

# PRORAČUN REŠETKASTE LUČNE KONSTRUKCIJE SA STUPOVIMA

---

**Aubel, Robert**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:479941>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-27**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Veleučilište u Karlovcu  
Strojarski odjel

Stručni studij strojarstva

Robert Aubel

**PRORAČUN REŠETKASTE  
LUČNE KONSTRUKCIJE  
SA STUPOVIMA**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2020.

Karlovac University of Applied Sciences  
Mechanical Engineering Department

Professional undergraduate study of Mechanical Engineering

Robert Aubel

# **DESIGN OF GRID ARCH STRUCTURE WITH COLUMNS**

FINAL PAPER

Karlovac, 2020.

Veleučilište u Karlovcu

Strojarski odjel

Stručni studij strojarstva

Robert Aubel

**PRORAČUN REŠETKASTE  
LUČNE KONSTRUKCIJE  
SA STUPOVIMA**

ZAVRŠNI RAD

dr.sc. Josip Hoster, v.pred.

Karlovac, 2020.

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU****ZAVRŠNI RAD**

|   |   |  |  |
|---|---|--|--|
| Ime i prezime   | Robert Aubel                                      |  |  |
| OIB / JMBG  |   |  |  |
| Adresa  |   |  |  |
| Tel. / Mob./e-mail  |   |  |  |
| Matični broj studenta                                       |   |  |  |
| JMBAG   | 0035190907  |  |  |
| Studij (staviti znak <b>X</b> ispred odgovarajućeg studija) | <input checked="" type="checkbox"/> preddiplomski | <input type="checkbox"/> specijalistički diplomski |  |
| Naziv studija   | Stručni studij Strojarsva                         |  |  |
| Godina upisa  | 2017.   |  |  |
| Datum podnošenja molbe                                      | 29.10.2019.                                       |  |  |
| Vlastoručni potpis studenta/studentice                      |   |  |  |

|  |                                    |
|--|------------------------------------|
| Naslov teme na hrvatskom:<br><b>Proračun rešetkaste lučne konstrukcije sa stupovima</b>  |                                    |
| Naslov teme na engleskom:<br><b>Design of grid arch structure with columns</b>   |                                    |
| Opis zadatka:<br><p>U završnom radu potrebno je opisati funkciju, glavne dijelove i okolišne uvjete rešetkaste lučne konstrukcije sa stupovima. Opisati međusobni utjecaj stupova i lučne konstrukcije. Opisati opterećenja na konstrukciju uslijed vjetra, snijega i nominalnog opterećenja korisnog tereta na lučnu konstrukciju. Analizirati čvrstoću konstrukcije u skladu s važećim propisima te optimirati konstrukciju. Analizirati stabilnost konstrukcije. Proračunati čvrstoću zavarenih spojeva. Prikazati konstrukciju u obliku sklopnog crteža.</p> <p>Zadatak izraditi i opremiti sukladno Pravilniku o završnom radu Veleučilišta u Karlovcu.</p> |                                    |
| Mentor: dr.sc. Josip Hoster, v.pred  | Predsjednik Ispitnog povjerenstva: |



## SAŽETAK

Rešetkaste konstrukcije nalaze široku primjenu u gradnji. S obzirom na učestalost primjene opravdana je potreba za standardiziranom regulativom i tehničkim nadzorom. Kako bi se postigao kvalitetniji proizvod i sigurnost pri korištenju, poželjno je da se konstruktor drži važećih normi. Tako se osigurava optimalna cijena izrade i umanjuje rizik predimenzioniranja.

Ovaj rad bavi se usporedbom numerički dobivenih dimenzija nosača s aktualnim europskim standardima. Time je omogućen zorniji prikaz stanja naprezanja. Kako se smanjuje broj pojednostavljenja raste ekvivalentno naprezanje, samim time i dimenzije čeličnih poluproizvoda.

Prvo poglavlje daje kratak uvod u industrijske hale, glavne dijelove lučnih nosača, opće značajke metode konačnih elemenata i mogućnosti računalnih programa zasnovanih na tom principu. Nadalje, opisan je glavni zadatak i pristup rješavanju s analitičkog i numeričkog stajališta. Drugo poglavlje bavi se simulacijom zadatka u Solidworks-u i definiranjem svih opterećenja kroz nelinearnu analizu. Ovaj korak daje okvirne gabarite i izgled rešetke. U trećem poglavlju provjerava se sigurnost kritičnih priključaka izražena u postotku maksimalne dopuštene aksijalne sile prije pojave tipičnih oblika otkazivanja. U četvrtom poglavlju proračunavaju se zavareni spojevi pojasnih i rebrenih štapova te zavareni spoj stupa s pločom. Na kraju je dan kratak pregled rada i zaključak glede razlika u rješenjima dobivenih numeričkim putem i onih prema Eurocode pravilnicima.

### Ključne riječi:

rešetkasta konstrukcija, greda, stup, numerička analiza, Eurocode, priključak, zavareni spoj



## SUMMARY

Frame structures are commonly employed in construction. Given their frequency of use, the need for standardized regulation and technical supervision is justified. In order to achieve a high quality product and safety for its users, it is advisable that the constructor adheres to the latest standards, thus ensuring lower cost and reduced risk of over-dimensioning.

Numerically obtained measurements of the grid frame are compared with current European standards. This gives a more comprehensive view of the stress state. As the number of simplifications decreases, the equivalent stress increases, so do the dimensions of semi-finished steel products.

The first chapter gives a brief introduction to steel frame structures, general features of the finite element analysis, and the capabilities of software based on this principle. Furthermore, the main task and the difference between analytical and numerical approach are described. The second chapter illustrates the simulation of the model in Solidworks and defines all loads through nonlinear analysis. Two-layer grid frame is composed and defined in this step. The safety of critical web rods is inspected in chapter 3, expressed as a percentage of the maximum allowed axial force, before the member failure occurs. In the fourth chapter, the welded joints are calculated. Lastly, the conclusion gives a brief abstract of the paper and touches on the differences in results obtained numerically and those according to Eurocode guidelines.

### Key words:

frame structure, beam, column, numerical analysis, Eurocode, joint, welded connection



## SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| SAŽETAK.....   |    |
| SUMMARY .....  |    |
| POPIS SLIKA .....                                    |    |
| POPIS TABLICA.....                                   |    |
| POPIS OZNAKA .....                                   |    |
| 1. UVOD .....  | 1  |
| 1.1. PREDMET I CILJ RADA.....                        | 2  |
| 2. MODELIRANJE I SIMULACIJA.....                     | 4  |
| 2.1. GEOMETRIJSKE ZNAČAJKE I OPTEREĆENJA.....        | 4  |
| 2.2. NELINEARNA ANALIZA.....                         | 7  |
| 3. PRORAČUN PRIKLJUČAKA PREMA EUROCODE NORMAMA ..... | 12 |
| 3.1. ISKORISTIVOST KRITIČNOG PRIKLJUČKA .....        | 13 |
| 4. KONTROLA KRITIČNIH ZAVARA.....                    | 20 |
| 4.1. KRITIČNI PRIKLJUČAK .....                       | 20 |
| 4.2. ZAVARENI SPOJ STUPA I PLOČE .....               | 22 |
| 5. ZAKLJUČAK.....                                    | 26 |
| 6. LITERATURA.....                                   | 27 |





## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 1 - Primjer čelične rešetkaste konstrukcije [8].....  | 3  |
| Slika 2 - Gabariti nosača sa stupovima .....  | 4  |
| Slika 3 - Opterećenja i veze s okolinom.....  | 5  |
| Slika 4 - Prostorni prikaz lučne hale .....   | 5  |
| Slika 5 - Valjkasti krov [1].....   | 7  |
| Slika 6 - Koeficijenti oblika za valjkasti krov [1].....  | 7  |
| Slika 7 - Ekvivalentna naprezanja bez utjecaja vjetra .....   | 9  |
| Slika 8 - Ekvivalentna naprezanja s utjecajem vjetra .....  | 10 |
| Slika 9 - Pomaci konstrukcije .....   | 10 |
| Slika 10 - Pomaci vrha lijevog stupa u ovisnosti o vremenu .....  | 11 |
| Slika 11 - Pomaci vrha desnog stupa u ovisnosti o vremenu.....  | 11 |
| Slika 12 - Aksijalna sila u kritičnom dijagonalnom rebrenom štapu .....   | 14 |
| Slika 13 - Moment savijanja oko globalne z osi (plava strelica) u kritičnom<br>dijagonalnom rebrenom štapu..... | 15 |
| Slika 14 - Aksijalna sila u kritičnom vertikalnom rebrenom štapu .....  | 15 |
| Slika 15 - Moment savijanja oko globalne z osi u kritičnom vertikalnom rebrenom<br>štapu .....                  | 16 |
| Slika 16 - Aksijalne sile u gornjem pojasnom štapu na mjestu kritičnog čvora .....                              | 16 |
| Slika 17 - Momenti savijanja oko globalne z osi u gornjem pojasnom štapu na mjestu<br>kritičnog čvora .....     | 17 |
| Slika 18 - Maksimalno tlačno naprezanje u pojasnom štapu priključka ( $\sigma_0, ed$ ) .....                    | 17 |
| Slika 19 - Potrebna debljina zavora kritičnih priključaka .....   | 21 |
| Slika 20 - Smično opterećenje kritičnog dijagonalnog štapa.....   | 21 |
| Slika 21 - Smično opterećenje kritičnog vertikalnog štapa.....  | 22 |
| Slika 22 - Geometrijske značajke zavora priključaka .....   | 22 |
| Slika 23 - Spoj ploče i dva stupa.....  | 23 |
| Slika 24 - Geometrijske značajke zavora ploče i dva stupa .....   | 23 |
| Slika 25 - Reakcije u uklještenju desnog stupa.....   | 24 |
| Slika 26 - Potrebna debljina zavora između ploče i stupa.....   | 25 |



## POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1 - Karakteristične vrijednosti opterećenja snijegom $sk$ u $\text{kN/m}^2$ .....                      | 6  |
| Tablica 2 - Proračun otpornosti karakterističnih priključka sa šupljim kvadratnim<br>profilima prema [2] ..... | 13 |
| Tablica 3 - Kritični N priključak, centrično spojeni štapovi.....  | 18 |



## POPIS OZNAKA

|            |   |
|------------|---|
| $A$        | računska površina poporečnog presjeka zavara  |
| $A_p$      | računska površina zavara paralelna sa smjerom smicanja  |
| $b$        | ukupna širina šupljeg kutijastog profila štapa  |
| $b_{eff}$  | efektivna širina spoja između štapa ispune i pojasnog štapa   |
| $b_{e,ov}$ | efektivna širina spoja između dva štapa koja se međusobno preklapaju  |
| $b_{e,p}$  | djelotvorna širina pri posmičnom proboju stijenke profila   |
| $C_e$      | koeficijent izloženosti   |
| $C_t$      | toplinski koeficijent   |
| $e$        | okomita udaljenost od neutralne osi   |
| $f_{yi}$   | granica popuštanja za štap $i$ ( $i=0, 1, 2, 3$ )   |
| $F_S$      | smična sila na promatranom presjeku   |
| $F_V$      | vlačna sila na promatranom presjeku   |
| $h$        | ukupna visina šupljeg kutijastog profila štapa  |
| $h/b$      | omjer visine i širine krovnog luka  |
| $I$        | aksijalni moment tromost  |
| $M$        | moment savijanja oko globalne $z$ osi   |
| $n$        | omjer naprezanja (kod šupljeg kutijastog profila pojasnog štapa)  |
| $N_{i,Rd}$ | proračunska vrijednost otpornost spoja izražena preko unutarnje uzdužne sile u štapu $i$ ( $i=0, 1, 2, 3$ ) |



|                   |  |
|-------------------|--|
| $N_{i,Ed}$        | vrijednost unutarnje uzdužne sile u štapu $i$ ( $i=0, 1, 2, 3$ )                               |
| $p$               | duljina projicirane kontaktne površine štapa koji naliježe na pojasni štap (preklapajući štap) |
| $q$               | duljina preklopa, mjereno duž lica pojasnog štapa između štapova ispune u K i N priključcima   |
| $s$               | karakteristično opterećenje snijegom   |
| $s_k$             | karakteristična vrijednost opterećenja snijega na tlo  |
| $t$               | debljina stijenke šupljeg kutijastog profila štapa   |
| $W$               | moment otpora presjeka   |
| $\beta$           | omjer širina štapova ispune i pojasnog štapa   |
| $\mu_i$           | koeficijent oblika opterećenja snijegom (učinak oblika krova)                                  |
| $\sigma_{dop}$    | dopušteno naprezanje u materijalu  |
| $\sigma_v$        | normalno naprezanje uzrokovano vlačnom silom   |
| $\sigma_{ukupno}$ | ukupno normalno naprezanje   |
| $\sigma_{ekv}$    | ekvivalentno naprezanje prema energetske teoriji   |
| $\sigma_s$        | normalno naprezanje uslijed savijanja  |
| $\sigma_{0,Ed}$   | maksimalno tlačno naprezanje u pojasnom štapu priključka                                       |
| $\gamma$          | omjer širine pojasnog štapa $i$ dvije njegove debljine stijenke                                |
| $\theta_i$        | kut između štapova ispune $i$ ( $i=0, 1, 2, 3$ ) i pojasnog štapa                              |
| $\lambda_{ov}$    | omjer preklopa, izražen u postotcima,<br>$\lambda_{ov} = q \cdot p \cdot 100\%$                |
| $\tau$            | tangencijalno naprezanje uslijed smične sile   |



## 1. UVOD

Rešetkasti nosači predstavljaju optimalno rješenje za velika opterećenja uz minimalan utrošak materijala. Razlikujemo ravninske i prostorne nosače. Osnovni element rešetke je trokut. Nosač čine pojasni i rebreni štapovi, odnosno štapovi ispune, koji se sastaju u čvorovima. Nazive dobivaju prema izumiteljima, obliku pojasa, ležajnim uvjetima, rasporedu štapova ispune itd. Obično su spojeni zavarivanjem ili vijcima.

