

# Primjena numeričkog modela u analizi pouzdanosti konstrukcije tipskog rešetkastog antenskog stupa visine 40 m

---

**Botić, Hrvoje**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:864899>

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

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



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Hrvoje Botić**

**Split, 2016**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Hrvoje Botić**

**Primjena numeričkog modela u analizi pouzdanosti  
konstrukcije tipskog rešetkastog antenskog stupa  
visine 40m**

**Diplomski rad**

**Split, 2016**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Hrvoje Botić

BROJ INDEKSA: 509/2014

KATEDRA: **Katedra za Metalne i drvene konstrukcije**

PREDMET: Metalne konstrukcije II i  
Pouzdanost konstrukcija

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Primjena numeričkog modela u analizi pouzdanosti konstrukcije tipskog rešetkastog antenskog stupa visine 40m

Opis zadatka: Zadatak diplomskog rada je proračunati tipski čelični antenski stup visine 40m. Posebno istražiti ponašanje stupa s obzirom na dominantno opterećenje od utjecaja pojedinih vjetrova na lokaciji „Bobani, Split“ prema dostavljenim zapisima brzine i smjera vjetra. Proračun izvršiti primjenom inženjerskog programa „Ansys“ uz variranje krutosti montažnih spojeva stupa simuliranih kao kruti, deformabilni i zglobni. U okviru istraživanja ukazati na različitost opterećenja od djelovanja vjetra bure i juga. Projekt konstrukcije obraditi na inženjerskoj razini te dati dispoziciono rješenje čelične konstrukcije stupa i prikaz proračuna spojeva elemenata stupa. Izvršiti statističku analizu opterećenja na konstrukciju i odgovor konstrukcije. Istražiti dinamičku krutost antenskog stupa za djelovanje vjetrova bure i juga.

U Splitu, 20. ožujka 2016.

Voditelj Diplomskog rada

Prof. dr. sc. Bernardin Peroš

Komentor Diplomskog rada

Doc. dr. sc. Vladimir Divić

Predsjednik Povjerenstva  
za završne i diplomske ispite:

Prof. dr. sc. Ivica Boko

# **Primjena numeričkog modela u analizi pouzdanosti konstrukcije tipskog rešetkastog antenskog stupa visine 40m**

## ***Sažetak:***

Ovim radom smo istražili odgovor numeričkog modela za različite statičke sustave tipskog čeličnog antenskog stupa uslijed opterećenja slučajnih vremenskih serija zapisa vjetra na lokaciji predmetnog stupa. Nelinearnom analizom velikih pomaka, koristeći inženjerski program Ansys, dobiveni su rezultati odgovora konstrukcije na djelovanje vjetrova bure i juga. Usporedbom dinamičkih krutosti, dobivenih dijeljenjem spektra srednje čvorne sile i spektra pomaka vrha stupa uslijed djelovanja pojedinog vjetra, pokazalo se da je konstrukcija antenskog stupa kruća za djelovanje bure na svim frekventnim područjima.

## ***Ključne riječi:***

Ansys, antenski stup, numerički model, čvorovi, krutost spojeva, vjetar, vremenske serije, nelinearna analiza, geometrijska nelinearnost

# **The application of numerical model in the analysis of the reliability of standard antenna truss tower structure height of 40 m**

## ***Abstract:***

In this paper we investigated the answer of numerical models for different steel antenna tower's static systems due to loads of random time series of wind speeds collected at the location of the antenna tower. The results of structural response to the action of northeast and southeast wind have been shown by nonlinear analysis of large deflections, using engineering software Ansys. By comparing the dynamic stiffness, obtained by dividing response spectrum mean nodal force with response spectrum total deformation at the top of the tower due to action of a particular wind, it has been shown that the antenna tower structure is stiffer due to the influence of northeast wind considering all frequency areas.

## ***Keywords:***

Ansys, antenna tower, numerical model, nodes, joint stiffness, wind, time series, nonlinear analysis, geometric nonlinearities

# S a d r Ź a j

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIJA RADA.....</b>	<b>2</b>
2.1	Uvod .....	2
2.2	Verifikacijski primjeri .....	3
2.2.1	Primjer 1	3
2.2.2	Primjer 2	12
2.3	Numeričko modeliranje .....	18
2.3.1	Modeliranje montažnih spojeva	18
2.3.2	Numeričko modeliranje konstrukcije antenskog stupa	30
2.4	Statističko modeliranje .....	34
2.4.1	Model opterećenja vjetrom	34
2.4.2	Djelovanje vjetra na elemente stupa	39
<b>3</b>	<b>REZULTATI .....</b>	<b>42</b>
3.1	Rezultati numeričkog modela.....	42
3.1.1	Odgovor modela s krutim spojevima na djelovanje bure	45
3.1.2	Odgovor modela s krutim spojevima na djelovanje juga	53
3.1.3	Odgovor modela s deformabilnim spojevima na djelovanje bure	61
3.1.4	Odgovor modela s deformabilnim spojevima na djelovanje juga	70
3.1.5	Odgovor modela sa zglobnim spojevima na djelovanje bure	79
3.1.6	Odgovor modela sa zglobnim spojevima na djelovanje juga	87
3.2	Analiza rezultata .....	95
3.2.1	Statistička analiza	95
3.2.2	Fourierova analiza	96

<b>4</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>103</b>
<b>5</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>105</b>
<b>6</b>	<b>GRAFIČKI PRILOZI .....</b>	<b>107</b>

## 1 UVOD

Motivacija izrade ovoga rada nastala je iz niza poznatih havarija rušenja čeličnih antenskih stupova uslijed dominantnog opterećenja vjetrom. Pokušavajući što realnije numerički pratiti ponašanje vitkih čeličnih konstrukcija antenskih stupova uslijed dinamičkog opterećenja u svrhu detektiranja razloga havarija postavljaju se slijedeća pitanja:

- mogu li se krutosti spojeva modelirati njihovom stvarnom rotacijskom krutošću i ukoliko mogu kakav će utjecaj imati varijacija njihovih vrijednosti na odgovor konstrukcije?
- postoji li razlika u odgovoru konstrukcije stupa za djelovanje različitih vjetrova?
- postoji li mogućnost uključivanja geometrijske nelinearnosti u analizu odgovora konstrukcije u svrhu što stvarnijih proračuna progiba i reznih sila?
- kako stvarne zapise vjetra, izmjerene na terenu, prenijeti na konstrukciju kao opterećenje uz uvjet minimalizacije pogrešaka pri transformaciji?

Odgovori na postavljena pitanja dati će se primjenom inženjerskog programa Ansys, koji svojim raznim modulima omogućava različitim znanstvenim disciplinama simuliranje i rješavanje mnogih inženjerskih problema. Modeliranje utjecaja vjetra na konstrukciju antenskog stupa temelji se na stvarnim zapisima vjetra u referentnim točkama konstrukcije stupa izmjerenim na lokaciji "Bobani" u općini Klis, u blizini Splita.

Postupak lokalnog i globalnog modeliranja konstrukcije te opterećenja vjetra na konstrukcije antenskog stupa prikazan je u poglavlju 2. Rezultati i rasprava dana je u poglavljima 3 i 4.



## 2 METODOLOGIJA RADA

### 2.1 Uvod

Jedan od glavnih načela ovoga rada je pokazati utjecaj spojeva na odgovor konstrukcije antenskog stupa u funkciji krutosti spojeva i tipu vjetra na predmetnoj lokaciji. Ovim poglavljem opisan je postupak modeliranja konstrukcije i opterećenja vjetrom.

Ovo je prvi rad na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu u kojem se koristi inženjerski program Ansys. Stoga će se u potpoglavlju 2.2 pokazati dva verifikacijska primjera.

Svrha prvog primjera je dokazati funkcioniranje mogućnosti lokalnih modeliranja krutosti spojeva pri izradi globalnog modela konstrukcije. Svrha drugog verifikacijskog primjera je dokazati mogućnost uključivanja geometrijske nelinearnosti pri analizi odgovora konstrukcija. Važnost funkcioniranja drugog primjera je u tome što vjetar kao dinamičko opterećenje, u realnom stanju, u svakom sljedećem vremenskom koraku djeluje na prethodno deformiranu konstrukciju. Bilo kakva težnja davanju što realnijih odgovora konstrukcije ne bi bila opravdana bez mogućnosti uključivanja geometrijske nelinearnosti.

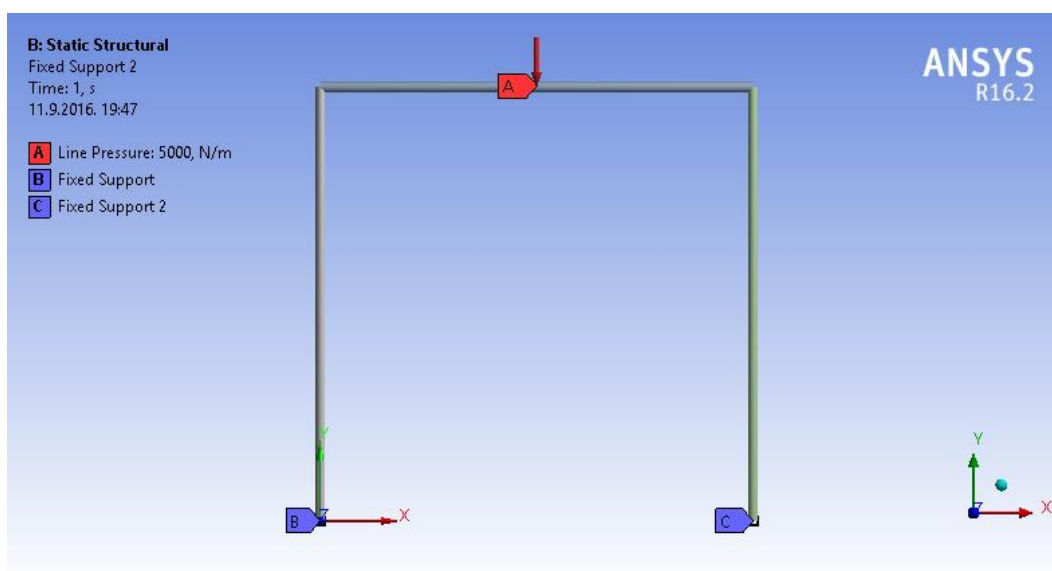
Sa saznanjima iz verifikacijskih primjera u nastavku je opisan numerički model konstrukcije predmetnog antenskog stupa.

## 2.2 Verifikacijski primjeri

### 2.2.1 Primjer 1

Promatran je ravninski okvir. Visina stupova i duljina grede iznose 5m. Greda je opterećena proizvoljnim raspodijeljenim opterećenjem 5kN/m u smjeru gravitacije. Poprečni presjeci stupova i grede su šuplji čelični cijevni profili dimenzija  $D/t=114,3/4,5\text{mm}$ . Kvaliteta materijala S355, modul elastičnosti  $E=210\,000\text{MPa}$ , Poissonov koeficijent  $\nu=0.3$ . Stupovi okvira su upeti u temelj.

U ravnini okvira, razmatra se utjecaj varijacije rotacijske krutosti spoja stup-greda na ukupni odgovor ravninskog okvira za isto djelovanje. Translacijski pomaci su spriječeni za sve slučajeve razmatrane u nastavku. Provedena je linearna statička analiza.

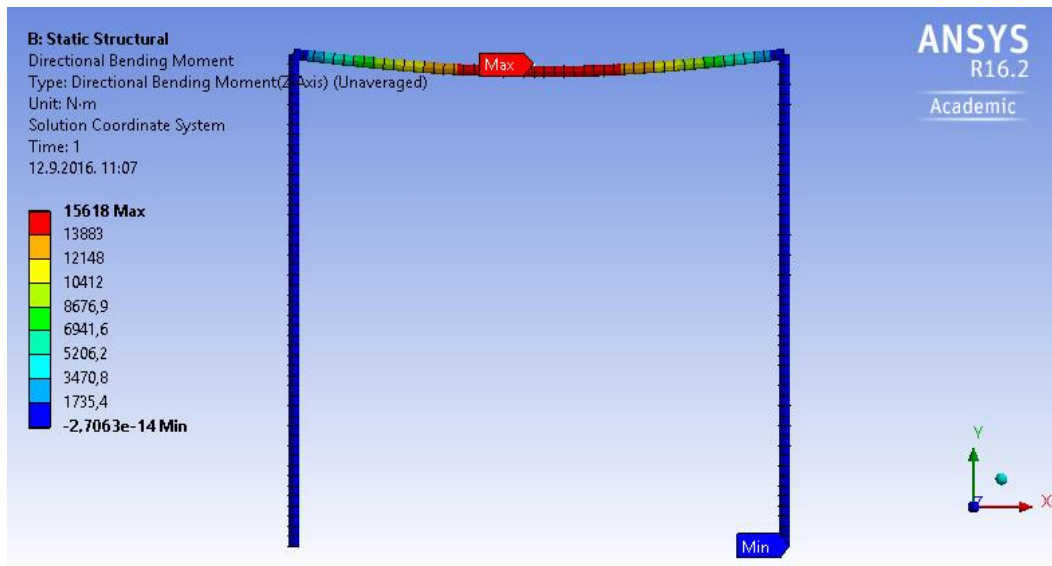


2.1 Model ravninskog okvira

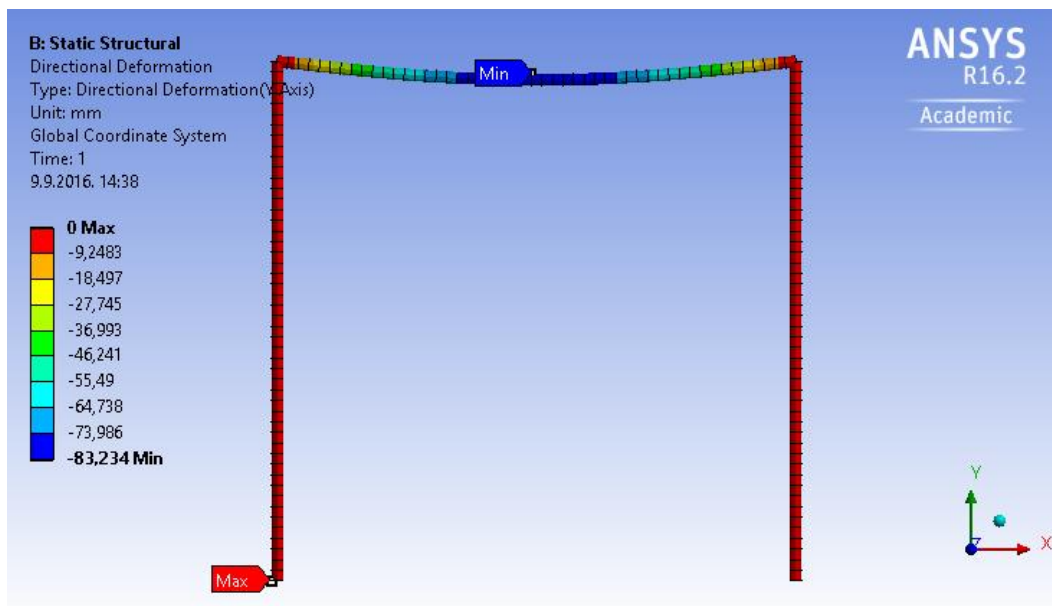
Rezultati dobiveni numeričkim štapnim modelom inženjerskim softwerom Ansys R16.2 Academic usporediti će se s rezultatima numeričkog štapnog modela okvira inženjerskim softwerom Scia Engineer-student version 2013.1 te uz pomoć poznatih inženjerskih izraza.

### 2.2.1.1 Model sa zglobnom vezom stup-greda

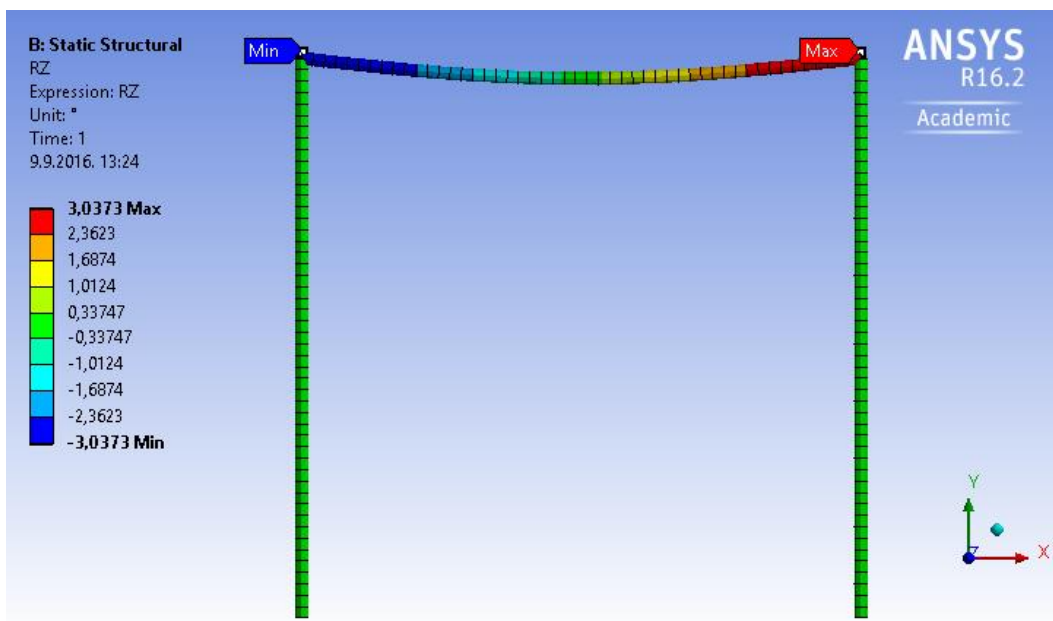
Razmatra se odgovor za slučaj oslobođene relativne rotacije u ravni okvira na spojevima stup-greda. Rezultati dobiveni programom Ansys prikazani su slikama (2.2, 2.3, 2.4).



2.2 Momenti savijanja u ravni okvira [Nm]

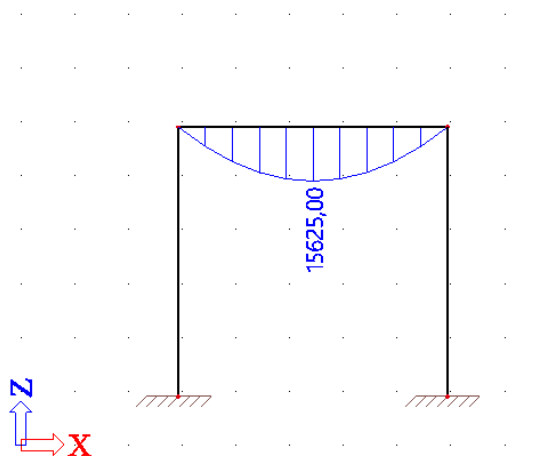


2.3 Pomaci u smjeru gravitacije [mm]

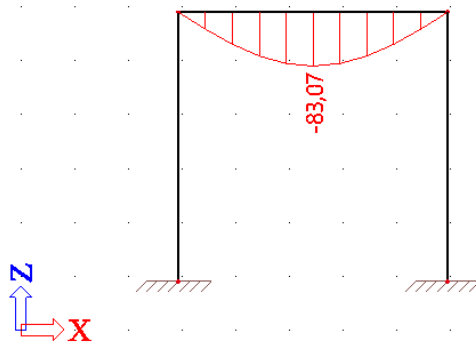


2.4 Rotacija konstrukcije ravninskog okvira [°]

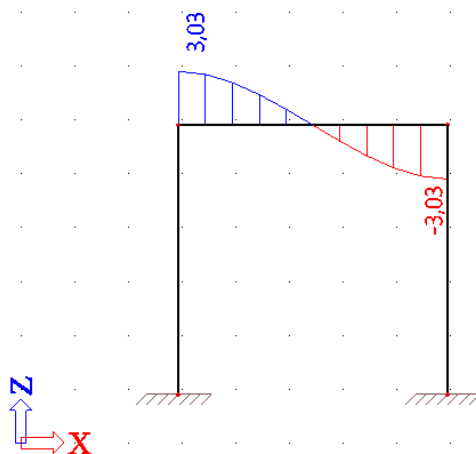
Rezultati dobiveni programom Scia Engineer prikazani su slikama (2.5, 2.6, 2.7).



2.5 Momenti savijanja u ravnini okvira [Nm]



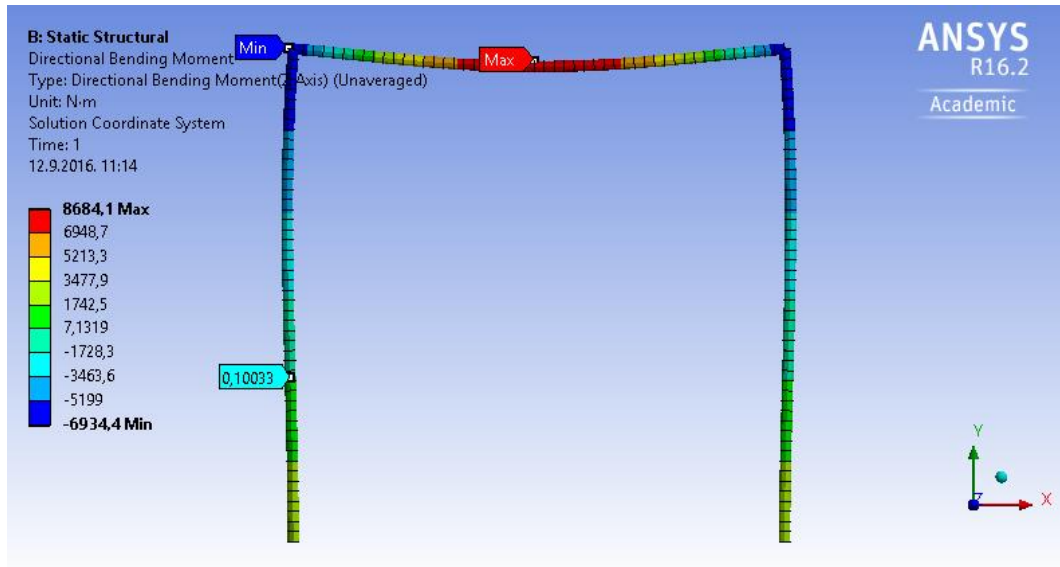
2.6 Pomaci u smjeru gravitacije [mm]



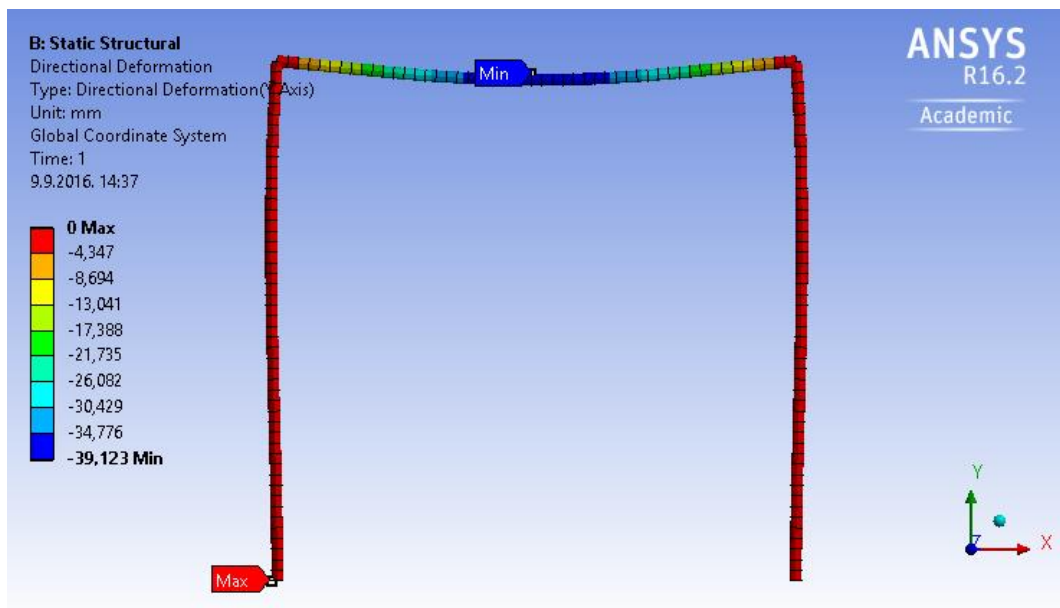
2.7 Rotacija konstrukcije ravninskog okvira [°]

### 2.2.1.2 Model s upetom vezom stup-greda

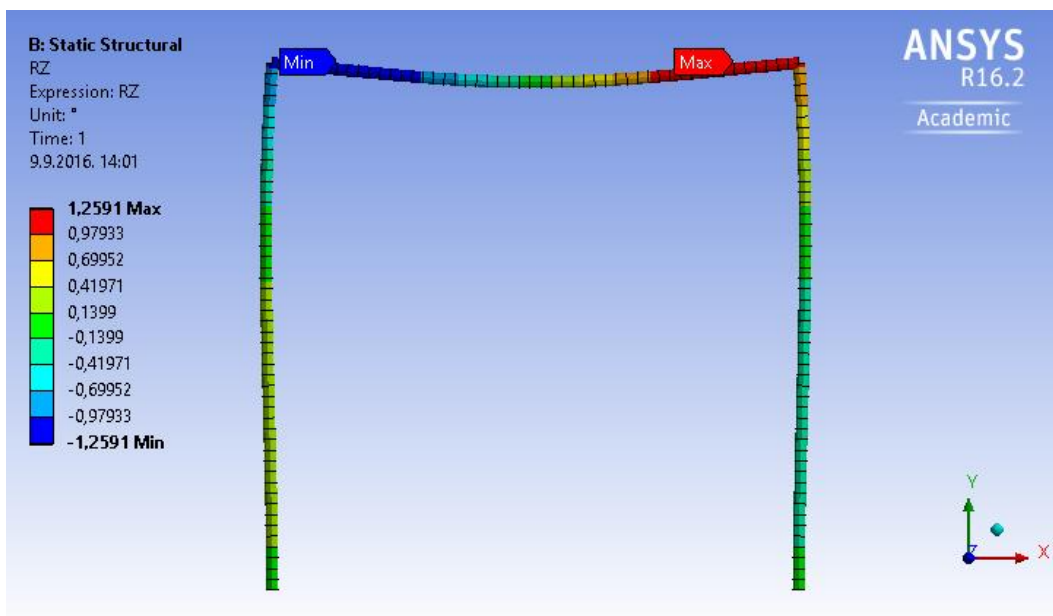
Razmatra se odgovor za slučaj spriječene relativne rotacije u ravnini okvira na spojevima stup-greda. Rezultati dobiveni programom Ansys prikazani su slikama (2.8, 2.9, 2.10).



2.8 Momenti savijanja u ravnini okvira [Nm]

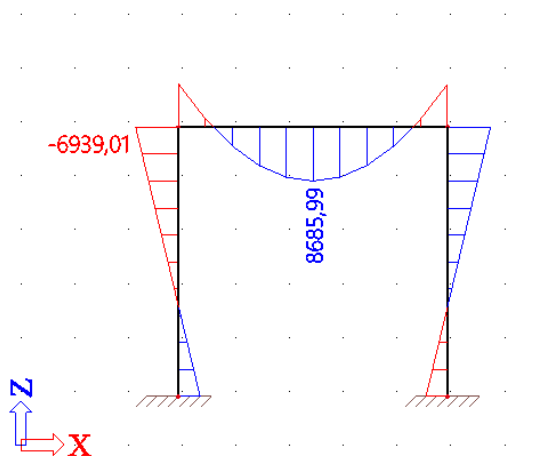


2.9 Pomaci u smjeru gravitacije [mm]

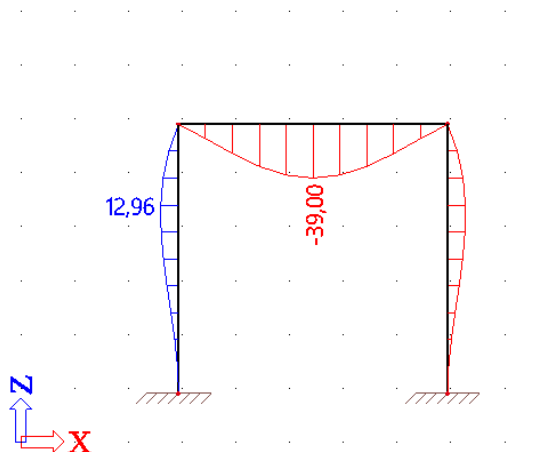


2.10 Rotacija konstrukcije ravninskog okvira [°]

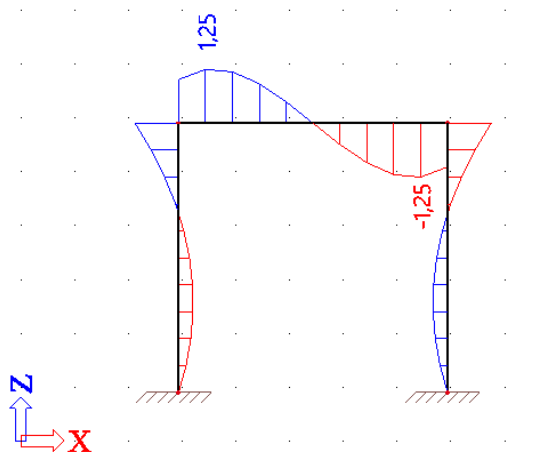
Rezultati dobiveni programom Scia Engineer prikazani su slikama (2.11, 2.12, 2.13).



2.11 Momenti savijanja u ravnini okvira [Nm]



2.12 Pomaci u smjeru gravitacije [mm]



2.13 Rotacija konstrukcije ravninskog okvira [°]



### 2.2.1.3 Model s definiranom vrijednošću rotacijske krutosti spoja stup-greda

Razmatra se odgovor ravninskog okvira za slučaj proizvoljno odabranih vrijednosti rotacijskih krutosti kako je prikazano tablicama (2.1, 2.2). Krutosti na spojevima su različite isključivo iz edukacijskih razloga. Rezultati proračuna prikazani su u nastavku.

#### 2.1 Vrijednost rotacijske krutosti spoja lijevi stup-greda

##### General - Stup L To Greda

###### Stiffness Coefficients

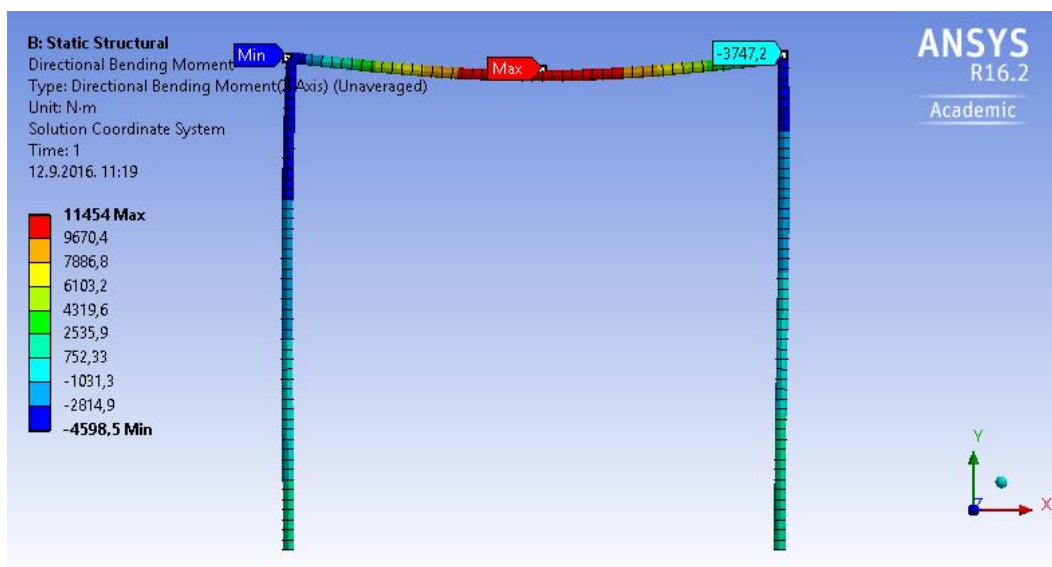
Stiffness	Per Unit X (m)	Per Unit Y (m)	Per Unit Z (m)	Per Unit $\theta_x$ (°)	Per Unit $\theta_y$ (°)	Per Unit $\theta_z$ (°)
$\Delta$ Force X (N)						
$\Delta$ Force Y (N)						
$\Delta$ Force Z (N)						
$\Delta$ Moment X (N-m)						
$\Delta$ Moment Y (N-m)					5000,	
$\Delta$ Moment Z (N-m)						

#### 2.2 Vrijednost rotacijske krutosti spoja desni stup-greda

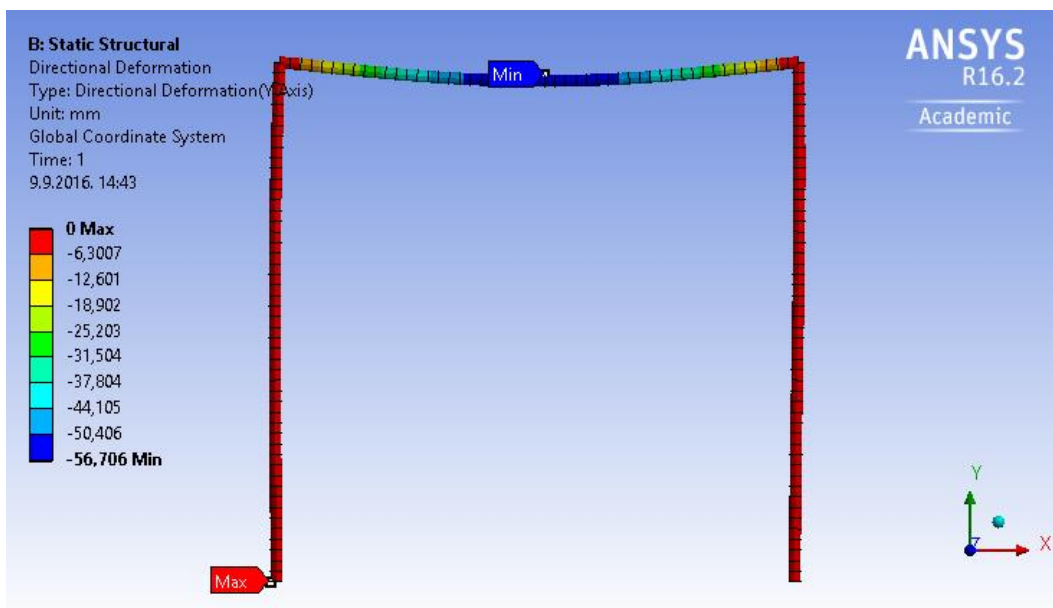
##### General - Stup D To Greda

###### Stiffness Coefficients

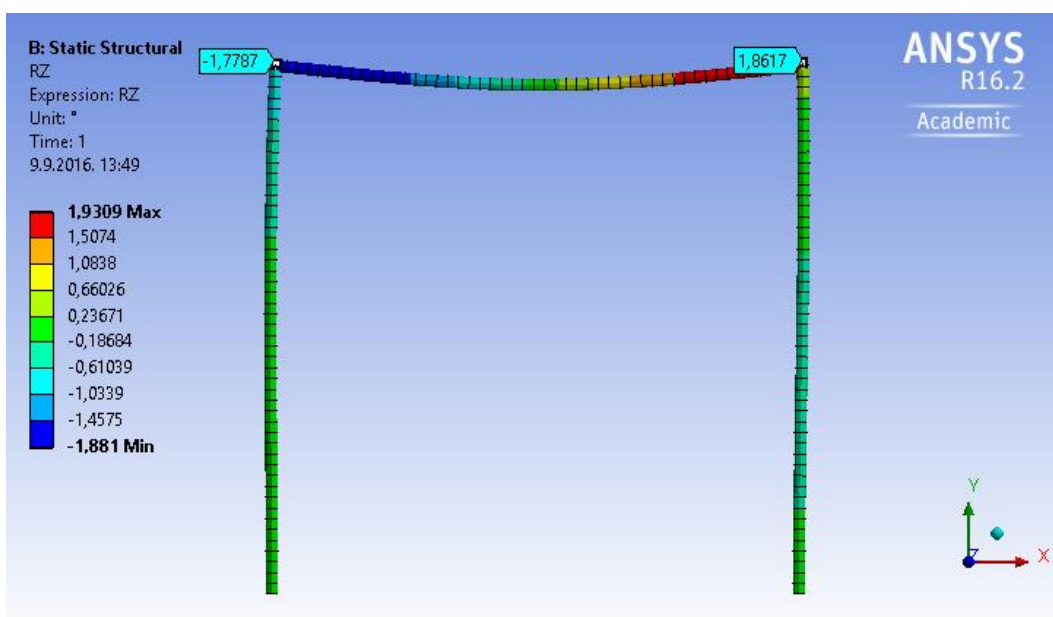
Stiffness	Per Unit X (m)	Per Unit Y (m)	Per Unit Z (m)	Per Unit $\theta_x$ (°)	Per Unit $\theta_y$ (°)	Per Unit $\theta_z$ (°)
$\Delta$ Force X (N)						
$\Delta$ Force Y (N)						
$\Delta$ Force Z (N)						
$\Delta$ Moment X (N-m)						
$\Delta$ Moment Y (N-m)					2500,	
$\Delta$ Moment Z (N-m)						



2.14 Momenti savijanja u ravnini okvira [Nm]



2.15 Pomaci u smjeru gravitacije [mm]



2.16 Rotacija konstrukcije ravninskog okvira [°]

#### 2.2.1.4 Zaključak

Razlike u rezultatima dobivene inženjerskim softverima Ansys i Scia Engineer su zanemarive.

Model sa zglobnom vezom i model s upetom vezom stup-greda predstavljaju dva ekstrema u odgovoru konstrukcije okvira. Proizvoljnim odabirom vrijednosti rotacijske krutosti između vrijednosti nula (model sa zglobnom vezom) i beskonačne vrijednosti (model s upetom vezom) u potpoglavlju 2.2.1.3. pokazana je mogućnost kontroliranja odgovora konstrukcije u smislu ostvarenih reznih sila i deformacija na elementima okvira.

