

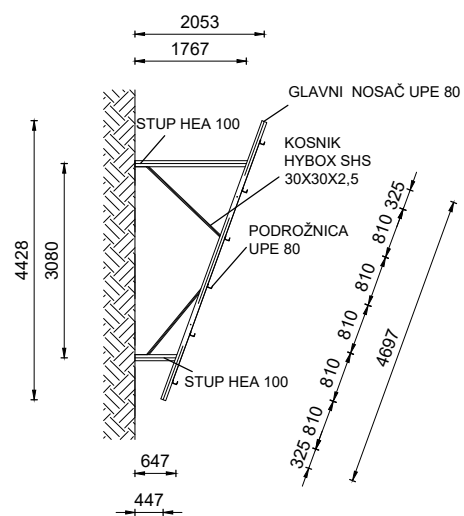
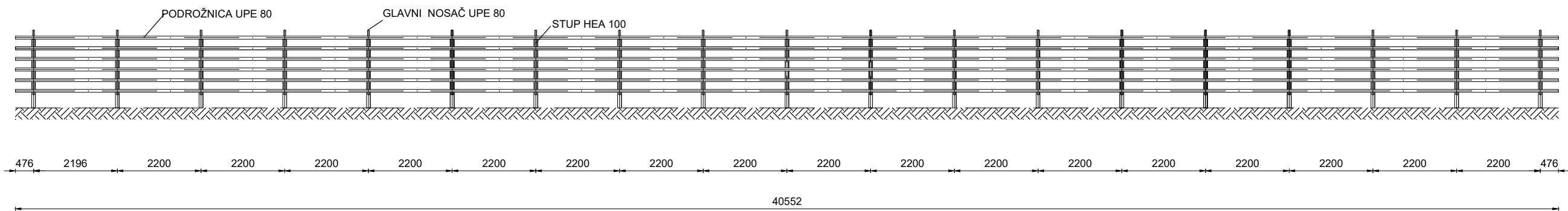
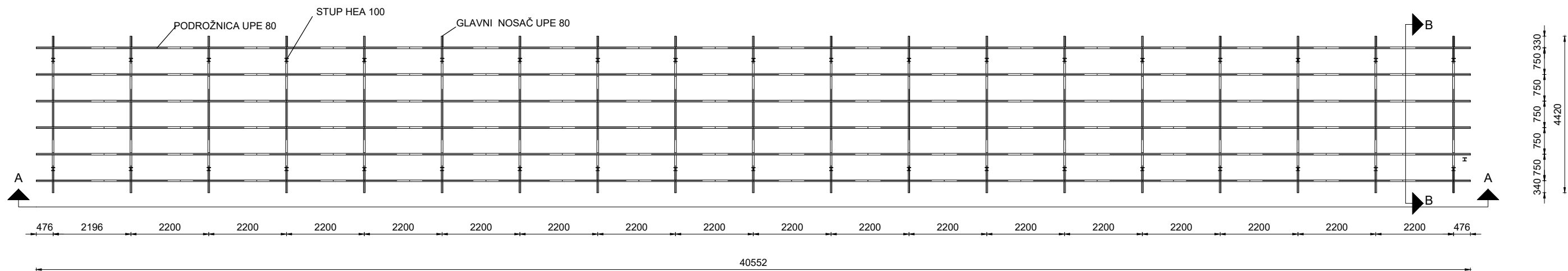
10.4. Solarni paneli

[21] ENF: Solar Panel Directory, <https://www.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/55660> , pristup: 18.4.2024.