Primjenu nalaze u visokogradnji, kod izrade krovišta, hala, dalekovoda, za pješačke i cestovne mostove. Čelik je moderan, pouzdan i ekološki prihvatljiv. Moguće ga je kombinirati s drugim materijalima poput drveta i betona. Zbog iznimne izdržljivosti ostavlja prostora inženjerima kako bi se što više prilagodili željama korisnika i potrebama proizvodnje. Industrijske hale od čelika odlikuju se povoljnom cijenom i brzinom izrade i praktično su rješenje za mnoga postrojenja. Slično kao šatori, nemaju potporne stupove čime se prostor unutar može bolje iskoristiti. S obzirom na vrstu industrije ili robe koja se skladišti moguće je kontrolirati uvjete kao što su vlaga, lako zapaljive tvari, temperaturne razlike. Općenito imaju potrebe za manjim temeljima i uz suhu gradnju prednost im je što se mogu djelomično ili potpuno izraditi još u tvornici. Tako se osigurava visoka kvaliteta izrade, manji utisak na okoliš, lako održavanje i demontaža. U poljoprivredi su se čelične hale pokazale kao bolji izbor naspram zidanih, kako zbog cijene tako i jednostavnosti. U njih ubrajamo štale, ostave, hangare, spremišta, nadstrešnice, podne silose i sl. Koriste se za farme, skladištenje poljoprivrednih strojeva, usjeva i sjena. Zidovi i krovovi obično se izvode od lima ili takozvanih „sendvič“ panela koji se odlikuju dobrom zvučnom i toplinskom izolacijom i malom specifičnom težinom. Uz dug vijek trajanja laka je mogućnost nadogradnje, adaptacije postojećih objekata i premještanje.

Rješavanju se može pristupiti analitički (Ritterova metoda, metoda projekcija, metoda zamjene štapova, metoda isjecanja čvorova), grafički (Cremonin plan sila, Culmanova metoda) i numerički. Analitički proračun zasniva se na pretpostavki da sila djeluje koncentrirano u čvoru, rebreni štap prenosi samo aksijalnu silu (samo N dijagram unutarnjih sila) i opterećen je jednako po cijeloj dužini. Također se pretpostavlja da krute veze u zglobovima imaju dovoljan rotacijski kapacitet kako bi



moment savijanja bio nula, odnosno štapovi su spojeni u čvorovima idealnim zglobovima. To naravno nije realan slučaj ali uz neka ograničenja može biti dovoljan. Sve klasične metode temelje se na rješavanju diferencijalnih jednadžbi i općenito je vrlo teško dobiti rješenje koje zadovoljava u cijelom području razmatranog modela. Numerički pristup koristi metodu konačnih elemenata i računalni potencijal da bi nam omogućio zamjenu diferencijalnih sa sustavom algebarskih jednadžbi na principu fizičke diskretizacije kontinuuma. Deformabilno tijelo postaje mreža konačnih elemenata s ograničenim stupnjevima slobode. Stanje svakog elementa (npr. polje pomaka) određeno je interpolacijskim funkcijama. Kako raste broj elemenata tako je i točniji rezultat. Uz pravilnu formulaciju proračunskog modela i izbor konačnih elemenata moguće je približiti se realnim vrijednostima. Jurica Sorić u [9] navodi: „Danas postoji velik broj računalnih programa temeljenih na toj metodi, koji omogućuju analizu konstrukcija bez razmatranja složene teorije koja opisuje fizikalno ponašanje konstrukcije. Njihovo korištenje nerijetko se svodi na zadavanje ulaznih podataka prema propisanim uputama, a dobivena rješenja, koja svojim grafičkim prikazom često fasciniraju korisnike, prihvaćaju se bez dovoljno kritičnosti.“ Veliku je pozornost potrebno posvetiti interpretiranju rezultata, računalni model nije preslika stvarnosti i osim za orijentacijske vrijednosti, daje uvid u moguće ponašanje konstrukcije još u projektnoj fazi, stoga je danas neizostavan dio u istraživanju i proizvodnji.

## 1.1. PREDMET I CILJ RADA

Potrebno je proračunati lučni nosač u rešetkastoj izvedbi oslonjen na vertikalne stupove. Razmak između stupova je 14 m, visina 3,5 m. Luk je sastavljen od dva pojasna štapa, te vertikalnim i dijagonalnim rebrenim ispunama, na konstantnom razmaku od 0,5 m. U najvišoj točki luk je visok 4,5 m. Svi štapovi su šupljeg kvadratnog presjeka, izrađeni od čelika S275. Za stupove je izabran čelični IPE profil s usporednim pojasnicama. Stup je uklješten na dnu u betonsku podlogu, a na vrhu je preko ploče vezan za nosač. U duljinu, stupovi se zajedno s nosačem postavljaju na razmaku od 2 m tvoreći lučnu halu, što ujedno osigurava stabilnost u tom smjeru. Pri razmatranju opterećenja u obzir će se uzeti utjecaj atmosferilija, poput snijega i

vjetra, vlastite težine konstrukcije te korisno opterećenje u vidu ovješene sile. S obzirom na granicu tečenja iterativnim postupkom odabire se ekonomski najpovoljnija izvedba, što je uz zahtjevani faktor sigurnosti od 1,5 cilj ovog rada.

Priključci su modelirani s centrično postavljenim štapovima ispune. Veze u rešetki su krute i pri deformiranju kutevi između njih ostaju isti. Takav pristup odlikuje se dodatnim naprezanjima uslijed savijanja, takozvani sekundarni momenti, i daje konzervativnije rezultate na strani sigurnosti. Nadalje, podaci dobiveni simulacijom korišteni su za provjeru statičke otpornosti prema važećim Eurocode normama. Nosivost priključaka je izražena preko maksimalne proračunske otpornosti štapova ispune koja ovisi o uzdužnoj sili. Naposljetku je izračunata potrebna debljina/duljina šavova kritičnih zavora.



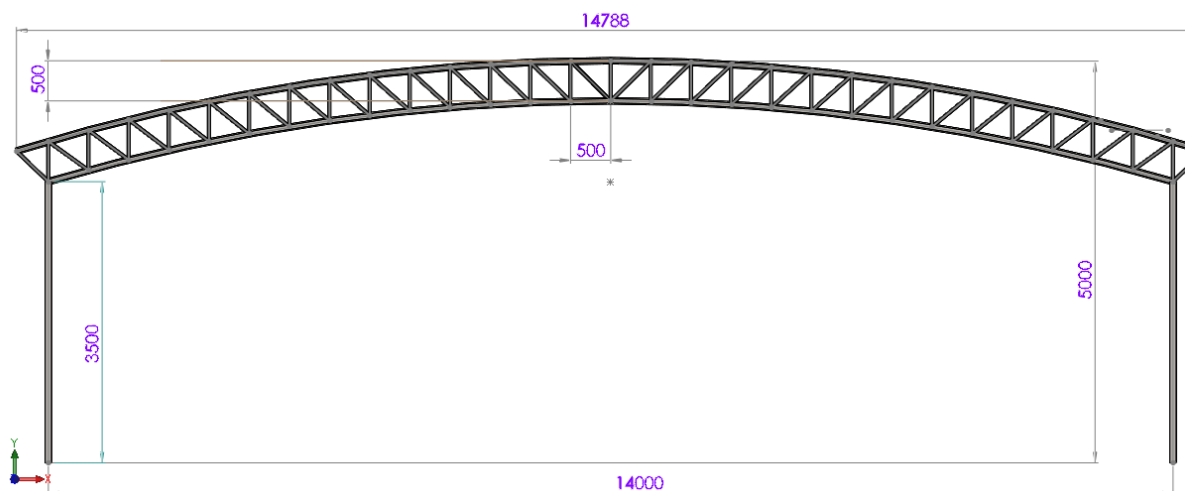
*Slika 1 - Primjer čelične rešetkaste konstrukcije [8]*

## 2. MODELIRANJE I SIMULACIJA

Pri izradi modela korišten je program Solidworks 2016, dok je za analizu čvrstoće i stabilnosti primjenjen dodatni modul, Solidworks Simulation. Za razliku od analitičkog pristupa, ovdje su svi elementi promatrani kao grede (beam), sposobni prenositi i moment, i aksijalnu silu. U tu svrhu koristi se Solidworks značajka „Weldments“ koja omogućuje relativno brzo i jednostavno oblikovanje rešetke kao i naknadno „meshanje“. Naime, gredni elementi, definirani kao oni čija je dimenzija duljine minimalno 10 puta veća od poprečnog presjeka, predstavljaju pojednostavljenje kod metode konačnih elemenata, odnosno broj konačnih elemenata je drastično manji nego pri klasičnoj simulaciji 3D tijela. Također, za lakše iteriranje preuzet je katalog kovinskih poluproizvoda potrebnih za izradu nosača.

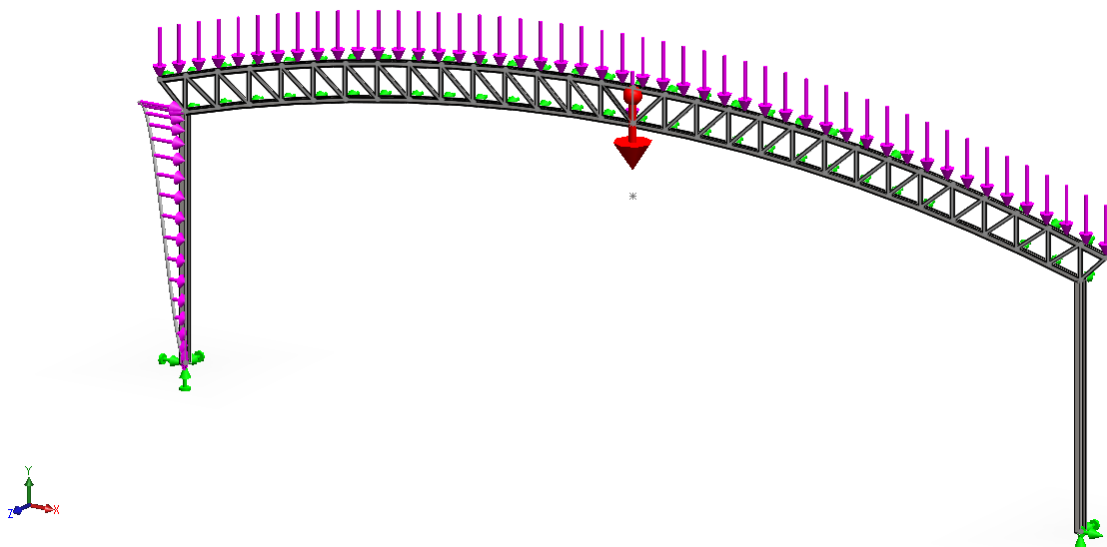
### 2.1. GEOMETRIJSKE ZNAČAJKE I OPTEREĆENJA

Lučni nosač je modeliran prema slici 2. Promatrat će se ravninski slučaj opterećenja uzimajući u obzir razmak od 2 m u dimenziji duljine (dimenzija okomita na papir, odnosno globalna z os), pa će stoga karakteristična opterećenja vjetra i snijega biti izražena u jedinici N/m, umjesto N/m<sup>2</sup> (slika 3). Pretpostavit će se da jedan luk preuzima sva opterećenja na 2 metra duljine, dok se težina krova, odnosno cerade koja se navlači, dodaje u težinu snijega.