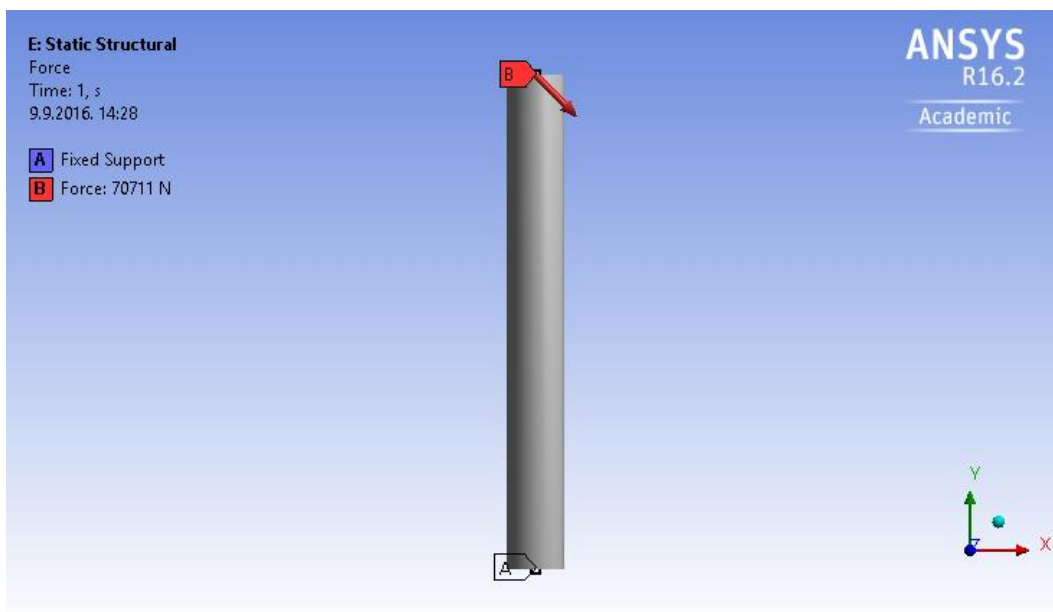
Ovim primjerom na jednostavnom modelu je dokazana mogućnost kontroliranja rotacijske krutosti spojeva te se opravdava upotreba istoga u nastavku.

#### 2.2.2 Primjer 2

Promatran je odgovor konzolnog stupa u ravnini. Visina stupa iznosi 1[m]. Slobodni vrh stupa opterećen je proizvoljnom tlačnom silom te horizontalnom silom s iznosima 50 kN. Poprečni presjek je šuplji čelični cijevni profil dimenzija  $D/t=114,3/4,5\text{mm}$ . Kvaliteta materijala S355, modul elastičnosti  $E=210\,000\text{MPa}$ , Poissonov koeficijent  $\nu=0.3$ . Stup je upet u temelj.

Razmatra se mogućnost uključivanja geometrijske nelinearnosti u proračun konstrukcije.

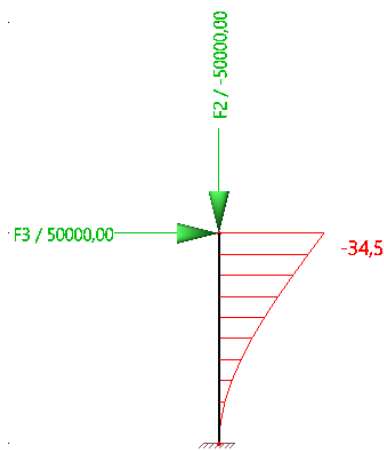
Rezultati dobiveni numeričkim štapnim modelom inženjerskim softverom Ansys R16.2 Academic usporediti će se s rezultatima numeričkog štapnog modela okvira inženjerskim softverom Scia Engineer-student version 2013.1 te uz pomoć poznatih inženjerskih izraza.



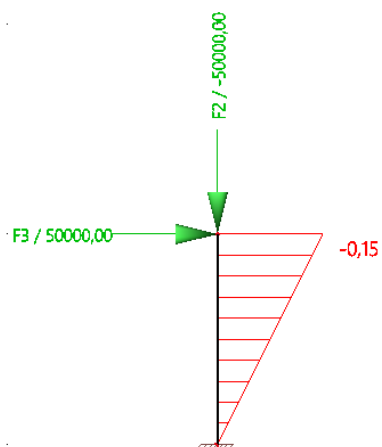
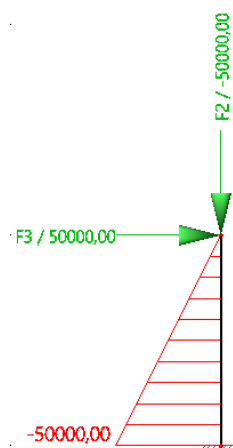
2.17 Model konzolnog stupa

2.2.2.1 Globalna elastična analiza 1.reda

Programom Scia Engineer provedena je globalna elastična analiza 1.reda odgovora konzolnog stupa na zadano opterećenje. U nastavku su prikazani rezultati.

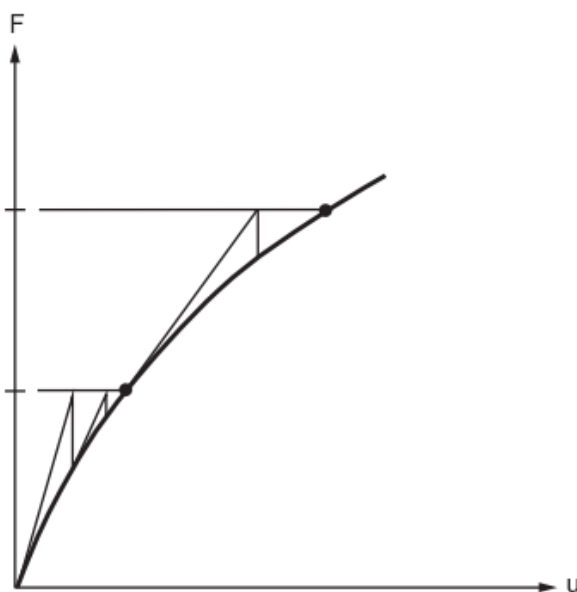


2.18 Horizontalni pomak [mm]

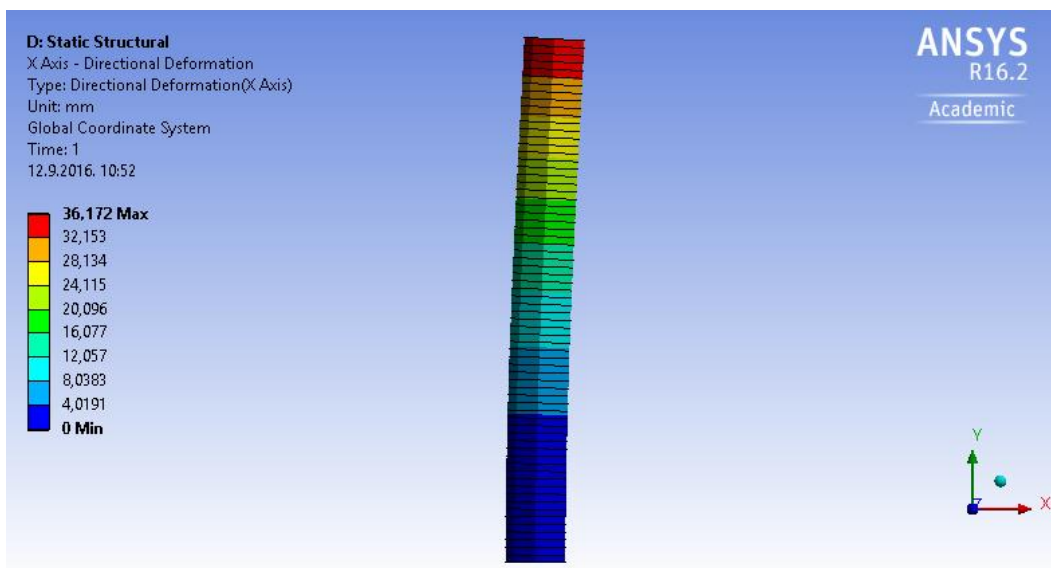
**2.19 Uzdužni pomak [mm]****2.20 Momenti savijanja u ravnini stupa [Nm]**

### 2.2.2.2 Nelinearna analiza velikih pomaka

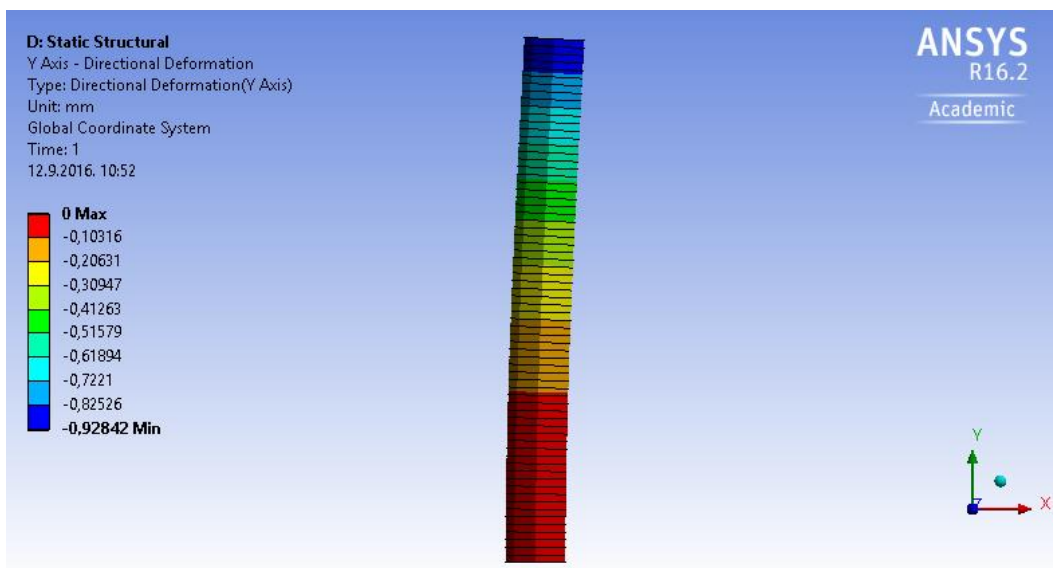
Programom Ansys provedena je nelinearna analiza velikih pomaka, prema [1] large deflection analysis, kojom je uključena geometrijska nelinearnost pri proračunu odgovora konzolnog stupa na zadano opterećenje. Program Ansys nelinearne probleme rješava Newton-Raphson metodom. Dakle, zadano opterećenje nanosi se inkrementalno na konstrukciju. Do konačnog nelinearnog odgovora konstrukcije dolazi se iterativnom serijom linearnih aproksimacija (slika 2.21). U nastavku su prikazani rezultati.



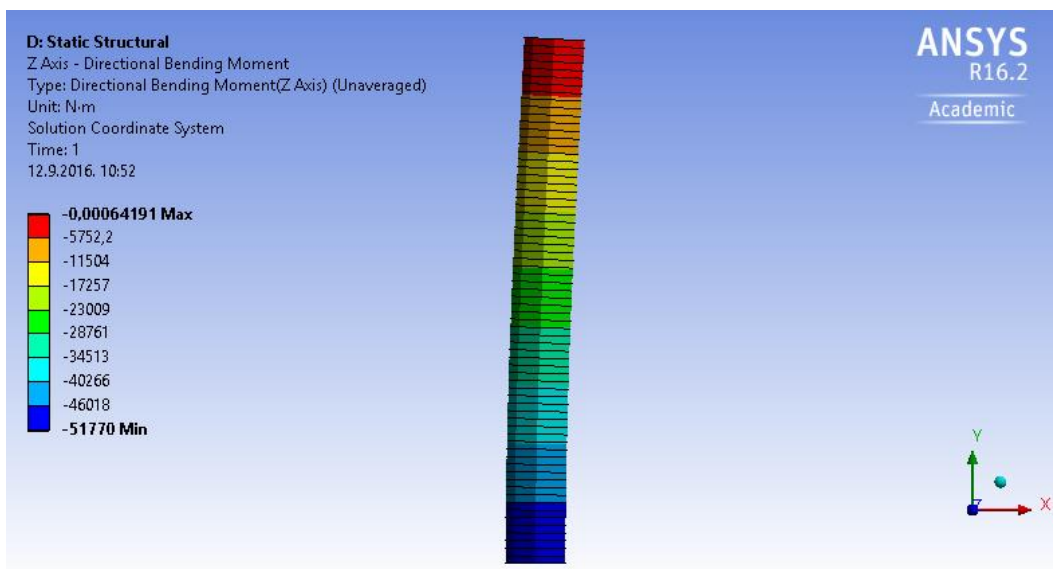
2.21 Newton-Raphson pristup (preuzeto iz [1])



2.22 Horizontalni pomak [mm]



2.23 Uzdužni pomak [mm]



2.24 Momenti savijanja u ravni stupa [Nm]

### 2.2.2.3 Zaključak

Usporedbom rezultata iz potpoglavlja 2.2.2.1 i 2.2.2.2 vidljive su razlike u deformacijama vrha stupa. To se objašnjava razlikom odnosa sila-pomak, gdje je u nelinearnoj analizi velikih pomaka, provedenoj programom Ansys, navedeni odnos nelinearan, dok je isti odnos u globalnoj elastičnoj analizi, provedenoj programom Scia Engineer, linearan. S obzirom da se konstrukcije u stvarnosti ponašaju nelinearno, uključivanjem geometrijske nelinearnosti dobivamo realnije pomake i rezne sile pri analizi odgovora konstrukcije. Inženjerski gledano, većim pomacima i reznim silama smo na strani sigurnosti.

Funkcioniranje geometrijske nelinearnosti pri proračunu konstrukcija pokazati će se ostvarenim rezultatima učinaka 2.reda.

Za momente prema analizi 2.reda vrijedi:

$$M = H \cdot (h - \Delta h) + N \cdot \Delta u \quad (2.1)$$

gdje je H horizontalna sila u vrhu stupa, h visina stupa,  $\Delta h$  uzdužni pomak vrha stupa (slika 2.23), N tlačna sila u vrhu stupa te  $\Delta u$  horizontalni pomak vrha stupa (slika 2.22).

$$M = 50[\text{kN}] \cdot (1000 - 0.93)[\text{mm}] + 50[\text{kN}] \cdot 36.1[\text{mm}] \quad (2.2)$$

Usporedbom izračunatog momenta s numeričkim rezultatom (slika 2.24) slijedi:

$$M = 51758,5[\text{kNmm}] = 51758,5[\text{Nm}] \approx 51770[\text{Nm}] \quad (2.3)$$

Ovim primjerom na jednostavnom modelu je dokazana mogućnost uključivanja geometrijske nelinearnosti u proračun uz nelinearan odnos sile i opterećenja te se opravdava upotreba istoga u nastavku.



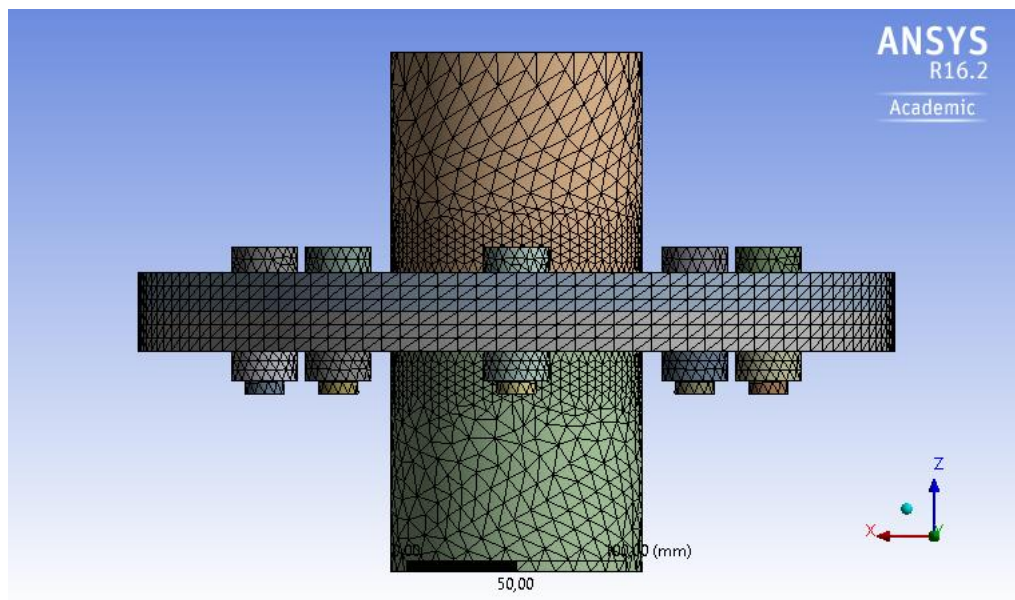
## 2.3 Numeričko modeliranje

### 2.3.1 Modeliranje montažnih spojeva

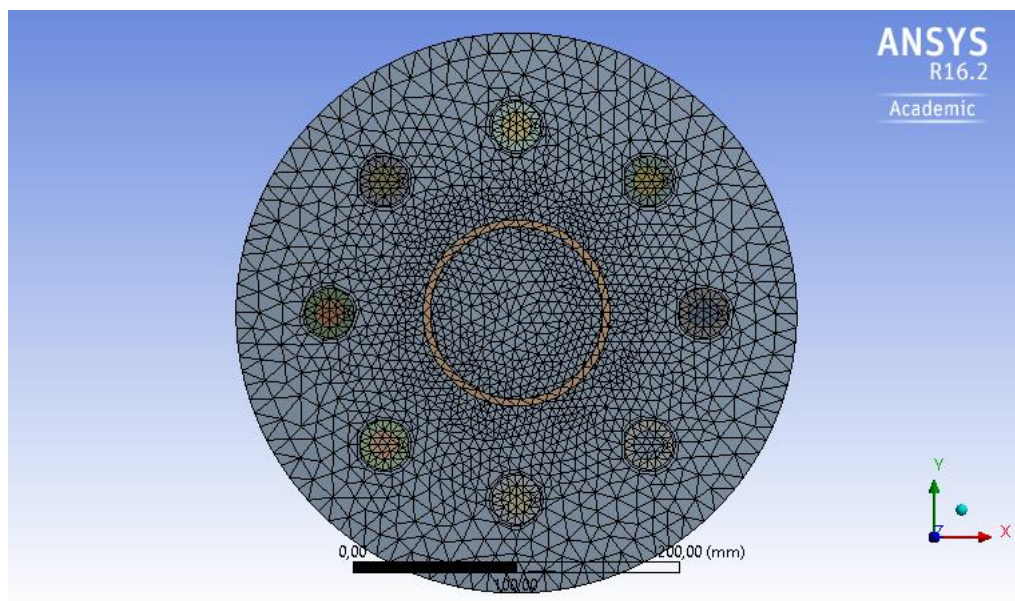
Vijčani spojevi čeličnih šupljih okruglih cijevi (engl. bolted circular flange connections), tijekom djelovanja vjetra na predmetni antenski stup, dominantno su izloženi savijanju okomito na svoju uzdužnu os. Statičkom analizom (engl. static structural analysis), koristeći inženjerski program Ansys R16.2 Academic, razmatrani su odgovori spojeva uslijed djelovanja savojnog momenta te je utvrđena njihova rotacijska krutost u ravninama okomito na uzdužnu os. S dobivenim vrijednostima rotacijske krutosti modelirani su čvorovi modela konstrukcije antenskog stupa, opisanog u idućem potpoglavlju 2.3.2., radi ostvarivanja što realnijeg odgovora na djelovanje vjetra. U nastavku je opisan numerički model montažnih spojeva te su prikazani rezultati analize. Radovi [2], [3], [4], [5], [6], [7] opisuju način modeliranja spoja istog tipa ili modeliranja vijaka te su pomogli pri izradi ovog modela.

#### 2.3.1.1 Numerički model

Šuplje okrugle cijevi, priрубnice (engl. flange), glava vijka, tijelo vijka i matica modelirani su 3-D 10-čvornim konačnim elementima SOLID187 oblika tetraedra [8]. Svaki čvor ima 3 translacijska stupnja slobode.



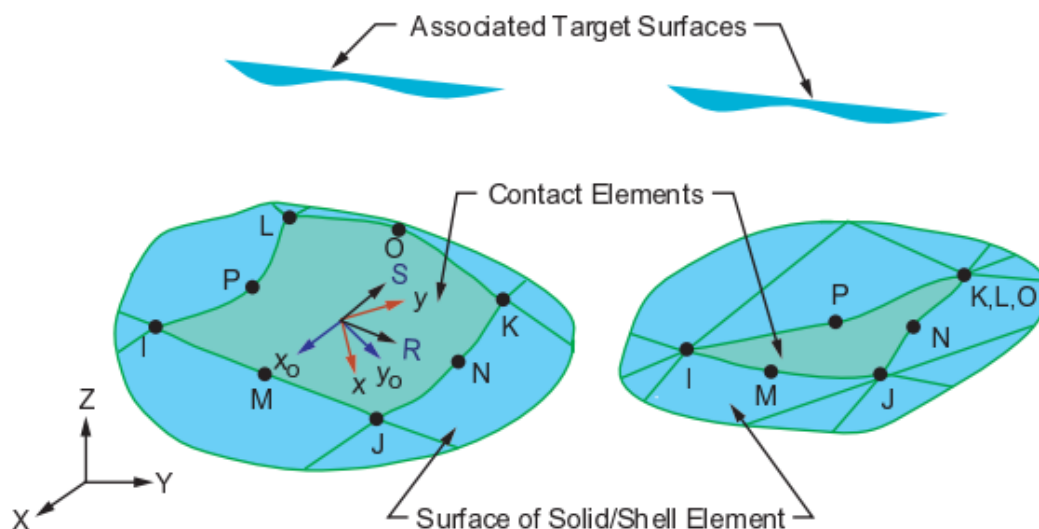
Slika 2.25 Prikaz numeričkog modela - pogled



Slika 2.26 Prikaz numeričkog modela - floert

Materijali čeličnih okruglih cijevi i prirubnica modelirani su kao linearno elastičani - idealno plastičani s granicom razvlačenja  $f_y = 355\text{N/mm}^2$ . Materijali glave vijka i matice simulirani su linearnom  $\sigma$ - $\epsilon$  krivuljom s definiranom granicom razvlačenja  $f_y = 900\text{N/mm}^2$  i granicom čvrstoće  $f_u = 1000\text{N/mm}^2$ . Nosivost tijela vijka u tlaku je isključena, dok mu je vlačna nosivost jednaka glavi vijka i matici. Modul elastičnosti za sve elemente spoja iznosi  $210000\text{MPa}$ . Sve ostale karakteristike materijala usvojene su prema početnim postavkama Ansys-a.

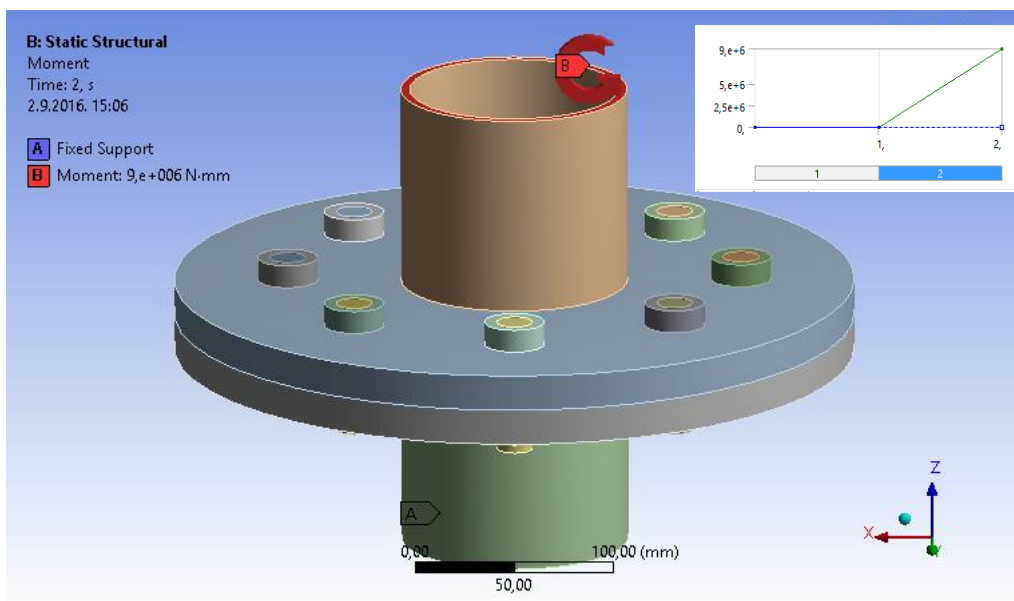
Svi elementi spoja koji su međusobno u kontaktu modelirani su surface-to-surface kontaktnim elementima CONTA174 i "target" surface segmentnim elementima TARGE170. Kontaktni elementi prekrivaju površinu tijela (slika 2.27) koja prenosi opterećenje na određenom kontaktu, opisuju uvjete po kojima se to tijelo može deformirati te su potencijalno u kontaktu s površinom tijela koja prima opterećenje, definiranom s "target surface" [8].



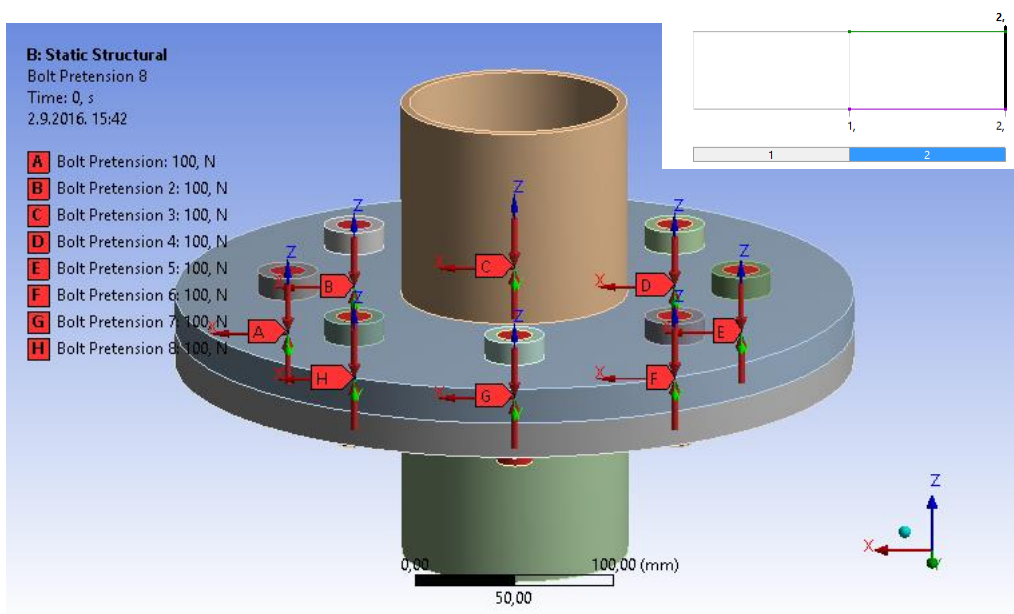
2.27 Geometrija elementa CONTACT174 (preuzeto iz [8])

Na kontaktu zavarenog spoja šuplje okrugle cijevi i prirubnice te na kontaktima glava vijka-tijelo vijka i tijelo vijka-matica simulirano je linearno ponašanje bez mogućnosti penetracije, odvajanja ili klizanja između kontaktnih površina (engl. bonded contact type of behavior). Na kontaktima glava vijka-prirubnica, prirubnica-prirubnica, prirubnica-matica simulirano je nelinearno ponašanje gdje je na kontaktnim površinama dopušteno klizanje s otporom proporcionalnim koeficijentu trenja, a potencijalno odvajanje kontaktnih površina je potpuno slobodno (engl. frictional contact type of behavior) [9]. Vrijednost koeficijenta trenja za sve gore navedene nelinearne kontakte jednaka je 0.1 prema rezultatima radova [10], [11].

Model je opterećen raspodijeljenim momentom po površini cijevi, okomito na uzdužnu os, na jednom kraju te pridržan fiksnim ležajem po površini cijevi na drugom kraju spoja. Opterećenje momentom nanosi se inkrementalno, a konačna vršna vrijednost definirana je uvjetom čvrstoće [12] da su ekvivalentna naprezanja manja od granice razvlačenja čelika kvalitete S355. U prvom koraku, prije početka djelovanja momenta, simulirano je montažno zatezanje vijaka pomoću prednapregnutih konačnih elementa PRETS179 [8]. Jednoosni elementi se nalaze u sredini tijela vijka te u njemu izazivaju početnu vlačnu silu u iznosu 100N.



Slika 2.28 Prikaz opterećenja i pridržanja modela



Slika 2.29 Prikaz početnog prednaprezanja vijaka

Provedena je nelinearna statička analiza s uključenom geometrijskom nelinearnosti (engl. large deflection analysis).

## 2.3.1.2 Rezultati numeričkog modela montažnih spojeva

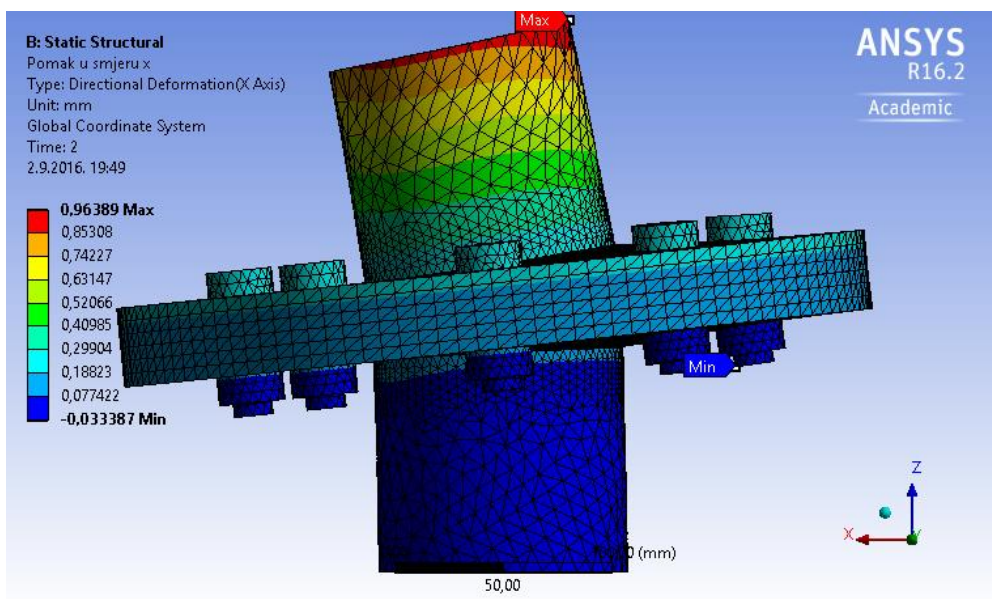
U nastavku su prikazani rezultati modela montažnih spojeva tipa 1 i 2 kojima se razlikuju unutarnji i vanjski promjeri cijevi, promjeri prirubnice te udaljenosti vijaka od uzdužne osi spoja.

### 1. Grafički i tablični rezultati modela montažnog spoja tipa 1

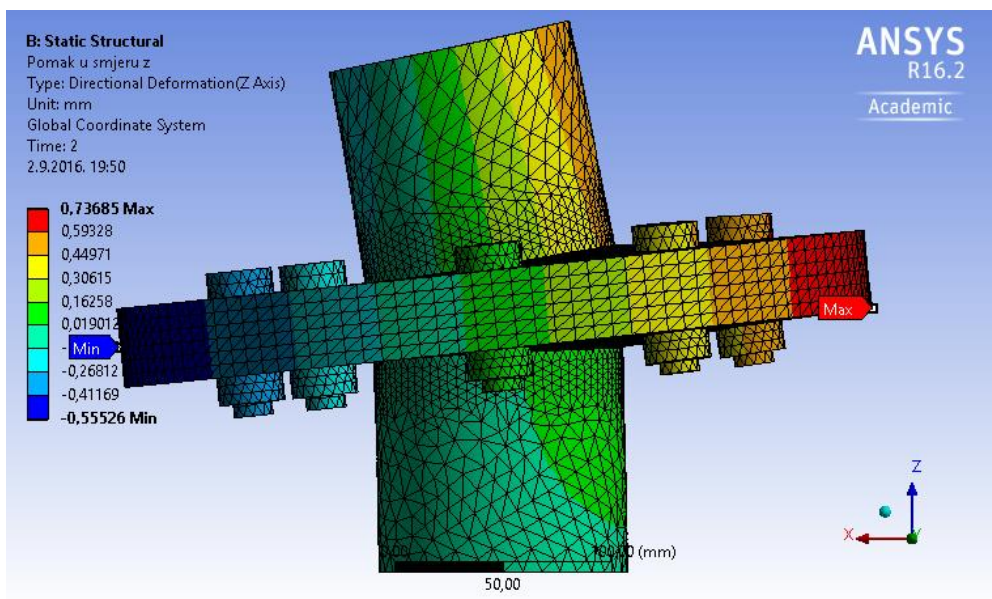
#### 2.3 Ulazni geometrijski parametri

	<b>Parametri</b>	<b>Jedinica [mm]</b>
<b>šuplja cijev</b>	promjer vanjski ( $d_1$ )	114,3
	promjer unutarnji ( $d_2$ )	105,3
	duljina cijevi uzeta u obzir pri proračunu	100
<b>prirubnica</b>	promjer ( $=3d_1$ )	342,9
	debljina	18
<b>glava vijka</b>	promjer ( $s$ )	30
	debljina ( $k$ )	11,5
<b>tijelo vijka</b>	promjer	18
	udaljenost vijka od osi spoja ( $=d_1$ )	114,3
<b>matica</b>	promjer	30
	debljina ( $m$ )	13

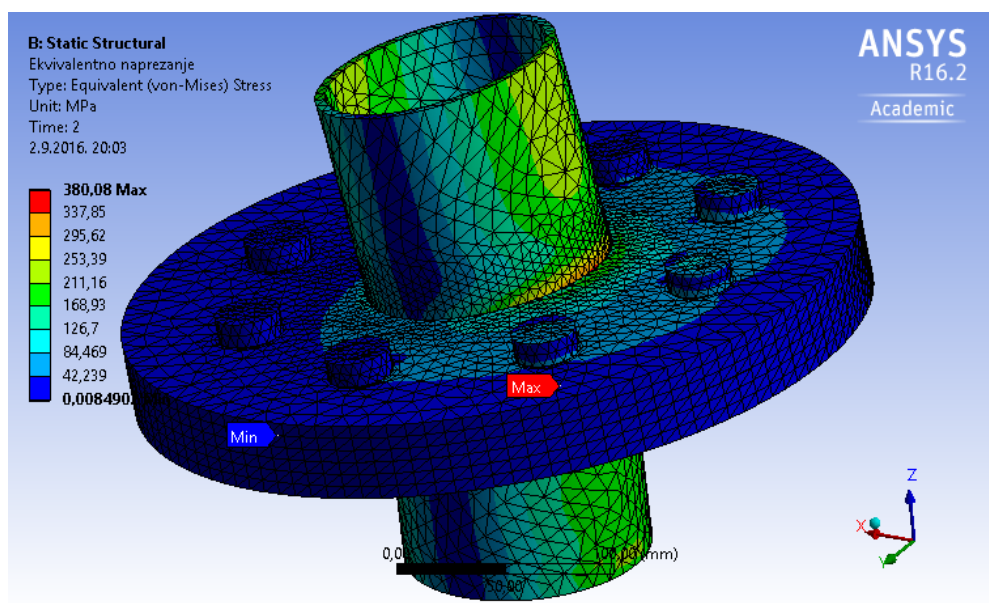




2.30 Pomak spoja u smjeru osi x [mm]

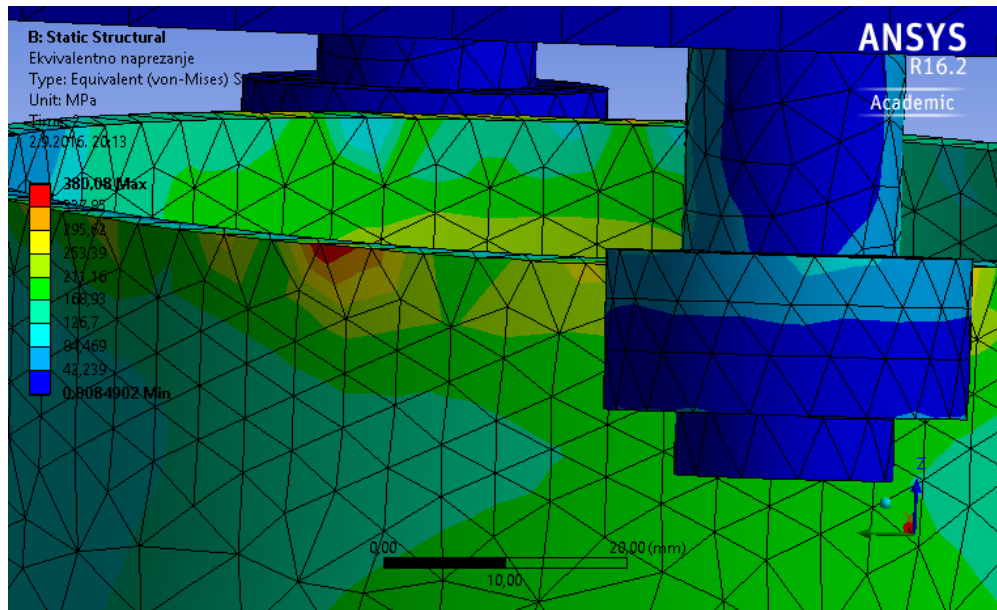


2.31 Pomak spoja u smjeru osi z [mm]



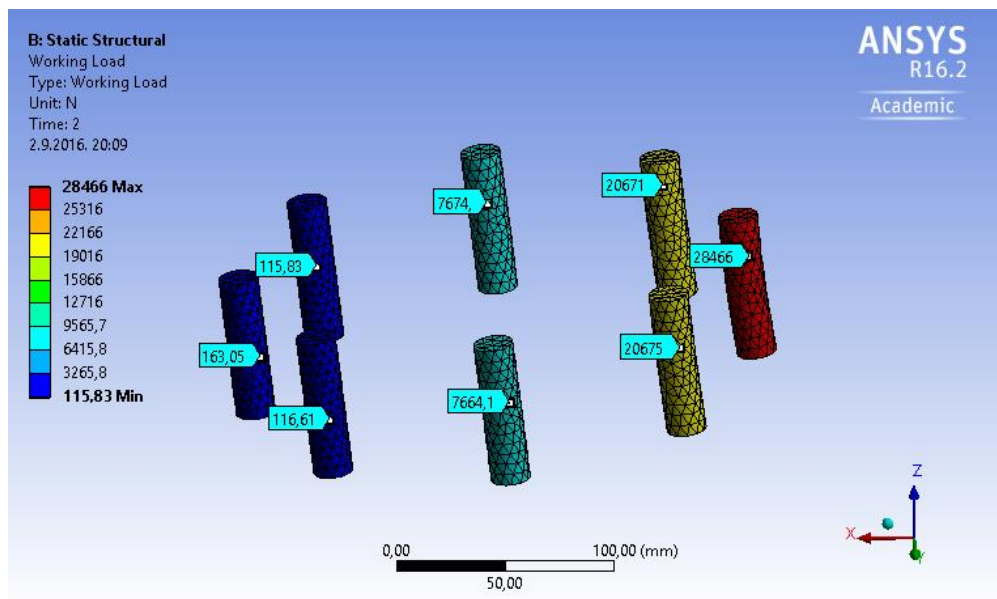
2.32 Ekvivalentno naprezanje  $\sigma_{ek}$  [MPa]

Na slici 2.32 vidljivo je da su ekvivalentna naprezanja veća od granice razvlačenja  $f_y=355\text{MPa}$ . Na slici 2.33 uočava se da se javljaju koncentracije naprezanja na kontaktu cijevi i priрубnice. Ograničenje sile odnosno naprezanja na navedenom kontaktu moglo bi se definirati dopuštenom vrijednosti normalne krutosti ili penetracije. Kako je razmatrani kontakt modeliran kao bonded prema Ansys-ovim postavkama vrijednost krutosti, odnosno omjeru sile  $F$  i penetracije  $x$ , jednaka je 10 [9]. U nemogućnosti eksperimentalnih istraživanja autor će zanemariti ovaj problem isključivo iz razloga što je primarni cilj odrediti rotacijsku krutost montažnih spojeva konstrukcije antenskog stupa radi što realnijeg modeliranja na djelovanje vjetra, koji izaziva značajno manje momente u istim spojevima, a što je prikazano u nastavku. Za momente koji se ostvaruju pri djelovanju vjetra prema tablici 2.4 ekvivalentna naprezanja su manja od granice razvlačenja što opravdava uzimanje vrijednosti rotacijske krutosti u obzir.