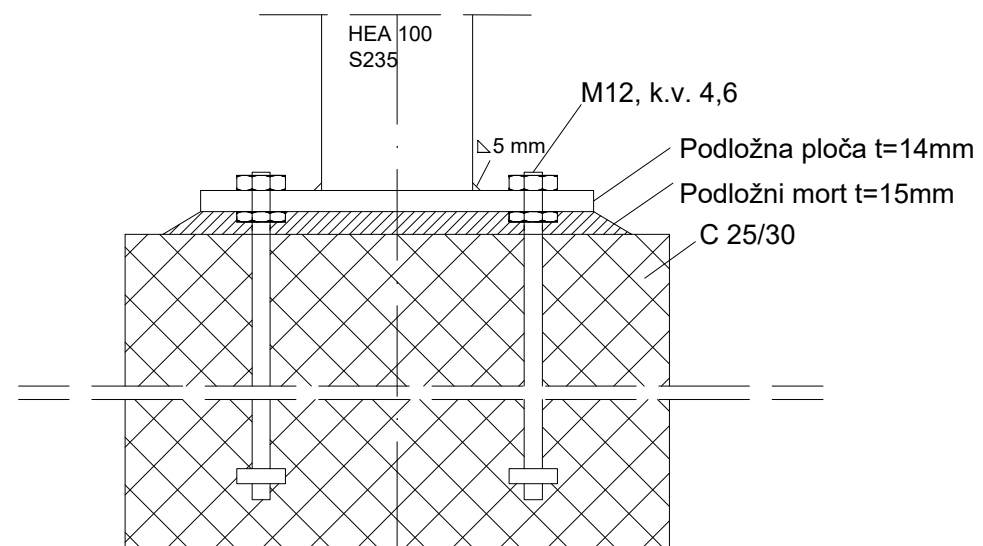
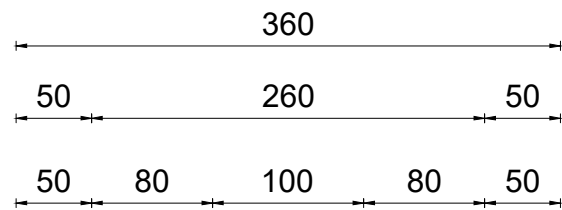
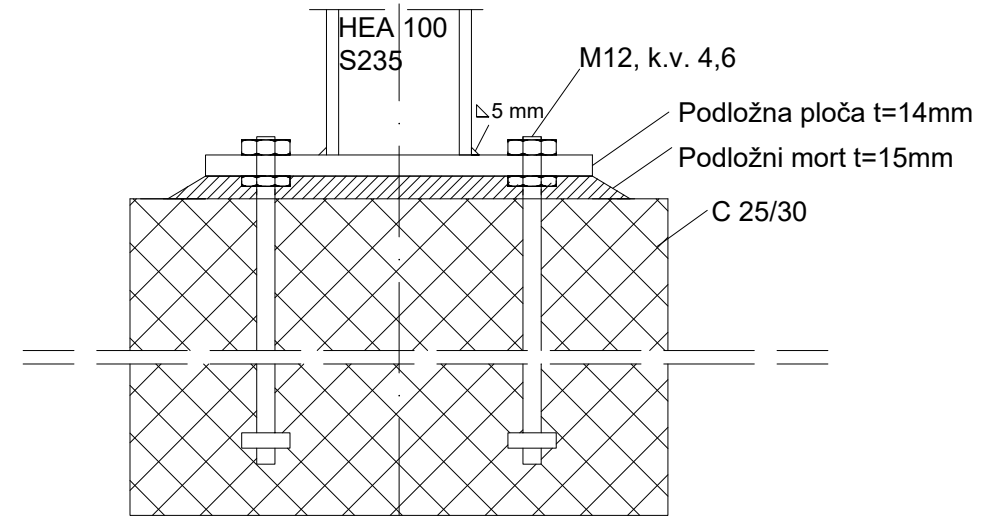
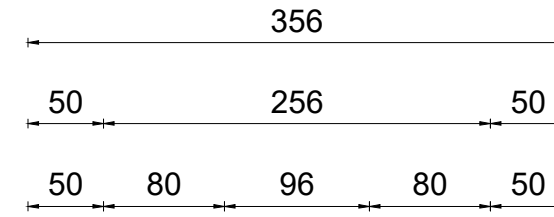
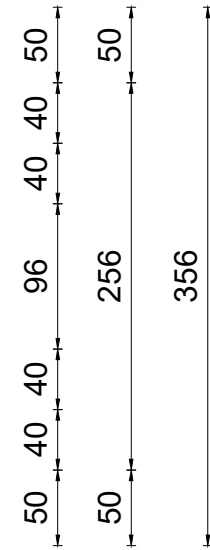
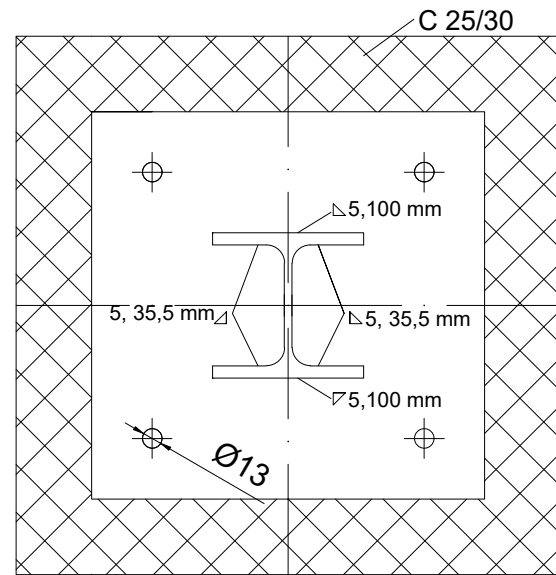
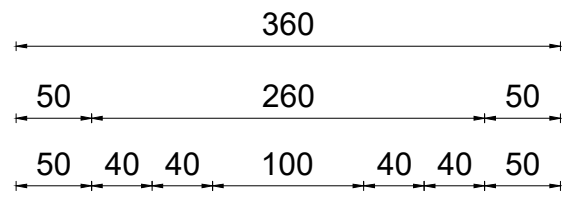
[22] EKO-SUSTAV; Fotonaponski moduli, <https://eko-sustav.hr/strucni-clanci/fotonaponski-sustavi/> , pristup: 05.06.2024.

[23] HERMI: Konstrukcijski sistemi, <https://hermi.hr/konstrukcijski-sistemi-za-solarne-panele> , pristup: 2.7.2024.

11. NACRTI



G F Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci			
ZAVRŠNI RAD:		SADRŽAJ:	
Proračun čelične konstrukcije za kodupiranje solarnih panela na tu		Dispozicija	
STUDENTICA: Lea Radoslović		KOLEGIJ: Osnove čeličnih konstrukcija	
MENTORICA: Izv.prof. Paulina Krolo	DATUM: 24.6.2024.	MJERILO: 1:120	LIST: 110.



G F			
Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci			
ZAVRŠNI RAD:		SADRŽAJ:	
Proračun čelične konstrukcije za kodupiranje solarnih panela na tu		Spoj stupa na armirano betonski temelj	
STUDENTICA: Lea Radoslović		KOLEGIJ: Osnove čeličnih konstrukcija	
MENTORICA: Izv.prof. Paulina Krolo		DATUM: 24.6.2024.	MJERILO: 1:5
		LIST: 111.	