

# Čelična konstrukcija višeraspanske nadstrešnice sa solarnim panelima

---

**Zvijerac, Aleksandar**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*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:157:710748>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**



*Repository / Repozitorij:*

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



*image not found or type unknown*

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Aleksandar Zvijerac**

**Čelična konstrukcija višeraspanske nadstrešnice sa solarnim panelima**

**Završni rad**

**Rijeka, 2021.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski stručni studij  
Čelične konstrukcije**

**Aleksandar Zvijerac  
JMBAG: 0114033247**

**Čelična konstrukcija višeraspanske nadstrešnice sa solarnim panelima**

**Završni rad**

**Rijeka, rujan 2021.**

Naziv studija: **Preddiplomski stručni studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Nosive konstrukcije

Tema završnog rada

**ČELIČNA KONSTRUKCIJA VIŠERASPONSKE NADSTREŠNICE SA SOLARNIM PANELIMA**

**STEEL STRUCTURE OF MULTI-SPAN CANOPY WITH SOLAR PANELS**

Kandidat: **ALEKSANDAR ZVIJERAC**

Kolegij: **ČELIČNE KONSTRUKCIJE**

Završni rad broj: **21-ST-6**

**Zadatak:**

Istražiti i napraviti kratki pregled nadstrešnica prema obliku nosive konstrukcije, materijalu, obliku pokrova i sl. Dati prijedlog čelične konstrukcije višeraspomske nadstrešnice za natkrivanje četrdeset parkirnih mjesta s pokrovom izvedenim od solarnih panela. Analizirati djelovanja prema lokaciji konstrukcije koristeći se svim važećim propisima za djelovanja. Modelirati konstrukciju u programu Robot Structural Analysis, te provesti statički proračun. Dimenzionirati karakteristične elemente konstrukcije (stup, glavni i sekundarni nosač) prema graničnom stanju nosivosti i graničnom stanju uporabivosti. Riješiti detalj spajanja stupa na betonski temelj i detalj spajanja glavnog nosača na stup te provjeriti vijke i zavare.

Tema rada je uručena: 24. veljače 2021.

**Mentorica:**

doc. dr. sc. Paulina Krolo,  
dipl. ing. građ.

## ***IZJAVA***

Završni rad sam izradio 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.

---

Aleksandar Zvijerac

U Rijeci, 15. rujna 2021.



**Sažetak:**

Tema završnog rada je proračun čelične konstrukcije višeraspanske nadstrešnice koja je izložena djelovanju vjetra i snijega. Za pokrov nadstrešnice odabrani su solarni paneli kako bi se potaknula proizvodnja solarne energije. Statički proračun višeraspanske nadstrešnice je proveden pomoću programa Robot Structural Analysis Professional System, pomoću kojega su dobivene unutarnje sile u stupu, kosoj prečki i sekundarnom nosaču. Potom je provedeno dimenzioniranje elemenata konstrukcije za granično stanje nosivosti i granično stanje uporabljivosti. Riješeni su detalji spojeva stupa na temelj i spoja stup -kosa prečka, te su provedeni proračuni vijaka i zavara. Konačni proračun spoja stup -kosa prečka ne zadovoljava potrebne uvjete iz razloga što je prekoračena nosivost vijaka

**Ključne riječi:**

Čelična konstrukcija, višeraspanska nadstrešnica, djelovanje vjetra, statički proračun, solarni paneli

**Abstract:**

The topic of this final work is to estimate the steel structure of multibay duo pitch canopy which is exposed to wind and snow action. The solar panels were chosen for the cover roof of the canopy to encourage the production of solar energy. The static calculation of multibay duo pitch canopy was conducted in Robot Structural Analysis Professional System, by which the internal forces in the column, bracings and secondary elements were obtained. Then, the dimensioning of the structural elements for the ultimate limit state and the serviceability limit state was performed. The details of column base connection and beam to column connection were designed, and the calculations of bolts and welds were performed. The final calculation of beam to column connection does not satisfy the required conditions because the capacity of bolts was exceeded.

**Keywords:**

Steel construction, multibay canopy, wind action, static calculation, solar panels

# Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Nadstrešnice.....	2
2.1. Namjena nadstrešnica .....	2
2.2. Krovna konstrukcija .....	3
2.3. Dimenzije nadstrešnica .....	5
2.4. Materijali za izradu nadstrešnica .....	7
3. Proračun čelične konstrukcije višeraspanske nadstrešnice .....	10
3.1. Tehnički opis .....	10
3.2. Dimenzije konstrukcije.....	11
3.3. Analiza djelovanja .....	14
3.3.4. Kombinacije djelovanja .....	29
3.4. Statički proračun unutarnjih sila.....	31
3.5. Dimenzioniranje glavnih elemenata konstrukcije nadstrešnice .....	32
3.6. Proračun spojeva nadstrešnice .....	61
4. Zaključak .....	75
5. Literatura:.....	77
6. Nacrti .....	78



## Popis slika

Slika 1: Primjer dvostrešne nadstrešnice (preuzeto sa web stranice [1]).....	3
Slika 2: Nadstrešnica sa jednostrešnom krovnom konstrukcijom (preuzeto sa web stranice [2]).....	4
Slika 3: Nadstrešnica sa šatorastom krovnom konstrukcijom (preuzeto sa web stranice [3]).....	4
Slika 4: Nadstrešnica sa peronskim tipom krovne konstrukcije (preuzeto sa web stranice [4]).....	5
Slika 5: Primjer standardne dimenzije nadstrešnice za zaštitu vozila (preuzeto sa web stranice [5]).....	6
Slika 6: Primjer nadstrešnice iznad parkirnih mjesta trgovačkog centra (preuzeto sa web stranice [6]).....	6
Slika 7: Primjer nadstrešnice za putnike na peronu željezničke stanice (preuzeto sa web stranice [7]).....	7
Slika 8: Primjer nadstrešnice izrađene od aluminijskih elemenata (preuzeto sa web stranice [8]).....	10
Slika 9: Primjer nadstrešnice izrađene od čeličnih elemenata (preuzeto sa web stranice [9]).....	10
Slika 10: 3D prikaz konstrukcije iz Robot-a (Foto: A. Zvijerac, 26.7.2021.).....	12
Slika 11: Prikaz stabilizacijskih elemenata nadstrešnice (Foto: A. Zvijerac, 4.9.2021.).....	12
Slika 12: Tlocrt konstrukcije sa ucrtanim parkirnim mjestima i dimenzijama (Foto: A. Zvijerac, 25.07.2021.).....	13
Slika 13: Dimenzije nadstrešnice u presjeku (Foto: A. Zvijerac, 25.07.2021.)....	13
Slika 14: Katalog odabranih solarnih panela (Preuzeto sa web stranice [14]) ..	14
Slika 15: Karta snježnih područja u mjerilu 1 : 1 000 000 (preuzeto iz norme[5]).	15
Slika 16: Koeficijent oblika i duljine nanosa za izuzetne nanose snijega – uvale višeraspinskih krovova (preuzeto iz norme [1]) .....	17
Slika 17: Definirano opterećenje snijega na nadstrešnicu (Foto: A. Zvijerac, 3.9.2021.).....	18
Slika 18: Karta vjetrovnih zona Republike Hrvatske (preuzeto iz norme [2]) ...	19
Slika 19: Tlocrt krova dvostruke nadstrešnice sa određenim zonama djelovanja vjetra (Foto: A. Zvijerac, 25.07.2021.).....	23
Slika 20: Opterećenje vjetra na konstrukciju u obliku pritiska (poprečni presjek) (Foto: A. Zvijerac, 3.9.2021.).....	27
Slika 21: Opterećenje vjetra na konstrukciju u obliku pritiska (uzdužni presjek) (Foto: A. Zvijerac, 3.9.2021.).....	28
Slika 22: Opterećenje vjetra na konstrukciju u obliku usisa (poprečni presjek) (Foto: A. Zvijerac, 3.9.2021.).....	28
Slika 23: Opterećenje vjetra na konstrukciju u obliku usisa (uzdužni presjek) (Foto: A. Zvijerac, 3.9.2021.).....	29
Slika 24: Kombinacije djelovanja definirane u programu Robot Structural Analysis Professional (Foto: A. Zvijerac, 3.9.2021.).....	29

Slika 25: Prikaz unutarnjih sila na stupu za 3. kombinaciju djelovanja graničnog stanja nosivosti (Foto: A. Zvijerac, 3.9.2021.)	31
Slika 26: Prikaz unutarnjih sila na kosoj prečki za 3. kombinaciju djelovanja graničnog stanja nosivosti (Foto: A. Zvijerac, 3.9.2021.)	31
Slika 27: Prikaz unutarnjih sila na sekundarnom nosaču za 3. kombinaciju djelovanja graničnog stanja nosivosti (Foto: A. Zvijerac, 3.9.2021.)	32
Slika 28: Prikaz najopterećenijeg stupa na konstrukciji (plava boja) za 3. kombinaciju djelovanja graničnog stanja nosivosti (Foto: A. Zvijerac, 3.9.2021.)	33
Slika 29: Prikaz sila koje djeluju na stup (Foto: A. Zvijerac, 3.9.2021.)	34
Slika 30: Izvijanje stupa oko osi y i osi z (Foto: A. Zvijerac, 3.9.2021.)	41
Slika 31: Kritična duljina izvijanja $L_{cr}$ (preuzeto sa web stranice [25])	41
Slika 32: Najopterećenija kosa prečka za 4. kombinaciju djelovanja GSN (Foto: A. Zvijerac, 4.9.2021.)	48
Slika 33: Prikaz sila koje djeluju na kosu prečku (Foto: A. Zvijerac, 4.9.2021.)	57
Slika 34: Proračun $\alpha$ (preuzeto sa web stranice[34])	48
Slika 35: Najopterećeniji sekundarni nosač za 3. kombinaciju djelovanja GSN (Foto: A. Zvijerac, 4.9.2021.)	55
Slika 36: Prikaz sila koje djeluju na sekundarni nosač (Foto: A. Zvijerac, 4.9.2021.)	56
Slika 37: Pomak stupa (4. kombinacija djelovanja GSU) (Foto: A. Zvijerac, 4.9.2021.)	60
Slika 38: Progib kose prečke (4. kombinacija djelovanja GSU) (Foto: A. Zvijerac, 4.9.2021.)	60
Slika 39: Progib sekundarnog nosača (3. kombinacija djelovanja GSU) (Foto: A. Zvijerac, 4.9.2021.)	61
Slika 40: Sile koje djeluju na spoj (2. kombinacija djelovanja GSN) (Foto: A. Zvijerac, 4.9.2021.)	62
Slika 41: Detalj opterećenja vijaka u spoju stup-temelj (Foto: A. Zvijerac, 4.9.2021.)	63
Slika 42: Svi zavari na spoju (žuta boja) (Foto: A. Zvijerac, 4.9.2021.)	67
Slika 43: Spoj koji se proračunava na konstrukciji (Foto: A. Zvijerac, 4.9.2021.)	69
Slika 44: Sile koje djeluju na spoj (2. kombinacija GSN) (Foto: A. Zvijerac, 4.9.2021.)	69
Slika 45: Detalj opterećenja vijaka u spoju stup-kosa prečka (Foto: A. Zvijerac, 4.9.2021.)	70
Slika 46: Zavari na spoju (crna boja) (Foto: A. Zvijerac, 6.9.2021.)	73

## Popis tablica

Tablica 1: Preporučene vrijednosti koeficijenata $\psi_0$ , $\psi_1$ i $\psi_2$ za različite lokacije konstrukcija (preuzeto iz norme [5]) .....	16
Tablica 2: Preporučene vrijednosti za koeficijent $C_e$ (preuzeto iz norme [5])....	18
Tablica 3: Kategorije terena i parametri terena (preuzeto iz norme [2]) .....	20
Tablica 4: Faktori smanjenja $\psi_{mc}$ za nadstrešnice s više polja (preuzeto iz norme[6]) .....	24
Tablica 5: Vrijednosti koeficijenata $c_{p,net}$ za dvostrešne nadstrešnice (preuzeto iz norme[6]) .....	25
Tablica 6: Klasifikacija unutrašnjih tlačnih elemenata (preuzeto iz norme[3]).	34
Tablica 7: Klasifikacija vanjskih tlačnih elemenata (preuzeto iz norme[3]).....	36
Tablica 8: Odabir krivulje izvijanja (preuzeto iz norme[3]) .....	42
Tablica 9: faktor imperfekcije $\alpha_{LT}$ zavisno od krivulje izvijanja preuzeto iz norme[3]) .....	45
Tablica 10: Određivanje računске otpornosti za jedan vijak (preuzeto iz norme [4]).....	64

## 1. Uvod

U ovom završnom radu napravljen je proračun čelične konstrukcije višeraspanske nadstrešnice na budućem parkiralištu sveučilišta na Trsatu. Pokrov nadstrešnice izveden je sa solarnim panelima koji imaju ulogu krovne obloge i ulogu napajanja solarnom energijom.

Kada je riječ o solarnoj energiji i izvođenju građevina sa solarnim panelima, posebno u krajevima koji imaju puno sunčanih dana, ona se još uvijek nedovoljno iskorištava u Hrvatskoj. Nedavne statistike u Europi su pokazale nove rezultate tržišta EU-a za solarnu energiju, što pokazuje da je, unatoč zastojsima zbog pandemije, europsko solarno tržište poraslo za 11 posto, dodajući 18,7 GW instalacija. Ta brojka čini 2020. drugom najboljom godinom ikad za solarnu energiju u Europi, a prvom najboljom nakon 2011.godine. Ovi podaci su preuzeti sa web stranice [1].

Ovom konstrukcijom bi se riješio problem nedostatka parkirnih mjesta na području sveučilišta koji je većinom vremena preopterećen automobilima. Izvedba nadstrešnice sa solarnim panelima, osim rješavanja problema manjka parkirnih mjesta, osigurava dodatne kapacitete električne energije na području Trsata, te služe kao rezerve za napajanje obližnjih građevina na sveučilištu. Rad se sastoji od teorijskog i numeričkog dijela. U teorijskom dijelu je detaljnije opisana namjena nadstrešnica, vrste krovnih konstrukcija koje se mogu primijeniti na nadstrešnici, optimalne dimenzije za nadstrešnice ovisno o njenoj namjeni, te detaljniji opisi vrsta materijala od kojih se proizvode konstruktivni elementi za nadstrešnicu. U numeričkom dijelu proveden je statički proračun čelične konstrukcije višeraspanske nadstrešnice koja je izložena djelovanju snijega i vjetra.

Osim što su bitna mehanička svojstva konstrukcije, potrebno je i da konstrukcija bude jednostavna i da se izvede u što

kraćem vremenu. Prethodno montirani elementi konstrukcije u radioni pojednostavljaju montažu i smanjuju potrebno vrijeme montaže na gradilištu.

Predviđeni životni vijek fotonaponskih sunčanih elektrana u pravilu iznosi 25 godina. U skladu s tim na elemente fotonaponskih sunčanih elektrana postavljaju se zahtjevi u pogledu postojanosti konstrukcije koja je izložena atmosferskim utjecajima i promjenjivim opterećenjima.

Najpovoljniji materijali od kojih se izrađuju konstrukcije su aluminij i nehrđajući čelik zbog otpornosti na koroziju. Ovakav izbor materijala garantira postojanost materijala s obzirom na koroziju u očekivanom životnom vijeku fotonaponskih sunčanih elektrana izloženih atmosferskim uvjetima definiranih korozijskom kategorijom C2 i C3. Cilj ovog rada je bio projektirati čeličnu konstrukciju višeraspanske nadstrešnice sa solarnim panelima.

## **2. Nadstrešnice**

### **2.1. Namjena nadstrešnica**

Nadstrešnice služe kao efikasna zaštita za vozila kao što su automobili, određene vrste strojeva, zimski vrtovi. Većinom joj je glavna namjena zaštita površina od atmosferskih utjecaja (kiša, snijeg, tuča). Ove konstrukcije imaju veliki potencijal što se tiče korištenja u javnim prostorima kao što su trgovački centri (parkirna mjesta za vozila ), skladišta za alat ili za strojeve. Glavna mana kod čeličnih nadstrešnica je izloženost vremenskim uvjetima koji uzrokuju nastanak korozije na konstrukciji, stoga je potrebno izvesti adekvatnu zaštitu.

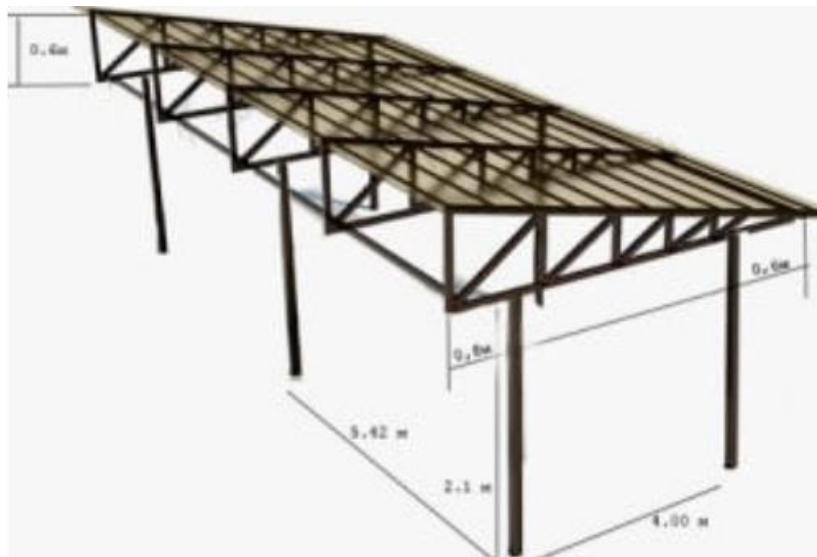
### **2.2. Krovna konstrukcija**

Krovna konstrukcija je element nadstrešnice koji ima ulogu zaštite objekata ispod nadstrešnice. Krovne konstrukcije se razlikuju prema obliku, nagibu i konstruktivnom sustavu. Prema obliku krovne konstrukcije za nadstrešnice mogu biti: jednostrešne (Slika 2), dvostrešne (Slika 1), šatoraste (Slika 3) i također peronske (Slika 4) što može

biti idealni oblik za solarne panele. Prema nagibu krovne konstrukcije razlikujemo strme nagibe (kut nagiba preko 25 °), blage nagibe (kut nagiba 5°-25°) i ravne krovove (kut nagiba manji od 5°).



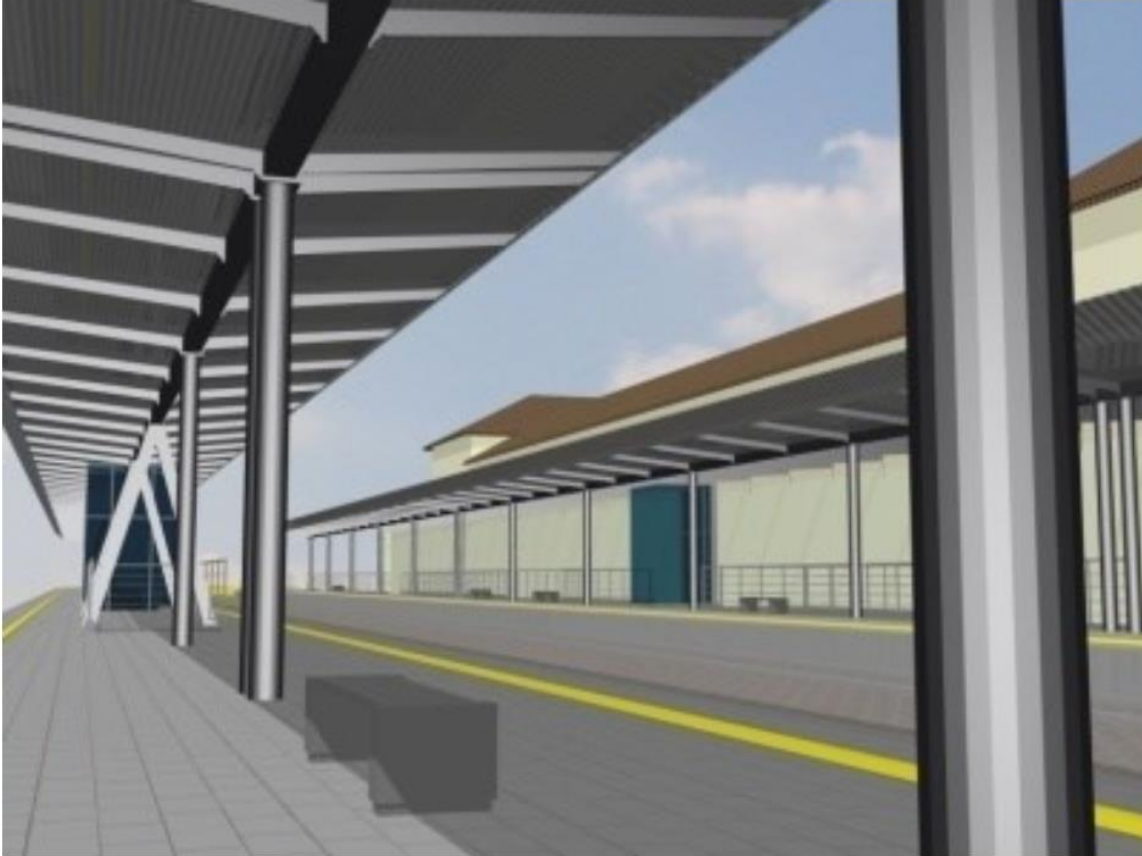
Slika 1: Primjer dvostrešne nadstrešnice [\[1\]](#)



Slika 2: Nadstrešnica sa jednostrešnom krovnom konstrukcijom [2]



Slika 3: Nadstrešnica sa šatorastom krovnom konstrukcijom [3]



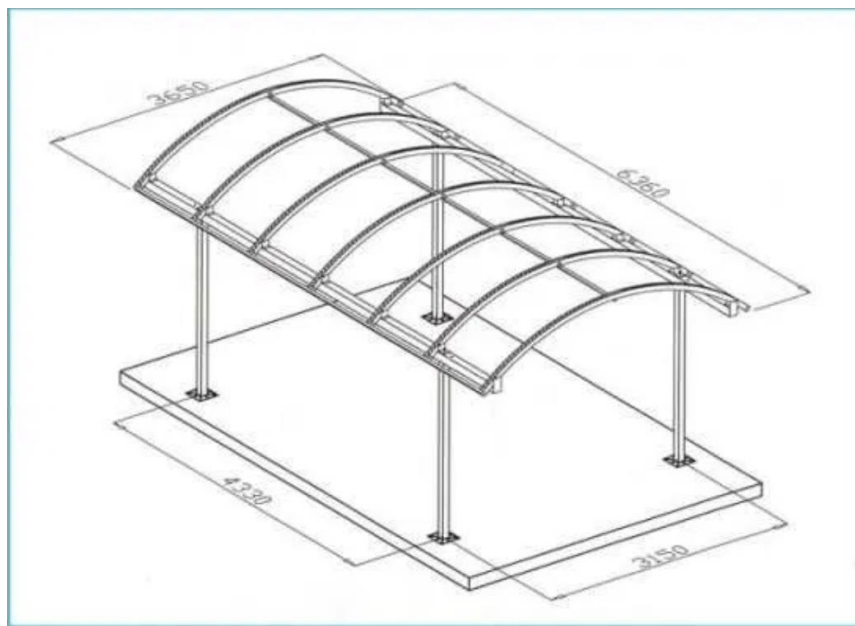
Slika 4: Nadstrešnica sa peronskim tipom krovne konstrukcije [4]

### 2.3. Dimenzije nadstrešnica

U pogledu dimenzija nadstrešnice, specifično duljine ili raspona, najčešće se primjenjuju manji rasponi za nadstrešnice kojima raspon varira od 4,5 do 6 metara, iz razloga što se najčešće koriste kao zaštita za vozila. Najbolje dimenzije za nadstrešnice koje služe za zaštitu vozila imaju tlocrtne dimenzije 6x4 metara .

Osim nadstrešnica za zaštitu vozila koje u većini slučajeva imaju raspon do 6 metara, također se koriste nadstrešnice na javnim mjestima kao što su npr. peroni na željezničkim stanicama koji mogu imati raspone veće od 50 metara ili nadstrešnice u trgovačkim centrima, koje mogu imati raspone od 50 do 100 metara.





Slika 5: Primjer standardne dimenzije nadstrešnice za zaštitu vozila [5]



Slika 6: Primjer nadstrešnice iznad parkirnih mjesta trgovačkog centra [6]



Slika 7: Primjer nadstrešnice za putnike na peronu željezničke stanice [7]

## 2.4. Materijali za izradu nadstrešnica

Jedna od glavnih primjena materijala za izradu elemenata nadstrešnica je proizvodnja metala kao što su čelik i aluminij koji se sve više primjenjuju na području građevine.

### 2.4.1. Karakteristike aluminija

Aluminij je meki metal, ima malu težinu u usporedbi s drugim metalima kao što je čelik, savitljiv je i može se deformirati pod tlakom. On je ujedno i jedini laki metal koji je našao svoje mjesto u nosivim konstrukcijama u građevinarstvu. Problem kod aluminija je što ima relativno nisku čvrstoću. Aluminij ima u svom najčišćem obliku vlačnu čvrstoću oko 40 MPa (megapaskali) i dogovornu granicu popuštanja oko 10 MPa. Za većinu tehničkih primjena ovo je prenisko, stoga su razvijene legure aluminija s mehaničkim svojstvima koje značajno nadmašuju one osnovnog materijala. Najbolja primjena aluminija u građevinarstvu se može ostvariti u nekim tipičnim slučajevima,

koje se odlikuju u ostvarivanju najmanje jedno glavno osnovno svojstvo, a to je mala težina, otpornost na koroziju i funkcionalnost. Konstrukcijske primjene koje najbolje odgovaraju tim svojstvima u području graditeljstva su sljedeće: krovni sustavi velikih raspona, konstrukcije smještene na nedostupnim mjestima daleko od radionice, konstrukcije koje se nalaze u korozivnim ili vlažnim okolišima, kao što su krovovi bazena, riječni mostovi i hidrotehničke građevine. U pogledu primjene aluminija za nadstrešnice, aluminij bi bio povoljan materijal za izvedbu elemenata nadstrešnice na područjima uz obalu, npr. na područjima turističkih zona kao što su hoteli, privatni apartmani i slično, stoga bi se u većini slučajeva aluminijem izvodile nadstrešnice koje služe kao dio turističkih građevina.

#### **2.4.2. Karakteristike čelika**

Čelik je metalna legura sastavljena od željeza, ugljika i nekoliko drugih elemenata kao što su mangan, volfram, fosfor i sumpor. Postotak ugljika prisutnog u čeliku može varirati. Prema količini prisutnog ugljika, čelik se može podijeliti u nekoliko skupina kao što su: blagi čelik, čelik visokog ugljika, čelik niske razine ugljika.

