

Čelična konstrukcija za podupiranje solarnih panela na zemlji

Đurić, Ivona

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:148851>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-28**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI

Ivona Đurić

Čelična konstrukcija za podupiranje solarnih panela na zemlji

Završni rad

Rijeka, 2023.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI

Prijediplomski sveučilišni studij
Osnove čeličnih konstrukcija

Ivona Đurić
JMBAG: 0114035220

Čelična konstrukcija za podupiranje solarnih panela na zemlji

Završni rad

Rijeka, rujan 2023.

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.

Ivona Đurić

U Rijeci, 15. rujna 2023.

ZAHVALA

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Paulini Krolo na mentorstvu i pomoći pri izradi završnog rada.

Također bih se zahvalila svojoj obitelji bez koje sve ovo ne bi bilo moguće. Naravno, hvala svim prijateljima i kolegama čija potpora mi je puno značila tijekom studiranja.

Sažetak:

Tema završnog rada je proračun čelične konstrukcije koja pridržava solarne panele na tlu. Konstrukcija je izložena djelovanju vjetra i snijega. Statički proračun čelične konstrukcije proveden je u programu Robot Structural Analysis Professional. Pomoću njega dobivene su unutarnje sile koje djeluju na stup, nosač i podrožnicu. Zatim je provedeno dimenzioniranje elemenata za granično stanje nosivosti i granično stanje uporabljivosti. Također su proračunati vijci i zavari na detaljima priključka stupa na armiranobetonski temelj i priključka nosača na stup.

Ključne riječi:

Čelična konstrukcija, solarni paneli, dimenzioniranje, statički proračun, granično stanje nosivosti, granično stanje uporabljivosti, spojevi

Abstract:

The topic of the final work is the design of the steel structure that supports the solar panels. The structure is exposed to the effects of wind and snow. The static calculation of the steel structure was carried out in the software Robot Structural Analysis Professional. It is used to obtain the internal forces acting on the column, support and beam. Then, the dimensioning of the elements for the ultimate limit state and the serviceability limit state was carried out. Bolts and welds on the column base connection and beam to column connection were also calculated. The column base connection does not meet the load-bearing requirements of the screws because their load-bearing capacity has been exceeded.

Keywords:

Steel structure, solar panels, dimensioning, static calculation, ultimate limit state, serviceability limit state, connections

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Solarni paneli.....	2
3. Konstrukcije za podupiranje solarnih panela	6
4. Proračun čelične konstrukcije	10
4.1. Tehnički opis.....	10
4.2. Analiza djelovanja prema važećim propisima	11
4.2.1. Stalno djelovanje	11
4.2.2. Analiza djelovanja snijega.....	11
4.2.3. Analiza djelovanja vjetra.....	14
4.2.4. Kombinacije djelovanja.....	24
4.3. Statički proračun unutarnjih sila.....	26
4.4. Dimenzioniranje glavnih elemenata konstrukcije nadstrešnice	26
4.4.1. Granično stanje nosivosti	26
4.4.2. Granično stanje uporabljivosti.....	68
4.5. Proračun spojeva čelične konstrukcije	71
4.5.1. Priključak stupa na AB temelj	71
4.5.2. Detalj spoja stupa i nosača	80
5. Zaključak.....	84
6. Literatura	85
7. Nacrti.....	86

Popis slika

Slika 1: Polikristalni moduli (preuzeto sa web stranice [1]).....	3
Slika 2: Monokristalni moduli (preuzeto sa web stranice [1]).....	4
Slika 3: Crna verzija modula (preuzeto sa web stranice [1])	4
Slika 4: Montaža solarnih panela na kosom krovu [2]	6
Slika 5: Montaža solarnih panela na ravnom krovu (preuzeto sa web stranice [2])	7
Slika 6: Montaža solarnih panela na nadstrešnici (preuzeto sa web stranice [2])	7
Slika 7: Montaža solarnih panela na tlu (preuzeto sa web stranice [2]).....	8
Slika 8: Montaža solarnih panela na fasadi (preuzeto sa web stranice [2]).....	8
Slika 9: 3D prikaz čelične konstrukcije iz Robota (Fotografija: I. Đurić 22.7.2023.)	10
Slika 10: Odabrani solarni panel iz kataloga proizvođača JA SOLAR (preuzeto sa web stranice [8])	11
Slika 11: Karta sniježnih područja u mjerilu 1:1 000 000 (preuzeto iz norme [5]).....	12
Slika 12: Karta vjetrovnih zona Republike Hrvatske (preuzeto iz norme [6]).....	15
Slika 13: Tlocrt solarnih panela sa određenim zonama djelovanja vjetra (Fotografija: I.Đurić 26.7.2023.)	18
Slika 14: Tlocrt solarnih panela sa određenim zonama djelovanja vjetra (Fotografija: I.Đurić 26.7.2023.)	22
Slika 15: Kombinacije djelovanja definirane u programu Robot Structural Analysis Professional (Fotografija: I.Đurić 30.7.2023.).....	24
Slika 16: Momentno opterećenje na stupu (Fotografija: I.Đurić 30.7.2023.).....	27
Slika 17: Opterećenje uzdužnom silom na stupu (Fotografija: I.Đurić 30.7.2023.)	27
Slika 18: Izvijanje stupa oko osi y i osi z (Fotografija: I.Đurić 16.8.2023.).....	35
Slika 19: Kritična duljina izvijanja L_{cr} (preuzeto iz norme[9])	35
Slika 20: Najopterećeniji nosač za 13. kombinaciju djelovanja graničnog stanja nosivosti(Fotografija: I.Đurić 18.8.2023.).....	44
Slika 21: Opterećenje uzdužnom silom na nosaču (Fotografija: I.Đurić 19.8.2023.)	44
Slika 22: Momentno opterećenje na nosaču (Fotografija: I.Đurić 19.8.2023.).....	45
Slika 23: Kritična duljina izvijanja L_{cr} (preuzeto iz norme [9])	50
Slika 24: Najopterećenija podrožnica za 9. kombinaciju djelovanja GSN (Fotografija: I.Đurić 24.8.2023.)	58
Slika 25: Momentno opterećenje na podrožnicu (Fotografija: I.Đurić 24.8.2023.)	59
Slika 26: Opterećenje uzdužnom silom na podrožnicu (Fotografija: I.Đurić 24.8.2023.).....	59
Slika 27: Pomak stupa (13. kombinacijq djelovanja GSU) (Fotografija: I.Đurić 26.8.2023.).....	69
Slika 28: Progib nosača (13. kombinacija djelovanja GSU) (Fotografija: I.Đurić 26.8.2023.)	70
Slika 29: Progib podrožnice (8. kombinacija djelovanj GSU) (Fotografija: I.Đurić 26.8.2023.)	71
Slika 30: Uzdužna sila u spoju stupa i temelja (11. kombinacija GSN) (Fotografija: I.Đurić 29.8.2023.)	71
Slika 31: Poprečna sila u spoju stupa i temelja (11. kombinacija GSN) (Fotografija: I.Đurić 29.8.2023.)	72
Slika 32: Moment savijanja u spoju stupa i temelja (11. kombinacija GSN) (Fotografija: I.Đurić 29.8.2023.)	72
Slika 33: Djelovanje sila na detalj spoja stup-temelj(Fotografija: I.Đurić 6.9.2023.)	73
Slika 34: Promatrani spoj na konstrukciji(Fotografija: I.Đurić 6.9.2023.)	80

Slika 35: Moment savijanja u spoju nosača i stupa za 11. kombinaciju GSN(Fotografija: I.Đurić 9.9.2023.)	80
Slika 36: Uzdužna sila u spoju nosača i stupa za 11. kombinaciju GSN (Fotografija: I.Đurić 9.9.2023.) ..	81
Slika 37: Poprečna sila u spoju nosača i stupa za 11. kombinaciju GSN (Fotografija: I.Đurić 9.9.2023.) ..	81
Slika 38: Opterećenja na spoju stup-nosač(Fotografija: I.Đurić 9.9.2023.)	82

Popis tablica

Tablica 1: Preporučene vrijednosti ψ_0 , ψ_1 i ψ_2 koeficijenata za različite lokacije konstrukcija (preuzeto iz norme [5])	12
Tablica 2: preporučene vrijednosti koeficijenta μ_i za jednostrešne krovove (preuzeto iz norme [4]).....	13
Tablica 3: Preporučene vrijednosti koeficijenta C_e (preuzeto iz norme [5]).....	13
Tablica 4: Kategorije i parametri terena (preuzeto iz norme [6])	16
Tablica 5: Vrijednost koeficijenata $c_{p,net}$ i C_f za jednostrešne nadstrešnice (preuzeto iz norme [7]).....	19
Tablica 6: Klasifikacija unutrašnjih tlačnih elemenata (preuzeto iz norme [9])	29
Tablica 7: Klasifikacija vanjskih tlačnih elemenata (preuzeto iz norme [9])	31
Tablica 8: Odabir krivulje izvijanja (preuzeto iz norme [9])	36
Tablica 9: Faktor imperfekcije α_{LT} zavisno od krivulje izvijanja (preuzeto iz norme [9])	40
Tablica 10: Odabir krivulje izvijanja (preuzeto iz norme [9])	51
Tablica 11: Faktor imperfekcije α_{LT} zavisno od krivulje izvijanja (preuzeto iz norme [9])	55
Tablica 12: Odabir krivulje izvijanja (preuzeto iz norme [9])	65
Tablica 13: Određivanje računске otpornosti za vijak (preuzeto iz norme [10])	74

1. UVOD

U završnom radu proračunata je čelična konstrukcija čija namjena je pridržavanje solarnih panela namijenjenih napajanju solarnom energijom. Konstrukcija je predviđena na parkiralištu sveučilišnog Kampusu u Rijeci.

U posljednjem desetljeću značajno je poraslo korištenje solarnih izvora energije, što u komercijalnom, tako i u kućnom sektoru. Može se reći da je solarna energija danas moderan izvor napajanja, a oni koji si mogu priuštiti početna veća ulaganja vrlo često se odlučuju upravo na solarnu energiju.

Ovom konstrukcijom planirano je na neiskorištenom prostoru livade, pored parkirališta (Kampus na Trsatu) omogućiti skupljanje solarne energije i njenu pretvorbu u druge oblike energije. Tom energijom napajale bi se građevine u potrebi za dodatnom energijom čija namjena je u službi sveučilišta. Završni rad podijeljen je na teorijski i numerički dio. U teorijskom dijelu predstavljeni su solarni paneli i sve najbitnije o njihovom funkcioniranju. Zatim su opisane konstrukcije za pridržavanje solarnih panela, razne mogućnosti i materijali od kojih su napravljene. U numeričkom dijelu proveden je proračun čelične konstrukcije za pridržavanje solarnih panela koja je izložena djelovanjima snijega i vjetra. Provedeni su svi potrebni proračuni za granično stanje nosivosti i granično stanje uporabivosti. Također su proračunata dva spoja na konstrukciji, a to su spoj stupa i temelja te spoj stupa i nosača. Na kraju rada priloženi su nacrti spojeva stup-temelj i stup-nosač, kao i dispozicija čelične konstrukcije.

Kampus na Trsatu idealno je mjesto za postavljanje solarnih panela iz razloga što je u Rijeci omogućen optimalan broj sunčanih dana i na mjestu parkirališta nema visokih zgrada i drveća pa solarni paneli ne bi bili u sjeni. Dimenzije čelične konstrukcije nisu velike (13,52x6x5,67 metara) pa bi se konstrukcija (ili njeni dijelovi) mogla napraviti u radioni, dovesti šleperom i postaviti na predviđeno mjesto.

Cilj ovog završnog rada bio je proračunati čeličnu konstrukciju koja nosi solarne panele i provjeriti njeno granično stanje nosivosti i uporabivosti.

2. SOLARNI PANELI

Solarni paneli se sastoje od fotonaponskih ćelija čiji broj ovisi o veličini panela. Solarni paneli su zapravo slojevi silicija zajedno sa slojevima fosfora i bora. Navedeni kemijski elementi omogućuju fotonaponskim ćelijama da oslobađaju elektrone i tako stvaraju dodatnu energiju. Dvije stvari su ključne da bi dobili električnu energiju, a to su sunčeva svjetlost koja potiče navedene kemijske elemente da otpuštaju elektrone i mehanizam koji novonastalu energiju može transformirati u električnu energiju za korištenje. Transformator, ili pretvarač, ključan je da bi se stvorena neprestana energija pretvorila u izmjeničnu.

Solarni paneli su samo dio solarnog sustava. Svi oni koji budu pretraživali opcije kupnje solarnih panela, vidjet će da se solarni sustavi često nazivaju i solarnim elektranama. Iako različiti termini, oba označavaju iste stvari. Solarni sustavi se sastoje od solarnih panela, transformatora i priključka na kućnu električnu mrežu. Ukoliko je objekt spojen na javnu električnu infrastrukturu, višak neiskorištene energije se šalje u sustav ili se pak može akumulirati u baterijama za kućnu potrošnju. Ovisno o tom izboru, solarni sustavi sadržavaju i baterije za akumulaciju električne energije ili pak priključak na javnu mrežu. Većina kućanstava koja koriste solarne panele spojena su i na javnu opskrbu električnom energijom. Ono ujedno omogućuje i da višak neiskorištene energije koju su solarni paneli proizveli, kućanstvo šalje u mrežu opskrbe električnom energijom koja dalje cirkulira prema drugim korisnicima.

Za skladištenje električne energije koju proizvode solarni paneli koriste se baterije. Ta se energija može naknadno koristiti po potrebi, čak i onda kada solarni paneli ne proizvode energiju. Najjeftinija solucija takvih baterija su takozvani „akumulatori“. Zbog slabog kapaciteta to dugoročno nije najisplativija solucija. Za razliku od njih litij-ionske baterije su duljeg vijeka i popularniji su te isplativiji izbor.

Cijene kupnje i instalacije solarnih panela visoke su i ovise o nekoliko čimbenika. To su primjerice: potrebe kućanstva za električnom energijom, geografska lokacija, proizvođač kod kojeg se kupuje i slično. Osim toga treba imati na umu i troškove održavanja, zamjene pojedinih elemenata ili eventualnih kvarova na sustavu. Ulaganja u solarne panele na

početku su velika, ali isplativost nije zanemariva. Tako se isplativost počinje osjećati nakon otprilike 5 do 10 godina. Ovi podaci preuzeti su sa web stranice [1].

Najveći hrvatski proizvođač solarnih panela je tvrtka Solvis. Na svjetskom tržištu prisutni su od 2009. godine, usmjereni su na proizvodnju ekološki prihvatljivog i svima dostupnog izvora energije. Neki od njihovih proizvoda su polikristalni moduli, monokristalni moduli, staklo-staklo moduli, crna verzija modula i moduli po mjeri. Informacije o tvrtki Solvis preuzete su sa web stranice [2].



Slika 1: Polikristalni moduli [2]



Slika 2: Monokristalni moduli [2]



Slika 3: Crna verzija modula [2]

Jedan od značajnijih razloga za porast korištenja solarne energije posljednjih godina jest pad cijena solarnih panela u svijetu. Napredak u proizvodnji i sve veće konkurencije na tržištu doveli su do smanjenja troškova kod proizvodnje i samim time solarni paneli postali su pristupačniji široj populaciji. Također, napredak u tehnikama proizvodnje doveo je do veće isplativosti i boljeg izvođenja solarnih sistema. Nadalje, živimo u vremenu kada je svijest o klimatskim promjenama i održivom načinu života jedan od ključnih faktora u svim granama industrije u svijetu. Samim time, za razliku od fosilnih goriva, solarna energija je čišća i doprinosi očuvanju okoliša.

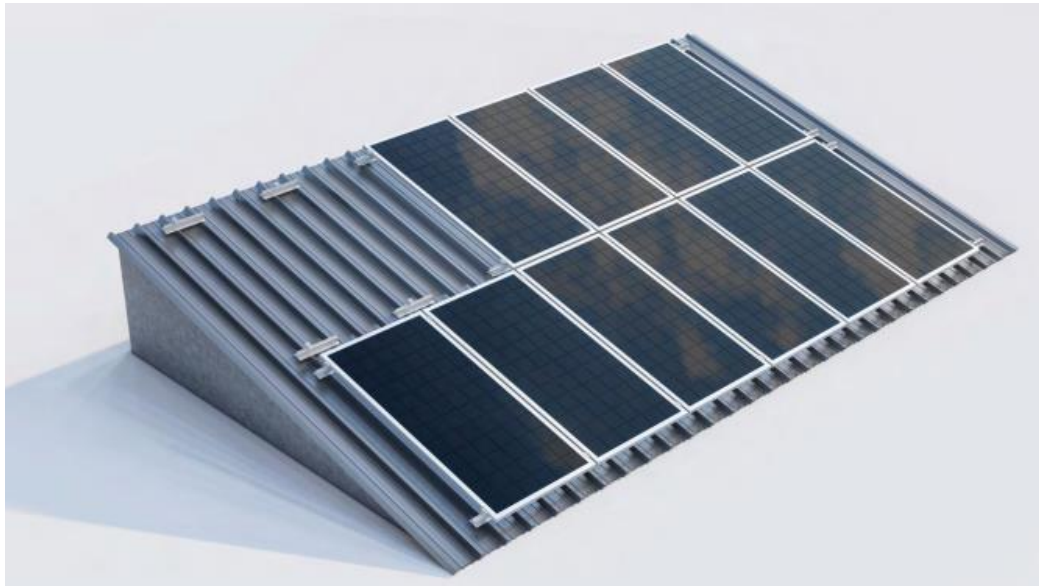
S druge strane, iako korištenje solarne energije ima mnoge prednosti, postoje i negativni aspekti u njihovu korištenju. Kao što je već spomenuto, to su visoki početni ulozi, što može predstavljati prepreku za mnoge ljude koji se žele koristiti solarnom energijom. Naravno, treba imati na umu i ovisnost o vremenskim uvjetima kao i velike površine koje su potrebne da bi se postigla optimalna proizvodnja energije. Također, kada solarni paneli dostignu kraj svog životnog vijeka, njihovo odlaganje postaje problem zbog prisutnosti štetnih stvari. Ipak, važno je reći da se tehnologija razvija i postaje naprednija pa će u budućnosti svi ti negativni aspekti imati bolje rješenje.

Vjeruje se da će se u budućnosti nastaviti pozitivan trend rasta i razvitka tehnologije i infrastruktura povezanih sa solarnim panelima.

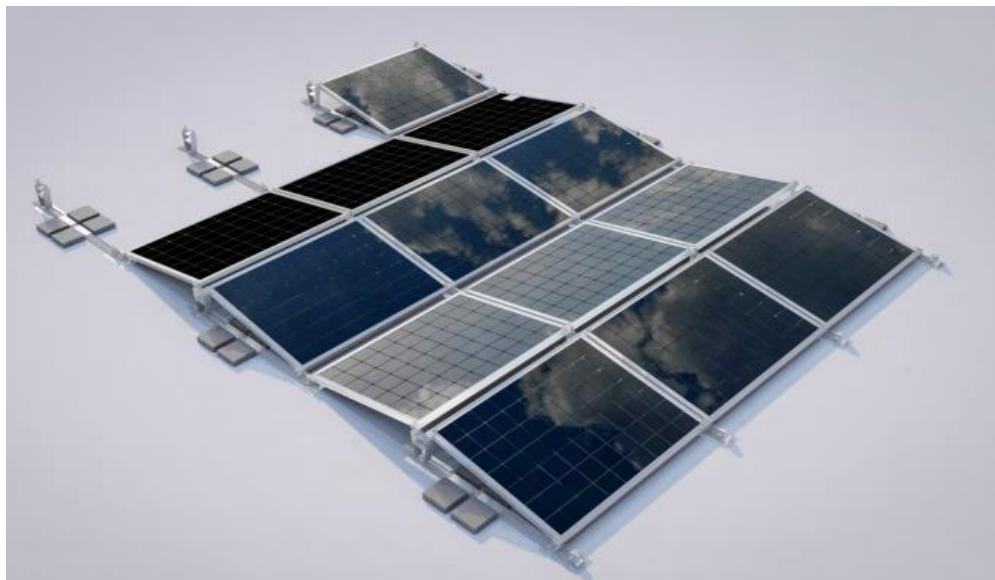
3. KONSTRUKCIJE ZA PODUPIRANJE SOLARNIH PANELA

Solarni paneli najčešće su namijenjeni za postavljanje na tlo, ravne ili kose krovove te kao nadstrešnice iznad parkirališta. Osim toga, u novije vrijeme solarni paneli postavljaju se i na ograde terasa ili balkona, čime zamjenjuju prostor ograde. Takvim postavljanjem ekonomično se iskorištava prostor. Jednako tako, mogu se montirati kao nadstrešnice iznad balkona ili ulaznih vrata, a nalazimo ih i na fasadama. Ovakva vertikalna montaža odlična je za prikupljanje sunčeve energije zimi jer je tada sunce nisko.

Primjerice, tvrtka Euro Tim d.o.o. osnovana je 1996. godine razvijajući se kao obrt sa izgradnjom i ugradnjom alu i pvc stolarije. Uveli su potpuno novu liniju proizvoda u sektoru obnovljive energije pod imenom SOLAR. To je kompletan sistem aluminijske podkonstrukcije za postavljanje solarnih panela. U njihovom katalogu dana su rješenja za instalaciju solarnih panela različitih kapaciteta i na različitim tipovima podloge.



Slika 4: Montaža solarnih panela na kosom krovu [3]



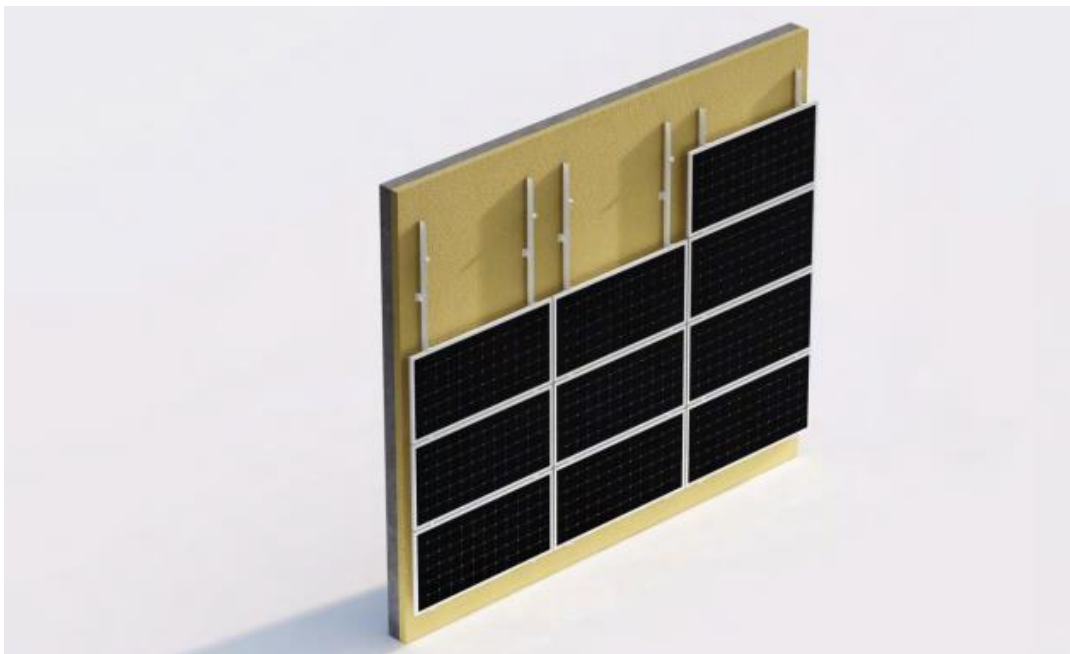
Slika 5: Montaža solarnih panela na ravnom krovu [3]



Slika 6: Montaža solarnih panela na nadstrešnici [3]



Slika 7: Montaža solarnih panela na tlu [3]



Slika 8: Montaža solarnih panela na fasadi [3]

U njihovom katalogu dana su i pravila montaže konstrukcija. Podaci o tvrtki Euro Tim d.o.o. i njihovom sistemu SOLAR preuzeti su sa web stranice [3].

U ovom završnom radu prikazan je proračun čelične konstrukcija postavljene na tlo.