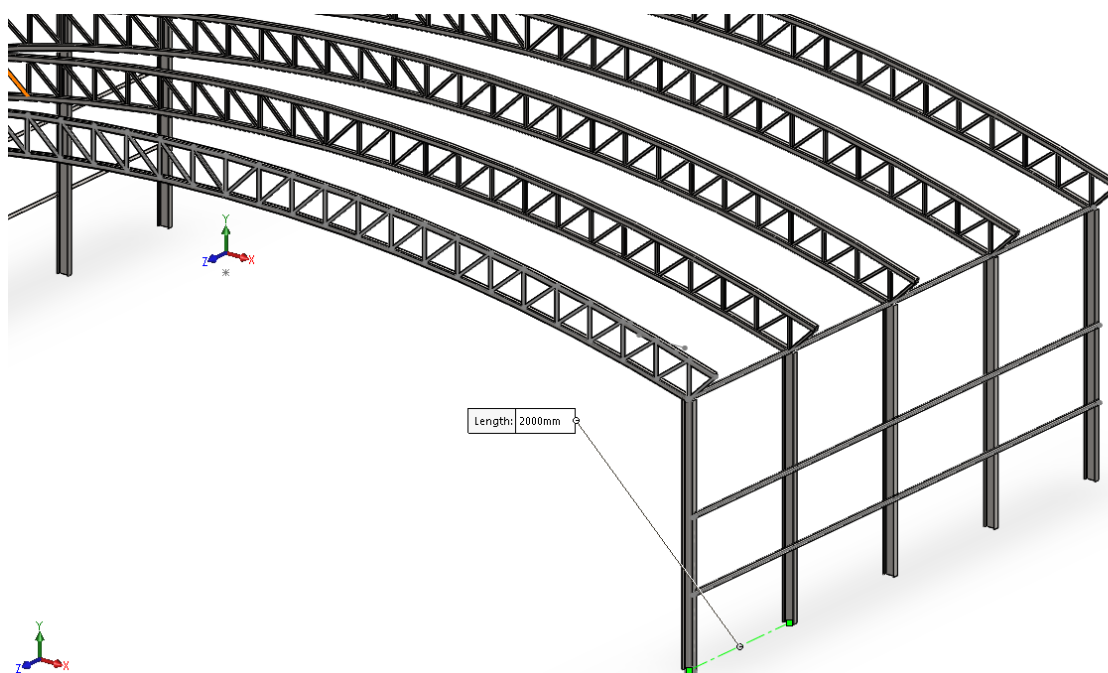
Slika 2 - Gabariti nosača sa stupovima





Slika 3 - Opterećenja i veze s okolinom

Pojasni štapovi su crtani u jednom komadu ali mogu biti izrađeni od više jednakih dijelova, zavareni na najmanje opasnom mjestu, odnosno na mjestima najmanjeg naprezanja. Stupovi su na dnu uklešteni, tj. onemogućeno je translacijsko i rotacijsko gibanje. Uz to svi pomaci u smjeru globalne osi „z“ su nula iz razloga što su stupovi međusobno povezani u građevini, stoga dobiju puno veću krutost i čvrstoću u navedenom smjeru (vidljivo na slici 4). Crvena strelica označava pravac gravitacije i upravo je na tom mjestu dodana još jedna korisna sila iznosa 3000 N.



Slika 4 - Prostorni prikaz lučne hale

Karakteristično opterećenje snijegom izračunato je prema [1] i sljedećoj formuli:

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad (1)$$

gdje su:  $s$  – karakteristično opterećenje snijegom prema [1]

$s_k$  - karakteristična vrijednost opterećenja snijega na tlo ( $\text{kN/m}^2$ )

$\mu_i$  - koeficijent oblika opterećenja snijegom (učinak oblika krova)

$C_e$  - koeficijent izloženosti, koji obično ima vrijednost 1,0

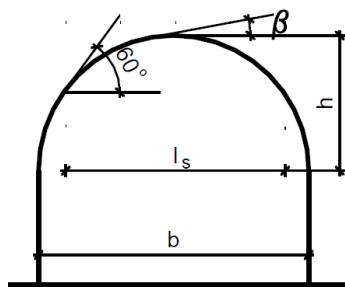
$C_t$  - toplinski koeficijent, koji obično ima vrijednost 1,0

Iz tablice 1 za Karlovac koji se nalazi u zoni B, i za nadmorsku visinu do 200 m očitana je prema [1] vrijednost  $s_k = 1,4 \text{ kN/m}^2$ . Prema slici 5 za odnos  $h/b = 0,11$ , iz grafa na slici 6 dobiva se koeficijent  $\mu_3 = 1,3$ . Uvršteno u jednadžbu (1) računa se karakteristično opterećenje snijegom:  $s \approx 1,9 \text{ kN/m}^2$ .

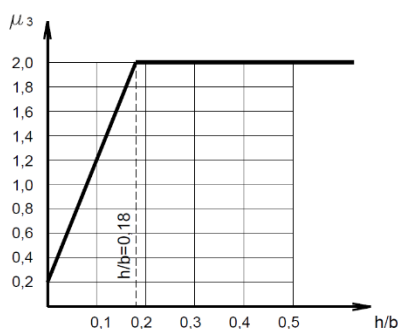
Tablica 1 - Karakteristične vrijednosti opterećenja snijegom  $s_k$  u  $\text{kN/m}^2$  prema [1]

| Nadmorska visina do (m) | A područje | B područje | C područje | D područje |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 100                     | 1,10       | 1,10       | 0,45       | 0,35       |
| 200                     | 1,30       | 1,40       | 0,80       | 0,50       |
| 300                     | 1,55       | 1,75       | 1,20       | 0,70       |
| 400                     | 1,80       | 2,20       | 1,65       | 0,90       |
| 500                     | 2,05       | 2,65       | 2,15       | 1,15       |
| 600                     | 2,35       | 3,15       | 2,70       |            |
| 700                     | 2,65       | 3,70       | 3,30       |            |
| 800                     | 2,95       | 4,25       | 3,95       |            |
| 900                     | 3,25       | 4,90       | 4,65       |            |
| 1000                    | 3,60       | 5,55       | 5,40       |            |
| 1100                    | 3,95       | 6,25       | 6,20       |            |
| 1200                    | 4,30       | 7,00       | 7,05       |            |
| 1300                    | --         | 7,80       | 7,95       |            |
| 1400                    | --         | 8,65       | 8,90       |            |
| 1500                    | --         | 9,50       | 9,90       |            |
| 1600                    | --         | 10,40      | 10,95      |            |
| 1700                    | --         | 11,40      | 12,05      |            |
| 1800                    | --         | --         | 13,20      |            |

Ta će vrijednost biti pomnožena s 2 kako bi se uzela u obzir duljina, odnosno treća dimenzija, i problem prebacio u dvije dimenzije, što daje:  $s \approx 3,8 \text{ kN/m}$ . Takvo opterećenje uvećano za težinu krova (+1  $\text{kN/m}$ ) kontinuirano djeluje na gornji pojasni štap po cijeloj dužini u smjeru gravitacije:  $s_{uk} = 4,8 \text{ kN/m}$ .



Slika 5 - Valjkasti krov [1]



Slika 6 - Koeficijenti oblika za valjkasti krov [1]

Opterećenje vjetrom je promjenljivo slobodno djelovanje. Pojednostavnjeni postupak proračuna vjetrovog opterećenja može se koristiti za zgrade i dimnjake visine manje od 200 m i znači da se djelovanje vjetra uzima kao zamjenjujuće statičko opterećenje. Iako bočni udari vjetra mogu uzrokovati turbulencije i dinamička stanja opterećenja u ovom će se radu zanemariti taj utjecaj i tlak vjetra na vanjske površine će biti prikazan kao kontinuirana sila po dužini stupa, krećući od nule na dnu do maksimalnog iznosa pri vrhu stupa (vidi sliku 3). Maksimalan iznos tlaka vjetra je  $1 \text{ kN/m}^2$ .

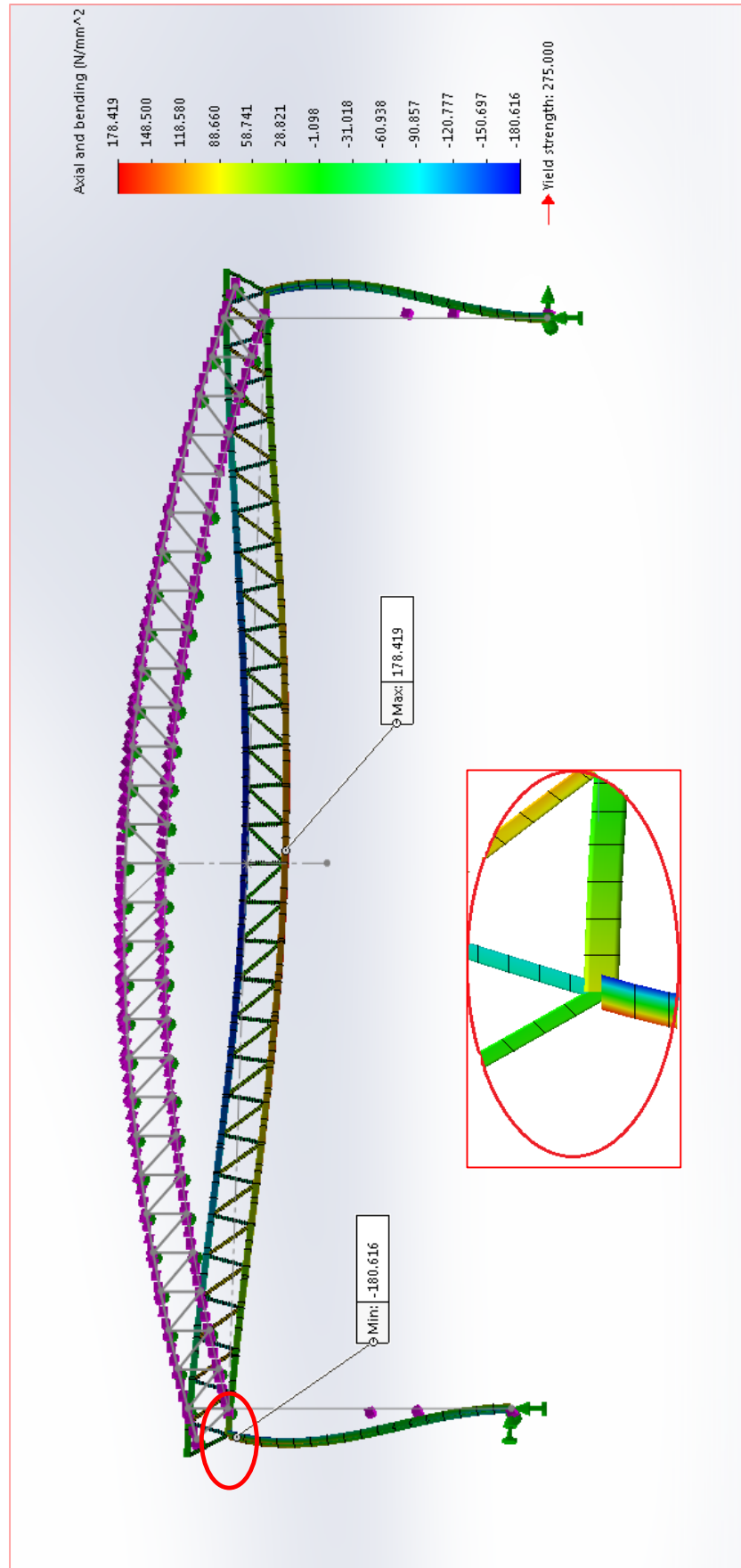
## 2.2. NELINEARNA ANALIZA

Statički proračun na izvijanje vrijedi za ravne štapove. Za vrijeme eksploatacije stupovi nosača se deformiraju i poželjno je pratiti kako progib stupa djeluje na ostatak konstrukcije. Prema [2], načini dimenzioniranja u Eurocode pravilnicima, iako složeni, ne pridaju pozornost sljedećem: „Posebna opasnost za nosivost, odnosno naglo nestabilno deformiranje stupova, a time i opasnost od urušavanja, je progresivno djelovanje vertikalnog, stalnog opterećenja, a posebice pri naletima vjetra jer povećanje momenta opterećenja mimo vertikalne sile povećava progib što povećava

moment, a time i progib, uslijed vertikalne sile.“ Postoji opravdanja sumnja da će naprezanje u stupu nejednoliko rasti. Točnija rješenja u obzir moraju uzeti utjecaj nazivnih opterećenja na izvijene stupove kao i efekt tih pomaka na vodoravni luk. Solidworks Simulation paket nudi dodatne opcije, jedna od njih je nelinearna analiza koja omogućuje detaljniji uvid u naprezanja i ponašanje modela. Sile koje djeluju na pojedine elemente uvode se u inkrementima u ovisnosti o vremenu, te se dobivaju među-rezultati. Jedna od mogućnosti je praćenje deformacija i kako sile mijenjaju smjer s obzirom na pomak hvatišta uslijed tih istih deformacija. Takva simulacija daje još konzervativnije rezultate na strani sigurnosti. Promatra se utjecaj kompleksnog izvijanja stupa na rešetku kao i nelinearnost u naprezanju zbog otklona stupa od vertikalnog položaja. Prije uvođenja vjetra, opterećenja i naprezanja su simetrična s obzirom da je i nosač simetričan po globalnoj y osi. Nakon uvođenja djelovanja vjetra s jedne strane javlja se veliki porast u ekvivalentnom naprezanju stupa, što je i za očekivati. Iterativnim postupkom, odnosno pogađanjem odabiru se kvadratni profili pojasnih i rebrenih štapova. Uspoređuje se ukupno naprezanje, kao zbirno djelovanje aksijalnog i savojnog naprezanja, s granicom tečenja materijala umanjenoj za faktor sigurnosti. Takvo naprezanje nazivamo  $\sigma_{dop}$  i računamo po sljedećoj formuli prema [4]:

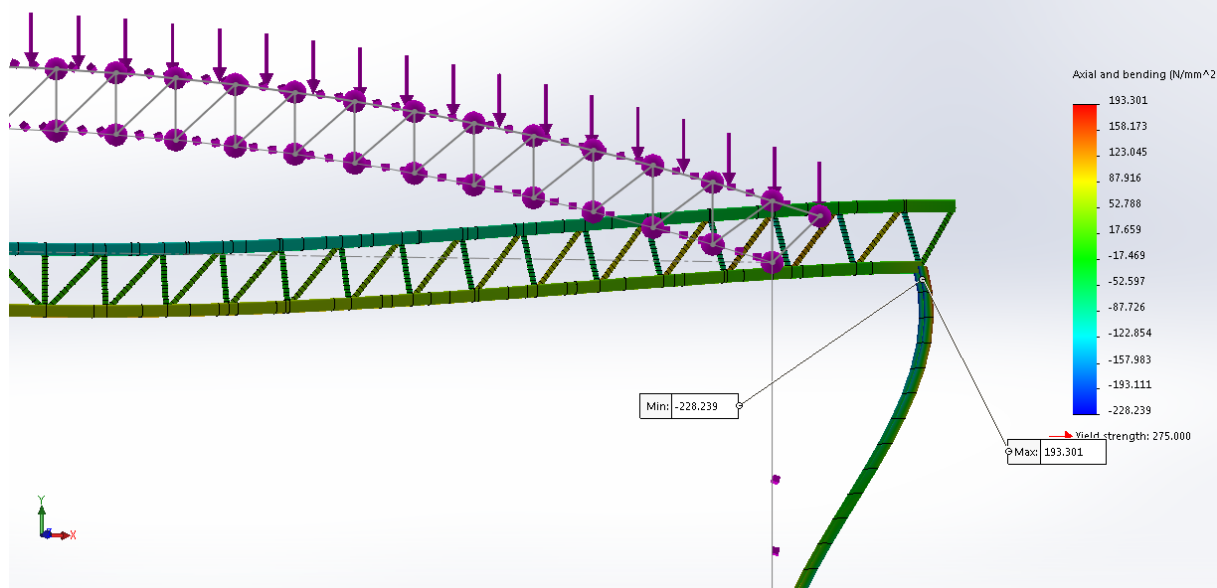
$$\sigma_{dop} = \frac{R_e}{S} = \frac{275}{1,5} = 183,33 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

Prvo će se promatrati utjecaj nazivnih opterećenja na lučni nosač bez vjetra (slika 7). Zatim će se dodati opterećenje tlakom vjetra i tako odabrati dimenzije stupova (slika 8). Vidi se sa slike da ukupna naprezanja prelaze  $\sigma_{dop}$ . Zbog toga, a i bolje stabilnosti uvode se po dva stupa sa svake strane jednog lučnog nosača, što nas vraća nazad na stranu sigurnosti. Valja napomenuti da je kod prikaza ekvivalentnog naprezanja korištena opcija „render beam profile“ koja uzima u obzir poprečni presjek štapova i računa lokalna naprezanja s točnim predznakom. To je bitno jer u nekim slučajevima najniže naprezanje (označeno plavom bojom) ima veći apsolutni iznos od najvišeg naprezanja (crvena boja), pa je samim time mjerodavno pri izboru materijala/dimenzija. Slika 9 prikazuje pomake u „mm“. Najveći progib je na sredini i iznosi  $\approx 70$  mm. Radi bolje preglednosti pomaci nisu prikazani u mjerilu, nego su uvećani za faktor  $\approx 35$ .



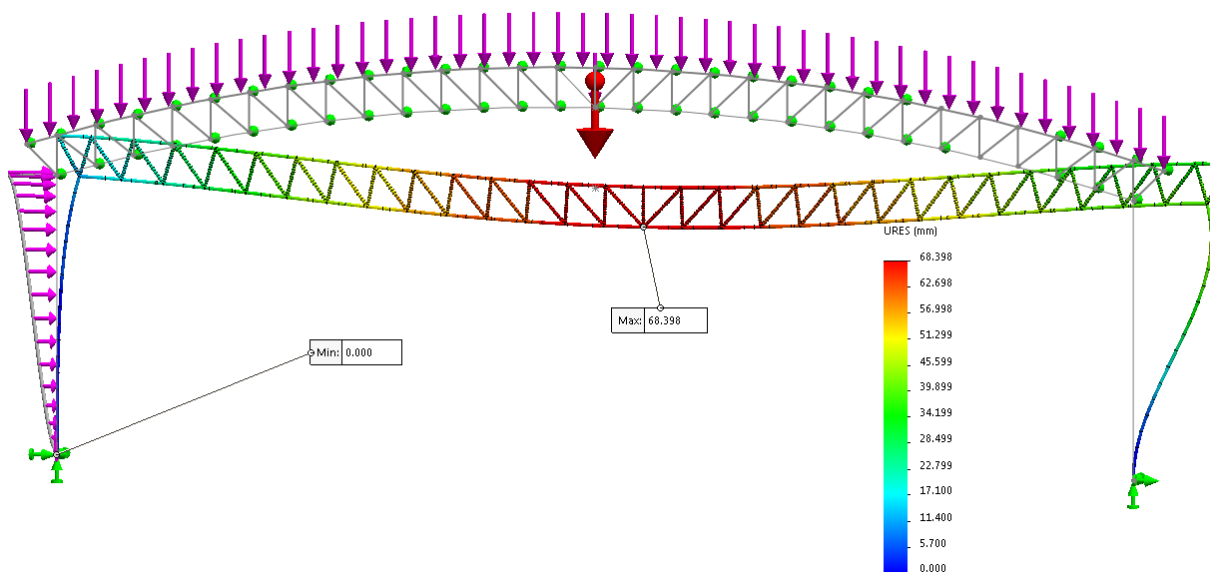
Slika 7 - Ekvivalentna naprezanja bez utjecaja vjetro

Plot type: Axial and bending Stress1  
Plot step: 7 time : 3 Seconds  
Deformation scale: 34.5531



Slika 8 - Ekvivalentna naprezanja s utjecajem vjetra

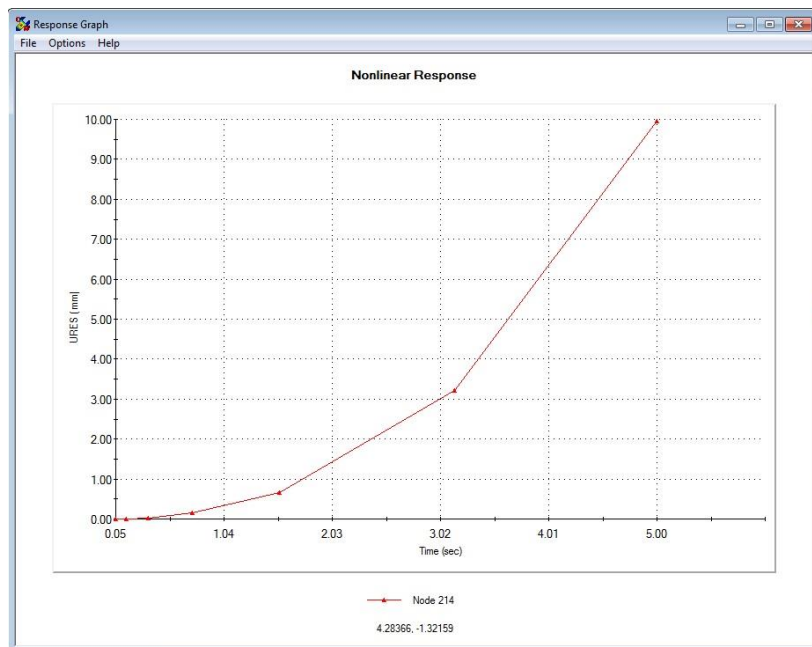
Plot type: Nonlinear Displacement Displacement1  
Plot step: 7 time : 3 Seconds  
Deformation scale: 23.5217



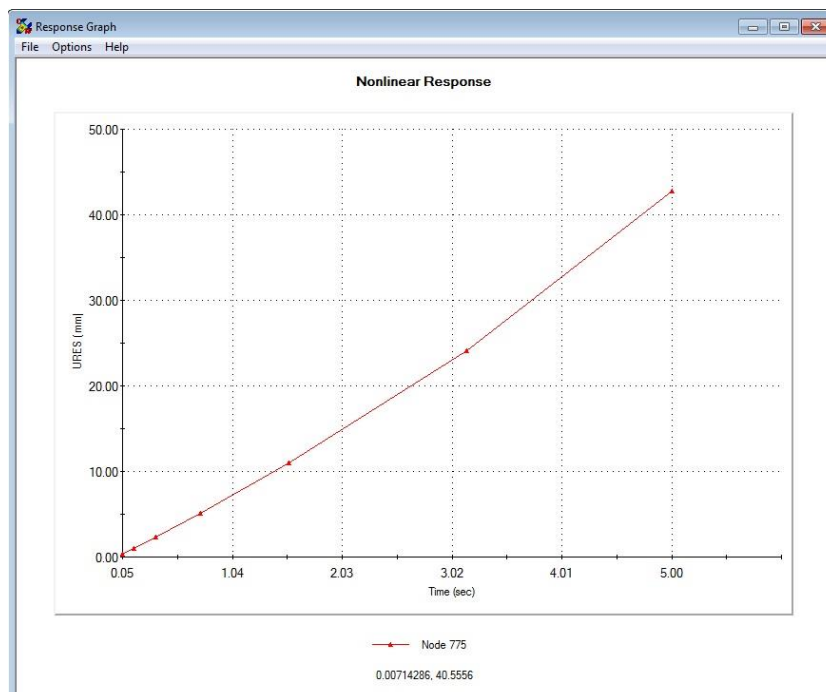
Slika 9 - Pomaci konstrukcije

Zgodno je još prikazati pomake određenih dijelova konstrukcije u ovisnosti o vremenu, iz kojih se jasno vidi gore spomenuta nelinearnost. Promatra se element na vrhu lijevog i desnog stupa, gdje se očekuje najveće odstupanje od linearnosti. Opterećenja su raspoređena u jednake inkremente kroz vrijeme od 5 sekundi. Svaki

među-korak uzima u obzir pomake, odnosno deformirani izgled stupova (samim time i promjenu smjera sile). Vidljivo je kako vrijeme odmiče, i kako je stup sve više izbačen iz vertikalnog položaja, pomaci prestaju pratiti linearnu značajku. Nelinearni odziv dva elementa prikazan je na slikama 10 i 11.