Ponekad čelik ima neke druge elemente u visokom postotku od ugljika. Dobar primjer za to je nehrđajući čelik. Nehrđajući čelik ima vrlo malu količinu ugljika, ali veliku količinu kroma zajedno s željezom. Različita željena svojstva mogu se dobiti miješanjem različitih metalnih i nemetalnih elemenata. Čelik je tvrd materijal, vrlo jak i rastezljiv. No ipak nije otporan na koroziju (osim nehrđajućeg čelika, koji je napravljen miješanjem kroma s željezom, što daje svojstvo otpornosti na koroziju). U pogledu težine čelik je puno teži od aluminija, ali se lakše zavaruje od aluminija i ima višu točku taljenja. Čelik je vječno moderan i aktualan materijal. Materijal je današnjice i budućnosti, materijal neograničenih mogućnosti. Nijedan drugi materijal ne nudi istodobno tako elegantne oblike i svojstva s jedne, a s druge strane jednostavnost u primjeni. Pouzdan je materijal za reprezentativnu i industrijsku gradnju, budući da podnosi velika opterećenja. Posebno je primjenjiv u projektima gdje često dolazi do projektantskih promjena, ili do promjena u namjeni. Čelična

konstrukcija je zbog svojih građevinskih svojstava prikladna za univerzalnu primjenu, nudi kvalitetna i praktična rješenja za objekte svih namjena (industrijski, sportski i trgovački objekti).

Čelična konstrukcija sastoji se od primarne i sekundarne konstrukcije. Primarnu konstrukciju čine nosivi okvir ili stabilizacijski elementi, koji osiguravaju stabilnost konstrukcije i prenose opterećenje na temelje. Nosiva čelična konstrukcija ima prevladavajuću funkciju preuzimanja opterećenja. Svaki pojedini element konstrukcije ima dostatnu nosivost da može odoljeti silama koje na njega djeluju. Opterećenje konstrukcije prenosi se preko pojedinih elemenata do temelja i preko temelja u tlo. Nosiva čelična konstrukcija je sustav nosača, koji su sastavljeni iz osnovnih proizvoda valjanja, spojenih tako da osiguravaju prostornu stabilnost objekta. Nosač je organizirana kombinacija nosivih elemenata koji su projektirani, izrađeni i spojeni tako da poluču određenu mjeru krutosti na savijanje i posmik. Nosači mogu biti kontinuirani nosači, plošni nosači i štapni sustavi. Ovakav način izvedbe konstrukcija čelikom je idealan za nadstrešnice koje imaju bitniju namjenu kao što su npr.: nadstrešnice za skladištenje materijala, nadstrešnice u industrijskim zonama gdje se skladište materijali koji su osjetljivi na atmosferske utjecaje, nadstrešnice koje se nalaze na područjima u kojima prevladava jak vjetar i ostale nepogodne atmosferilije koje utječu na stabilnost nadstrešnice.

Zaključak je da metali i legure od metala imaju mnogo primjena u industrijskom mjerilu, a aluminij i čelik su takvi elementi koji imaju više različitih karakteristika. Na sljedećim stranicama prikazane su slike objekata i konstrukcija izrađenih od aluminija i čelika. Izvor karakteristika čelika i aluminija je preuzet sa web stranice [\[2\]](#).



Slika 8: Primjer nadstrešnice izrađene od aluminijskih elemenata [8]



Slika 9: Primjer nadstrešnice izrađene od čeličnih elemenata [9]

### **3. Proračun čelične konstrukcije višeraspanske nadstrešnice**

#### **3.1. Tehnički opis**

Konstrukcija čelične višeraspanske nadstrešnice tlocrtnih dimenzija 27 x 30 m sastoji se od 6 glavnih nosivih konstrukcija na osnom razmaku od 5,4 m. Krov je izveden kao višerasponski dvostrešni krov s nagibima krovnih ploha od  $20^{\circ}$ . Konstrukcija čelične višeraspanske nadstrešnice se nalazi na nadmorskoj visini od 150 m na području grada Rijeke. Glavna namjena ove konstrukcije je javno parkiralište za automobile na

sveučilištu u Rijeci. Konstrukcija višeraspanske nadstrešnice natkriva 36 parkirnih mjesta dimenzija 5 x 3 m, te dva prolaza za vozila dimenzija 5 x 27 m.

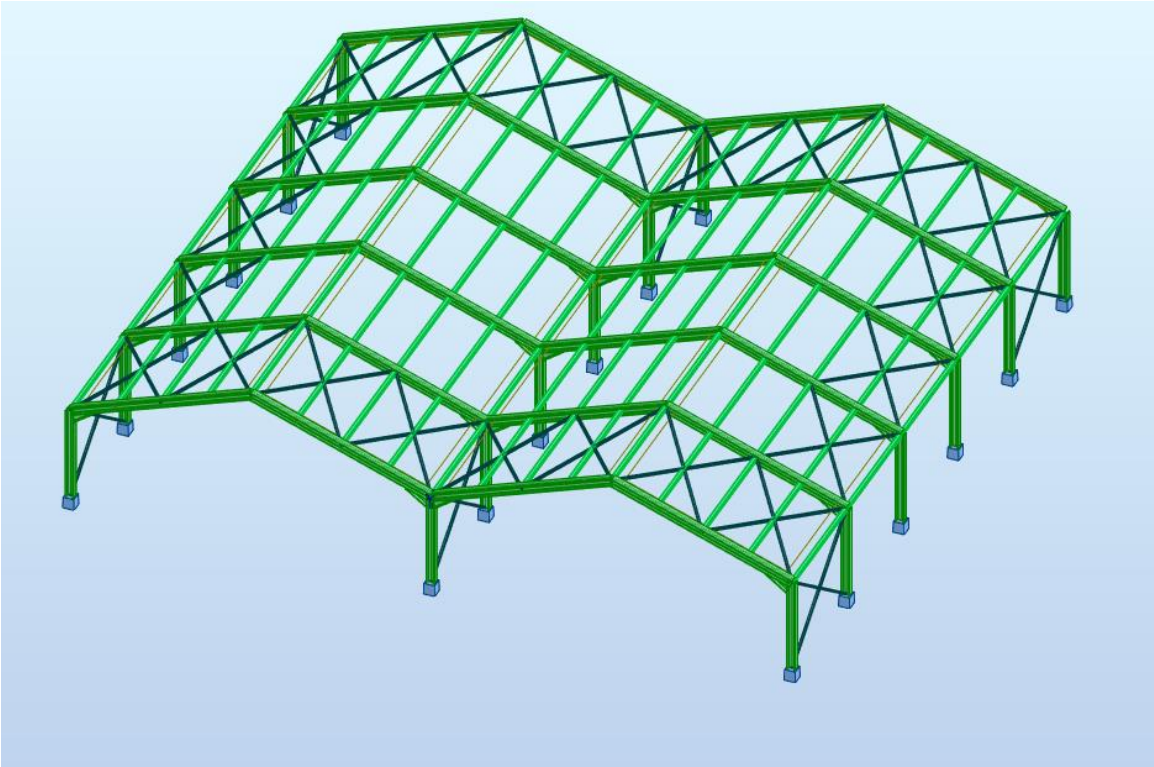
Na konstrukciju djeluju stalno opterećenje, opterećenje snijegom i opterećenje vjetrom. Stalno opterećenje obuhvaća težinu solarnih panela i vlastitu težinu konstrukcije. Opterećenje snijegom je određeno uz primjenu hrvatske norme HRN EN 1991-1-3: 2008 [1] i nacionalnog dodatka nHRN EN 1991-1-3: 2012/NA [5], dok je opterećenje vjetrom određeno primjenom norme HRN EN 1991-1-4: 2005 [2] i nacionalnog dodatka nHRN EN 1991-1-4: 2012/NA [6].

Statički sustav sekundarnog nosača je prosta greda oslonjena na glavnu nosivu konstrukciju na razmacima od 1,8 m. Odabrani su kvadratni cijevni profili dimenzija 150 x 150 x 8 mm izrađeni od čelika klase S275.

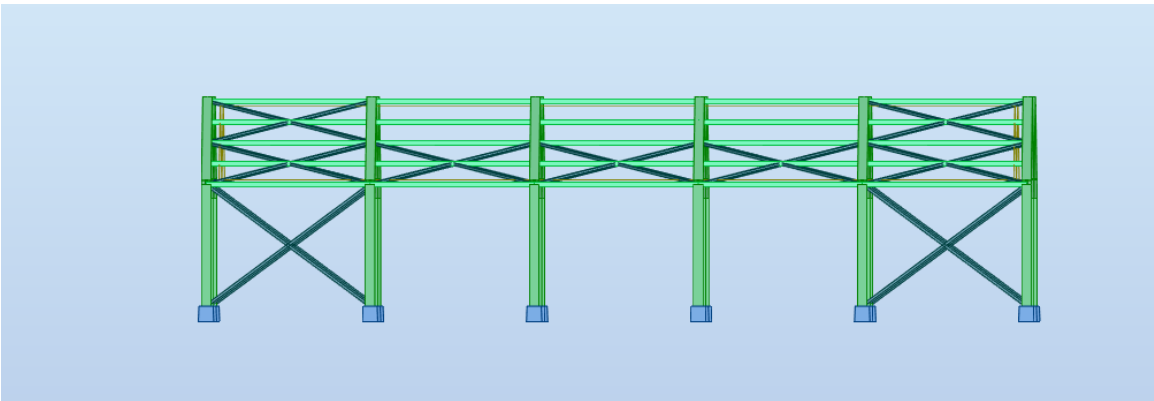
Statički sustav glavne nosive konstrukcije višeraspanske nadstrešnice sastoji se od stupa za koji je odabran valjani profil HE 240 A i kose prečke za koji je odabran valjani profil HE 220 M.

### **3.2. Dimenzije konstrukcije**

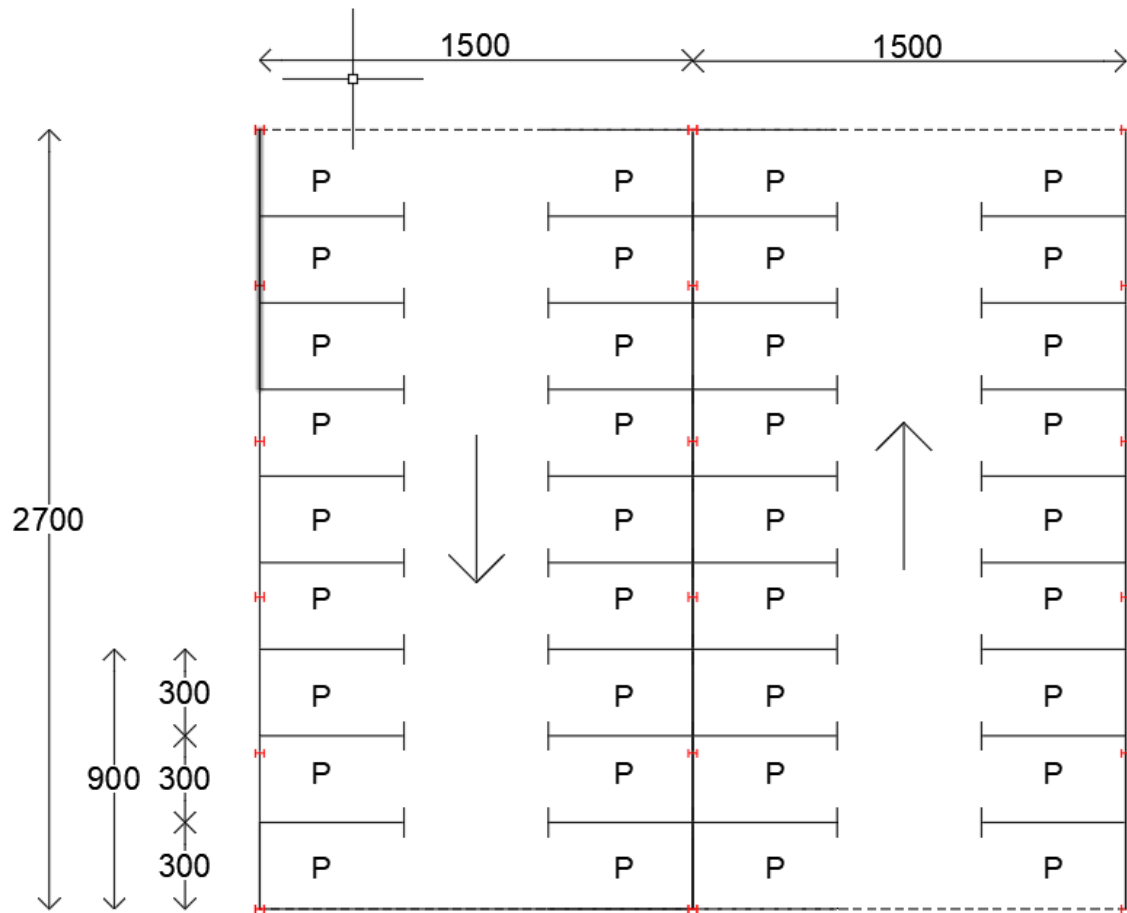
Konstrukcija čelične višeraspanske nadstrešnice tlocrtnih dimenzija 27 x 30 m sastoji se od 6 glavnih nosivih konstrukcija na osnom razmaku od 5,4 m. Krov je izveden kao višerasponski dvostrešni krov s nagibima krovnih ploha od 20°. Visina konstrukcije je ukupno 6,73 m, od čega su stupovi glavne nosive konstrukcije visine 4 m, dok je krovna konstrukcija visine 6,73 m mjereno od tla.



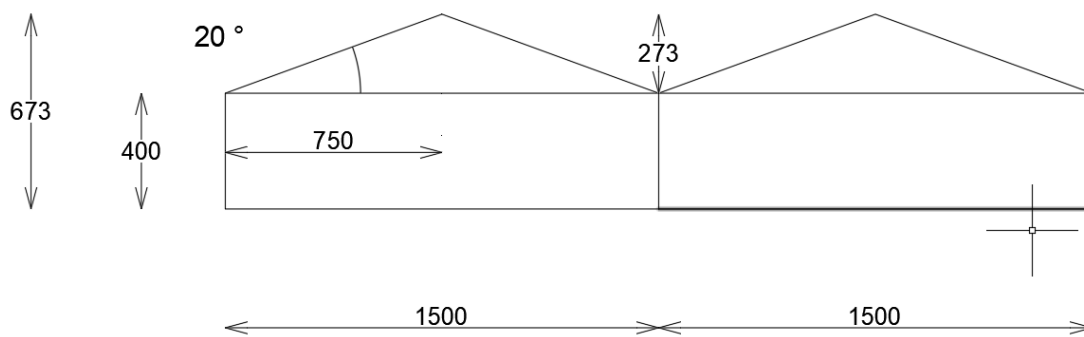
Slika 10: 3D prikaz konstrukcije iz Robot-a



Slika 11: Prikaz stabilizacijskih elemenata nadstrešnice



Slika 12: Tlocrt konstrukcije sa ucrtanim parkirnim mjestima i dimenzijama



Slika 13: Dimenzije nadstrešnice u presjeku



### 3.3. Analiza djelovanja

#### 3.3.1. Stalno djelovanje

Stalno djelovanje koje djeluje na konstrukciju jesu vlastita težina konstrukcije koja je uzeta u proračun uz pomoć opcije self weight u programu Robot Structural Analysis Professional System, te solarni paneli 335W Amerisolar AS-6M30 Half Cell. Proizvođač ovih solarnih panela je *Amerisolar, Worldwide Energy and Manufacturing USA*.

Vlastita težina solarnih panela je  $0,185 \text{ kN/m}^2$ . Dimenzije jednog komada solarnog panela su  $1800 \times 1000 \times 35 \text{ mm}$ .



Slika 14: Katalog odabranih solarnih panela [\[14\]](#)

### 3.3.2. Analiza djelovanja snijega

Proračun djelovanja snijega proveden je prema normi HRN EN 1991-1-3: 2008 [1] i nacionalnom dodatku nHRN EN 1991-1-3: 2012/NA [5]. Konstrukcija se nalazi na lokaciji sveučilišnog kampusa u gradu Rijeci na nadmorskoj visini od 150 m

#### 3.3.2.1. Opterećenje snijegom na tlu

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



Slika 15: Karta snježnih područja u mjerilu 1 : 1 000 000 [5]

Tablica 1: Preporučene vrijednosti koeficijenata  $\psi_0$ ,  $\psi_1$  i  $\psi_2$  za različite lokacije konstrukcija [5]

Regija	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
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

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

Za lokacije gdje postoji mogućnost izuzetnih opterećenja snijegom na tlu, ona se smiju odrediti izrazom (1):

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

gdje je:

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

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

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

### 3.3.2.2. Opterećenje snijegom na krovu

Koeficijent oblika opterećenja snijegom za izuzetne nanose koji treba upotrebljavati za uvale višerasponskih krovova dan je na slici 16.

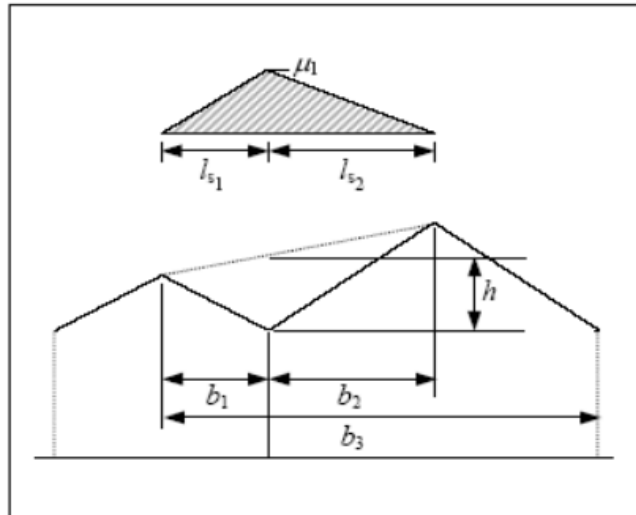
Koeficijent oblika dan na slici 16 određen je izrazom (2) kao najmanja vrijednost između:

$$\mu_1 = \frac{2h}{s_k} = 2 \times 2,73 / 0,5 = 10,92$$

$$\mu_1 = \frac{2b_3}{l_{s1} + l_{s2}} = \frac{2 \times 22,5}{7,5 + 7,5} = 3$$

$$\mu_1 = 5$$

(2)



Slika 16: Koeficijent oblika i duljine nanosa za izuzetne nanose snijega – uvale višerasponskih krovova [1]

Proračun opterećenja snijega na krovnu konstrukciju određuje se prema izrazu (3): za unutarnje panele:

$$s = \mu_1 \times s_{Ad} \times C_e \times C_t = 3,0 \times 1,0 \times 1,2 \times 1 = 3,6 \text{ kN/m}^2$$

za vanjske panele:

$$s = \mu_1 \times s_{Ad} \times C_e \times C_t = 0,8 \times 1,0 \times 1,2 \times 1 = 0,96 \text{ kN/m}^2 \quad (3)$$

gdje je:

$s=3,6 \text{ kN/m}^2$ ,  $s=1,0 \text{ kN/m}^2$  izuzetno opterećenje snijegom

$\mu_1=3,0$ ,  $\mu_1=0,8$  koeficijent za oblik opterećenja snijegom

$C_e=1,2$  koeficijent izloženosti

$C_t=1,0$  toplinski koeficijent

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

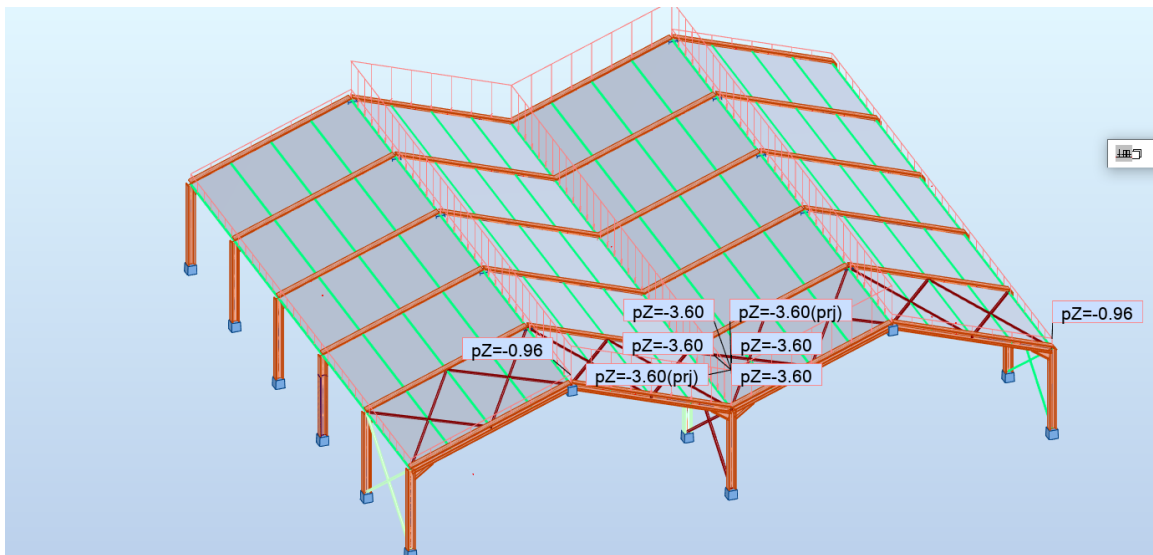
Tablica 2: Preporučene vrijednosti za koeficijent  $C_e$  [5]

Topografija	$C_e$
Izložena vjetru <sup>a</sup>	0,8
Uobičajena <sup>b</sup>	1,0
Zaklonjena <sup>c</sup>	1,2

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

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

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



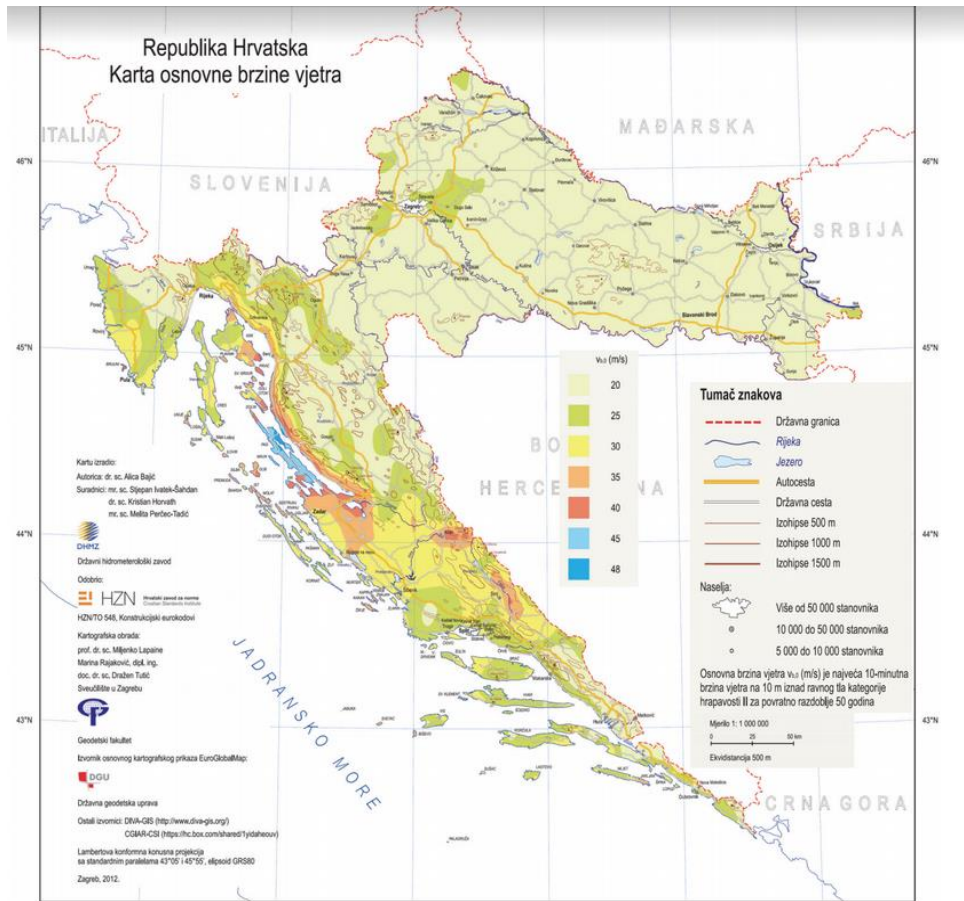
Slika 17: Definirano opterećenje snijega na nadstrešnicu

### 3.3.3. Analiza djelovanja vjetra

Proračun djelovanja vjetra na konstrukciju nadstrešnice je proveden prema normi HRN EN 1991-1-4: 2005 [2] i nacionalnom dodatku nHRN EN 1991-1-4: 2012/NA [6].

#### Izračun pritiska uslijed brzine vjetra

Brzina vjetra je određena prema karti vjetrovnih zona Republike Hrvatske.



Slika 18: Karta vjetrovnih zona Republike Hrvatske [2]

Osnovna brzina vjetra  $v_b$  određuje se prema izrazu (4) :

$$V_b = c_{dir} \times c_{season} \times V_{bo} = 1 \times 1 \times 25 = 25 \frac{m}{s} \quad (4)$$

gdje je:

$c_{dir}=1,0$  faktor smjera

$c_{season}=1,0$  faktor godišnjeg doba

$v_{bo}=25$  m/s temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra očitana sa karte na slici 17

Iz tablice za osnovnu brzinu vjetra su se izvukli 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  $\rho=1,25$  kg /m<sup>3</sup>

Tablica 3: Kategorije terena i parametri terena [2]

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 2 su određeni parametri  $z_{min}=1$  (minimalna visina),  $z_0=0,003$  (duljina hrapavosti),  $z_{0,II}=0,05$  m (hrapavost za 2. kategoriju),  $z_{max}=200$  m (maksimalna visina, uzima se 200 metara).