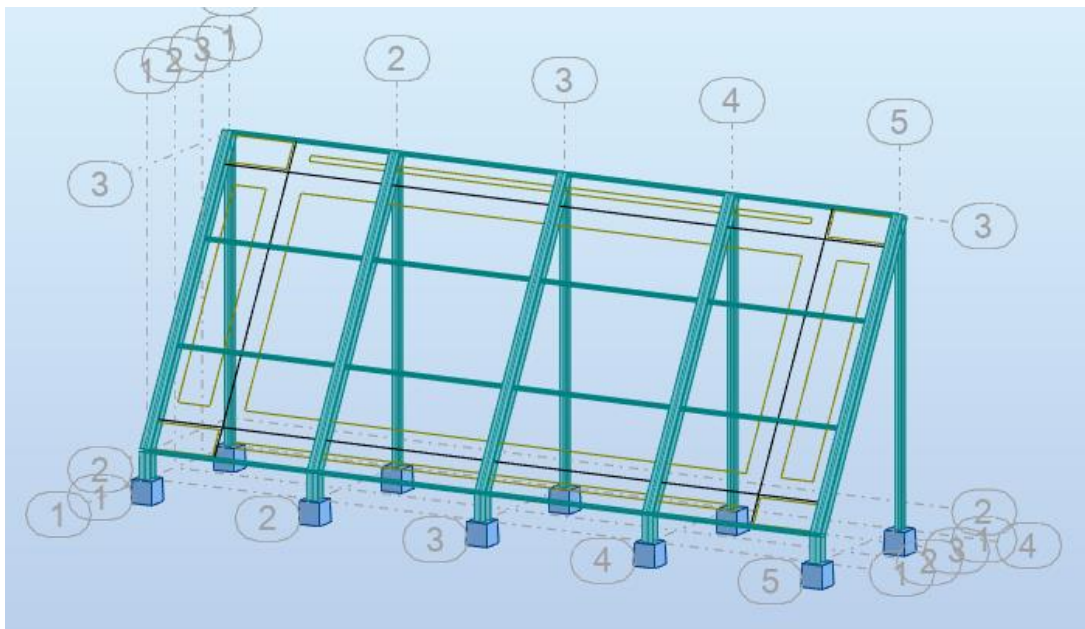
Tvrtka Grengy Solar nudi niz dostupnih opcija za sustave montirane na zemlji, ovisno o zahtjevima kupca. To uključuje: montažu na tlo zabijenu u pilote, okvire pričvršćene sidrom, sustave s balastom, dizajne po narudžbi i drugo. Kutovi nagiba solarnih panela su od 5 do 60 stupnjeva, a maksimalno opterećenje vjetrom 60 m/s. Tvrtka proizvodi toplo pocinčane čelične konstrukcije i aluminijske konstrukcije. Oni tvrde da su mnoge prednosti odabira sustava solarnih panela postavljenih na zemlju. Prvo, sustavi koji se montiraju na zemlju lako se postavljaju na otvoreno tlo. Ne zahtijevaju bušenje krova, a ukrućenja koja se koriste lagana su i lako se uklanjaju. Zatim, montiranje na tlo može biti produktivnije po panelu nego krovni solarni niz. Prizemni solarni paneli postavljeni su pod savršenim kutom za optimizaciju proizvodnje energije. Također, solarnim panelima postavljenim na zemlju vrlo je lako pristupiti radi čišćenja i održavanja. Za područja gdje ima puno snijega zimi, mogućnost lakog čišćenja snijega sa solarnih panela velika je pogodnost. O tvrtki Grengy Solar preuzeti su podaci sa web stranice [4].

4. PRORAČUN ČELIČNE KONSTRUKCIJE

4.1. Tehnički opis

Čelična konstrukcija namijenjena pridržavanju solarnih panela ima tlocrtnu dimenziju 13,52 x 2,985 m. Sastoji se od nosača, podrožnica i dvije vrste stupova. Stupovi su postavljeni na osnovnom razmaku od 3,38 m. Na istom razmaku su i nosači koji su postavljeni na stupove. Visina nižih stupova je 0,5 m, a viših stupova 5,67 m. Duljina nosača je 5,97 m, a također su nagnuti pod kutom od 30°. Podrožnice su postavljene okomito na nosače i na osnovnom su razmaku 1,99 m jedna od druge. Za niže stupove odabran je presjek HEA 220, a za više stupove HEA 140. Nosače čine poprečni profili HEA 200, dok su podrožnice napravljene od kvadratnih presjeka 90x50x5. Klasa čelika korištena za izradu konstrukcije je S235.

Na konstrukciju djeluju stalno opterećenje, opterećenje snijegom i vjetrom. Stalno djelovanje čini težina solarnih panela zbrojena vlastitom težinom konstrukcije. Opterećenje snijegom određuje se primjenom norme EN 1991-1-3 [5] i nacionalnog dodatka nHRN EN 1991-1-3:2012/NA [6]. Nadalje, opterećenje vjetrom određuje se primjenom norme HRN EN 1991-1-4 [7] i nacionalnog dodatka nHRN EN 1991-1-4:2012/NA [8].



Slika 9: 3D prikaz čelične konstrukcije iz Robotu

4.2. Analiza djelovanja prema važećim propisima

4.2.1. Stalno djelovanje

Na konstrukciju djeluje stalno djelovanje koje čini vlastita težina konstrukcije zajedno sa solarnim panelima JA Solar 345W Half Cell.

Težina solarnih panela je 18,7 kg, a vlastita težina je 0,187 kN/m². Dimenzije solarne ploče su 1690x995x35 mm.



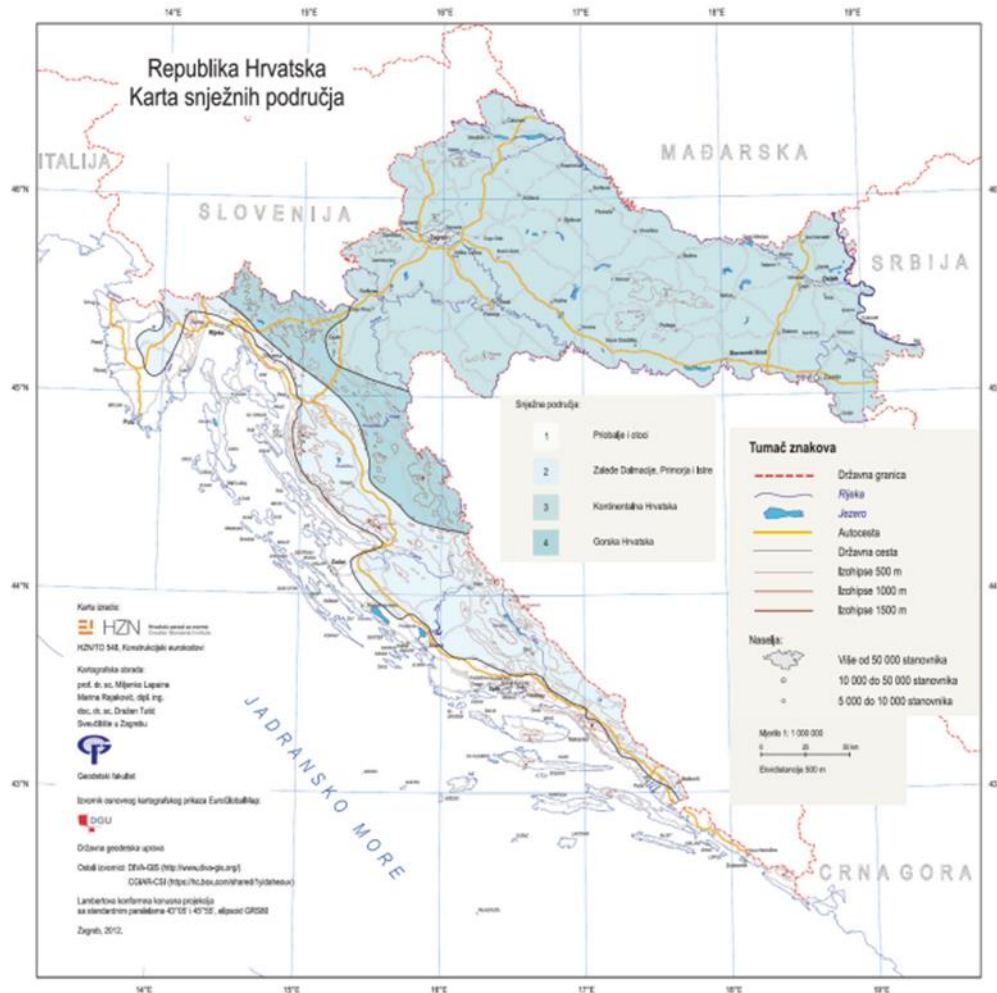
Slika 10: Odabrani solarni panel iz kataloga proizvođača JA SOLAR [9]

4.2.2. Analiza djelovanja snijega

Proračun djelovanja snijega proveden je prema normi EN 1991-1-3 [5] i nacionalnom dodatku nHRN EN 1991-1-3:2012/NA [6]. Čelična konstrukcija se nalazi na lokaciji sveučilišnog kampusa u gradu Rijeci na nadmorskoj visini od 150 m.n.m.

4.3.2.1. Opterećenje snijegom na tlu

Proračun opterećenja snijegom na tlu (s_k) se uračunava u slučaju mogućih djelovanja snijega na natkrivenim područjima konstrukcija.



Slika 11: Karta snježnih područja u mjerilu 1:1 000 000 [6]

Tablica 1: Preporučene vrijednosti ψ_0 , ψ_1 i ψ_2 koeficijenta za različite lokacije konstrukcija [6]

Regija	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Finska, Island, Norveška, Švedska	0,70	0,50	0,20
Ostale države članice CEN-a, za gradilišta smještena na nadmorskim visinama $H > 1000$ m	0,70	0,50	0,20
Ostale države članice CEN-a, za gradilišta smještena na nadmorskim visinama $H \leq 1000$ m	0,50	0,20	0,00

Za lokacije gdje postoji mogućnost izuzetnih opterećenja snijegom na tlu, određujemo ih izrazom (1):

$$s_{Ad} = C_{esl} \cdot s_k = 2,0 \times 0,5 = 1,0 \text{ kN/m}^2 \quad (1)$$

gdje je:

$C_{est}=2,0$ - koeficijent za izuzetna opterećenja snijegom

$s_k=0,5 \text{ kN/m}^2$ -karakteristična vrijednost opterećenja snijegom na tlu za danu lokaciju.

$s_{Ad}=1,0 \text{ kN/m}^2$ -proračunska vrijednost izuzetnog opterećenja snijegom na tlu za danu lokaciju

4.3.2.2. Opterećenje snijegom na krovu

Koeficijent oblika opterećenja snijegom za izuzetne nanose koji treba upotrebljavati za jednostrešne krovove dan je u tablici 2.

Tablica 2: preporučene vrijednosti koeficijenta μ_i za jednostrešne krovove [5]

Kut nagiba krova α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8 \frac{60-\alpha}{30}$	0,0
μ_2	$0,8 + 0,8 \frac{\alpha}{30}$	1,6	-

Tablica 3: Preporučene vrijednosti koeficijenta C_e [6]

Topografija	C_e
Izložena vjetru ^a	0,8
Uobičajena ^b	1,0
Zaklonjena ^c	1,2

^a Izložena vjetru: ravna, nezaklonjena područja izložena sa svih strana, bez zaklona ili s vrlo malo zaklona terenom, višim građevinama ili drvećem.

^b Uobičajena topografija: područja gdje ne dolazi do značajnijeg premještanja snijega na građevini zbog vjetra, terena, drugih građevina ili drveća.

^c Zaklonjena topografija: područja gdje je predmetna građevina značajno niža od okolnog terena ili okružena visokim drvećem i/ili okružena drugim višim građevinama.

Proračun opterećenja snijega na krovnu konstrukciju određuje se prema izrazu (2):

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_{Ad}$$

$$s = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,8 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

gdje je:

$\mu_i = 0,8$ - koeficijent oblika opterećenja snijegom

$C_e = 1,0$ - koeficijent izloženosti

$C_t = 1,0$ - toplinski koeficijent

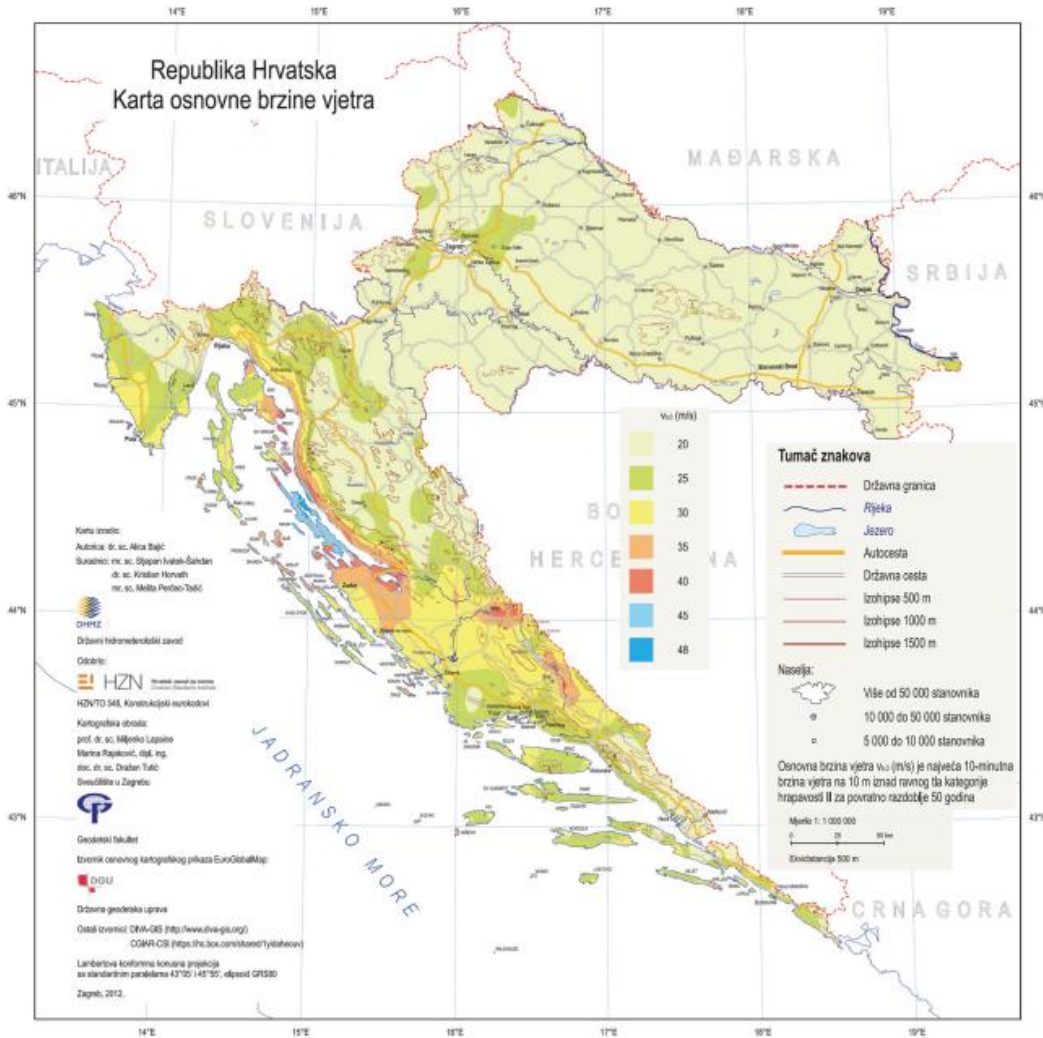
$s_{Ad} = 1,0 \text{ kN/m}^2$ - proračunska vrijednost izuzetnog opterećenja snijegom na tlu

$s = 0,8 \text{ kN/m}^2$ - izuzetno opterećenje snijegom

4.2.3. Analiza djelovanja vjetra

Proračun djelovanja vjetra na konstrukciju nadstrešnice je proveden prema normi HRN EN 1991-1-4: 2012 [7] i nacionalnom dodatku nHRN EN 1991-1-4: 2012/NA [8].

Brzina vjetra je određena prema karti vjetrovnih zona Republike Hrvatske.



Slika 12: Karta vjetrovnih zona Republike Hrvatske [7]

Osnovna brzina vjetra v_b određuje se prema izrazu (3):

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 25 = 25 \text{ m/s} \quad (3)$$

gdje je:

$$c_{dir} = 1,0 \quad - \text{faktor smjera}$$

$$c_{season} = 1,0 \quad - \text{faktor godišnjeg doba}$$

$$v_{b,0} = 25 \text{ m/s} \quad - \text{temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra očitana sa karte na slici 3}$$

Iz tablice za osnovnu brzinu vjetra dobiveni su podaci o osnovnoj brzini vjetra za grad Rijeku, koja spada pod kategoriju terena 0. Osnovna brzina vjetra $v_{b,0}$ iznosi 25 m/s, a gustoća vjetra je $\rho=1,25 \text{ kg/m}^3$.

Tablica 4: Kategorije i parametri terena [7]

Kategorija terena		z_0 [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 tablice 4 su prisvojeni parametri $z_{min}=1,0 \text{ m}$, $z_0=0,003 \text{ m}$, $z_{0,II}=0,05 \text{ m}$, $z_{max}=200 \text{ m}$.

Određujemo faktor terena k_r prema izrazu (4):

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{0,003}{0,05}\right)^{0,07} = 0,156 \quad (4)$$

gdje je:

$z_0=0,003$ -duljina hrapavosti

$z_{0,II}=0,05 \text{ m}$ -hrapavost za 2. Kategoriju

Faktor hrapavosti $c_r(z)$ određuje se prema izrazu (5):

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln \frac{z}{z_0} = 0,156 \cdot \ln \frac{5,67}{0,003} = 1,18 \quad (5)$$

gdje je:

$k_r=0,156$ -faktor terena

$z=5,67 \text{ m}$ -visina vrha čelične konstrukcije

$z_0=0,003$ -duljina hrapavosti

Srednja brzina vjetra $v_m(z)$ računa se prema izrazu (6):

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = 1,18 \cdot 1,0 \cdot 25 = 29,5 \text{ m/s} \quad (6)$$

gdje je:

$$c_r(z)=1,18 \quad \text{-faktor hrapavosti}$$

$$c_0(z)=1,0 \quad \text{-faktor vertikalne razvedenosti terena}$$

$$v_b=25 \text{ m/s} \quad \text{-osnovna brzina vjetra}$$

Intenzitet turbulencije $I_v(z)$ određuje se prema izrazu (7):

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln \frac{z}{z_0}} = \frac{1}{1 \times \ln \left(\frac{5,67}{0,003} \right)} = 0,13 \quad (7)$$

gdje je:

$$k_I=1,0 \quad \text{-faktor turbulencije}$$

$$c_0(z)=1,0 \quad \text{-faktor vertikalne razvedenosti terena}$$

$$z=5,67 \text{ m} \quad \text{-visina vrha čelične konstrukcije}$$

$$z_0=0,003 \quad \text{-duljina hrapavosti}$$

Tlak pri vršnoj brzini $q_p(z)$ određuje se prema izrazu (8):

$$\begin{aligned} q_p(z) &= (1 + 7 \cdot I_v(z)) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m(z)^2 = (1 + 7 \cdot 0,13) \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 29,5^2 = \\ &= 1,038 \text{ kN/m}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

gdje je:

$$I_v(z)=0,13 \quad \text{-intenzitet turbulencije}$$

$$\rho=1,25 \text{ kg/m}^3 \quad \text{-gustoća zraka}$$

$$v_m(z)=29,5 \text{ m/s} \quad \text{-srednja brzina vjetra}$$

Tlak pri osnovnoj brzini q_b određuje se prema izrazu (9):

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 25^2 = 0,39 \text{ kN/m}^2 \quad (9)$$

gdje je:

$\rho=1,25 \text{ kg/m}^3$ -gustoća zraka

$v_b=25 \text{ m/s}$ -osnovna brzina vjetra

Faktor izloženosti $c_e(z)$ određuje se prema izrazu (10):

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} = \frac{1,038}{0,39} = 2,66 \quad (10)$$

gdje je:

$q_p(z)=1,038 \text{ kN/m}^2$ -tlak pri vršnoj brzini

$q_b=0,39 \text{ kN/m}^2$ -tlak pri osnovnoj brzini

Tlak vjetra na vanjske površine određuje se prema izrazu (11):

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b = 2,66 \cdot 0,39 = 1,04 \text{ kN/m}^2 \quad (11)$$

gdje je:

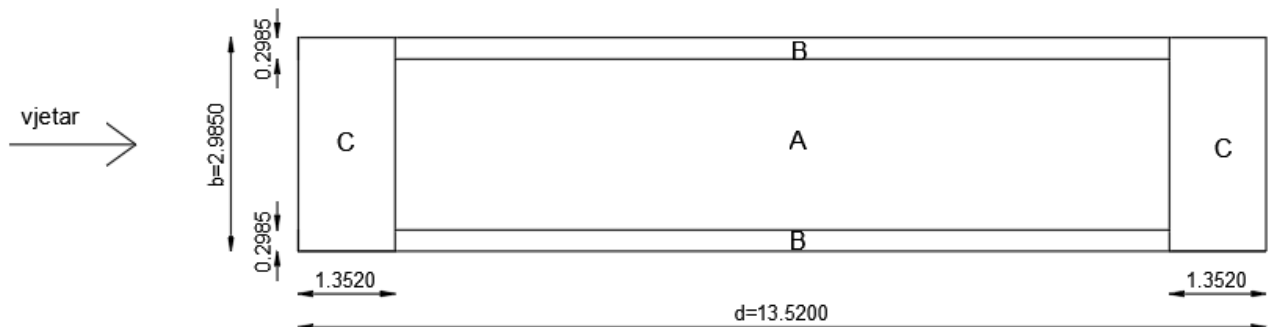
$c_e(z)=2,66$ -faktor izloženosti

$q_b=0,39 \text{ kN/m}^2$ -tlak pri osnovnoj brzini

Proračun koeficijenta vanjskog tlaka na krov jednostruke nadstrešnice:

Za proračun koeficijenta vanjskog tlaka korištena je norma HRN EN 1991-1-4 [7] i nacionalni dodatak nHRN EN 1991-1-4: 2012/NA [8].

Slučaj 1:



Slika 13: Tlocrt solarnih panela sa određenim zonama djelovanja vjetra

Pomoću prikazanog tlocrta (Slika 13), s prikazanim vjetrovnim zonama i dimenzijama, izračunate su površine vjetrovnih zona. Površine su izračunate na kosoj ravnini pod nagibom od 30°.

Napomena:

Iako je nagib solarnih panela previše strm i nije idealan (30 stupnjeva), solarni paneli postaviti će se pod 30 stupnjeva zato što u tablici 5 nije navedeno koje koeficijente uzimati za veće nagibe.

Površine vjetrovnih zona iznose:

$$P_A = 10,816 \cdot 4,776 = 51,66 \text{ m}^2$$

$$P_B = 13,52 \cdot 0,597 = 8,07 \text{ m}^2$$

$$P_C = 1,352 \cdot 5,97 = 8,07 \text{ m}^2$$

Tablica 5: Vrijednost koeficijenata $c_{p,net}$ i c_f za jednostrešne nadstrešnice [8]

			Koeffcijenti neto tlaka $c_{p,net}$ tlocrt		
Nagib krova α	Zapriječenost φ	Koeffcijenti 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 AC	- 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					

Odabrani koeficijenti ρ iznose $\rho=0$ zato što je ispod solarnih panela slobodan prostor i vjetar slobodno prolazi.