Slika 10 - Pomaci vrha lijevog stupa u ovisnosti o vremenu



Slika 11 - Pomaci vrha desnog stupa u ovisnosti o vremenu

### 3. PRORAČUN PRIKLJUČAKA PREMA EUROCODE NORMAMA

U nastavku se obrađuje kodificirani proračun priključaka rešetkastih čeličnih nosača prema [3] i [4]. S obzirom da je konstrukcija modelirana pomoću grednih elemenata Solidworks Simulation omogućuje da definiramo dijagrame aksijalnih sila, momenata savijanja i smičnih sila za bilo koji gredni element. To uvelike pomaže pri usporedbi s kriterijima otkazivanja priključaka prema Eurocode normama. U pojednostavljenoj analizi štapovi ispune mogu biti opterećeni samo na vlak ili tlak. Kako je ipak poželjno u obzir uzeti i utjecaj momenata savijanja, aksijalna sila koju smo dobili numeričkim putem biti će uvećana za iznos sile koja bi bila potrebna da uzrokuje vlačna naprezanja jednaka savojnim naprezanjima prema [6], odnosno:

$$\sigma_v = \frac{F_1}{A} \quad (3)$$

$$\sigma_s = \frac{M}{W} = \frac{F_2}{A} \quad (4)$$

$$F_2 = \frac{M \cdot A}{W} \quad (5)$$

$$F_{ukupno} = F_1 + F_2 \quad (6)$$

Upravo će se  $F_{ukupno}$  koristiti kod proračuna otpornosti štapova. Prema [3] u tablici 2 navedeni su izrazi za provjeru a prije toga potrebno je još odrediti neke geometrijske odnose:

- omjer širina štapova ispune i pojasnog štapa

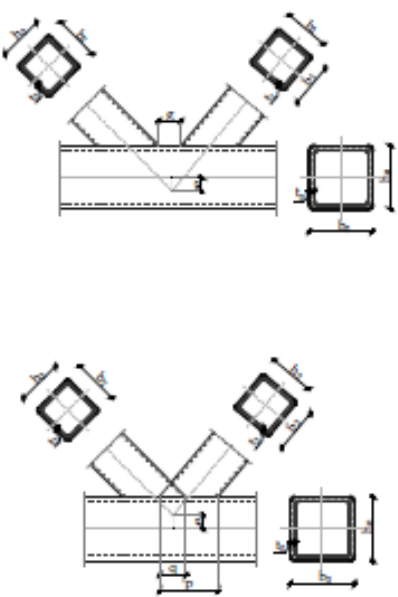
$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4 \cdot b_0} = \frac{40 + 40 + 40 + 40}{4 \cdot 80} = 0,5 \quad (7)$$

- omjer širine pojasnog štapa i dvije njegove debljine stijenke

$$\gamma = \frac{b_0}{2 \cdot t_0} = \frac{80}{2 \cdot 6,3} = 6,35 \quad (8)$$



Tablica 2 - Proračun otpornosti karakterističnih priključka sa šupljim kvadratnim profilima prema [3]

| K i N priključci  | Proračun otpornosti štapa $i$ [ $i=1$ ili $2$ ]  |
|---|--|
|   | <p>1<sup>o</sup> plastifikacija lica pojasnog štapa</p> $N_{i,Rd} = \frac{8,9 \cdot k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot \sqrt{\gamma}}{\sin \theta_i} \cdot \beta$  |
|   | <p>2<sup>o</sup> posmični proboj stijenke pojasnog štapa (tlačni štap), pojava pukotine – odvajanje štapa ispune od pojasa (vlačni štap)</p> $N_{i,Rd} = \frac{f_{yt} \cdot t_i \cdot (2 \cdot h_i - 4 \cdot t_i + b_i + b_{eff})}{\gamma_{M5}}$   |
|   | <p>3<sup>o</sup> otkazivanje štapa ispune zbog smanjenja efektivne širine (pukotina u zavaru ili štapa ispune)</p> $N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3} \cdot \sin \theta_i} \cdot \left( \frac{2 \cdot h_i}{\sin \theta_i} + b_i + b_{e,p} \right)$ $N_{i,Rd} = \frac{f_{yt} \cdot t_i \cdot \left( b_{eff} + b_{e,ov} + \frac{\lambda_{ov}}{50} \cdot (2 \cdot h_i - 4 \cdot t_i) \right)}{\gamma_{M5}}$ |
|   | <p>4<sup>o</sup> posmično otkazivanje pojasnog štapa</p> $N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} \cdot A_v}{\sqrt{3} \cdot \sin \theta_i} \cdot \gamma_{M5}$ $N_{0,Rd} = \frac{\left[ (A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v \cdot f_{y0} \sqrt{1 - \left( \frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \right)^2} \right]}{\gamma_{M5}}$   |
| $k_n = 1,3 - \frac{0,4 \cdot n}{\beta} \leq 1,0$ $A_v = (2 \cdot h_0 + \alpha \cdot b_0) \cdot t_0$ $b_{eff} = \frac{10}{b_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0^2}{f_{yt} \cdot t_i} \cdot b_i \leq b_i$ $\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 \cdot g^2}{3 \cdot t_0^2}}}$ $b_{e,p} = \frac{10 \cdot t_0}{b_0} \cdot b_i \leq b_i$ $V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_{y0}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$ |  |

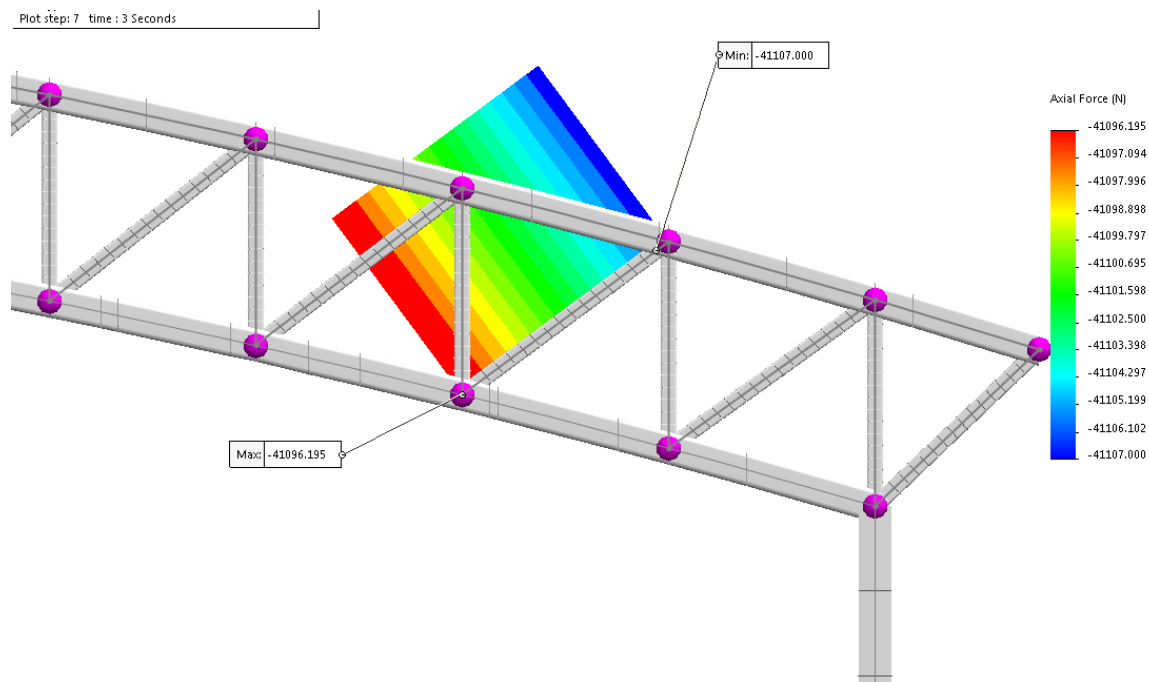
### 3.1. ISKORISTIVOST KRITIČNOG PRIKLJUČKA

Propisi daju metode proračuna statičke otpornosti priključaka, izražene preko uzdužne sile koju može prenijeti štap ispune, a općenito je potrebno razmotriti put sile, ponašanje materijala i raspodjelu krutosti. Iskoristivost je u ovom slučaju omjer  $F_{ukupno}$  i maksimalne uzdužne sile u štapa prije pojave otkazivanja nosivosti bilo

plastifikacijom, tečenjem, gnječenjem, pojavom izbočenja, proboja i sl. Veća iskoristivost ujedno znači bolje optimiranu konstrukciju i manji utrošak materijala. Posebno su izdvojena neka od ograničenja kod primjene spomenutih pravila prema [3]:

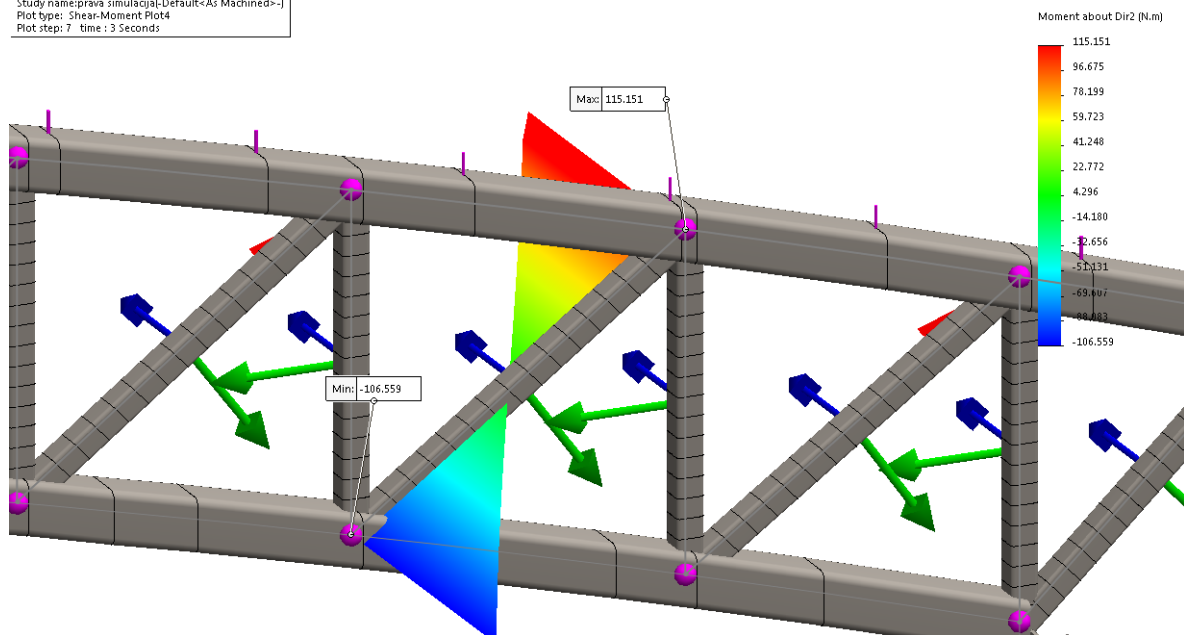
- za najmanju debljinu stijenki šupljih poprečnih presjeka ograničenje je 2,5 mm, a za najveću debljinu pojasnih štapova 25 mm
- kutovi između štapova ispune i pojasnih štapova, te između susjednih štapova ispune moraju biti veći od  $30^\circ$
- priključci s preklapom u kojima štapovi imaju različite širine poprečnih presjeka moraju se preklapati tako da je štap s većom širinom preklopljen štapom s manjom širinom
- priključci s razmakom trebaju imati razmak veći od sume debljina stijenki štapova, mjereno duž lica pojasnog štapa zbog osiguranja izvedbe zavara

Promatrani slučaj je N priključak. Provjera se vrši na kritičnim štapovima, tamo gdje su numerički dobivene najveće uzdužne sile i momenti savijanja. Zbog nesimetričnog opterećenja usljed djelovanja vjetra kritičan priključak nalazi se na desnoj strani (vidljivo na slikama 12, 13, 14 i 15 u nastavku). Negativan predznak opisuje vlačno opterećenje, a pozitivan tlačno zbog orijentacije lokalnog koordinatnog sustava grede.