Faktor terena  $k_r$  određuje se prema izrazu (5):

$$k_r = 0,19x\left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0,19x\left(\frac{0,003}{0,05}\right) = 0,156 \quad (5)$$

gdje je:

$k_r=0,56$  faktor terena

$z_0=0,003$  m duljina hrapavosti

$z_{0,II}=0,05$  m hrapavost za 2.kategoriju

Faktor hrapavosti  $c_r(z)$  određuje se prema izrazu (6):

$$c_r(z) = k_r x \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,156 x \ln\left(\frac{6,73}{0,003}\right) = 1,20 \quad (6)$$

gdje je :

$k_r = 0,156$  faktor terena

$z = 6,73$  visina vrha krova nadstrešnice

$z_0= 0,003$  duljina hrapavosti

Srednja brzina vjetra  $v_m(z)$  određuje se prema izrazu (7):

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_0(z) \times v_b = 1,2 \times 1 \times 25 = 30 \text{ m/s} \quad (7)$$

gdje je:

$c_r(z)=1,2$  faktor hrapavosti

$c_0(z)=1$  faktor orografije

$v_b=25$  m/s osnovna brzina vjetra

Intenzitet turbulencije  $I_v(z)$  određuje se prema izrazu (8):

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_0 \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1}{1 \times \ln\left(\frac{6,73}{0,003}\right)} = 0,13 \quad (8)$$

gdje je :

$k_I=1,0$  faktor turbulencije

$c_0=1,0$  faktor orografije

$z=6,73$  visina vrha krova nadstrešnice

$z_0=0,003$  duljina hrapavosti

Tlak pri vršnoj brzini  $q_p(z)$  određuje se prema izrazu (9):

$$q_p(z) = (1 + 7 \times I_v(z)) \times 0,5 \times \rho \times v_m z^2 = (1 + 7 \times 0,13) \times 0,5 \times 1,25 \times 30 = 0,69 \text{ kN/m}^2 \quad (9)$$

gdje je:

$I_v(z)=0,13$  intenzitet turbulencije

$\rho=1,25$  kg/m<sup>3</sup> gustoća zraka očitana iz aneksa

$v_m(z)=30$  m/s srednja brzina vjetra

Tlak pri osnovnoj brzini  $q_b$  određuje se prema izrazu (10):

$$q_b = \frac{1}{2} \times \rho \times v_b^2 = \frac{1}{2} \times 1,25 \times 20^2 = 0,25 \text{ kN/m}^2 \quad (10)$$

gdje je:

$\rho=1,25$  kg/m<sup>3</sup> gustoća zraka očitana iz aneksa

$v_b=20$  m/s osnovna brzina vjetra



Faktor izloženosti  $c_e(z)$  određuje se prema izrazu (11):

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} = \frac{0,69}{0,25} = 2,75 \quad (11)$$

gdje je:

$q_p(z) = 0,69 \text{ kN/m}^2$  tlak pri vršnoj brzini

$q_b = 0,25 \text{ kN/m}^2$  tlak pri osnovnoj brzini

Tlak vjetra na vanjske površine određuje se prema izrazu (12):

$$q_p(z) = q_b \times c_e(z) = 0,25 \times 2,75 = 0,69 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (12)$$

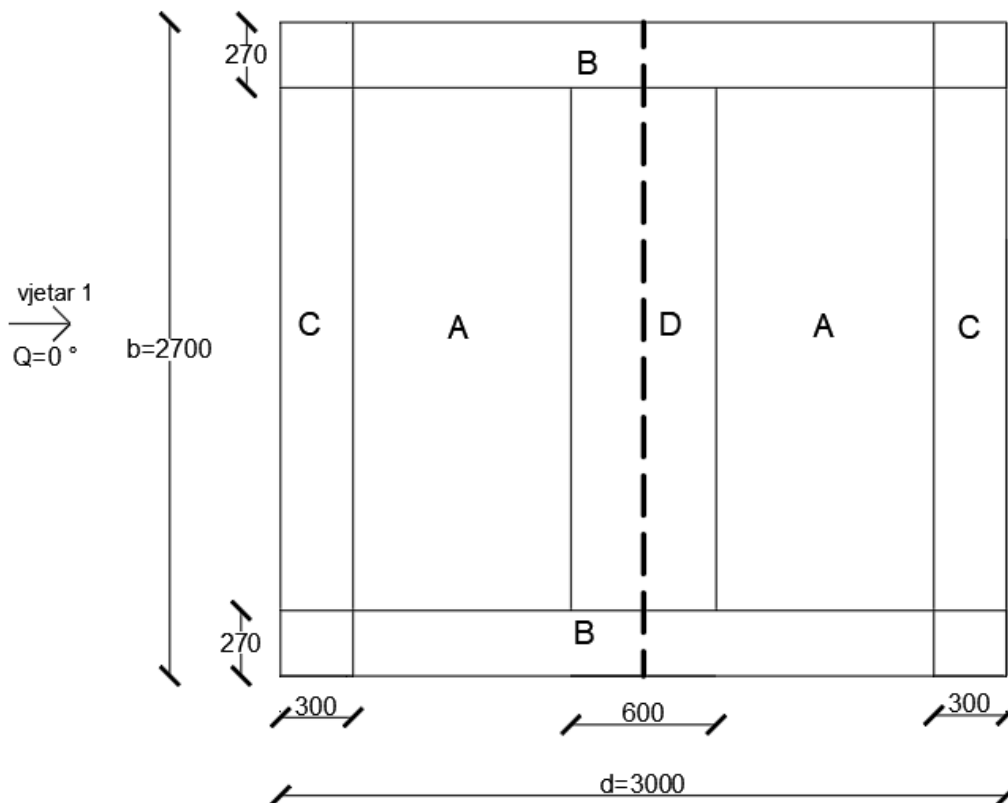
gdje je:

$q_b = 0,25 \text{ kN/m}^2$  tlak pri osnovnoj brzini

$c_e(z) = 2,75$  faktor izloženosti

### **Proračun koeficijenta vanjskog tlaka na krov dvostruke nadstrešnice**

Za proračun koeficijenta vanjskog tlaka korištena je norma HRN EN 1991-1-4: 2005 [\[2\]](#) i nacionalni dodatak nHRN EN 1991-1-4: 2012/NA [\[6\]](#).



Slika 19: Tlocrt krova dvostruke nadstrešnice sa određenim zonama djelovanja vjetra

Pomoću prikazanog tlocrta (Slika 18), s prikazanim vjetrovnim zonama i dimenzijama, izračunate su površine vjetrovnih zona. Površine su izračunate na kosoj ravnini pod nagibom od 20°.

Površine vjetrovnih zona nadstrešnice iznose:

$$P_A = (478,72 \times 2160 \text{ cm}) \times 4 = 4136140,8 \text{ cm}^2 = 413,61$$

$$P_B = (797,87 \times 270 \text{ cm}) \times 8 = 1723399,2 \text{ cm}^2 = 172,33 \text{ m}^2$$

$$P_C = (319,15 \times 2700 \text{ cm}) \times 2 = 1723410 \text{ cm}^2 = 172,34 \text{ m}^2$$

$$P_D = (319,14 \times 2160 \text{ cm}) \times 2 = 1378684,8 \text{ cm}^2 = 137,87 \text{ m}^2$$

Za dvije povezane nadstrešnice je bilo potrebno odrediti faktor redukcije prema tablici 7.8.

Tablica 4: Faktori smanjenja  $\psi_{mc}$  za nadstrešnice s više polja [6]

Uvala	Položaj	Faktori $\psi_{mc}$ za sve $\varphi$	
		najveća vrijednost (prema dolje) koeficijenti sile i koeficijenti tlaka	najmanja vrijednost (prema gore) koeficijenti sile i koeficijenti tlaka
1	rubno polje	1,0	0,8
2	drugo polje	0,9	0,7
3	treće i naredna polja	0,7	0,7

Koeficijenti  $\rho$  u drugom polju se smanjuju s faktorom redukcije  $\psi_{mc}$  koji su 0,9 za pritisak i 0,7 za usis.

Iz tablice 4 su određeni neto koeficijenti  $c_{p, net}$  za svaku vjetrovnu zonu posebno. Odabrani koeficijenti  $\rho$  iznose  $\rho=0$  za prazan parking ispod nadstrešnica i  $\rho=1$  za popunjen parking.

Tablica 5: Vrijednosti koeficijenata  $c_{p,net}$  za dvostrešne nadstrešnice [6]

			Koeficijenti neto tlaka $c_{p,net}$ tlocrt			
Nagib krova $\alpha$	Zapriječenost $\varphi$	Koeficijenti sveukupne sile $c_r$				
			Područje A	Područje B	Područje C	Područje D
- 20°	Najveća vrijednost, svi $\varphi$	+ 0,7	+ 0,8	+ 1,6	+ 0,6	+ 1,7
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 0$	- 0,7	- 0,9	- 1,3	- 1,6	- 0,6
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,5	- 2,4	- 2,4	- 0,6
- 15°	Najveća vrijednost, svi $\varphi$	+ 0,5	+ 0,6	+ 1,5	+ 0,7	+ 1,4
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 0$	- 0,6	- 0,8	- 1,3	- 1,6	- 0,6
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,7	- 2,6	- 0,6
- 10°	Najveća vrijednost, svi $\varphi$	+ 0,4	+ 0,6	+ 1,4	+ 0,8	+ 1,1
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 0$	- 0,6	- 0,8	- 1,3	- 1,5	- 0,6
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,7	- 2,6	- 0,6
- 5°	Najveća vrijednost, svi $\varphi$	+ 0,3	+ 0,5	+ 1,5	+ 0,8	+ 0,8
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 0$	- 0,5	- 0,7	- 1,3	- 1,6	- 0,6
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,5	- 2,4	- 2,4	- 0,6
+ 5°	Najveća vrijednost, svi $\varphi$	+ 0,3	+ 0,6	+ 1,8	+ 1,3	+ 0,4
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 0$	- 0,6	- 0,6	- 1,4	- 1,4	- 1,1
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,3	- 2,0	- 1,8	- 1,5
+ 10°	Najveća vrijednost, svi $\varphi$	+ 0,4	+ 0,7	+ 1,8	+ 1,4	+ 0,4
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 0$	- 0,7	- 0,7	- 1,5	- 1,4	- 1,4
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,3	- 2,0	- 1,8	- 1,8
+ 15°	Najveća vrijednost, svi $\varphi$	+ 0,4	+ 0,9	+ 1,9	+ 1,4	+ 0,4
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 0$	- 0,8	- 0,9	- 1,7	- 1,4	- 1,8
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,3	- 2,2	- 1,6	- 2,1
+ 20°	Najveća vrijednost, svi $\varphi$	+ 0,6	+ 1,1	+ 1,9	+ 1,5	+ 0,4
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 0$	- 0,9	- 1,2	- 1,8	- 1,4	- 2,0
	Najmanja vrijednost, $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,4	- 2,2	- 1,6	- 2,1

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

Vjetar djeluje kao pritisak:

$$C_f = +0,6$$

$$\text{Zona A: } C_{p,net,A} = +1,1 \times \psi_{mc} = +1,1 \times 0,9 = +0,99$$

$$\text{Zona B: } C_{p,net,B} = +1,9 \times 0,9 = +1,71$$

$$\text{Zona C: } C_{p,net,C} = +1,5 \times 0,9 = +1,35$$

$$\text{Zona D: } C_{p,net,D} = +0,4 \times 0,9 = +0,36$$

Vjetar djeluje kao usis:

Parking je prazan :  $\rho = 0$

$$C_f = -0,9$$

$$\text{Zona A: } C_{p,net,A} = -1,2$$

$$\text{Zona B: } C_{p,net,B} = -1,8$$

$$\text{Zona C: } C_{p,net,C} = -1,4$$

$$\text{Zona D: } C_{p,net,D} = -2,0$$

Parking je pun:  $\rho = 1$

$$C_f = -1,3$$

$$\text{Zona A: } C_{p,net,A} = -1,4$$

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

$$\text{Zona C: } C_{p,net,C} = -1,6$$

$$\text{Zona D: } C_{p,net,D} = -2,1$$

### 3.3.3.3. Pritisak vjetra na krovnu konstrukciju

Pritisak vjetra na krovnu konstrukciju određuje se prema izrazu (13):

Vjetar djeluje kao pritisak:

$$\text{Zona A: } w_e(A) = q_p(z) \times c_{p,net}(A) = 0,69 \times 0,99 = 0,683 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zona B: } w_e(B) = q_p(z) \times c_{p,net}(B) = 0,69 \times 1,71 = 1,18 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zona C: } w_e(C) = q_p(z) \times c_{p,net}(C) = 0,69 \times 1,35 = 0,93 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zona D: } w_e(D) = q_p(z) \times c_{p,net}(D) = 0,69 \times 0,36 = 0,25 \text{ kN/m}^2$$

Vjetar djeluje kao usis:

$\rho = 0$  prazan parking

$$\text{Zona A: } w_e(A) = q_p(z) \times c_{p,net}(A) = 0,69 \times (-1,2) = -0,83 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zona B: } w_e(B) = q_p(z) \times c_{p,net}(B) = 0,69 \times (-1,8) = -1,24 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zona C: } w_e(C) = q_p(z) \times c_{p,net}(C) = 0,69 \times (-1,4) = -0,97 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zona D: } w_e(D) = q_p(z) \times c_{p,net}(D) = 0,69 \times (-2,0) = -1,38 \text{ kN/m}^2$$

$\rho=1$  pun parking

$$\text{Zona A: } w_e(A) = q_p(z) \times c_{p,net}(A) = 0,69 \times (-1,4) = -0,97 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zona B: } w_e(B) = q_p(z) \times c_{p,net}(B) = 0,69 \times (-2,2) = -1,52 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zona C: } w_e(C) = q_p(z) \times c_{p,net}(C) = 0,69 \times (-1,6) = -1,1 \text{ kN/m}^2$$

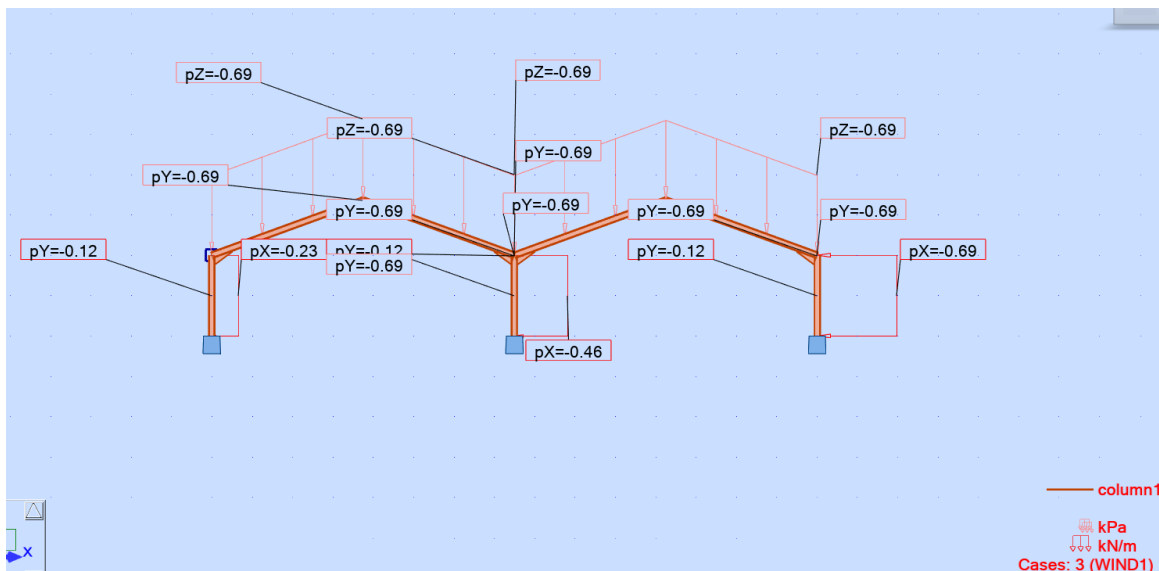
$$\text{Zona D: } w_e(D) = q_p(z) \times c_{p,net}(D) = 0,69 \times (-2,1) = -1,45 \text{ kN/m}^2 \quad (13)$$

gdje je:

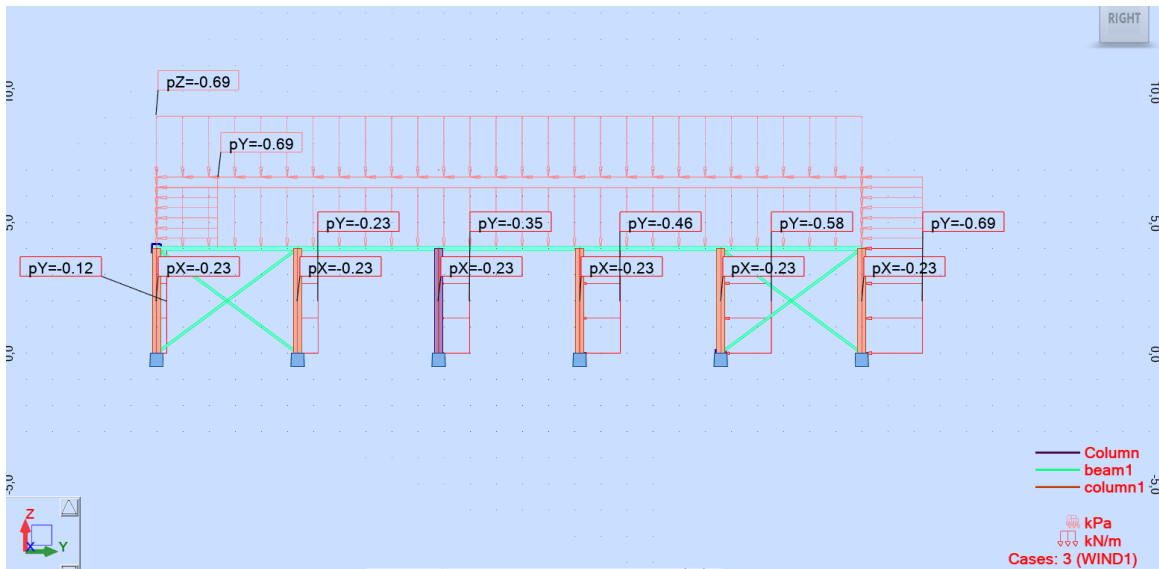
$w_e = -1,45 \text{ kN/m}^2$  pritisak vjetra na površinu

$c_p(\text{net}) = -1,2$  koeficijent pritiska na površine

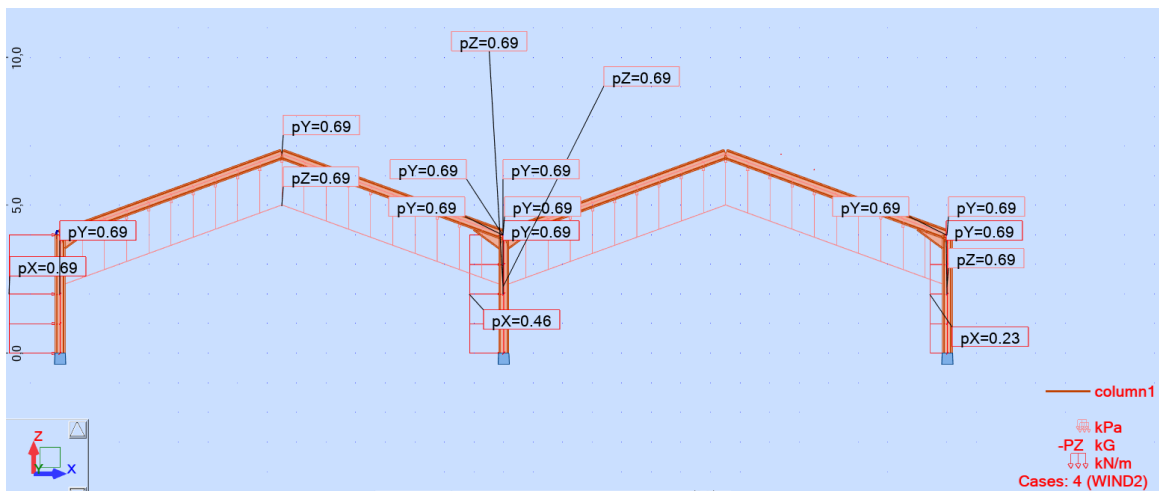
$q_p(z) = 0,69 \text{ kN/m}^2$  tlak vjetra na površinu



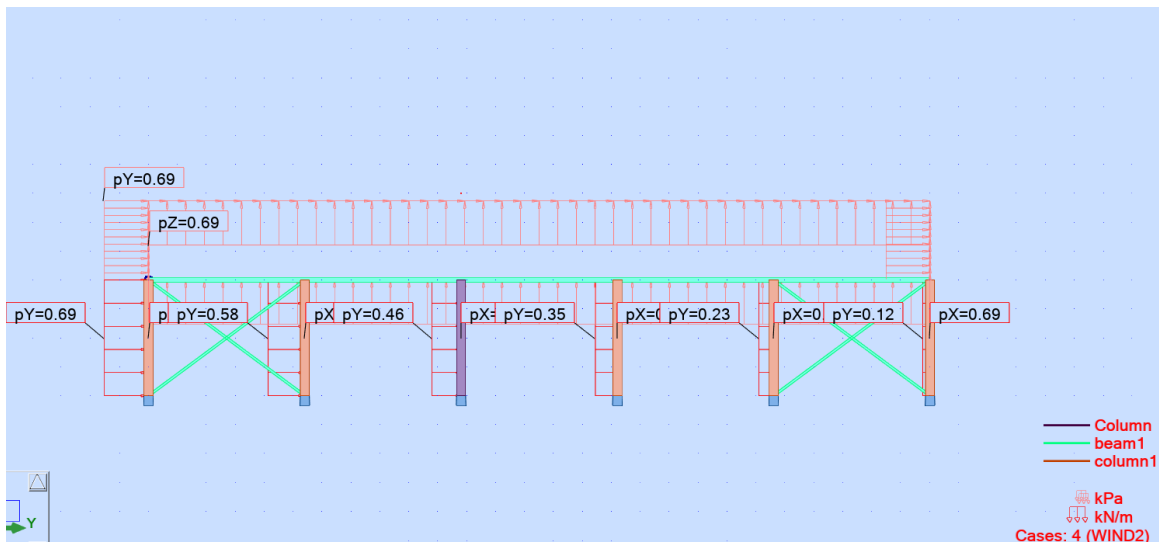
Slika 20: Opterećenje vjetra na konstrukciju u obliku pritiska (poprečni presjek)



Slika 21: Opterećenje vjetra na konstrukciju u obliku pritiska (uzdužni presjek)



Slika 22: Opterećenje vjetra na konstrukciju u obliku usisa (poprečni presjek)



Slika 23: Opterećenje vjetra na konstrukciju u obliku usisa (uzdužni presjek)

### 3.3.4. 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
6 (C)	COMB1	Linear Combinati	ULS	Structural	$(1+2)*1.35+3*1.50$
7 (C)	COMB2	Linear Combinati	ULS	Structural	$4*1.50+(1+2)*1.35$
8 (C)	COMB3	Linear Combinati	ULS	Structural	$3*1.50+(1+2)*1.35+4*0.90$
9 (C)	COMB4	Linear Combinati	ULS	Structural	$(2+1)*1.35+4*1.50+3*0.75$
10 (C)	COMB5	Linear Combinati	SLS	Structural	$(1+2+3)*1.00$
11 (C)	COMB6	Linear Combinati	SLS	Structural	$(1+2+4)*1.00$
12 (C)	COMB7	Linear Combinati	SLS	Structural	$(1+2+3)*1.00+4*0.60$
13 (C)	COMB8	Linear Combinati	SLS	Structural	$(1+2+4)*1.00+3*0.50$
14 (C)	COMB9	Linear Combinati	ULS	Structural	$5*1.50+(1+2)*1.35$
15 (C)	COMB10	Linear Combinati	ULS	Structural	$(2+1)*1.35+3*1.50+5*0.90$
16 (C)	COMB11	Linear Combinati	ULS	Structural	$(1+2)*1.35+3*0.75+5*1.50$
17 (C)	COMB12	Linear Combinati	SLS	Structural	$(1+2+5)*1.00$
18 (C)	COMB13	Linear Combinati	SLS	Structural	$(1+2+3)*1.00+5*0.60$
19 (C)	COMB14	Linear Combinati	SLS	Structural	$(1+2+5)*1.00+3*0.50$

Slika 24: Kombinacije djelovanja definirane u programu Robot Structural Analysis Professional



Lista kombinacija je određena tako da je:

COMB 1: 1.kombinacija GSN stalno + snijeg

COMB 2: 2.kombinacija GSN stalno+vjetar

COMB 3: 3.kombinacija GSN stalno+snijeg+vjetar

COMB 4: 4.kombinacija GSN stalno+vjetar+snijeg

COMB 5: 5.kombinacija GSU stalno+snijeg

COMB 6: 6.kombinacija GSU stalno+vjetar

COMB 7: 7.kombinacija GSU stalno+snijeg+vjetar

COMB 8: 8.kombinacija GSU stalno+vjetar+snijeg

COMB 9: 9.kombinacija GSN stalno-vjetar

COMB 10: 10.kombinacija GSN stalno+snijeg-vjetar

COMB 11: 11.kombinacija GSN stalno-vjetar+snijeg

COMB 12: 12.kombinacija GSU stalno-vjetar

COMB 13: 13.kombinacija GSU stalno+snijeg-vjetar

COMB 14: 14.kombinacija GSU stalno-vjetar+snijeg

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

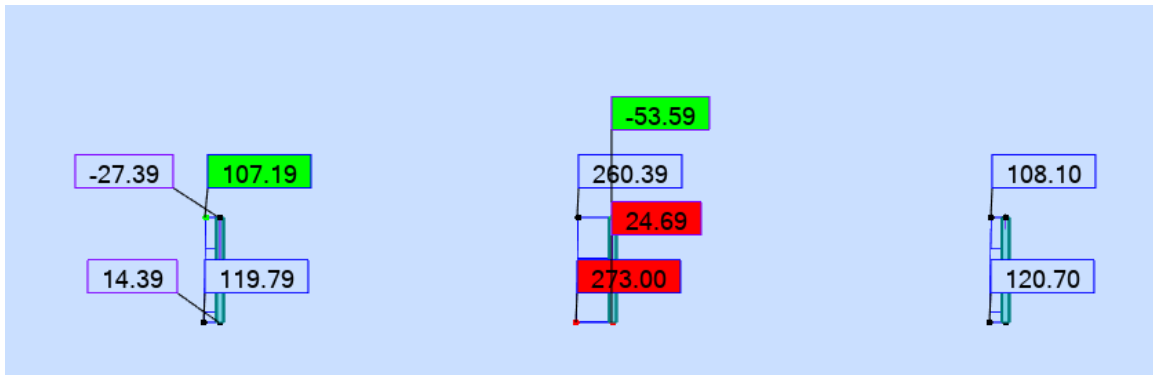
gdje je:

$\gamma_G$  parcijalni koeficijent sigurnosti za stalno djelovanje

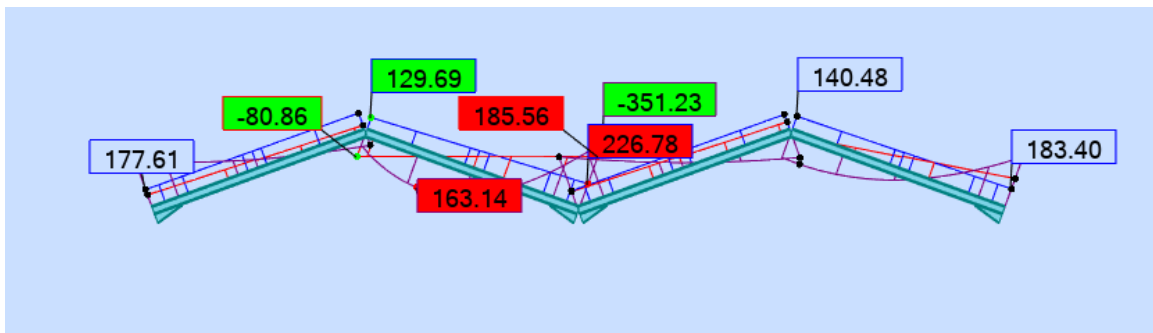
$\gamma_Q$  parcijalni koeficijent sigurnosti za promjenjivo djelovanje

### 3.4. Statički proračun unutarnjih sila

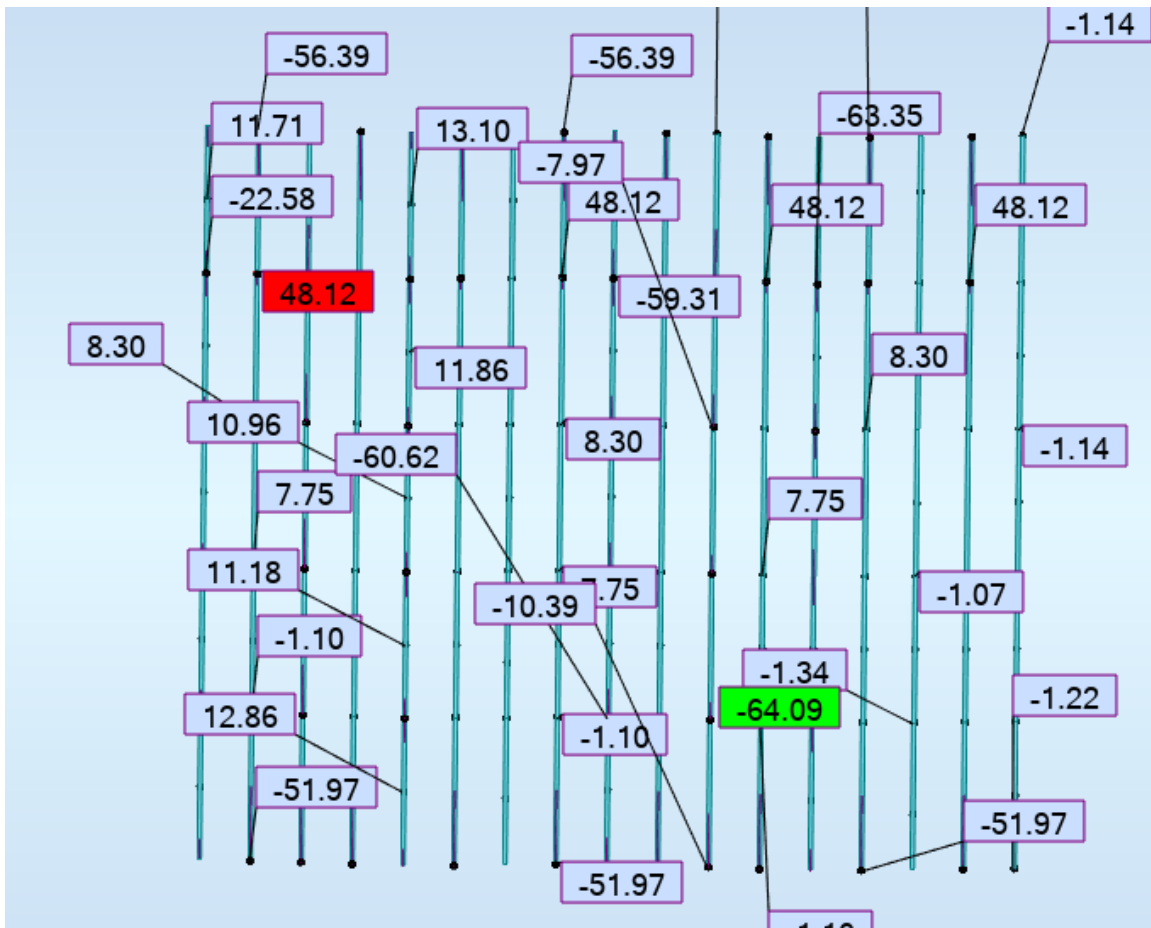
Statički proračun čelične konstrukcije nadstrešnice proveden je u programu Robot Structural Analysis Professional.