Iz navedenih podataka slijedi da su neto faktori djelovanja vjetra $c_{p,net}$ jednaki:

Vjetar djeluje kao pritisak:

$$C_f = +1,2$$

$$\text{Zona A: } C_{p,net} = +2,2$$

$$\text{Zona B: } C_{p,net} = +3,2$$

Zona C: $C_{p,net}=+2,4$

Vjetar djeluje kao usis:

$$\rho=0$$

$$C_f=-1,8$$

Zona A: $C_{p,net}=-3,0$

Zona B: $C_{p,net}=-3,8$

Zona C: $C_{p,net}=-3,6$

4.3.3.1. Pritisak vjetra na krovnu konstrukciju za Slučaj 1

Pritisak vjetra na krovnu konstrukciju određuje se prema izrazu (12):

Vjetar djeluje kao pritisak:

$$\text{Zona A: } w_e(A) = q_p(z) \cdot c_{p,net}(A) = 1,04 \cdot 2,2 = 2,29 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zona B: } w_e(B) = q_p(z) \cdot c_{p,net}(B) = 1,04 \cdot 3,2 = 3,33 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zona C: } w_e(C) = q_p(z) \cdot c_{p,net}(C) = 1,04 \cdot 2,4 = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

Vjetar djeluje kao usis:

$$\rho=0$$

$$\text{Zona A: } w_e(A) = q_p(z) \cdot c_{p,net}(A) = 1,04 \cdot (-3) = -3,12 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zona B: } w_e(B) = q_p(z) \cdot c_{p,net}(B) = 1,04 \cdot (-3,8) = -3,95 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zona C: } w_e(C) = q_p(z) \cdot c_{p,net}(C) = 1,04 \cdot (-3,6) = -3,74 \text{ kN/m}^2 \quad (12)$$

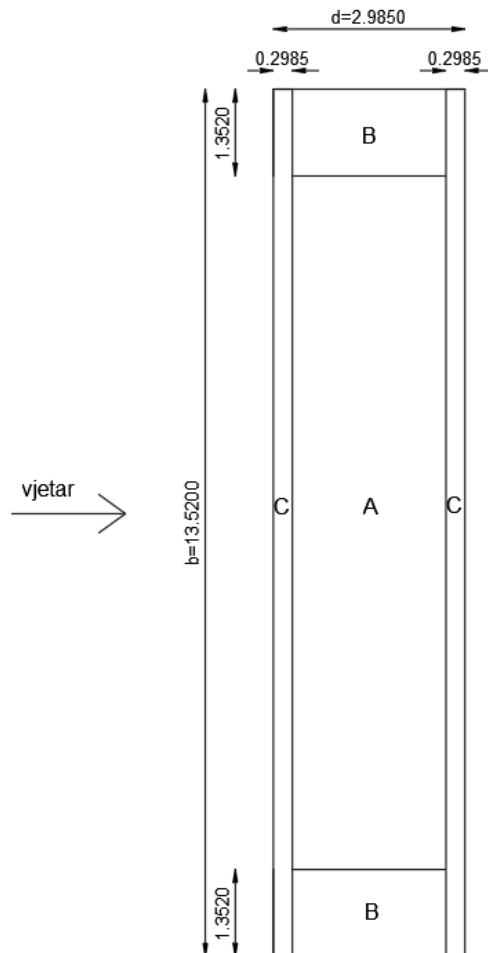
gdje je:

$w_e=-3,74 \text{ kN/m}^2$ -pritisak vjetra na površinu

$C_{p,net}=-3,6$ -koeficijent pritiska na površinu

$q_p(z)=1,04 \text{ kN/m}^2$ -tlak vjetra na površinu

Slučaj 2:



Slika 14: Tlocrt solarnih panela sa određenim zonama djelovanja vjetra

Pomoću prikazanog tlocrta (Slika 14), s prikazanim vjetrovnim zonama i dimenzijama, izračunate su površine vjetrovnih zona. Površine su izračunate na kosoj ravnini pod nagibom od 30° .

Površine vjetrovnih zona iznose:

$$P_A = 10,816 \cdot 4,776 = 51,66 \text{ m}^2$$

$$P_B = 1,352 \cdot 5,97 = 8,07 \text{ m}^2$$

$$P_C = 13,52 \cdot 0,597 = 8,07 \text{ m}^2$$

Neto faktori djelovanja vjetra $c_{p,\text{net}}$ jednaki su:

Vjetar djeluje kao pritisak:

$$C_f = +1,2$$

$$\text{Zona A: } C_{p,net} = +2,2$$

$$\text{Zona B: } C_{p,net} = +3,2$$

$$\text{Zona C: } C_{p,net} = +2,4$$

Vjetar djeluje kao usis:

$$\rho = 0$$

$$C_f = -1,8$$

$$\text{Zona A: } C_{p,net} = -3,0$$

$$\text{Zona B: } C_{p,net} = -3,8$$

$$\text{Zona C: } C_{p,net} = -3,6$$

4.3.3.2. Pritisak vjetra na krovnu konstrukciju za Slučaj 2

Vjetar djeluje kao pritisak:

$$\text{Zona A: } w_e(A) = q_p(z) \cdot c_{p,net}(A) = 1,04 \cdot 2,2 = 2,29 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zona B: } w_e(B) = q_p(z) \cdot c_{p,net}(B) = 1,04 \cdot 3,2 = 3,33 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zona C: } w_e(C) = q_p(z) \cdot c_{p,net}(C) = 1,04 \cdot 2,4 = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

Vjetar djeluje kao usis:

$$\rho = 0$$

$$\text{Zona A: } w_e(A) = q_p(z) \cdot c_{p,net}(A) = 1,04 \cdot (-3) = -3,12 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zona B: } w_e(B) = q_p(z) \cdot c_{p,net}(B) = 1,04 \cdot (-3,8) = -3,95 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zona C: } w_e(C) = q_p(z) \cdot c_{p,net}(C) = 1,04 \cdot (-3,6) = -3,74 \text{ kN/m}^2$$

4.2.4. Kombinacije djelovanja

Kombinacije djelovanja definirane su za granično stanje nosivosti i granično stanje uporabljivosti za djelovanje vjetra, snijega i stalnog opterećenja na konstrukciju nadstrešnice pomoću programa Robot Structural Analysis Professional.

Combinations	Name	Analysis type	Combination	Case nature	Definition
8 (C)	GSN1: stalno+snijeg	Linear Combination	ULS	Structural	$(1+2)*1.35+3*1.50$
9 (C)	GSN2: stalno+snijeg+vjetar1-pritisak	Linear Combination	ULS	Structural	$(1+2)*1.35+3*1.50+4*0.90$
10 (C)	GSN3: stalno+snijeg+vjetar1-uisis	Linear Combination	ULS	Structural	$3*1.50+(1+2)*1.00+5*0.90$
11 (C)	GSN4: stalno+snijeg+vjetar2-pritisak	Linear Combination	ULS	Structural	$(1+2)*1.35+3*1.50+6*0.90$
12 (C)	GSN5: stalno+snijeg+vjetar2-uisis	Linear Combination	ULS	Structural	$(1+2)*1.00+3*1.50+7*0.90$
13 (C)	GSN6: stalno+vjetar1-pritisak+snijeg	Linear Combination	ULS	Structural	$(1+2)*1.35+4*1.50+3*0.75$
14 (C)	GSN7: stalno+vjetar1-uisis+snijeg	Linear Combination	ULS	Structural	$(1+2)*1.00+5*1.50+3*0.75$
15 (C)	GSN8: stalno+vjetar2-pritisak+snijeg	Linear Combination	ULS	Structural	$(1+2)*1.35+6*1.50+3*0.75$
16 (C)	GSN9: stalno+vjetar2-uisis+snijeg	Linear Combination	ULS	Structural	$(1+2)*1.00+7*1.50+3*0.75$
17 (C)	GSN10: stalno+vjetar1-pritisak	Linear Combination	ULS	Structural	$(1+2)*1.35+4*1.50$
18 (C)	GSN11: stalno+vjetar1-uisis	Linear Combination	ULS	Structural	$(1+2)*1.00+5*1.50$
19 (C)	GSN12: stalno+vjetar2-pritisak	Linear Combination	ULS	Structural	$(1+2)*1.35+6*1.50$
20 (C)	GSN13: stalno+vjetar2-uisis	Linear Combination	ULS	Structural	$(1+2)*1.00+7*1.50$
21 (C)	GSU1: stalno+snijeg	Linear Combination	SLS	Structural	$(1+2+3)*1.00$
22 (C)	GSU2: stalno+snijeg+vjetar1-pritisak	Linear Combination	SLS	Structural	$(1+2+3)*1.00+4*0.60$
23 (C)	GSU3: stalno+snijeg+vjetar1-uisis	Linear Combination	SLS	Structural	$(1+2+3)*1.00+5*0.60$
24 (C)	GSU4: stalno+snijeg+vjetar2-pritisak	Linear Combination	SLS	Structural	$(1+2+3)*1.00+6*0.60$
25 (C)	GSU5: stalno+snijeg+vjetar2-uisis	Linear Combination	SLS	Structural	$(1+2+3)*1.00+7*0.60$
26 (C)	GSU6: stalno+vjetar1-pritisak+snijeg	Linear Combination	SLS	Structural	$(1+2+4)*1.00+3*0.50$
27 (C)	GSU7: stalno+vjetar1-uisis+snijeg	Linear Combination	SLS	Structural	$(1+2+5)*1.00+3*0.50$
28 (C)	GSU8: stalno+vjetar2-pritisak+snijeg	Linear Combination	SLS	Structural	$(1+2+6)*1.00+3*0.50$
29 (C)	GSU9: stalno+vjetar2-uisis+snijeg	Linear Combination	SLS	Structural	$(1+2+7)*1.00+3*0.50$
30 (C)	GSU10: stalno+vjetar1-pritisak	Linear Combination	SLS	Structural	$(1+2+4)*1.00$
31 (C)	GSU11: stalno+vjetar1-uisis	Linear Combination	SLS	Structural	$(1+2+5)*1.00$
32 (C)	GSU12: stalno+vjetar2-pritisak	Linear Combination	SLS	Structural	$(1+2+6)*1.00$
33 (C)	GSU13: stalno+vjetar2-uisis	Linear Combination	SLS	Structural	$(1+2+7)*1.00$

Slika 15: Kombinacije djelovanja definirane u programu Robot Structural Analysis Professional

Lista kombinacija određena je tako da je:

Kombinacija 1: GSN1: stalno+snijeg

Kombinacija 2: GSN2: stalno+snijeg+vjetar1-pritisak

Kombinacija 3: GSN3: stalno +snijeg+vjetar1-uisis

Kombinacija 4: GSN4: stalno+snijeg+vjetar2-pritisak

Kombinacija 5: GSN5: stalno+snijeg+vjetar2-uisis

Kombinacija 6: GSN6: stalno+vjetar1-pritisak+snijeg

Kombinacija 7: GSN7: stalno+vjetar1-usic+snijeg

Kombinacija 8: GSN8: stalno+vjetar2-pritisak+snijeg

Kombinacija 9: GSN9: stalno+vjetar2-usic+snijeg

Kombinacija 10: GSN10: stalno+vjetar1-pritisak

Kombinacija 11: GSN11: stalno+vjetar1-usic

Kombinacija 12: GSN12: stalno+vjetar2-pritisak

Kombinacija 13: GSN13: stalno+vjetar2-usic

Kombinacija 14: GSU1: stalno+snijeg

Kombinacija 15: GSU1: stalno+snijeg+vjetar1-pritisak

Kombinacija 16: GSU1: stalno +snijeg+vjetar1-usic

Kombinacija 17: GSU1: stalno+snijeg+vjetar2-pritisak

Kombinacija 18: GSU1: stalno+snijeg+vjetar2-usic

Kombinacija 19: GSU1: stalno+vjetar1-pritisak+snijeg

Kombinacija 20: GSU1: stalno+vjetar1-usic+snijeg

Kombinacija 21: GSU1: stalno+vjetar2-pritisak+snijeg

Kombinacija 22: GSU1: stalno+vjetar2-usic+snijeg

Kombinacija 23: GSU1: stalno+vjetar1-pritisak

Kombinacija 24: GSU1: stalno+vjetar1-usic

Kombinacija 25: GSU1: stalno+vjetar2-pritisak

Kombinacija 26: GSU1: stalno+vjetar2-usic

Parcijalni koeficijenti sigurnosti za granično stanje nosivosti jesu:

$\gamma_G = 1,00$ povoljno djelovanje

$\gamma_Q = 0,00$ povoljno djelovanje

$\gamma_G = 1,35$ nepovoljno djelovanje

$\gamma_Q = 1,50$ nepovoljno djelovanje

Parcijalni koeficijenti sigurnosti za granično stanje uporabljivosti jesu:

$\gamma_G = 1,00$ povoljno djelovanje

$\gamma_Q = 0,00$ povoljno djelovanje

$\gamma_G = 1,00$ nepovoljno djelovanje

$\gamma_Q = 1,00$ nepovoljno djelovanje

gdje je:

γ_G - parcijalni koeficijent sigurnosti za stalno djelovanje

γ_Q - parcijalni koeficijent sigurnosti za promjenjivo djelovanje

4.3. Statički proračun unutarnjih sila

4.4. Dimenzioniranje glavnih elemenata konstrukcije nadstrešnice

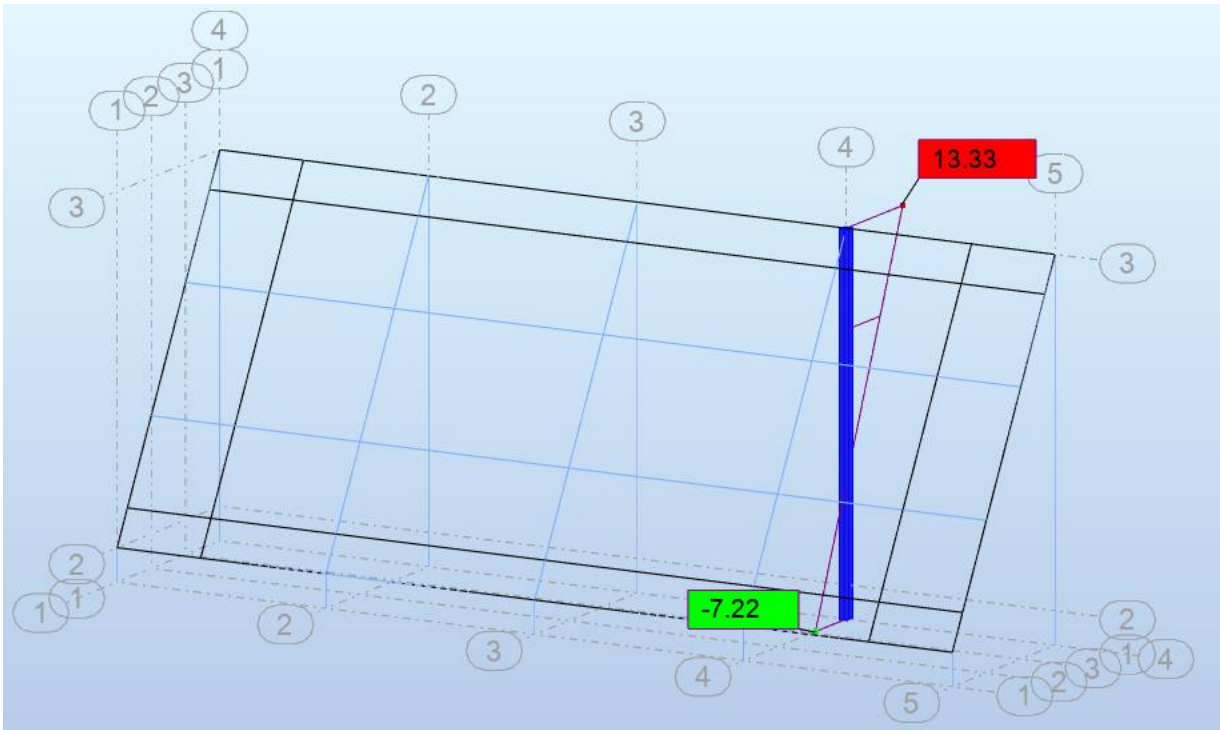
Dimenzioniranje glavnih elemenata čelične konstrukcije provedeno je za stup, nosač i podrožnicu za granično stanje nosivosti i granično stanje uporabljivosti. Dimenzioniranje elemenata čelične konstrukcije provedeno je prema normi EN 1993-1-1:2005 [10].

4.4.1. Granično stanje nosivosti

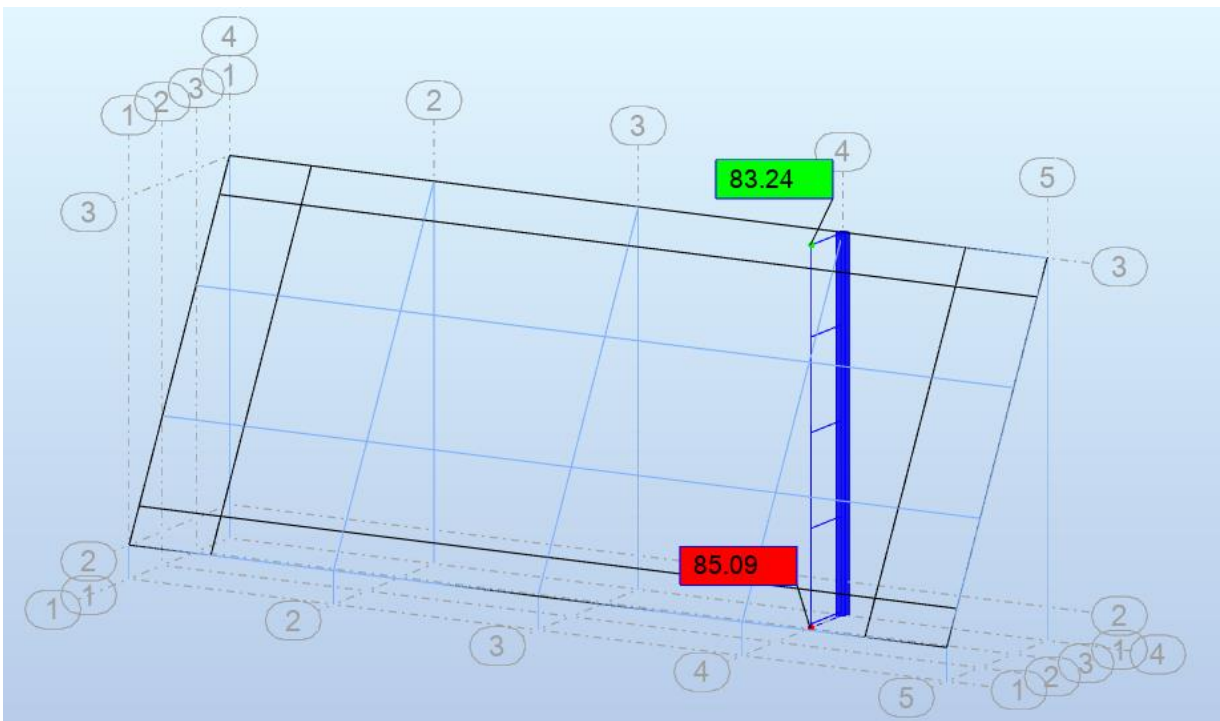
Stup

Klasifikacija poprečnog presjeka stupa

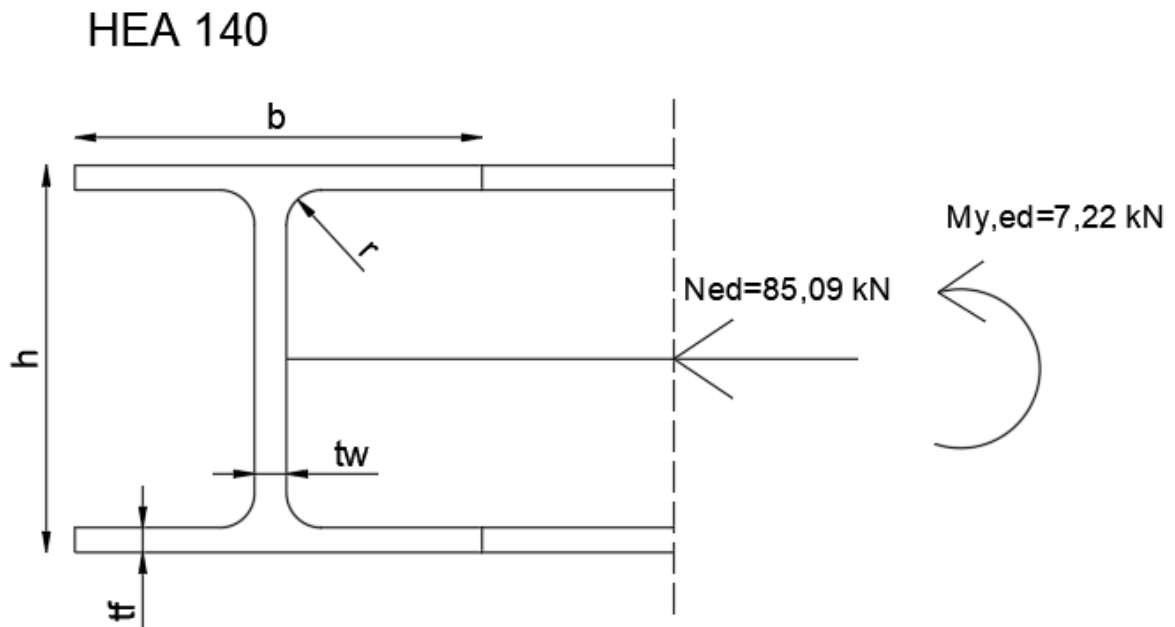
Za poprečni profil stupa uzet je valjani profil HEA 140, klase čelika S235.



Slika 16: Momentno opterećenje na stupu



Slika 17: Opterećenje uzdužnom silom na stupu



Karakteristike poprečnog presjeka:

$h = 133 \text{ mm}$	$I_y = 1033 \text{ cm}^4$
$b = 140 \text{ mm}$	$W_{pl,y} = 173.53 \text{ cm}^3$
$t_f = 8.5 \text{ mm}$	$I_t = 8.13 \text{ cm}^4$
$t_w = 5.5 \text{ mm}$	$I_w = 15060 \text{ cm}^6$
$r = 12 \text{ mm}$	$I_z = 389.3 \text{ cm}^4$
$A = 31.42 \text{ cm}^2$	

Svojstva čelika:

$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$
$G = 81\,000 \text{ MPa}$
$\nu = 0,3$
$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

$$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$$

Posmičnu silu V_{ed} zanemarujemo zbog malog iznosa.