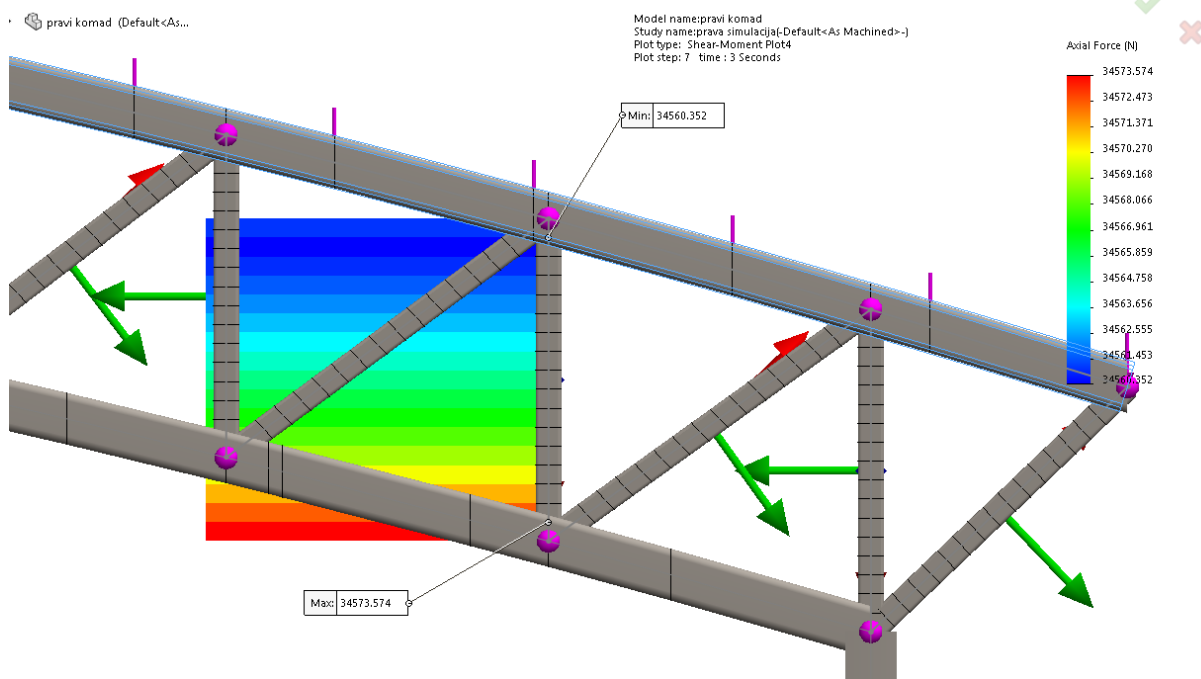


Slika 12 - Aksijalna sila u kritičnom dijagonalnom rebrenom štapu

Study name: prava simulacija-Default<As Machined>-  
 Plot type: Shear-Moment Plot4  
 Plot step: 7 time : 3 Seconds

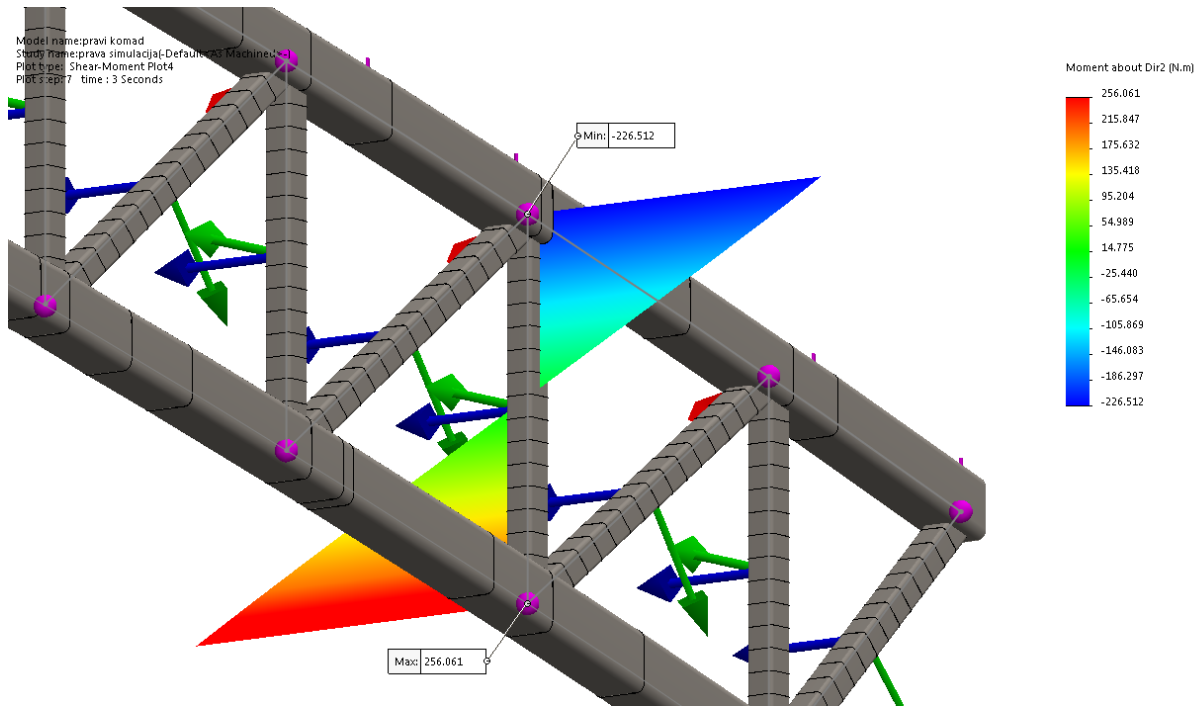


Slika 13 - Moment savijanja oko globalne z osi (plava strelica) u kritičnom dijagonalnom rebrnom štapu

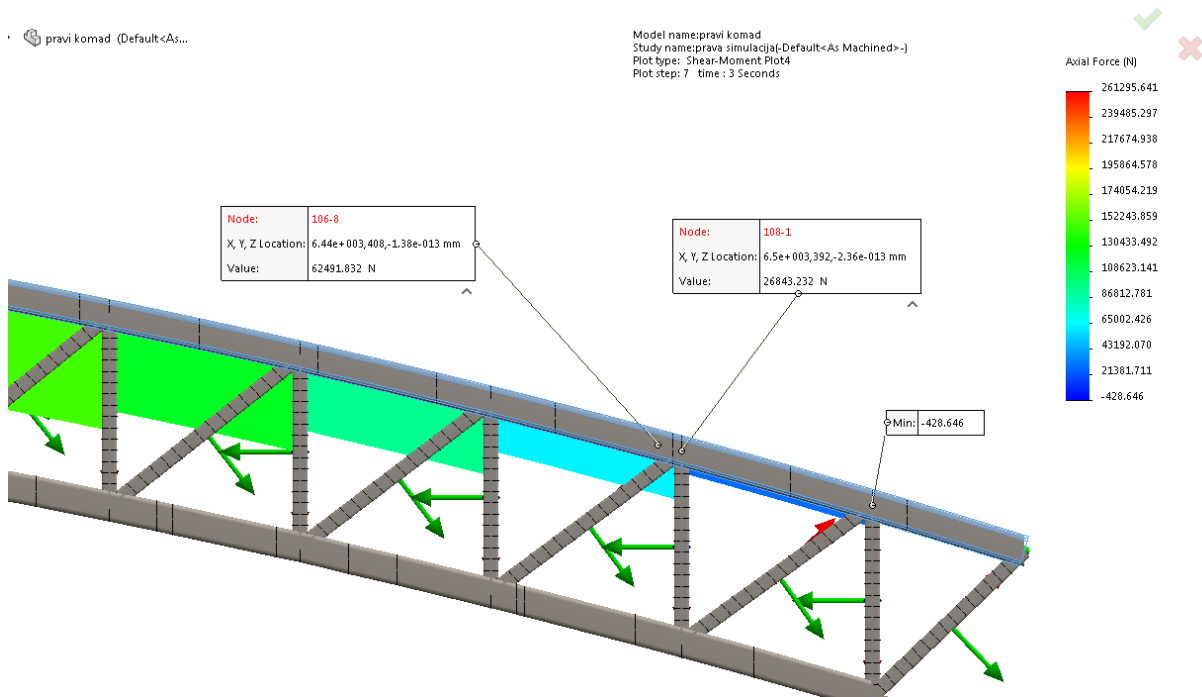


Slika 14 - Aksijalna sila u kritičnom vertikalnom rebrnom štapu

Na slikama 16 i 17 prikazane su aksijalne sile i momenti savijanja gornjeg pojasnog štapa prilazeći kritičnom čvoru s jedne i druge strane.

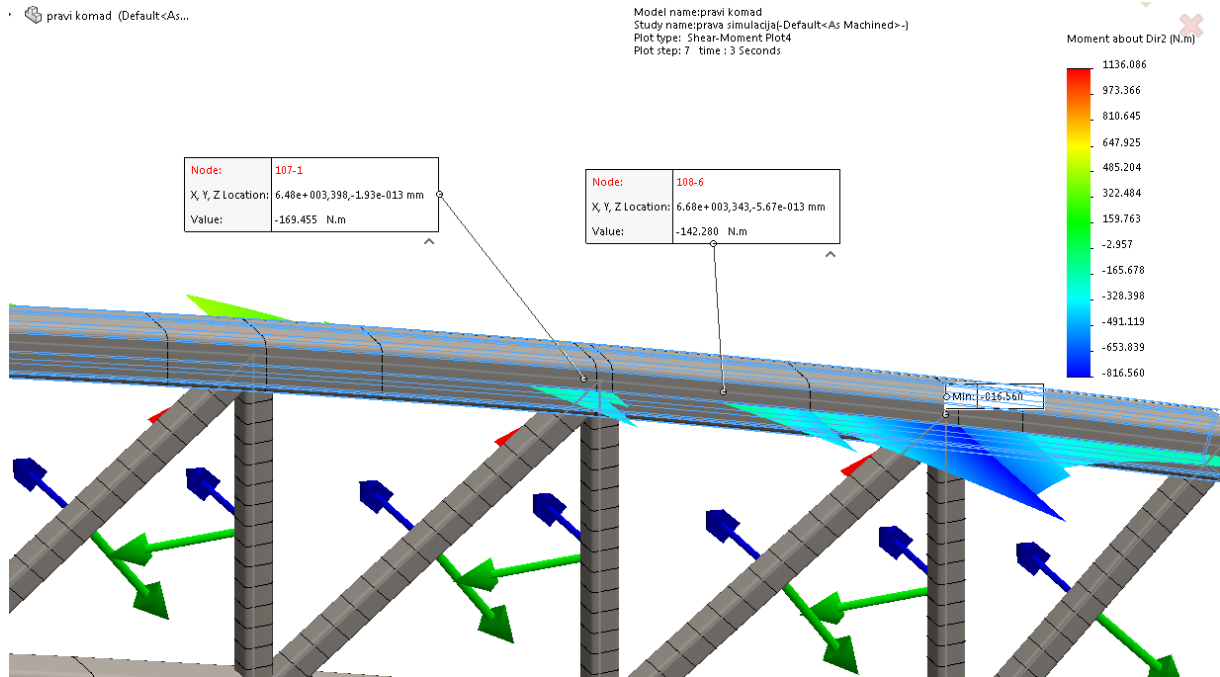


Slika 15 - Moment savijanja oko globalne z osi u kritičnom vertikalnom rebrenom štapu

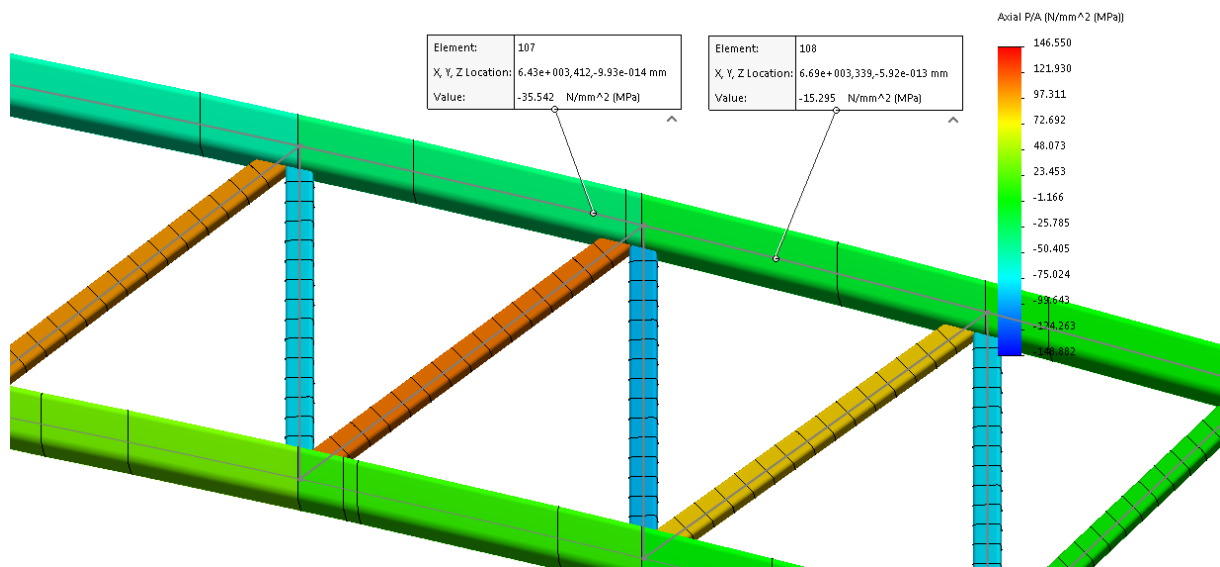


Slika 16 - Aksijalne sile u gornjem pojasnom štapu na mjestu kritičnog čvora

Slika 18 prikazuje maksimalno tlačno naprezanje u pojasnom štapu u blizini kritičnog priključka potrebno za izračunavanje jednadžbe (9).