Slika 25: Prikaz unutarnjih sila na stupu za 3. kombinaciju djelovanja graničnog stanja nosivosti



Slika 26: Prikaz unutarnjih sila na kosoj prečki za 3. kombinaciju djelovanja graničnog stanja nosivosti



Slika 27: Prikaz unutarnjih sila na sekundarnom nosaču za 3. kombinaciju djelovanja graničnog stanja nosivosti

### 3.5. Dimenzioniranje glavnih elemenata konstrukcije nadstrešnice

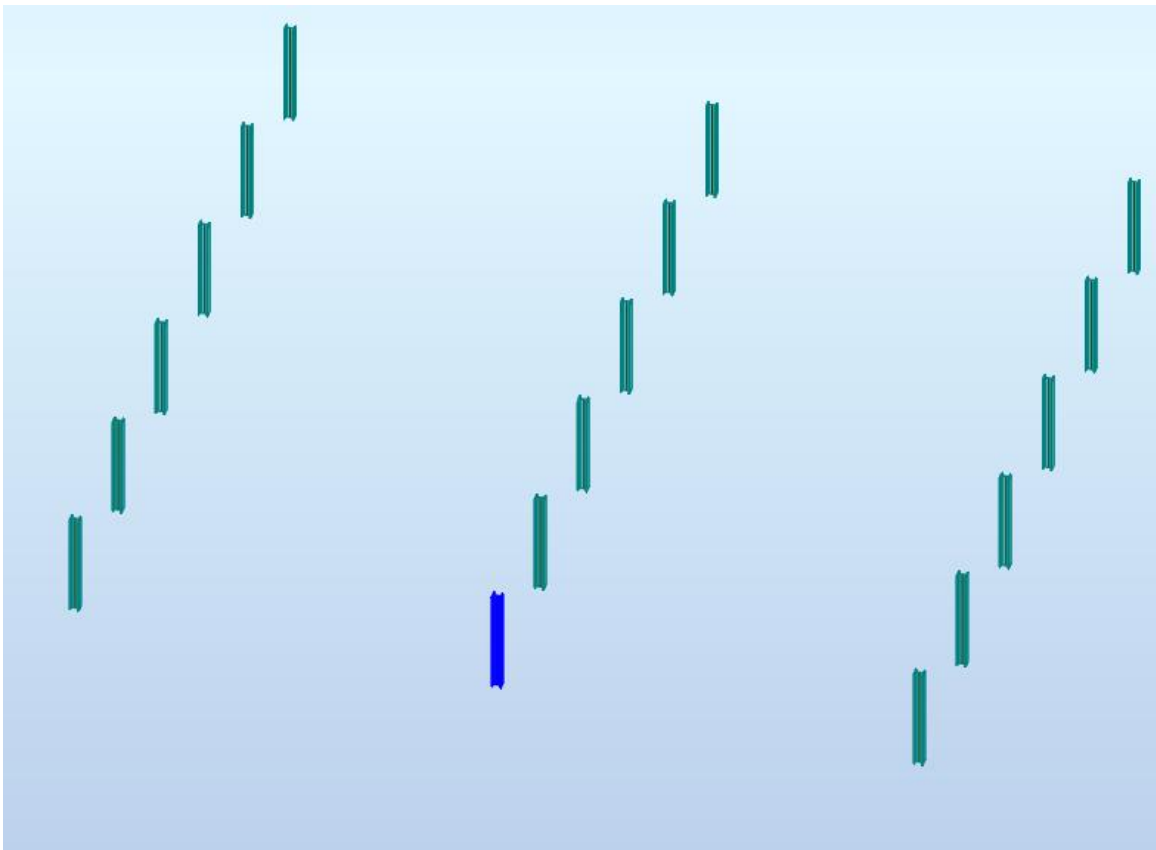
Dimenzioniranje glavnih elemenata dvostruke nadstrešnice provedeno je za stup, kosu prečku i sekundarni nosač za granično stanje nosivosti i granično stanje uporabljivosti. Dimenzioniranje elemenata čelične konstrukcije provedeno je prema normi EN 1993-1-1:2005 [3].

#### 3.5.1. Granično stanje nosivosti

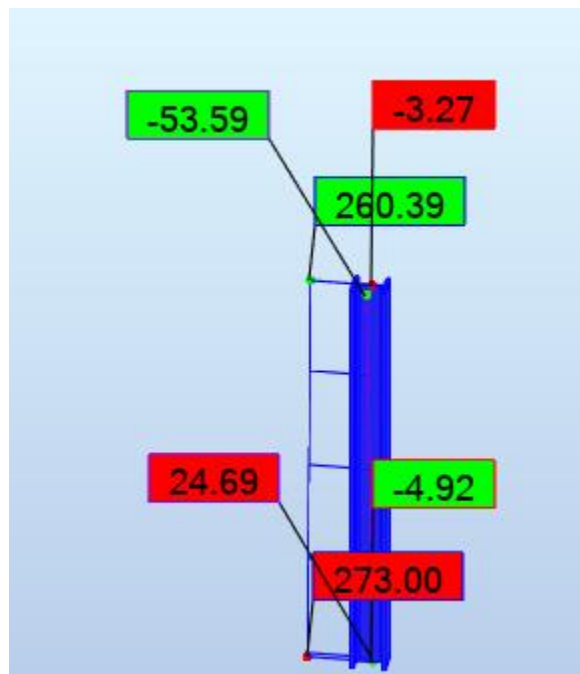
##### Stup

Klasifikacija poprečnog presjeka stupa

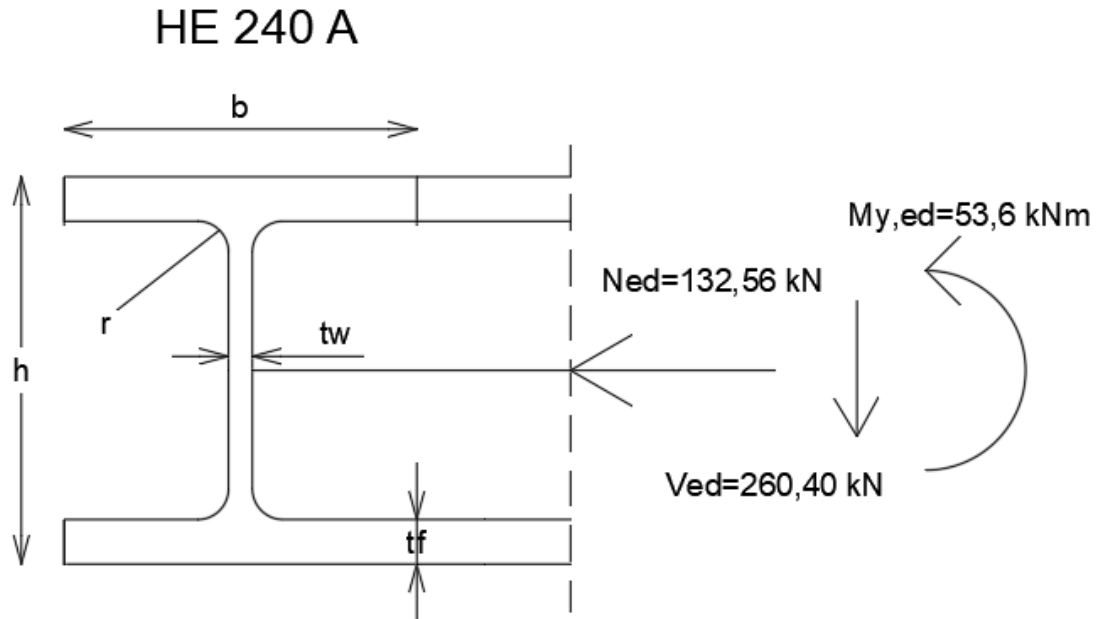
Za poprečni profil stupa uzet je valjani profil HE 240 A, klase čelika S275.



Slika 28: Prikaz najopterećenijeg stupa na konstrukciji (plava boja) za 3. kombinaciju djelovanja graničnog stanja nosivosti



Slika 29: Prikaz sila koje djeluju na stup



Karakteristike poprečnog presjeka:

$h=230 \text{ mm}$      $A=76,84 \text{ cm}^2$   
 $b=240 \text{ mm}$      $I_y=7763 \text{ cm}^4$   
 $t_f=12,0 \text{ mm}$      $W_{pl,y}=744,6 \text{ cm}^3$   
 $t_w=7,5 \text{ mm}$      $I_t=41,55 \text{ cm}^3$   
 $r=21 \text{ mm}$      $I_w=328,5 \text{ cm}^6$   
 $A_{v,z}=25,18 \text{ cm}^2$   
 $I_z=2769 \text{ cm}^4$

Svojstva čelika:

$E=210\,000 \text{ N/mm}^2$   
 $G=81\,000 \text{ N/mm}^2$   
 $\nu=0,3$   
 $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$   
 $f_y=275 \text{ N/mm}^2$   
 $f_u=430 \text{ N/mm}^2$

Klasifikacija hrpta stupa

Klasifikacija hrpta određuje se po tablici 5.2. (klasifikacija unutrašnjih tlačnih elemenata).

Tablica 6: Klasifikacija unutrašnjih tlačnih elemenata [\[3\]](#)

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

Odnos ravnog djela hrpta  $c$  i debljine hrpta  $t_w$  određuje se prema izrazu (14):

$$c = h - 2 \times t_f - 2 \times r = 230 - 2 \times 12,0 - 2 \times 21 = 164 \text{ mm} \quad (14)$$

gdje je:

$h=230$  mm visina profila

$t_f=12$  mm debljina pojasnice

$r=21$  mm polumjer valjanog spoja hrpta i pojasnice

Proračun  $\alpha$  za interakciju momenta savijanja i tlačne sile određuje se prema izrazu (15):

$$a = \frac{N_{Ed}}{\frac{2 \times t_w \times f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{132,56}{\frac{2 \times 0,75 \times 27,5}{1,0}} = 3,21 \text{ cm}$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \times \left( \frac{d}{2} + a \right) = \frac{1}{164} \times \left( \frac{164}{2} + 32,1 \right) = 0,7 \quad (15)$$

gdje je:

a=32,1 mm visina hrpta na koju djeluje moment savijanja I uzdužna tlačna sila

$N_{Ed}$ =132,56 kN računaska uzdužna sila

$t_w$ =7,5 mm debljina hrpta

d=164 mm ravni dio hrpta

$f_y$ =27,5 kN/cm<sup>2</sup> granica popuštanja čelika

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

Klasifikacija hrpta na savijanje i tlak određuje se prema izrazu (16):

$$\frac{c}{t} \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$$

$$\frac{164}{7,5} \leq \frac{396 \times 0,92}{13 \times 0,7 - 1}$$

21,86 < 44,98 Hrbat je klasa 1

(16)

gdje je:

c=177,6 mm visina hrpta

$t_w$ =5,9 mm debljina hrpta

$\alpha$ =0,51 proračun  $\alpha$

$\varepsilon$ =0,92 izduženje čelika

Klasifikacija pojasnice stupa

Klasifikacija pojasnice određuje se po tablici 5.2. (tablica 7)

Tablica 7: Klasifikacija vanjskih tlačnih elemenata [\[3\]](#)

vanjski tlačni elementi			
valjani profili		zavareni profili	
klasa	tlak	savijanje i tlak	
		rub u tlaku	rub u vlaku
raspodjela naprezanja po elementu (tlak pozitivan)			
1	$\frac{c}{t_f} \leq 9\epsilon$	$\frac{c}{t_f} \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$\frac{c}{t_f} \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$\frac{c}{t_f} \leq 10\epsilon$	$\frac{c}{t_f} \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$\frac{c}{t_f} \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
raspodjela naprezanja po elementu (tlak pozitivan)			
3	$\frac{c}{t_f} \leq 14\epsilon$	$\frac{c}{t_f} \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$	

Važan nam je odnos širine ravnog dijela pojasnice  $c$  i debljine pojasnice  $t_f$  koji se određuje prema izrazu (17):

$$c = \frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r = 120 - \frac{7,5}{2} - 21 = 95,25 \text{ mm} \quad (17)$$

gdje je:

$c=95,25$  mm širina opterećenog djela pojasnice

$b=240$  mm širina profila

$t_w=7,5$  mm debljina hrpta

$r=21$  mm polumjer valjanog spoja hrpta i pojasnice

Klasifikacija donje pojasnice na tlak stupa određuje se prema izrazu (18):

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

$$\frac{95,25}{12} \leq 9\epsilon$$

$$7,94 < 8,28 \text{ Pojasnica je klasa 1}$$

(18)

gdje je:

$c=95,25$  mm širina polovice pojasnice na koju djeluje tlak

$t_f=12$  mm debljina pojasnice

$\epsilon=0,92$  izduženje čelika

### Otpornost poprečnog presjeka stupa na tlak

Otpornost poprečnog presjeka na tlak za klasu 1 određuje se prema izrazu (19):



$$N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{MO}} = \frac{76,84 \times 27,5}{1,0} = 2113,1 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

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

$$132,56 < 2113,1 \text{ kN}$$

$$0,06 < 1 \text{ (6 \% iskoristivost)}$$

(19)

gdje je:

$N_{c,Rd}$ =2113,1 KN računska otpornost presjeka

$N_{Ed}$ =132,56 KN računska uzdužna sila

$A$ =76,84 cm<sup>2</sup> površina presjeka

$f_y$ =275 MPa granica popuštanja čelika

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

### Otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu (posmičnu silu)

Provjera izbočivanja hrpta se određuje prema izrazu (20):

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \frac{\epsilon}{\eta}$$

$$\frac{h - 2 \times t_f}{t_w} \leq 72 \frac{\epsilon}{\eta}$$

$$\frac{230 - 2 \times 12}{7,5} \leq 72 \times \frac{0,92}{1,2}$$

$$27,47 < 55,2 \text{ Nema izbočivanja hrpta}$$

(20)

gdje je:

$h_w$ =206 mm visina hrpta između pojasnica

$t_w$ =7,5 mm debljina hrpta

$\eta$ =1,2 faktor posmične površine

$\epsilon$ =0,92 izduženje čelika

Posmična površina presjeka određuje se prema izrazu (21):

$$A_{vz} = A - 2 \times b \times t_f + (t_w + 2r) \times t_f \geq \eta \times h_w \times t_w$$

$$A_{vz} = 76,84 - 2 \times 24 \times 1,2 + (0,75 + 2 \times 2,1) \times 1,2 \geq 1,2 \times 20,6 \times 0,75$$

$$A_{vz} = 25,18 > 18,54 \text{ cm}^2 \quad (21)$$

gdje je:

$A$ =76,84 cm<sup>2</sup> površina presjeka

$b$ =24 cm širina profila

$t_f$ =1,2 cm debljina pojasnice

$t_w$ =0,75 cm debljina hrpta

$r$ =2,1 cm polumjer valjanog dijela između pojasnica I hrpta

$\eta$ =1,2 faktor posmične površine

$h_w$ =20,6 cm visina hrpta između pojasnica

Posmična otpornost poprečnog presjeka  $V_{pl,Rd}$  određuje se prema izrazu (22):

$$V_{pl,Rd} = A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{\gamma_{M0}}$$
$$V_{pl,Rd} = 25,18 \times \frac{27,5}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1,0} = 399,78 \text{ kN}$$

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

$$260,39 < 399,78 \text{ KN (65 \% iskoristivost)} \quad (22)$$

gdje je:

$V_{pl,Rd}=399,78$  kN plastična otpornost na poprečnu silu

$V_{Z,Ed}=260,39$  kN računski posmična sila

$A_v=25,18$  cm<sup>2</sup> posmična površina

$f_y=27,5$  kN/cm<sup>2</sup> granica popuštanja čelika

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

### Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje određuje se prema izrazu (23):

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{744,6 \times 27,5}{1,0} = 204,8 \text{ kNm} \quad (23)$$

Uvjet nosivosti

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

$$53,59 < 204,8 \text{ kNm (26 \% iskoristivost)}$$

gdje je:

$W_{pl,y}=744,6$  cm<sup>3</sup> plastični moment otpora u y smjeru

$f_y=27,5$  kN/cm<sup>2</sup> granica popuštanja čelika

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

### Interakcija savijanja i tlaka (M-N)

Interakcija savijanja i tlaka određuje se prema izrazu (24):

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

$$132,56 \leq 0,25 \times 2113,1$$

$$132,56 < 528,28 \text{ kN} \quad \text{zadovoljava}$$

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

$$132,56 \leq \frac{0,5 \times 20,6 \times 0,75 \times 27,5}{1,0}$$

132,56 < 212,44 zadovoljava (24)

gdje je:

$N_{Ed}$  = 132,56 kN računski uzdužna sila

$N_{pl,Rd}$  = 2113,1 kN računski otpornost poprečnog presjeka na tlak

$h_w$  = 20,6 cm visina hrpta između pojasnica

$t_w$  = 0,75 cm debljina hrpta

$f_y$  = 27,5 kN/cm<sup>2</sup> granica popuštanja čelika

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

### Interakcija savijanja i posmika (M-V)

Interakcija savijanja i posmika određuje se prema izrazu (25):

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

260,39 ≤ 0,5 × 399,78 kN

260,39 > 199,89 kN ne zadovoljava (25)

gdje je:

$V_{z,Ed}$  = 260,39 kN računski poprečna sila

$V_{pl,Rd}$  = 399,78 kN računski otpornost na poprečnu silu

Računski otpornost presjeka na savijanje se reducira.

Plastična redukcija otpornosti na savijanje se određuje prema izrazu (26):

$$M_{y,V,Rd} = \left[ W_{pl,y} - \frac{\rho \times A_w^2}{4 \times t_w} \right] \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \leq M_{b,Rd}$$

$$M_{y,V,Rd} = \left[ 744,6 - \frac{0,1 \times 15,45^2}{4 \times 0,75} \right] \times \frac{27,5}{1,0} \leq 204,8 \text{ kNm}$$

$M_{y,V,Rd}$  = 202,6 kNm

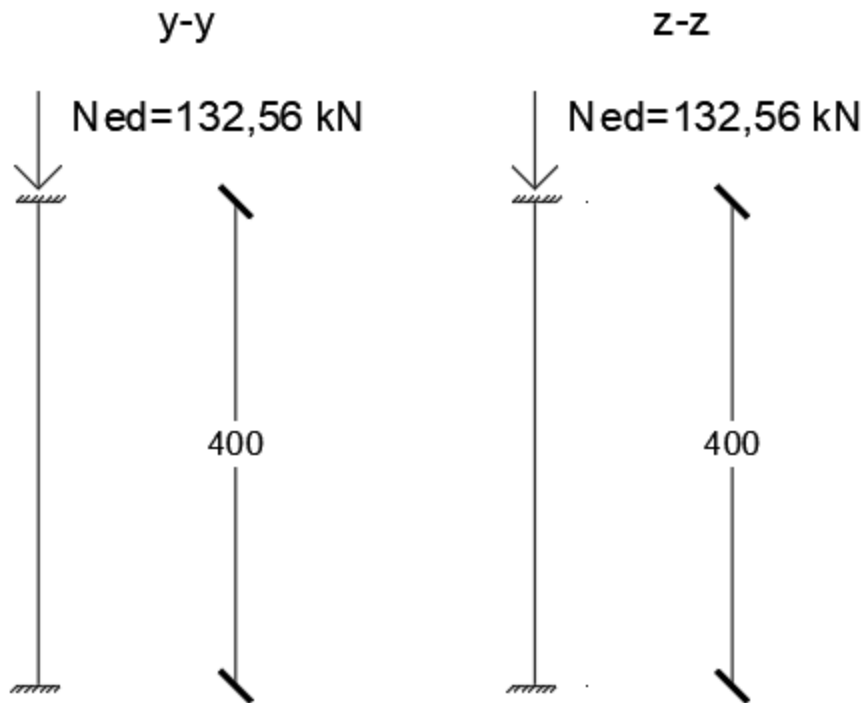
uvjet nosivosti:

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

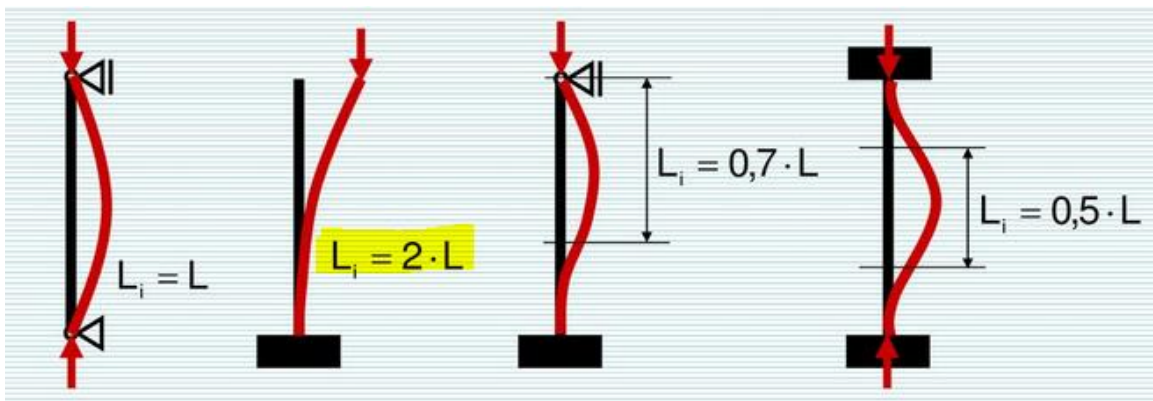
53,59 < 202,6 kNm (27 % iskoristivost) (26)

### Otpornost elementa stupa na izvijanje

Otpornost elementa stupa višeraspanske nadstrešnice se proračunalo na izvijanje



Slika 30: Izvijanje stupa oko osi y i osi z



Slika 31: Kritična duljina izvijanja  $L_{cr}$  [25]

Iz zaokružene slike se odredilo da je kritična duljina izvijanja  $L_{cr} = 2 \times L = 2 \times 4 = 8$  m.

Eulerova kritična duljina izvijanja  $N_{cr}$  određuje se prema izrazu (27):

$$N_{cr} = \frac{\pi \times E \times I_y}{L_{cr}^2} = \frac{\pi \times 21000 \times 7763}{800^2} = 800,24 \text{ kN} \quad (27)$$

gdje je:

$E = 21\,000 \text{ kN/cm}^2$  modul elastičnosti

$I_y = 7763 \text{ cm}^4$  moment inercije

$L_{cr} = 8 \text{ m}$  kritična duljina izvijanja

Vitkost elementa  $\lambda$  određuje se prema izrazu (28):

$$\lambda_y = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{76,84 \times 27,5}{800,24}} = 1,62 \quad (28)$$

gdje je:

$A=76,84 \text{ cm}^2$  površina profila

$f_y=27,5 \text{ kN/cm}^2$  granica popuštanja čelika

$N_{cr}=800,24 \text{ KN}$  Eulerova kritična sila izvijanja

Faktor imperfekcije  $\alpha$  bilo je potrebno odrediti pomoću tablice odabira krivulje izvijanja. Odnos visine i širine profila  $h/b$  ( $230/240 \text{ mm}$ ) je jednak  $0,96$ , što je manje od uvjetnog iznosa  $1,2$  koji je zadan u tablici za odabir krivulje izvijanja. Iz donje tablice (slika 43) se očita faktor imperfekcije za dobivenu krivulju  $b$ . Faktor imperfekcije oko osi  $y$  je  $\alpha=0,34$ .