Klasifikacija poprečnog presjeka

Klasifikacija hrpta stupa

Tablica 6: Klasifikacija unutrašnjih tlačnih elemenata [10]

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

Odnos ravnog dijela hrpta c i debljine t_w određuje se prema izrazu (13):

$$c = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r = 133 - 2 \cdot 8,5 - 2 \cdot 12 = 92 \text{ mm} \quad (13)$$

gdje je:

- h=133 mm -visina profila
 t_f=8,5 mm -debljina pojasnice
 r=12 mm -polumjer valjanog spoja hrpta i pojasnice

Proračun α za interakciju momenta savijanja i tlačne sile određuje se prema izrazu (14):

$$a = \frac{N_{Ed}}{2 \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{85,09}{2 \cdot 0,55 \cdot \frac{23,5}{1}} = 3,29 \text{ cm}$$

$$\alpha = \frac{1}{c} \cdot \left(\frac{c}{2} + a \right) = \frac{1}{9,2} \cdot \left(\frac{9,2}{2} + 3,29 \right) = 0,86 \quad (14)$$

gdje je:

- a=32,9 mm -visina hrpta na koju djeluje moment savijanja i uzdužna tlačna sila
 N_{Ed}=85,09 kN -računska uzdužna sila
 t_w=5,5 mm -debljina hrpta
 c=92 mm -ravni dio hrpta
 f_y=23,5 kN/cm² -granica popuštanja čelika
 γ_{M0}=1,0 -parcijalni faktor sigurnosti

Klasifikacija hrpta na savijanje i tlak određuje se prema izrazu (15):

$$\frac{c}{t} \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{(13 \cdot \alpha - 1)} \quad (15)$$

$$\frac{92}{5,5} \leq \frac{396 \cdot 1}{(13 \cdot 0,86 - 1)}$$

16,73 < 38,9 Hrbat je klasa 1.

gdje je:

- c=92 mm -ravni dio hrpta
 t_w=5,5 mm -debljina hrpta
 α=0,86 -proračun α

$\epsilon=1,0$

-izduženje čelika

Klasifikacija pojasnice stupa

Tablica 7: Klasifikacija vanjskih tlačnih elemenata [10]

vanjski tlačni elementi			
valjani profili		zavareni profili	
klasa	tlak	savijanje i tlak	
		rub u tlaku	rub u vlak
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	$\frac{c}{t} \leq 14\epsilon$	$\frac{c}{t} \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$	

Odnos širine pojasnice c i debljine pojasnice t_f određuje se prema izrazu (16):

$$c = \frac{b - t_w - 2 \cdot r}{2} = \frac{140 - 5,5 - 2 \cdot 12}{2} = 55,25 \text{ mm} \quad (16)$$

gdje je:

$c=55,25 \text{ mm}$ -širina opterećenog dijela pojasnice

$b=140 \text{ mm}$ -širina profila

$t_w=5,5 \text{ mm}$ -debljina hrpta

$r=12 \text{ mm}$ -polumjer valjanog spoja hrpta i pojasnice

Klasifikacija donje pojasnice na tlak stupa određuje se prema izrazu (17):

$$\frac{c}{t_f} \leq 9 \cdot \varepsilon \quad (17)$$

$$\frac{55,25}{8,5} \leq 9 \cdot 1$$

6,5 < 9 Pojasnica je klasa 1.

gdje je:

c=55,25 mm -širina polovice pojasnice na koju djeluje tlak

t_f=8,5 mm -debljina pojasnice

ε=1,0 -izduženje čelika

Otpornost poprečnog presjeka

Otpornost poprečnog presjeka stupa na tlak

Otpornost poprečnog presjeka na tlak za klasu 1 određuje se prema izrazu (18):

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{31,42 \cdot 23,5}{1} = 738,37 \text{ kN} \quad (18)$$

Uvjet nosivosti:

$$N_{Ed} \leq N_{c,Rd}$$

$$85,09 \leq 738,37 \text{ kN}$$

0,12 < 1 (12% iskoristivost)

gdje je:

N_{c,Rd}=738,37 kN -računska otpornost poprečnog presjeka

N_{Ed}=85,09 kN -računsko djelovanje uzdužne sila

A=31,42 cm² -površina poprečnog presjeka

f_y=235 MPa -granica popuštanja čelika

γ_{M0}=1,0 -parcijalni koeficijent sigurnosti za otpornost

Otpornost poprečnog presjeka izloženog savijanju

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje određuje se prema izrazu (19):

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{173,53 \cdot 23,5}{1} = 40,8 \text{ kNm} \quad (19)$$

Uvjet nosivosti

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

$$7,22 < 40,8 \text{ kNm (18\% iskoristivost)}$$

gdje je:

$$W_{pl,y} = 173,53 \text{ cm}^3 \quad \text{-plastični moment otpora u y smjeru}$$

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

$$\gamma_{M0} = 1,0 \quad \text{-parcijalni koeficijent sigurnosti}$$

Interakcija savijanja i tlaka (M-N)

Interakcija savijanja i tlaka određuje se prema izrazu (20):

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

$$85,09 \leq 0,25 \cdot 738,37$$

$$85,09 < 184,59 \text{ kN} \quad \text{Zadovoljava.}$$

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

$$85,09 \leq \frac{0,5 \cdot 11,6 \cdot 0,55 \cdot 23,5}{1}$$

$$85,09 > 74,97 \text{ kN} \quad \text{Ne zadovoljava.} \quad (20)$$

gdje je:

$$N_{Ed} = 85,09 \text{ kN} \quad \text{-računska uzdužna sila}$$

$N_{pl,Rd}=738,37$ kN -računska otpornost poprečnog presjeka na tlak

$h_w=11,6$ cm -visina hrpta između pojasnica

$t_w=0,55$ cm -debljina hrpta

$f_y=23,5$ kN/cm² -granica popuštanja čelika

$\gamma_{M0}=1,0$ -parcijalni faktor sigurnosti

Redukcija plastične otpornosti savijanja određuje se prema izrazu (21):

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a}$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{85,09}{738,37} = 0,115$$

$$a = \frac{A-2 \cdot b \cdot t_f}{A} \leq 0,5$$

$$a = \frac{31,42-2 \cdot 14 \cdot 0,85}{31,42} = 0,243$$

$$M_{N,y,Rd} = 40,8 \cdot \frac{1-0,115}{1-0,5 \cdot 0,243} = 41,1 \text{ kNm}$$

Uvjet

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd}$$

7,22 < 41,1 kNm Odabrani profil zadovoljava. (21)

gdje je:

$M_{N,y,Rd}=41,1$ kNm -reducirana plastična otpornost savijanja

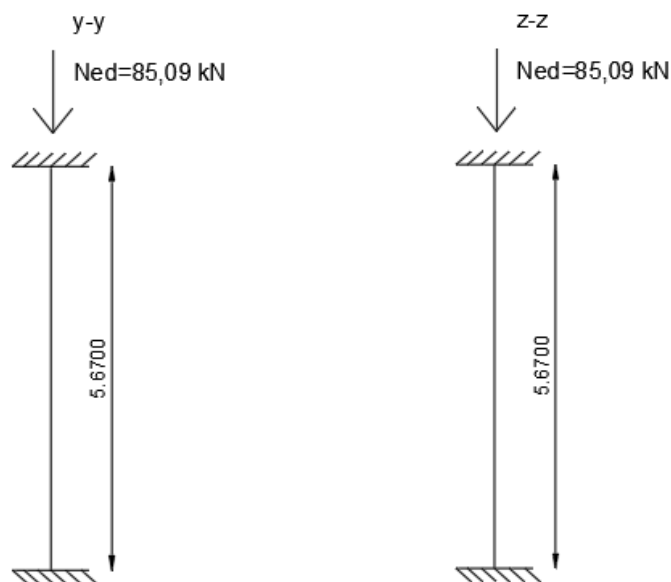
$M_{pl,y,Rd}=40,8$ kNm -otpornost poprečnog presjeka na savijanje

$n=0,115$ -koeficijent plastične otpornosti savijanja

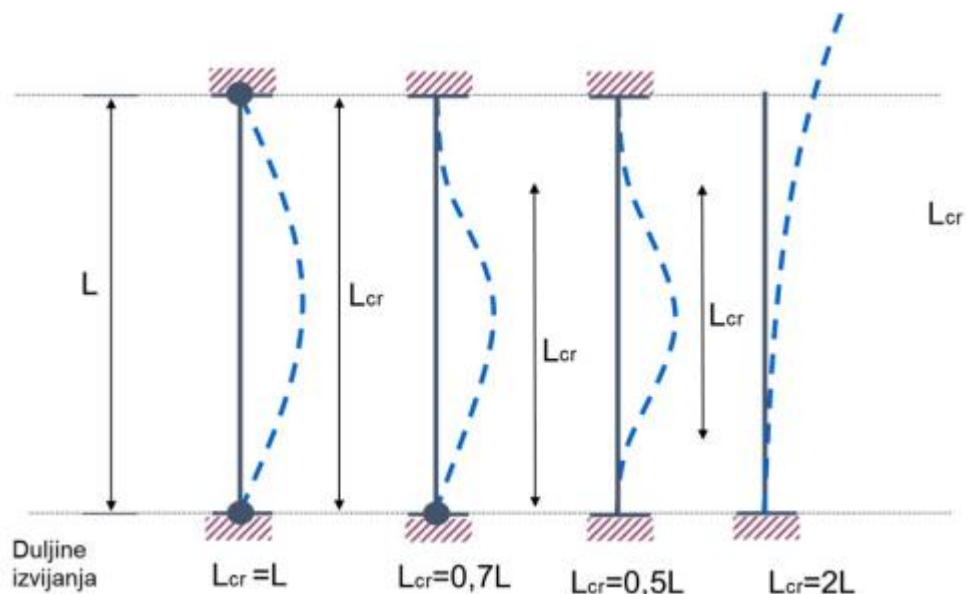
$a=0,243$ -koeficijent plastične otpornosti savijanja

Otpornost elementa izloženog djelovanju uzdužne sile i momenta savijanja

Otpornost elementa stupa na izvijanje



Slika 18: Izvijanje stupa oko osi y i osi z



Slika 19: Kritična duljina izvijanja L_{cr} [10]

Iz slike se određuje da je kritična duljina izvijanja $L_{cr} = L = 5,67 \text{ m}$.

Otpornost elementa stupa na izvijanje oko osi y

Eulerova kritična duljina izvijanja N_{cr} određuje se prema izrazu (22):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 1033}{567^2} = 665,97 \text{ kN} \quad (22)$$

gdje je:

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

$I_y=1033 \text{ cm}^4$ -moment inercije

$L_{cr}=5,67 \text{ m}$ -kritična duljina izvijanja

Vitkost elementa λ određuje se prema izrazu (23):

$$\lambda_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{31,42 \cdot 23,5}{665,97}} = 1,05 \quad (23)$$

gdje je:

$A=31,42 \text{ cm}^2$ -površina presjeka

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

$N_{cr}=665,97 \text{ kN}$ -Eulerova kritična sila izvijanja

Faktor imperfekcije α određuje se pomoću tablice odabira krivulje izvijanja. Odnos visine i širine profila h/b iznosi 0,95 (133/140 mm). To je manje od iznosa 1,2 koji je zadan u tablici za odabir krivulje izvijanja. Debljina pojasnice t_f iznosi 8,5 mm što je manje od 100 mm. Iz donje tablice očita se faktor imperfekcije za dobivenu krivulju b. Faktor imperfekcije oko osi y je $\alpha=0,34$.

Tablica 8: Odabir krivulje izvijanja [10]

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

Faktor izvijanja ϕ se određuje prema izrazu (24):

$$\phi = 0,5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda_y - 0,2) + \lambda_y^2)$$

$$\phi = 0,5 \cdot (1 + 0,34 \cdot (1,05 - 0,2) + 1,05^2) = 1,2 \quad (24)$$

gdje je:

$\alpha=0,34$ -faktor imperfekcije

$\lambda_y=1,05$ -vitkost elementa

Faktor redukcije χ određuje se prema izrazu (25):

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \lambda^2]^{0,5}} = \frac{1}{1,2 + [1,2^2 - 1,05^2]^{0,5}} = 0,56 < 1 \quad (25)$$

gdje je:

$\phi=1,2$ -faktor izvijanja

$\lambda_y=1,05$ -vitkost elementa

Otpornost elementa stupa na izvijanje oko osi z

Eulerova kritična sila izvijanja N_{cr} određuje se prema izrazu (26):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 389,3}{5,67^2} = 250,98 \text{ kN} \quad (26)$$

gdje je:

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

$I_z=389,3 \text{ cm}^4$ -moment inercije oko osi z

$L_{cr}=5,67 \text{ m}$ -kritična duljina izvijanja

Vitkost elementa λ određuje se prema izrazu (27):

$$\lambda_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{31,42 \cdot 23,5}{250,98}} = 1,72 \quad (27)$$

gdje je:

$A=31,42 \text{ cm}^2$ -površina poprečnog presjeka

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

$N_{cr}=250,98 \text{ kN}$ -Eulerova kritična sila izvijanja oko osi z

Faktor izvijanja ϕ se određuje prema izrazu (28):

$$\phi = 0,5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda_z - 0,2) + \lambda_z^2)$$
$$\phi = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (1,72 - 0,2) + 1,72^2) = 2,35 \quad (28)$$

gdje je:

$\alpha=0,49$ -faktor imperfekcije

$\lambda_z=1,72$ -vitkost elementa

Faktor redukcije χ određuje se prema izrazu (29):

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \lambda^2]^{0,5}} = \frac{1}{2,35 + [2,35^2 - 1,72^2]^{0,5}} = 0,25 < 1 \quad (29)$$

gdje je:

$\phi=2,35$ -faktor izvijanja

$\lambda_z=1,72$ -vitkost elementa

$$\chi = \min(0,56; 0,25) = 0,25$$

Otpornost tlačnog elementa na izvijanje $N_{b,Rd}$ određuje se prema izrazu (30):

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,25 \cdot \frac{31,42 \cdot 23,5}{1} = 184,59 \text{ kN} \quad (30)$$

Uvjet nosivosti:

$$N_{ed} \leq N_{b,Rd}$$

$$85,09 < 184,59 \text{ kN (46\% iskoristivost)}$$

gdje je:

$\chi=0,25$ -faktor redukcije

$A=31,42 \text{ cm}^2$ -površina presjeka

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

$\gamma_{M1}=1,0$ -parcijalni koeficijent sigurnosti

Otpornost elementa stupa na bočno torzijsko izvijanje

Elastični kritični moment bočnog torzijskog izvijanja određuje se prema izrazu (31):

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (c_2 \cdot z_g)^2} - c_2 \cdot z_g \right]$$

$$M_{cr} = 2,57 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 389,3}{(1 \cdot 567)^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \cdot \frac{15060}{389,3} + \frac{(1 \cdot 567)^2 \cdot 8077 \cdot 8,13}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 389,3} + (1,55 \cdot 6,65)^2} - 1,55 \cdot 6,65 \right]$$

$$M_{cr} = 6357 \text{ kNcm} = 63,57 \text{ kNm} \quad (31)$$

gdje je:

$C_1=2,57$ -faktor za izračun kritičnog momenta bočno-torzijskog izvijanja

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

$I_z=389,3 \text{ cm}^4$ -moment inercije u z smjeru

$L=567 \text{ cm}$ -razmak točaka bočnog pridržanja

$k, k_w=1$ -faktori krivljenja

$I_w=15060 \text{ cm}^6$ -konstanta krivljenja

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

$I_t=8,13 \text{ cm}^3$ -torzijska konstanta

$C_2=1,55$ -faktor za izračun kritičnog momenta bočno-torzijskog izvijanja

$z_g=6,65 \text{ cm}$ -razmak između centra posmika i točke djelovanja opterećenja

Bezdimenzijska vitkost elementa λ_{LT} određuje se prema izrazu (32):

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{173,5 \cdot 23,5}{6357}} = 0,8 \quad (32)$$

gdje je:

$W_y=173,5 \text{ cm}^3$ -moment otpora u smjeru y

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

$M_{cr}=6357 \text{ kNcm}$ -elastični kritični moment bočno-torzijskog izvijanja

Faktor imperfekcije α_{LT} iznosi 0,21 zato što valjani H profil spada u razred a.

Tablica 9: Faktor imperfekcije α_{LT} zavisno od krivulje izvijanja [10]

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

Faktor bočnog torzijskog izvijanja ϕ_{LT} određuje se prema izrazu (33):

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT}(\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,21 \cdot (0,8 - 0,2) + 0,8^2) = 0,88$$

(33)

gdje je:

$$\alpha_{LT}=0,21 \quad \text{-faktor imperfekcije}$$

$$\lambda_{LT}=0,8 \quad \text{-vitkost elementa}$$

Faktor redukcije χ_{LT} određuje se prema izrazu (34):

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = \frac{1}{0,88 + \sqrt{0,88^2 - 0,8^2}} = 0,80 \quad (34)$$

gdje je:

$$\phi_{LT}=0,88 \quad \text{-faktor bočno torzijskog izvijanja}$$

$$\lambda_{LT}=0,8 \quad \text{-vitkost elementa}$$

Otpornost elementa na bočno torzijsko izvijanje $M_{b,Rd}$ određuje se prema izrazu (35):

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,8 \cdot \frac{173,53 \cdot 235}{1} = 3262,36 \text{ kNcm} = 32,62 \text{ kNm} \quad (35)$$

Uvjet nosivosti:

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

$$7,22 \text{ kNm} \leq 32,62 \text{ kNm} \text{ (22\% iskoristivost)}$$

gdje je:

$$\chi_{LT}=0,8 \quad \text{-faktor redukcije}$$

$$W_y=173,53 \text{ cm}^3 \quad \text{-moment otpora}$$

$$f_y=235 \text{ N/mm}^2 \quad \text{-granica popuštanja čelika}$$

$$\gamma_{M1}=1 \quad \text{-parcijalni koeficijent sigurnosti}$$

Interakcija izvijanja i savijanja elementa stupa (M-N)

Interakcijski faktori za klase 1 i 2 određuju se prema izrazu (36):

$$k_{yy} = c_{my} \cdot \left[1 + (\lambda_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \geq c_{my} \cdot \left[1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right]$$

Za $\lambda_z=1,72 > 0,4$:

$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1 \cdot \lambda_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right]$$

$$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = -0,42$$

$$\psi = -\frac{13,33}{7,22} = -1,84$$

$$C_{my} = 0,1 \cdot (1 - \psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$$

$$C_{mLT} = 0,1 \cdot (1 - \psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$$

$$C_{my} = 0,1 \cdot (1 + 1,84) + 0,8 \cdot 0,42 = 0,62 > 0,4$$

$$C_{mLT} = 0,1 \cdot (1 + 1,84) + 0,8 \cdot 0,42 = 0,62 > 0,4$$

$$k_{yy} = 0,62 \cdot \left[1 + (1,05 - 0,2) \cdot \frac{85,09}{0,56 \cdot \frac{1845,9}{1}} \right] \geq 0,62 \cdot \left[1 + 0,8 \cdot \frac{85,09}{0,56 \cdot \frac{1845,9}{1}} \right]$$

$$k_{yy} = 0,663 > 0,661$$

$$k_{yy}=0,66$$

$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1 \cdot 1,72}{(0,62 - 0,25)} \cdot \frac{85,09}{0,25 \cdot \frac{1845,9}{1}} \right] \geq \left[1 - \frac{0,1}{(0,62 - 0,25)} \cdot \frac{85,09}{0,25 \cdot \frac{1845,9}{1}} \right]$$

$$k_{zy} = 0,91 < 0,95$$

$$k_{zy}=0,95$$

(36)

Interakcija izvijanja i savijanja stupa određuje se prema izrazu (37):

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M0}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M0}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M0}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M0}}} \leq 1$$

$$\frac{85,09}{0,56 \cdot \frac{1845,9}{1}} + 0,66 \cdot \frac{7,22}{0,8 \cdot \frac{40,8}{1}} \leq 1$$

$$0,22 < 1$$

$$\frac{85,09}{0,25 \cdot \frac{1845,1}{1}} + 0,95 \cdot \frac{7,22}{0,8 \cdot \frac{40,8}{1}} \leq 1$$

$$0,39 < 1$$

(37)

gdje je:

$N_{Ed}=85,09$ kN -računska uzdužna sila

$X_y=0,56$ -faktor redukcije izvijanja oko osi y

$X_z=0,25$ - faktor redukcije izvijanja stupa oko osi z

$X_{LT}=0,8$ - faktor redukcije za bočno torzijsko izvijanje

$N_{Rk}=184,51$ kN -karakteristična otpornost elementa na izvijanje

$\gamma_{M0}=1,0$ -parcijalni faktor sigurnosti

$k_{zy}=0,95, k_{yy}=0,66$ -interakcijski faktori

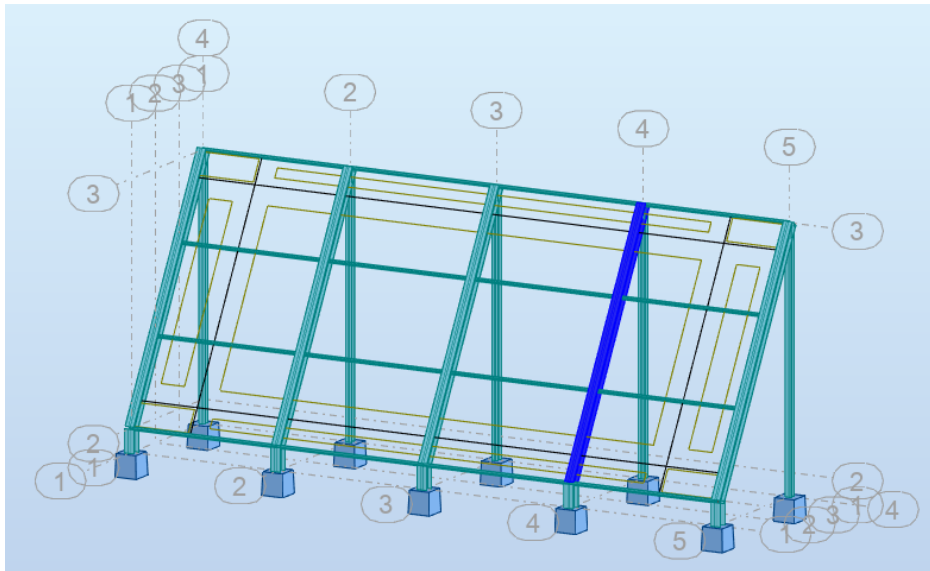
$M_{y,Ed}=7,22$ kNm -računski moment savijanja

$M_{y,Rk}=40,8$ kNm -karakteristična otpornost elementa na bočno torzijsko izvijanje

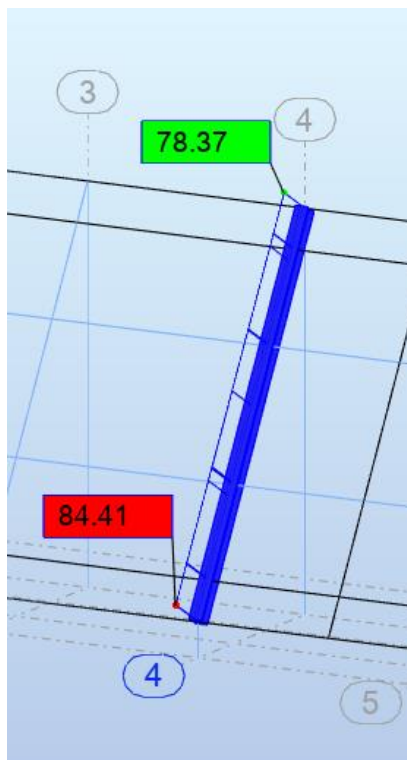
Nosač

Klasifikacija poprečnog presjeka nosača

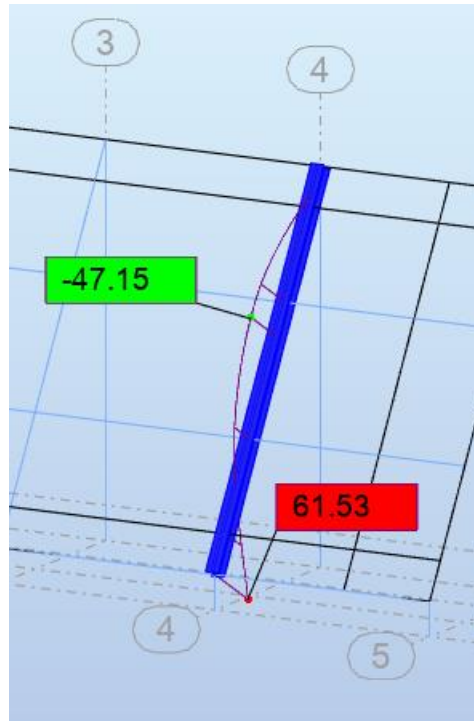
Za poprečni profil nosača uzet je valjani profil HEA 200, klase čelika S235.