Slika 17 - Momenti savijanja oko globalne z osi u gornjem pojasnom štapu na mjestu kritičnog čvora



Slika 18 - Maksimalno tlačno naprezanje u pojasnom štapu priključka ( $\sigma_{0,ed}$ )

$$n = \frac{\sigma_{0,ed}}{f_{y,0}} = \frac{35,542}{275} = 0,13 \quad (9)$$

$$k_n = 1,3 - \frac{0,4 \cdot 0,13}{0,5} = 1,196 \quad (10)$$



$$b_{eff} = \frac{10}{80} \cdot \frac{275 \cdot 6,3^2}{275 \cdot 2,6} \cdot 40 = 76,33 \text{ mm} \quad (11)$$

$$b_{e,p} = \frac{10 \cdot 6,3}{80} \cdot 40 = 31,5 \text{ mm} \quad (12)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 \cdot 4,2^2}{3 \cdot 6,3^2}}} = 0,8 \quad (13)$$

$$A_v = (2 \cdot 80 + 0,8 \cdot 80) \cdot 6,3 = 1411,2 \text{ mm}^2 \quad (14)$$

Gornji izrazi iz tablice 2 potrebni su za proračun priključaka u odnosu na moguće načine otkazivanja nosivosti ([3], poglavlje 7.5.2.1 tablice br 7.10 i 7.12). Uz podatke iz tablice 3 u nastavku je dan pregled iskoristivosti kritičnog N priključka.

Tablica 3 - Kritični N priključak, centrično spojeni štapovi

|   | Pojasni štap | Dijagonalni štap 1<br>(vlak) | Vertikalni štap 2<br>(tlak) |
|---|--------------|------------------------------|-----------------------------|
| Poprečni presjek [mm]                   | 80x80x6,3    | 40x40x2,6                    | 40x40x2,6                   |
| Uzdužna sila $F_1$ [N]                  | 62492        | 41107                        | 34574                       |
| Moment savijanja $M$ [Nm]               | 169,5        | 115,2                        | 256,1                       |
| Moment otpora $W$ [m <sup>3</sup> ]     | 0,0000423403 | 0,000004555                  | 0,000004555                 |
| Površina presjeka $A$ [m <sup>2</sup> ] | 0,001857     | 0,00038896                   | 0,00038896                  |
| $F_2$ [N]                               | 7457         | 9673                         | 21534                       |
| $F_{uk}$ [N]                            | 69949        | 50780                        | 56108                       |

a) plastifikacija lica pojasnog štapa

$$N_{1,Rd} = \frac{8,9 \cdot 1,196 \cdot 275 \cdot 6,3^2 \cdot \sqrt{6,35}}{\sin(52,97^\circ)} = 393711,88 \text{ N} \quad (15)$$

→ iskoristivost  $\approx 13\%$

$$N_{2,Rd} = \frac{8,9 \cdot 1,196 \cdot 275 \cdot 6,3^2 \cdot \sqrt{6,35}}{\sin(105,85^\circ)} = 326730,47 \text{ N} \quad (16)$$

→ iskoristivost  $\approx 17,2\%$



- b) posmični proboj stijenke pojasnog štapa (tlačni štap), pojava pukotine – odvajanje štapa ispune od pojasa (vlačni štap)

$$N_{1,2,Rd} = \frac{275 \cdot 2,6 \cdot (2 \cdot 40 - 4 \cdot 2,6 + 40 + 76,33)}{1} = 132939 \text{ N} \quad (17)$$

→ iskoristivost štapa 1  $\approx 38,2\%$

→ iskoristivost štapa 2  $\approx 42,2\%$

- c) otkazivanje štapa ispune zbog smanjenja efektivne širine (pukotina u zavaru ili štapu ispune)

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{275 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot \sin(52,97^\circ)} \cdot \left( \frac{2 \cdot 40}{\sin(52,97^\circ)} + 40 + 31,5 \right)}{1} = 215145,4 \text{ N} \quad (18)$$

→ iskoristivost  $\approx 23,6\%$

$$N_{2,Rd} = \frac{\frac{275 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot \sin(105,85^\circ)} \cdot \left( \frac{2 \cdot 40}{\sin(105,85^\circ)} + 40 + 31,5 \right)}{1} = 160816,1 \text{ N} \quad (19)$$

→ iskoristivost  $\approx 34,89\%$

- d) posmično otkazivanje pojasanog štapa

$$N_{1,Rd} = \frac{275 \cdot 1411,2}{\sqrt{3} \cdot \sin(52,97^\circ)} = 280661,9 \text{ N} \quad (20)$$

→ iskoristivost  $\approx 18,1\%$

$$N_{2,Rd} = \frac{275 \cdot 1411,2}{\sqrt{3} \cdot \sin(105,85^\circ)} = 232913,5 \text{ N} \quad (21)$$

→ iskoristivost  $\approx 24,1\%$

## 4. KONTROLA KRITIČNIH ZAVARA

Zavarivanje je postalo jedno od najvažnijih postupaka spajanja, kako zbog uštede materijala, tako i zbog smanjenih troškova za modele i alate. Profilni čelici, plosnate šipke, cijevi i limovi spajaju se u nosive konstrukcije, rešetkaste konstrukcije i limene nosače. Promjenjiva istosmjerna opterećenja unutar štapova rešetke djeluju na računsku površinu zavara uzrokujući naprezanja koja je potrebno kontrolirati. Dopušteno naprezanje u šavu zavara ovisi o kvaliteti i postupku izrade, nečistoćama, vrsti materijala koji se spaja, prethodnoj i naknadnoj obradi, te u najboljem slučaju dostiže granicu tečenja. Aksijalna sila i savojni moment uzrokuju normalna naprezanja, dok je tangencijalno naprezanje posljedica smičnih sila i njih preuzimaju samo površine zavara paralelne sa smjerom smicanja. Naposljetku se prema energetske teoriji računa ekvivalentno naprezanje kao suma djelovanja normalnih i tangencijalnih.

### 4.1. KRITIČNI PRIKLJUČAK

Rebreni štapovi su sa pojasnima spojeni zavarenim spojevima. Na mjestu gdje se vršila provjera po Eurocode normama biti će provjerena i čvrstoća zavarenih šavova. Prema [5] i općim metodama nauke o čvrstoći računa se potrebna debljina zavara „X“. Opterećenja su dobivena iz grednih dijagrama Solidworks simulacije. Podaci iz tablice 3 upotpunjeni su smičnim silama (prema slikama 20 i 21) i geometrijskim značajkama šavova zavara (slika 22). Iz [5] prema tipu opterećenja očitano je dopušteno naprezanje u zavaru,  $\sigma_{dop,zav} = 135 \text{ N/mm}^2$  te se iterativnim postupkom pomoću excel tablice (slika 19) dobiva najmanja potrebna debljina zavara, u ovom slučaju:  $X \geq 3 \text{ mm}$ .

$$A = 40^2 - (40 - 2 \cdot X)^2 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (22)$$

$$A_p = 2 \cdot 40 \cdot X \text{ [mm}^2\text{]} \quad (23)$$

$$W = \frac{I}{e} = \frac{\frac{40^4}{12} - \frac{(40 - 2 \cdot X)^4}{12}}{20} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (24)$$

$$\sigma_v = \frac{F_v}{A} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (25)$$



$$F_{V1} = 41107 \text{ N}; F_{V2} = 34574 \text{ N}$$

$$\sigma_s = \frac{M}{W} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (26)$$

$$M_1 = 115200 \text{ Nmm}; M_2 = 256100 \text{ Nmm}$$

$$\tau = \frac{F_S}{A_P} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (27)$$

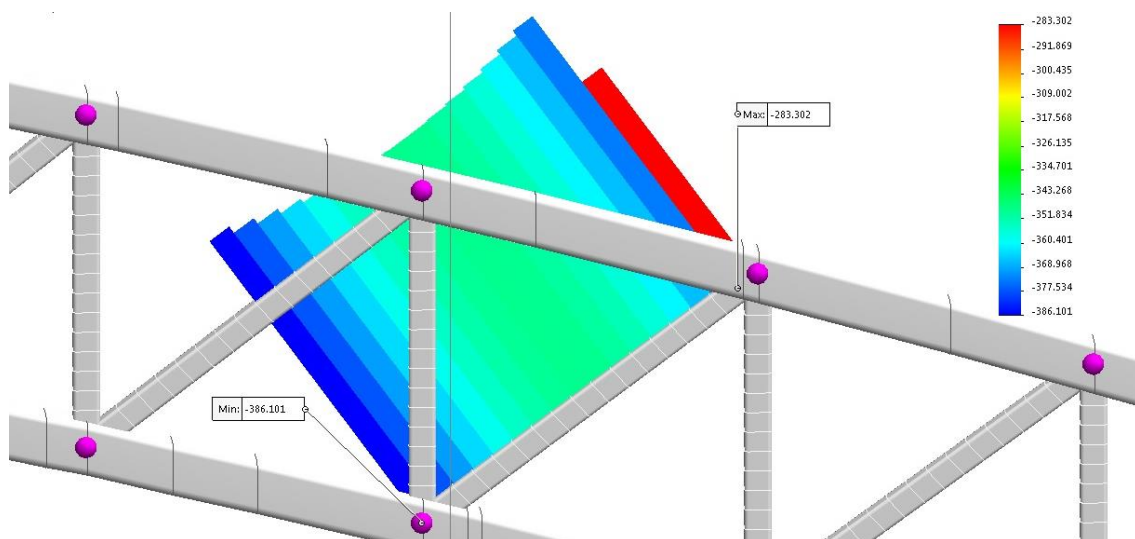
$$F_{S1} = 386 \text{ N}; F_{S2} = 988 \text{ N}$$

$$\sigma_{ukupno} = \sigma_s + \sigma_v \quad (28)$$

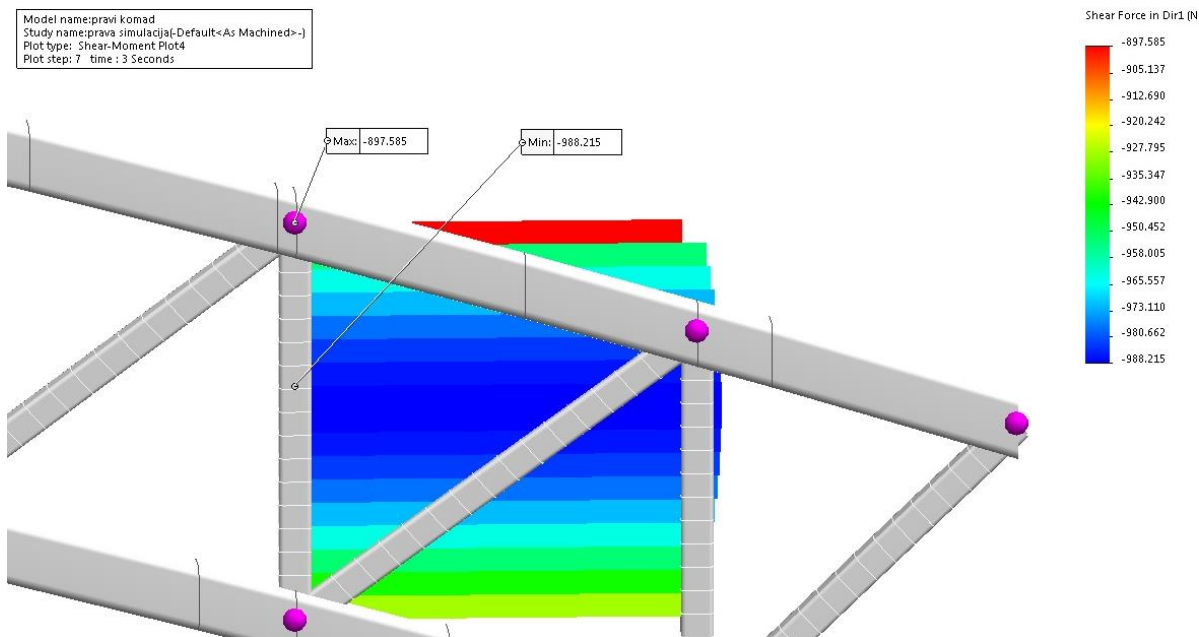
$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma_{ukupno}^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad (29)$$

|    | A                  | B      | C    | D        | E           | F      | G | H  | I      | J    | K        | L           | M      |
|----|--------------------|--------|------|----------|-------------|--------|---|----|--------|------|----------|-------------|--------|
| 1  | Fv                 | 41107  | N    | SigmaV   | 92,58333333 |        |   | Fv | 34574  | N    | SigmaV   | 77,86936937 |        |
| 2  | M                  | 115200 | Nmm  | SigmaS   | 22,59443769 |        |   | M  | 256100 | Nmm  | SigmaS   | 50,22947476 |        |
| 3  | Fs                 | 386    | N    | Tau      | 1,608333333 |        |   | Fs | 988    | Nmm  | Tau      | 4,116666667 |        |
| 4  | X(debljina zavara) | 3      | mm   |          |             |        |   |    |        |      |          |             |        |
| 5  | A                  | 444    | mm^2 | SigmaUK  | 115,177771  |        |   | A  | 444    | mm^2 | SigmaUK  | 128,0988441 |        |
| 6  | Ap                 | 240    | mm^2 |          |             |        |   | Ap | 240    | mm^2 |          |             |        |
| 7  | W                  | 5098,6 | mm^3 | SigmaEKV | 115,2114541 | N/mm^2 |   | W  | 5098,6 | mm^3 | SigmaEKV | 128,2971344 | N/mm^2 |
| 8  |                    |        |      |          |             |        |   |    |        |      |          |             |        |
| 9  |                    |        |      |          |             |        |   |    |        |      |          |             |        |
| 10 |                    |        |      |          |             |        |   |    |        |      |          |             |        |
| 11 |                    |        |      |          |             |        |   |    |        |      |          |             |        |