Tablica 8: Odabir krivulje izvijanja [3]

Odabir krivulje izvijanja

Poprečni presjeci	Ograničenja	Izvijanje oko osi	Linija izvijanja	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Vojani presjeci 	$h/b \leq 1,2$ $h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$ $40 \text{ mm} < t_f \leq 100$ $t_f \leq 100 \text{ mm}$ $t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z y-y z-z y-y z-z	a a <sub>0</sub> b a c a d c
Zavretni i zavretni profili 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$ $t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z y-y z-z	b e c d	b e c d
Šupji presjeci 	vruće dogotovljeni hladno oblikovani	bilo koje	a c	a <sub>0</sub> c
Zavretni savršeni savršeni presjeci 	općenito (osim kao ispod) debljina vara: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $b/t_w < 30$	bilo koje	b c	b c
U-, T-, i pni presjeci 		bilo koje	c	c
L- presjeci 		bilo koje	b	b

Krivulja izvijanja	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
Faktor imperfekcije $\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Faktor izvijanja  $\phi$  se određuje prema izrazu (29):

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

$$\phi = 0,5 \times (1 + 0,34 \times (1,62 - 0,2)) + 1,62^2 = 2,05 \quad (29)$$

gdje je:

$\alpha=0,34$  faktor imperfekcije  
 $\lambda_y=1,62$  vitkost elementa

Faktor redukcije X određuje se prema izrazu (30):

$$X_y = \frac{1}{\phi + (\phi^2 - \lambda^2)^{0,5}} = \frac{1}{2,05 + (2,05^2 - 1,62^2)^{0,5}} = 0,30 \leq 1 \quad (30)$$

gdje je:

$\eta=2,05$  faktor izvijanja  
 $\lambda_y=1,62$  vitkost elementa

### Otpornost elementa stupa na izvijanje oko osi z

Eulerova kritična sila izvijanja  $N_{cr}$  određuje se prema izrazu (31):

$$N_{cr} = \frac{\pi \times E \times I_z}{L_{cr}^2} = \frac{\pi \times 21000 \times 2769}{800^2} = 285,44 \text{ kN} \quad (31)$$

gdje je:

$E=21\ 000$  kN/cm<sup>2</sup> modul elastičnosti  
 $I_z=2769$  cm<sup>4</sup> moment inercije oko osi z  
 $L_{cr}=8$  m kritična duljina izvijanja

Vitkost elementa  $\lambda$  određuje se prema izrazu (32):

$$\lambda_z = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{76,84 \times 27,5}{285,44}} = 2,72 \quad (32)$$

gdje je:

$A=76,84$  cm<sup>2</sup> površina profila  
 $f_y=27,5$  KN/cm<sup>2</sup> granica popuštanja čelika  
 $N_{cr}=285,44$  KN Eulerova kritična sila izvijanja oko osi z

Faktor izvijanja  $\eta$  se određuje prema izrazu (33):

$$\begin{aligned} \phi &= 0,5 \times (1 + \alpha \times (\lambda_z - 0,2) + \lambda_z^2) \\ \phi &= 0,5 \times (1 + 0,49 \times (2,72 - 0,2) + 2,72^2) = 5,07 \end{aligned} \quad (33)$$

gdje je:

$\alpha=0,34$  faktor imperfekcije  
 $\lambda_z=2,72$  vitkost elementa

Faktor redukcije X određuje se prema izrazu (34):

$$X = \frac{1}{\phi + (\phi^2 - \lambda^2)^{0,5}} = \frac{1}{5,07 + (5,07^2 - 2,72^2)^{0,5}} = 0,11 \leq 1$$

$$X = \min(0,3; 0,11) = 0,11 \quad (34)$$

gdje je:

$\eta=23,37$  faktor izvijanja  
 $\lambda_z=6,6$  vitkost elementa

Otpornost tlačnog elementa na izvijanje  $N_{b,Rd}$  određuje se prema izrazu (35):

$$N_{b,Rd} = X \times \frac{A \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,11 \times \frac{76,84 \times 27,5}{1,1} = 211,31 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

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

$$132,56 < 211,31 \text{ KN (63 \% iskoristivost)} \quad (35)$$

gdje je:

$X=0,11$  faktor redukcije

$A=76,84 \text{ cm}^2$  površina poprečnog presjeka profila

$f_y=27,5 \text{ kN/cm}^2$  granica popuštanja čelika

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

### Otpornost elementa stupa na bočno torzijsko izvijanje

Elastični kritični moment bočnog torzijskog izvijanja određuje se prema izrazu (36):

$$M_{cr} = C_1 \times \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{(k \times L)^2} \times \left[ \sqrt{\frac{k^2}{kk_w} \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \times L)^2 \times G \times I_t}{\pi^2 E \times I_z}} + (C_2 \times z_g)^2 - C_2 \times z_g \right]$$

$$M_{cr} = 2,57 \times \frac{\pi^2 \times 21000 \times 2769}{(1 \times 400)^2} \times \left[ \sqrt{\frac{1^2}{1 \times 1} \times \frac{328,5}{2769} + \frac{(1 \times 400)^2 \times 8077 \times 41,55}{\pi^2 \times 21000 \times 2769}} + (1,55 \times 11,5)^2 - 1,55 \times 11,5 \right]$$

$$M_{cr} = 22661 \text{ kNcm} = 226,61 \text{ kNm} \quad (36)$$

gdje je:

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

$E=21\ 000 \text{ kN/cm}^2$  modul elastičnosti

$I_z=2769 \text{ cm}^4$  moment inercije u z smjeru

$L=400 \text{ cm}$  razmak točaka bočnog pridrzanja

$k, k_w=1$  faktori krivljenja

$I_w=328,5 \text{ cm}^6$  konstanta krivljenja

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

$I_t=41,55 \text{ cm}^3$  torzijska konstanta

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

$z_g=11,5 \text{ cm}$  razmak između centra posmika i točke djelovanja opterećenja

Bezdimenzijska vitkost elementa  $\lambda_{LT}$  određuje se prema izrazu (37):

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{744,6 \times 27,5}{22661}} = 0,95 \quad (37)$$

gdje je:

$W_y=744,6 \text{ cm}^3$  moment otpora u smjeru y

$f_y=27,5 \text{ kN/cm}^2$  granica popuštanja čelika

$M_{cr}=22661 \text{ kNcm}$  elastični kritični moment bočno-torzijskog izvijanja

Valjani H profil spada pod valjane I presjeke (razred a) kada se uzima faktor imperfekcije  $\alpha_{LT}$ .

Tablica 9: faktor imperfekcije  $\alpha_{LT}$  zavisno od krivulje izvijanja [3]

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

Faktor bočnog torzijskog izvijanja  $\phi_{LT}$  određuje se prema izrazu (38):

$$\phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2] = 0,5[1 + 0,21x(0,95 - 0,2) + 0,95^2] = 1,03 \quad (38)$$

gdje je:

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

$\lambda_{LT}= 0,95$  vitkost elementa

Faktor redukcije  $X_{LT}$  određuje se prema izrazu (39):

$$X_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = \frac{1}{1,03 + \sqrt{1,03^2 - 0,95^2}} = 0,70 \quad (39)$$

gdje je:

$\phi_{LT}=1,03$  faktor bočnog torzijskog izvijanja

$\lambda_{LT}=0,95$  vitkost elementa

Otpornost elementa na bočno torzijsko izvijanje  $M_{b,Rd}$  određuje se prema izrazu (40):

$$M_{b,Rd} = X_{LT} \times \frac{W_y \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,70 \times \frac{744,6 \times 27,5}{1,1} = 13030,5 \text{ kNcm} = 130,31 \text{ kNm} \quad (40)$$

Uvjet nosivosti:

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

$53,59 < 130,31 \text{ kNm}$  (41% iskoristivost)



gdje je:

$X_{LT}=0,70$  faktor redukcije

$W_y=744,6 \text{ cm}^3$  moment otpora

$f_y=275 \text{ N/mm}^2$  granica popuštanja čelika

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

### Interakcija izvijanja i savijanja elementa stupa (M-N):

Interakcijski faktori za klase 1 i 2 određuju se prema izrazu (41):

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

Za  $\lambda_z=2,72 > 0,4$

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

$$\alpha_h = \frac{M_h}{M_s} = 0,1$$

$$C_{my} = 0,95 + 0,05 \times \alpha_h = 0,95 + 0,05 \times 0,1 = 0,96$$

$$C_{m,LT} = 0,95 + 0,05 \times \alpha_h = 0,96$$

$$k_{yy} = 0,96 \times \left[ 1 + (1,62 - 0,2) \frac{132,56}{0,3 \times \frac{2113,1}{1,1}} \right] \geq 0,96 \times \left[ 1 + 0,8 \times \frac{132,56}{0,30 \times \frac{2113,1}{1,1}} \right]$$

$$k_{yy} = 1,27 \geq 1,13$$

$$k_{yy}=1,27$$

$$k_{zy} = \left[ 1 - \frac{0,1 \times 2,72}{(0,96 - 0,25)} \times \frac{132,56}{0,11 \times \frac{2113,1}{1,1}} \right] \geq \left[ 1 - \frac{0,1}{(0,96 - 0,25)} \times \frac{132,56}{0,11 \times \frac{2113,1}{1,1}} \right]$$

$$k_{zy} = 0,76 \geq 0,71$$

$$k_{zy}=0,76$$

(41)

Interakcija izvijanja i savijanja stupa određuje se prema izrazu (42):

$$\frac{N_{Ed}}{X_y \times \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M0}}} + k_{yy} \times \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \times \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M0}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{X_z \times \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M0}}} + k_{zy} \times \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \times \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M0}}} \leq 1$$

$$\frac{132,56}{0,3 \times \frac{2113,1}{1,0}} + 1,27 \times \frac{53,59}{0,70 \times \frac{204,8}{1,0}} \leq 1$$

0,68 < 1

$$\frac{132,56}{0,11 \times \frac{2113,1}{1,0}} + 0,76 \times \frac{53,59}{0,70 \times \frac{204,8}{1,0}} \leq 1$$

0,85 < 1

(42)

gdje je:

$N_{Ed}$ =132,56 računaska uzdužna sila

$X_y$ =0,30 faktor redukcije izvijanja oko osi y

$X_z$ =0,11 faktor redukcije izvijanja stupa oko osi z

$X_{LT}$ =0,70 faktor redukcije za bočno torzijsko izvijanje

$N_{Rk}$ =2113,1 karaktersitična otpornost elementa na izvijanje

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

$k_{zy}$ =0,76,  $k_{yy}$ =1,27 interakcijski faktori

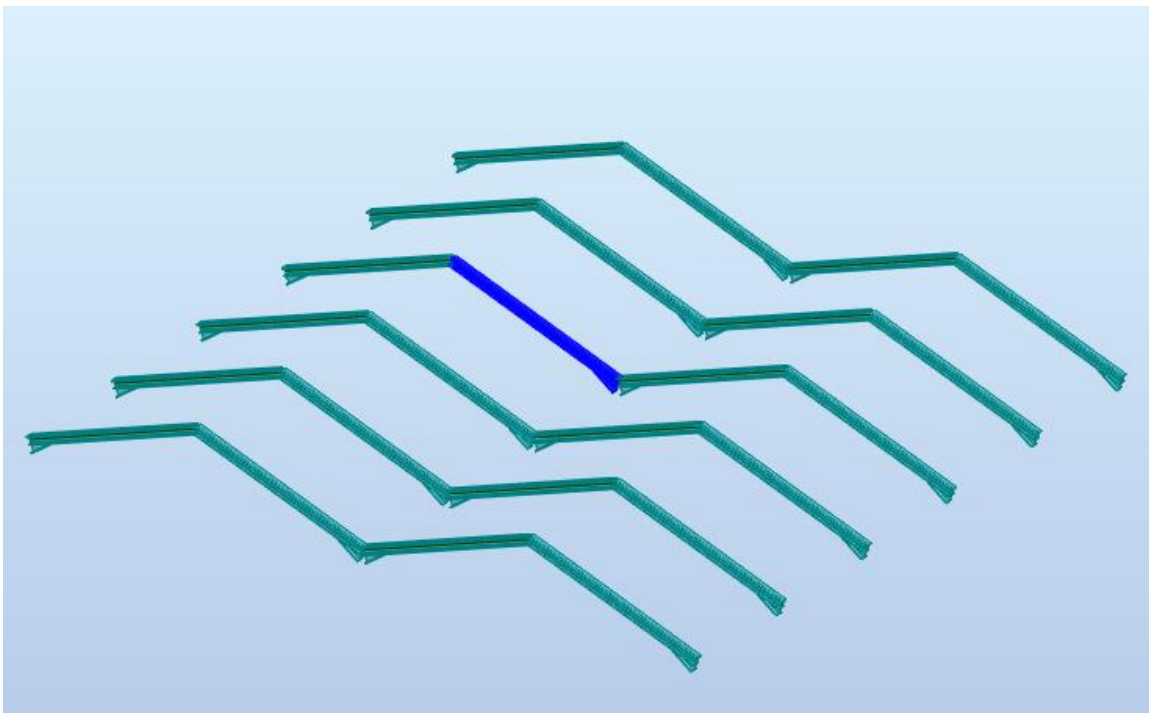
$M_{y,Ed}$ =53,59 kNm računski moment na savijanje

$M_{y,Rk}$ =204,8 kNm karakteristična otpornost elementa na bočno torzijsko izvijanje

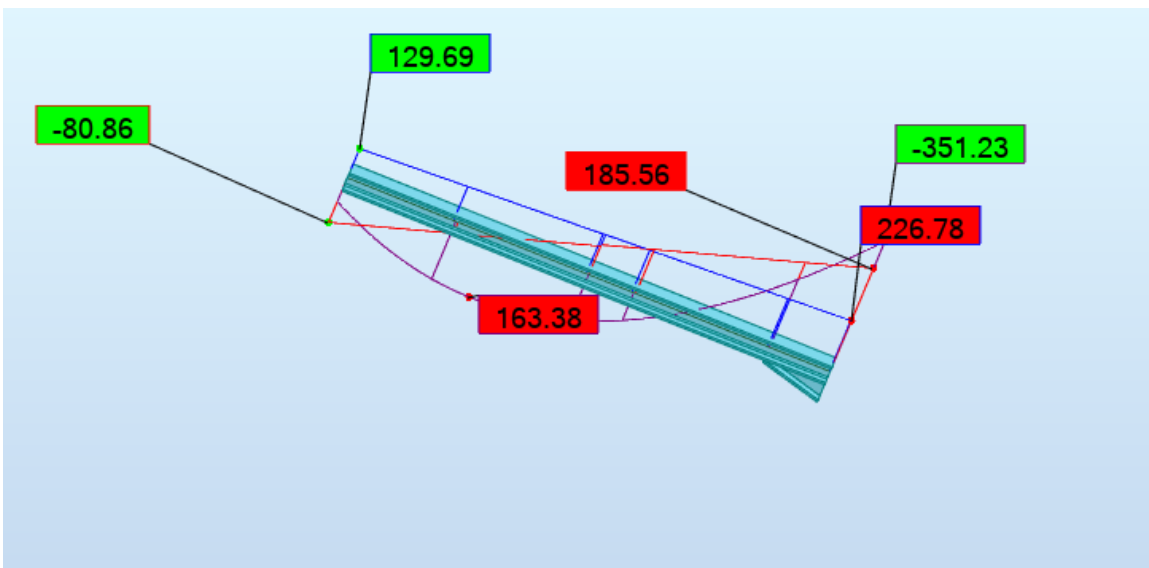
### Kosa prečka

Klasifikacija poprečnog presjeka kose prečke

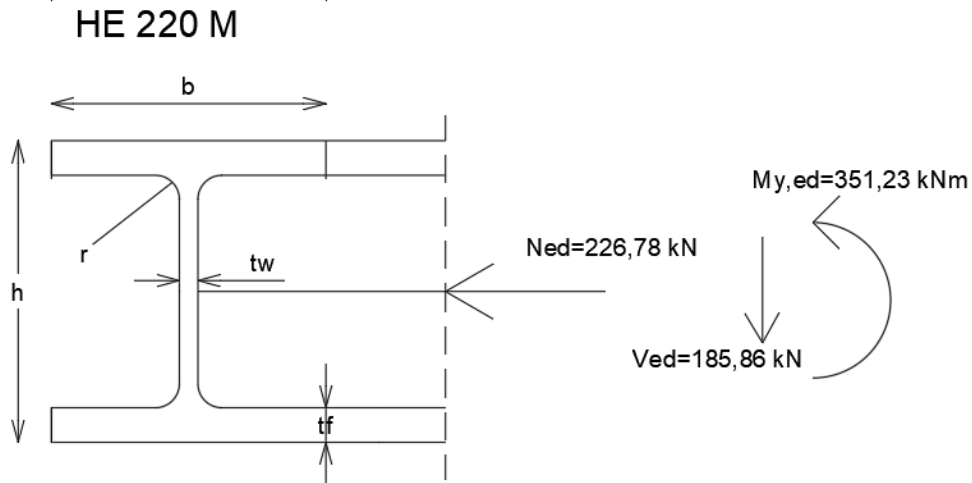
Za poprečni profil kose prečke uzet je valjani profil HE 220 M, klase čelika S275.



Slika 32: Najopterećenija kosa prečka za 4. kombinaciju djelovanja GSN



Slika 33: Prikaz sila koje djeluju na kosu prečku



Karakteristike poprečnog presjeka:

$h = 240 \text{ mm}$      $A = 149,40 \text{ cm}^2$   
 $b = 226 \text{ mm}$      $I_y = 14\,600 \text{ cm}^4$   
 $t_f = 26 \text{ mm}$      $W_{pl,y} = 1419 \text{ cm}^3$   
 $t_w = 15,5 \text{ mm}$      $I_t = 315,3 \text{ cm}^3$   
 $r = 18 \text{ mm}$      $I_w = 572,7 \text{ cm}^6$   
 $A_{v,z} = 45,31 \text{ cm}^2$   
 $I_z = 5012 \text{ cm}^4$

Svojstva čelika:

$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$   
 $G = 81\,000 \text{ N/mm}^2$   
 $\nu = 0,3$   
 $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$   
 $f_y = 275 \text{ N/mm}^2$   
 $f_u = 430 \text{ N/mm}^2$

### Klasifikacija hrpta kose prečke:

Odnos ravnog djela hrpta  $c$  i debljine hrpta  $t_w$  određuje se prema izrazu (43):

$$c = h - 2 \times t_f - 2 \times r = 240 - 2 \times 26 - 2 \times 18 = 152 \text{ mm} \quad (43)$$

gdje je:

$h = 240 \text{ mm}$  visina profila

$t_f = 26 \text{ mm}$  debljina pojasnice

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

Proračun  $\alpha$  za interakciju momenta savijanja i tlačne sile određuje se prema izrazu (44):

$$a = \frac{N_{Ed}}{\frac{2 \times t_w \times f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{226,78}{\frac{2 \times 1,55 \times 27,5}{1,0}} = 2,66 \text{ cm}$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \times \left( \frac{d}{2} + a \right) = \frac{1}{152} \times \left( \frac{152}{2} + 26,6 \right) = 0,68 \quad (44)$$

Klasifikacija hrpta na savijanje i tlak određuje se prema izrazu (45):

$$\frac{c}{t} \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$$

$$\frac{152}{15,5} \leq \frac{396 \times 0,92}{13 \times 0,68 - 1}$$

$$9,81 < 46,47 \text{ Hrbat je klasa 1}$$

(45)

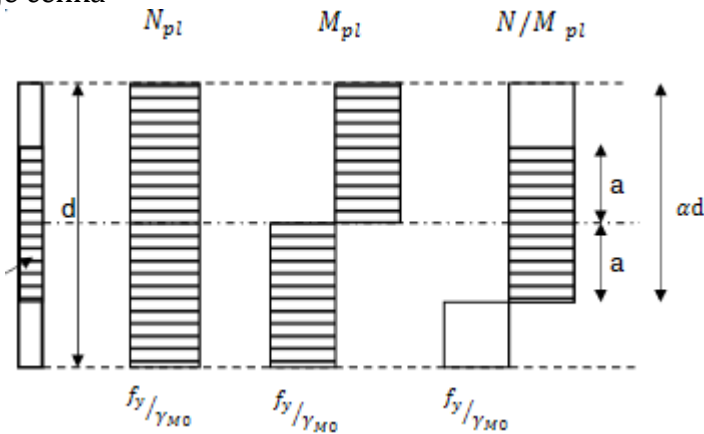
gdje je:

$c=152$  mm visina hrpta

$t_w=15,5$  mm debljina hrpta

$\alpha=0,68$  proračun  $\alpha$

$\varepsilon=0,92$  izduženje čelika



Slika 34: Proračun  $\alpha$  [34]

### Klasifikacija pojasnice kose prečke

Važan nam je odnos širine ravnog dijela pojasnice  $c$  i debljine pojasnice  $t_f$  koji se određuje prema izrazu (46):

$$c = \frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r = 113 - \frac{15,5}{2} - 18 = 87,25 \text{ mm} \quad (46)$$

gdje je:

$c=87,25$  mm širina opterećenog djela pojasnice

$b=226$  mm širina profila

$t_w=15,5$  mm debljina hrpta

$r=18$  mm polumjer valjanog spoja hrpta i pojasnice

Klasifikacija pojasnice na tlak kose prečke određuje se prema izrazu (47):

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

$$\frac{87,25}{26} \leq 9 \times 0,81$$

3,36 < 8,28 Pojasnica je klasa 1 (47)

gdje je:  
 c=87,25 mm širina polovice pojasnice na koju djeluje tlak  
 t<sub>f</sub>=26 mm debljina pojasnice  
 ε=0,92 izduženje čelika

### Otpornost poprečnog presjeka kose prečke na tlak

Otpornost poprečnog presjeka na tlak za klasu 1 određuje se prema izrazu (48):

$$N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{MO}} = \frac{149,40 \times 27,5}{1,0} = 4108,5 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:  
 $N_{Ed} \leq N_{c,Rd}$   
 226,78 < 4108,5 kN  
 0,06 < 1 (6 % iskoristivost) (48)

gdje je:  
 N<sub>c,Rd</sub>=4108,5 KN računski otpornost presjeka  
 N<sub>Ed</sub>=226,78 KN računski uzdužna sila  
 A=149,40 cm<sup>2</sup> površina presjeka  
 f<sub>y</sub>=275 MPa granica popuštanja čelika  
 γ<sub>MO</sub> = 1,0 parcijalni koeficijent sigurnosti

### Otpornost poprečnog presjeka kose prečke na poprečnu silu (posmičnu silu)

Provjera izbočivanja hrpta se određuje prema izrazu (49):

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \frac{\epsilon}{\eta}$$

$$\frac{h - 2 \times t_f}{t_w} \leq 72 \frac{\epsilon}{\eta}$$

$$\frac{240 - 2 \times 26}{15,5} \leq 72 \times \frac{0,92}{1,2}$$

12,12 < 55,2 Nema izbočivanja hrpta (49)

gdje je:  
 h<sub>w</sub>=188 mm visina hrpta između pojasnica  
 t<sub>w</sub>=15,5mm debljina hrpta  
 η=1,2 faktor posmične površine  
 ε=0,92 izduženje čelika

Posmična površina presjeka određuje se prema izrazu (50):

$$\begin{aligned}A_{vz} &= A - 2 \times b \times t_f + (t_w + 2r) \times t_f \geq \eta \times h_w \times t_w \\A_{vz} &= 149,40 - 2 \times 22,6 \times 2,6 + (1,55 + 2 \times 1,8) \times 2,6 \geq 1,2 \times 18,8 \times 1,45 \\A_{vz} &= 45,27 \text{ cm}^2 \geq 32,72 \text{ cm}^2\end{aligned}\quad (50)$$

gdje je:

A=149,40 cm<sup>2</sup> površina presjeka

b=22,6 cm širina profila

t<sub>f</sub>=2,6 cm debljina pojasnice

t<sub>w</sub>=1,55 cm debljina hrpta

r=1,8 cm polumjer valjanog dijela između pojasnica I hrpta

η=1,2 faktor posmične površine

h<sub>w</sub>=18,8 cm visina hrpta između pojasnica

Posmična otpornost poprečnog presjeka V<sub>pl,Rd</sub> određuje se prema izrazu (51):

$$\begin{aligned}V_{pl,Rd} &= A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{\gamma_{M0}} \\V_{pl,Rd} &= 45,27 \times \frac{27,5}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1,0} = 718,76 \text{ kN}\end{aligned}$$

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

$$185,86 < 718,76 \text{ KN (26\% iskoristivost)} \quad (51)$$

gdje je:

V<sub>pl,Rd</sub>=718,76 kN plastična otpornost na poprečnu silu

V<sub>Z,Ed</sub>=185,86 kN računski posmična sila

A<sub>v</sub>=45,27 cm<sup>2</sup> posmična površina

f<sub>y</sub>=27,5 kN/cm<sup>2</sup> granica popuštanja čelika

γ<sub>M0</sub> = 1,0 parcijalni koeficijent sigurnosti

### Otpornost poprečnog presjeka kose prečke na savijanje

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje određuje se prema izrazu (52):

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1419 \times 27,5}{1,0} = 390,22 \text{ kNm} \quad (52)$$

Uvjet nosivosti

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

$$351,23 < 390,22 \text{ kNm}$$

$$0,90 < 1 \text{ (90\% iskoristivost)}$$

gdje je:

W<sub>pl,y</sub>=1419 cm<sup>3</sup> plastični moment otpora u y smjeru

$f_y = 27,5 \text{ kN/cm}^2$  granica popuštanja čelika  
 $\gamma_{M0} = 1,0$  parcijalni koeficijent sigurnosti  
 $M_{y,Ed} = 351,23 \text{ kNm}$  računski moment savijanja kose prečke

### Interakcija savijanja i tlaka (M-N)

Interakcija savijanja i tlaka određuje se prema izrazu (53):

$$\begin{aligned}
 N_{Ed} &\leq 0,25 N_{pl,Rd} \\
 226,78 &\leq 0,25 \times 4108,5 \\
 226,78 &< 1027,13 \text{ KN zadovoljava}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N_{Ed} &\leq \frac{0,5 \times h_w \times t_w \times f_y}{\gamma_{M0}} \\
 226,78 &\leq \frac{0,5 \times 18,8 \times 1,55 \times 27,5}{1,0} \\
 226,78 &< 400,68 \text{ zadovoljava}
 \end{aligned} \tag{53}$$

gdje je:

$N_{ed} = 226,78 \text{ KN}$  računska uzdužna sila  
 $N_{pl,Rd} = 4108,5 \text{ KN}$  otpornost poprečnog presjeka na tlak

Uzdužna sila nema utjecaj na otpornost presjeka na savijanje.

### Interakcija savijanja i posmika (M-V)

Interakcija savijanja i posmika određuje se prema izrazu (54):

$$\begin{aligned}
 V_{Ed} &\leq 0,5 V_{pl,Rd} \\
 185,86 \text{ kN} &\leq 0,5 \times 718,76 \text{ kN} \\
 185,86 &< 359,38 \text{ KN zadovoljava}
 \end{aligned} \tag{54}$$

gdje je:

$V_{z,Ed} = 185,86 \text{ KN}$  računska poprečna sila  
 $V_{pl,Rd} = 718,76 \text{ KN}$  računska otpornost na poprečnu silu

Računska otpornost presjeka na savijanje se ne reducira

### Otpornost elementa sekundarnog nosača na bočno torzijsko izvijanje:

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

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



$$M_{cr} = 2,57 \times \frac{\pi^2 \times 21000 \times 5012}{(1 \times 798)^2} \times \sqrt{\frac{1}{1 \times 1} \times \frac{572,7}{5012} + \frac{(1 \times 798)^2 \times 8077 \times 315,3}{\pi^2 \times 21000 \times 5012} + (1,55 \times 12)^2 - 1,55 \times 12}$$

$$M_{cr} = 105110 \text{ kNcm} = 1051,10 \text{ kNm} \quad (55)$$

gdje je:

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

$E=21\ 000 \text{ kN/cm}^2$  modul elastičnosti

$I_z=5012 \text{ cm}^4$  moment inercije u z smjeru

$L=798 \text{ cm}$  razmak točaka bočnog pridržanja

$k, k_w=1$  faktori krivljenja

$I_w=572,7 \text{ cm}^6$  konstanta krivljenja

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

$I_t=315,3 \text{ cm}^3$  torzijska konstanta

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

$z_g=12 \text{ cm}$  razmak između centra posmika i točke djelovanja opterećenja

Bezdimenzijska vitkost elementa  $\lambda_{LT}$  određuje se prema izrazu (56):

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1419 \times 27,5}{105110}} = 0,61 \quad (56)$$

gdje je:

$W_y=1419 \text{ cm}^3$  moment otpora u smjeru y

$f_y=27,5 \text{ kN/cm}^2$  granica popuštanja čelika

$M_{cr}=105110 \text{ kNcm}$  elastični kritični moment bočno-torzijskog izvijanja

Valjani H profil spada pod valjane I presjeke (razred a) kada se uzima faktor imperfekcije  $\alpha_{LT}$ .