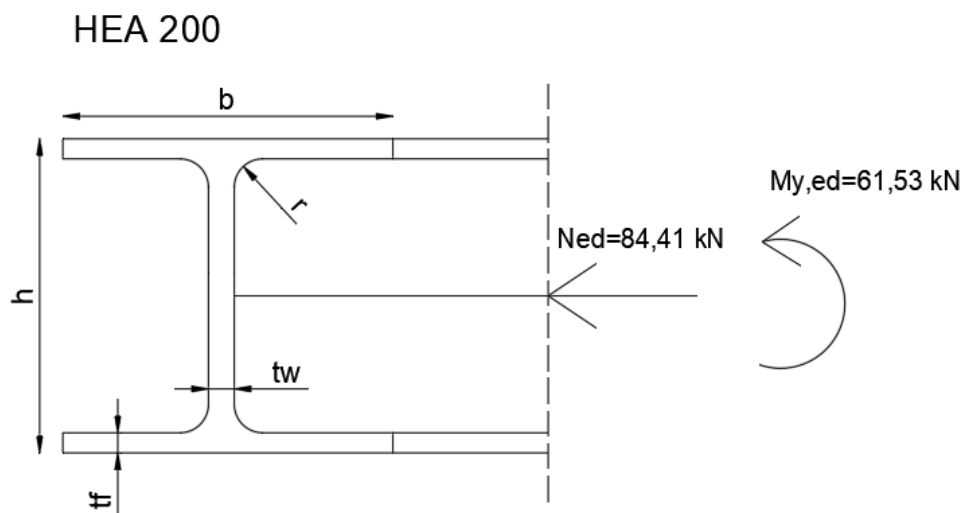
Slika 20: Najopterećeniji nosač za 13. kombinaciju djelovanja graničnog stanja nosivosti



Slika 21: Opterećenje uzdužnom silom na nosaču



Slika 22: Momentno opterećenje na nosaču



Karakteristike poprečnog presjeka:

$h=190 \text{ mm}$ $I_y=3692 \text{ cm}^4$

$b=200 \text{ mm}$ $W_{pl,y}=429.50 \text{ cm}^3$

$t_f=10 \text{ mm}$ $I_t=20.98 \text{ cm}^4$

$$t_w = 6.5 \text{ mm} \quad I_w = 108000 \text{ cm}^6$$

$$r = 18 \text{ mm} \quad I_z = 1336 \text{ cm}^4$$

$$A = 53.80 \text{ cm}^2$$

Svojstva čelika:

$$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$G = 81\,000 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,3$$

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$$

Klasifikacija poprečnog presjeka

Klasifikacija hrpta nosača

Odnos ravnog dijela hrpta c i debljine t_w određuje se prema izrazu (38):

$$c = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r = 190 - 2 \cdot 10 - 2 \cdot 18 = 134 \text{ mm} \quad (38)$$

gdje je:

$$h = 190 \text{ mm} \quad \text{-visina profila}$$

$$t_f = 10 \text{ mm} \quad \text{-debljina pojasnice}$$

$$r = 18 \text{ mm} \quad \text{-polumjer valjanog spoja hrpta i pojasnice}$$

Proračun α za interakciju momenta savijanja i tlačne sile određuje se prema izrazu (39):

$$a = \frac{N_{Ed}}{2 \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{84,41}{2 \cdot 0,65 \cdot \frac{23,5}{1}} = 2,76 \text{ cm}$$

$$\alpha = \frac{1}{c} \cdot \left(\frac{c}{2} + a \right) = \frac{1}{13,4} \cdot \left(\frac{13,4}{2} + 2,76 \right) = 0,71 \quad (39)$$

Klasifikacija hrpta na savijanje i tlak određuje se prema izrazu (40):

$$\frac{c}{t} \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{(13 \cdot \alpha - 1)} \quad (40)$$

$$\frac{134}{6,5} \leq \frac{396 \cdot 1}{(13 \cdot 0,71 - 1)}$$

20,62 < 48,12 Hrbat je klasa 1.

gdje je:

c=134 mm -ravni dio hrpta

t_w=6,5 mm -debljina hrpta

α=0,71 -proračun α

ε=1,0 -izduženje čelika

Klasifikacija pojasnice nosača

Odnos širine pojasnice c i debljine pojasnice t_f određuje se prema izrazu (41):

$$c = \frac{b - t_w - 2 \cdot r}{2} = \frac{200 - 6,5 - 2 \cdot 18}{2} = 78,75 \text{ mm} \quad (41)$$

gdje je:

c=78,75 mm -širina opterećenog dijela pojasnice

b=200 mm -širina profila

t_w=6,5 mm -debljina hrpta

r=18 mm -polumjer valjanog spoja hrpta i pojasnice

Klasifikacija donje pojasnice na tlak određuje se prema izrazu (42):

$$\frac{c}{t_f} \leq 9 \cdot \varepsilon \quad (42)$$

$$\frac{78,75}{10} \leq 9 \cdot 1$$

7,9 < 9 Pojasnica je klasa 1.

gdje je:

$c=78,75$ mm -širina polovice pojasnice na koju djeluje tlak

$t_f=10$ mm -debljina pojasnice

$\varepsilon=1,0$ -izduženje čelika

Otpornost poprečnog presjeka

Otpornost poprečnog presjeka nosača na tlak

Otpornost poprečnog presjeka na tlak za klasu 1 određuje se prema izrazu (43):

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{53,8 \cdot 23,5}{1} = 1264,3 \text{ kN} \quad (43)$$

Uvjet nosivosti:

$$N_{Ed} \leq N_{c,Rd}$$

$$84,41 \leq 1264,3 \text{ kN}$$

$$0,07 < 1 \text{ (7\% iskoristivost)}$$

gdje je:

$N_{c,Rd}=1264,3$ kN -računska otpornost presjeka

$N_{Ed}=84,41$ kN -računska uzdužna sila

$A=53,80$ cm² -površina presjeka

$f_y=235$ MPa -granica popuštanja čelika

$\gamma_{M0}=1,0$ -parcijalni koeficijent sigurnosti na otpornost

Otpornost poprečnog presjeka izloženog savijanju

Otpornost poprečnog presjeka nosača na savijanje određuje se prema izrazu (44):

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{429,5 \cdot 23,5}{1} = 100,93 \text{ kNm} \quad (44)$$

Uvjet nosivosti

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

$$61,53 < 100,93 \text{ kNm (61\% iskoristivost)}$$

gdje je:

$$W_{pl,y} = 429,5 \text{ cm}^3 \quad \text{-plastični moment otpora u y smjeru}$$

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

$$\gamma_{M0} = 1,0 \quad \text{-parcijalni koeficijent sigurnosti na otpornost}$$

Interakcija savijanja i tlaka (M-N)

Interakcija savijanja i tlaka određuje se prema izrazu (45):

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

$$84,41 \leq 0,25 \cdot 1264,3$$

$$85,09 < 316,08 \text{ kN} \quad \text{Zadovoljava.}$$

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

$$85,09 \leq \frac{0,5 \cdot 17 \cdot 0,65 \cdot 23,5}{1}$$

$$85,09 > 129,84 \text{ kN} \quad \text{Zadovoljava.} \quad (45)$$

gdje je:

$$N_{Ed} = 84,41 \text{ kN} \quad \text{-računska uzdužna sila}$$

$$N_{pl,Rd} = 1264,3 \text{ kN} \quad \text{-računska otpornost poprečnog presjeka na tlak}$$

$$h_w = 17 \text{ cm} \quad \text{-visina hrpta između pojasnica}$$

$$t_w = 0,65 \text{ cm} \quad \text{-debljina hrpta}$$

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

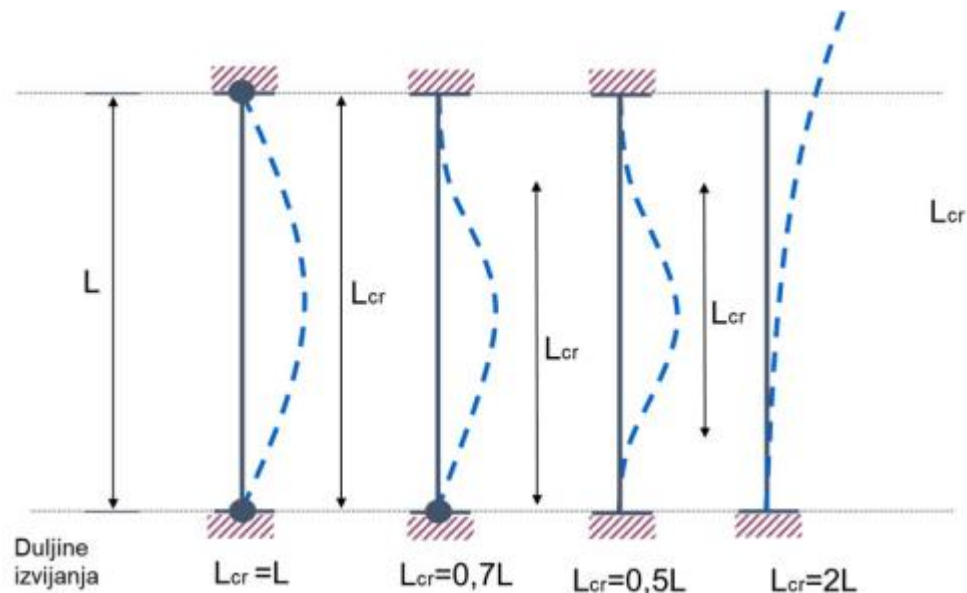
$\gamma_{M0}=1,0$

-parcijalni faktor sigurnosti na otpornost

Uzdužna sila nema utjecaj na otpornost presjeka na savijanje.

Otpornost elementa izloženog djelovanju uzdužne sile i momenta savijanja

Otpornost elementa nosača na izvijanje



Slika 23: Kritična duljina izvijanja L_{cr} [10]

Iz slike se određuje da je kritična duljina izvijanja $L_{cr}=L=5,97$ m.

Otpornost elementa nosača na izvijanje oko osi y

Eulerova kritična duljina izvijanja N_{cr} određuje se prema izrazu (46):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 3692}{597^2} = 2147 \text{ kN} \quad (46)$$

gdje je:

$E=21000$ kN/cm² -modul elastičnosti

$I_y=3692$ cm⁴ -moment inercije

$L_{cr}=5,97$ m -kritična duljina izvijanja

Vitkost elementa λ određuje se prema izrazu (47):

$$\lambda_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{53,8 \cdot 23,5}{2147}} = 0,77 \quad (47)$$

gdje je:

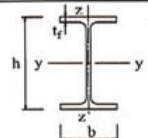
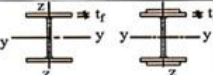

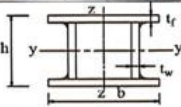
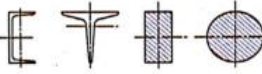

$A=53,8 \text{ cm}^2$ -površina presjeka

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

$N_{cr}=2147 \text{ kN}$ -Eulerova kritična sila izvijanja

Faktor imperfekcije α određuje se pomoću tablice odabira krivulje izvijanja. Odnos visine i širine profila h/b iznosi 0,95 (190/200 mm). To je manje od iznosa 1,2 koji je zadan u tablici za odabir krivulje izvijanja. Debljina pojasnice t_f iznosi 10 mm što je manje od 100 mm. Iz donje tablice očita se faktor imperfekcije za dobivenu krivulju b. Faktor imperfekcije oko osi y je $\alpha=0,34$.

Tablica 10:Odabir krivulje izvijanja [10]

Poprečni presjeci	Ograničenja	Izvijanje oko osi	Linija izvijanja		
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
 Vajljani presjeci	$h/b \leq 1,2$ $bb > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a b	a_0 a_0
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	b c	a a
		$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	a a
		$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d d	c c
 Zavareni I profili		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	b c
		$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	c d	c d
 Šuplji presjeci		vruće dogotovljeni	bilo koje	a	a_0
		hladno oblikovani	bilo koje	c	c
 Zavareni sandučasti 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

Faktor izvijanja ϕ se određuje prema izrazu (48):

$$\phi = 0,5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda_y - 0,2) + \lambda_y^2)$$

$$\phi = 0,5 \cdot (1 + 0,34 \cdot (0,77 - 0,2) + 0,77^2) = 0,89 \quad (48)$$

gdje je:

$$\alpha=0,34 \quad \text{-faktor imperfekcije}$$

$$\lambda_y=0,77 \quad \text{-vitkost elementa}$$

Faktor redukcije χ određuje se prema izrazu (49):

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \lambda^2]^{0,5}} = \frac{1}{0,89 + [0,89^2 - 0,77^2]^{0,5}} = 0,75 < 1 \quad (49)$$

gdje je:

$$\phi=0,89 \quad \text{-faktor izvijanja}$$

$$\lambda_y=0,77 \quad \text{-vitkost elementa}$$

Otpornost elementa nosača na izvijanje oko osi z

Eulerova kritična sila izvijanja N_{cr} određuje se prema izrazu (50):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 1336}{5,97^2} = 776,92 \text{ kN} \quad (50)$$

gdje je:

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

$$I_z=1336 \text{ cm}^4 \quad \text{-moment inercije oko osi z}$$

$$L_{cr}=5,97 \text{ m} \quad \text{-kritična duljina izvijanja}$$

Vitkost elementa λ određuje se prema izrazu (51):

$$\lambda_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{53,8 \cdot 23,5}{776,92}} = 1,28 \quad (51)$$

gdje je:

$$A=53,8 \text{ cm}^2 \quad \text{-površina poprečnog presjeka}$$

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

$N_{cr}=776,92 \text{ kN}$ -Eulerova kritična sila izvijanja oko osi z

Faktor izvijanja ϕ se određuje prema izrazu (52):

$$\phi = 0,5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda_z - 0,2) + \lambda_z^2)$$

$$\phi = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (1,28 - 0,2) + 1,28^2) = 1,58 \quad (52)$$

gdje je:

$\alpha=0,49$ -faktor imperfekcije

$\lambda_z=1,28$ -vitkost elementa

Faktor redukcije χ određuje se prema izrazu (53):

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \lambda^2]^{0,5}} = \frac{1}{1,58 + [1,58^2 - 1,28^2]^{0,5}} = 0,4 < 1 \quad (53)$$

gdje je:

$\phi=1,58$ -faktor izvijanja

$\lambda_z=1,28$ -vitkost elementa

$$\chi = \min(0,75; 0,4) = 0,4$$

Otpornost tlačnog elementa na izvijanje $N_{b,Rd}$ određuje se prema izrazu (54):

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,4 \cdot \frac{53,8 \cdot 23,5}{1} = 505,72 \text{ kN} \quad (54)$$

Uvjet nosivosti:

$$N_{ed} \leq N_{b,Rd}$$

$$84,41 < 505,72 \text{ kN (17% iskoristivost)}$$

gdje je:

$\chi=0,4$ -faktor redukcije

$A=53,8 \text{ cm}^2$ -površina presjeka

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

$\gamma_{M1}=1,0$ -parcijalni koeficijent sigurnosti

Otpornost elementa nosača na bočno torzijsko izvijanje

Elastični kritični moment bočnog torzijskog izvijanja određuje se prema izrazu (55):

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right]$$
$$M_{cr} = 2,57 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 1336}{(1 \cdot 597)^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \cdot \frac{108000}{1336} + \frac{(1 \cdot 597)^2 \cdot 8077 \cdot 20,98}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 1336} + (1,55 \cdot 9,5)^2} - 1,55 \cdot 9,5 \right]$$
$$M_{cr} = 15945 \text{ kNcm} = 159,45 \text{ kNm} \quad (55)$$

gdje je:

$C_1=2,57$ -faktor za izračun kritičnog momenta bočno-torzijskog izvijanja

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

$I_z=1336 \text{ cm}^4$ -moment inercije u z smjeru

$L=597 \text{ cm}$ -razmak točaka bočnog pridržanja

$k, k_w=1$ -faktori krivljenja

$I_w=108000 \text{ cm}^6$ -konstanta krivljenja

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

$I_t=20,98 \text{ cm}^3$ -torzijska konstanta

$C_2=1,55$ -faktor za izračun kritičnog momenta bočno-torzijskog izvijanja

$z_g=9,5 \text{ cm}$ -razmak između centra posmika i točke djelovanja opterećenja

Bezdimenzijska vitkost elementa λ_{LT} određuje se prema izrazu (56):

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{w_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{429,5 \cdot 23,5}{15945}} = 0,8 \quad (56)$$

gdje je:

$W_y=429,5 \text{ cm}^3$ -moment otpora u smjeru y

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

$M_{cr}=15945 \text{ kNcm}$ -elastični kritični moment bočno-torzijskog izvijanja

Faktor imperfekcije α_{LT} iznosi 0,21 zato što valjani H profil spada u razred a.

Tablica 11: Faktor imperfekcije α_{LT} zavisno od krivulje izvijanja [10]

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

Faktor bočnog torzijskog izvijanja ϕ_{LT} određuje se prema izrazu (57):

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT}(\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,21 \cdot (0,8 - 0,2) + 0,8^2) = 0,88 \quad (57)$$

gdje je:

$\alpha_{LT}=0,21$ -faktor imperfekcije

$\lambda_{LT}=0,8$ -vitkost elementa

Faktor redukcije χ_{LT} određuje se prema izrazu (58):

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = \frac{1}{0,88 + \sqrt{0,88^2 - 0,8^2}} = 0,80 \quad (58)$$

gdje je:

$\phi_{LT}=0,88$ -faktor bočno torzijskog izvijanja

$\lambda_{LT}=0,8$ -vitkost elementa

Otpornost elementa na bočno torzijsko izvijanje $M_{b,Rd}$ određuje se prema izrazu (59):

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,8 \cdot \frac{429,5 \cdot 23,5}{1} = 8074,6 \text{ kNcm} = 80,75 \text{ kNm} \quad (59)$$

Uvjet nosivosti:

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

$$61,53 \text{ kNm} \leq 80,75 \text{ kNm} \text{ (76\% iskoristivost)}$$

gdje je:

$$\chi_{LT}=0,8 \quad \text{-faktor redukcije}$$

$$W_y=429,5 \text{ cm}^3 \quad \text{-moment otpora}$$

$$f_y=235 \text{ N/mm}^2 \quad \text{-granica popuštanja čelika}$$

$$\gamma_{M1}=1 \quad \text{-parcijalni koeficijent sigurnosti}$$

Interakcija izvijanja i savijanja elementa nosača (M-N)

Interakcijski faktori za klase 1 i 2 određuju se prema izrazu (60):

$$k_{yy} = c_{my} \cdot \left[1 + (\lambda_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \geq C_{my} \cdot \left[1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right]$$

Za $\lambda_z=1,28 > 0,4$:

$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1 \cdot \lambda_z}{(C_{mLT}-0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT}-0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right]$$

$$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = -0,73$$

$$\psi = \frac{15,68}{61,53} = 0,25$$

$$C_{my} = 0,1 \cdot (1 - \psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$$

$$C_{mLT} = 0,1 \cdot (1 - \psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$$

$$C_{my} = 0,1 \cdot (1 - 0,25) + 0,8 \cdot 0,73 = 0,66 > 0,4$$

$$C_{mLT} = 0,1 \cdot (1 - 0,25) + 0,8 \cdot 0,73 = 0,66 > 0,4$$

$$k_{yy} = 0,66 \cdot \left[1 + (0,77 - 0,2) \cdot \frac{84,41}{0,75 \cdot \frac{5057,2}{1}} \right] \geq 0,66 \cdot \left[1 + 0,8 \cdot \frac{84,41}{0,75 \cdot \frac{5057,2}{1}} \right]$$

$$k_{yy} = 0,668 > 0,672$$

$$k_{yy}=0,67$$

$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1 \cdot 1,28}{(0,66-0,25)} \cdot \frac{84,41}{0,4 \cdot \frac{5057,2}{1}} \right] \geq \left[1 - \frac{0,1}{(0,66-0,25)} \cdot \frac{84,41}{0,4 \cdot \frac{5057,2}{1}} \right]$$

$$k_{zy} = 0,99 < 0,99$$

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

(60)

Interakcija izvijanja i savijanja nosača određuje se prema izrazu (61):

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M0}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M0}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M0}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M0}}} \leq 1$$

$$\frac{84,41}{0,75 \cdot \frac{5057,2}{1}} + 0,67 \cdot \frac{61,53}{0,8 \cdot \frac{100,93}{1}} \leq 1$$

$$0,53 < 1$$

$$\frac{84,41}{0,4 \cdot \frac{5057,2}{1}} + 0,99 \cdot \frac{61,53}{0,8 \cdot \frac{100,93}{1}} \leq 1$$

$$0,8 < 1$$

(61)

gdje je:

$N_{Ed}=84,41$ kN -računska uzdužna sila

$\chi_y=0,75$ -faktor redukcije izvijanja oko osi y

$\chi_z=0,4$ - faktor redukcije izvijanja stupa oko osi z

$\chi_{LT}=0,8$ - faktor redukcije za bočno torzijsko izvijanje

$N_{Rk}=505,72$ kN -karakteristična otpornost elementa na izvijanje

$\gamma_{M0}=1,0$ -parcijalni faktor sigurnosti

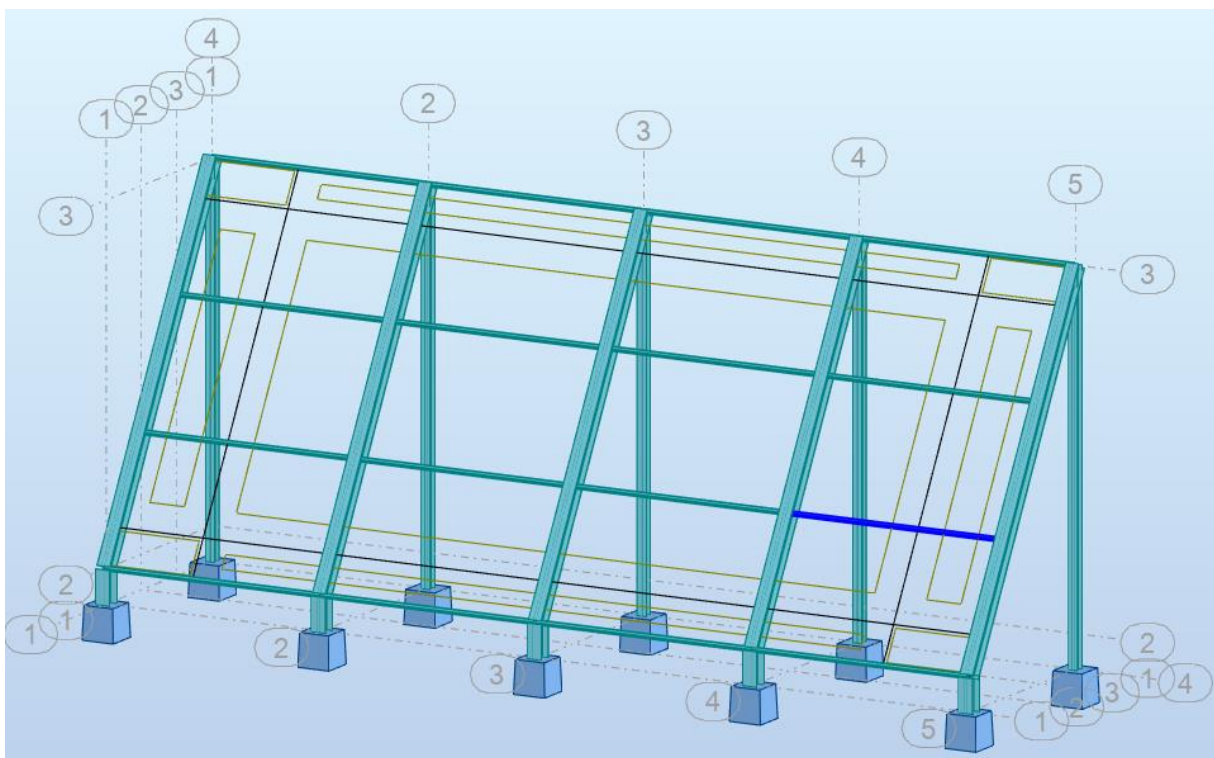
$k_{zy}=0,99, k_{yy}=0,67$ -interakcijski faktori

$M_{y,Ed}=61,53$ kNm -računski moment savijanja

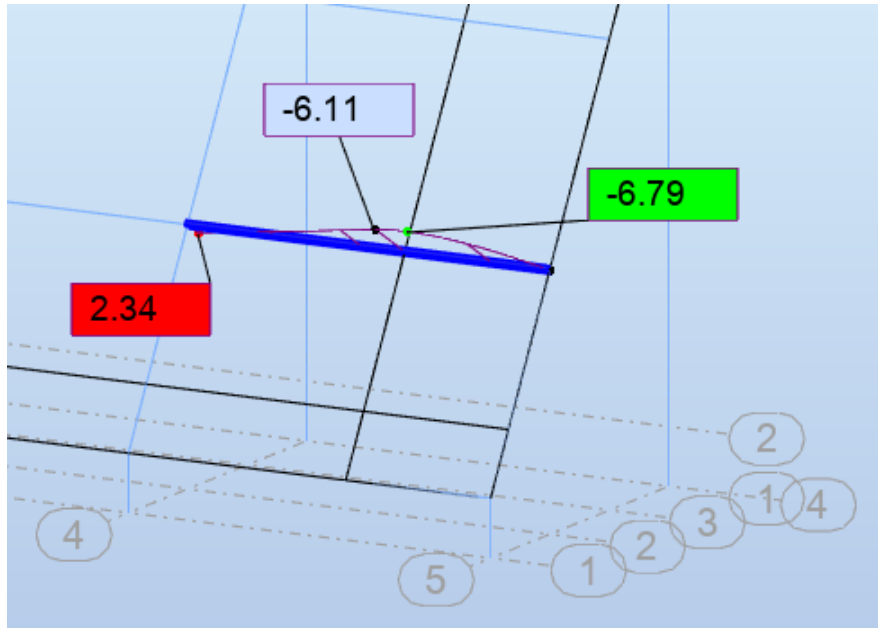
$M_{y,Rk}=100,93$ kNm -karakteristična otpornost elementa na bočno torzijsko izvijanje

Podrožnica

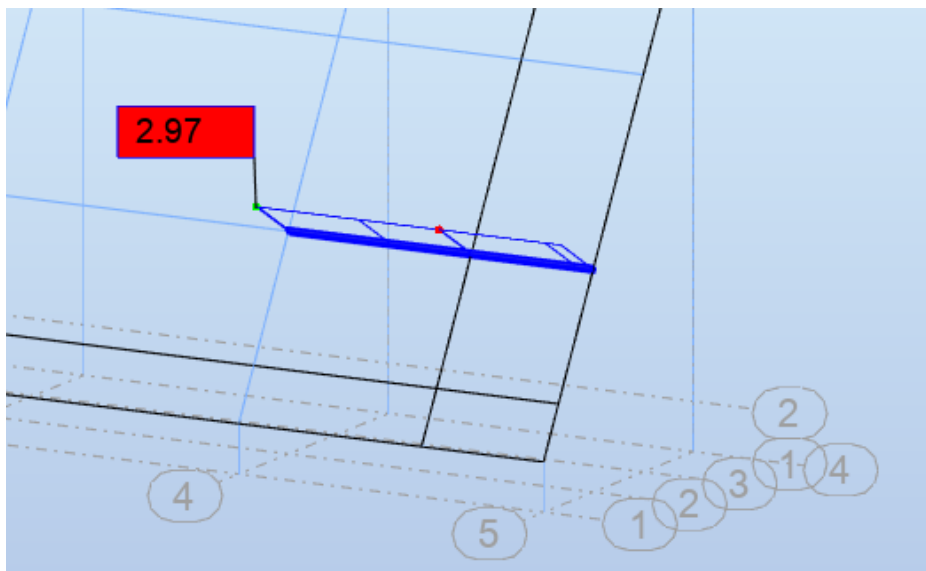
Za podrožnicu koristimo kvadratni cijevni profil dimenzija 90x50x5 mm klase čelika S235.