### 2.33 Prikaz koncentracije naprezanja

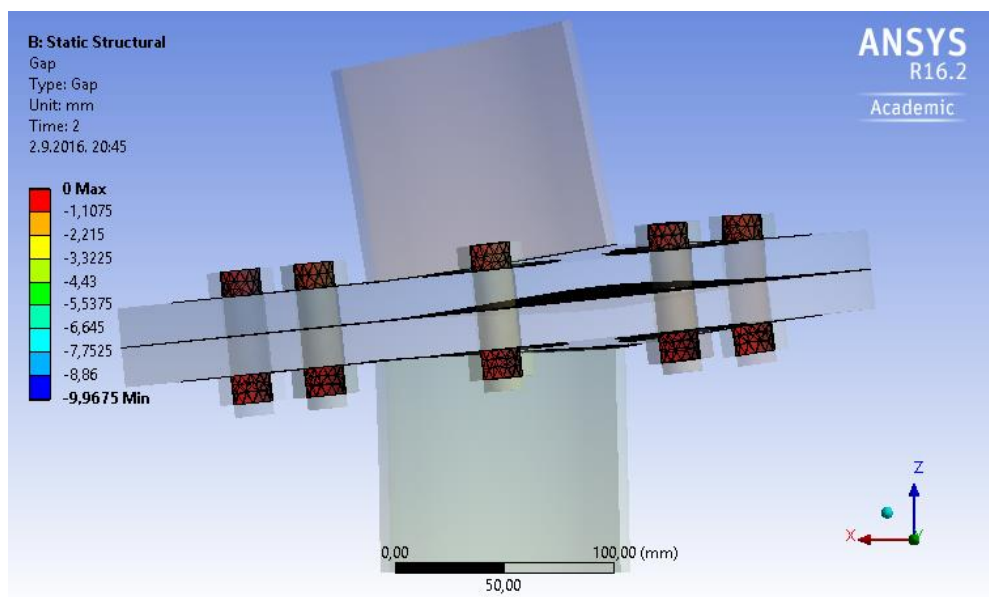
Slika 2.34 prikazuje veličine vlačnih sila u tijelima vijaka. Vidljivo je da u tlačnoj zoni vijci (označeni plavom bojom) ne preuzimaju tlačna naprezanja uslijed savijanja prirubnica. Oni su opterećeni isključivo početnom montažnom silom pri zatezanju vijaka.



### 2.34 Vrijednosti vlačnih sila u vijcima [N]



Slika 2.35 pokazuje deformaciju montažnog spoja na kontaktu dvaju prirubnica. Vidljivo je da dolazi do razdvajanja kontaktnih površina, što je bilo za očekivati.



2.35 Prikaz deformiranja spoja na kontaktima [mm]

Tablicom 2.4 dani su određeni razmatrani rezultati u funkciji prirasta vrijednosti opterećenja momentom.

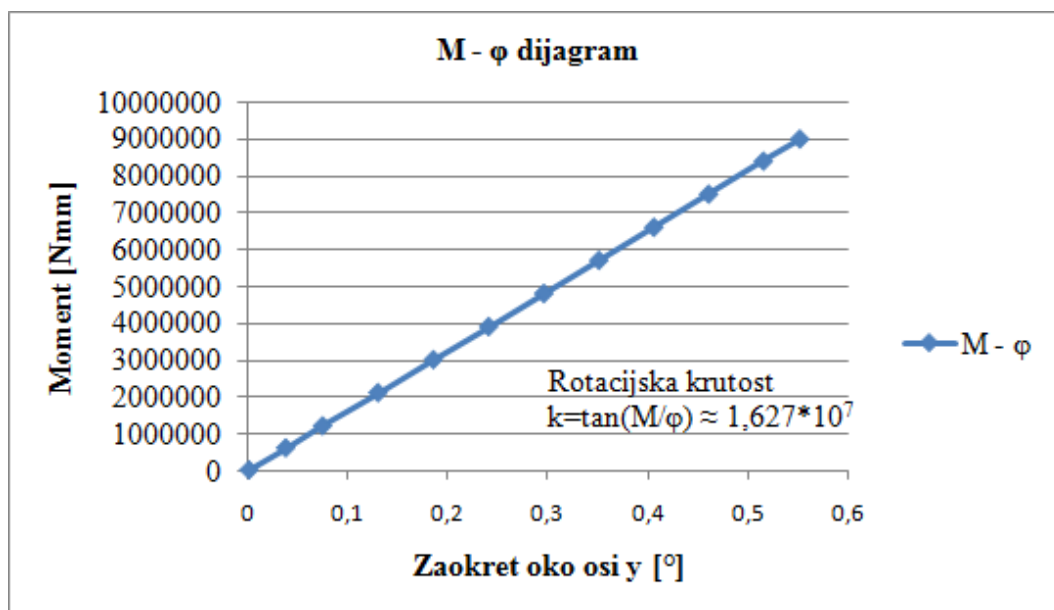
2.4 Rezultati numeričkog modela

Moment (Y) [N·mm]	Bolt Pretension (Preload) [N]	Moment Reaction (Total) [N·mm]	Ekvivalentno naprezanje ( $\sigma_{ek}$ ) [MPa]	Usmjereni pomak (x) [mm]	Usmjereni pomak (z) [mm]	Zaokret oko osi y [N]	Max sile u vijcima [N]
0	100	0	0	0	0	0	0
600300		600000	35,481	0,0641	0,049	0,0368	1892,4
1199700		1200000	71,106	0,12871	0,0986	0,0737	3773,3
2099700		2100000	124,56	0,22563	0,17283	0,1293	6594,9
2999700		3000000	177,99	0,32253	0,24701	0,1848	9418,8
3899700		3900000	231,4	0,41925	0,32097	0,2402	12248
4799700		4800000	285,11	0,51586	0,39482	0,2956	15087
5699700		5700000	338,98	0,61224	0,46846	0,3508	17935
6599700		6600000	365,43	0,70839	0,54189	0,4059	20793
7499700		7500000	416,51	0,80433	0,6151	0,4608	23662
8399700		8400000	371,68	0,90011	0,68819	0,5157	26542
9000000	100	9000000	380,08	0,96389	0,73685	0,5523	28466

Na slici 2.36 prikazan je M- $\varphi$  dijagram montažnog spoja tipa 1 koji nije idealno linearan. Vrijednost rotacije oko osi y određena je prema jednadžbi (2.4), a rotacijska krutost određena je kao prosječna vrijednost omjera  $M_i/\varphi_i$ , gdje i predstavlja broj inkremenata opterećenja momentom.

$$\varphi_i = \arctan\left(\frac{u_x}{L}\right) \quad (2.4)$$

gdje je  $u_x$  pomak u smjeru x prema tablici 2.4, a L duljina cijevi prema tablici 2.3.



2.36 M -  $\varphi$  dijagram

## 2. Grafički i tablični rezultati montažnog spoja tipa 2

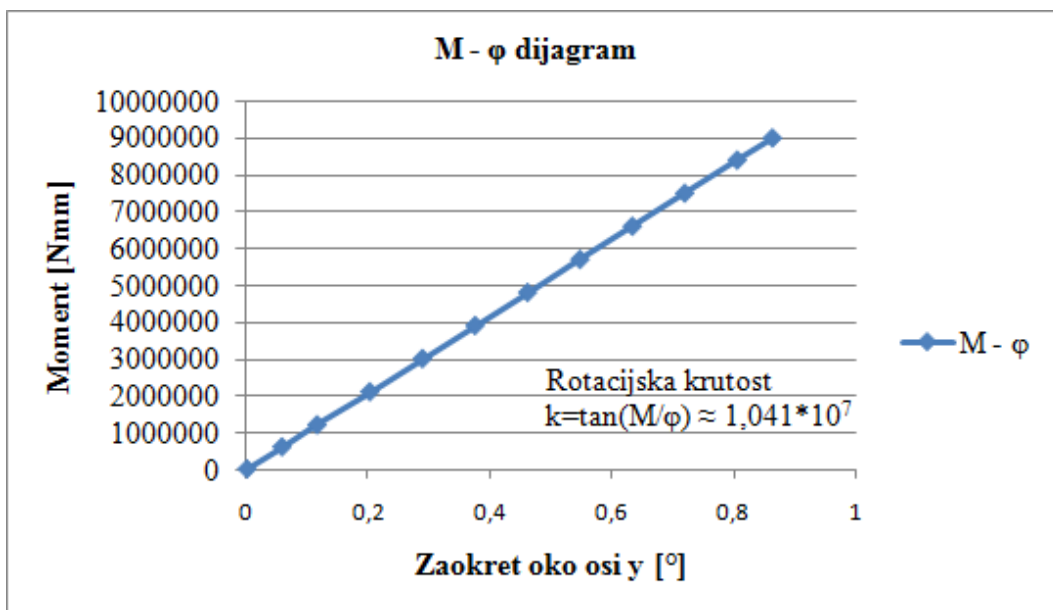
U nastavku će se prikazati tablični rezultati za montažni spoj tipa 2 za koji je oblik deformacije identičan kao i montažnom spoju tipa 1, a isključivo vrijednosti deformacija i reznih sila različite. Postupak dobivanja rezultata je identičan, stoga i u ovom slučaju vrijede iste napomene kao i za montažni spoj tipa 1.

### 2.5 Ulazni geometrijski parametri

	Parametri	Jedinica [mm]
šuplja cijev	promjer vanjski ( $d_1$ )	88,9
	promjer unutarnji ( $d_2$ )	78,9
	duljina cijevi uzeta u obzir pri proračunu	100
prirubnica	promjer ( $=3d_1$ )	266,7
	debljina	18
glava vijka	promjer (s)	30
	debljina (k)	11,5
tijelo vijka	promjer	18
	udaljenost vijka od osi spoja ( $=d_1$ )	88,9
matica	promjer	30
	debljina (m)	13

### 2.6 Rezultati numeričkog modela

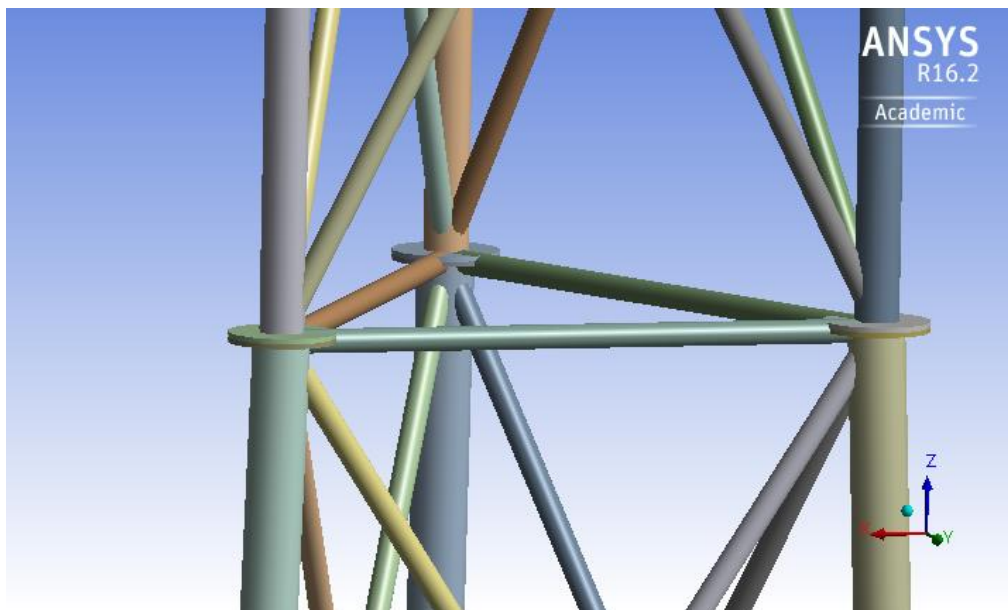
Moment (Y) [N·mm]	Bolt Pretension (Preload) [N]	Moment Reaction (Total) [N·mm]	Ekvivalentno naprezanje ( $\sigma_{ek}$ ) [MPa]	Usmjereni pomak (x) [mm]	Usmjereni pomak (z) [mm]	Zaokret oko osi y [N]	Max sile u vijcima [N]
0	100	0	0	0	0	0	0
600300		600000	42,004	0,10028	0,060048	0,0575	1998,4
1199700		1200000	84,105	0,20111	0,1205	0,1152	3969,7
2099700		2100000	146,87	0,35235	0,21111	0,2019	6931,4
2999700		3000000	209,34	0,50345	0,30156	0,2885	9907,6
3899700		3900000	271,72	0,65439	0,39183	0,3749	12912
4799700		4800000	334,01	0,80512	0,48186	0,4613	15948
5699700		5700000	362,08	0,95562	0,57166	0,5475	19014
6599700		6600000	367,41	1,1059	0,66127	0,6336	22112
7499700		7500000	377,23	1,2562	0,75081	0,7197	25242
8399700		8400000	398,15	1,4068	0,84051	0,806	28405
9000000	100	9000000	383,75	1,508	0,90082	0,864	30529



2.37 M - φ dijagram

### 2.3.2 Numeričko modeliranje konstrukcije antenskog stupa

Predmetni antenski stup tema je mnogih dosadašnjih radova na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu. Stoga je kompletna geometrija konstrukcije predmetnog stupa preuzeta iz rada [13] uz male izmjene. Izmjene se odnose na čvorove na mjestu montažnih spojeva, koji su razmaknuti za po 1 cm sa svake strane težišta spoja, u smjeru globalne osi z. Time je omogućeno umetanje elementa koji će simulirati rotacijske krutosti montažnih spojeva opisanih u prethodnom poglavlju.

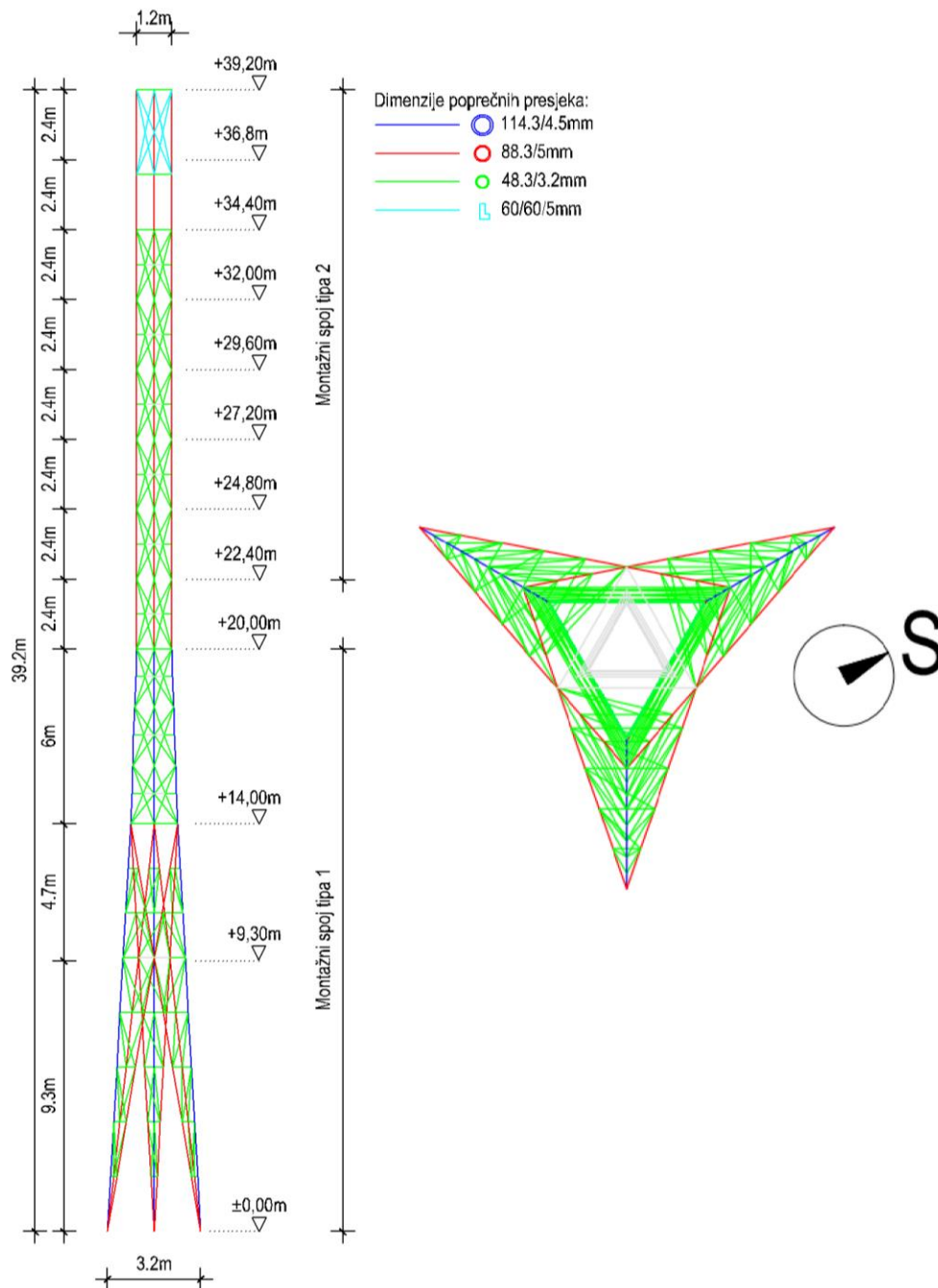


2.38 Simulacija montažnog čvora (renderirani pogled numeričkog modela)

#### 2.3.2.1 Općenito o geometriji konstrukcije antenskog stupa

Prostorna rešetkasta konstrukcija tipskog antenskog stupa, promjenjivog trokutastog tloctnog oblika, izvedena je od čeličnih šupljih okruglih cijevi. Stup ukupne visine 39.2m izveden je u 10 segmenata međusobno spojenih vijčanim vezama. Prva dva segmenta visina 9.3 i 4.7m izveden kao 3 trokutaste prostorne rešetke, čiji ukupni poprečni presjek promjenjiv po visini čine vanjske pojasnice 114.3/4.5mm i dvije unutarnje dimenzija 88.3/5mm. Razmak između vanjskih pojasnica pri tlu iznosi 3.2m, a pri vrhu drugog segmenta 1.6m. U vrhu trećeg segmenta visine 6m razmak između vanjskih pojasnica dimenzija 114.3/4.5mm iznosi 1.2m. Nakon trećeg segmenta, izveden je niz od 8 segmenata visine 2.4m konstantnog razmaka između vanjskih pojasnica dimenzija 88.3/5mm. Ispune prvih 9 segmenata su poprečnog presjeka 48.3/3.2mm, 10-ti segment ne sadrži ispune, dok su zadnjem segmentu vanjske pojasnice u svojim vrhovima povezane L profilima dimenzija 60/60/5mm. Unutar segmenata spojevi su

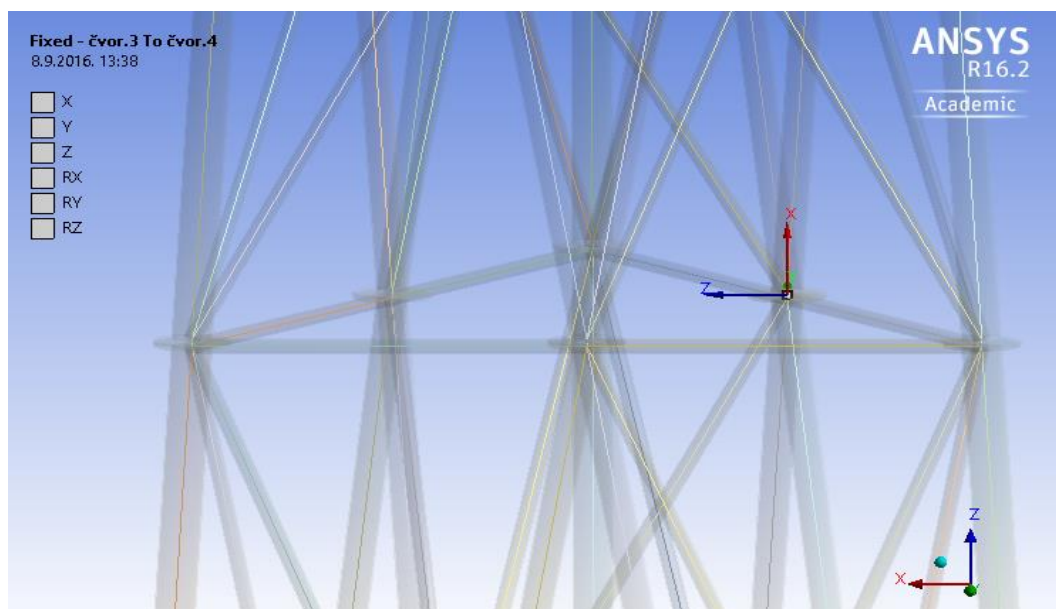
zavareni, a spojevi između segmenata osvareni vijčanim vezama vijcima klase 10.9. Veza stup temelj ostvarena je sidrima klase 5.6. Osnovni materijal konstrukcije je S355.



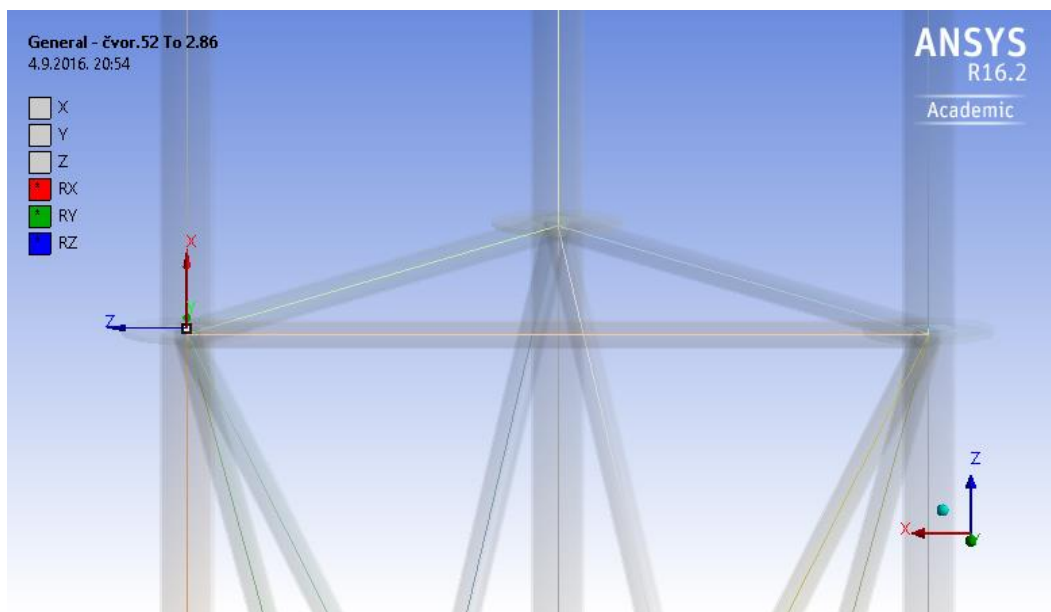
2.39 Skica antenskog stupa

### 2.3.2.2 Numerički model

Svi konstruktivni čelični elementi prostorne rešetke stupa modelirani su dvočvornim štapnim elementima BEAM188 sa 6 stupnjeva slobode u svakom čvoru. Veza stup temelj simulirana je kao kruta. Svi čvorovi rešetkaste konstrukcije modelirani su jednočvornim 3-D konačnim elementima CLOAD201 koji omogućuju da vanjska djelovanja u čvorovima, koja su promjenjiva u vremenu  $t$ , prate deformaciju konstrukcije u nelinearanoj analizi [8]. Kao što je već rečeno, jedan od ciljeva ovog rada je usporedba odgovora konstrukcije na djelovanje vjetera za krute, deformabilne i zglobne montažne spojeve. Stoga su montažni spojevi, u svojim težištima, modelirani MPC184 konačnim elementima koji uspostavljaju kinematička ograničenja gibanju odnosno rotaciji čvorova [8]. U prvom slučaju gdje su montažni spojevi simulirani kao kruti, spriječeni su svi relativni pomaci i zaokreti. U drugom slučaju, deformabilnim spojevima omogućeni su relativni zaokreti oko sve tri globalne osi s ograničenim linearnim rotacijskim krutostima opisanim u prethodnom poglavlju. U trećem slučaju, zglobnim spojevima ograničeni su samo torzijski pomaci. U slučaju deformabilnih i zglobnih spojeva svi relativni translacijski pomaci su spriječeni. Raspored montažnih spojeva po tipu i visini stupa prikazan je slikom 2.39. Na slici 2.40 prikazan je primjer jednog krutog montažnog spoja tipa 1 na visini 9.3m, sa spriječenim translacijskim pomacima i slobodnim rotacijskim zaokretima (označeno praznim kvadratima). Slikom 2.41 prikazan je primjer montažnog spoja tipa 2 na visini 34.4m, sa slobodnim zaokretima oko svih globalnih osi (označeno obojanim kvadratima).



2.40 Montažni spoj tipa 1

**2.41 Montažni spoj tipa 2**

Sile uslijed djelovanja vjetra, dobivene kako je opisano u poglavlju 2.4, nanešene se u čvorovima te je provedena dinamička analiza odgovora konstrukcije u ovisnosti o vremenu (engl. time-history analysis) s uključenom geometrijskom nelinearnosti (engl. large deflection analysis). Prema Ansys-ovom priručniku [1], pri analizi velikih pomaka, opterećenje u svakom sljedećem vremenskom koraku nanosi se na prethodno deformirane čvorove konstrukcije, bez utjecaja na kordinatnu usmjerenost opterećenja. Time je postignut realniji odgovor predmetne konstrukcije antenskog stupa na djelovanje vjetra. Rezultati numeričkog modela dati su u poglavlju 3.



## 2.4 Statističko modeliranje

U svrhu istraživanja djelovanja vjetra na konstrukcije te odgovora istih, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu provodi terenski eksperiment na iznajmljenom antenskom stupu ACS44B pozicioniranom na  $43^{\circ}35'40''$  sjeverno i  $16^{\circ}26'43''$  istočno. Na nadmorskoj visini 520 m.n.m, uz antenski stup, uspostavljen je terenski laboratorij u kojem se, između ostalog, pohranjuju sekundni zapisi brzine vjetra te prataći smjerovi vjetra. Terenski eksperiment, obrada i analiza izmjerenih podataka detaljno je opisana u radu [13].

### 2.4.1 Model opterećenja vjetrom

Analiza strujanja vjetra provodila se za nizove sekundnih 10-minutnih zapisa registriranih pomoću senzora za mjerenje brzine i smjera vjetra raspoređeni na visinama 10, 20 i 35m nad tлом. Za najdominantnije vjetrove, buru i jugo, grupirani su nizovi (grupa bura i grupa jugo) koji zadovoljavaju kriterije nepromijenjenosti smjera vjetra u trajanju niza, nepreklapanja niza i uvjet da su izmjereni na visini 10m.

Za modele opterećenja burom i jugom predmetnog antenskog stupa odabrani su slučajni zapisi koji zadovoljavaju uvjete:

- kontinuirano trajanje niza približno  $t_{\min}=1800s$

-srednja vrijednost brzine vjetrova bure i juga na referentnoj visini za konstrukciju stupa su približno jednake ( $v_{sr,bura}=v_{sr,jugo}$ )

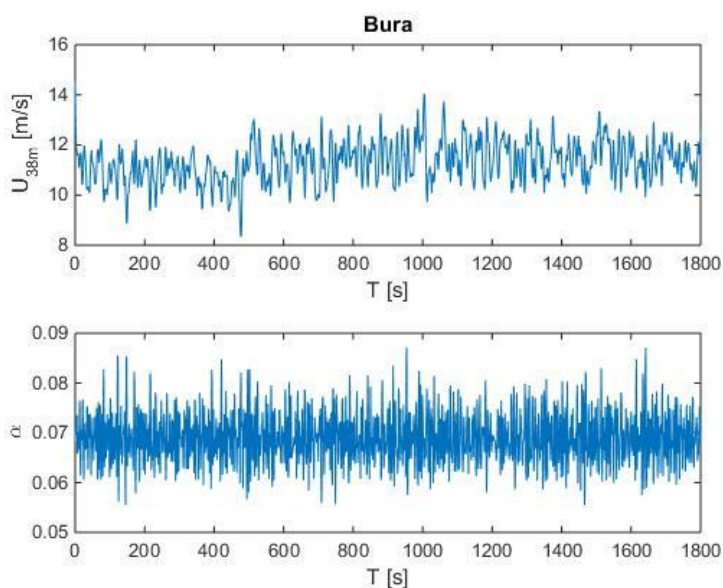
Modeli opterećenja vjetrom numeričkog modela konstrukcije antenskog stupa određeni su, vertikalnom interpolacijom izmjerenih brzina za svaki zapis na visinama 10,20 i 35m prema izrazu (2.5).

$$v_{h_i,j,k} = v_{j,k} \cdot \left(\frac{h_i}{10}\right)^{\alpha_k} \begin{cases} j=10 \rightarrow 0 < i \leq 15 \\ j=20 \rightarrow 15 < i \leq 27,5 \\ j=35 \rightarrow 27,5 < i \leq 39,2 \end{cases}, k = 0,1,2,\dots \quad (2.5)$$

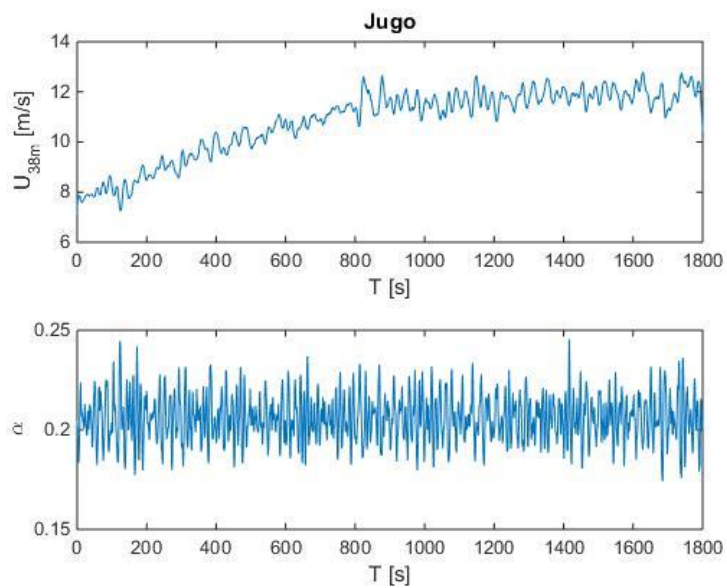
gdje je  $v_{h_i}$ [m/s] iznos vektora brzine na visini stupa  $h_i$ [m],  $v_{j,k}$  izmjereni iznos vektora brzina na visini  $j=10, 20$  ili  $35m$ ,  $\alpha_k$  koeficijent promjene brzine po visini konstrukcije za pripadajući sekundni zapis u trenutku  $k$ [s] prema (2.6).

$$\alpha_k = \frac{\sum_i \left[ \log\left(\frac{v_i}{v_j}\right) \cdot \log\left(\frac{h_i}{h_j}\right) \right]}{\sum_i \left[ \log\left(\frac{h_i}{h_j}\right) \right]^2} \begin{cases} j=10 \rightarrow 0 < i \leq 15 \\ j=20 \rightarrow 15 < i \leq 27,5 \\ j=35 \rightarrow 27,5 < i \leq 39,2 \end{cases}, k=0,1,2,\dots \quad (2.6)$$

Prema opisanom postupku vektori vjetrovnih brzina i pripadajući koeficijenti promjene brzine interpolirani su iz snimljenih vremenskih serija pomoću MATLAB [14]. U nastavku je prikazan primjer interpoliranog vjetrovnog zapisa na visini 38m i pripadajuće interpolirane koeficijente promjene brzine  $\alpha$ , za odabrani niz djelovanja bure i juga u trajanju  $k=1800s$  (slike 2.42, 2.43).

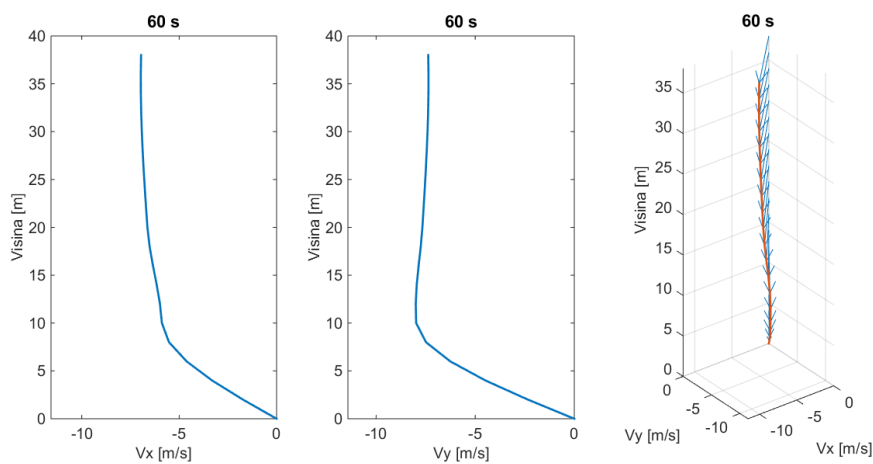


**2.42 Interpolirani vjetrovni zapis bure na visini 38[m]**

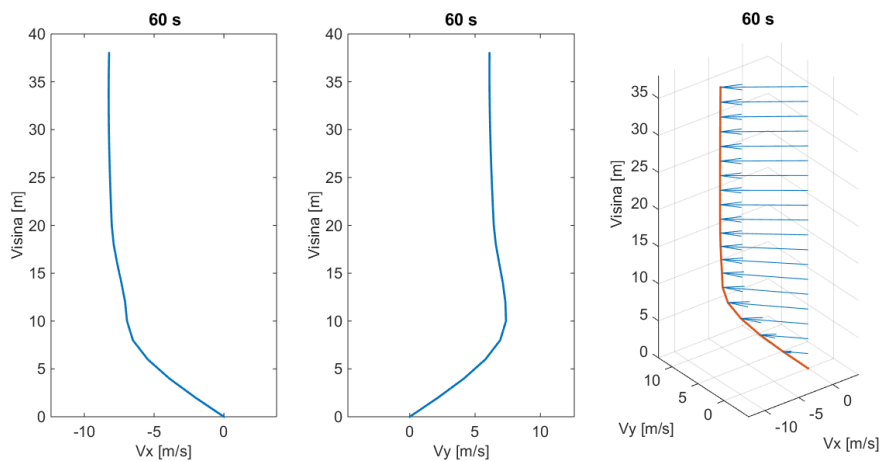


**2.43 Interpolirani vjetrovni zapis juga na visini 38[m]**

Slike 2.44, 2.45 su vektorski prikazi izgeneriranog vjetrovnog profila bure i juga po visini konstrukcije za trenutak  $k=60s$ .

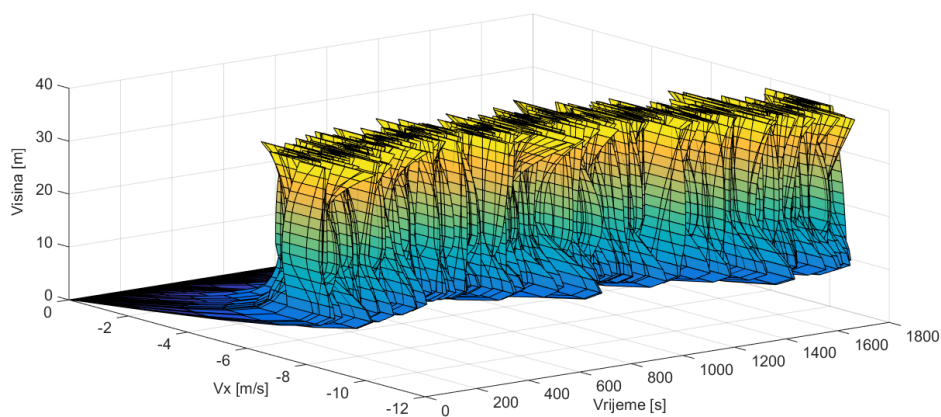


**2.44 Vjetrovni profil bure za  $t=60[s]$**

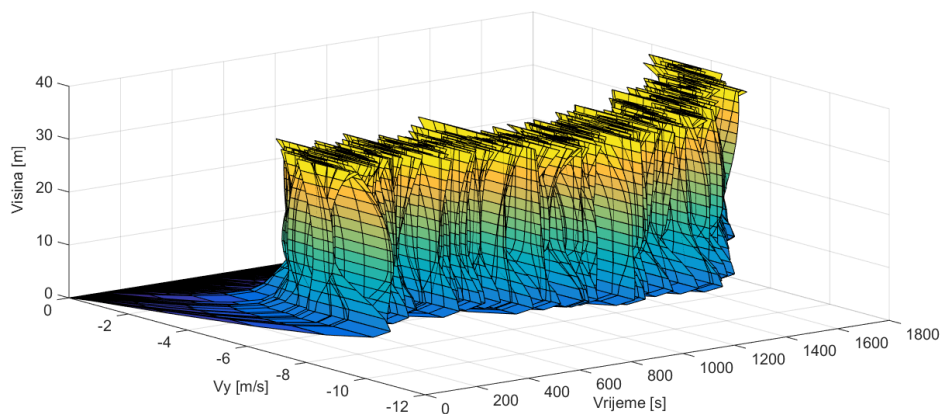


2.45 Vjetrovni profil juga za  $t=60[s]$

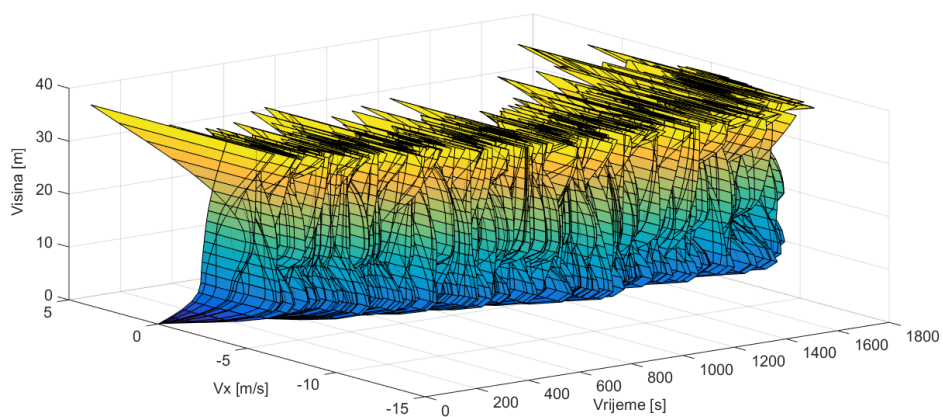
Rastavljanjem vektora brzine bure i juga na globalne komponente  $v_x$  i  $v_y$  te integriranjem svih interpoliranih podataka dobije se integrirani model opterećenja vjetrom za odabrani niz u trajanju  $k=1800s$ .