Tablica 9: faktor imperfekcije  $\alpha_{LT}$  zavisno od krivulje izvijanja [3]

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

Faktor bočnog torzijskog izvijanja  $\phi_{LT}$  određuje se prema izrazu (57):

$$\phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2] = 0,5[1 + 0,21 \times (0,61 - 0,2) + 0,61^2] = 0,73 \quad (57)$$

gdje je:

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

$\lambda_{LT} = 0,61$  vitkost elementa

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

$$X_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = \frac{1}{0,73 + \sqrt{0,73^2 - 0,61^2}} = 0,88 \quad (58)$$

gdje je:

$\phi_{LT} = 0,73$  faktor bočnog torzijskog izvijanja

$\lambda_{LT} = 0,61$  vitkost elementa

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

$$M_{b,Rd} = X_{LT} \times \frac{W_y \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,88 \times \frac{1419 \times 27,5}{1,1} = 31218 \text{ kNcm} = 312,18 \text{ kNm} \quad (59)$$

Uvjet nosivosti:

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

$$351,23 > 312,18 \text{ kNm}$$

$$1,12 > 1$$

gdje je:

$X_{LT} = 0,97$  faktor redukcije

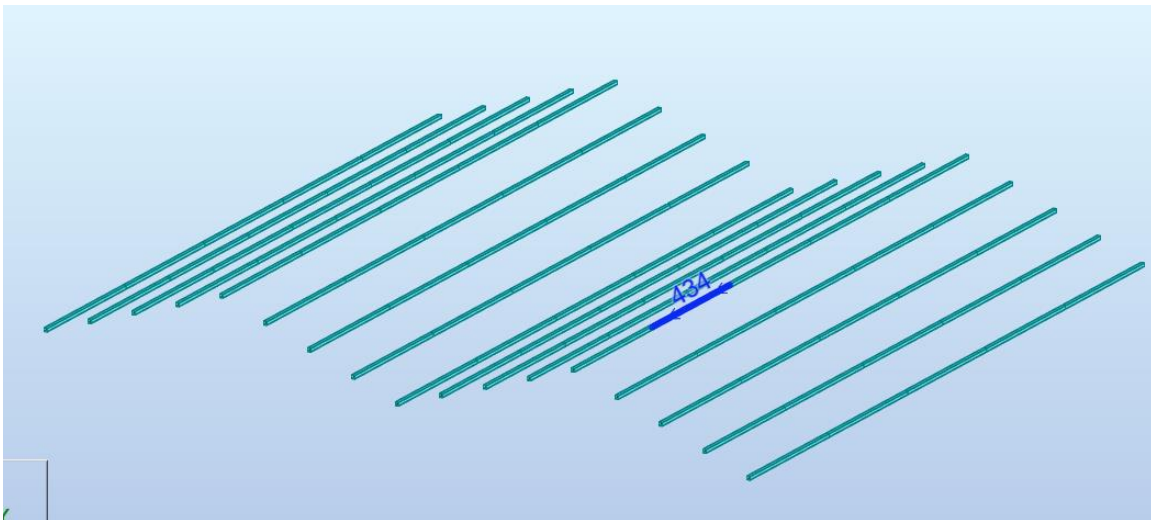
$W_y = 1419 \text{ cm}^3$  moment otpora

$f_y = 275 \text{ N/mm}^2$  granica popuštanja čelika

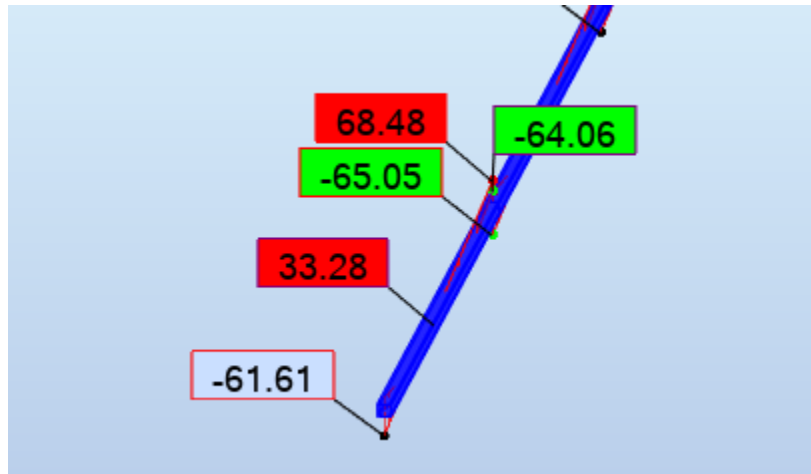
$\gamma_{M1} = 1,1$  parcijalni koeficijent sigurnosti

### Sekundarni nosač

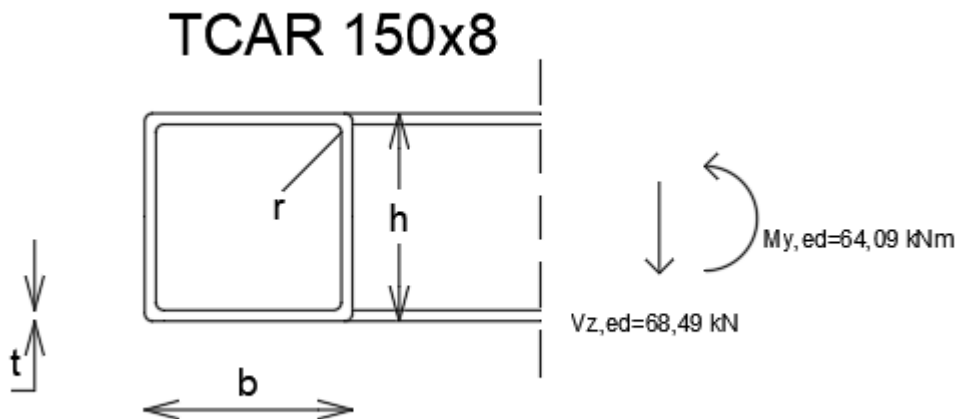
Za sekundarni nosač uzet je kvadratni cijevni profil dimenzija 150x150x8 mm klase čelika S275.



Slika 35: Najopterećeniji sekundarni nosač za 3. kombinaciju djelovanja GSN



Slika 36: Prikaz sila koje djeluju na sekundarni nosač



Karakteristike poprečnog presjeka:

$h=150 \text{ mm}$	$A=43,8 \text{ cm}^2$
$b=150 \text{ mm}$	$I=1443 \text{ cm}^4$
$t=8 \text{ mm}$	$W=192 \text{ cm}^3$
$r=57,4 \text{ mm}$	$W_{pl}=230 \text{ cm}^3$
	$I_t=2357 \text{ cm}^4$

Svojstva čelika:

$E=210\,000 \text{ N/mm}^2$
$G=81\,000 \text{ N/mm}^2$
$\nu=0,3$
$\rho=7850 \text{ kg/m}^3$
$f_y=275 \text{ N/mm}^2$
$f_u=430 \text{ N/mm}^2$

### **Klasifikacija hrpta sekundarnog nosača**

Ravan dio hrpta I pojasnice c određuje se prema izrazu (60):

$$c = d = h - 3 \times t = 150 - 3 \times 8 = 126 \text{ mm} \quad (60)$$

gdje je:

h=150 mm visina profila

t=8 mm debljina pojasnice I hrpta

Klasifikacija hrpta određuje se prema izrazu (61):

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

$$\frac{126}{8} \leq 72 \times 0,92$$

$$15,75 < 66,24 \text{ Hrbat je klasa 1} \quad (61)$$

gdje je:

c=126 mm visina hrpta

t=8 mm debljina hrpta

### **Klasifikacija pojasnice sekundarnog nosača:**

Klasifikacija pojasnice određuje se prema izrazu (62):

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

$$\frac{126}{8} \leq 33 \times 0,92$$

$$15,75 < 30,36 \text{ Pojasnica je klasa 1} \quad (62)$$

gdje je:

c=126 mm širina pojasnice

t=8 mm debljina pojasnice

### **Otpornost poprečnog presjeka sekundarnog nosača na posmik (poprečnu silu)**

Provjera izbočivanja hrpta se određuje prema izrazu (63):

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

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

$$\frac{150 - 2 \times 8}{8} \leq 72 \times \frac{0,92}{1,2}$$

$$16,75 < 55,2 \text{ Nema izbočivanja hrpta} \quad (63)$$

gdje je:

$h_w=134$  mm visina hrpta između pojasnica

$t=8$  mm debljina hrpta i pojasnice

$\eta=1,2$  faktor posmične površine

$\varepsilon=0,92$  izduženje čelika

Posmična površina presjeka određuje se prema izrazu (64):

$$A_{vz} = A - 2 \times b \times t + (t + 2r) \times t \geq \eta \times h_w \times t$$

$$A_{vz} = 43,8 - 2 \times 15 \times 0,8 + (0,8 + 2 \times 5,74) \times 0,8 \geq 1,2 \times 13,4 \times 0,8$$

$$A_{vz} = 29,62 \text{ cm}^2 \geq 12,86 \text{ cm}^2 \quad (64)$$

gdje je:

$A=43,8$  cm<sup>2</sup> površina presjeka

$b=15$  cm širina profila

$t=0,8$  cm debljina hrpta I pojasnice

$r=5,74$  cm polumjer valjanog dijela između pojasnica I hrpta

$\eta=1,2$  faktor posmične površine

$h_w=13,4$  cm visina hrpta između pojasnica

Posmična otpornost poprečnog presjeka  $V_{pl,Rd}$  određuje se prema izrazu (65):

$$V_{pl,Rd} = A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{\gamma_{M0}}$$

$$V_{pl,Rd} = 29,62 \times \frac{27,5}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1,0} = 470,28 \text{ kN}$$

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

$$68,49 < 470,28 \text{ kN (15\% iskoristivost)} \quad (65)$$

gdje je:

$A_v=29,62$  cm<sup>2</sup> posmična površina presjeka

$f_y=275$  N/mm<sup>2</sup> granica popuštanja čelika

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

### Otpornost sekundarnog nosača na savijanje:

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje određuje se prema izrazu (66):

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{230 \times 27,5}{1,0} = 65,25 \text{ kNm} \quad (66)$$

Uvjet nosivosti

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

$$64,09 < 65,25$$

$$0,98 < 1 \text{ (98\% iskoristivost)}$$

gdje je:

$W_{pl,y} = 230 \text{ cm}^3$  plastični moment otpora u y smjeru

$f_y = 27,5 \text{ kN/cm}^2$  granica popuštanja čelika

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

$M_{y,Ed} = 64,09 \text{ kNm}$  računski moment savijanja kose prečke

### Interakcija savijanja i posmika (M-V)

Interakcija savijanja i posmika određuje se prema izrazu (67):

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

$$1319,16 \leq 0,5 \times 470,28 \text{ kN}$$

$$68,49 < 235,14 \text{ KN zadovoljava} \quad (67)$$

gdje je:

$V_{z,Ed} = 68,49 \text{ KN}$  računski poprečna sila

$V_{pl,Rd} = 470,28 \text{ KN}$  računski otpornost na poprečnu silu

Računska otpornost presjeka na savijanje se ne reducira

### 3.5.2. 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 [3].

Dopušteni pomak stupa određuje se prema izrazu (68):

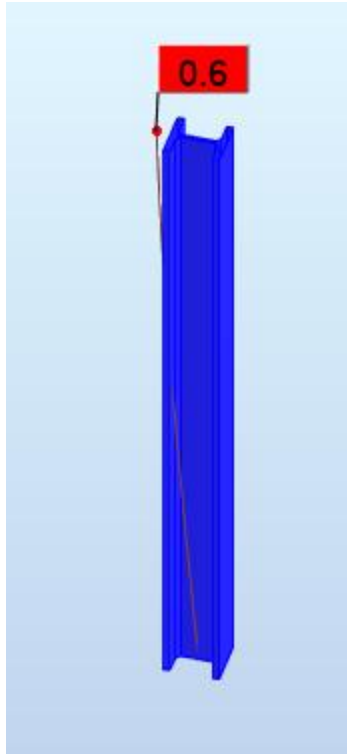
$$p_1 = \frac{H}{150} = \frac{400}{150} = 2,7 \text{ cm}$$

$$p = 0,6 \text{ cm} < 2,7 \text{ cm} \quad (68)$$

gdje je:

$H = 400 \text{ cm}$  visina stupa

$p = 0,6 \text{ cm}$  pomak u stupu



Slika 37: Pomak stupa (4. kombinacija djelovanja GSU)

Dopušteni progib kose prečke određuje se prema izrazu (69):

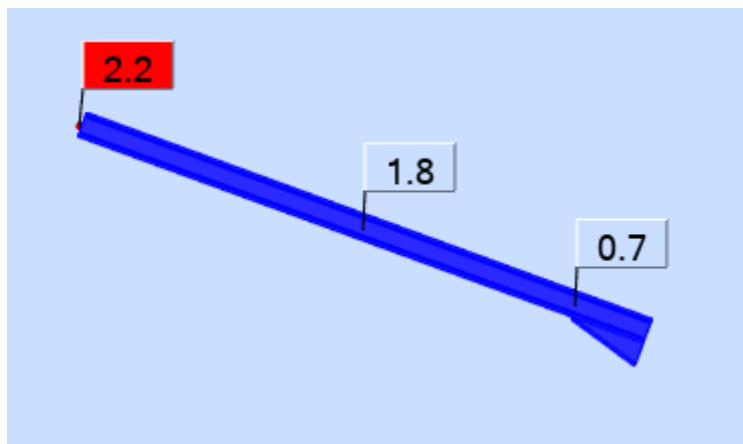
$$p_1 = \frac{L}{200} = \frac{798}{200} = 3,99 \text{ cm}$$

$$p = 2,2 \text{ cm} < 3,99 \text{ cm} \quad (69)$$

gdje je:

H=798 cm raspon kose prečke

p=2,2 cm progib u kosoj prečki



Slika 38: Progib kose prečke (4. kombinacija djelovanja GSU)

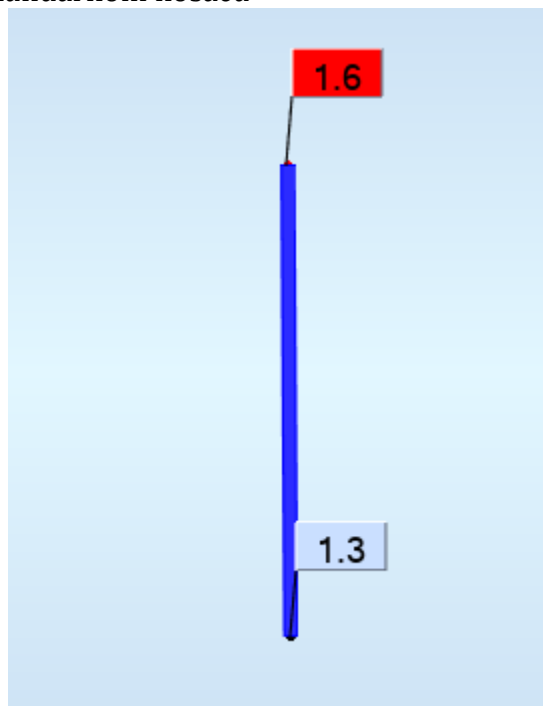
Dopušteni progib sekundarnog nosača određuje se prema izrazu (70):

$$p_1 = \frac{L}{200} = \frac{540}{200} = 2,7 \text{ cm}$$
$$p = 1,6 \text{ cm} < 2,7 \text{ cm} \quad (70)$$

gdje je:

L=540 cm raspon jednog elementa sekundarnog nosača

p=1,6 cm progib u sekundarnom nosaču



Slika 39: Progib sekundarnog nosača (3. kombinacija djelovanja GSU)

### 3.6. Proračun spojeva nadstrešnice

Za proračun spojeva nadstrešnice izveden je proračun detalja spoja stupa na temelj te detalj spoja stupa- kosa prečka. Nakon proračuna spajala se izveo proračun spajala i zavara.

#### 3.6.1. Detalj spoja stupa i temelja

Detalj spoja stupa i temelja proračunat je pomoću programa Robot Structural Analysis Professional.



## LOADS

---

Case: 8: COMB3 3\*1.50+(1+2)\*1.35+4\*0.90

$N_{j,Ed} =$	-273,46	[kN]	Axial force
$V_{j,Ed,y} =$	-19,63	[kN]	Shear force
$V_{j,Ed,z} =$	4,92	[kN]	Shear force
$M_{j,Ed,y} =$	-34,12	[kN*m]	Bending moment
$M_{j,Ed,z} =$	-24,69	[kN*m]	Bending moment

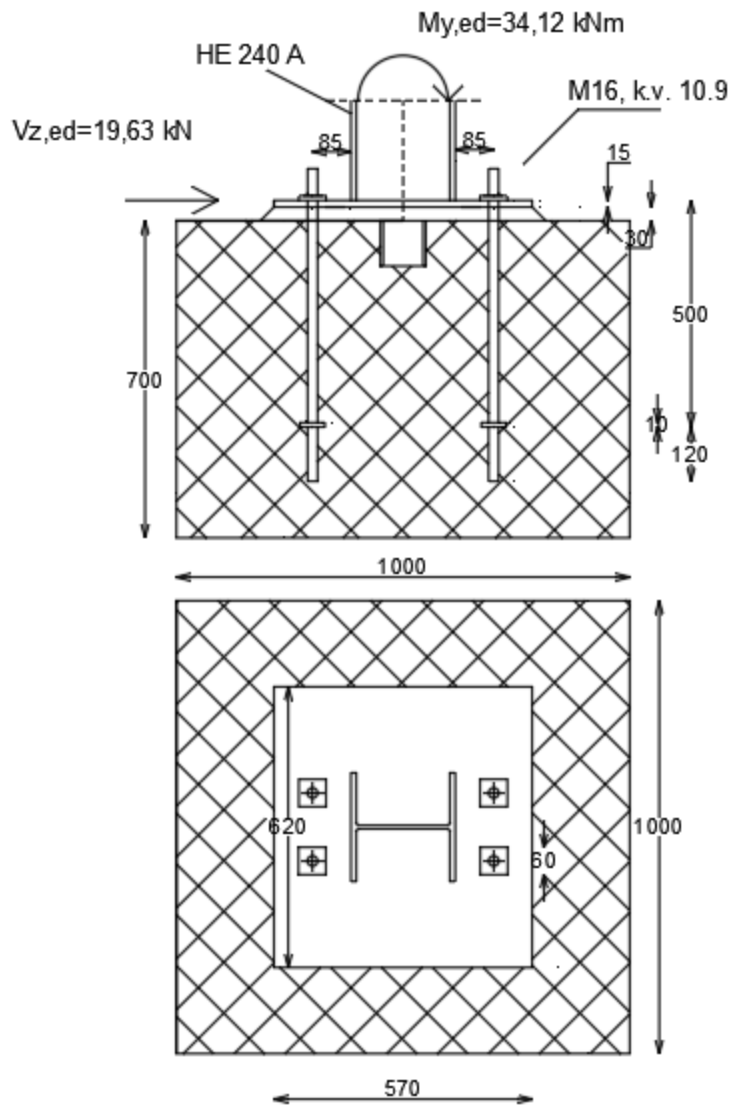
## RESULTS

---

Slika 40: Sile koje djeluju na spoj (2. kombinacija djelovanja GSN)

### Proračun spojeva i zavora na detalju stup-temelj

Proračun spojeva i zavora na detalju stupa i temelja proveden je prema normi HRN EN 1993-1-8 [\[4\]](#). U spoju ima ukupno 4 vijka i 1 rezna površina.



Slika 41: Detalj opterećenja vijaka u spoju stup-temelj

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

Krak  $x_1$  određuje se prema izrazu (71):

$$x_1 = 570 - 170 - 85 - \frac{12}{2} = 0,309 \text{ m} \quad (71)$$

Vlačna i tlačna sila  $N_1$  određuje se prema izrazu (72):

$$N_1 = \frac{M_{y,Ed}}{x_1} = \frac{34,12}{0,309} = 110,42 \text{ kN} \quad (72)$$

gdje je:

$M_{y,Ed}=34,12$  kNm računski moment savijanja

$x_1=0,419$  m duljina kraka sile

Tablica 10: Određivanje računске otpornosti za jedan vijak [4]

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 <math>A_s</math>)  <math>\alpha_v = 0,6 \rightarrow</math> za k.v. 4.6, 5.6 i 8.8  <math>\alpha_v = 0,5 \rightarrow</math> 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)  <math>\alpha_v = 0,6</math></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 <math>\alpha_d</math> (u smjeru naprezanja)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- za krajnje vijke : <math>\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}</math></li> <li>- za unutarnje vijke : <math>\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}</math></li> </ul> <p>Koeficijent <math>k_1</math> (okomito na smjer naprezanja)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- za krajnje vijke : <math>k_1 = \min\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right)</math></li> <li>- za unutarnje vijke : <math>k_1 = \min\left(1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right)</math></li> </ul>
otpornost na vlak	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ <p><math>k_2 = 0,63 \rightarrow</math> za vijke s upuštenom glavom  <math>k_2 = 0,90 \rightarrow</math> 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 vijka na posmik  $F_{v,Rd}$  određuje se prema izrazu (73):

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \times f_{ub} \times A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \times 100 \times 1,57}{1,25} = 62,8 \text{ KN} \quad (73)$$

gdje je:

$\alpha_v=0,5$  koeficijent za posmičnu površinu vijka

$f_{ub}=1000$  N /mm<sup>2</sup> čvrstoća vijka

$A=157 \text{ mm}^2$  površina jezgre vijka  
 $\gamma_{M2}=1,25$  parcijalni koeficijent sigurnosti

Otpornost vijaka u spoju  $\overline{F_{v,Rd}}$  određuje se prema izrazu (74):

$$\overline{F_{v,Rd}} = n \times m \times F_{v,Rd} = 4 \times 1 \times 62,8 = 251,2 \text{ kN} \quad (74)$$

uvjet nosivosti spoja:

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

19,63 < 251,2 KN (8% iskoristivost)

gdje je:

$n=4$  broj vijaka

$m=1$  broj reznih površina

$F_{v,Rd}=62,8$  kN otpornost 1 vijka na posmik

### Otpornost na pritisak po omotaču rupe osnovnog materijala

Koeficijent  $\alpha_d$  za krajnje vijke određuje se prema izrazu (75):

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{235}{3 \times 18} = 4,35 \quad (75)$$

gdje je:

$e_1=235$  mm razmak vijaka od ruba paralelno sa djelovanjem sile

$d_0=18$  mm promjer rupe za vijak

Koeficijent  $k_1$  za krajnje vijke određuje se prema izrazu (76):

$$k_1 = \min\left(2,8 \times \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right) = \min\left(2,8 \times \frac{85}{18} - 1,7; 2,5\right) = \min(11,52; 2,5) = 2,5 \quad (76)$$

gdje je:

$e_2=85$  mm razmak između vijaka okomito na smjer djelovanja sile

$d_0=18$  mm promjer rupe za vijak

Koeficijent  $\alpha_b$  određuje se prema izrazu (77):

$$\alpha_b = \min\left(\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1\right) = \min\left(4,35; \frac{1000}{360}; 1\right) = \min(4,35; 2,78; 1) = 1 \quad (77)$$

gdje je:

$\alpha_d=4,35$  koeficijent za krajnje vijke

$f_{ub}=1000 \text{ N/mm}^2$  čvrstoća vijka  
 $f_u=360 \text{ N/mm}^2$  čvrstoća osnovnog materijala

Otpornost na pritisak po omotaču 1 rupe osnovnog materijala  $F_{b,Rd}$  određuje se prema izrazu (78):

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \times \alpha_b \times f_u \times d \times t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \times 1 \times 36 \times 1,8 \times 1,5}{1,25} = 194,4 \text{ kN} \quad (78)$$

gdje je:

$k_1=2,5$  koeficijent za krajnje vijke  
 $\alpha_b=1$  koeficijent za vijke  
 $f_u=360 \text{ N/mm}^2$  čvrstoća osnovnog materijala  
 $d=18 \text{ mm}$  promjer vijka  
 $t=15 \text{ mm}$  najtanji lim u spoju

Ukupna otpornost  $\overline{F_{b,Rd}}$  određuje se prema izrazu (79):

$$\overline{F_{b,Rd}} = n \times F_{b,Rd} = 4 \times 194,4 = 777,6 \text{ kN} \quad (79)$$

Uvjet nosivosti:

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

$19,63 < 777,6 \text{ KN}$  (2,5% iskoristivost)

gdje je:

$n=4$  broj vijaka u spoju  
 $\overline{F_{b,Rd}}=777,6 \text{ KN}$  otpornost na pritisak po omotaču jedne rupe

### Otpornost vijaka na vlak

Otpornost 1 vijka na vlak određuje se prema izrazu (80):

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \times f_{ub} \times A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \times 100 \times 1,57}{1,25} = 113,04 \text{ kN} \quad (80)$$

gdje je:

$k_2=0,9$  koeficijent za otpornost na vlak za ostale vijke  
 $f_{ub}=1000 \text{ N/mm}^2$  čvrstoća vijka  
 $A_s=157 \text{ mm}^2$  površina jezgre vijka  
 $\gamma_{M2}=1,25$  parcijalni koeficijent sigurnosti

Otpornost za 2 vlačna vijka u spoju određuje se prema izrazu (81):

$$\overline{F_{t,Rd}} = 2 \times F_{t,Rd} = 2 \times 113,04 = 226,1 \text{ kN} \quad (81)$$

uvjet nosivosti:

$$N_1 \leq F_{t,Rd}$$

$$110,42 < 226,1 \text{ kN}$$

$$0,49 < 1 \text{ (49\% iskoristivost)}$$

gdje je:

$F_{t,Rd}$  = 113,04 kN otpornost 1 vijka na vlak

$N_1$  = 110,42 kN vlačna sila koja djeluje na vijke

### Interakcija posmika i vlaka

Interakcija posmika i vlaka određuje se prema izrazu (82):