Slika 24: Najopterećenija podrožnica za 9. kombinaciju djelovanja GSN

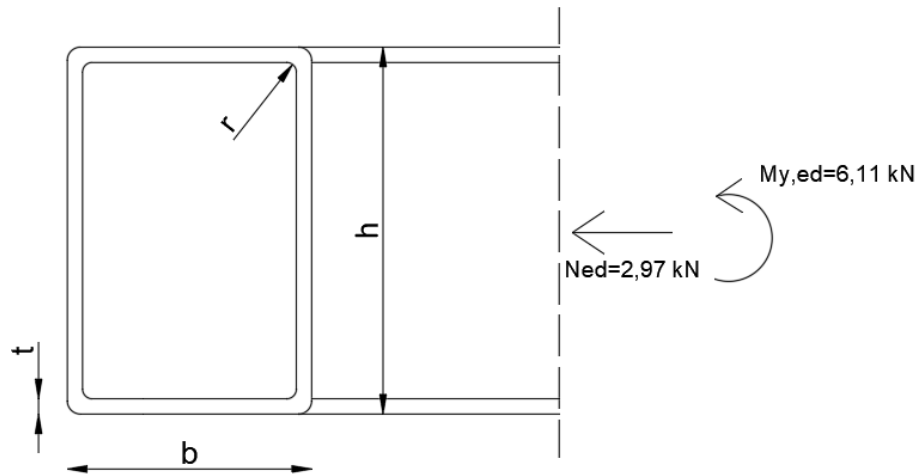


Slika 25: Momentno opterećenje na podrožnicu



Slika 26: Opterećenje uzdužnom silom na podrožnicu

TREC 90x50x5



Karakteristike poprečnog presjeka:

$$h=90 \text{ mm} \quad I_y=127,22 \text{ cm}^4$$

$$b=50 \text{ mm} \quad W_{pl,y}=35,99 \text{ cm}^3$$

$$t=5 \text{ mm} \quad I_t=116 \text{ cm}^4$$

$$r=5 \text{ mm} \quad I_w=37,75 \text{ cm}^6$$

$$A=12,73 \text{ cm}^2 \quad I_z=49,20 \text{ cm}^4$$

Svojstva čelika:

$$E=210\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$G=81\,000 \text{ MPa}$$

$$\nu=0,3$$

$$\rho=7850 \text{ kg/m}^3$$

$$f_y=235 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u=360 \text{ N/mm}^2$$

Klasifikacija poprečnog presjeka

Klasifikacija hrpta podrožnice

Ravan dio hrpta c određuje se prema izrazu (62):

$$c = h - 3 \cdot t = 90 - 3 \cdot 5 = 75 \text{ mm} \quad (62)$$

gdje je:

$h=90 \text{ mm}$ -visina profila

$t=5 \text{ mm}$ -debljina pojasnice

Proračun α za interakciju momenta savijanja i tlačne sile određuje se prema izrazu (63):

$$a = \frac{N_{Ed}}{2 \cdot t \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{2,97}{2 \cdot 0,5 \cdot \frac{23,5}{1}} = 0,13 \text{ cm}$$

$$\alpha = \frac{1}{c} \cdot \left(\frac{c}{2} + a \right) = \frac{1}{7,5} \cdot \left(\frac{7,5}{2} + 0,13 \right) = 0,52 \quad (63)$$

Klasifikacija hrpta na savijanje i tlak određuje se prema izrazu (64):

$$\frac{c}{t} \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{(13 \cdot \alpha - 1)} \quad (64)$$

$$\frac{75}{5} \leq \frac{396 \cdot 1}{(13 \cdot 0,52 - 1)}$$

$15 < 68,75$ Hrbat je klasa 1.

gdje je:

$c=75 \text{ mm}$ -ravni dio hrpta

$t=5 \text{ mm}$ -debljina hrpta

$\alpha=0,52$ -proračun α

$\varepsilon=1,0$ -izduženje čelika

Klasifikacija pojasnice podrožnice

Širina opterećenog dijela pojasnice c određuje se prema izrazu (65):

$$c = b - 3 \cdot t = 50 - 3 \cdot 5 = 35 \text{ mm} \quad (65)$$

gdje je:

$c=35$ mm -širina opterećenog dijela pojasnice

$b=50$ mm -širina profila

$t=5$ mm -debljina hrpta

Klasifikacija donje pojasnice na tlak određuje se prema izrazu (66):

$$\frac{c}{t} 33 \cdot \varepsilon \quad (66)$$

$$\frac{35}{5} \leq 9 \cdot 1$$

$7 < 9$ Pojasnica je klasa 1.

Otpornost poprečnog presjeka

Otpornost poprečnog presjeka podrožnice na tlak

Otpornost poprečnog presjeka na tlak za klasu 1 određuje se prema izrazu (67):

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{12,73 \cdot 235}{1} = 299,16 \text{ kN} \quad (67)$$

Uvjet nosivosti:

$$N_{Ed} \leq N_{c,Rd}$$

$$2,97 \leq 299,16 \text{ kN}$$

$$0,001 < 1 \text{ (0,1\% iskoristivost)}$$

gdje je:

$N_{c,Rd}=299,16$ kN -računska otpornost presjeka

$N_{Ed}=2,97$ kN -računska uzdužna sila

$A=12,73$ cm² -površina presjeka

$f_y=235$ MPa -granica popuštanja čelika

$\gamma_{M0}=1,0$ -parcijalni koeficijent sigurnosti

Otpornost poprečnog presjeka izloženog savijanju

Otpornost poprečnog presjeka nosača na savijanje određuje se prema izrazu (68):

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{35,99 \cdot 23,5}{1} = 845,77 \text{ kNm} \quad (68)$$

Uvjet nosivosti

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

$$6,11 < 845,77 \text{ kNm (0,7\% iskoristivost)}$$

gdje je:

$$W_{pl,y} = 35,99 \text{ cm}^3 \quad \text{-plastični moment otpora u y smjeru}$$

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

$$\gamma_{M0} = 1,0 \quad \text{-parcijalni koeficijent sigurnosti}$$

Interakcija savijanja i tlaka (M-N)

Interakcija savijanja i tlaka određuje se prema izrazu (69):

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

$$2,97 \leq 0,25 \cdot 299,16$$

$$2,97 < 74,79 \text{ kN} \quad \text{Zadovoljava.}$$

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

$$2,97 \leq \frac{0,5 \cdot 8 \cdot 0,5 \cdot 23,5}{1}$$

$$2,97 < 47 \text{ kN} \quad \text{Zadovoljava.} \quad (69)$$

gdje je:

$$N_{Ed} = 2,97 \text{ kN} \quad \text{-računska uzdužna sila}$$

$N_{pl,Rd}=299,16 \text{ kN}$	-računska otpornost poprečnog presjeka na tlak
$h_w=8 \text{ cm}$	-visina hrpta između pojasnica
$t_w=0,5 \text{ cm}$	-debljina hrpta
$f_y=23,5 \text{ kN/cm}^2$	-granica popuštanja čelika
$\gamma_{M0}=1,0$	-parcijalni faktor sigurnosti

Otpornost elementa izloženog djelovanju uzdužne sile i momenta savijanja

Otpornost elementa stupa na izvijanje

Kritična duljina izvijanja L_{cr} iznosi 3,38 m.

Otpornost elementa stupa na izvijanje oko osi y

Eulerova kritična duljina izvijanja N_{cr} određuje se prema izrazu (70):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 127,22}{338^2} = 230,8 \text{ kN} \quad (70)$$

gdje je:

$E=21000 \text{ kN/cm}^2$	-modul elastičnosti
$I_y=127,22 \text{ cm}^4$	-moment inercije
$L_{cr}=3,38 \text{ m}$	-kritična duljina izvijanja

Vitkost elementa λ određuje se prema izrazu (71):

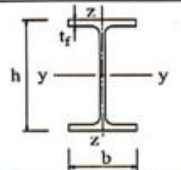
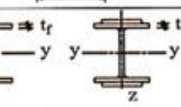

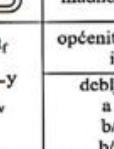

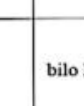
$$\lambda_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{12,73 \cdot 23,5}{230,8}} = 1,14 \quad (71)$$

gdje je:

$A=12,73 \text{ cm}^2$	-površina presjeka
$f_y=23,5 \text{ kN/cm}^2$	-granica popuštanja čelika
$N_{cr}=230,8 \text{ kN}$	-Eulerova kritična sila izvijanja

Odnos visine i širine profila h/b iznosi 1,8 (90/50 mm). To je veće od iznosa 1,2 koji je zadan u tablici za odabir krivulje izvijanja. Debljina pojasnice t iznosi 5 mm što je manje od 40 mm. Iz donje tablice očita se faktor imperfekcije za dobivenu krivulju a . Faktor imperfekcije oko osi y je $\alpha=0,21$.

Tablica 12: Odabir krivulje izvijanja [10]

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

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

Faktor izvijanja ϕ se određuje prema izrazu (72):

$$\phi = 0,5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda_y - 0,2) + \lambda_y^2)$$

$$\phi = 0,5 \cdot (1 + 0,21 \cdot (1,14 - 0,2) + 1,14^2) = 1,25 \quad (72)$$

gdje je:

$\alpha=0,21$ -faktor imperfekcije

$\lambda_y=1,14$ -vitkost elementa

Faktor redukcije χ određuje se prema izrazu (73):

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \lambda^2]^{0,5}} = \frac{1}{1,25 + [1,25^2 - 1,14^2]^{0,5}} = 0,57 < 1 \quad (73)$$

gdje je:

$\phi=1,25$ -faktor izvijanja

$\lambda_y=1,14$ -vitkost elementa

Otpornost elementa stupa na izvijanje oko osi z

Eulerova kritična sila izvijanja N_{cr} određuje se prema izrazu (74):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 49,2}{338^2} = 89,26 \text{ kN} \quad (74)$$

gdje je:

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

$I_z=49,2 \text{ cm}^4$ -moment inercije oko osi z

$L_{cr}=3,38 \text{ m}$ -kritična duljina izvijanja

Vitkost elementa λ određuje se prema izrazu (75):

$$\lambda_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{12,73 \cdot 23,5}{89,26}} = 1,83 \quad (75)$$

gdje je:

$A=12,73 \text{ cm}^2$ -površina presjeka

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

$N_{cr}=89,26 \text{ kN}$ -Eulerova kritična sila izvijanja oko osi z

Faktor izvijanja ϕ se određuje prema izrazu (76):

$$\phi = 0,5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda_z - 0,2) + \lambda_z^2)$$

$$\phi = 0,5 \cdot (1 + 0,34 \cdot (1,83 - 0,2) + 1,83^2) = 2,45 \quad (76)$$

gdje je:

$\alpha=0,34$ -faktor imperfekcije

$\lambda_z=1,83$ -vitkost elementa

Faktor redukcije χ određuje se prema izrazu (77):

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \lambda^2]^{0,5}} = \frac{1}{2,45 + [2,45^2 - 1,83^2]^{0,5}} = 0,25 < 1 \quad (77)$$

gdje je:

$\phi=2,45$ -faktor izvijanja

$\lambda_z=1,83$ -vitkost elementa

$$\chi = \min(0,57; 0,25) = 0,25$$

Otpornost tlačnog elementa na izvijanje $N_{b,Rd}$ određuje se prema izrazu (78):

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,25 \cdot \frac{12,73 \cdot 23,5}{1} = 74,79 \text{ kN} \quad (78)$$

Uvjet nosivosti:

$$N_{ed} \leq N_{b,Rd}$$

$$2,97 < 74,79 \text{ kN (4\% iskoristivost)}$$

gdje je:

$\chi=0,25$ -faktor redukcije

$A=12,73 \text{ cm}^2$ -površina presjeka

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

$\gamma_{M1}=1,0$ -parcijalni koeficijent sigurnosti

4.4.2. Granično stanje uporabljivosti

Za granično stanje uporabljivosti provjeravani su progibi i pomaci elemenata konstrukcije nadstrešnice pomoću programa Robot Structural Analysis Professional. Proračuni dopuštenih pomaka i progiba provedeni su prema normi EN 1993-1-1:2005 [10].

Dopušteni pomak stupa određuje se prema izrazu (79):

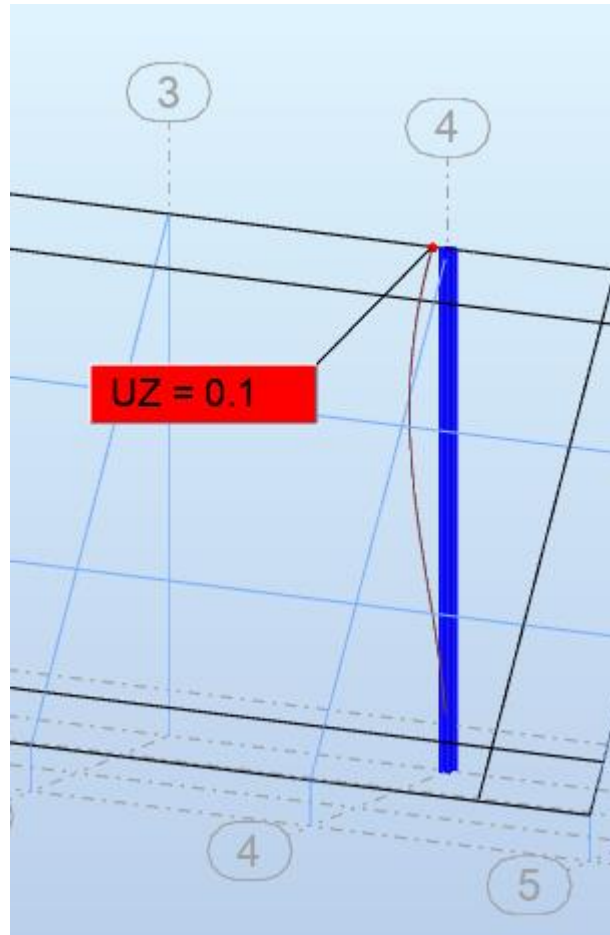
$$p_1 = \frac{L}{150} = \frac{567}{150} = 3,78 \text{ cm}$$

$$p = 0,1 \text{ cm} < 3,78 \text{ cm} \quad (79)$$

gdje je:

L=567 cm -visina stupa

p=0,1 cm -pomak u stupu



Slika 27: Pomak stupa (13. kombinacija djelovanja GSU)

Dopušteni progib nosača određuje se prema izrazu (80):

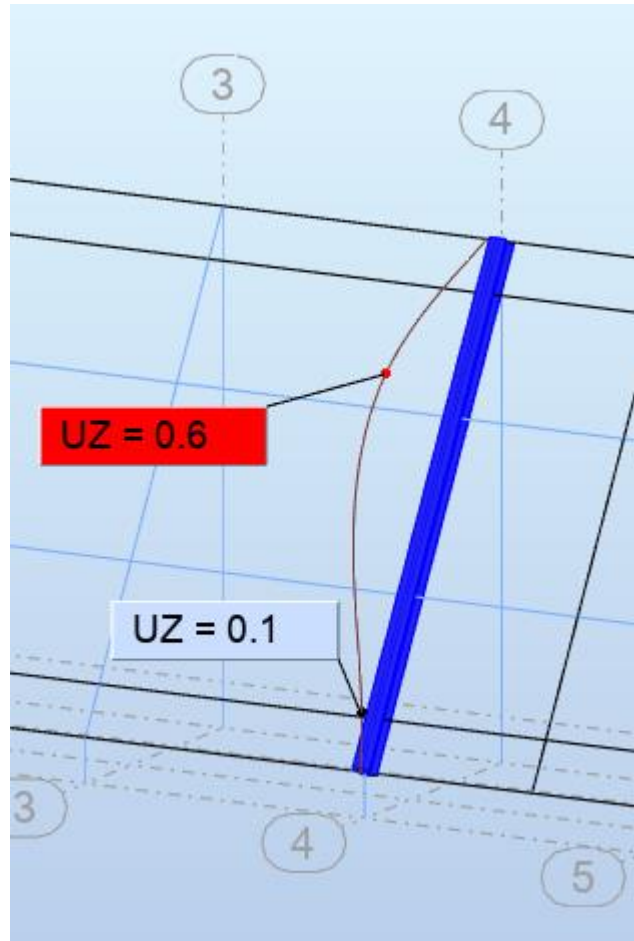
$$p_1 = \frac{L}{200} = \frac{597}{200} = 3 \text{ cm}$$

$$p = 0,6 \text{ cm} < 3 \text{ cm} \tag{80}$$

gdje je:

L=597 cm -raspon nosača

p=0,6 cm -progib nosača



Slika 28: Progib nosača (13. kombinacija djelovanja GSU)

Dopušteni progib podrožnice određuje se prema izrazu (81):

$$p_1 = \frac{L}{200} = \frac{338}{200} = 1,69 \text{ cm}$$

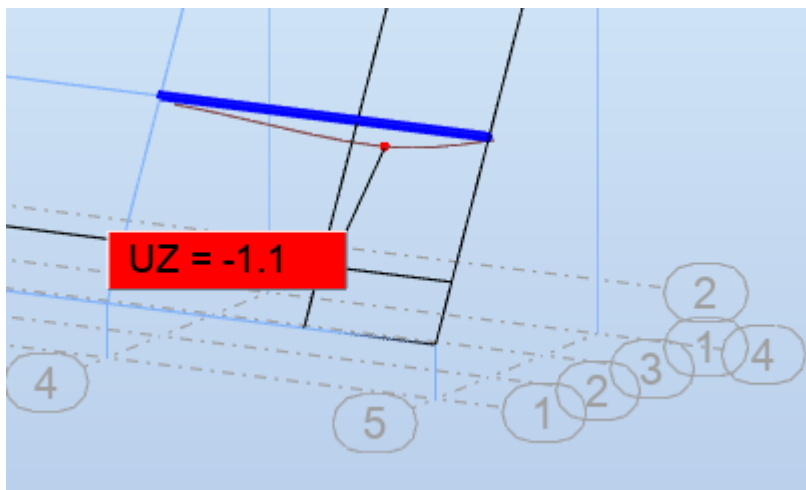
$$p = 1,1 \text{ cm} < 1,69 \text{ cm}$$

(81)

gdje je:

$L=338 \text{ cm}$ -raspon podrožnice

$p=1,1 \text{ cm}$ -progib podrožnice



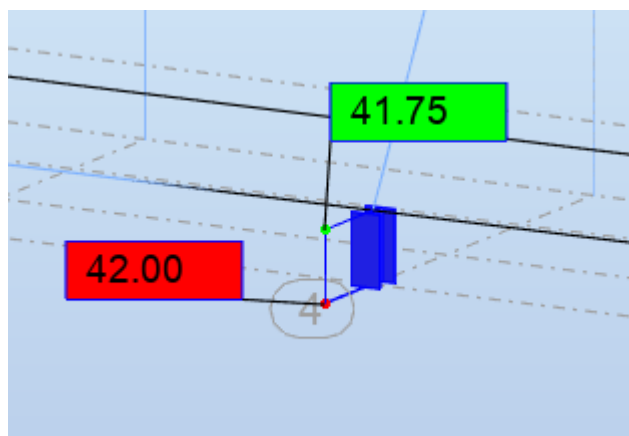
Slika 29: Progib podrožnice (8. kombinacija djelovanja GSU)

4.5. Proračun spojeva čelične konstrukcije

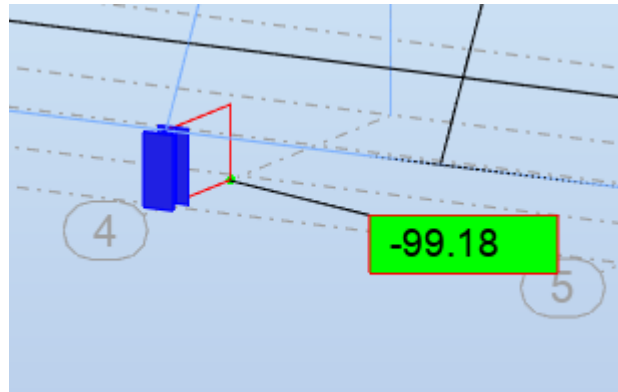
Provedene su provjere nosivosti vijaka i zavora na priključku stupa na AB temelj te provjere zavora na priključku nosača i stupa.

4.5.1. Priključak stupa na AB temelj

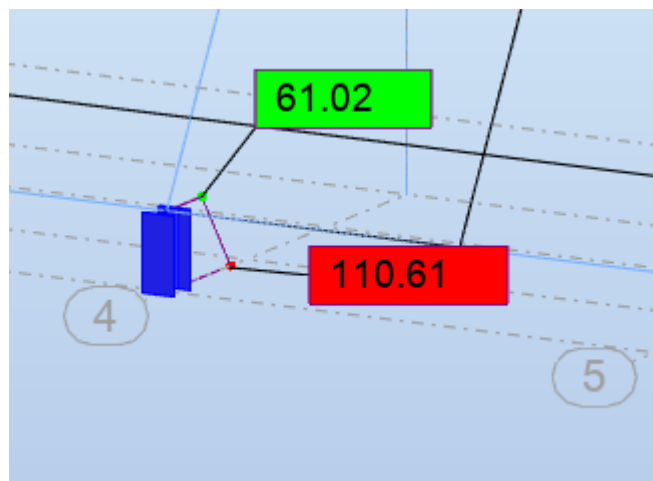
Sile u stupu koje djeluju na temelj proračunate su pomoću programa Robot Structural Analysis Professional.



Slika 30: Uzdužna sila u priključku stupa na AB temelj (11. kombinacija GSN)



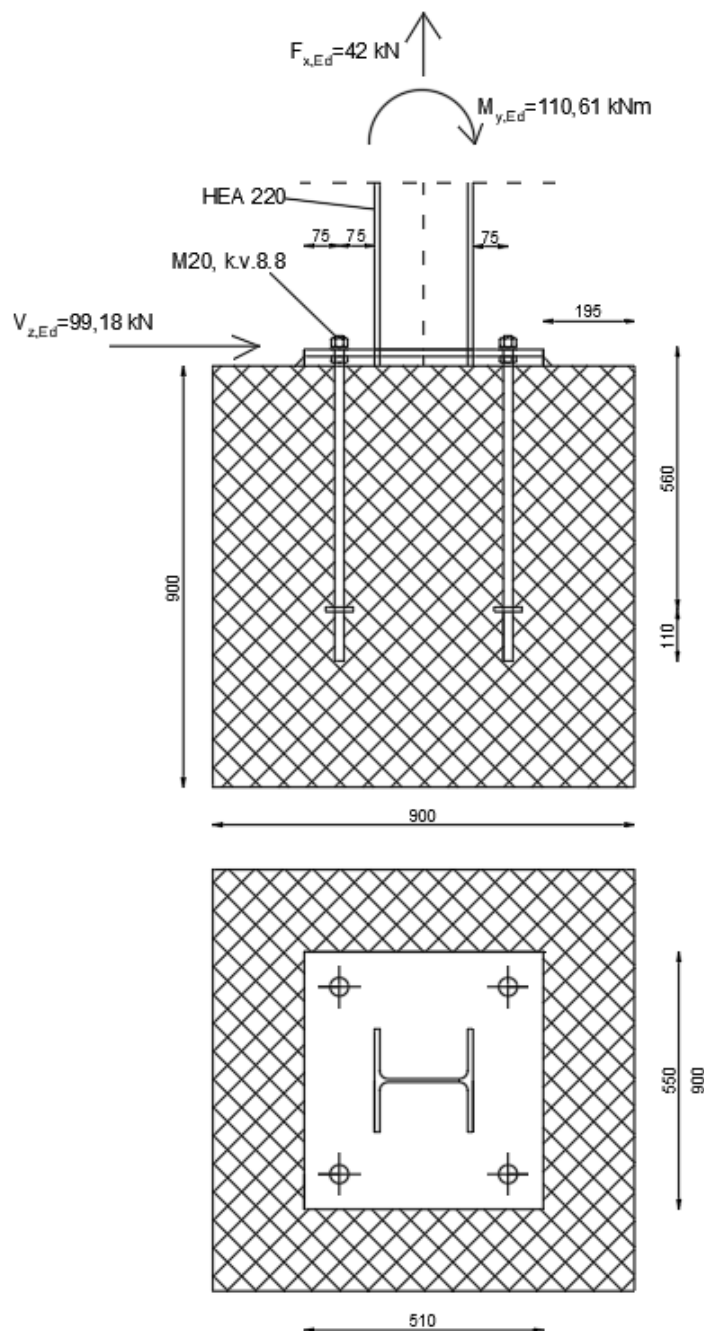
Slika 31: Poprečna sila u priključku stupa na AB temelj (11. kombinacija GSN)



Slika 32: Moment savijanja u priključku stupa na AB temelj (11. kombinacija GSN)

Proračun vijaka i zavora na priključku stupa na AB temelj

Proračun vijaka i zavora na priključku stupa na AB temelj proveden je prema normi HRN EN 1993-1-8 [11]. U spoju se nalazi ukupno 4 vijaka i 1 rezna površina.