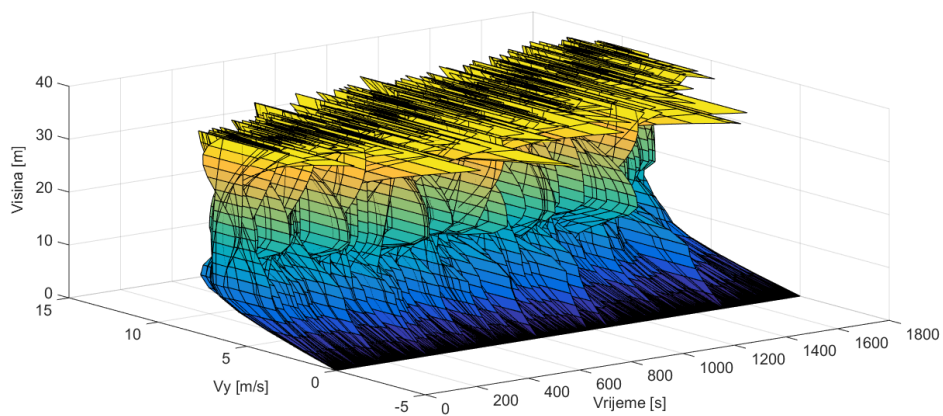
2.46 Model opterećenja burom u smjeru globalne osi x



**2.47 Model opterećenja burom u smjeru globalne osi y**



**2.48 Model opterećenja jugom u smjeru globalne osi x**



**2.49 Model opterećenja jugom u smjeru globalne osi y**

## 2.4.2 Djelovanje vjetra na elemente stupa

Pretpostavimo konstantan tlak po plohi uslijed optjecanja vjetra oko općeg elementa stupa. Neka rezultantna sila otpora (izraz (2.7)) suprotna smjeru strujanja vjetra, prolazi kroz težište elementa. Neka u težištu elementa okomito na smjer vjetra djeluje konstantna sila kao rezultanta dinamičkog uzgona (izraz (2.8)).

$$F_D = \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot A \cdot C_D \left( \text{Re}, \frac{k}{d} \right) \quad (2.7)$$

$$F_L = \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot A \cdot C_L \left( \text{Re}, \frac{k}{d} \right) \quad (2.8)$$

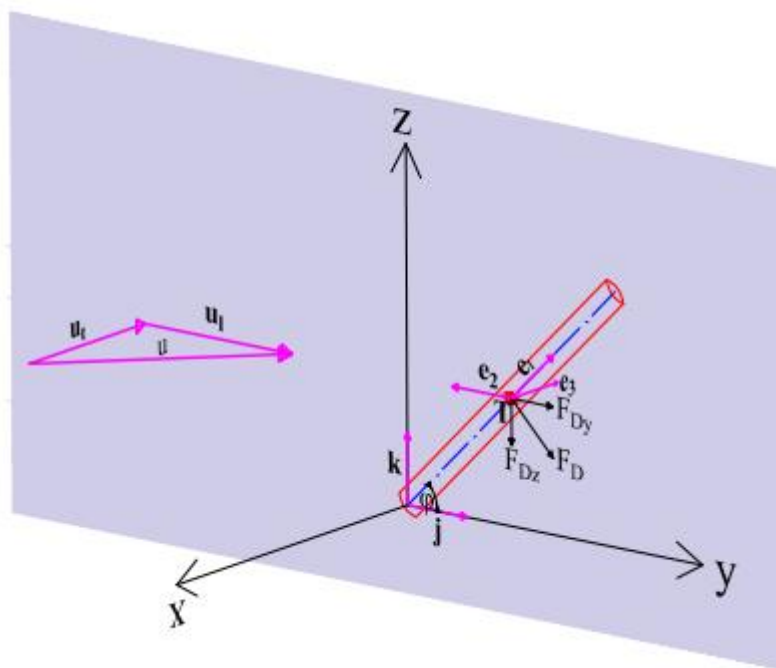
gdje je  $F_D$  sila na element uslijed djelovanja vjetra,  $F_L$  sila uzgona,  $v$  iznos vektora brzine vjetra,  $A$  površina presjeka ( $A=D \cdot L$ ) projicirana na plohu okomito na strujanje vjetra,  $D$  promjer elementa,  $L$  duljina elementa,  $\rho$  gustoća zraka,  $C_D$  koeficijent oblika i  $C_L$  koeficijent uzgona.

Definirajmo vektor  $\mathbf{e}_1$  s hvatištem u težištu elementa i u smjeru osi elementa slika (2.50). Uz pomoć vektora  $\mathbf{e}_3$  definira se ravnina okomita na vertikalnu ravninu kroz os elementa.

$$\vec{\mathbf{e}}_3 = \vec{\mathbf{k}} \times \vec{\mathbf{e}}_1 \quad (2.9)$$

Vektor  $\mathbf{e}_2$  je projekcija vektora  $\mathbf{e}_1$  na ravninu  $xy$ .

$$\vec{\mathbf{e}}_2 = \vec{\mathbf{e}}_3 \times \vec{\mathbf{k}} \quad (2.10)$$



### 2.50 Definicije vektora

Razmatra se vektor brzine vjetra u horizontalnoj ravnini koja prolazi kroz težište T općeg elementa stupa. Smjer i iznos vektora brzine definirani su interpoliranim vjetrovnim profilom opisanim u prethodnom potpoglavlju. Vektor brzine vjetra rastavlja se na dvije komponente: longitudinalni vjetar  $\mathbf{u}_l$  u vertikalnoj ravnini kroz os elementa i trasverzalni vjetar  $\mathbf{u}_t$  okomito na tu vertikalnu ravninu kao na slici 2.50.

$$\vec{u}_l(T) = (\vec{u}(T) \cdot \vec{e}_2) \cdot \vec{e}_2 \quad (2.11)$$

$$\vec{u}_t(T) = (\vec{u}(T) \cdot \vec{e}_3) \cdot \vec{e}_3 \quad (2.12)$$

Koeficijent oblika za silu otpora po komponentama definirani su sljedećim izrazima:

$$C_{Dy} = C_D \left( Re_{prim}, \frac{k}{b} \right) \sin^2(\varphi) \cos(\varphi) \quad (2.13)$$

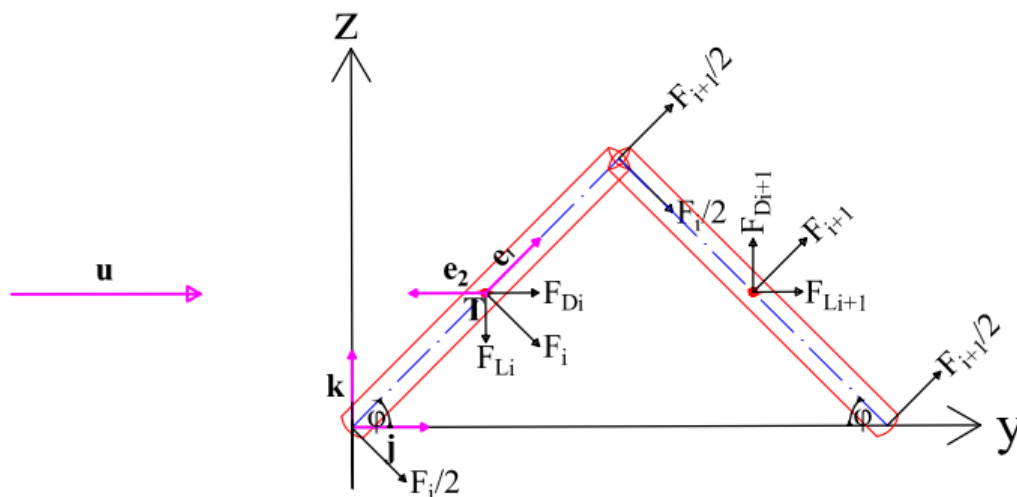
$$C_{Dz} = C_D \left( Re_{prim}, \frac{k}{b} \right) \sin^3(\varphi) \quad (2.14)$$

gdje je  $Re_{prim} = Re \cdot \sin(\varphi)$ ,  $\varphi$  kut između osi elementa i horizontalne ravnine prema [15].

Sila uzgona se ravna po izrazu (2.8) sa smjerom definiranim :

$$\vec{l} = \vec{e}_1 \times \vec{u} \quad (2.15)$$

Rezultanta sila  $\mathbf{F}_i$ , s hvatištem u težištu općeg elementa  $i$ , dobivena zbrajanjem svih parcijalnih sila otpora i uzgona razdvaja se na dvije paralelne sile  $\mathbf{F}_i/2$  s hvatištima u krajnjim čvorovima elementa (slika 2.51). Isti postupak provodi se za sve elemente stupa.



2.51 Definiranje ukupnih sila u zajedničkom čvoru

Zbrajanjem svih parcijalnih sila s hvatištem u zajedničkom čvoru okolnih elemenata stupa, dobije se rezultanta koja se potom razdvaja na globalne komponente u smjeru osi  $x, y$  i  $z$ . Tako definirane sile zadane se u numerički model. Ponavljanjem postupka za sve čvorove stupa dobije se ukupno opterećenje vjetrom na stup u nekom trenutku  $t$  odabranog vjetrovnog zapisa.

Opisani postupak definiranja čvornih sila programiran je pomoću MATLAB [14] te su tako dobivene sile nanijete u svakom čvoru numeričkog modela konstrukcije antenskog stupa za svaki trenutak  $t$  odabranog vjetrovnog niza. Primjer zadavanja čvornih sila pokazan je na primjeru jednog čvora slikama 3.2, 3.3.



### 3 REZULTATI

#### 3.1 Rezultati numeričkog modela

U nastavku su prikazani rezultati numeričkog modela uslijed djelovanja bure i juga na konstrukciju stupa kojemu su montažni spojevi simulirani kao:

- kruti spojevi (1.slučaj) - (u daljnjem tekstu model s krutim spojevima)
- deformabilni spojevi (2.slučaj) - (u daljnjem tekstu: model s deformabilnim spojevima)
- zglobni spojevi (3.slučaj) - (u daljenjm tekstu: model sa zglobnim spojevima)

Kako je već navedeno razlika u modelima u sva tri slučaja je u veličinama rotacijske krutosti montažnih spojeva. Rotacijske krutosti modela s krutim spojevima su beskonačne, a definirane rotacijske krutosti za ostale slučajeve prikazane su tablicama u nastavku.

Za model s deformabilnim spojevima vrijednosti krutosti iznose (tablica 3.1, 3.2):

##### 3.1 Vrijednosti rotacijskih krutosti montažnog spoja tipa 1

Stiffness	Per Unit X (mm)	Per Unit Y (mm)	Per Unit Z (mm)	Per Unit $\theta_x$ (°)	Per Unit $\theta_y$ (°)	Per Unit $\theta_z$ (°)
$\Delta$ Force X (N)						
$\Delta$ Force Y (N)						
$\Delta$ Force Z (N)						
$\Delta$ Moment X (N·m)				1,627e+007		
$\Delta$ Moment Y (N·m)					1,627e+007	
$\Delta$ Moment Z (N·m)						1,627e+007

##### 3.2 Vrijednosti rotacijskih krutosti montažnog spoja tipa 2

Stiffness	Per Unit X (mm)	Per Unit Y (mm)	Per Unit Z (mm)	Per Unit $\theta_x$ (°)	Per Unit $\theta_y$ (°)	Per Unit $\theta_z$ (°)
$\Delta$ Force X (N)						
$\Delta$ Force Y (N)						
$\Delta$ Force Z (N)						
$\Delta$ Moment X (N·m)				1,04e+007		
$\Delta$ Moment Y (N·m)					1,04e+007	
$\Delta$ Moment Z (N·m)						1,04e+007

Za model sa zglobnim spojevima vrijednosti krutosti iznose:

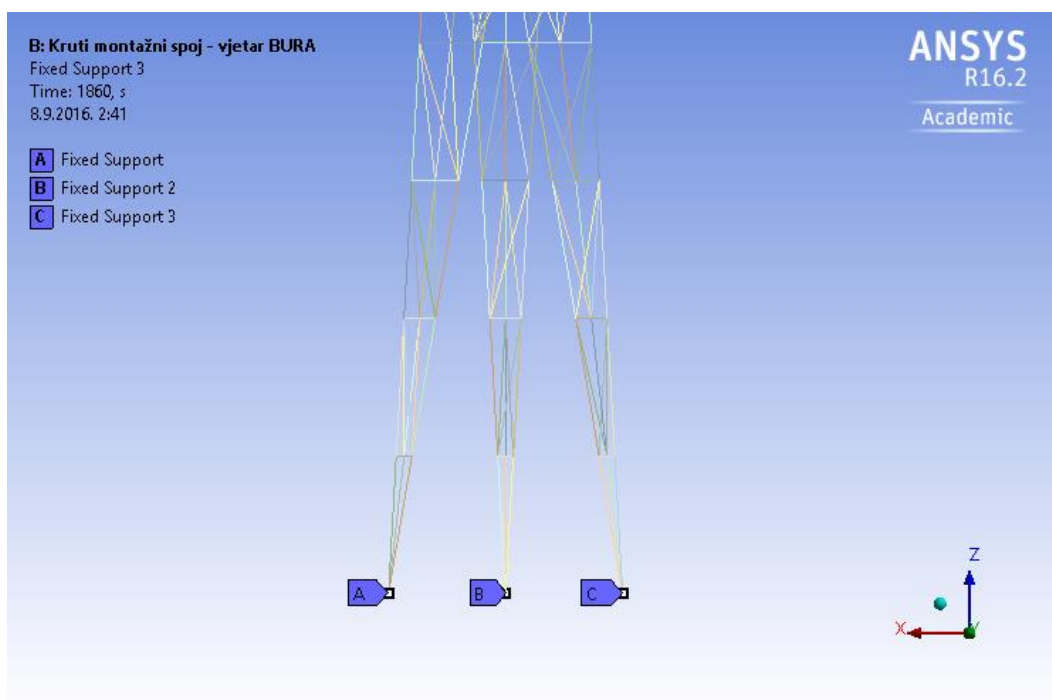
### 3.3 Vrijednosti rotacijskih krutosti montažnog spoja tipa 1

Stiffness	Per Unit X (mm)	Per Unit Y (mm)	Per Unit Z (mm)	Per Unit $\theta_x$ (°)	Per Unit $\theta_y$ (°)	Per Unit $\theta_z$ (°)
$\Delta$ Force X (N)						
$\Delta$ Force Y (N)						
$\Delta$ Force Z (N)						
$\Delta$ Moment X (N-mm)				1,627e+007		
$\Delta$ Moment Y (N-mm)					0,	
$\Delta$ Moment Z (N-mm)						0,

### 3.4 Vrijednosti rotacijskih krutosti montažnog spoja tipa 2

Stiffness	Per Unit X (mm)	Per Unit Y (mm)	Per Unit Z (mm)	Per Unit $\theta_x$ (°)	Per Unit $\theta_y$ (°)	Per Unit $\theta_z$ (°)
$\Delta$ Force X (N)						
$\Delta$ Force Y (N)						
$\Delta$ Force Z (N)						
$\Delta$ Moment X (N-m)				1,04e+007		
$\Delta$ Moment Y (N-m)					0,	
$\Delta$ Moment Z (N-m)						0,

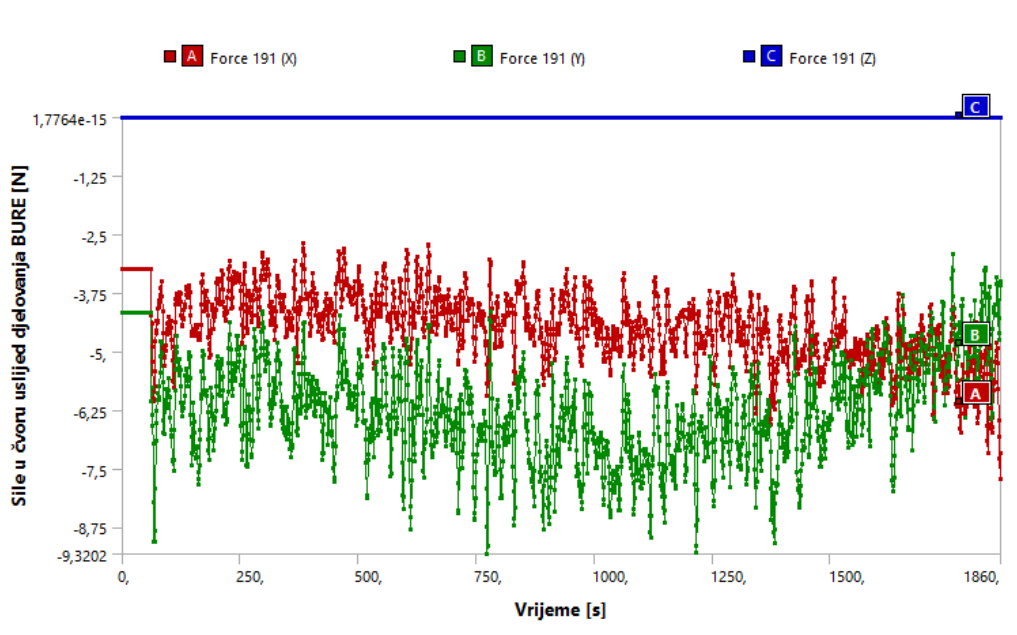
Za prikazane rezultate na ležajevima vrijedi nomenklatura prikazana slikom 3.1. Smjerovi osi lokalnih koordinatnih sustava montažnih spojeva definirani su slikama 2.40, 2.41.



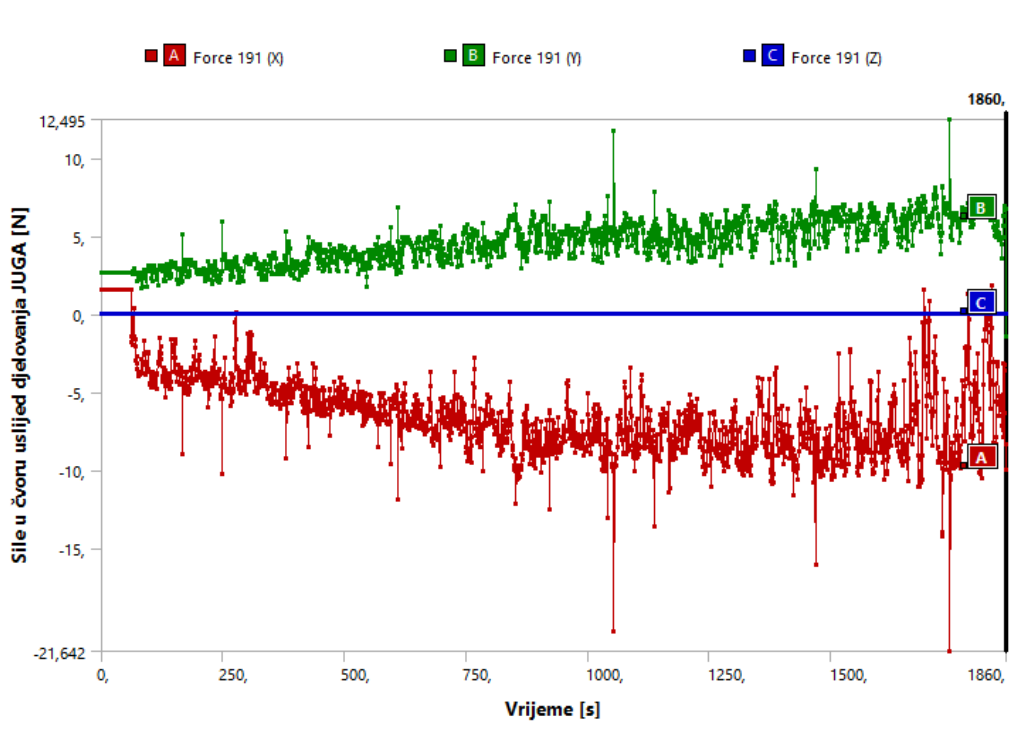
### 3.1 Nomenklatura upetih ležajeva

Da bi se spriječio utjecaj impulsne pobude na rezultate početno mirne konstrukcije, metodom konstantne početne sile u prvih 60 sekundi dinamičkog proračuna zadano je konstantno opterećenje u svim čvorovima jednako djelovanju vjetra u prvoj sekundi. Nakon 60s zadane su sile u čvorovima koje odgovaraju brzinama odabranog niza u trajanju 1800s (poglavlje 2.).

Stoga u razmatranjima svih rezultata u nastavku, potrebno je zanemariti prvih 60s odgovora modela konstrukcije. Slikama je prikazan primjer zadavanja niza sila u vremenu i to u čvoru na vrhu stupa za djelovanje bure i juga.



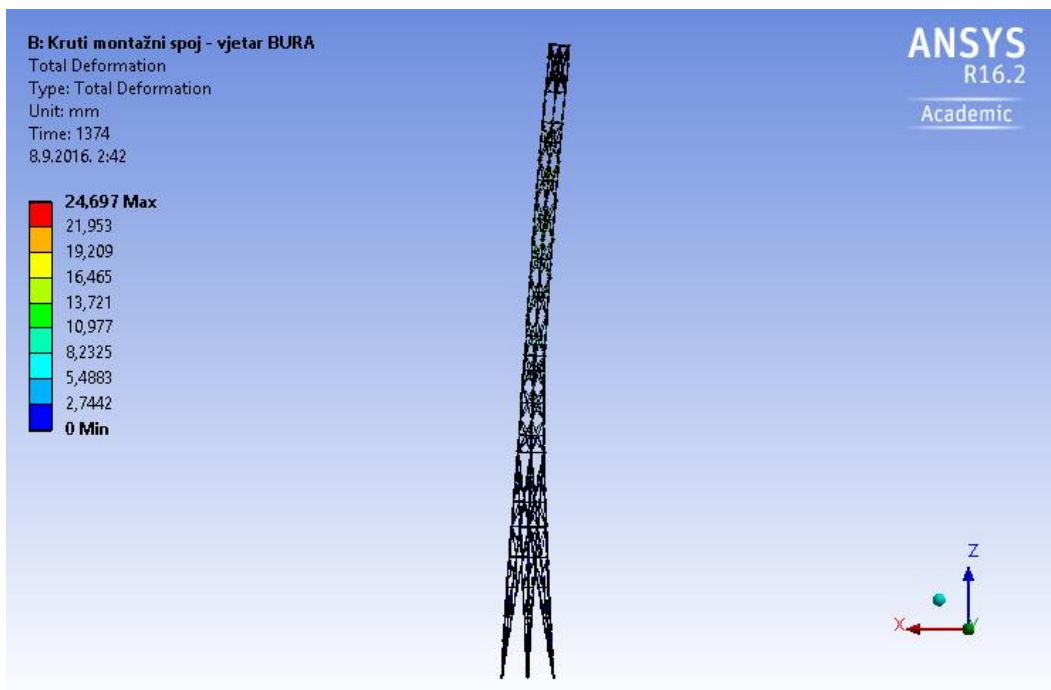
3.2 Sile u čvoru na vrhu stupa uslijed djelovanja bure



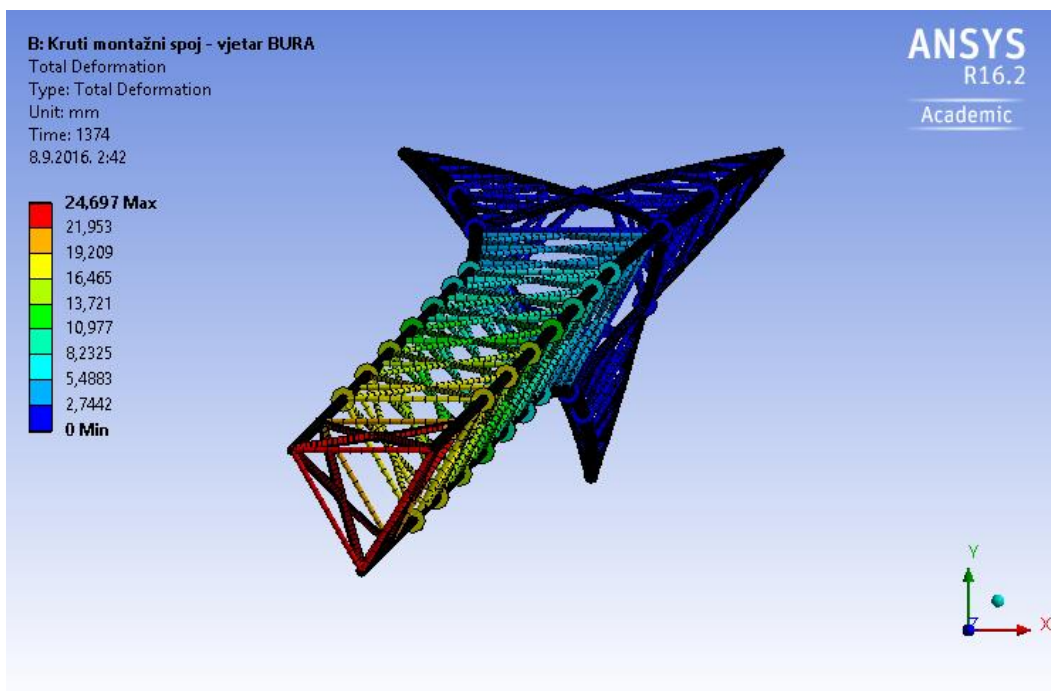
3.3 Sile u čvoru na vrhu stupa uslijed djelovanja juga

### 3.1.1 Odgovor modela s krutim spojevima na djelovanje bure

U nastavku je prikazan odgovor modela tijekom trajanja odabranog zapisa bure. Slike 3.4, 3.5 prikazuju maksimalne ukupne pomake čvorova po visini konstrukcije stupa u trenutku  $t=1374s$ .

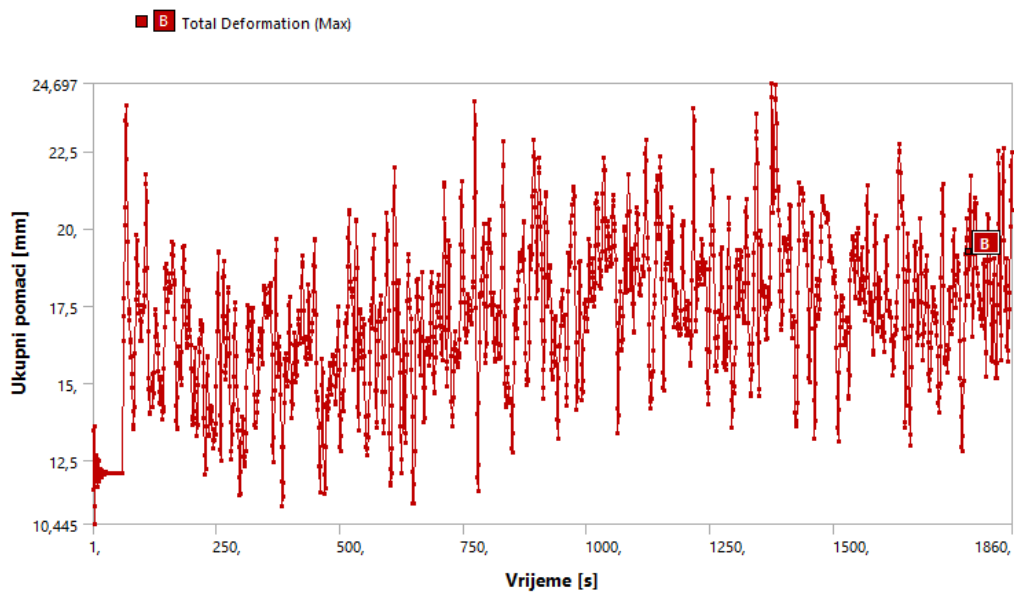


3.4 Ukupni pomaci po visini stupa - pogled [mm]

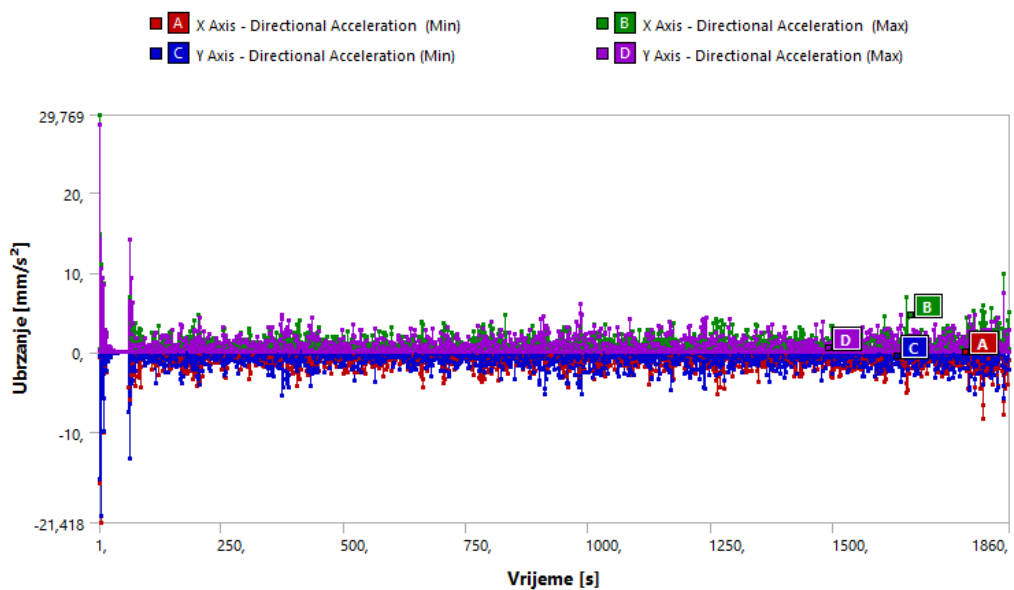


3.5 Ukupni pomaci po visini stupa - pogled [mm]

Slikama 3.6, 3.7 prikazani su pomaci i akceleracije čvorova vrha stupa.

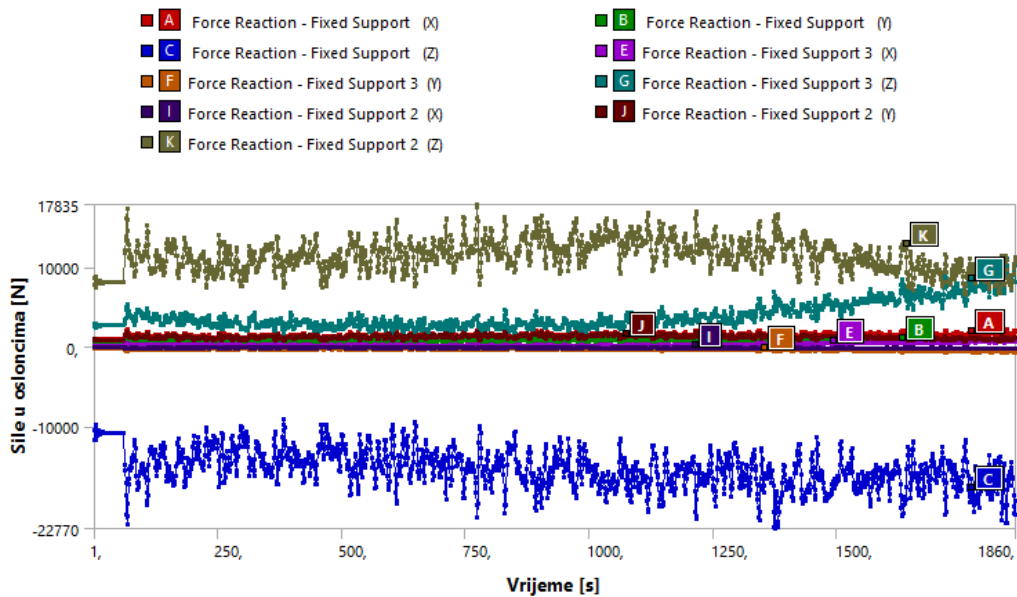


3.6 Ukupni pomaci vrha stupa

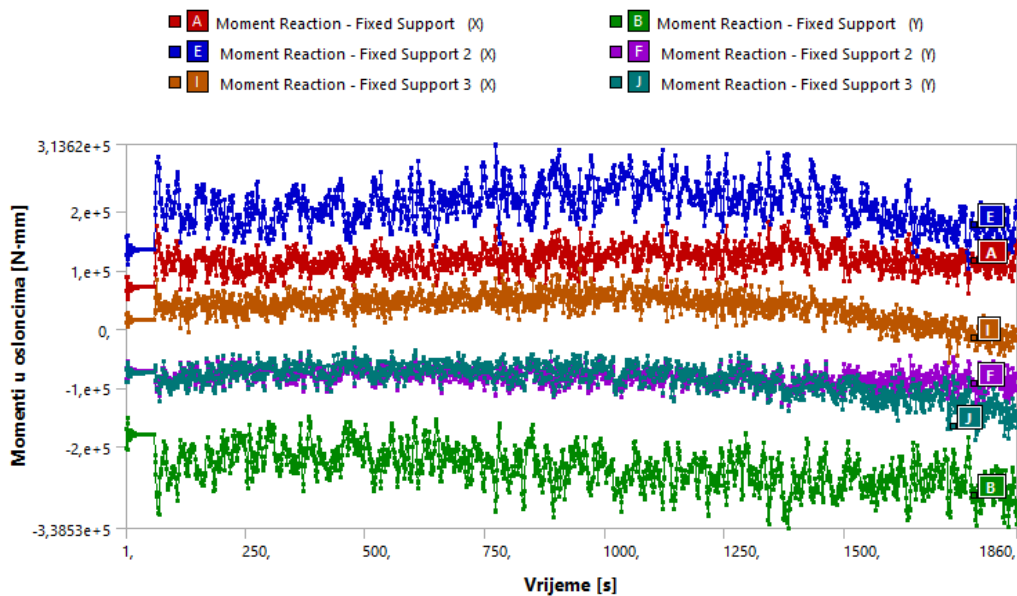


3.7 Ubrzanja vrha stupa

U nastavku su prikazani odgovori upetog spoja stup temelj.

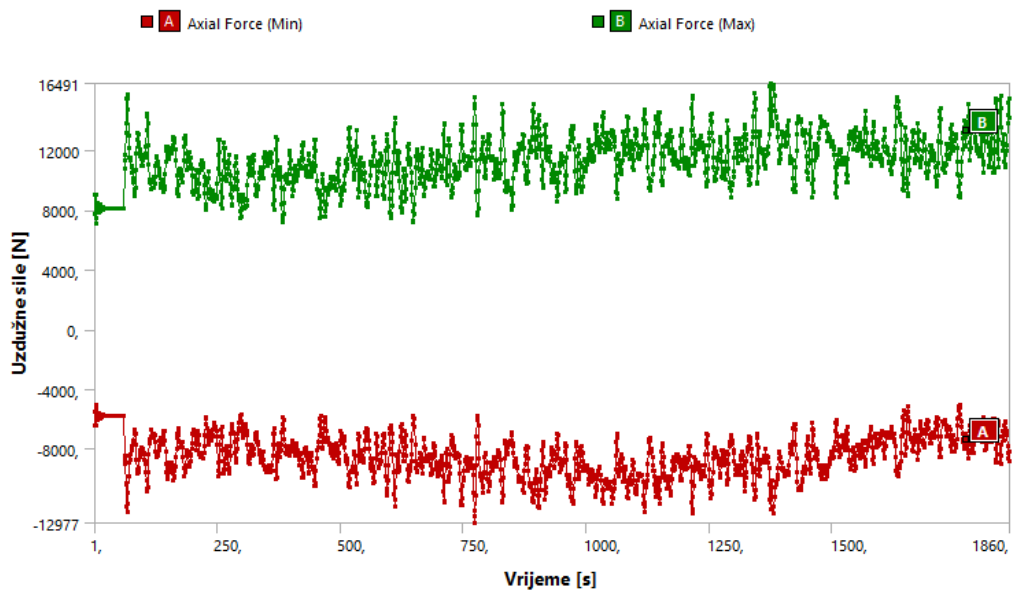


3.8 Sile u osloncima

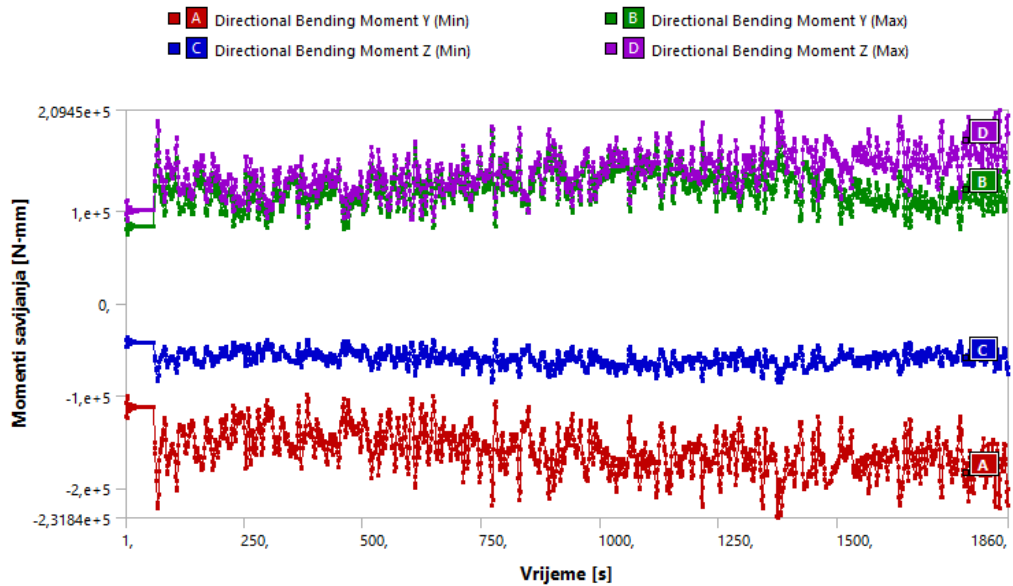


3.9 Momenti u osloncima

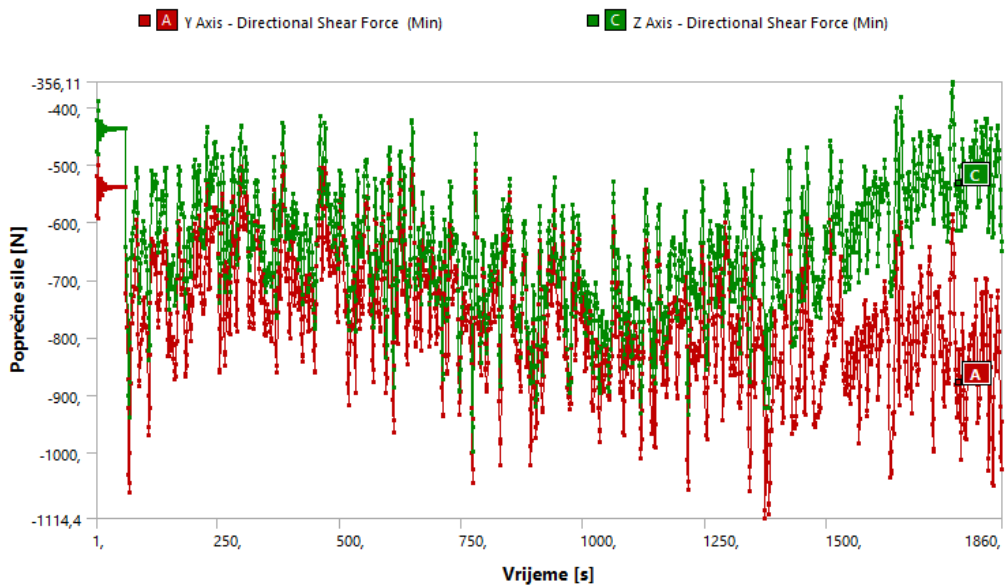
Sljedećim slikama prikazane su maksimalne rezne sile u maksimalno opterećenim elementima konstrukcije stupa.