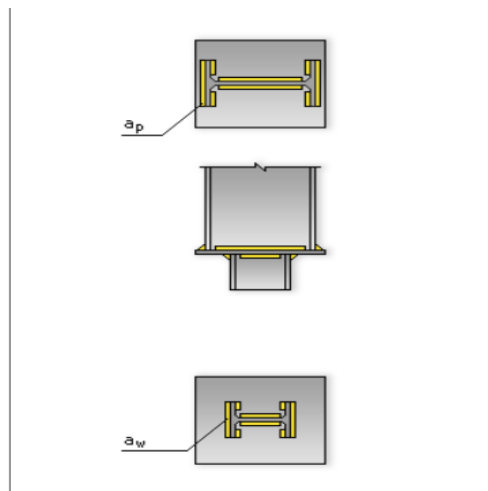
$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \times F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{19,63}{62,8} + \frac{110,42}{1,4 \times 113,04} \leq 1$$

$$0,99 < 1 \text{ (99\% iskoristivost)} \quad (82)$$

### Proračun zavarenog spoja

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



Slika 42: Svi zavari na spoju (žuta boja)

Vlačna komponenta koja djeluje na zavar  $N_2$  određuje se prema izrazu (83):

$$N_2 = \frac{M_{y,Ed}}{x_2} = \frac{34,12}{0,218} = 156,5 \text{ kN} \quad (83)$$

gdje je:

$M_{y,Ed}$  = 34,12 kNm računski nosivost momenta savijanja

$x_2$  = 218 mm krak vlačne sile koja djeluje na zavar

Ukupno djelovanje na zavar  $F_{w,Ed}$  određuje se prema izrazu (84):

$$F_{w,Ed} = \sqrt{\left(\frac{V_{z,Ed}}{2}\right)^2 + N_2^2} = \sqrt{9,82^2 + 156,5^2} = 156,81 \text{ kN} \quad (84)$$

gdje je:

$V_{z,Ed}=19,63$  KN računsa poprečna sila

$N_2=156,5$  KN vlačna komponenta koja djeluje na zavar

Otpornost 1 cm zavara određuje se prema izrazu (85):

$$F_{w,Rd} = \frac{f_u \times a}{\sqrt{3} \times \beta_w \times \gamma_{M2}} = \frac{360 \times 0,4}{\sqrt{3} \times 0,80 \times 1,25} = 8,31 \text{ kN} \quad (85)$$

gdje je:

$f_u=360$  N/mm<sup>2</sup> čvrstoća osnovnog materijala

$\beta_w=0,8$  korelacijski koeficijent

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

$a=4$  mm debljina zavara

Ukupna otpornost zavara  $\overline{F_{w,Rd}}$  određuje se prema izrazu (86):

$$\overline{F_{w,Rd}} = F_{w,Rd} \times \sum L = 8,31 \times 88,7 \text{ cm} = 737,1 \text{ kN} \quad (86)$$

Uvjet nosivosti:

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

156,81 kN < 737,1 kN zavar je zadovoljio nosivost (22% iskoristivost)

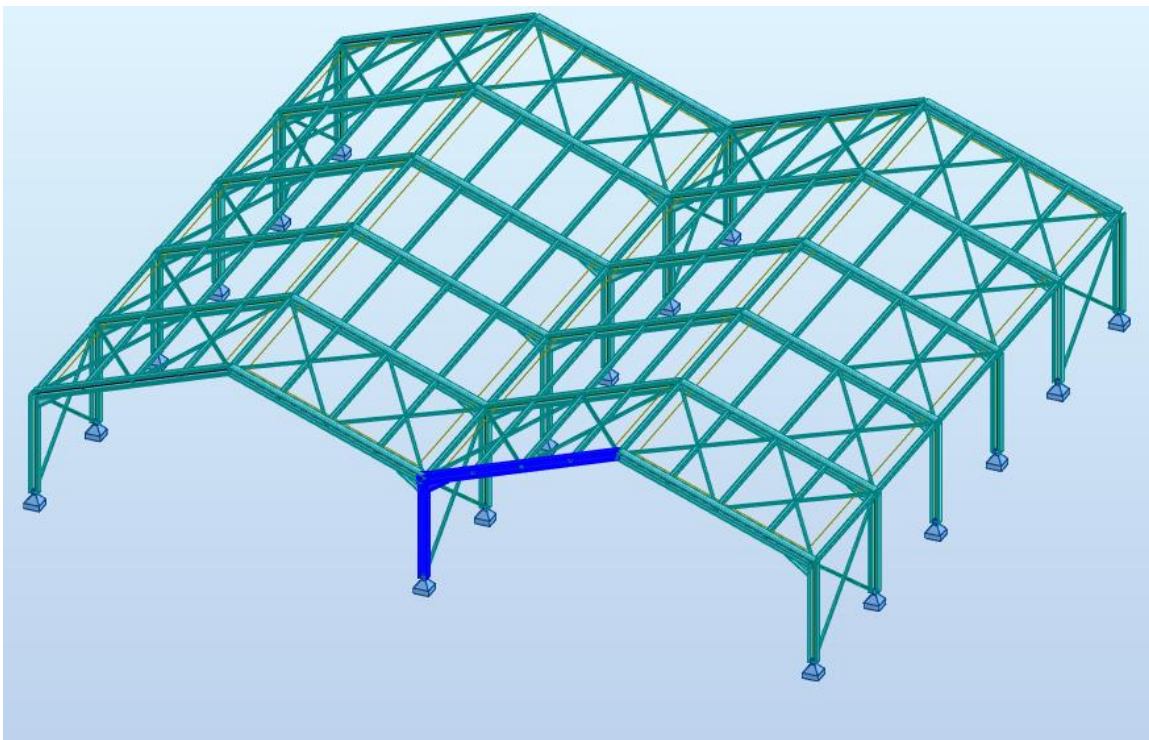
gdje je:

$F_{w,Rd}=8,31$  kN otpornost 1cm kutnog zavara

$\sum L=88,7$  cm ukupna duljina zavara

### 3.6.2. Detalj spoja stupa i kose prečke

Detalj spoja stupa i kose prečke se proračunao u programu Robot Structural Analysis Professional.



Slika 43: Spoj koji se proračunava na konstrukciji

## LOADS

### Ultimate limit state

Case: 7: COMB2 4\*1.50+(1+2)\*1.35

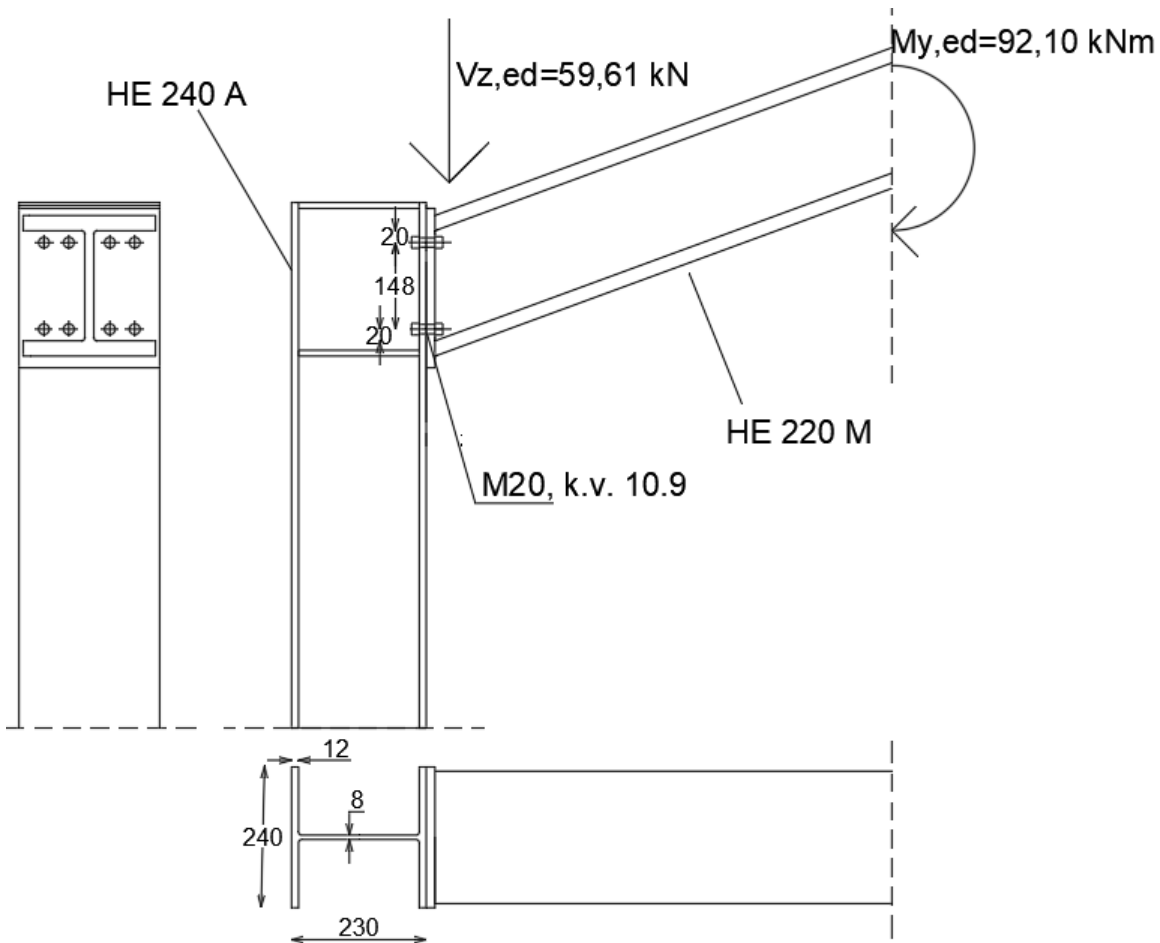
$M_{b1,Ed} =$	92,10	[kN*m]	Bending moment in the right beam
$V_{b1,Ed} =$	59,61	[kN]	Shear force in the right beam
$N_{b1,Ed} =$	-45,27	[kN]	Axial force in the right beam
$M_{c1,Ed} =$	92,16	[kN*m]	Bending moment in the lower column
$V_{c1,Ed} =$	45,34	[kN]	Shear force in the lower column
$N_{c1,Ed} =$	-62,32	[kN]	Axial force in the lower column

Slika 44: Sile koje djeluju na spoj (2. kombinacija GSN)

### Proračun spojeva i zavora na detalju stup- kosa prečka

Proračun spojeva i zavora na detalju stupa i kose prečke proveden je prema istoj normi kojom je proračunat spoj stup-temelj. Vijci su opterećeni na posmik (odrez) i vlak.





Slika 45: Detalj opterećenja vijaka u spoju stup-kosa prečka

Krak  $x_1$  određuje se prema izrazu (87):

$$x_1 = 240 - 20 - \frac{26}{2} = 0,207 \text{ m} \quad (87)$$

Vlačna i tlačna sila  $N_1$  određuje se prema izrazu (88):

$$N_1 = \frac{M_{y,Ed}}{x_1} = \frac{92,10}{0,207} = 444,93 \text{ kN} \quad (88)$$

gdje je:

$M_{y,Ed} = 92,10 \text{ kNm}$  računski moment savijanja

$x_1 = 0,207 \text{ m}$  duljina kraka sile

### Otpornost vijaka na posmik

Otpornost vijaka na posmik za 1 vijak određuje se prema izrazu (89):

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \times f_{ub} \times A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \times 100 \times 2,45}{1,25} = 98 \text{ kN} \quad (89)$$

gdje je:

$\alpha_v=0,6$  faktor za posmičnu površinu vijka

$f_{ub}=1000 \text{ N/mm}^2$  čvrstoća vijka

$A=A_s=157 \text{ mm}^2$  površina poprečnog presjeka vijka

Otpornost vijaka u spoju  $F_{v,Rd}$  određuje se prema izrazu (90):

$$\overline{F_{v,Rd}} = n \times m \times F_{v,Rd} = 8 \times 1 \times 98 = 784 \text{ kN} \quad (90)$$

uvjet nosivosti:

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

$$59,61 < 784 \text{ kN} \text{ (8 \% iskoristivost)}$$

gdje je:

$n=8$  broj vijaka

$m=1$  broj reznih površina

$F_{v,Rd}=98 \text{ kN}$  otpornost vijaka na posmik za 1 vijak

### Otpornost na pritisak po omotaču rupe osnovnog materijala

Koeficijent  $\alpha_d$  za krajnje vijke određuje se prema izrazu (91):

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{42,5}{3 \times 22} = 0,64 \quad (91)$$

gdje je:

$e_1=42,5 \text{ mm}$  razmak vijaka od ruba paralelno sa djelovanjem sile

$d_0=18 \text{ mm}$  promjer rupe za vijak

Koeficijent  $k_1$  za krajnje vijke određuje se prema izrazu (92):

$$k_1 = \min\left(2,8 \times \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right) = \min\left(2,8 \times \frac{20}{22} - 1,7; 2,5\right) = \min(0,85; 2,5) = 0,85 \quad (92)$$

gdje je:

$e_2=20 \text{ mm}$  razmak između vijaka okomito na smjer djelovanja sile

$d_0=22 \text{ mm}$  promjer rupe za vijak

Koeficijent  $\alpha_b$  određuje se prema izrazu (93):

$$\alpha_b = \min\left(\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1\right) = \min\left(0,64; \frac{1000}{430}; 1\right) = \min(0,64; 2,33; 1) = 0,64 \quad (93)$$

gdje je:

$\alpha_d=0,64$  koeficijent za krajnje vijke

$f_{ub}=1000 \text{ N/mm}^2$  čvrstoća vijka

$f_u=430 \text{ N/mm}^2$  čvrstoća osnovnog materijala

Otpornost na pritisak po omotaču 1 rupe osnovnog materijala  $F_{b,Rd}$  određuje se prema izrazu (94):

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \times \alpha_b \times f_u \times d \times t}{\gamma_{M2}} = \frac{0,85 \times 0,64 \times 430 \times 20 \times 1,2}{1,25} = 44,91 \text{ kN} \quad (94)$$

gdje je:

$k_1=0,85$  koeficijent za krajnje vijke

$\alpha_b=0,64$  koeficijent za vijke

$f_u=430 \text{ N/mm}^2$  čvrstoća osnovnog materijala

$d=20 \text{ mm}$  promjer vijka

$t=12 \text{ mm}$  najtanji lim u spoju

Ukupna otpornost  $\overline{F_{b,Rd}}$  određuje se prema izrazu (95):

$$\overline{F_{b,Rd}} = n \times F_{b,Rd} = 8 \times 44,91 = 359,28 \text{ kN} \quad (95)$$

Uvjet nosivosti:

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

$$59,61 < 359,28 \text{ kN (17\% iskoristivost)}$$

gdje je:

$n=8$  broj vijaka u spoju

$F_{b,Rd}=44,91 \text{ kN}$  otpornost na pritisak po omotaču jedne rupe

### Otpornost vijaka na vlak

Otpornost 1 vijka na vlak određuje se prema izrazu (96):

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \times f_{ub} \times A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \times 1000 \times 2,45}{1,25} = 182,88 \text{ kN} \quad (96)$$

gdje je:

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

$f_{ub}=1000 \text{ N/mm}^2$  čvrstoća vijka

$A_s=157 \text{ mm}^2$  površina jezgre vijka

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

Otpornost za 4 vlačna vijka u spoju određuje se prema izrazu (97):

\_\_\_\_\_

$$F_{t,Rd} = 4 \times F_{t,Rd} = 4 \times 182,88 = 731,52 \text{ kN} \quad (97)$$

uvjet nosivosti:

$$N_1 \leq F_{t,Rd}$$

$$444,93 < 731,52 \text{ kN}$$

$$0,98 < 1 \text{ (61\% iskoristivost)}$$

gdje je:

$F_{t,Rd}$  = 182,88 kN otpornost 1 vijka na vlak

$N_1$  = 444,93 kN vlačna sila koja djeluje na vijke

### Interakcija posmika i vlaka

Interakcija posmika i vlaka određuje se prema izrazu (98):

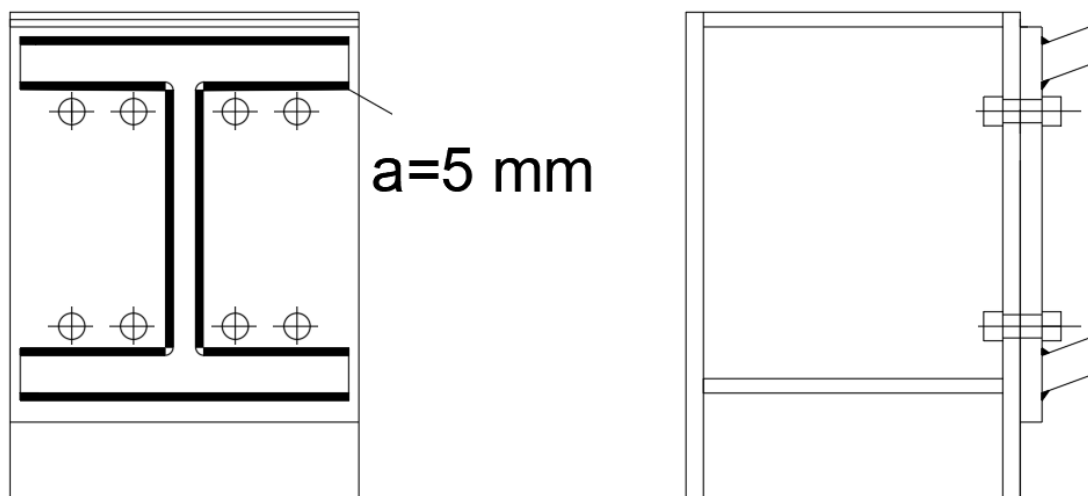
$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \times F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{59,61}{75,36} + \frac{444,93}{1,4 \times 731,52} \leq 1$$

$$1,23 > 1 \text{ Prekoračena je nosivost vijaka za 23 \%} \quad (98)$$

### Proračun zavarenog spoja

Za proračun zavarenog spoja potrebno je odrediti djelovanje na zavar i otpornost zavara.



Slika 46: Zavari na spoju (crna boja)

Vlačna komponenta koja djeluje na zavar  $N_2$  određuje se prema izrazu (99):

$$N_2 = \frac{M_{y,Ed}}{x_2} = \frac{92,10}{0,214} = 430,37 \text{ kN} \quad (99)$$

gdje je:

$M_{y,Ed}=92,10$  kNm računski moment savijanja  
 $x_2=0,214$  m krak vlačne sile koja djeluje na zavar

Ukupno djelovanje na zavar  $F_{w,Ed}$  određuje se prema izrazu (100):

$$F_{w,Ed} = \sqrt{\frac{V_{z,Ed}^2}{2} + N_2^2} = \sqrt{29,81^2 + 430,37^2} = 431,4 \text{ kN} \quad (105)$$

gdje je:

$V_{z,Ed}=59,61$  kN posmična sila koja djeluje na spoj  
 $N_2=430,37$  kN vlačna sila koja djeluje na spoj

Otpornost 1 cm kutnog zavara  $F_{w,Rd}$  određuje se prema izrazu (101):

$$F_{w,Rd} = \frac{f_u \times a}{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{M2}} = \frac{430 \times 0,5}{\sqrt{3} \times 0,85 \times 1,25} = 11,68 \text{ kN} \quad (101)$$

gdje je:

$f_u=430$  N/mm<sup>2</sup> čvrstoća osnovnog materijala  
 $\beta_w=0,85$  korelacijski koeficijent  
 $\gamma_{M2}=1,25$  parcijalni koeficijent sigurnosti  
 $a=5$  mm debljina zavara

Ukupna otpornost zavara  $\overline{F_{w,Rd}}$  određuje se prema izrazu (102):

$$\overline{F_{w,Rd}} = F_{w,Rd} \times \sum L$$

$$\overline{F_{w,Rd}} = 11,68 \times (22,6 + (22,6 - 1,55 - 2 \times 18)) = 11,68 \times 40,1 \text{ cm} = 468,38 \text{ kN} \quad (102)$$

Uvjet nosivosti:

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

431,4 kN < 468,38 kN zavar je zadovoljio nosivost (92 % iskoristivost)

gdje je:

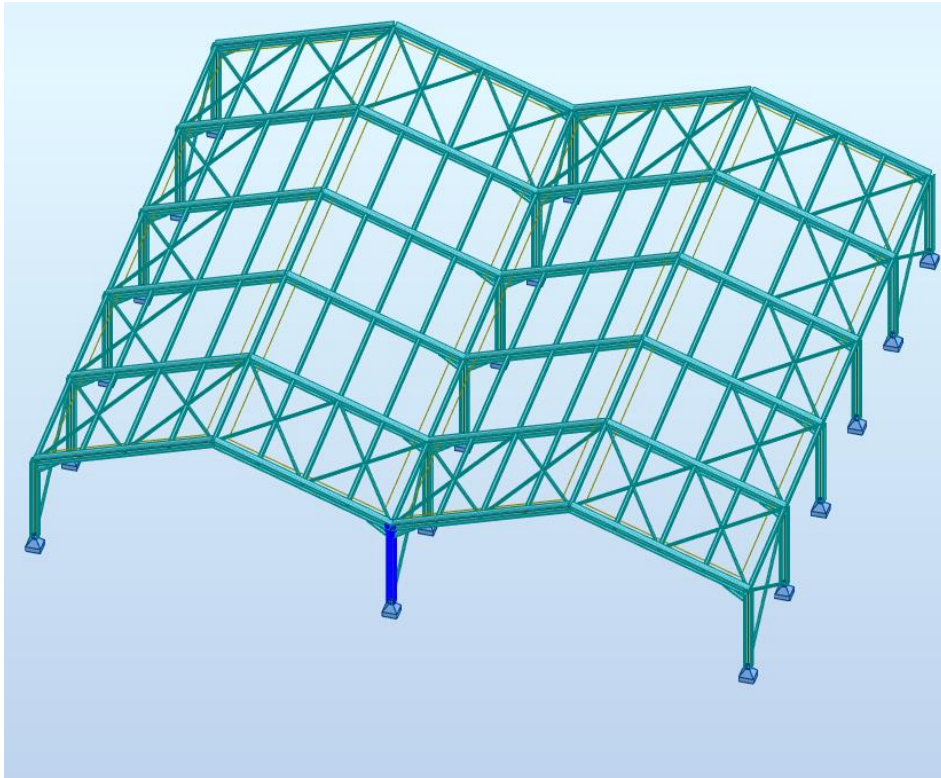
$\overline{F_{w,Rd}}=11,68$  kN otpornost 1cm kutnog zavara  
 $\sum L=40,1$  cm ukupna duljina zavara

## 4. Zaključak

U radu je prikazan proračun čelične konstrukcije višeraspanske nadstrešnice sa solarnim panelima. Analizirana su djelovanja od vlastite težine, solarnih panela, vjetra i snijega na temelju kojih su definirane kombinacije djelovanja prema graničnom stanju nosivosti i graničnom stanju uporabljivosti. Konstrukcija je modelirana u programu Robot Structural Analysis Professional System uz pomoću kojeg je proveden statički proračun. Dimenzioniranje je provedeno za najopterećenije elemente stupa, kose prečke i sekundarnog nosača prema graničnom stanju nosivosti i graničnom stanju uporabljivosti. Za granično stanje nosivosti proračunata je klasifikacija poprečnog presjeka, otpornost poprečnog presjeka i otpornost elementa. Pomoću programa Robot određeni su pomaci i progibi glavnih elemenata. Dobiveni pomaci i progibi elemenata provjeravani su s dopuštenim pomacima do kojeg može doći u elementu stupa, kose prečke i sekundarnog nosača.

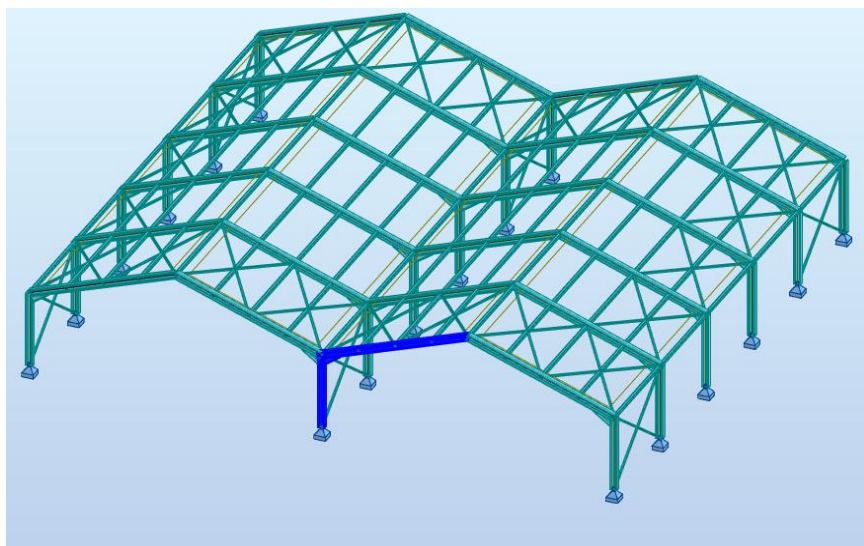
Riješeni su detalji spajanja stupa na temelj i spoj stup -kosa prečka te su provjereni vijci i zavari. Proračunata je otpornost vijaka na posmik, pritisak po omotaču rupe osnovnog materijala, otpornost vijaka na vlak, interakcija posmika i vlaka i zavareni spoj. Konačni proračun spoja stup -kosa prečka dovodi do zaključka da, provjera interakcije posmika i vlaka, ne zadovoljava potrebne uvjete iz razloga što je prekoračena nosivost vijaka. Stoga je potrebno staviti vijke većeg promjera.

### Detalj spoja stupa na temelj



Slika 47: Prikaz spoja stupa na temelj

### Detalj spoja stupa i kose prečke



Slika 48: Prikaz spoja stupa i kose prečke

## 5. Literatura:

### Web:

- [1] <https://www.nika-konstrukcije.hr/katalozi/Konstrukcije-za-montazu-suncanih-fotonaponskih-elektrana.pdf> (26.06.2021.)
- [2] <https://hr.strephonsays.com/difference-between-aluminium-and-steel> (23.06.2021.)

### Slike:

- [1] <https://bs.versal-wood.com/1776-do-it-yourself-metal-roofing-for-cars/> (23.06.2021.)
- [2] <http://vozac.tesear.com/resetkasti-nosaci-za-nadstresnice/> (24.06.2021.)
- [3] [http://euhonka.com/portfolio\\_tag/nadstresnice/page/3/](http://euhonka.com/portfolio_tag/nadstresnice/page/3/) (21.06.2021.)
- [4] <https://mmpi.gov.hr/vijesti-8/u-uporabi-novi-montazni-peron-u-kolodvoru-sisak/6481> (24.06.2021.)
- [5] <https://optolov.ru/hr/spalni-v-klassicheskom-stile/navesy-dlya-avtomobilei-iz-dereva-dlya-dachi-obzor-i-instrukciya-naves-dlya-mashiny.html> (03.07.2021.)
- [6] [https://www.baplast-mreze.com/hrvatski/detalji-proizvoda\\_6/auto-nadstresnica\\_40/](https://www.baplast-mreze.com/hrvatski/detalji-proizvoda_6/auto-nadstresnica_40/) (12.07.2021.)
- [7] <https://www.linkedin.com/pulse/kome-jo%C5%A1-peroni-trebaju-dra%C5%BEen-kau%C5%BEljar> (12.07.2021.)
- [8] <https://reling.hr/galerija/aluminijske-pergole/> (15.07.2021.)
- [9] <https://www.olympiabuildings.com/metal-canopy-buildings/> (15.07.2021.)
- [10] <http://solarprojekt.hr> (15.06.2021.)
- [14] [www.solarno.hr/katalog/proizvod/AS-6M-30](http://www.solarno.hr/katalog/proizvod/AS-6M-30) (15.06.2021.)
- [16], [18] norma HRN EN 1991-1-3:2008 + AC:2009 /25.07.2021.
- [33] [https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4596134/mod\\_resource/content/1/3\\_Klasifikacija%20popre%C4%8Dnog%20presjeka\\_%C4%8CK.pdf](https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4596134/mod_resource/content/1/3_Klasifikacija%20popre%C4%8Dnog%20presjeka_%C4%8CK.pdf) (26.07.2021.)
- [25] <https://slideplayer.gr/slide/17695173/> (28.07.2021.)