Slika 33: Djelovanje sila na priključku stupa na AB temelj

Moment savijanja djeluje kao spreg sila N_1 na kraku x_1 . Lijevi krak sile djeluje vlačno, a desni tlačno.

Krak x_1 određuje se prema izrazu (82):

$$x_1 = 510 - 210 - 75 - \frac{12}{2} = 0,219 \text{ m} \quad (82)$$

Vlačna i tlačna sila N_1 određuje se prema izrazu (83):

$$N_1 = \frac{M_{y,Ed}}{x_1} = \frac{110,61}{0,219} = 505,07 \text{ kN} \quad (83)$$

gdje je:

$M_{y,Ed}=110,61 \text{ kNm}$ -računski moment savijanja

$x_1=0,219 \text{ m}$ -duljina kraka sile

Tablica 13: Određivanje računске otpornosti za vijak [11]

Način otkazivanja	Otpornost za jedan vijak
otpornost na posmik	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}}$ <p>1) kada posmična površina prolazi kroz dio vijka s navojem (A je vlačna površina vijka A_s) $\alpha_v = 0,6 \rightarrow$ za k.v. 4.6, 5.6 i 8.8 $\alpha_v = 0,5 \rightarrow$ za k.v. 4.8, 5.8, 6.8 i 10.9.</p> <p>2) kada posmična površina prolazi kroz dio vijka bez navoja (A je ukupna površina poprečnog presjeka vijka) $\alpha_v = 0,6$</p>
otpornost na pritisak po omotaču rupe osnovnog materijala	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$ $\alpha_b = \min\left(\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1\right)$ <p>Koeficijent α_d (u smjeru naprezanja)</p> <ul style="list-style-type: none"> - za krajnje vijke : $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$ - za unutarnje vijke : $\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$ <p>Koeficijent k_1 (okomito na smjer naprezanja)</p> <ul style="list-style-type: none"> - za krajnje vijke : $k_1 = \min\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right)$ - za unutarnje vijke : $k_1 = \min\left(1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right)$
otpornost na vlak	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_t}{\gamma_{M2}}$ <p>$k_2 = 0,63 \rightarrow$ za vijke s upuštenom glavom $k_2 = 0,90 \rightarrow$ za ostale vijke</p>
interakcija posmika i vlaka	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1$

Otpornost vijaka na posmik (odrez)

Otpornost 1 vijaka na posmik $F_{v,Rd}$ određuje se prema izrazu (84):

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 80 \cdot 2,45}{1,25} = 94,08 \text{ kN} \quad (84)$$

gdje je:

$\alpha_v=0,6$ -koeficijent za posmičnu površinu vijka

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

$A=245 \text{ mm}^2$ -površina jezgre vijka

$\gamma_{M2}=1,25$ -parcijalni koeficijent sigurnosti

Otpornost vijaka u spoju $\overline{F_{v,Rd}}$ određuje se prema izrazu (85):

$$\overline{F_{v,Rd}} = n \cdot m \cdot F_{v,Rd} = 4 \cdot 1 \cdot 94,08 = 376,32 \text{ kN} \quad (85)$$

Uvjet nosivosti spoja:

$$V_{z,Ed} \leq \overline{F_{v,Rd}}$$

$$99,18 \leq 376,32 \quad (26\% \text{ iskoristivost})$$

gdje je:

$n=4$ -broj vijaka

$m=1$ -broj reznih površina

$F_{v,Rd}=94,08 \text{ kN}$ -otpornost jednog vijaka na posmik

Otpornost na pritisak po omotaču rupe osnovnog materijala

Koeficijent α_d za krajnje vijke određuje se prema izrazu (86):

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{75}{3 \cdot 22} = 1,14 \quad (86)$$

gdje je:

$e_1=75 \text{ mm}$ -razmak vijaka od ruba paralelno sa djelovanjem sile

$d_0=22$ mm -promjer rupe za vijak

Koeficijent k_1 za krajnje vijke određuje se prema izrazu (87):

$$k_1 = \min \left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right) = \min \left(2,8 \cdot \frac{75}{22} - 1,7; 2,5 \right) = \min (9,55; 2,5) = 2,5 \quad (87)$$

gdje je:

$e_2=75$ mm -razmak između vijaka okomito na smjer djelovanja sile

$d_0=22$ mm -promjer rupe za vijak

Koeficijent α_b određuje se prema izrazu (88):

$$\alpha_b = \min \left(\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right) = \min \left(1,14; \frac{800}{360}; 1 \right) = \min (1,14; 2,22; 1) = 1 \quad (88)$$

gdje je:

$\alpha_d=1,14$ -koeficijent za krajnje vijke

$f_{ub}=800$ N/mm² -čvrstoća vijka

$f_u=360$ N/mm² -čvrstoća osnovnog materijala

Otpornost na pritisak po omotaču 1 rupe osnovnog materijala $F_{b,Rd}$ određuje se prema izrazu (89):

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1 \cdot 360 \cdot 2 \cdot 1,5}{1,25} = 216 \text{ kN} \quad (89)$$

gdje je:

$k_1=2,5$ -koeficijent za krajnje vijke

$\alpha_b=1$ -koeficijent za vijke

$f_u=360$ N/mm² -čvrstoća osnovnog materijala

$d=20$ mm -promjer vijka

$t=15$ mm -najtanji lim u spoju

Ukupna otpornost $\overline{F_{b,Rd}}$ određuje se prema izrazu (90):

$$\overline{F_{b,Rd}} = n \cdot F_{b,Rd} = 4 \cdot 216 = 864 \text{ kN} \quad (90)$$

Uvjet nosivosti:

$$V_{z,Ed} \leq \overline{F_{b,Rd}}$$

$$99,18 \leq 864 \quad (11\% \text{ iskoristivost})$$

gdje je:

$n=4$ -broj vijaka u spoju

$\overline{F_{b,Rd}}=865 \text{ kN}$ -otpornost na pritisak po omotaču jedne rupe

Otpornost vijaka na vlak

Otpornost 1 vijka na vlak određuje se prema izrazu (91):

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 80 \cdot 2,45}{1,25} = 141,12 \text{ kN} \quad (91)$$

gdje je:

$k_2=0,9$ -koeficijent za otpornost na vlak za ostale vijke

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

$A_s=245 \text{ mm}^2$ -površina jezgre vijka

$\gamma_{M2}=1,25$ -parcijalni koeficijent sigurnosti

Otpornost za 2 vlačna vijka u spoju određuje se prema izrazu (92):

$$\overline{F_{t,Rd}} = 2 \cdot F_{t,Rd} = 2 \cdot 141,12 = 282,24 \text{ kN} \quad (92)$$

Uvjet nosivosti:

$$N_1 + F_{x,Ed} \leq \overline{F_{t,Rd}}$$

$$547,07 > 282,24 \text{ Ne zadovoljava.}$$

gdje je:

$F_{t,Rd}=141,12 \text{ kN}$ -otpornost 1 vijka na vlak

$N_1=547,07$ kN -vlačna sila koja djeluje na vijke

$F_{x,Ed}=42$ kN -vlačna sila koja djeluje na vijke

Interakcija posmika i vlaka

Interakcija posmika i vlaka određuje se prema izrazu (93):

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{99,18}{94,08} + \frac{547,07}{1,4 \cdot 141,12} \leq 1$$

$3,82 > 1$ Ne zadovoljava. (93)

Proračun zavarenog spoja

Usljed djelovanja poprečne sile $V_{z,Ed}$ svi zavari uz ležajnu ploču su opterećeni.

Vlačna komponenta koja djeluje na zavar N_2 određuje se prema izrazu (94):

$$N_2 = \frac{M_{y,Ed}}{x_2} = \frac{110,61}{0,199} = 555,83 \text{ kN} \quad (94)$$

gdje je:

$M_{y,Ed}=110,61$ kNm -računska nosivost momenta savijanja

$x_2=199$ mm -krak vlačne sile koja djeluje na zavar

Ukupno djelovanje na zavar $F_{w,Ed}$ određuje se prema izrazu (95):

$$F_{w,Ed} = \sqrt{\left(\frac{V_{z,Ed}}{2}\right)^2 + N_2^2} = \sqrt{49,59^2 + 555,83^2} = 558,04 \text{ kN} \quad (95)$$

gdje je:

$V_{z,Ed}=99,18$ kN -računska poprečna sila

$N_2=555,83$ kN -vlačna komponenta koja djeluje na zavar

Otpornost 1 cm zavora određuje se prema izrazu (96):

$$F_{w,Rd} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w} \alpha = \frac{36}{\sqrt{3} \cdot 0,8} \cdot 0,6 = 12,47 \text{ kN} \quad (96)$$

gdje je:

$f_u=360 \text{ N/mm}^2$ -čvrstoća osnovnog materijala

$\beta_w=0,8$ -korelacijski koeficijent

$\gamma_{M2}=1,25$ -parcijalni koeficijent sigurnosti

$a=6 \text{ mm}$ -debljina zavora

Ukupna otpornost zavora $\overline{F_{w,Rd}}$ određuje se prema izrazu (97):

$$\overline{F_{w,Rd}} = F_{w,Rd} \cdot \Sigma L = 12,47 \cdot 54,9 \text{ cm} = 684,6 \text{ kN} \quad (97)$$

Uvjet nosivosti:

$$F_{w,Ed} \leq \overline{F_{w,Rd}}$$

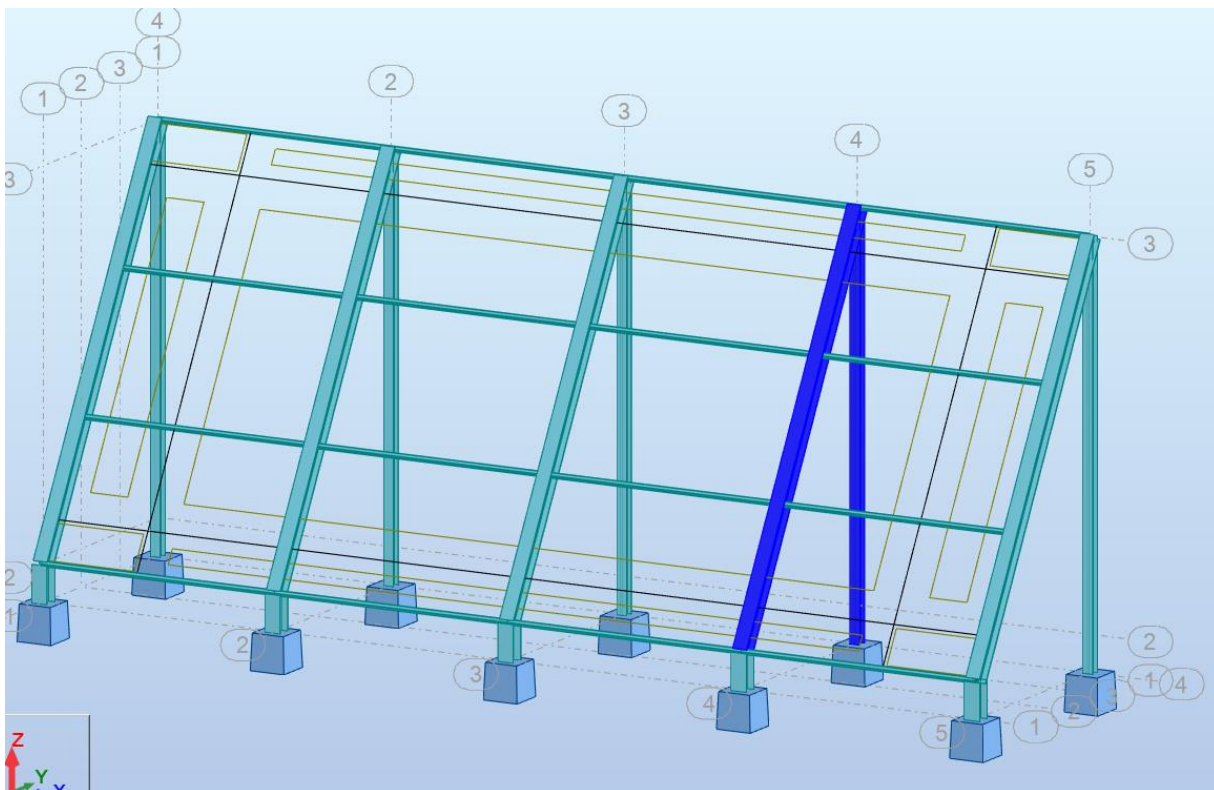
558,04 kN < 684,6 kN Zadovoljava.

gdje je:

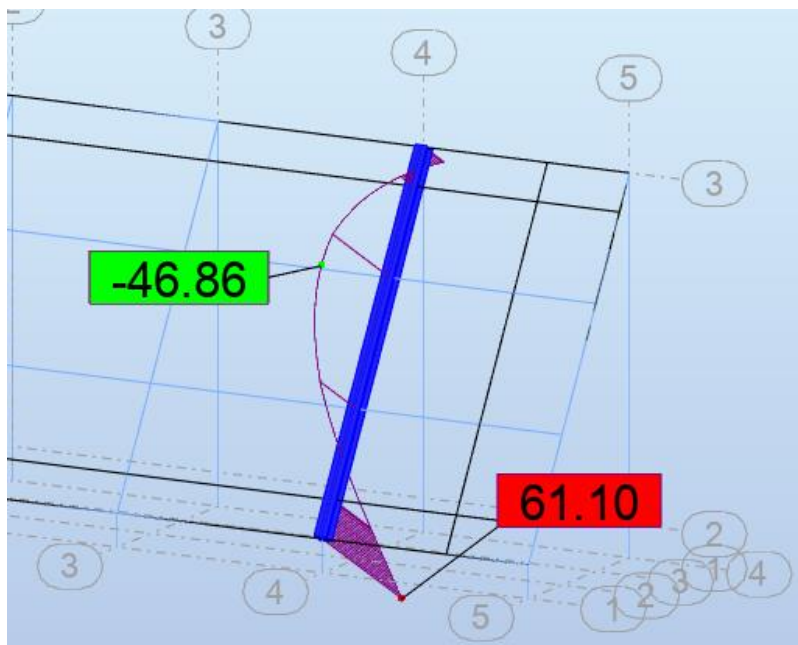
$F_{w,Rd}=12,47 \text{ kN}$ -otpornost 1cm kutnog zavora

$\Sigma L = 54,9 \text{ cm}$ -ukupna duljina zavora

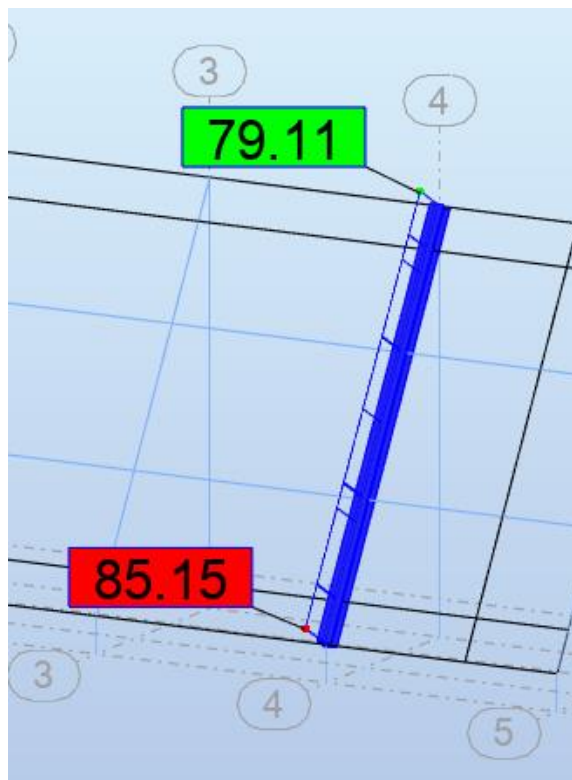
4.5.2. Detalj spoja stupa i nosača



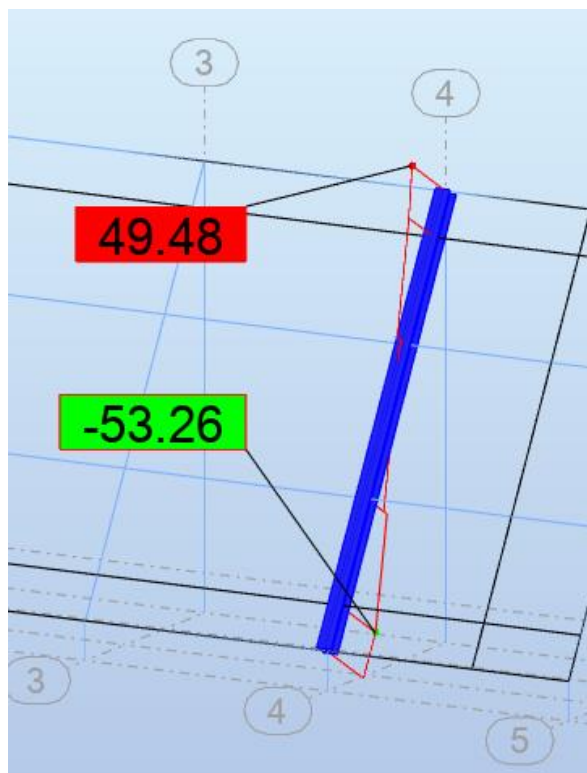
Slika 34: Promatrani spoj na konstrukciji



Slika 35: Moment savijanja u spoju nosača i stupa za 11. kombinaciju GSN



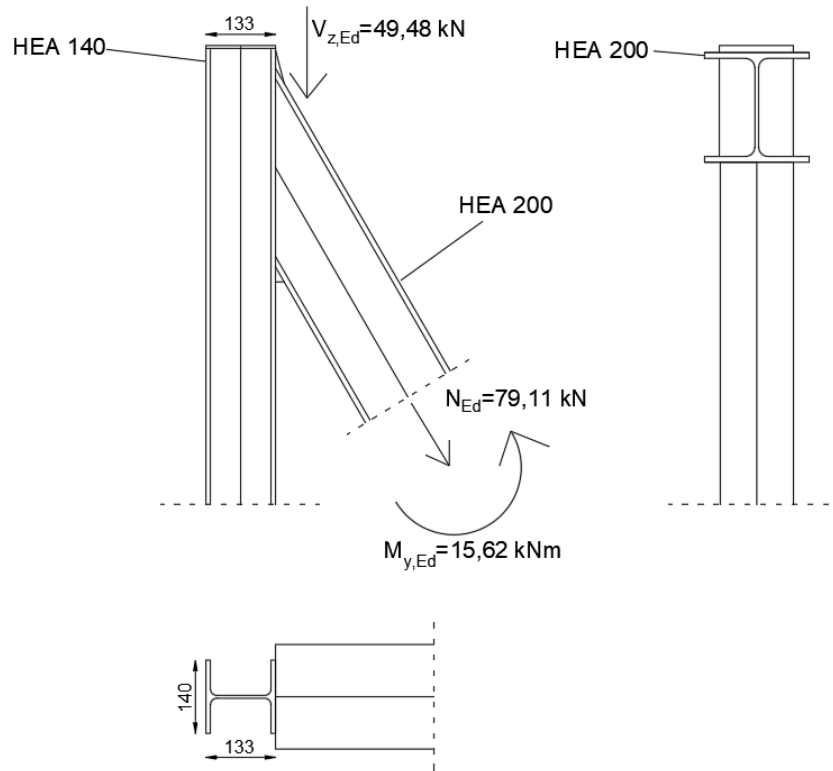
Slika 36: Uzdužna sila u spoju nosača i stupa za 11. kombinaciju GSN



Slika 37: Poprečna sila u spoju nosača i stupa za 11. kombinaciju GSN

Proračun zavarenog spoja

Određuje se djelovanje na zavar i otpornost zavara.



Slika 38: Opterećenja na spoju stup-nosač

Vlačna komponenta N_2 koja djeluje na zavar određuje se prema izrazu (98):

$$N_2 = \frac{M_{y,Ed}}{x_2} = \frac{15,62}{0,18} = 86,78 \text{ kN} \quad (98)$$

gdje je:

$M_{y,Ed} = 15,62 \text{ kNm}$ -računski moment savijanja

$x_2 = 0,18 \text{ m}$ -krak vlačne sile koja djeluje na zavar

Ukupno djelovanje na zavar $F_{w,Ed}$ određuje se prema izrazu (99):

$$F_{w,Ed} = \sqrt{\left(\frac{V_{z,Ed}}{2}\right)^2 + N_2^2 + N_{Ed}^2} = \sqrt{24,74^2 + 86,78^2 + 79,11^2} = 120,01 \text{ kN} \quad (99)$$

gdje je:

$$V_{z,Ed}=49,48 \text{ kN}$$

-računska poprečna sila

$$N_2=86,78 \text{ kN}$$

-vlačna komponenta koja djeluje na zavar

$$N_{Ed}=79,11 \text{ Kn}$$

-vlačna komponenta koja djeluje na zavar

Otpornost 1 cm zavara određuje se prema izrazu (100):

$$F_{w,Rd} = \frac{f_u \cdot a}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{360 \cdot 0,5}{\sqrt{3} \cdot 0,8 \cdot 1,25} = 10,39 \text{ kN} \quad (100)$$

gdje je:

$$f_u=360 \text{ N/mm}^2$$

-čvrstoća osnovnog materijala

$$\beta_w=0,8$$

-korelacijski koeficijent

$$\gamma_{M2}=1,25$$

-parcijalni koeficijent sigurnosti

$$a=5 \text{ mm}$$

-debljina zavara

Ukupna otpornost zavara $\overline{F_{w,Rd}}$ određuje se prema izrazu (101):

$$\overline{F_{w,Rd}} = F_{w,Rd} \cdot \Sigma L = 10,39 \cdot (20 + (20 - 0,65 - 2 \cdot 0,18)) = 405,11 \text{ kN} \quad (101)$$

Uvjet nosivosti:

$$F_{w,Ed} \leq \overline{F_{w,Rd}}$$

120,01 kN < 405,11 kN Zavar je zadovoljio nosivost (30% iskoristivost).

gdje je:

$$F_{w,Rd}=10,39 \text{ kN}$$

-otpornost 1cm kutnog zavara

$$\Sigma L = 38,99 \text{ cm}$$

-ukupna duljina zavara

5. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu prikazan je proračun čelične konstrukcije čija funkcija je pridržavanje solarnih panela na tlu. U obzir su uzeta djelovanja vlastite težine konstrukcije, težine solarnih panela, kao i snijeg i vjetar. Navedene su kombinacije djelovanja za granično stanje nosivosti i granično stanje uporabljivosti. Unutarnje sile elemenata dobivene su pomoću programa Robot Structural Analysis Professional. Provedeno je dimenzioniranje stupa, glavnog nosača i podrožnice. Kod graničnog stanja nosivosti provedene su provjere za klasifikaciju poprečnog presjeka (hrpta i pojasnice), otpornost poprečnog presjeka i otpornost elementa. Pomaci elemenata dobiveni su u programu, a granično stanje uporabljivosti provjeravano je s dopuštenim pomacima za određeni element. Također su riješena dva detalja: priključak stupa na temelj i spoj nosača na stup. Kod detalja stup-temelj provedene su provjere vijaka M20 (otpornost vijaka na posmik, otpornost na pritisak po omotaču rupe osnovnog materijala, otpornost vijaka na vlak i interakcija posmika i vlaka). Na tom spoju je također provedena provjera zavara. Za spoj nosač-stup provedena je samo provjera za zavare zato što se vijci u tom spoju nisu koristili.