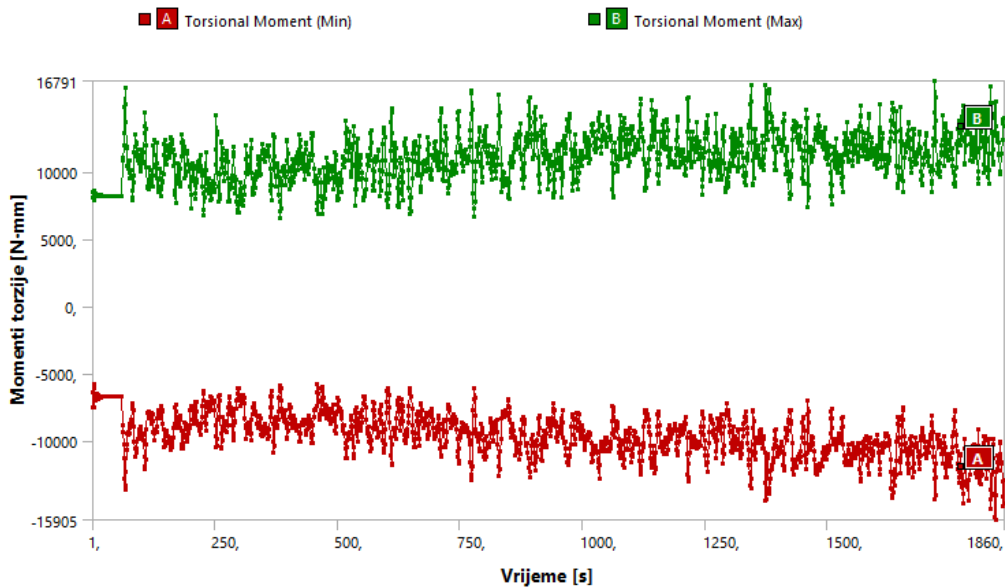
3.10 Max uzdužne sile u elementima



3.11 Max momenti savijanja u elementima



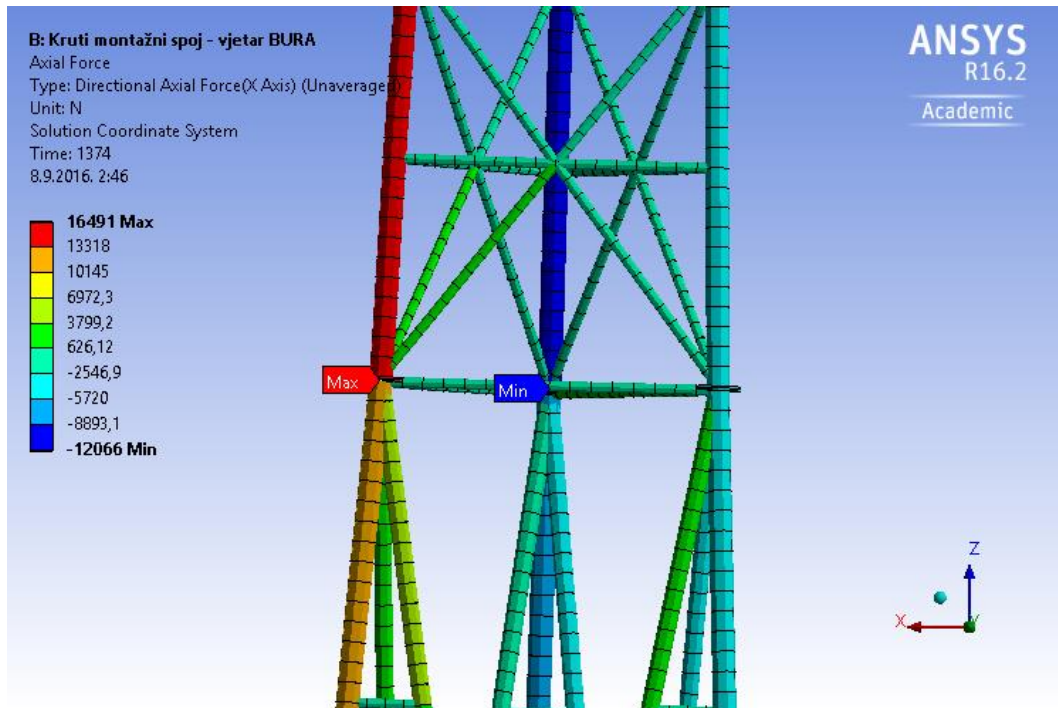
3.12 Max poprečne sile u elementima



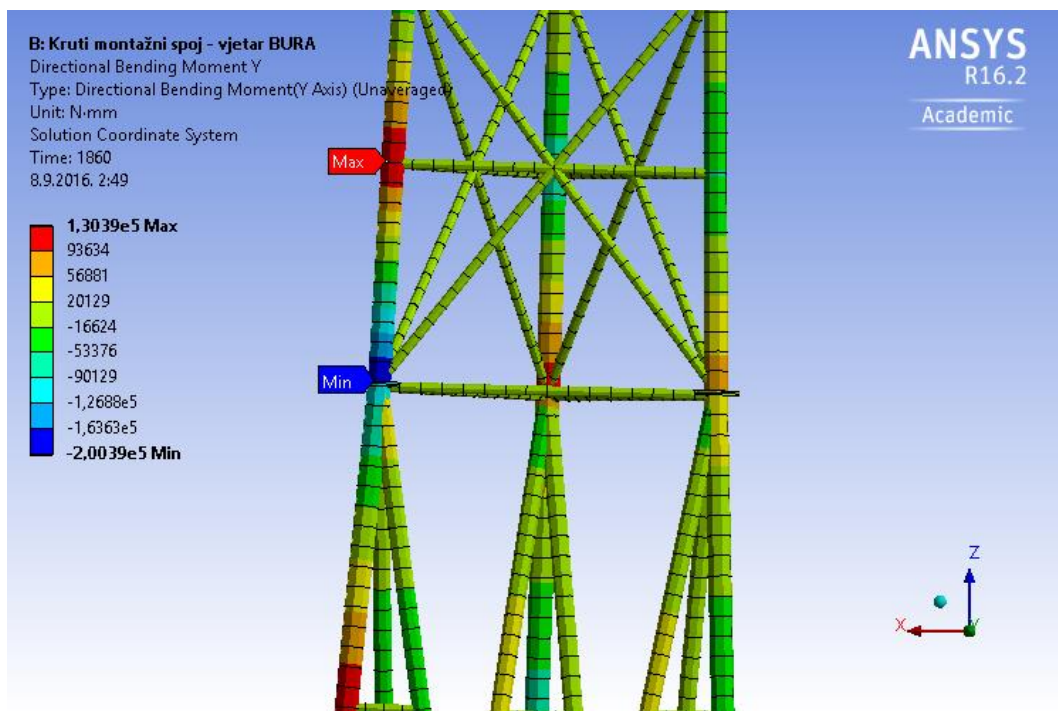
3.13 Max momenti torzije u elementima



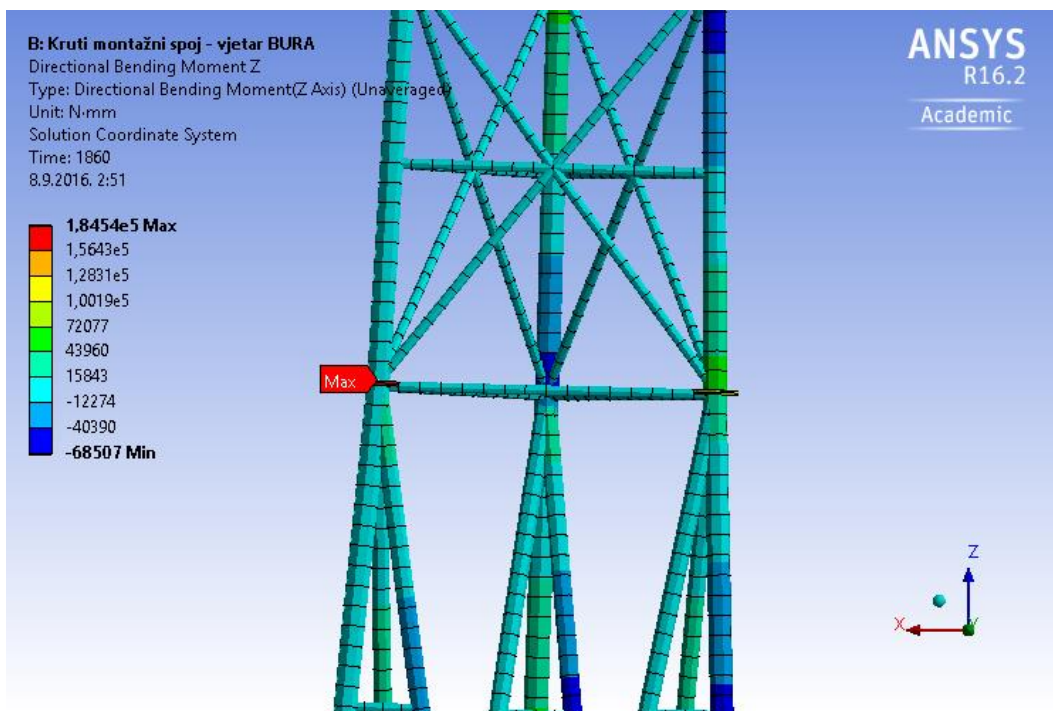
Razmatraju se rezne sile najopterećenijeg montažnog spoja u trenutku maksimalnog pomaka vrha stupa (slike 3.14, 3.15, 3.16).



3.14 Uzdužne sile [N]

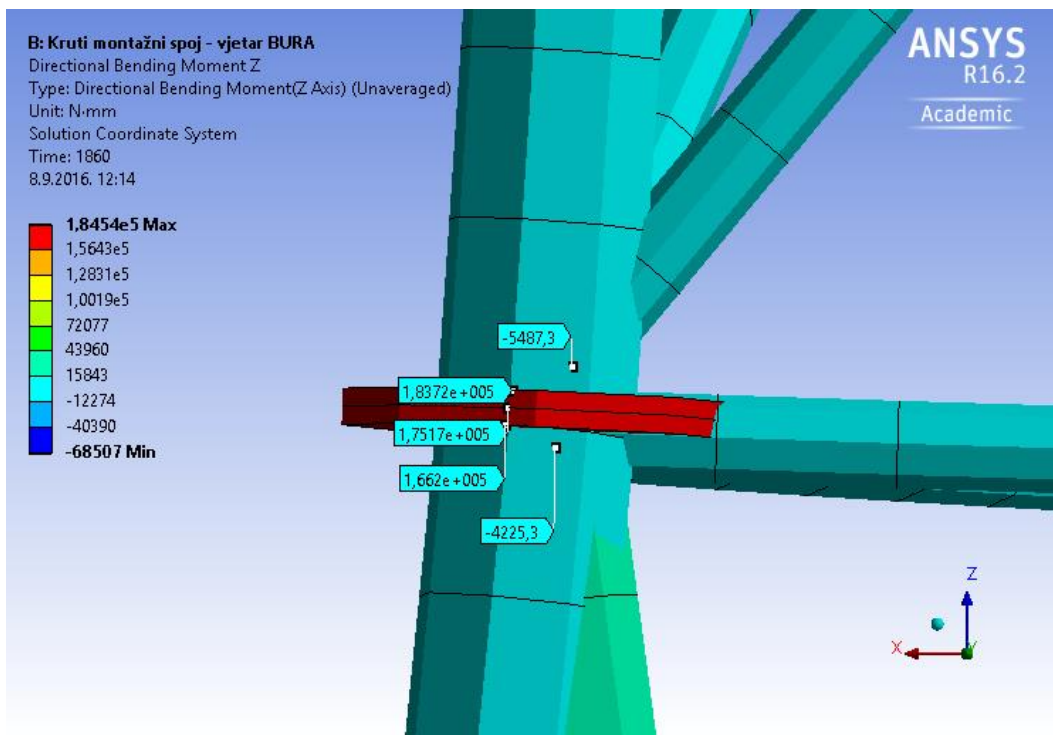


3.15 Savojni moment  $M_y$  [Nmm]



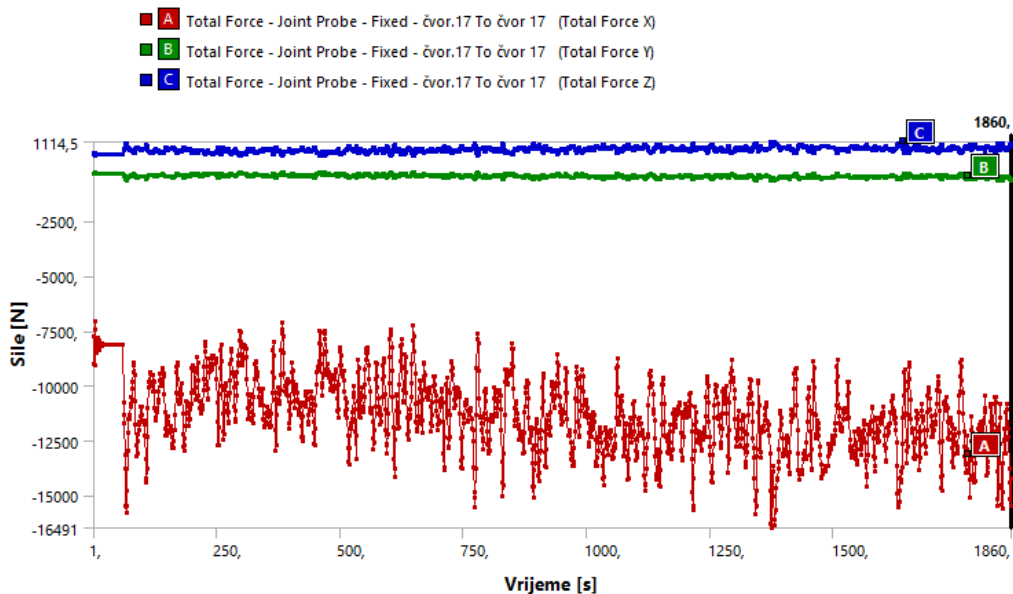
3.16 Savojni moment  $M_z$  [Nmm]

Na slici 3.17. prikazana je raspodjela momenta  $M_z$  duž osi spoja. Vidljivo je da spoj preuzima momente uslijed savojnog deformiranja segmenta konstrukcije stupa. Do opadanja momenta duž osi spoja dolazi zbog razlike u krutostima čvorova iznad i ispod montažnog spoja.

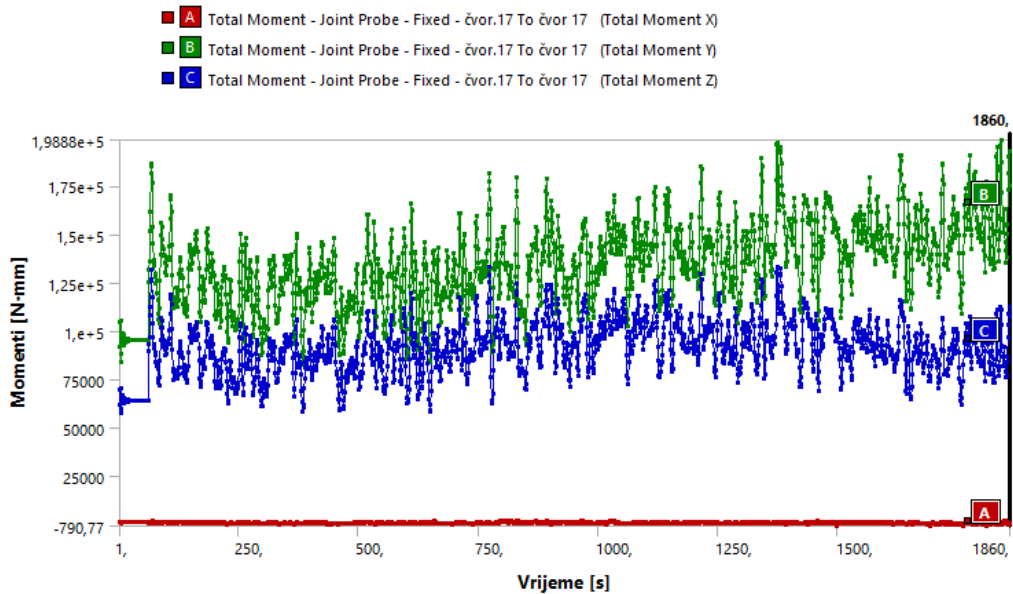


3.17 Raspodjela momenta  $M_z$  duž osi spoja

Slikama 3.18, 3.19 prikazane su rezne sile koje se javljaju u najopterećenijem montažnom spoju za vrijeme djelovanja bure. Relativni zaokreti, kao što je i očekivano, iznose 0°.



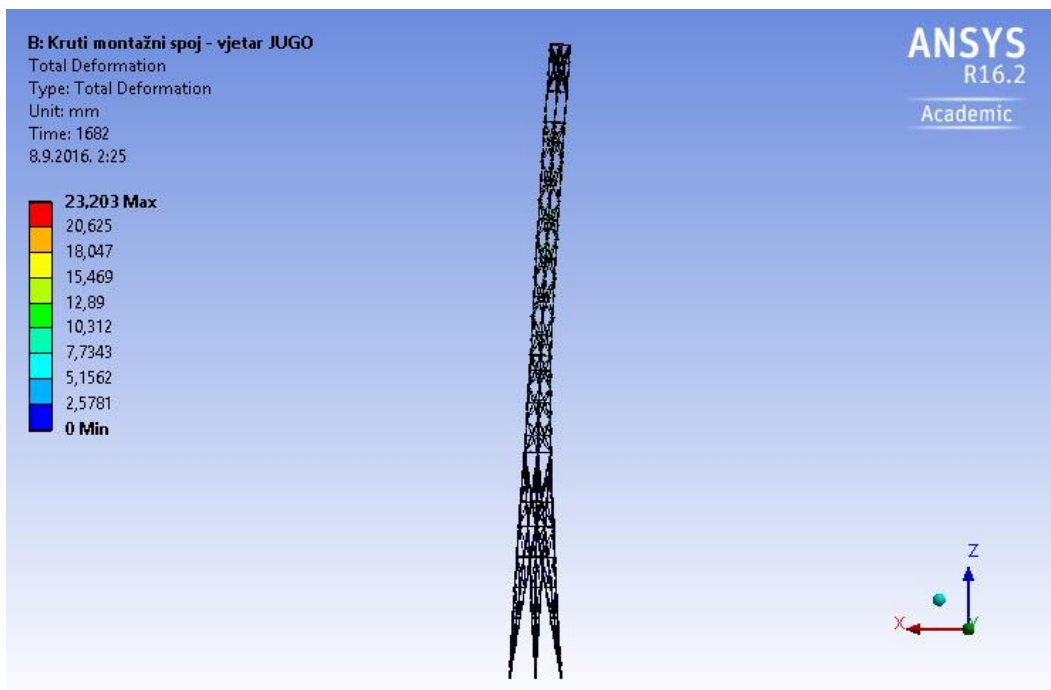
3.18 Sile u montažnom spoju



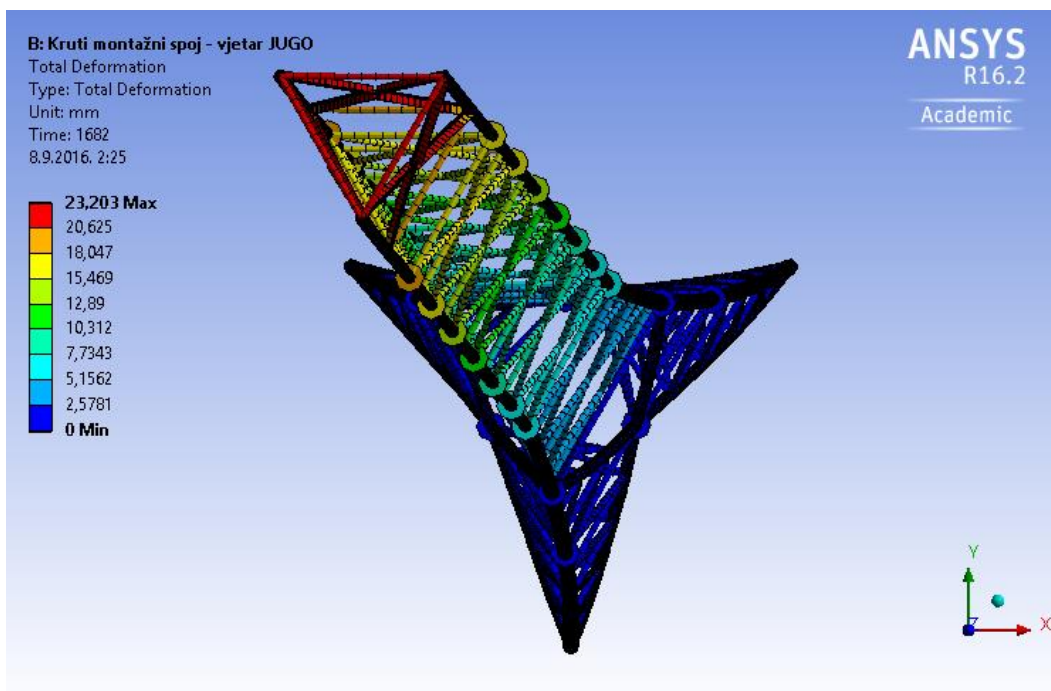
3.19 Momenti u montažnom spoju

### 3.1.2 Odgovor modela s krutim spojevima na djelovanje juga

U nastavku je prikazan odgovor modela tijekom trajanja odabranog zapisa juga. Slike 3.18, 3.19 prikazuju maksimalne ukupne pomake čvorova po visini konstrukcije stupa u trenutku  $t=1682s$ .

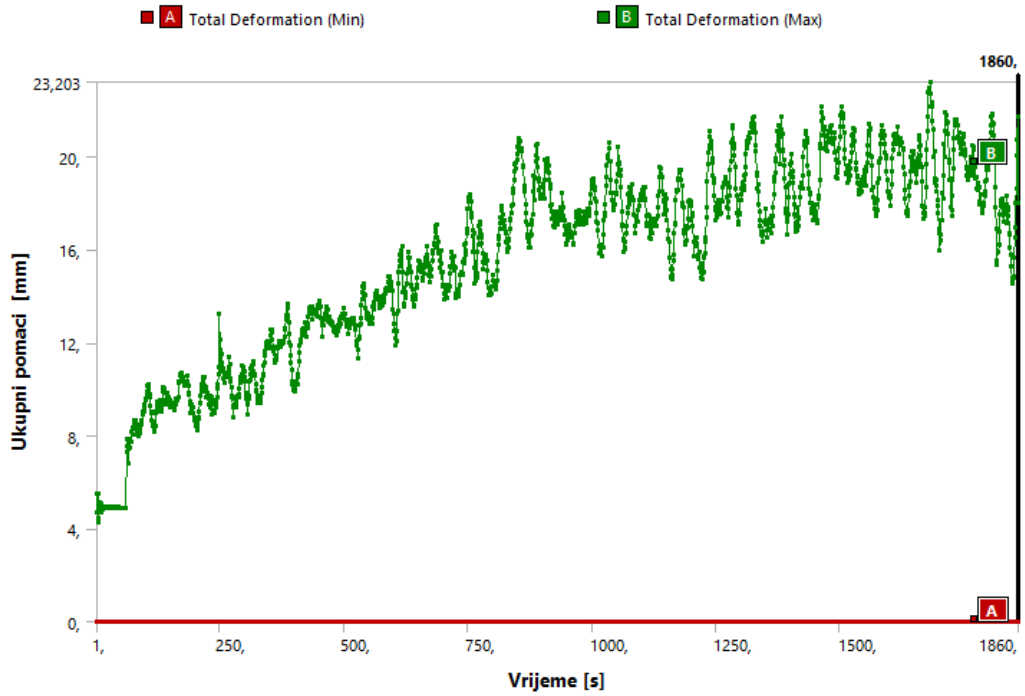


3.20 Ukupni pomaci po visini stupa - pogled [mm]

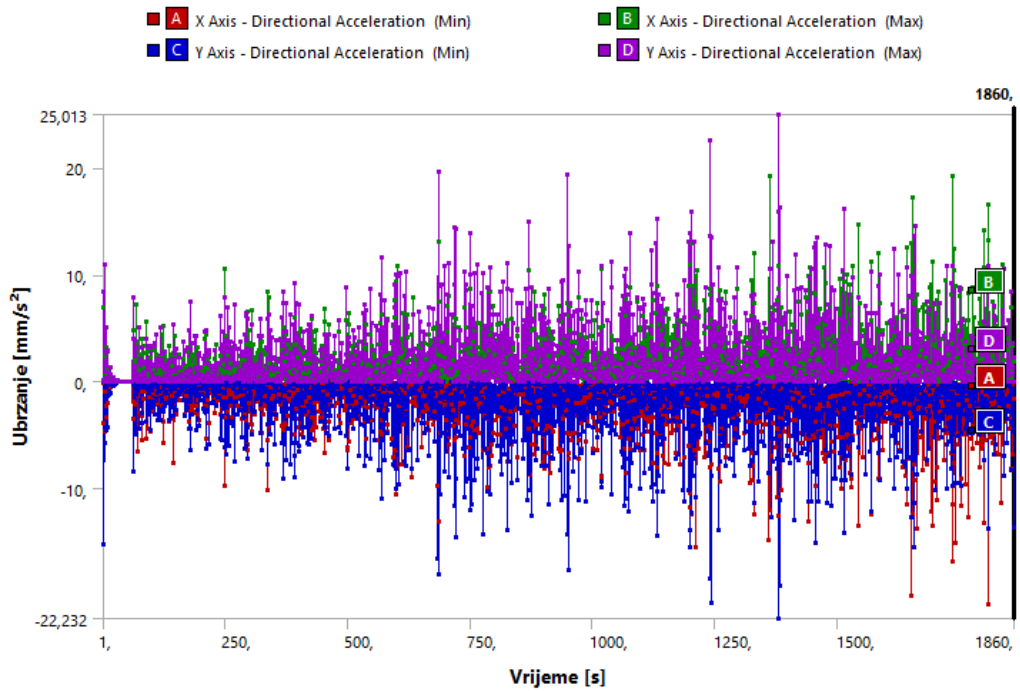


3.21 Ukupni pomaci po visini stupa - tlocrt [mm]

Slikama 3.22, 3.23 prikazani su pomaci i akceleracije čvorova vrha stupa.



3.22 Ukupni pomaci vrha stupa



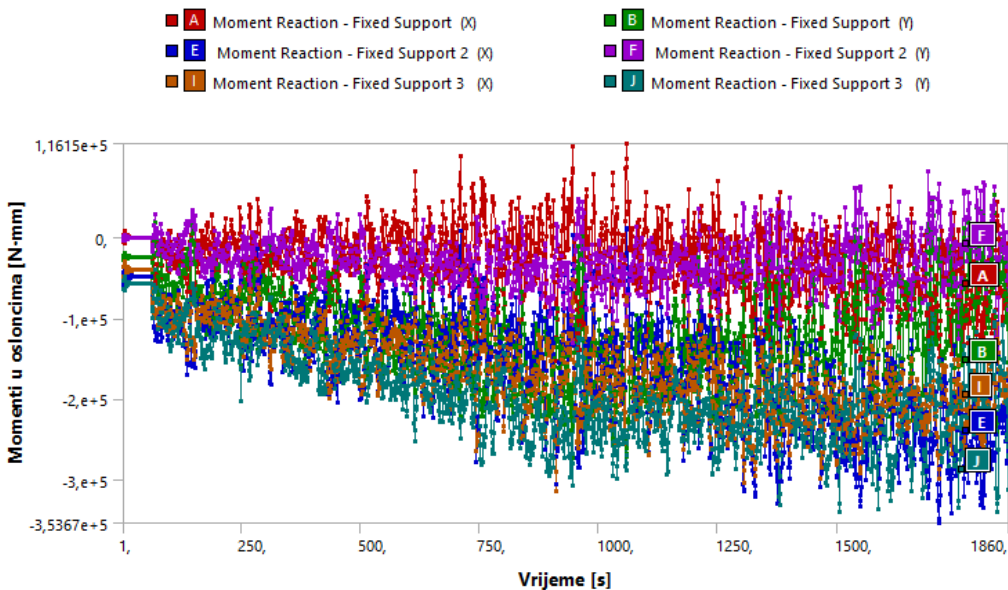
3.23 Ubrzanja vrha stupa



U nastavku su prikazani odgovori upetog spoja stup temelj.

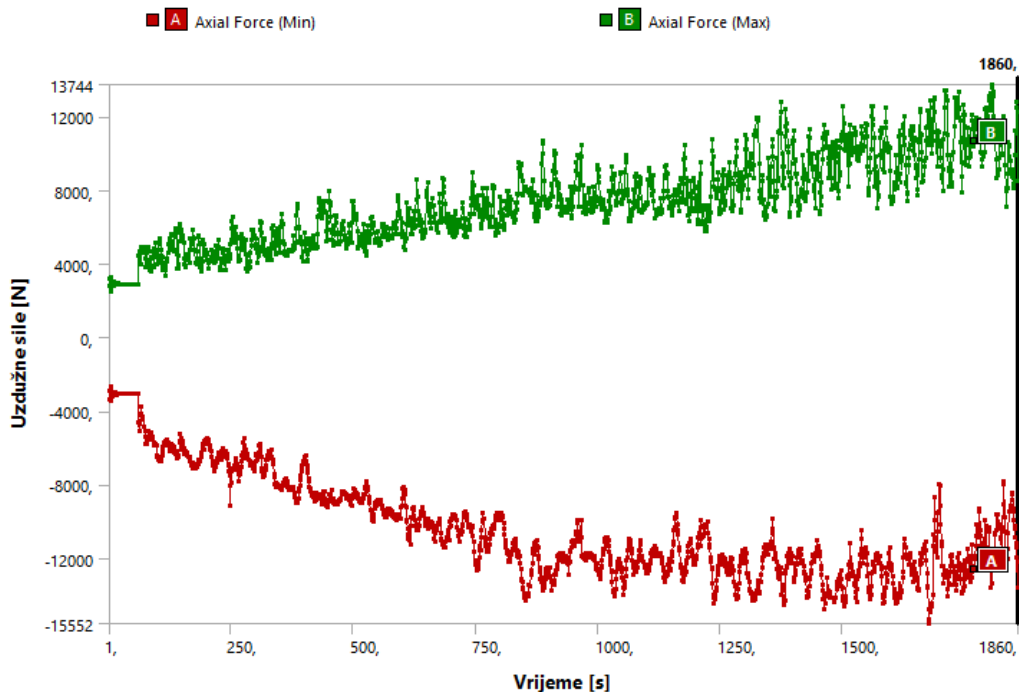


3.24 Sile u osloncima

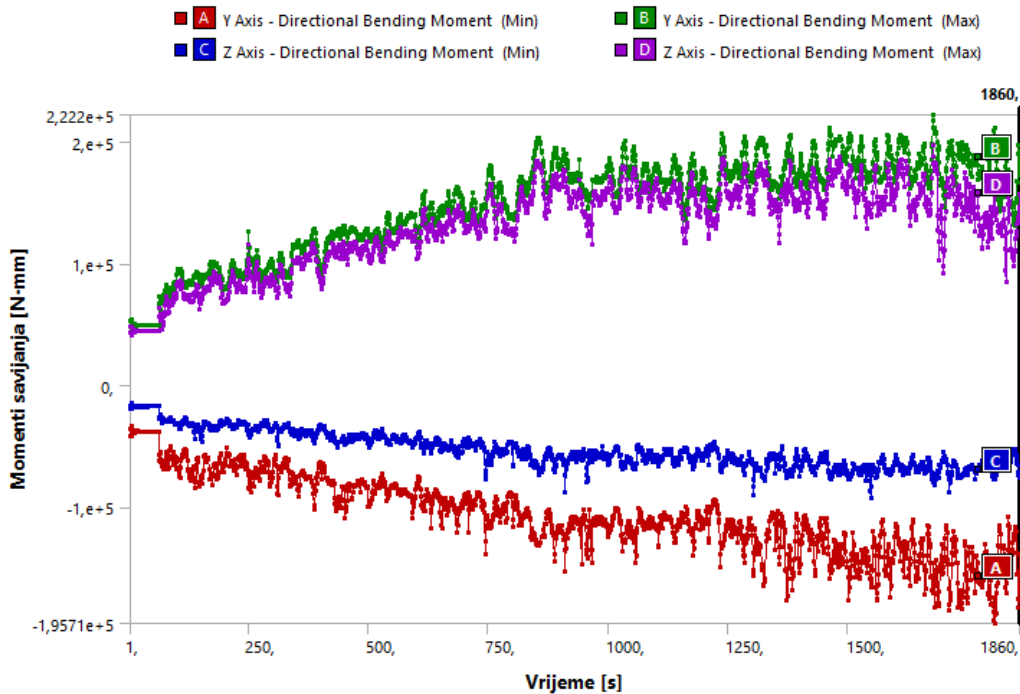


3.25 Momenti u osloncima

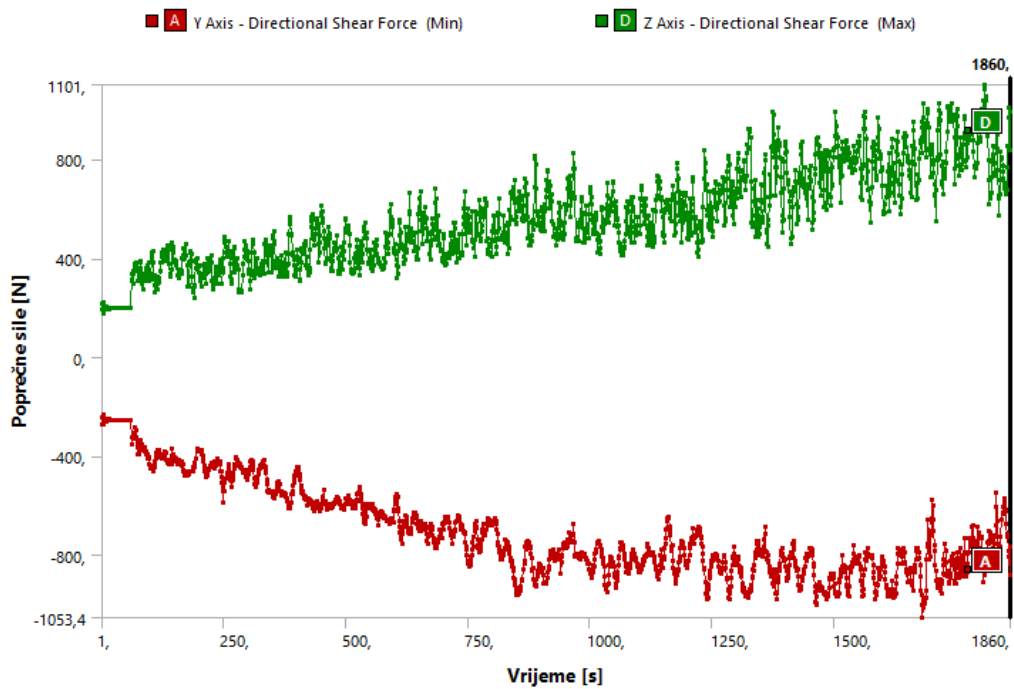
Sljedećim slikama prikazane su maksimalne rezne sile u maksimalno opterećenim elementima konstrukcije stupa.