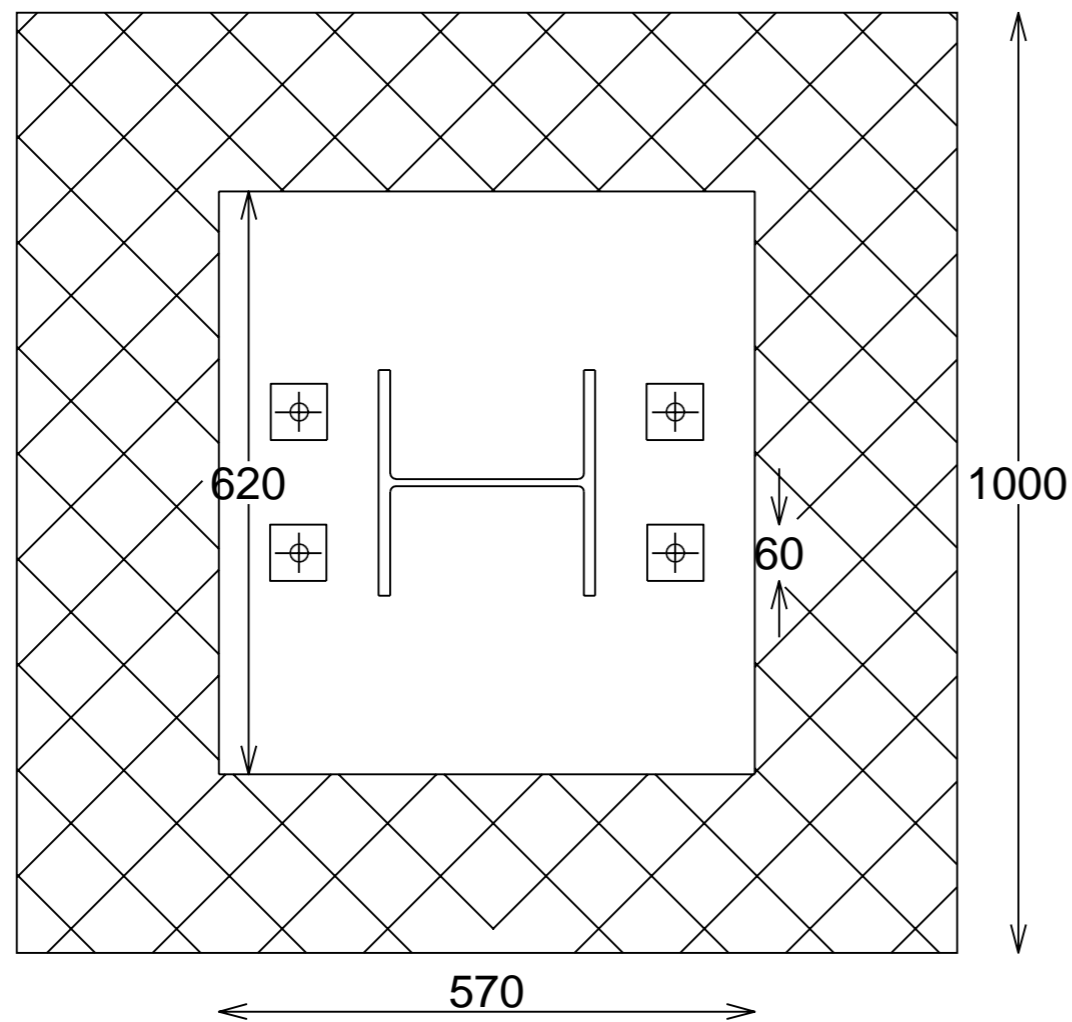
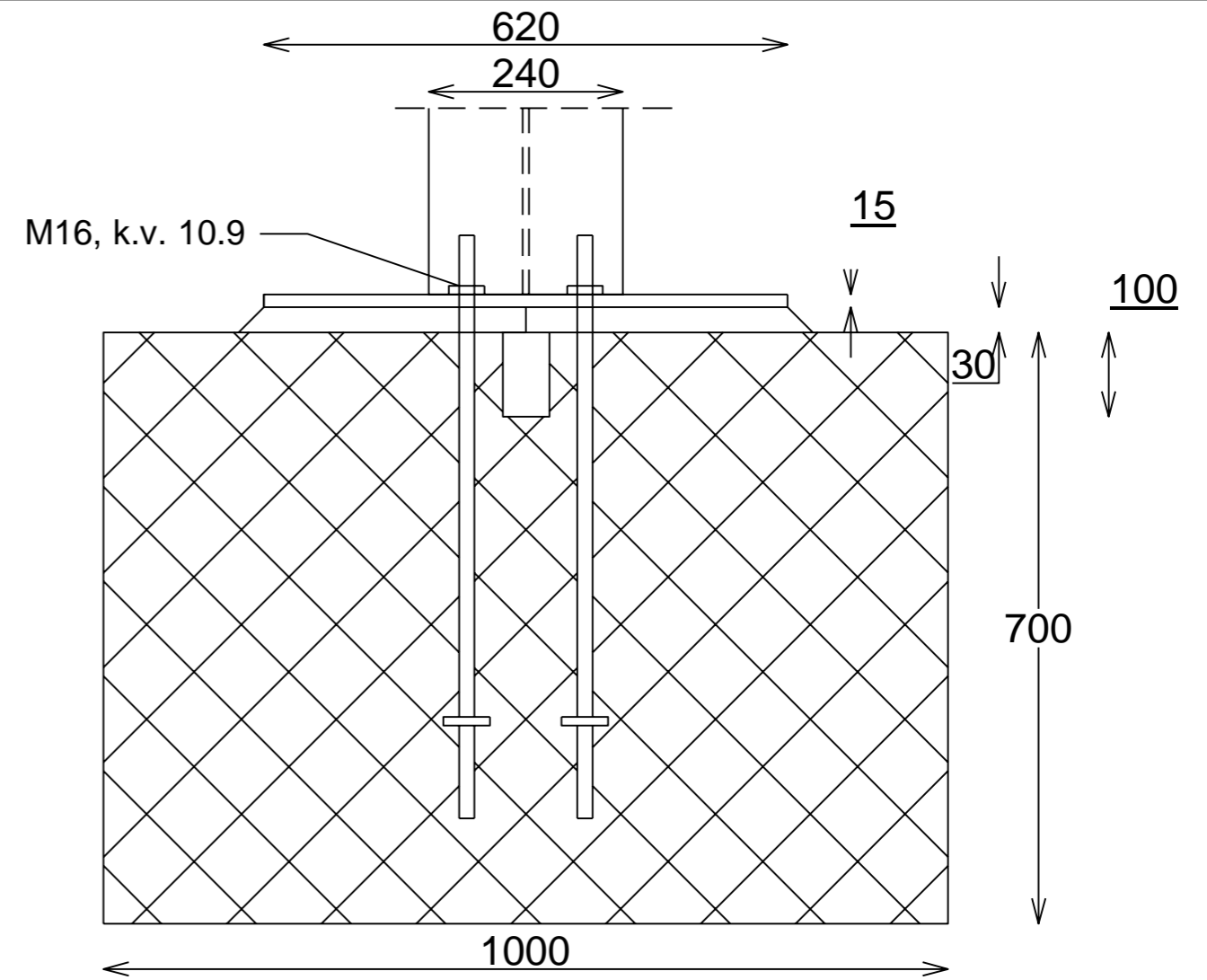
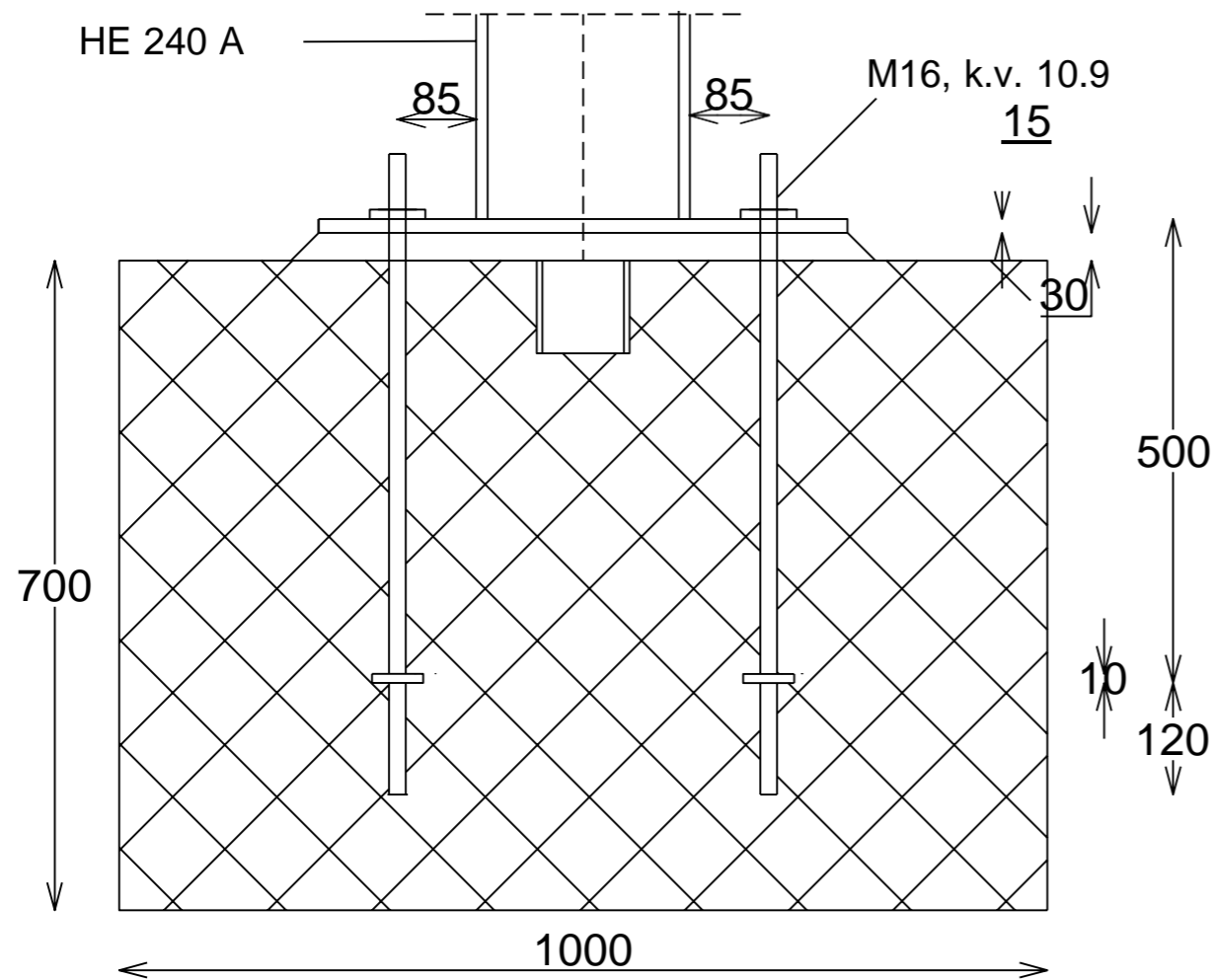
### Norme:

- [1] Norma HRN EN 1991-1-3:2008 (05.07.2021.)
- [2] Norma HRN EN 1991-1-4: 2005 (06.07.2021.)
- [3] Norma EN 1993-1-1:2005 (06.07.2021.)
- [4] Norma HRN EN 1993-1-8 (26.07.2021.)
- [5] nHRN EN 1991-1-3: 2012/NA (05.07.2021.)
- [6] nHRN EN 1991-1-4: 2012/NA (06.07.2021.)



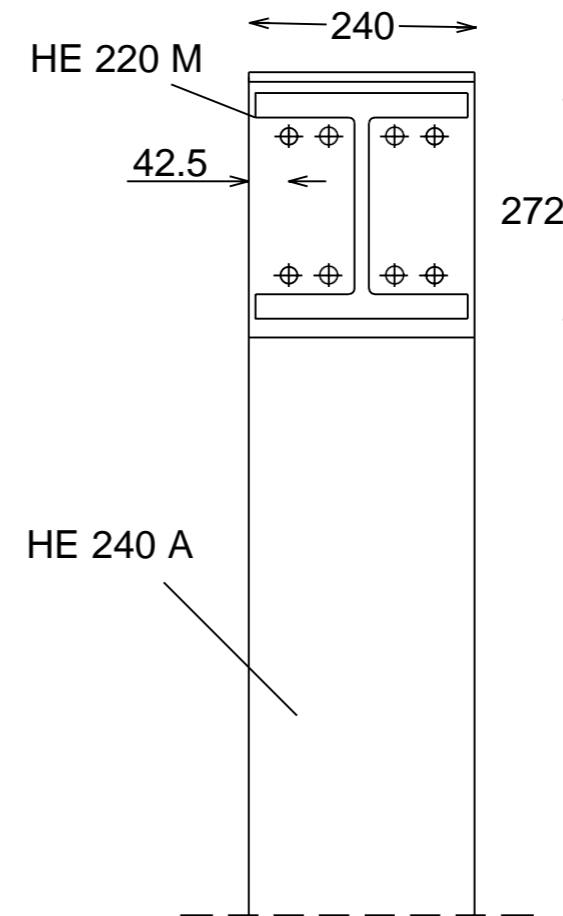
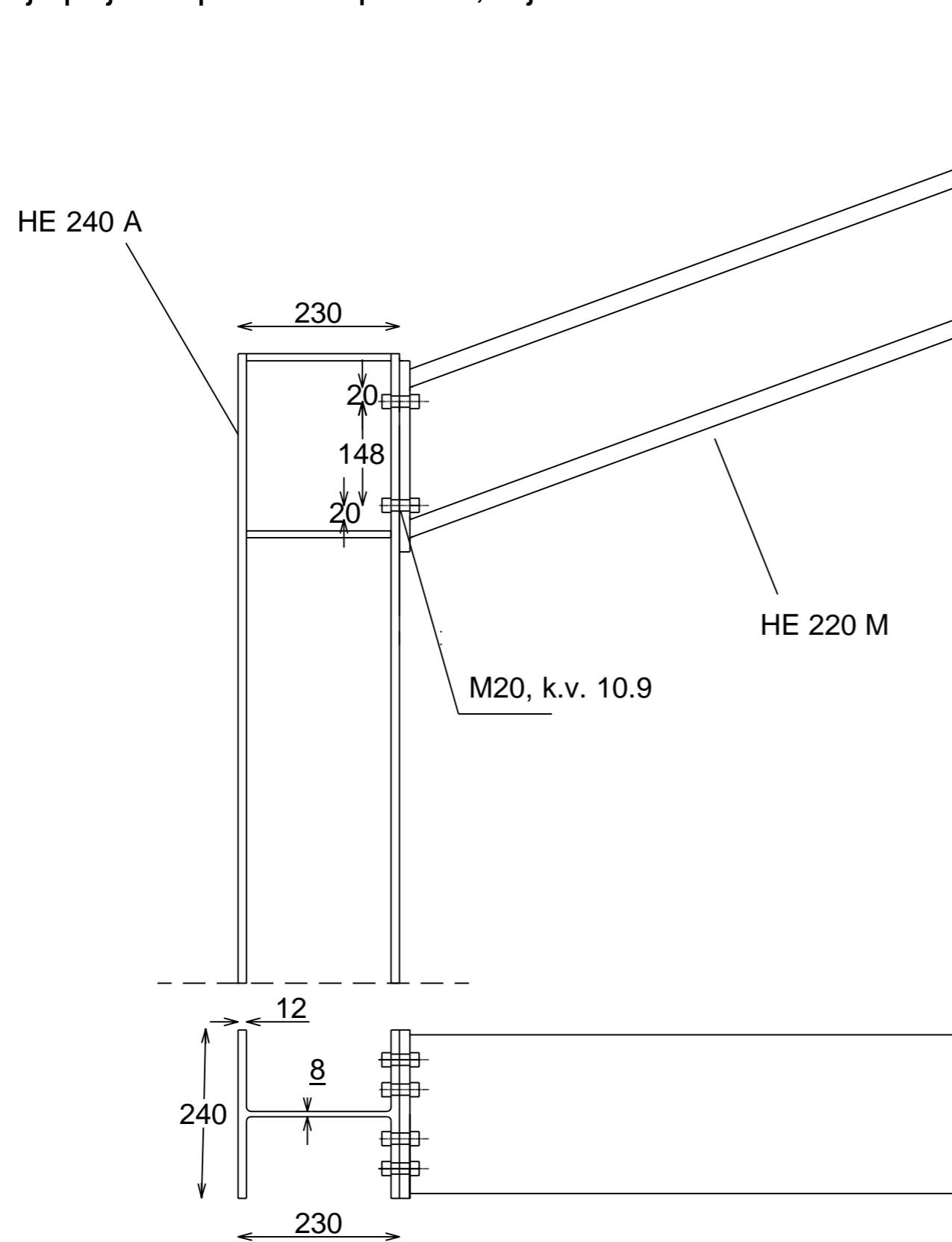
## **6. Nacrti**

# Detalj spoja stupa na temelj, Mjerilo 1:8



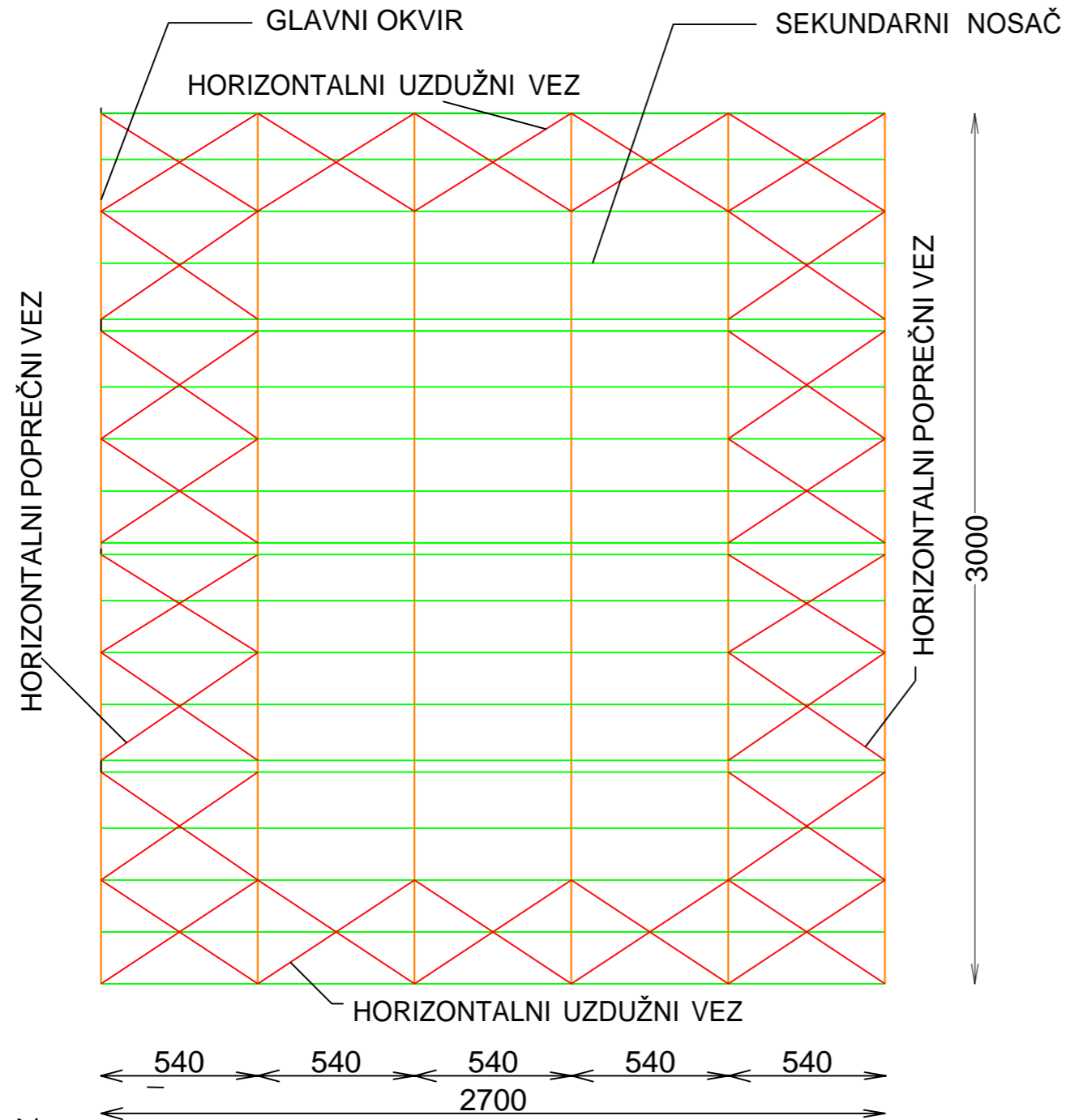
<b>GF GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI</b>			
Završni rad Čelična konstrukcija višeraspanske nadstrešnice sasolarnim panelima		Sadržaj nacрта Detalj spoja stupa na temelj	
Student Aleksandar Zvijerac		Kolegij Čelične konstrukcije	
Mentor Doc.dr.sc.Paulina Krolo	Datum 06.09.2021	Mjerilo 1:8	List 1

# Detalj spoja stupa i kose prečke, Mjerilo 1:8

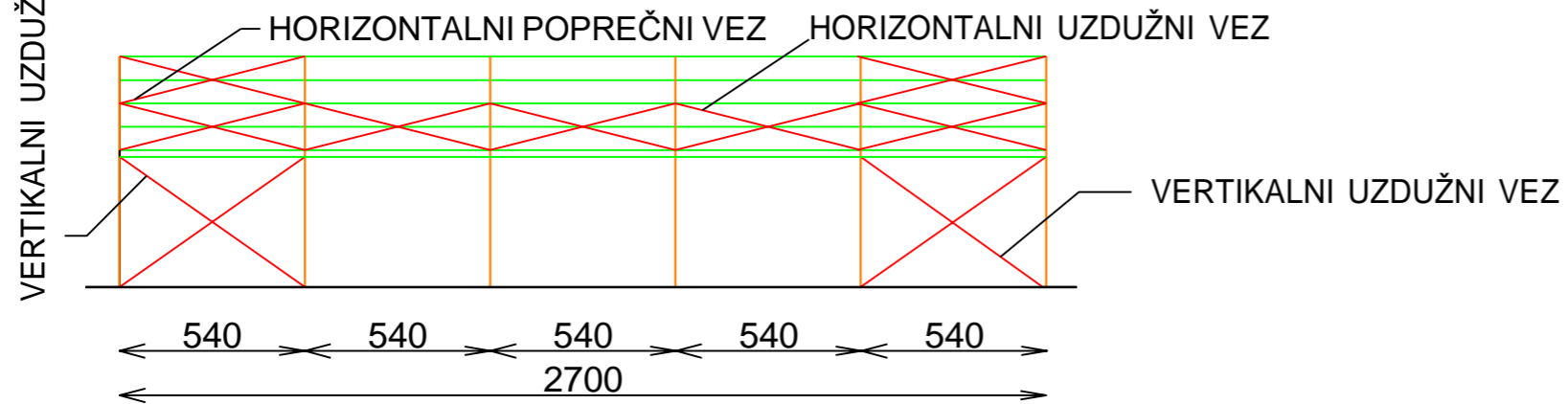


<b>GF GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI</b>			
Završni rad Čelična konstrukcija višeraspanske nadstrešnice sasolarnim panelima		Sadržaj nacrt Detalj spoja stupa i kose prečke	
Student Aleksandar Zvijerac		Kolegij Čelične konstrukcije	
Mentor Doc.dr.sc.Paulina Krolo	Datum 06.09.2021	Mjerilo 1:8	List 2

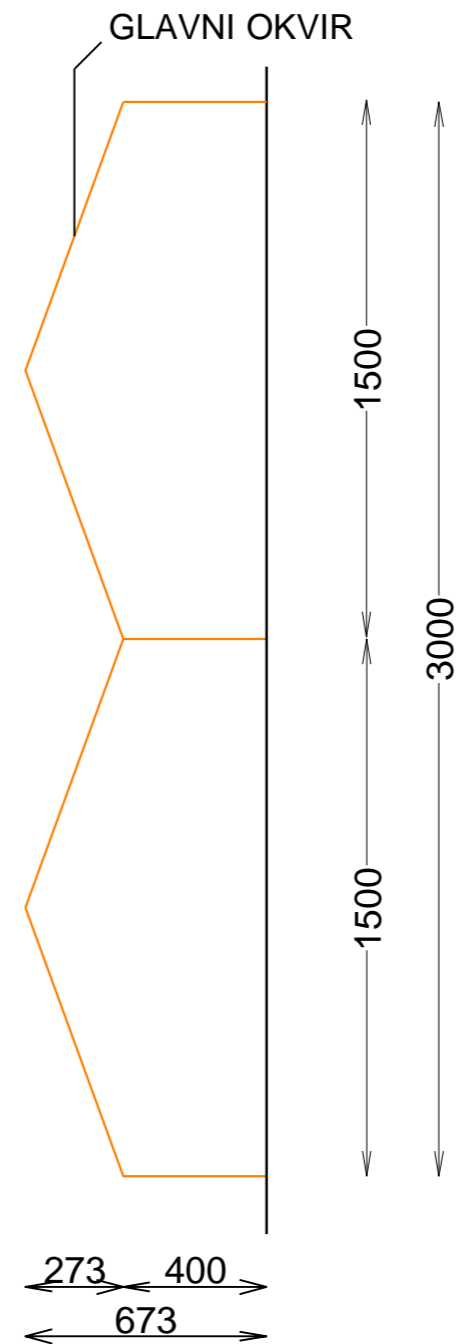
TLOCRTNA DISPOZICIJA M 1:200



UZDUŽNI POGLED M 1:200



POGLED NA ZABAT M 1:200



**GF GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI**

Završni rad Čelična konstrukcija višeraspanske nadstrešnice sa solarnim panelima	Sadržaj nacрта Dispozicija konstrukcije		
Student Aleksandar Zvijerac	Kolegij Čelične konstrukcije		
Mentor Doc.dr.sc.Paulina Krolo	Datum 07.09.2021	Mjerilo 1:200	List 3