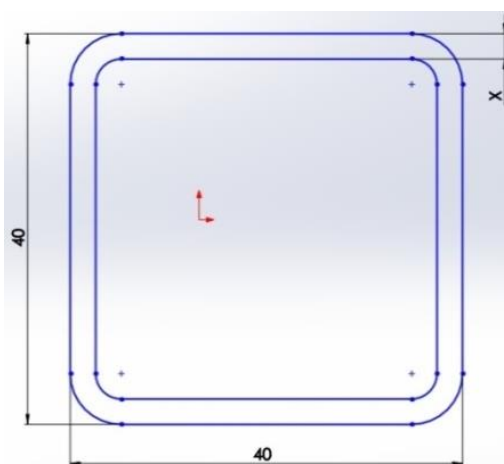
Slika 19 - Potrebna debljina zavara kritičnih priključaka



Slika 20 - Smično opterećenje kritičnog dijagonalnog štapa



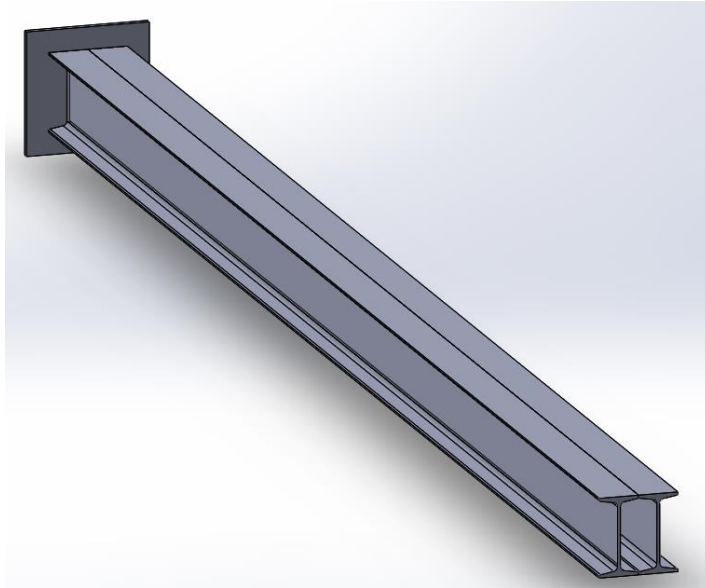
Slika 21 - Smično opterećenje kritičnog vertikalnog štapa



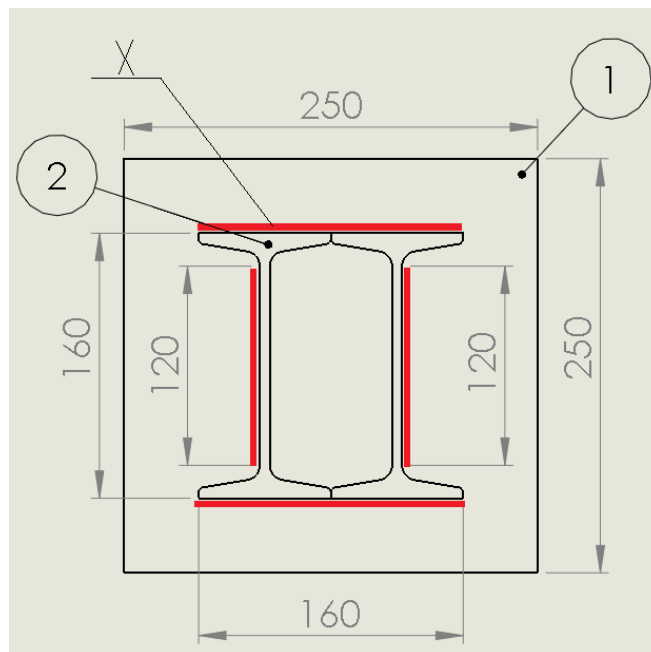
Slika 22 - Geometrijske značajke zavara priključaka

## 4.2. ZAVARENI SPOJ STUPA I PLOČE

Stupovi su za pojasne štapove vezani preko ploče. Prethodno odabrana dva stupa su kutnim zavarom spojena za ploču prema slici 23. Na slici 24 crvene površine predstavljaju šavove zavara, ploča je označena s 1, a stupovi s 2. Opterećenja na zavare dobivena su kao reakcije u uklještenju desnog stupa (slika 25). Na isti način kao i u prethodnom poglavlju pogađanjem je izračunata potrebna debljina zavara „X“ (slika 26).



Slika 23 - Spoj ploče i dva stupa



Slika 24 – Geometrijske značajke zavora ploče i dva stupa

$$A = 2 \cdot 160 \cdot X + 2 \cdot 120 \cdot X \text{ [mm}^2\text{]} \quad (30)$$

$$A_p = 2 \cdot 160 \cdot X \text{ [mm}^2\text{]} \quad (31)$$

$$W = \frac{I}{e} \quad (32)$$

$$W = \frac{160^3 \cdot (160 + 2 \cdot X) - 160^4}{12} + \frac{120 \cdot (90 + 2 \cdot X)^3 - 120 \cdot 90^3}{12} \quad [\text{mm}^3]$$

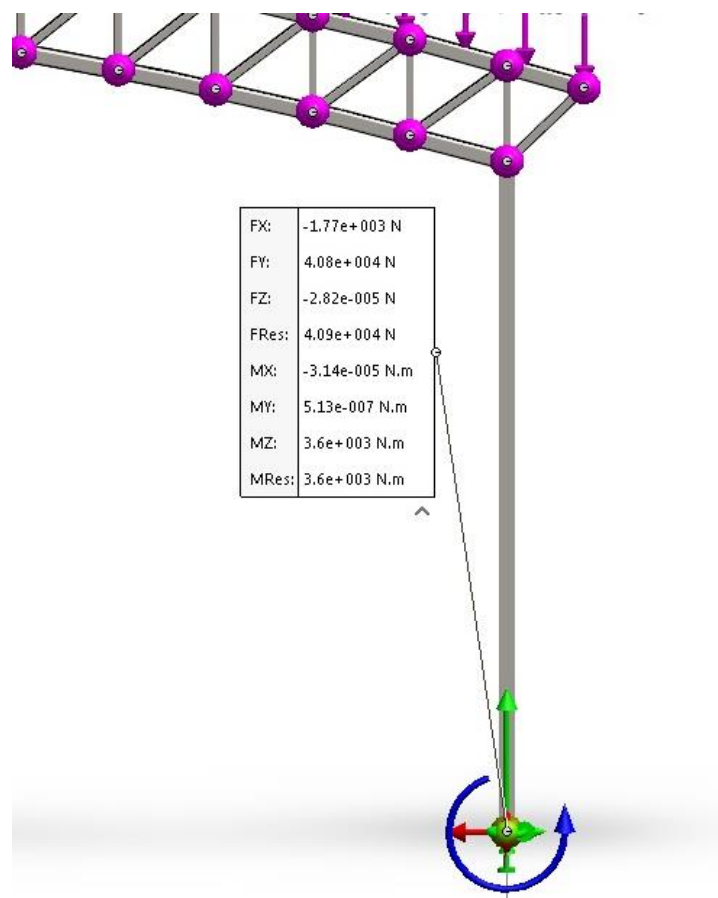
$$\sigma_V = \frac{F_V}{A} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] ; F_V = 40800 \text{ N} \quad (33)$$

$$\sigma_S = \frac{M}{W} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] ; M = 3600000 \text{ Nmm} \quad (34)$$

$$\tau = \frac{F_S}{A_p} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] ; F_S = 1770 \text{ N} \quad (35)$$

$$\sigma_{ukupno} = \sigma_S + \sigma_V \quad (36)$$

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma_{ukupno}^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad (37)$$



Slika 25 - Reakcije u uklještenju desnog stupa

|    | A                   | B       | C               | D | E        | F        |
|----|---------------------|---------|-----------------|---|----------|----------|
| 1  | Fv                  | 40800   | N               |   | SigmaV   | 24,28571 |
| 2  | M                   | 3600000 | Nmm             |   | SigmaS   | 79,88107 |
| 3  | Fs                  | 1770    | N               |   | Tau      | 1,84375  |
| 4  | X (debljina zavara) | 3       | mm              |   |          |          |
| 5  | A                   | 1680    | mm <sup>2</sup> |   | SigmaUK  | 104,1668 |
| 6  | Ap                  | 960     | mm <sup>2</sup> |   |          |          |
| 7  | I                   | 3605360 | mm <sup>4</sup> |   | SigmaEKV | 104,2157 |
| 8  | e                   | 80      | mm              |   |          |          |
| 9  | W                   | 45067   | mm <sup>3</sup> |   |          |          |
| 10 |                     |         |                 |   |          |          |
| 11 | Spoj ploče i stupa  |         |                 |   |          |          |
| 12 |                     |         |                 |   |          |          |
| 13 |                     |         |                 |   |          |          |

Slika 26 - Potrebna debljina zavara između ploče i stupa



## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisana je funkcija, glavni dijelovi, i proračun rešetkaste lučne konstrukcije. Provjerena je iskoristivost štapova prema aktualnim Eurocode normama, kao i čvrstoća zavarenih spojeva. Vanjski utjecaji vjetra i snijega zamjenjeni su kontinuiranim silama, naprezanja usljed toplinskih dilatacija su zanemarena, kao i dodatak za koroziju. Odabrani su šuplji kvadratični profili kao optimalno i ekonomično rješenje. Učinak savojnog momenta uzet je u obzir zbog krutih veza i nedovoljnog rotacijskog kapaciteta zglobova priključaka. Za numeričku analizu korišten je Solidworks simulacijski paket. Kompleksno izvijanje i nelinearni porast naprezanja u stupu uzrokovan otklonom od početnog položaja ilustriran je pomacima elemenata u svakom od stupova. Ovisno o geometriji i kutu između štapova može se utjecati na predznak uzdužne sile (vlak ili tlak). Izračunata je potrebna debljina zavara prema općim pravilima otpornosti. Prikazane su u excel tablici konačne vrijednosti svih relevantnih veličina. Iskoristivost kritičnog priključka izražena je u postotku i upozorava na iskustvom dobivene kriterije otkazivanja. Za dimenzije profila mjerodavna je granica tečenja. Kada se u obzir uzima da štapovi ispune ne prenose samo aksijalne sile, numerička analiza predviđa veća naprezanja nego europski standardi, stoga je i iskoristivost kritičnih priključaka rijetko prelazila 40%. Dio razlika svakako treba pripisati izboru proračunskog modela u ovom radu. U tom kontekstu nije moguće uzeti u obzir lokalno ponašanje priključaka, za što bi trebalo načiniti 3D shell model.



## 6. LITERATURA

- 1) **Rajčić V., Mandić A., Čizmar D.:** „*Djelovanje snijega i vjetra na nosive konstrukcije*“, Priručnik iz predmeta Lagane i Drvene konstrukcije; Zavod za konstrukcije, Građevinski Fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Zagreb, 2009.; ISBN 978-953-6272-29-7
- 2) **Hoster J.:** *Sigurnost stupova u okvirnim konstrukcijama*“, Zbornik radova Zaštita na radu i zaštita zdravlja; Veleučilište u Karlovcu, 2016. str. 338-343, Karlovac
- 3) **European Committee for Standardization (CEN) 2005:** EN 1993 - 1 - 8, *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1 - 8: Design of joints*
- 4) **European Committee for Standardization (CEN) 2005:** EN 1993 - 1 - 1, *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*
- 5) **Karl-Heinz Decker:** „*Elementi strojeva*“, 2. popravljeno izdanje, Tehnička knjiga Zagreb
- 6) **Dassault Systèmes SolidWorks Corporation:** „*An Introduction to Stress Analysis Applications with SolidWorks Simulation, Instructor Guide*“, Engineering Design and Technology Series
- 7) **Ivo Alfirević:** „*Nauka o čvrstoći 1*“, Tehnička knjiga Zagreb
- 8) <https://tlsteelstructure.en.made-in-china.com/>
- 9) **Jurica Sorić:** „*Metoda konačnih elemenata*“, Biblioteka Tehnička mehanika; Golden marketing – Tehnička knjiga; Zagreb, 2004.