3.26 Max uzdužne sile u elementima



3.27 Max momenti savijanja u elementima



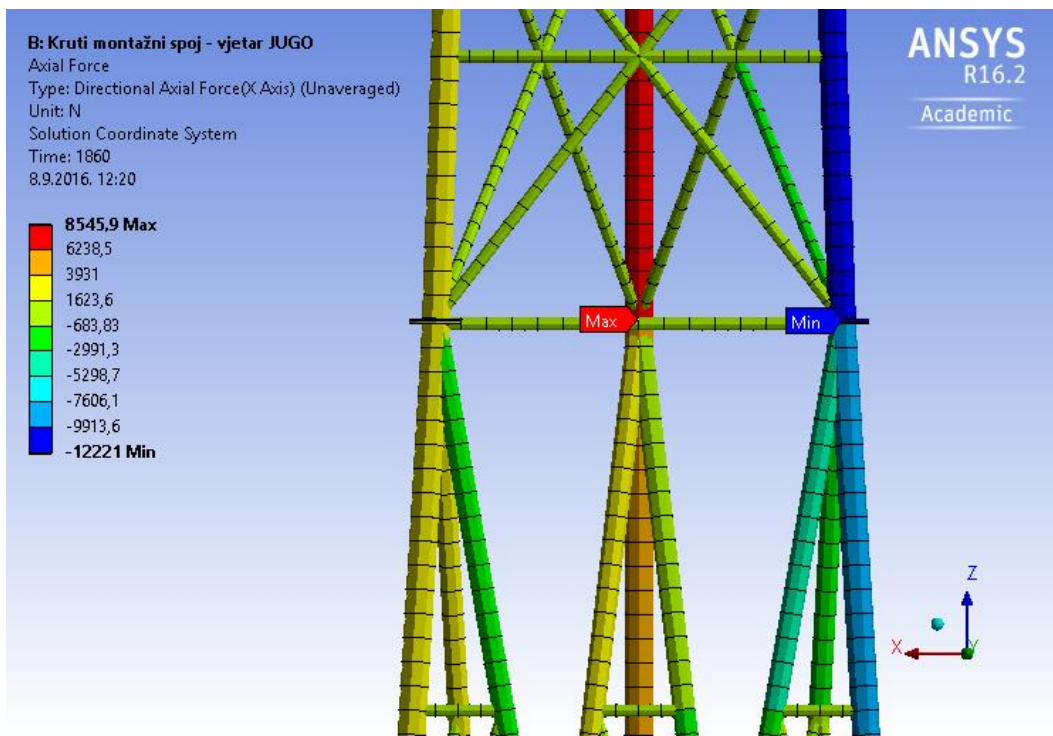
3.28 Max poprečne sile u elementima



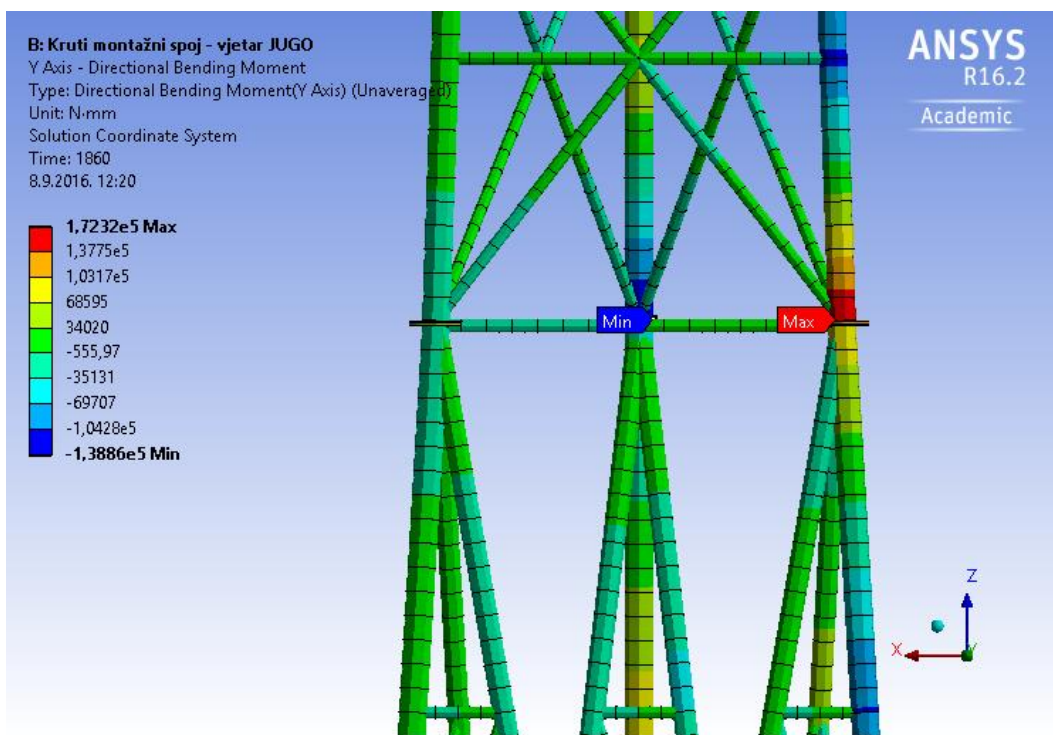
3.29 Max momenti torzije u elementima



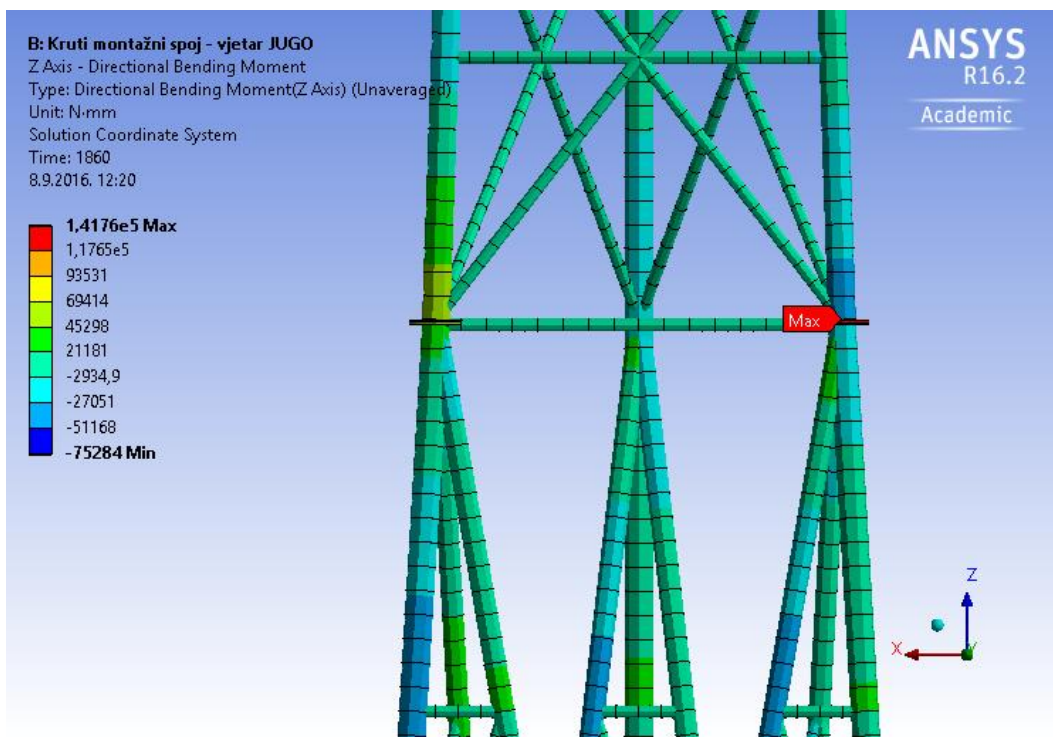
Razmatraju se rezne sile najopterećenijeg montažnog spoja u trenutku maksimalnog pomaka vrha stupa za vrijeme djelovanja juga (slike 3.30, 3.31, 3.32).



3.30 Uzdužne sile [N]

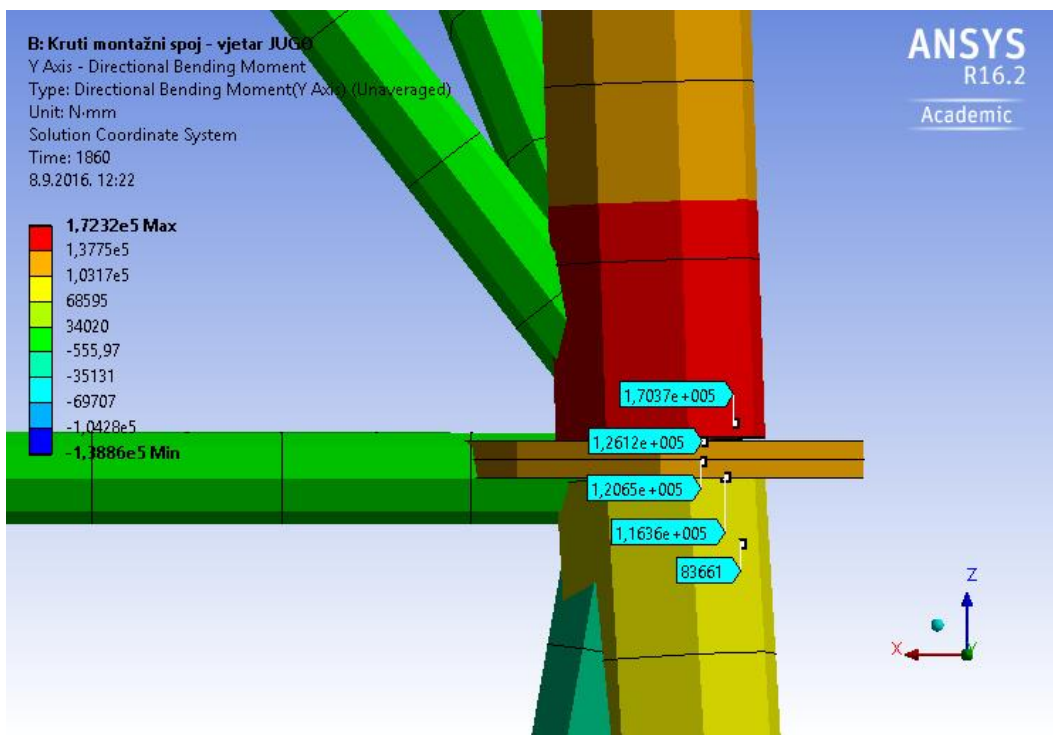


3.31 Savojni moment  $M_y$  [Nmm]



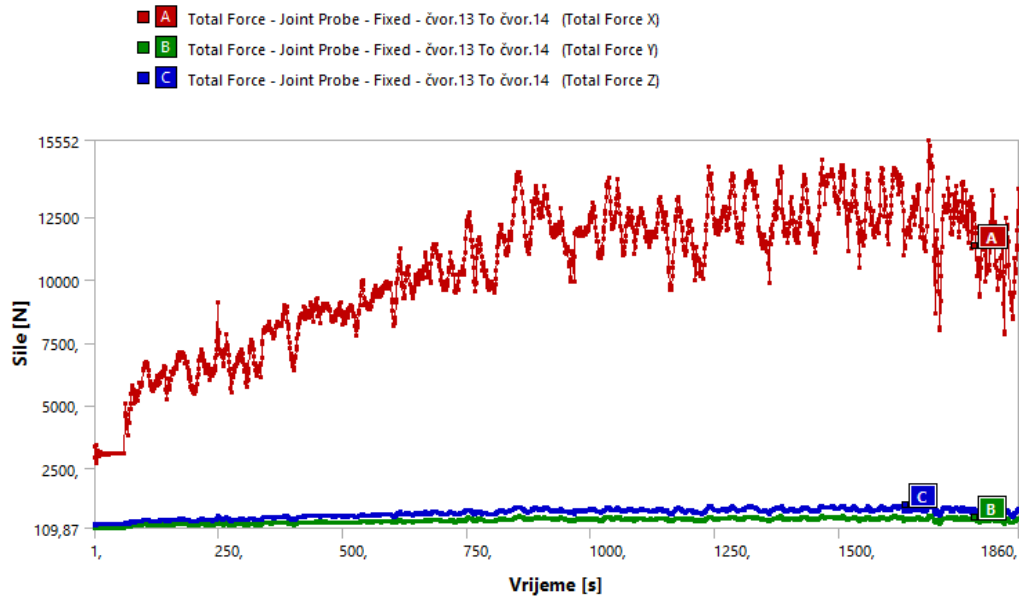
3.32 Savojni moment  $M_z$  [Nmm]

Za sliku 3.33 vrijedi sve navedeno vezano za raspodjelu momenta i krutost duž osi spoja kao i za sliku 3.17.

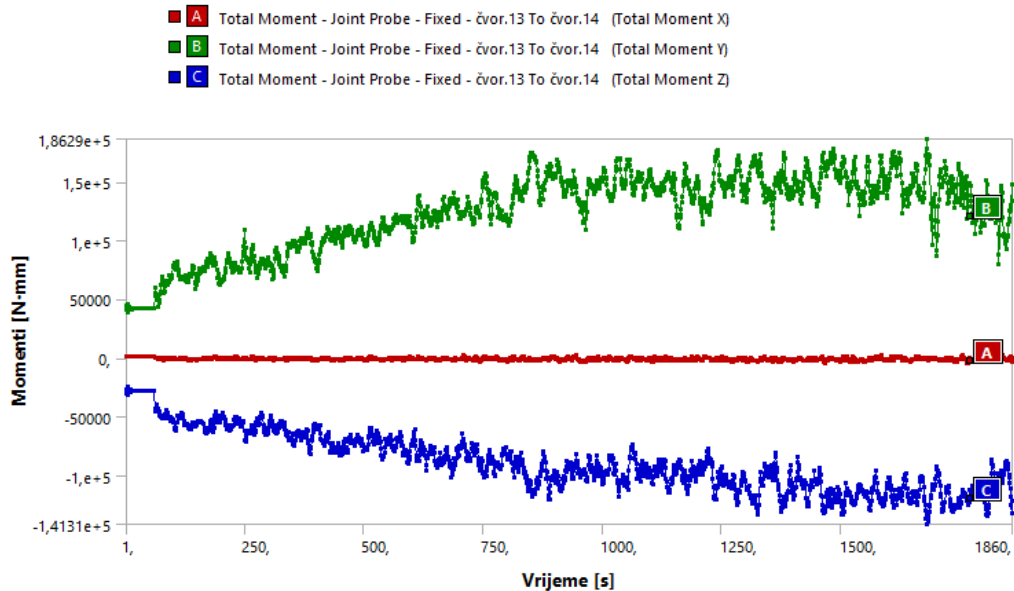


3.33 Raspodjela momenta  $M_y$  duž osi spoja

Slikama 3.34, 3.35 prikazane su rezne sile koje se javljaju u najopterećenijem montažnom spoju za vrijeme djelovanja juga. Relativni zaokreti, kao što je i očekivano, iznose 0°.



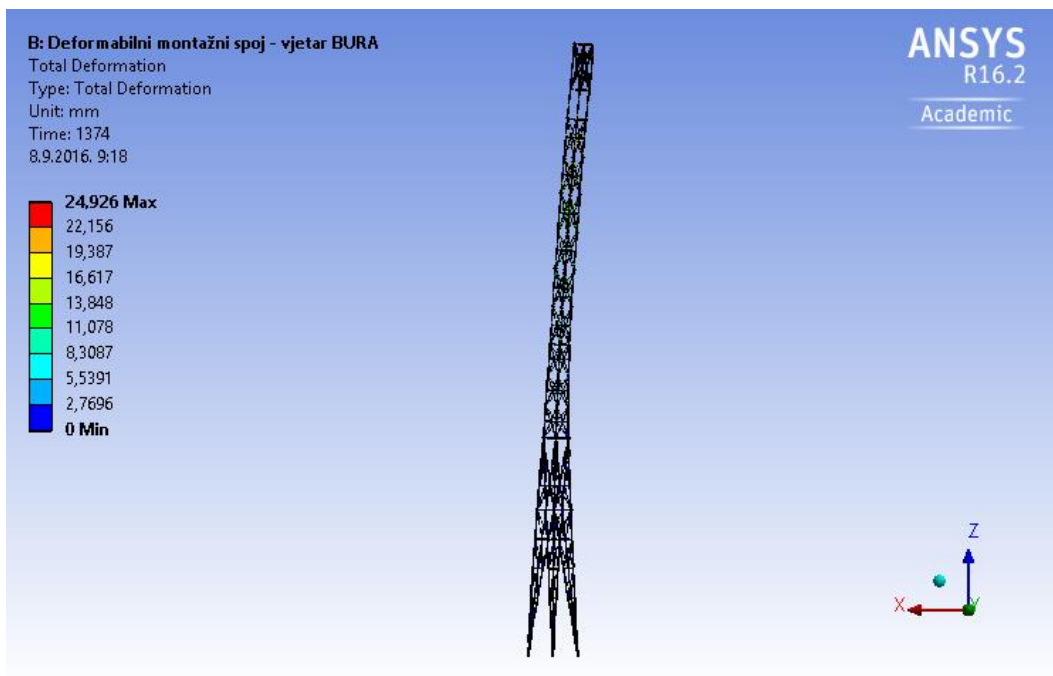
3.34 Sile u montažnom spoju



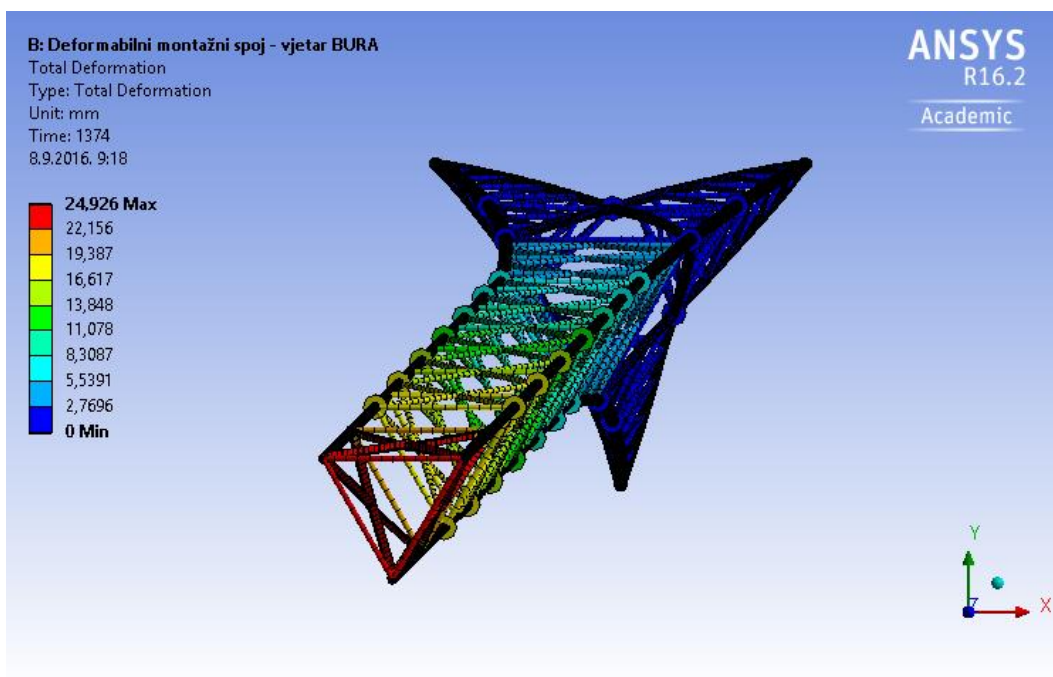
3.35 Momenti u montažnom spoju

### 3.1.3 Odgovor modela s deformabilnim spojevima na djelovanje bure

U nastavku je prikazan odgovor modela tijekom trajanja odabranog zapisa bure. Slike 3.36, 3.37 prikazuju maksimalne ukupne pomake čvorova po visini konstrukcije stupa u trenutku  $t=1374s$ .

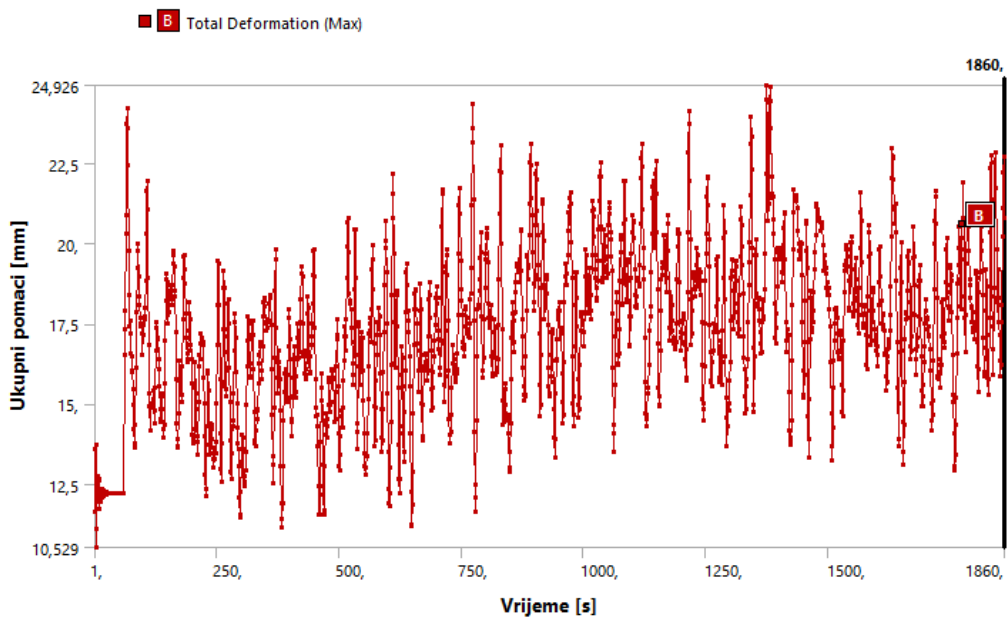


3.36 Ukupni pomaci po visini stupa - pogled [mm]

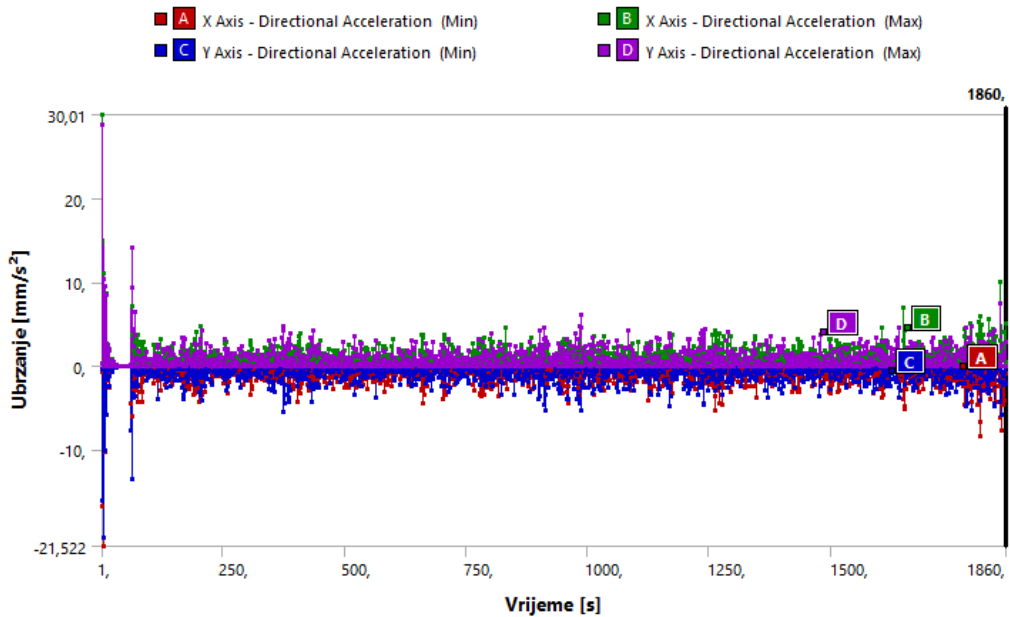


3.37 Ukupni pomaci po visini stupa - tloert [mm]

Slikama 3.38, 3.39 prikazani su pomaci i akceleracije čvorova vrha stupa.

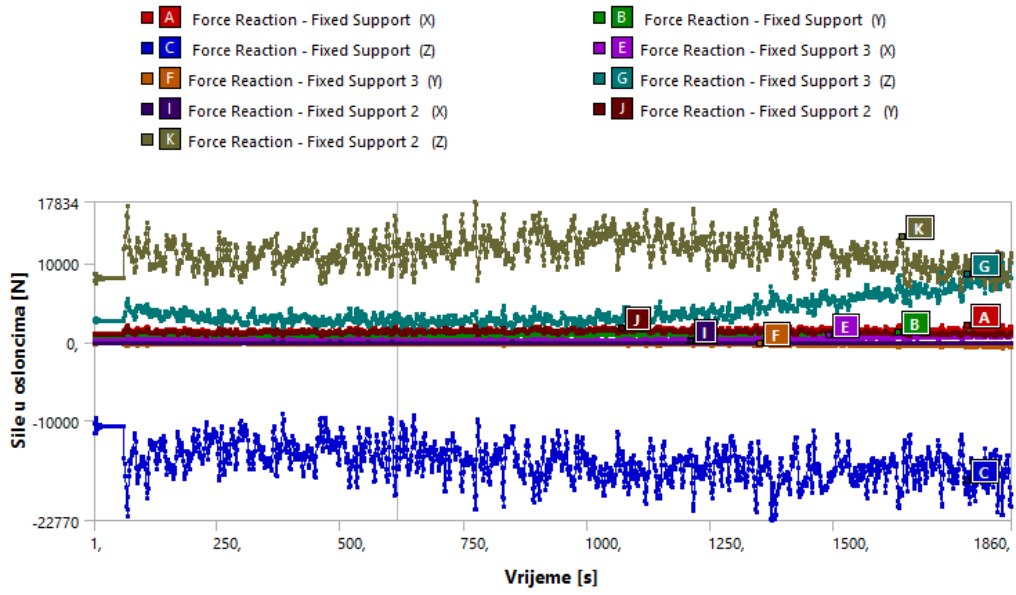


3.38 Ukupni pomaci vrha stupa

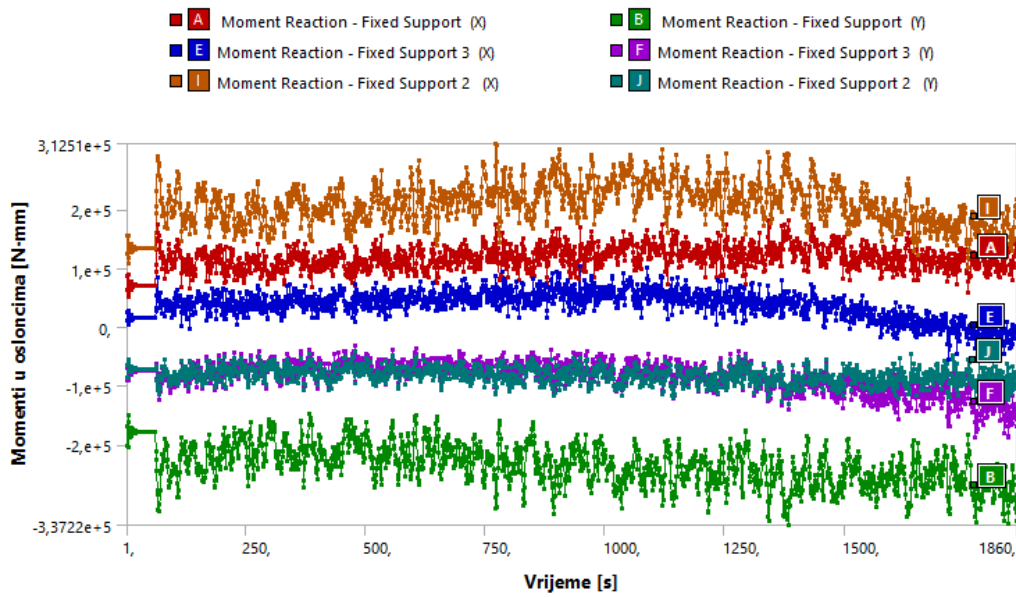


3.39 Ubrzanja vrha stupa

U nastavku su prikazani odgovori upetog spoja stup temelj.



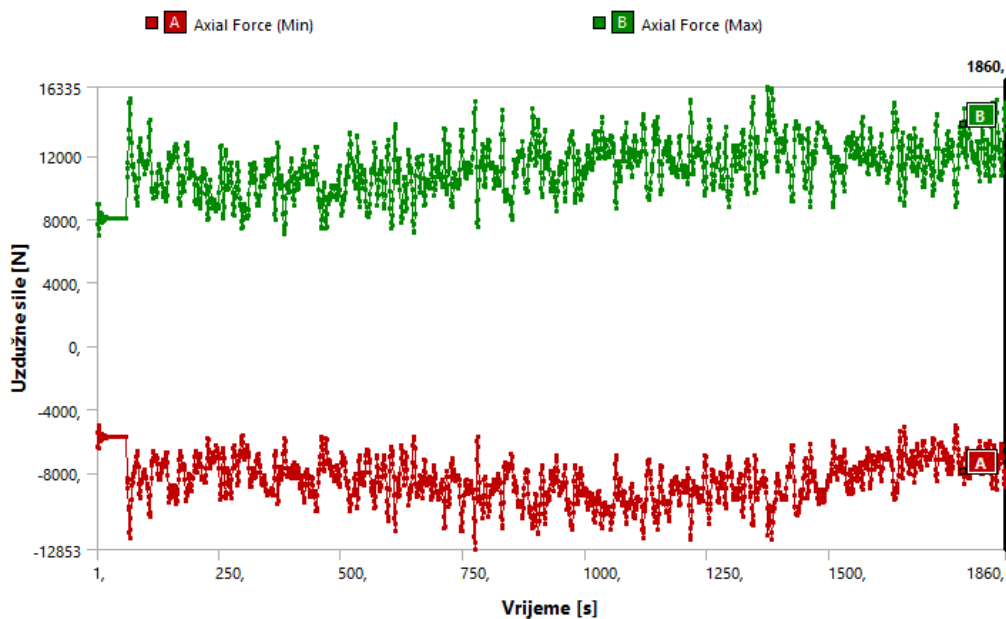
3.40 Sile u osloncima



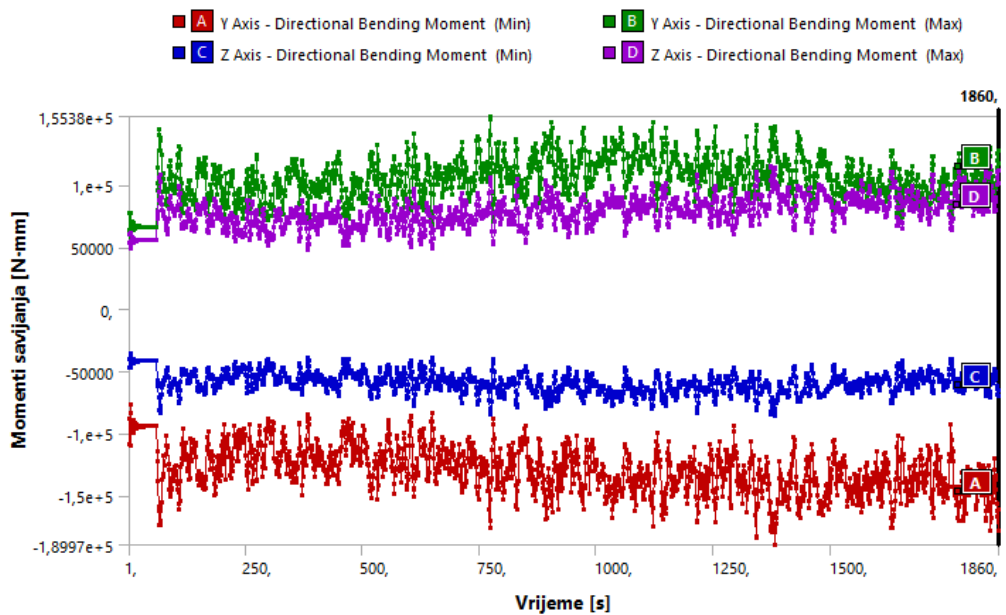
3.41 Momenti u osloncima



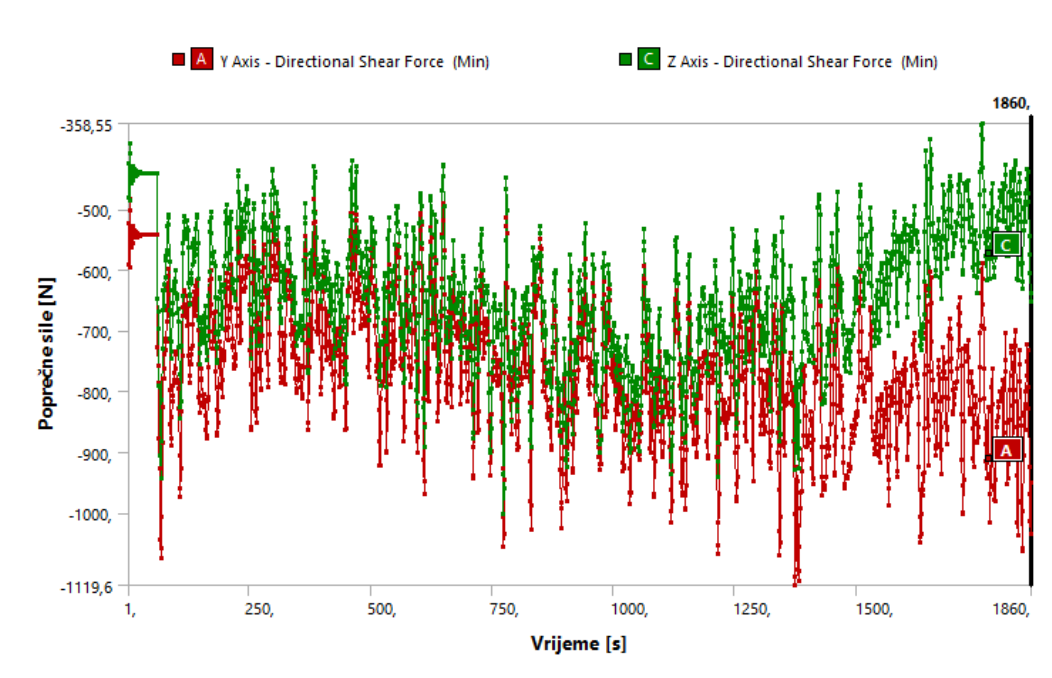
Sljedećim slikama prikazane su maksimalne rezne sile u maksimalno opterećenim elementima konstrukcije stupa.