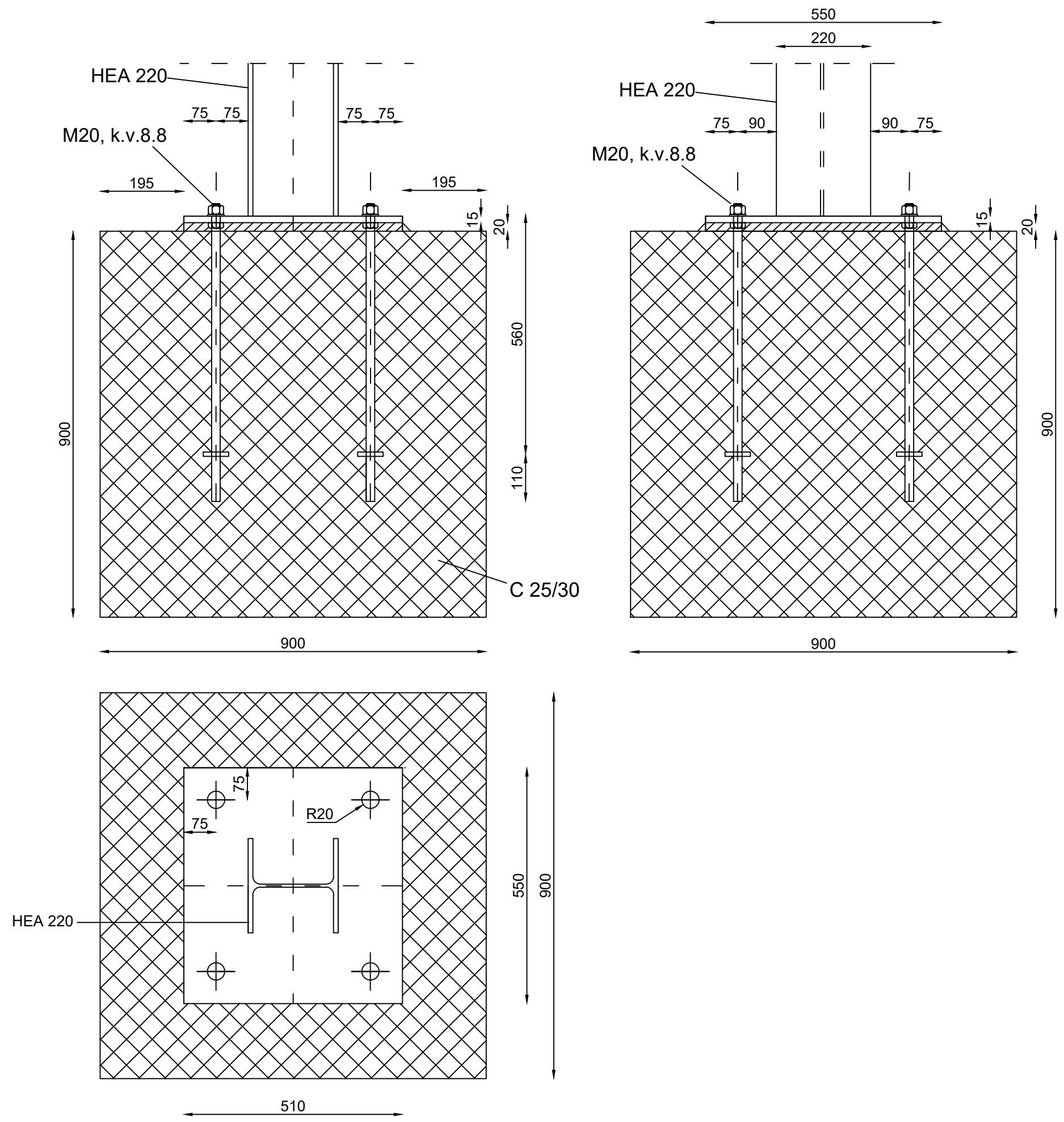
Kod detalja stup-temelj nije zadovoljio uvjet nosivosti za otpornost vijaka na vlak. Zaključak je to da se na tom spoju stave vijci većeg promjera ili visokovrijedni vijci.

6. LITERATURA

- [1] »Solarni paneli i 6 stvari koje trebate znati prije ulaganja,« [Mrežno]. Available: <https://zastita-prirode.hr/clanci/solarni-paneli/>. [Pokušaj pristupa 2. 7. 2023.].
- [2] »Solvis,« [Mrežno]. Available: <https://solvis.hr/en/>. [Pokušaj pristupa 7. 7. 2023.].
- [3] »Eurotim,« [Mrežno]. Available: https://eurotim.com.hr/usluge-poduzeca/solar/?gclid=EAIaIQobChMI38yqi4iigQMVTZGDBx2sKw5fEAAYAAAEgI54PD_BwE. [Pokušaj pristupa 1. 7. 2023.].
- [4] »Grengy Solar,« [Mrežno]. Available: <https://hr.grengysolar.com/ground-mounting-system/double-pole-mounting-system/solar-panels-ground-mounted-systems.html>. [Pokušaj pristupa 6 7 2023].
- [5] »EN 1991-1-3,« Hrvatski zavod za norme.
- [6] »nHRN EN 1991-1-3:2012/NA,« Hrvatski zavod za norme.
- [7] »HRN EN 1991-1-4,« Hrvatski zavod za norme.
- [8] »nHRN EN 1991-1-4:2012/NA,« Hrvatski zavod za norme.
- [9] »Solar Shop,« [Mrežno]. Available: <https://www.solarno.hr/katalog/proizvod/JAM-345W/ja-solar-345w-half-cell-solarni-paneli>. [Pokušaj pristupa 2. 7. 2023.].
- [10] »EN 1993-1-1:2005,« Hrvatski zavod za norme.
- [11] »HRN EN 1993-1-8,« Hrvatski zavod za norme.
- [12] B. Androić, D. Dujmović i I. Džeba , Čelične konstrukcije 2: Numerički primjeri prema EC3, Zagreb: IA PROJEKTIRANJE, 2007.
- [13] »Salvia,« [Mrežno]. Available: <https://kadulja.com/priroda-energija/postavljanje-solarnih-panela/>. [Pokušaj pristupa 2. 7. 2023.].
- [14] »Sunpower,« [Mrežno]. Available: <https://sunpower.maxeon.com/int/blog/solar-basics-how-do-solar-panels-work>. [Pokušaj pristupa 1. 7. 2023.].

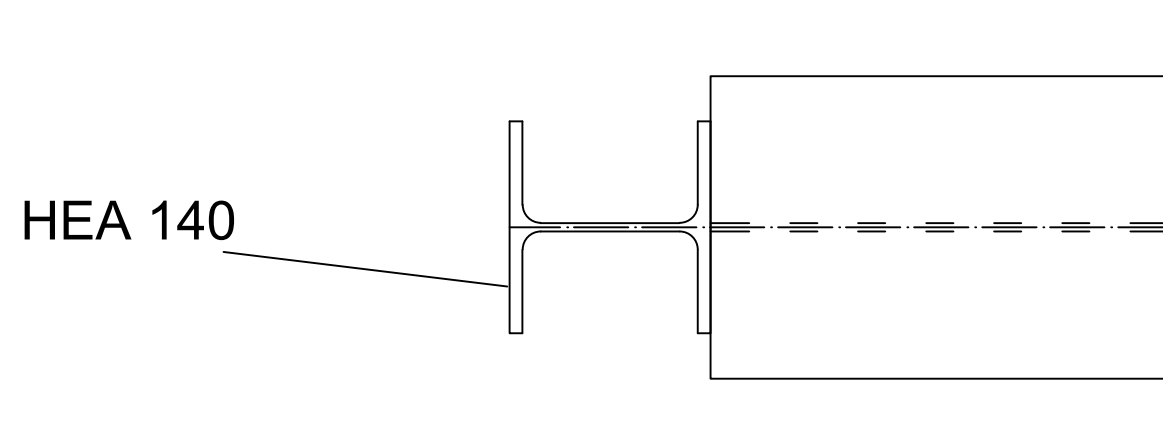
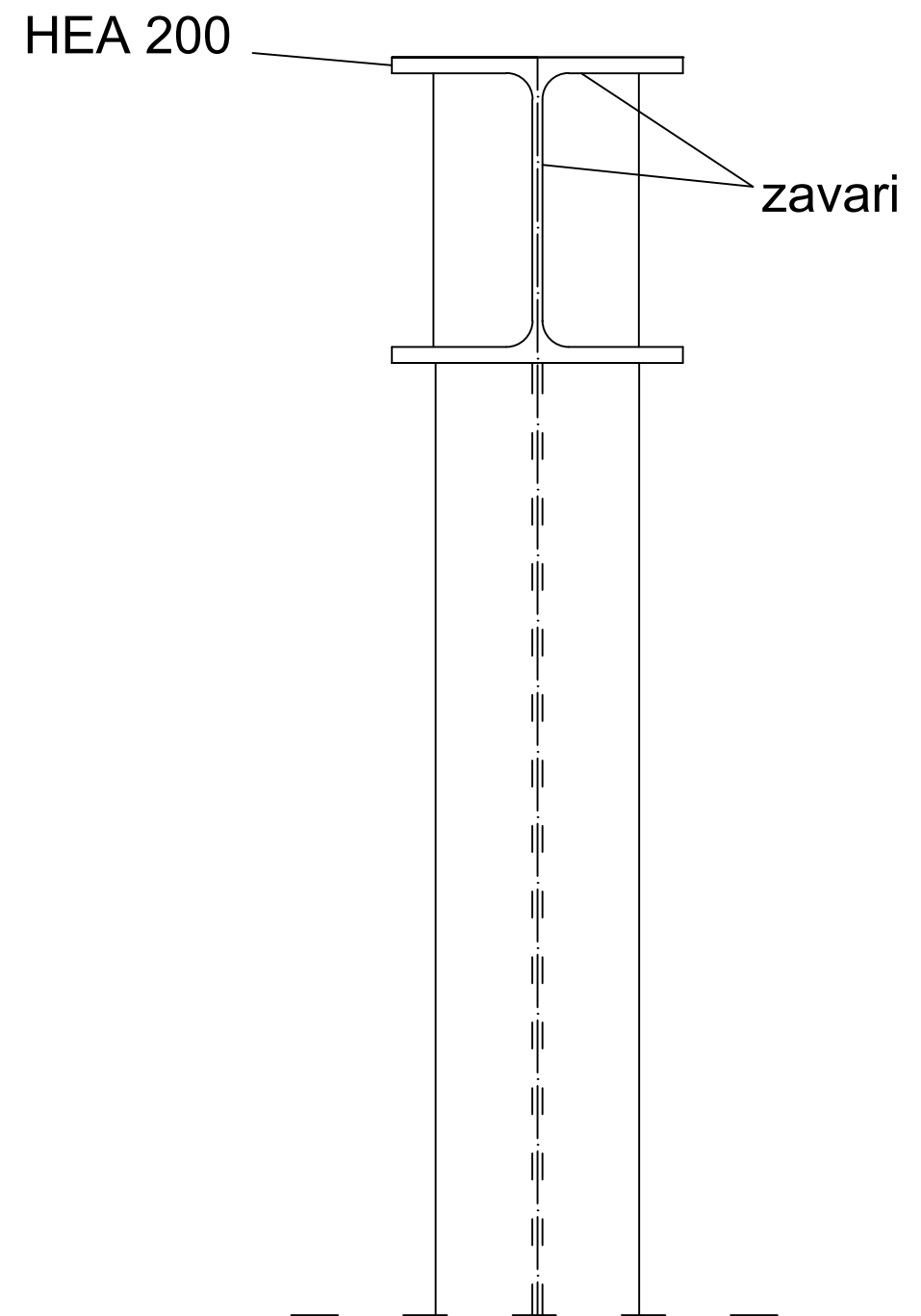
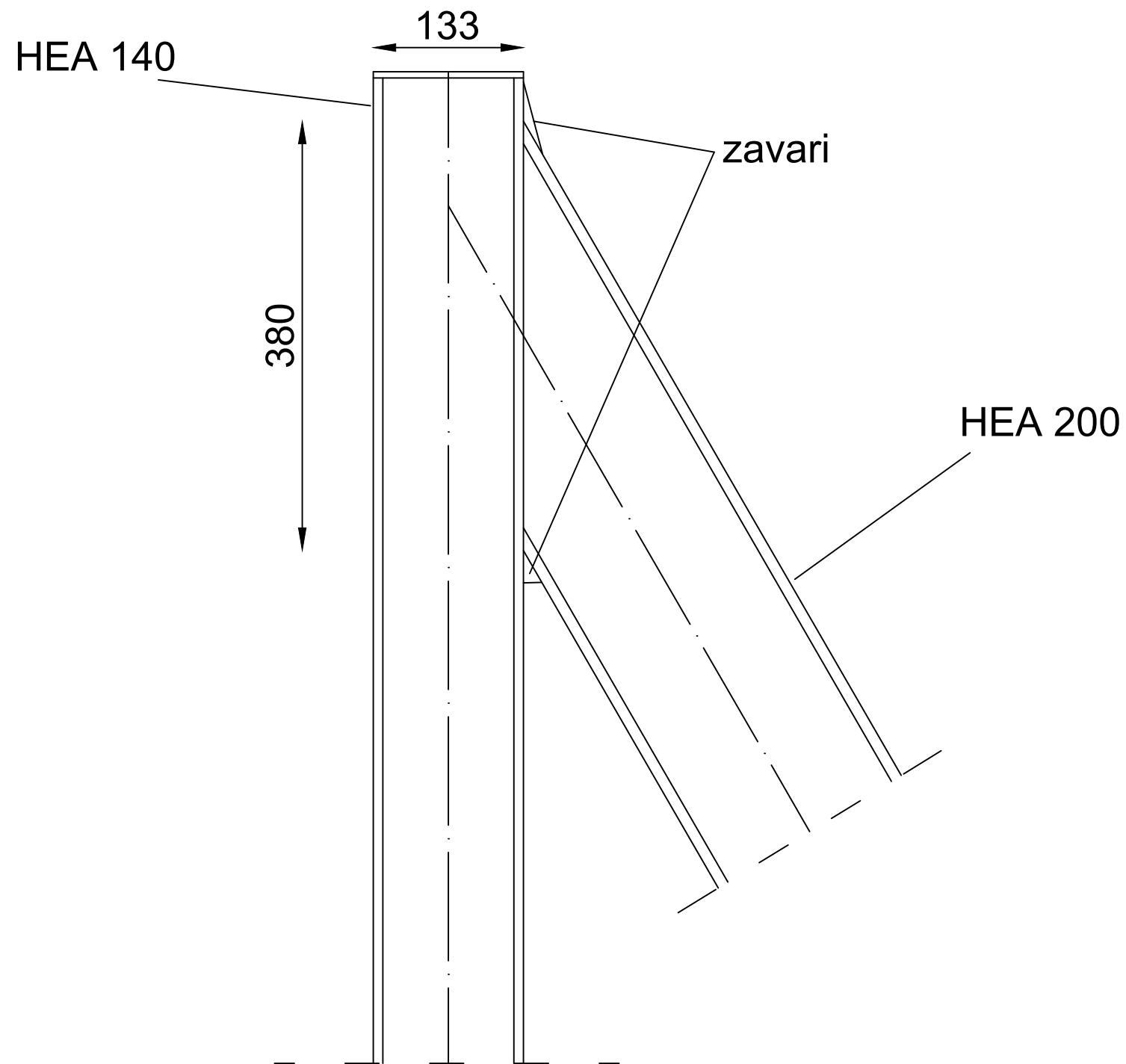
7. NACRTI

PRIKLJUČAK STUPA NA AB TEMELJ, M 1:10



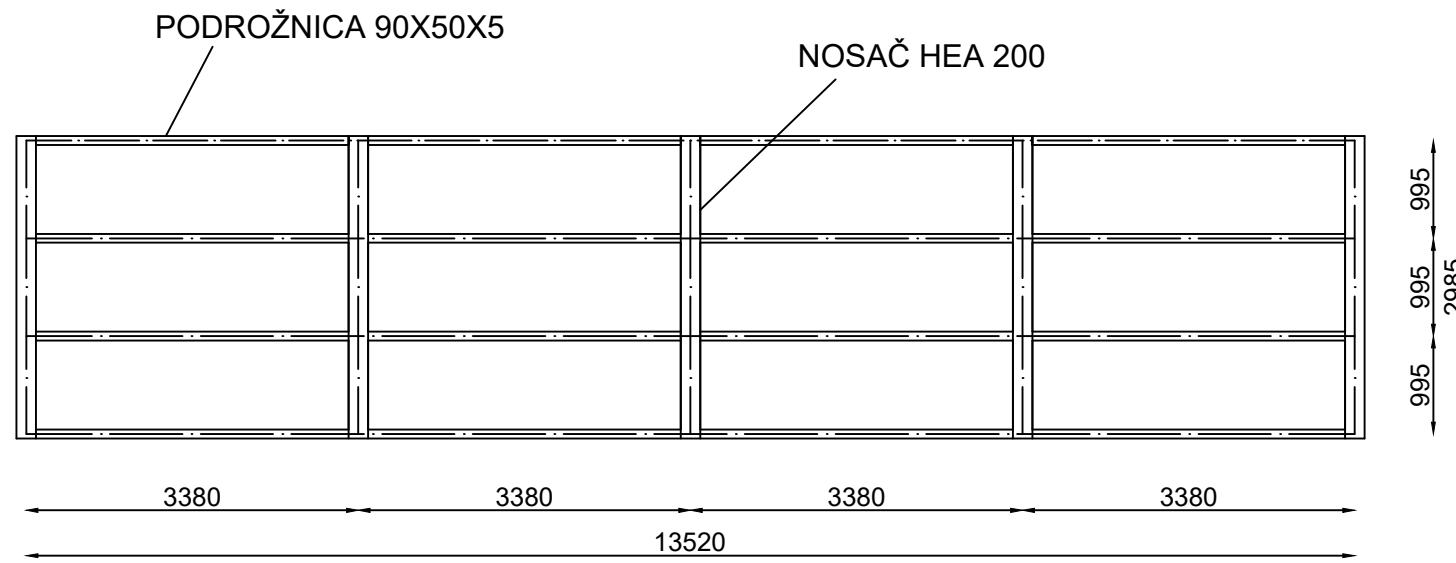
GF	GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI		
Završni rad Čelična konstrukcija za pridržavanje solarnih panela	Sadržaj nacрта Detalj priključka stupa na AB temelj		
Studentica Ivona Đurić	Kolegij Osnove čeličnih konstrukcija		
Mentor Doc.dr.sc. Paulina Krolo	Datum 07.09.2023.	Mjerilo 1:10	List 1

DETALJ SPOJA STUPA I NOSAČA, M 1:5

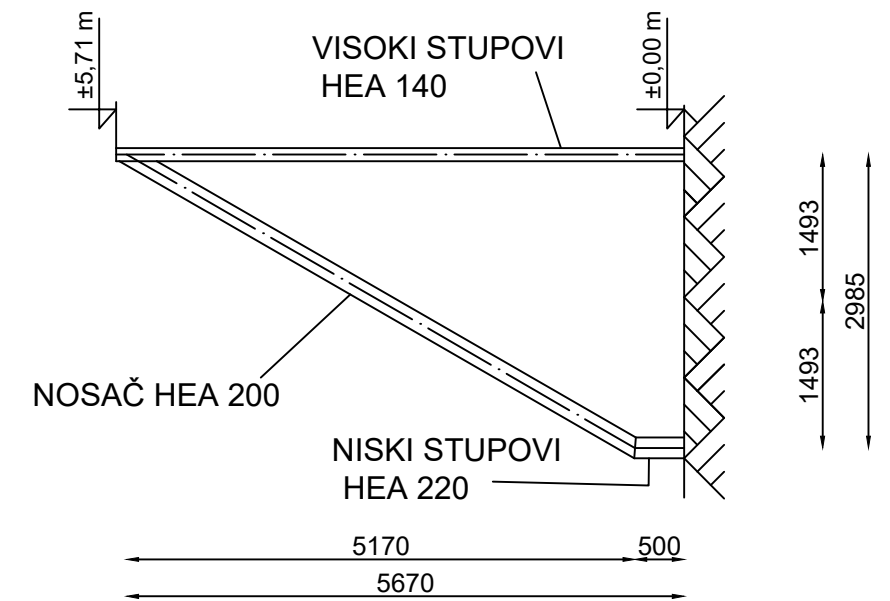


GF	GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI		
Završni rad Čelična konstrukcija za pridržavanje solarnih panela	Sadržaj nacрта Detalj spoja stupa i nosača		
Studentica Ivona Đurić	Kolegij Osnove čeličnih konstrukcija		
Mentor Doc.dr.sc. Paulina Krolo	Datum 07.09.2023.	Mjerilo 1:5	List 2

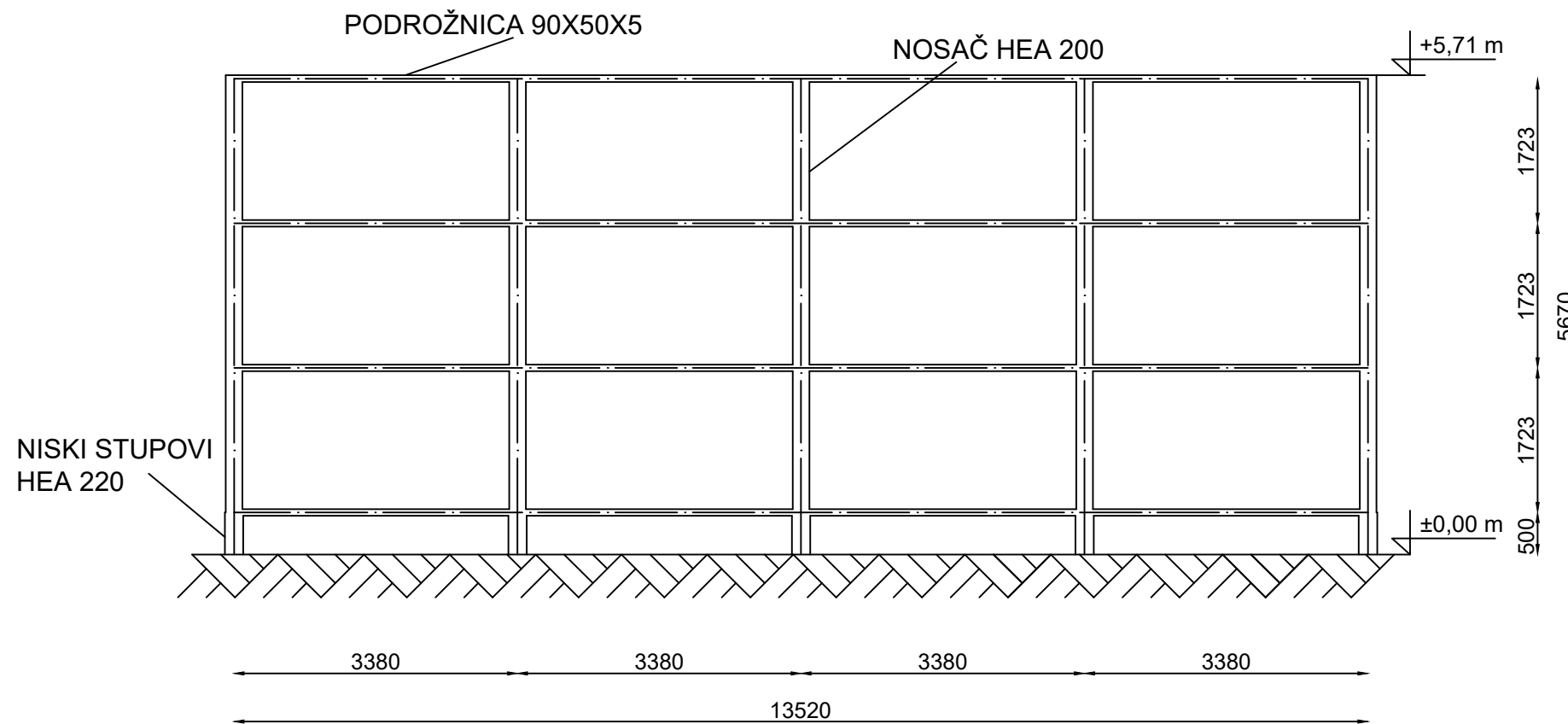
TLOCRTNA DISPOZICIJA M 1:75



POGLED NA ZABAT M 1:75



POPREČNI POGLED M 1:75



GF	GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI		
Završni rad Čelična konstrukcija za pridržavanje solarnih panela	Sadržaj nacrt Dispozicija čelične konstrukcije		
Studentica Ivona Đurić	Kolegij Osnove čeličnih konstrukcija		
Mentor Doc.dr.sc. Paulina Krolo	Datum 07.09.2023.	Mjerilo 1:75	List 3