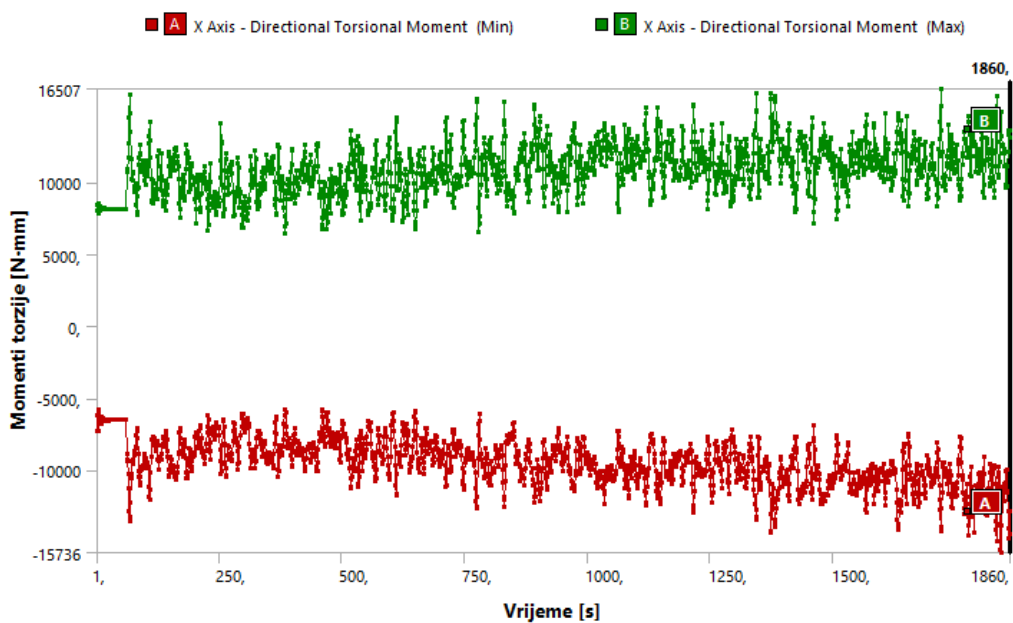
3.42 Max uzdužne sile u elementima



3.43 Max momenti savijanja u elementima



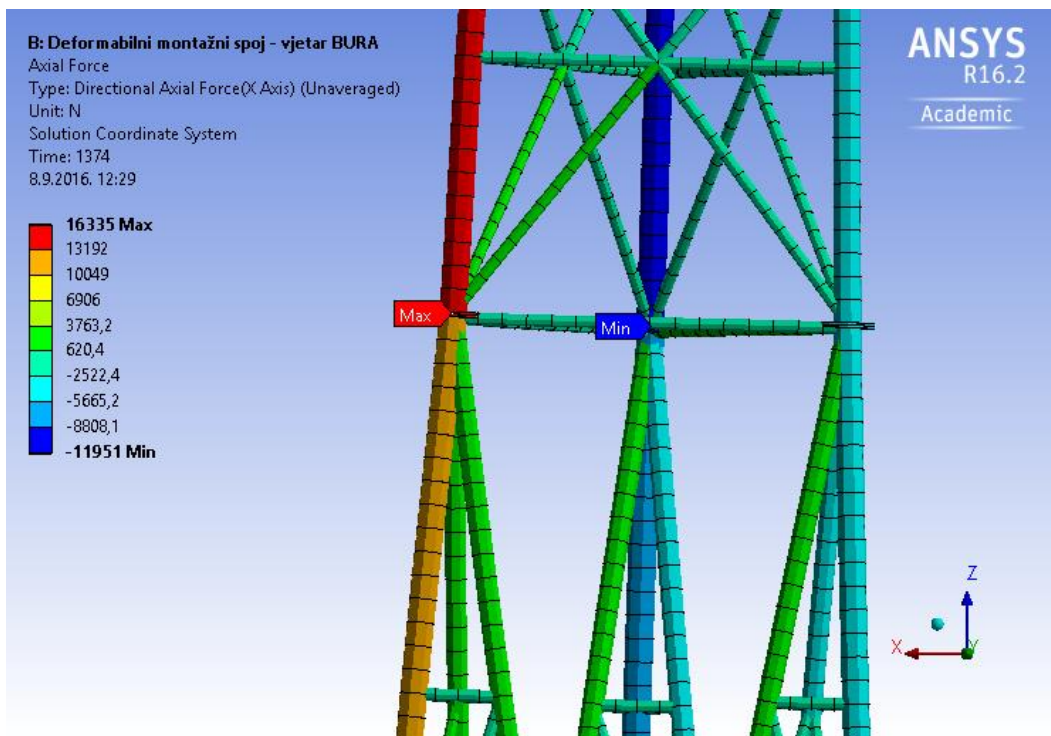
### 3.44 Max poprečne sile u elementima



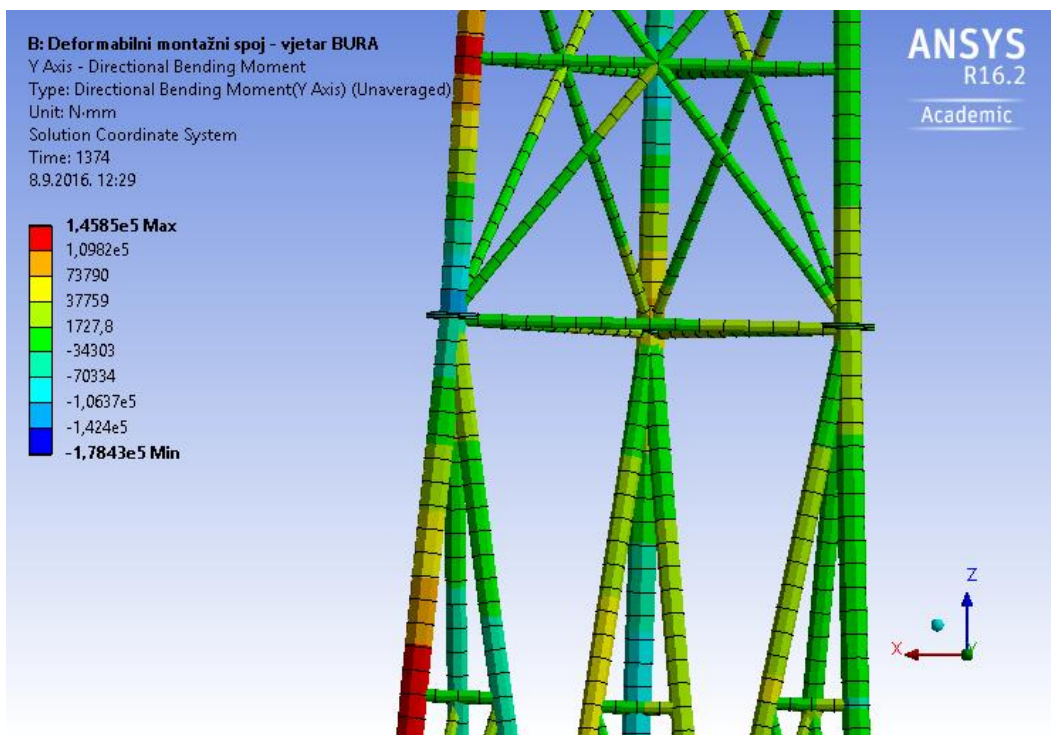
### 3.45 Max momenti torzije u elementima



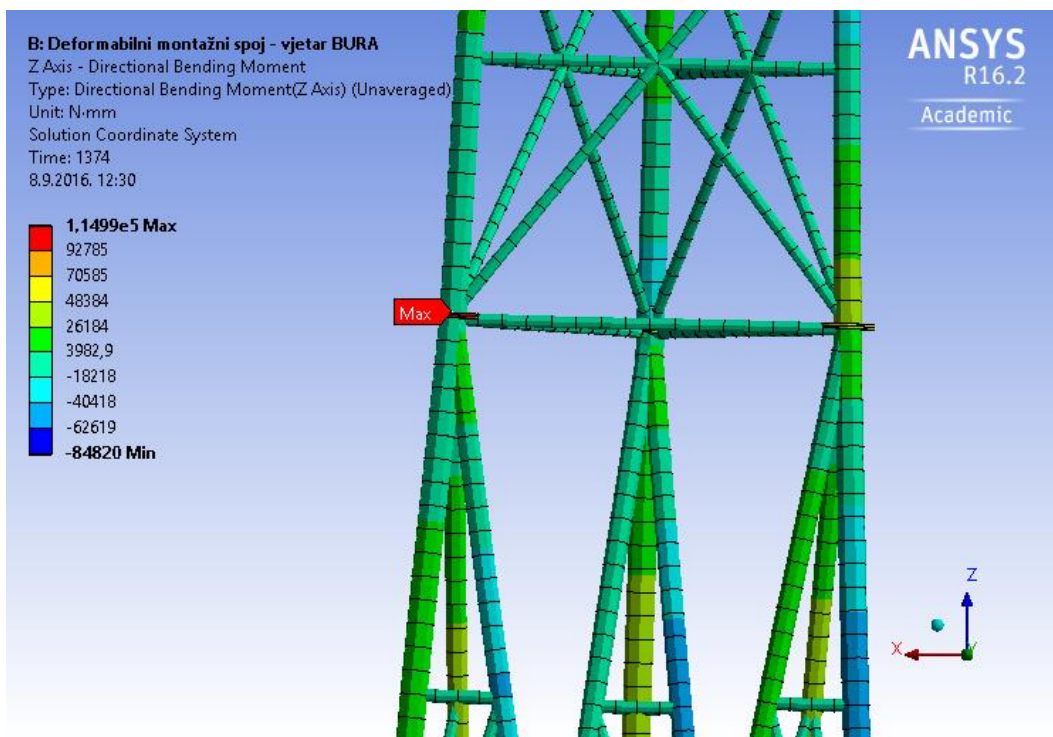
Razmatraju se rezne sile najopterećenijeg montažnog spoja u trenutku maksimalnog pomaka vrha stupa za vrijeme djelovanja bure (slike 3.46, 3.47, 3.48).



3.46 Uzdužne sile [N]

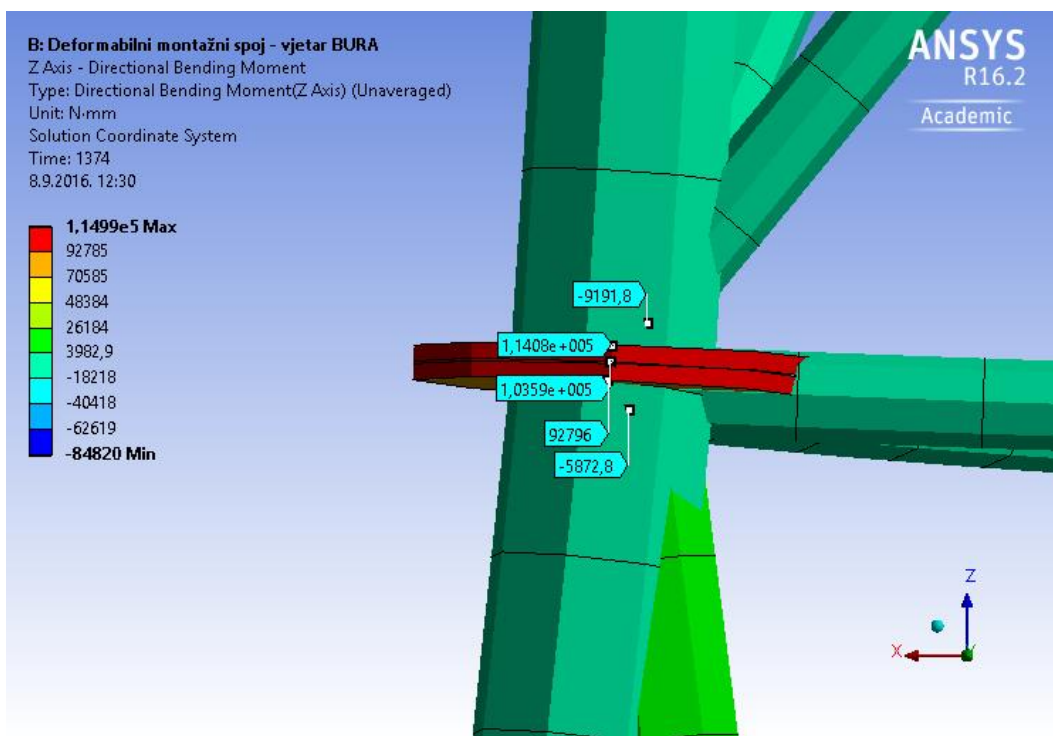


3.47 Savojni moment  $M_y$  [Nmm]



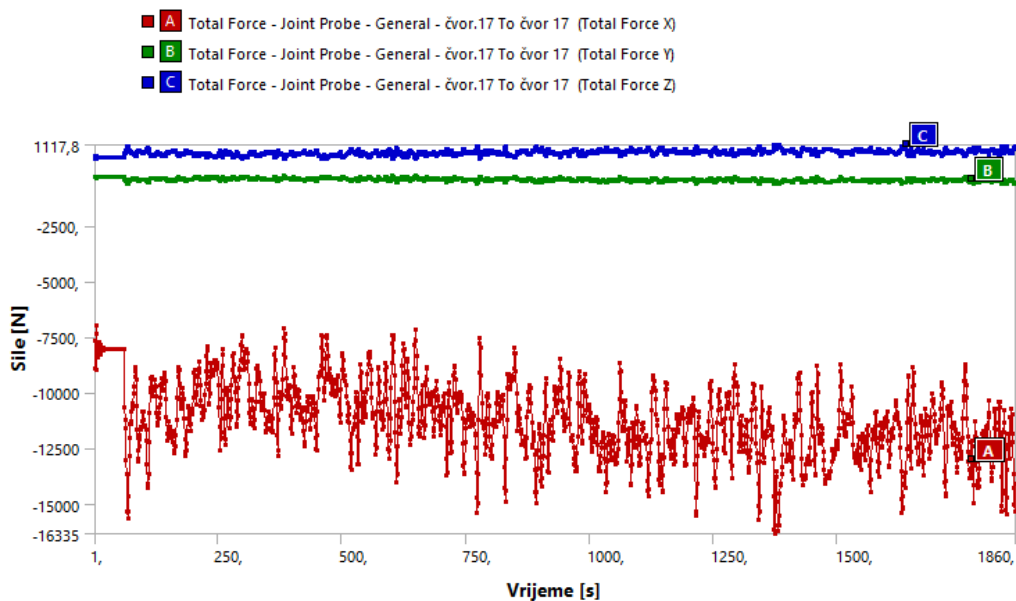
3.48 Savojni moment  $M_z$  [Nmm]

Usporedbom rezultata modela s krutim spojevima i modela s deformabilnim spojevima vidljivo je da deformabilni spoj preuzima manje momente (slika 3.49) u odnosu na momente krutog spoja (slika 3.17) za identično opterećenje uslijed djelovanja bure.

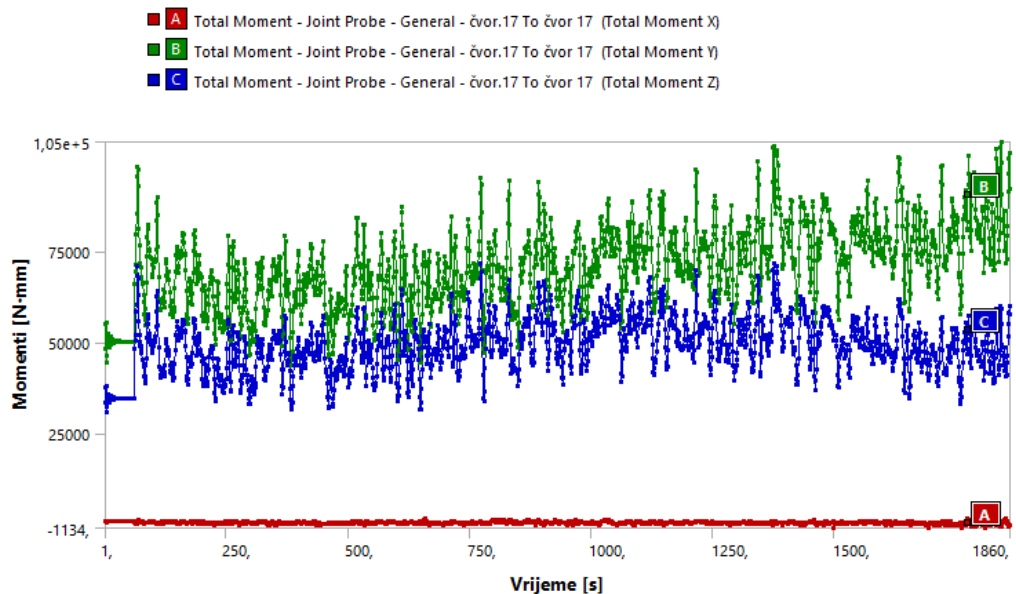


3.49 Raspodjela momenta  $M_y$  duž osi spoja

Slikama 3.50, 3.51, 3.52 prikazane su rezne sile i pripadajući zaokreti koje se javljaju u najopterećenijem montažnom deformabilnom spoju za vrijeme djelovanja bure .

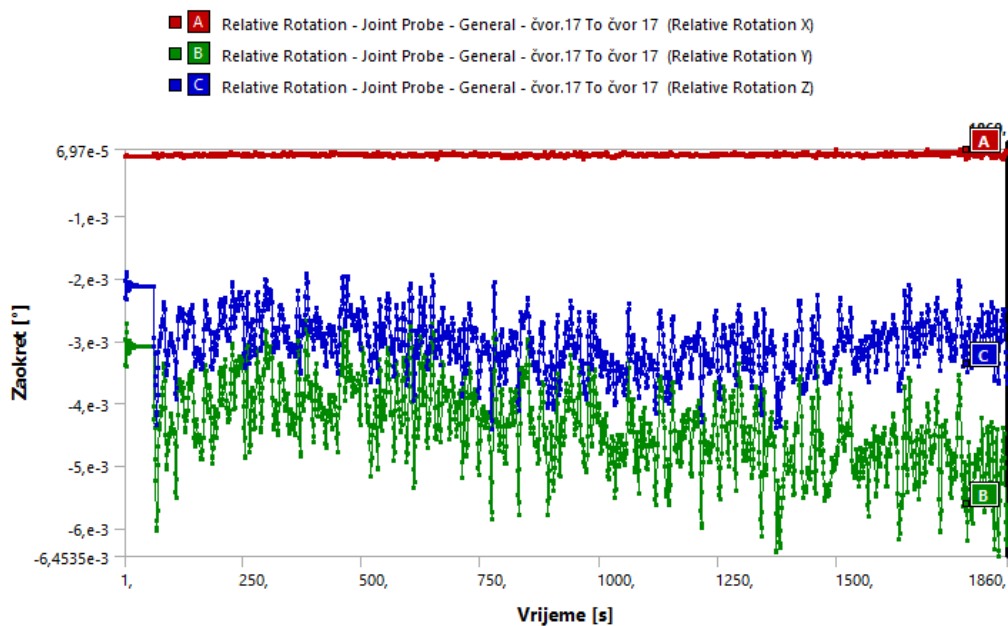


3.50 Sile u montažnom spoju



3.51 Momenti u montažnom spoju

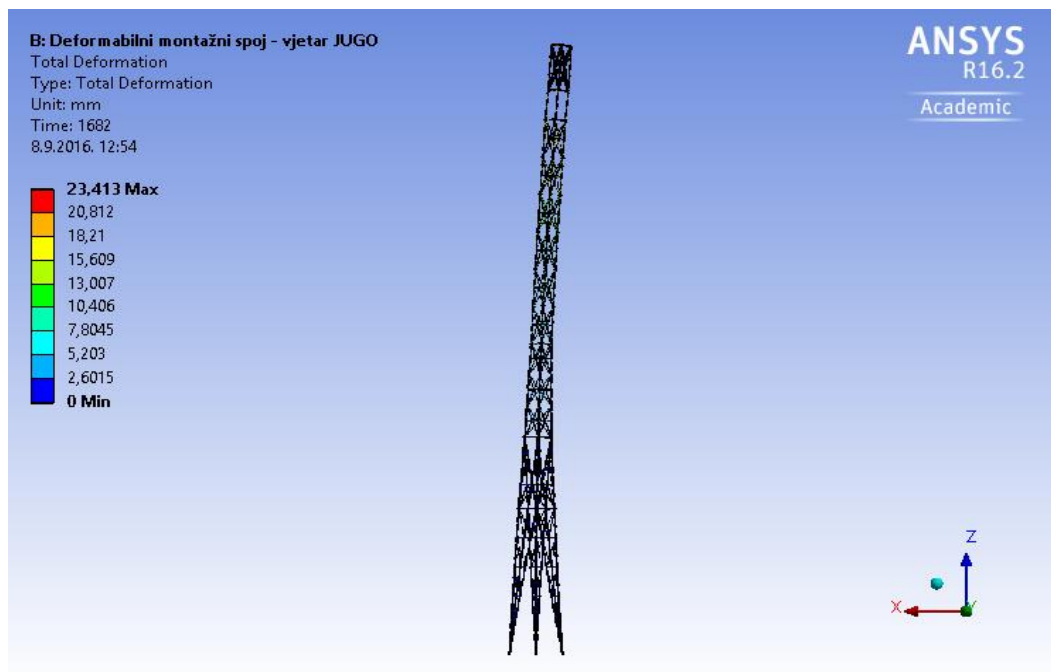
Relativne torzijske rotacije spoja oko lokalne osi x su zanemarive u odnosu na relativne rotacije uslijed savojnih deformacija.



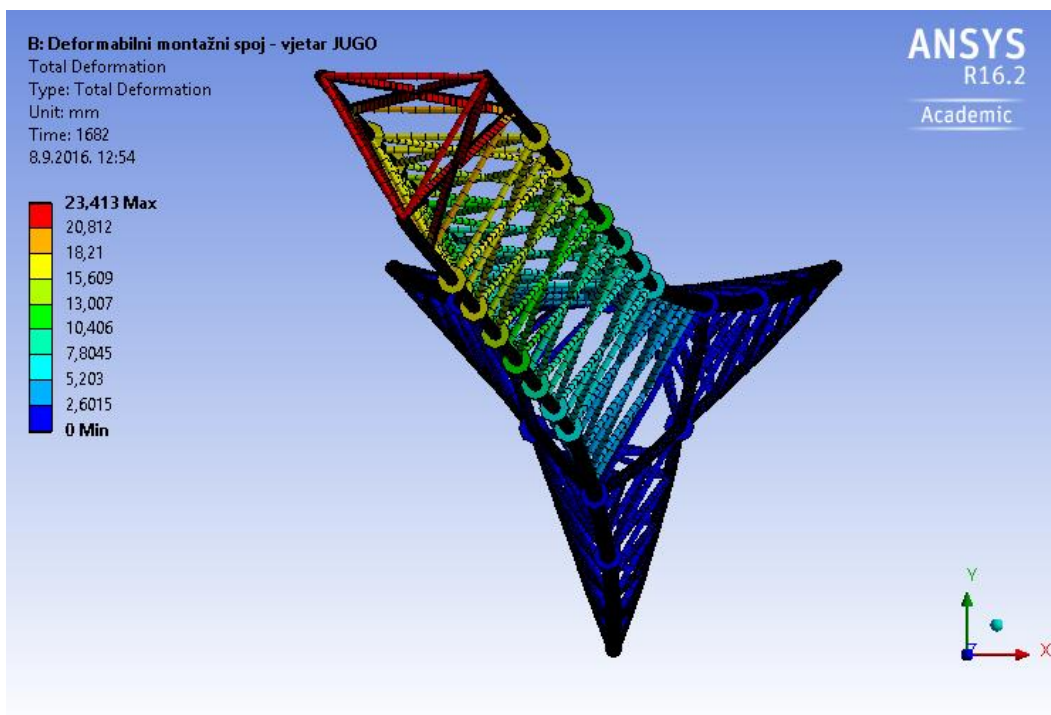
### 3.52 Zaokreti montažnog spoja

### 3.1.4 Odgovor modela s deformabilnim spojevima na djelovanje juga

U nastavku je prikazan odgovor modela tijekom trajanja odabranog zapisa juga. Slike 3.53, 3.54 prikazuju maksimalne ukupne pomake čvorova po visini konstrukcije stupa u trenutku  $t=1682s$ .

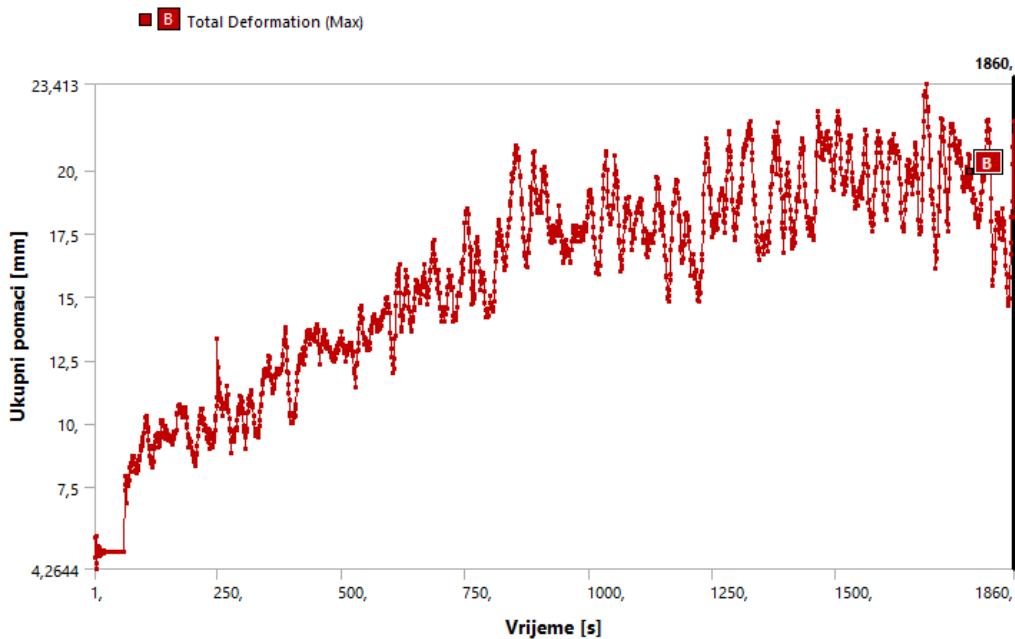


3.53 Ukupni pomaci po visini stupa - pogled [mm]

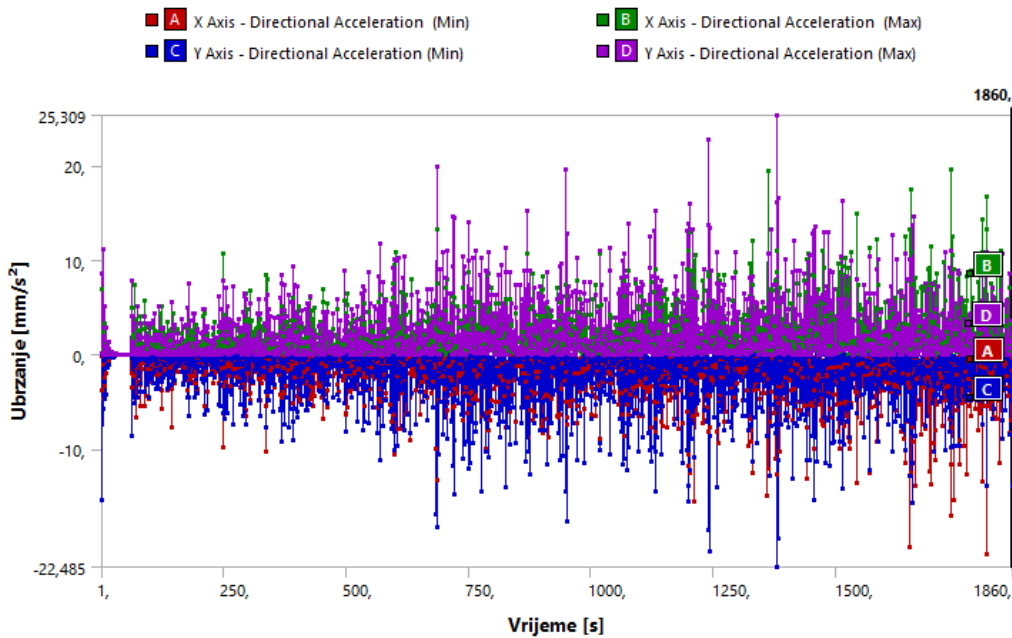


3.54 Ukupni pomaci po visini stupa - tlocrt [mm]

Slikama 3.55, 3.56 prikazani su pomaci i akceleracije čvorova vrha stupa.



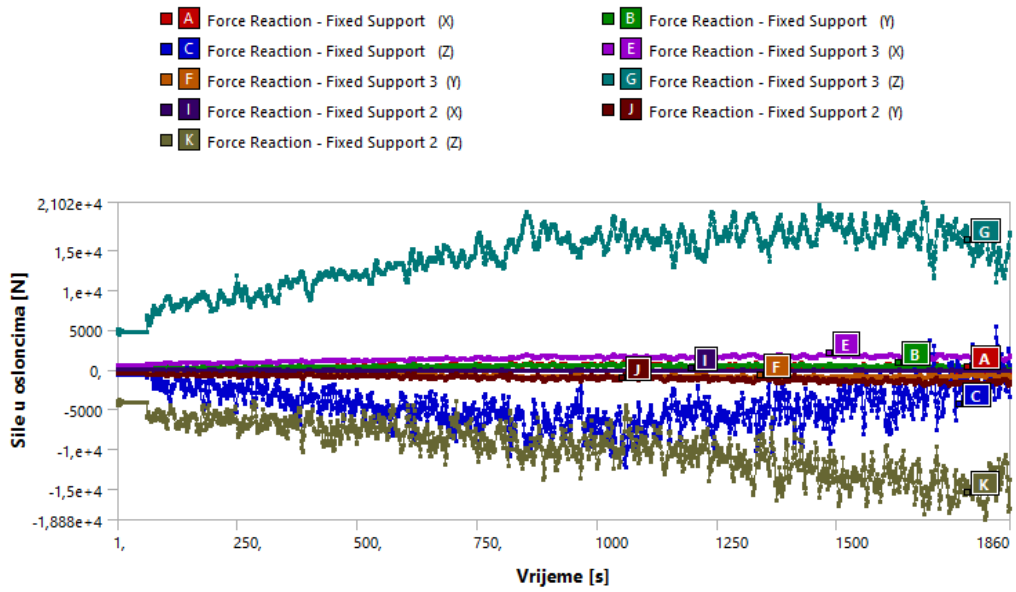
3.55 Ukupni pomaci vrha stupa



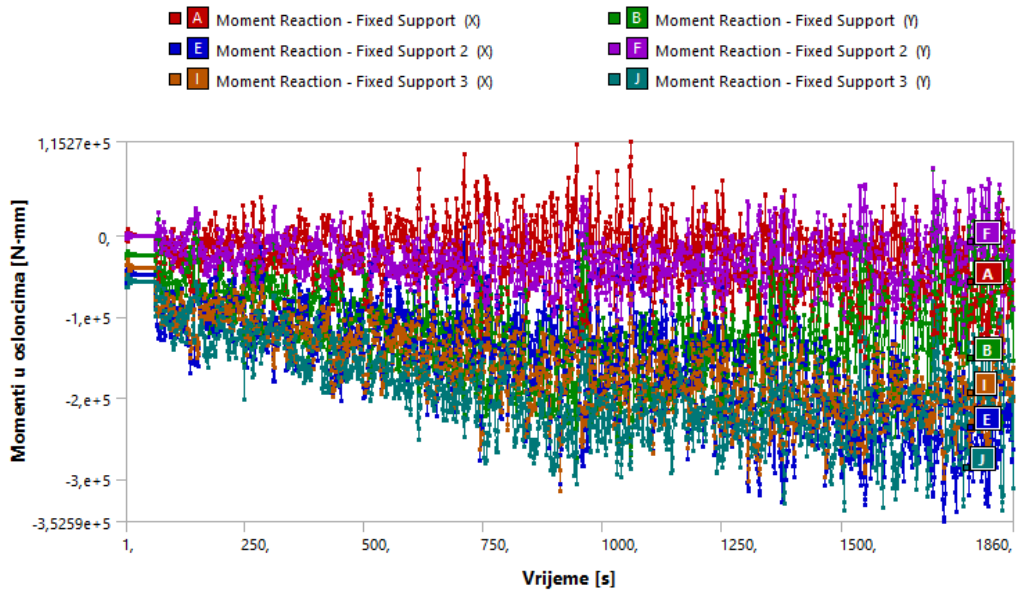
3.56 Ubrzanja vrha stupa



U nastavku su prikazani odgovori upetog spoja stup temelj.

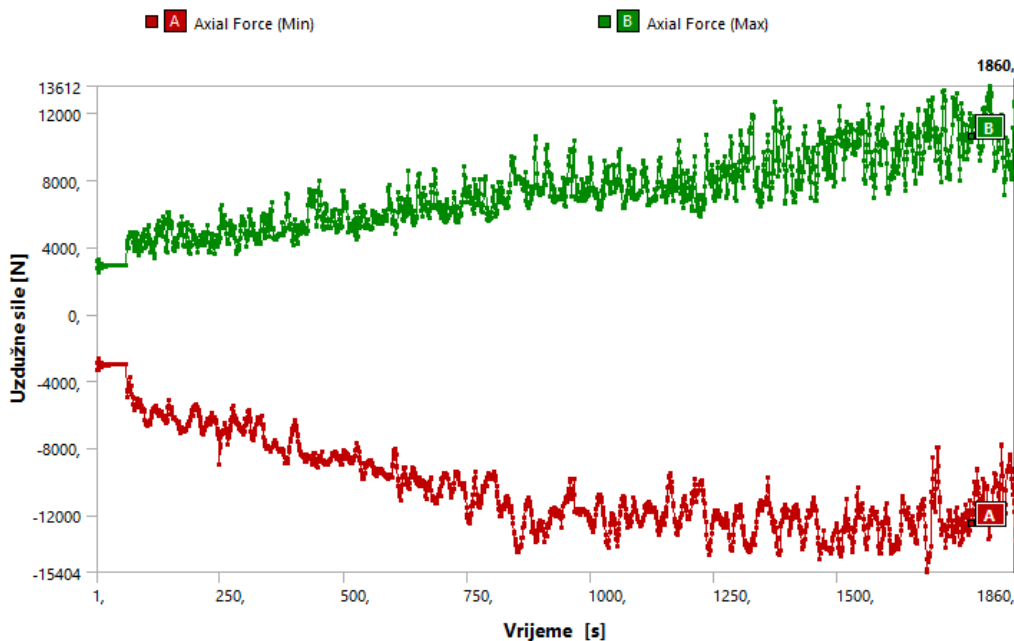


3.57 Sile u osloncima

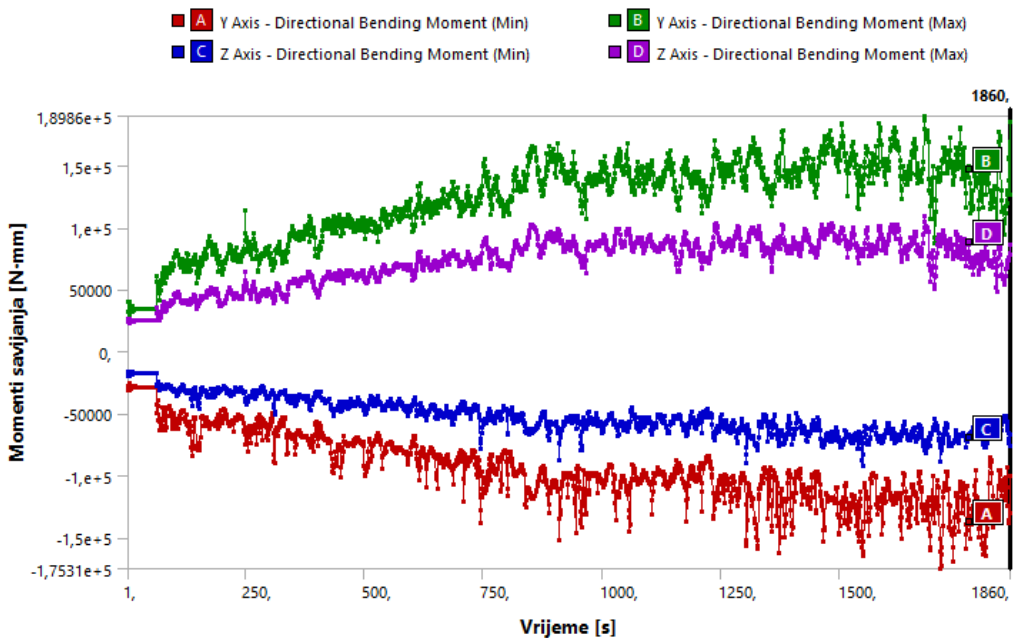


3.58 Momenti u osloncima

Sljedećim slikama prikazane su maksimalne rezne sile u maksimalno opterećenim elementima konstrukcije stupa.

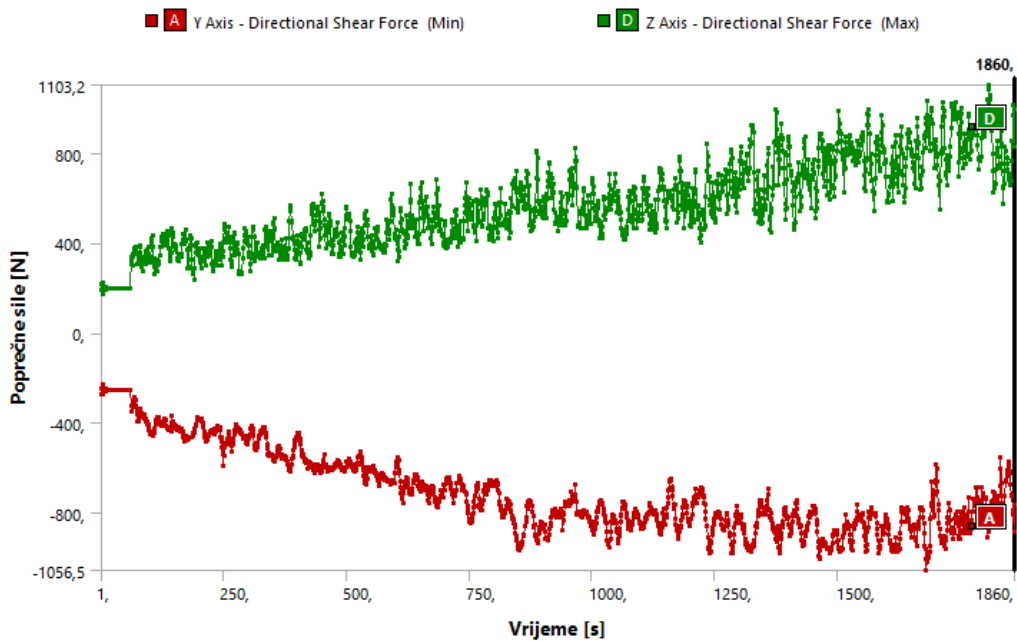


3.59 Max uzdužne sile u elementima

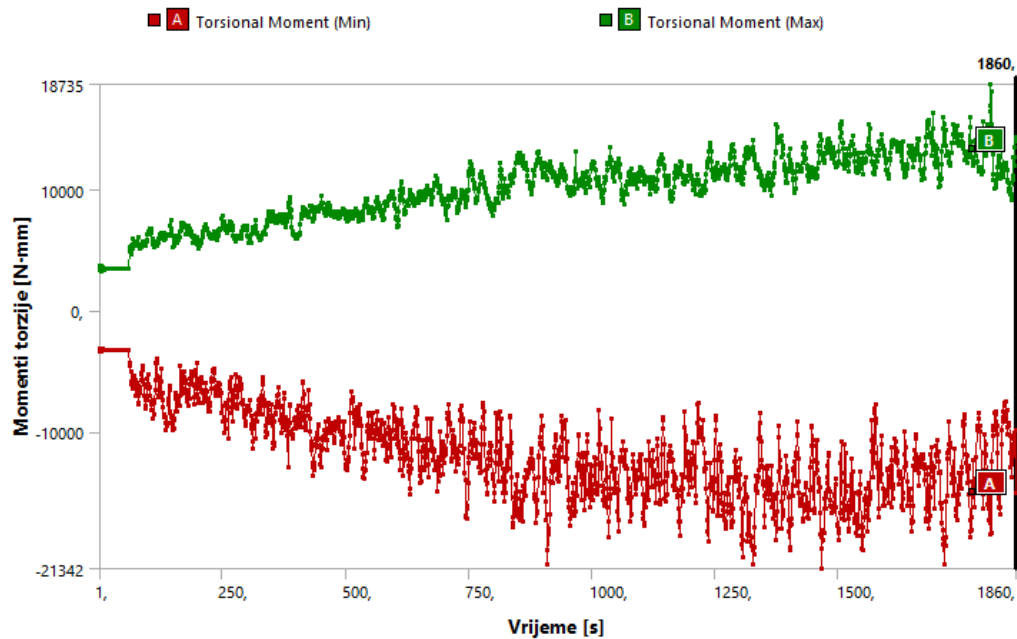


3.60 Max momenti savijanja u elementima



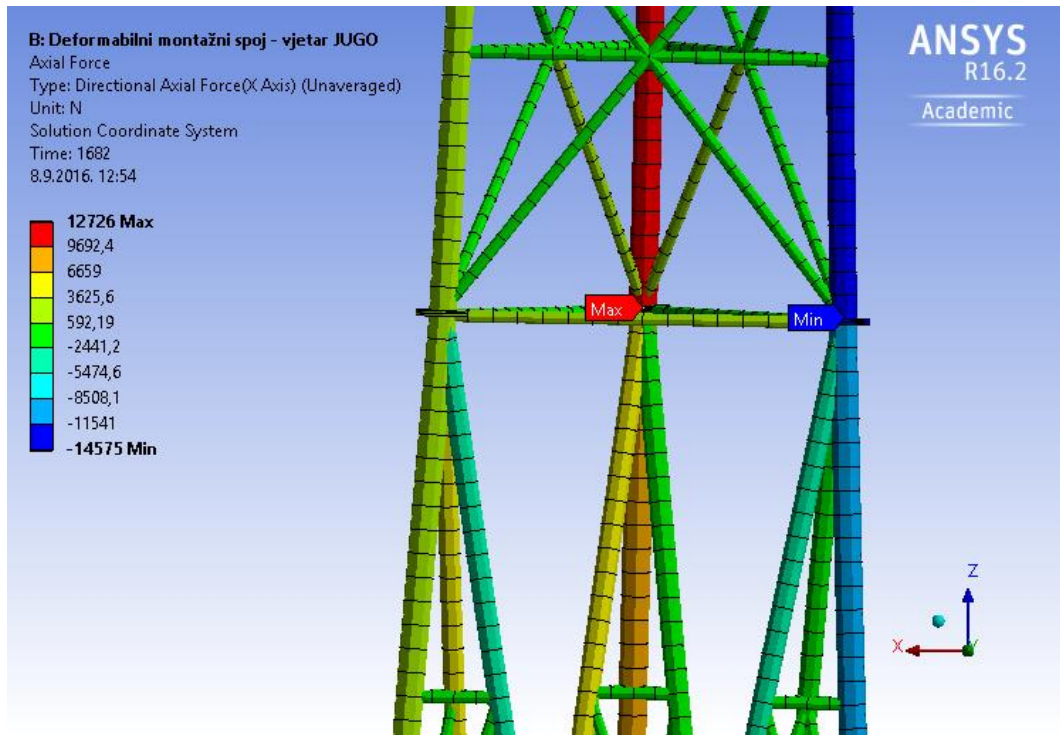


3.61 Max poprečne sile u elementima

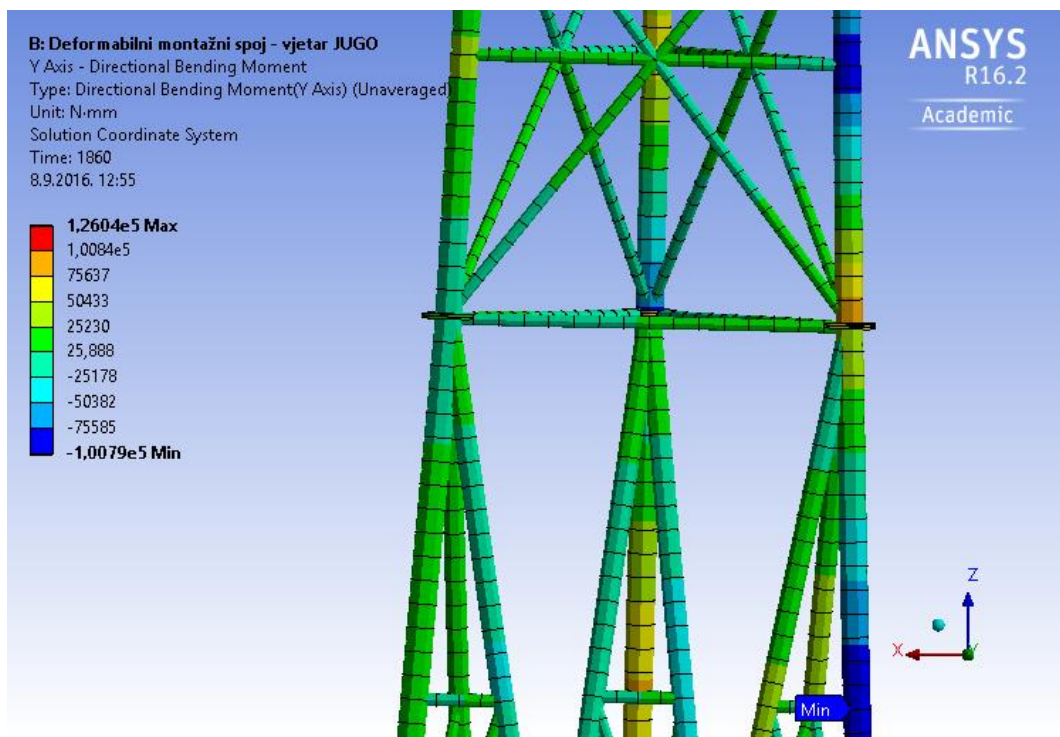


3.62 Max momenti torzije u elementima

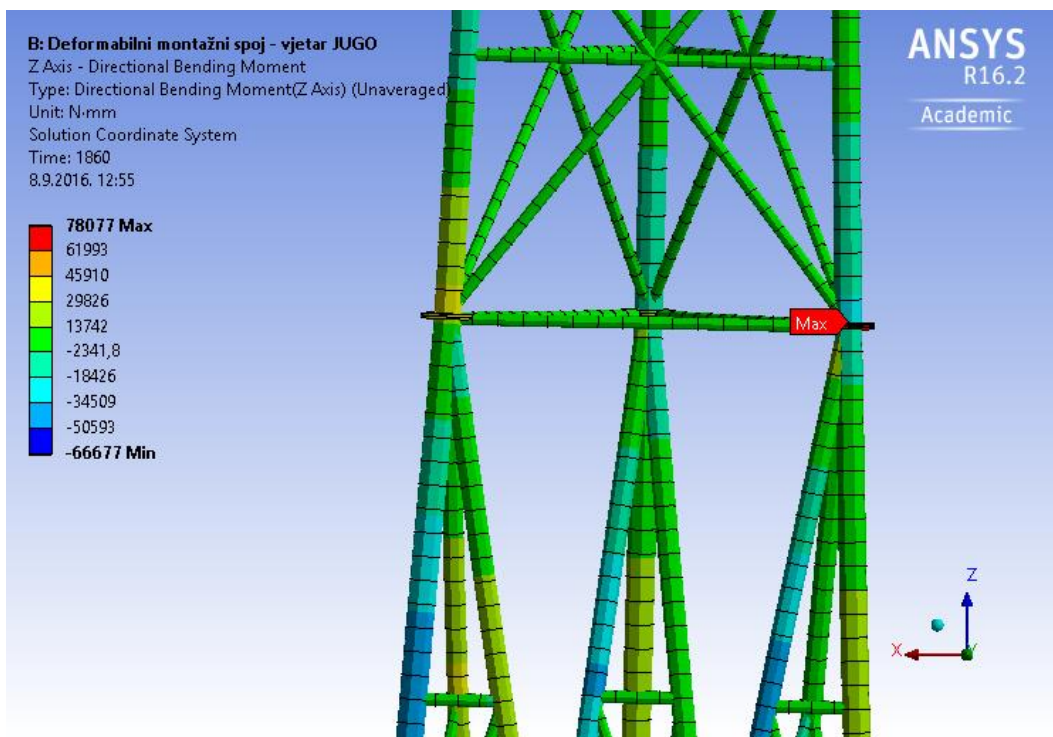
Razmatraju se rezne sile najopterećenijeg montažnog spoja u trenutku maksimalnog pomaka vrha stupa za vrijeme djelovanja juga (slike 3.63, 3.64, 3.65).



3.63 Uzdužne sile [N]

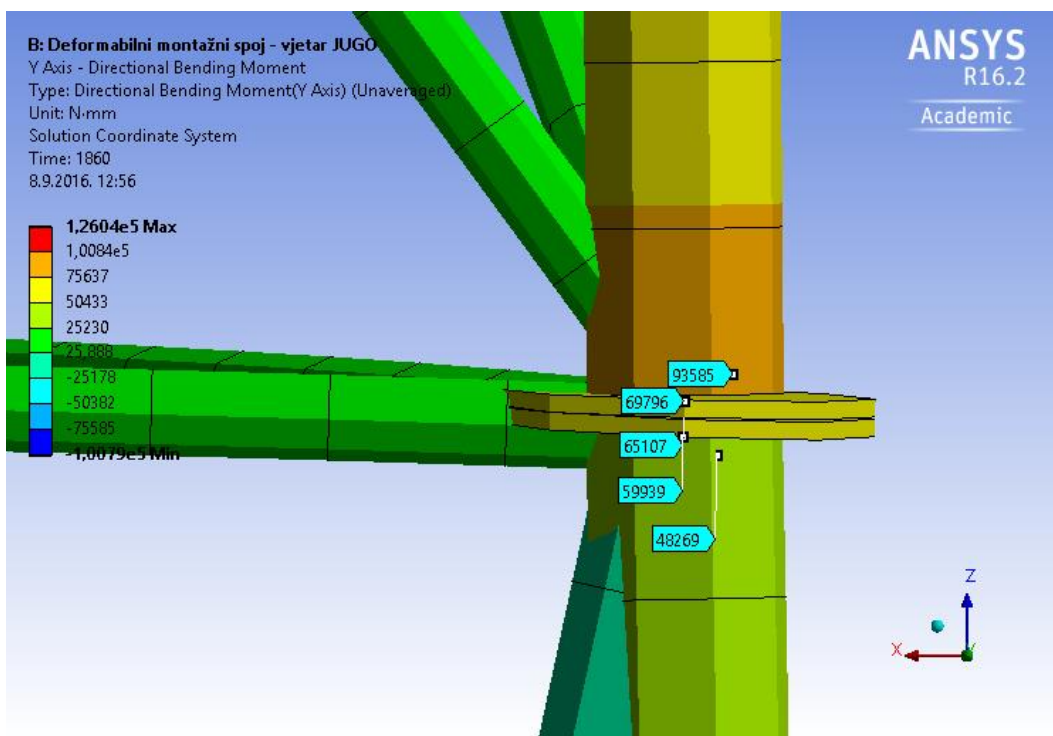


3.64 Savojni moment  $M_y$  [Nmm]



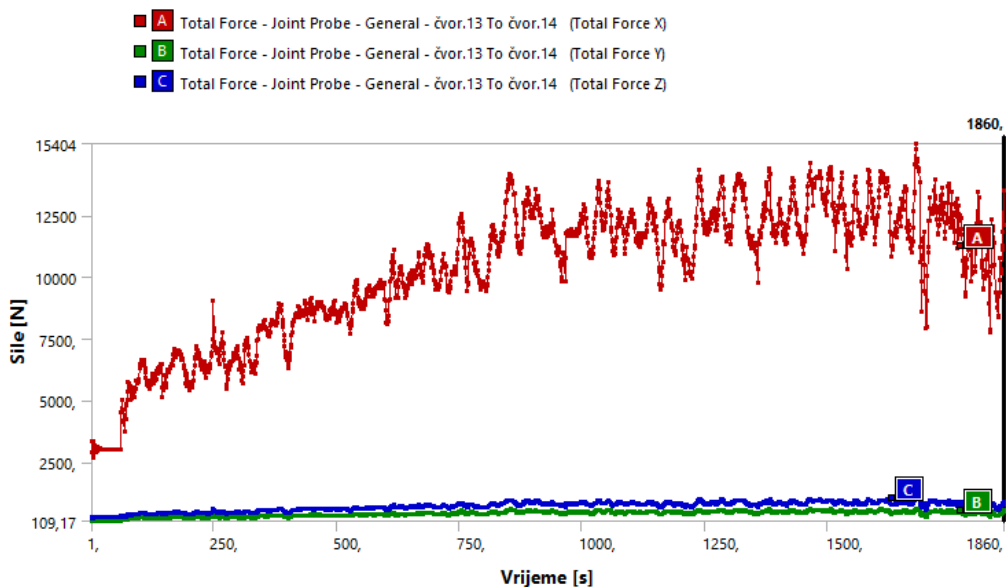
3.65 Savojni moment  $M_z$  [Nmm]

Usporedbom rezultata modela s krutim spojevima i modela s deformabilnim spojevima vidljivo je da deformabilni spoj preuzima manje momente (slika 3.66) u odnosu na momente krutog spoja (slika 3.33) za identično opterećenje djelovanja juga.

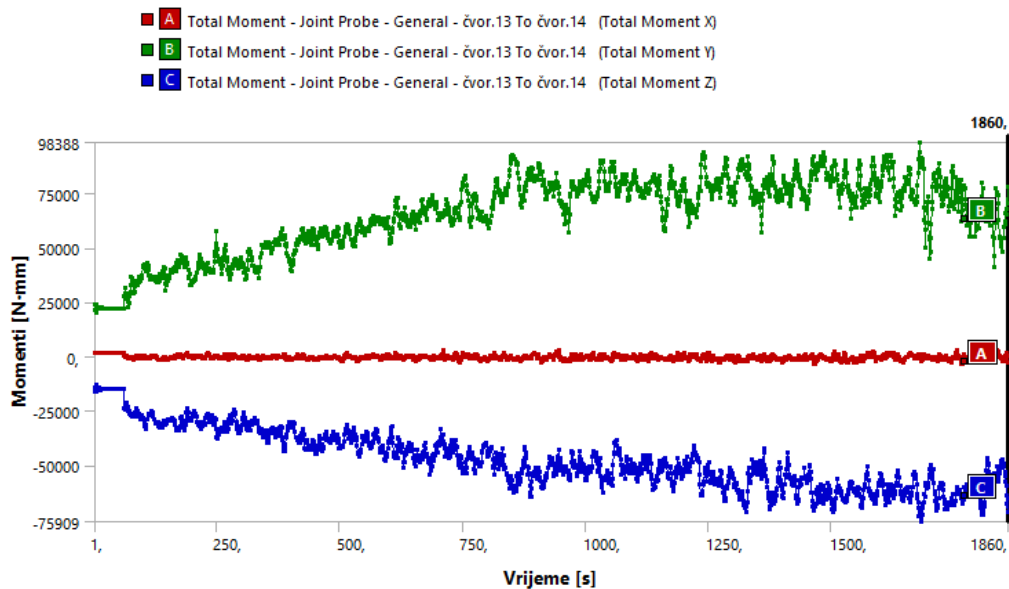


3.66 Raspodjela momenta  $M_y$  duž osi spoja

Slikama 3.67, 3.68, 3.69 prikazane su rezne sile i pripadajući zaokreti koji se javljaju u najopterećenijem montažnom deformabilnom spoju za vrijeme djelovanja juga .

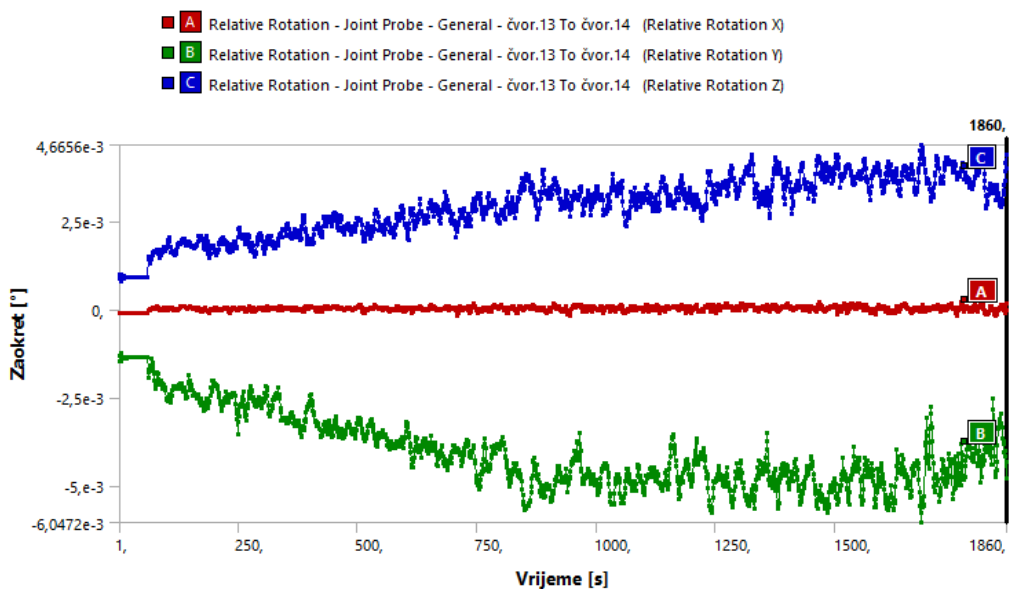


3.67 Sile u montažnom spoju



3.68 Momenti u montažnom spoju

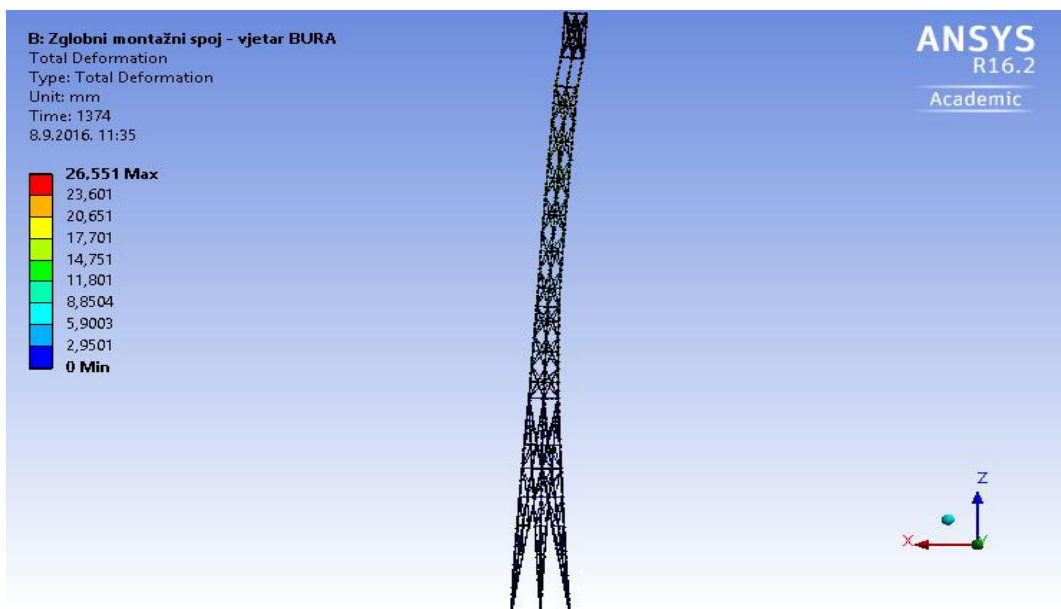
Relativne torzijske rotacije spoja oko lokalne osi x su zanemarive u odnosu na relativne rotacije uslijed savojnih deformacija.



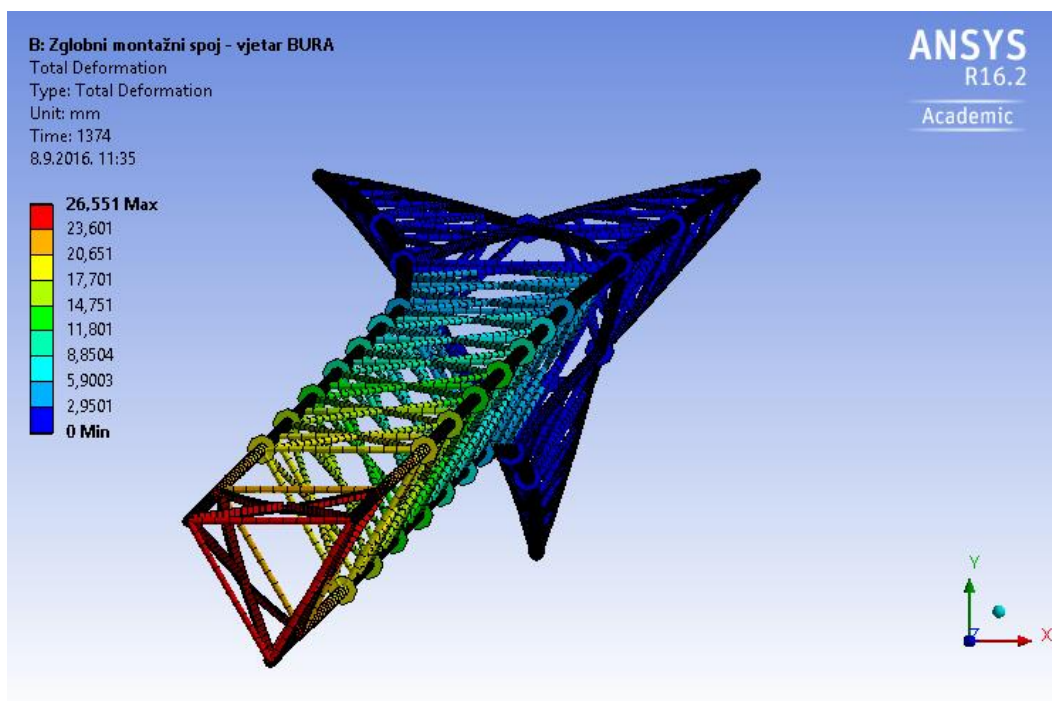
### 3.69 Zaokreti montažnog spoja

### 3.1.5 Odgovor modela sa zglobnim spojevima na djelovanje bure

U nastavku je prikazan odgovor modela tijekom trajanja odabranog zapisa bure. Slike 3.70, 3.71 prikazuju maksimalne ukupne pomake čvorova po visini konstrukcije stupa u trenutku  $t=1374s$ .



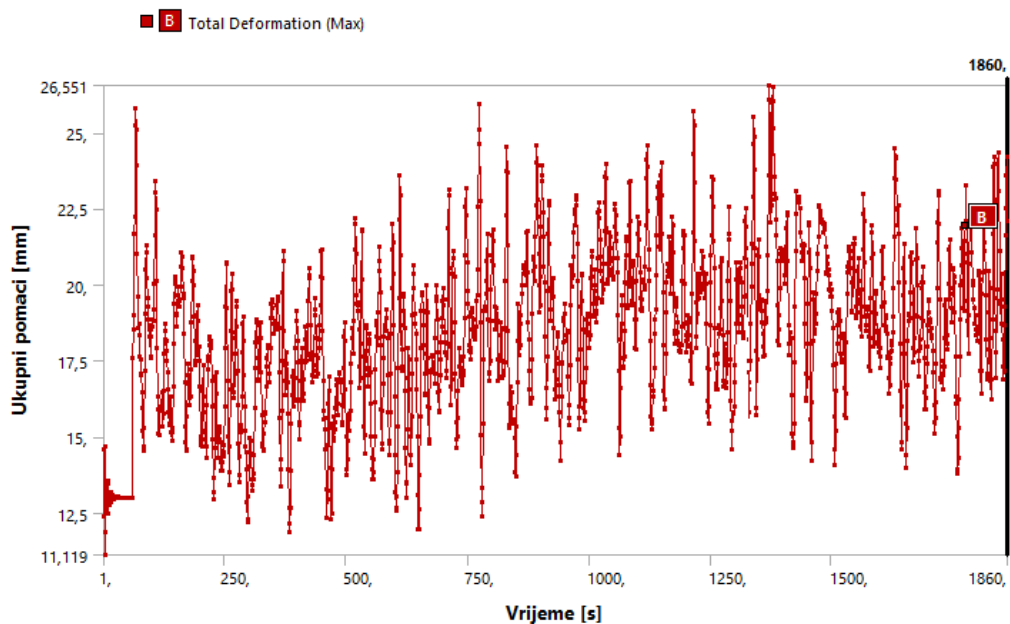
3.70 Ukupni pomaci po visini stupa - pogled [mm]



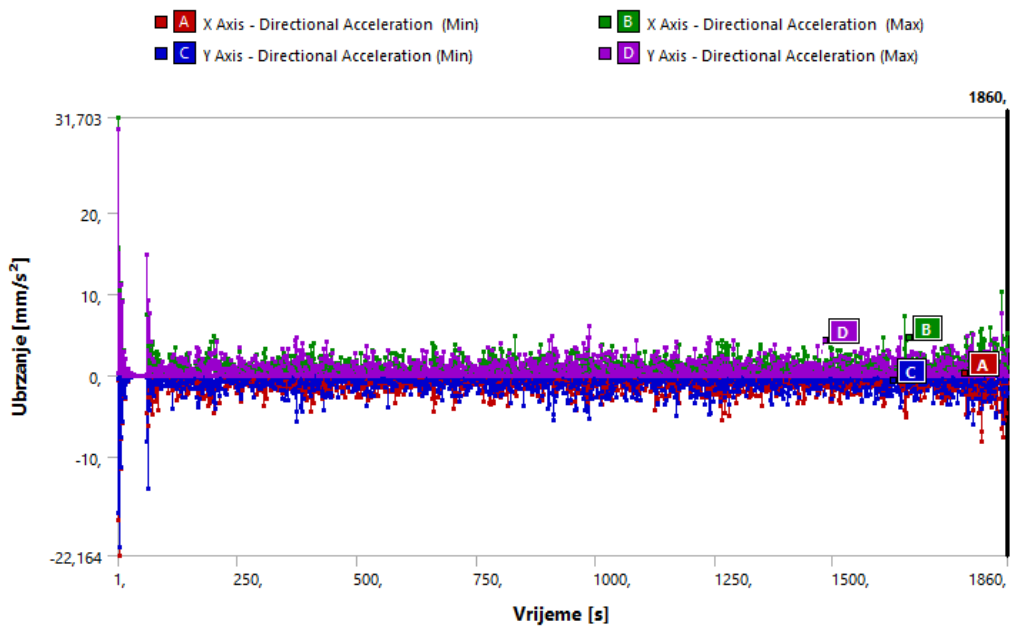
3.71 Ukupni pomaci po visini stupa - tlocrt [mm]



Slikama 3.72, 3.73 prikazani su pomaci i akceleracije čvorova vrha stupa.

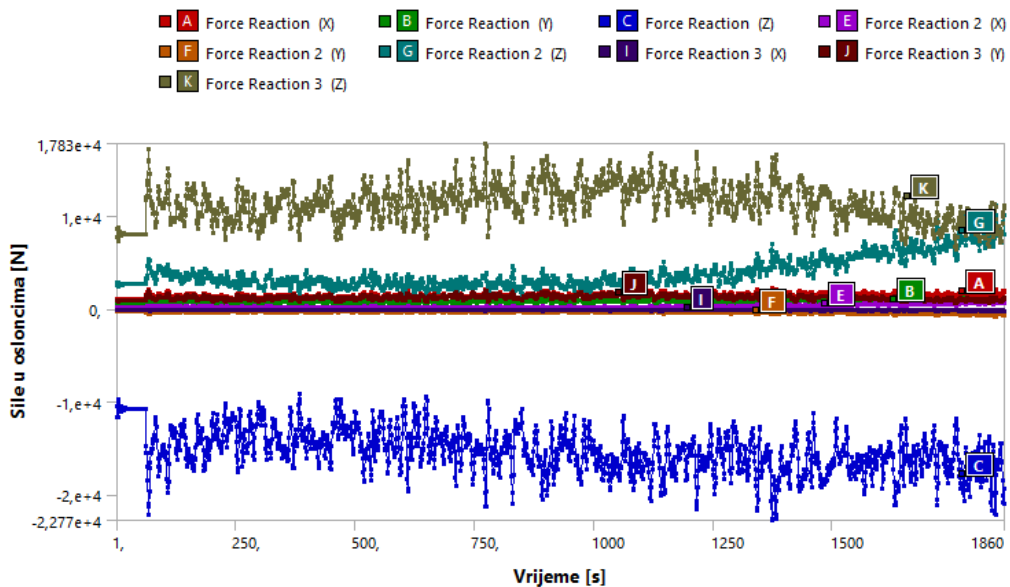


3.72 Ukupni pomaci vrha stupa

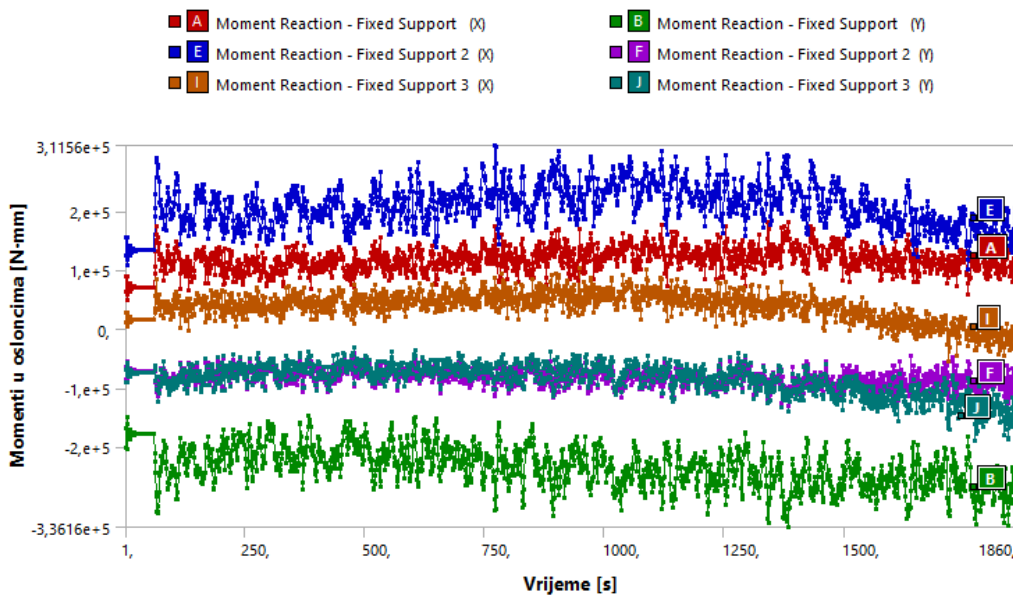


3.73 Ubrzanja vrha stupa

U nastavku su prikazani odgovori upetog spoja stup temelj.



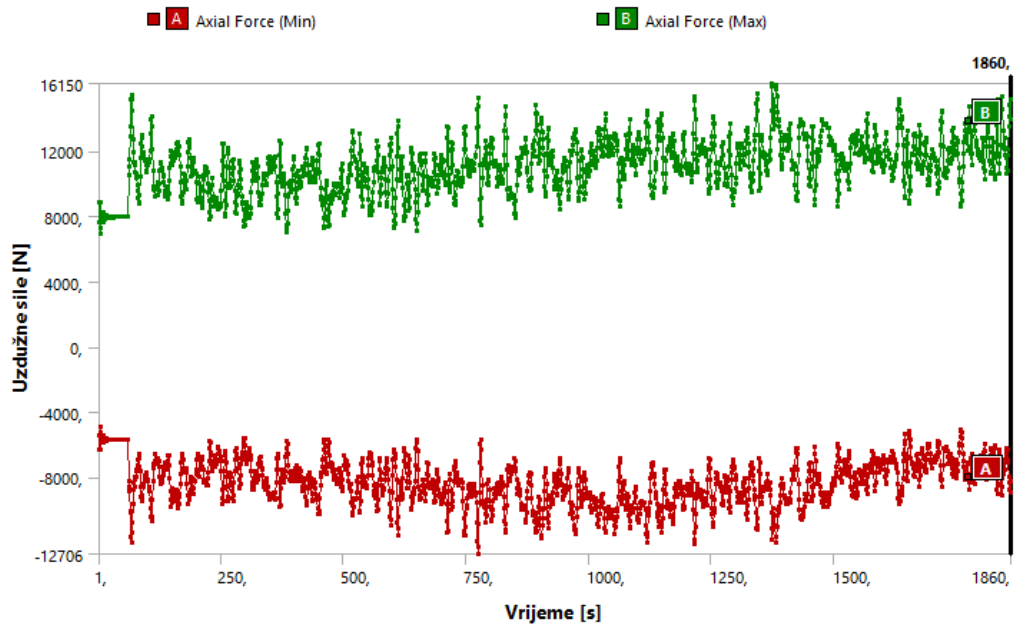
3.74 Sile u osloncima



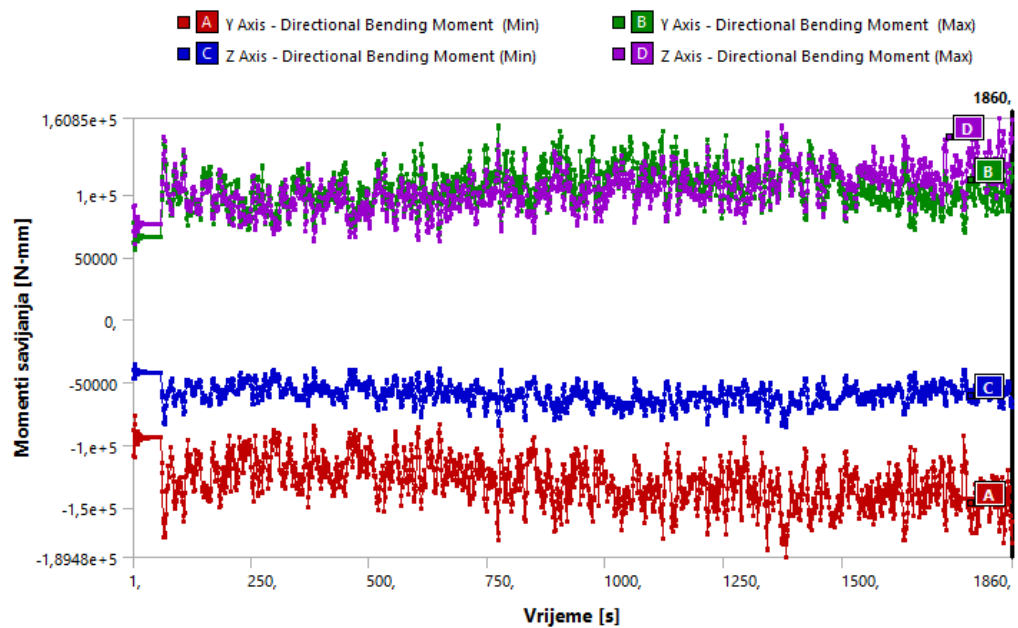
3.75 Momenti u osloncima



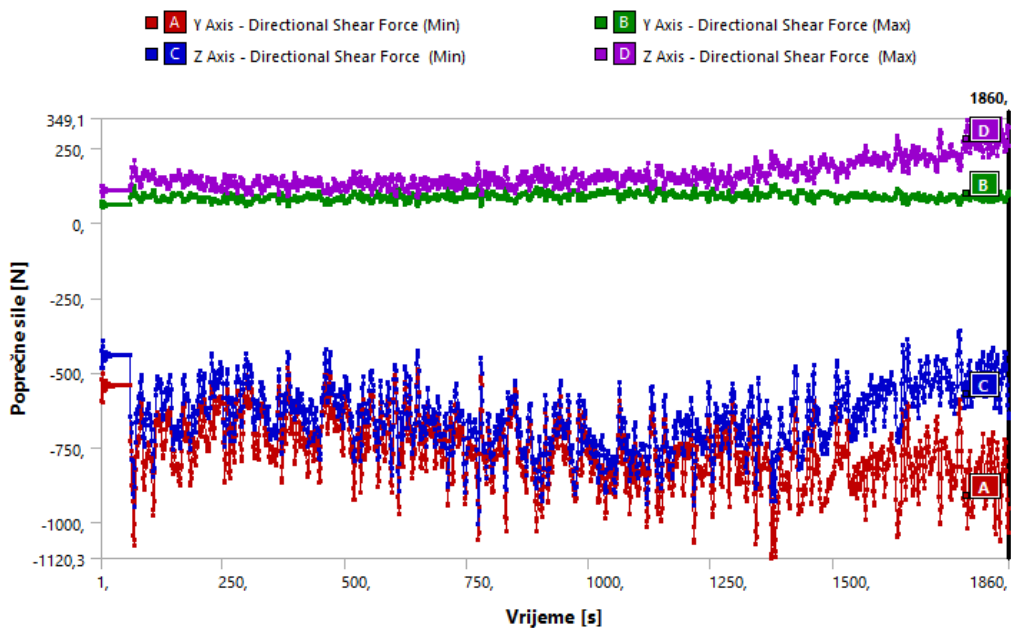
Sljedećim slikama prikazane su maksimalne rezne sile u maksimalno opterećenim elementima konstrukcije stupa.



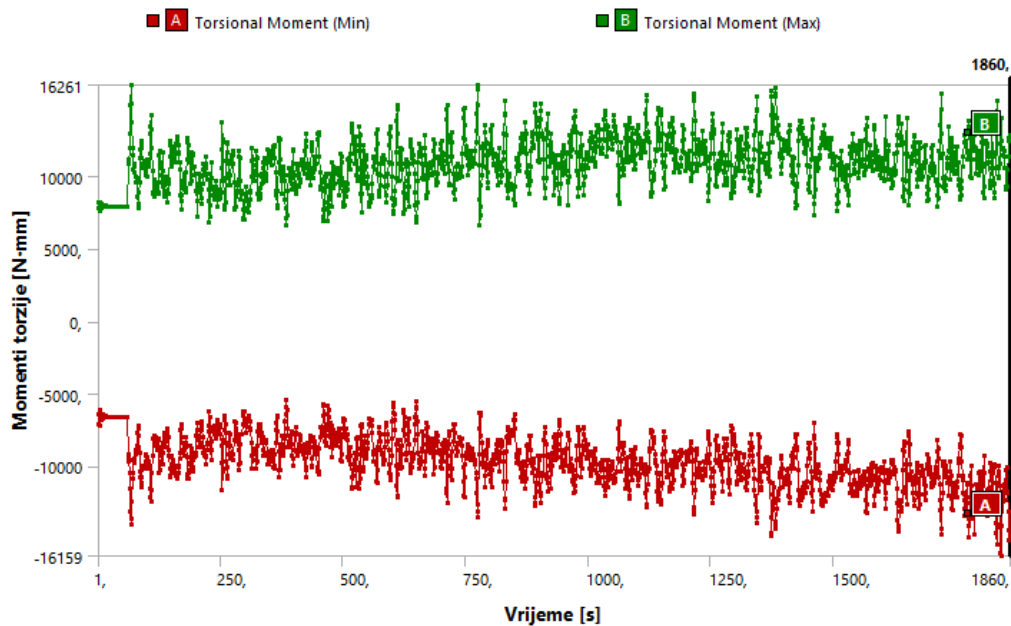
3.76 Max uzdužne sile u elementima



3.77 Max momenti savijanja u elementima

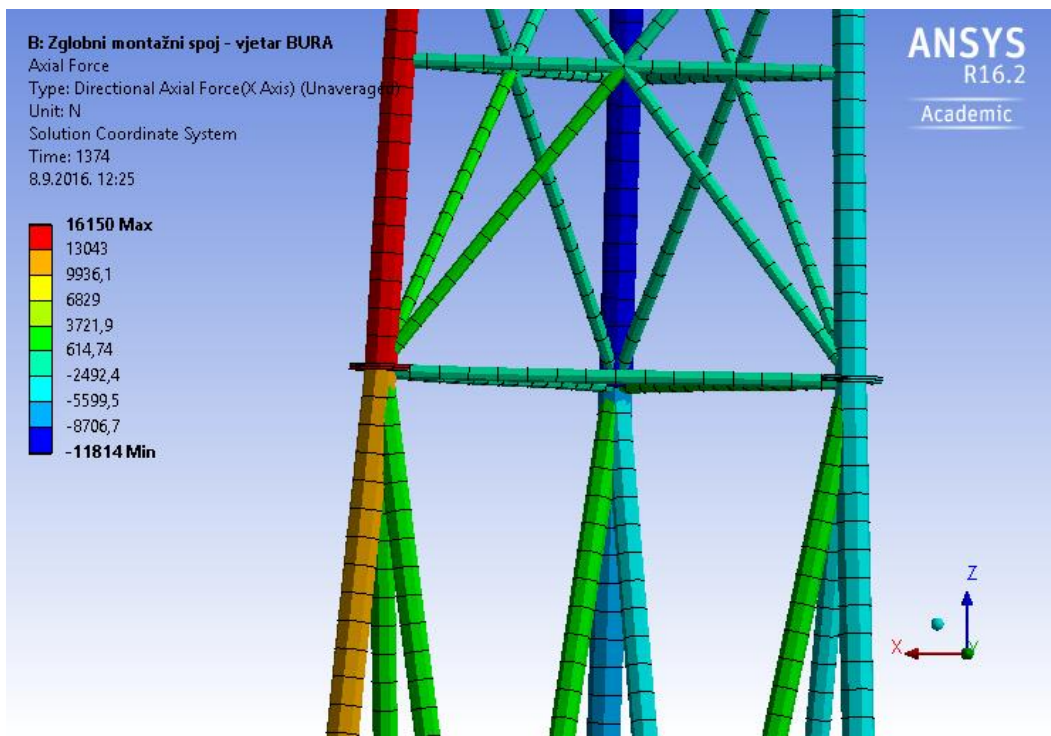


3.78 Max poprečne sile u elementima

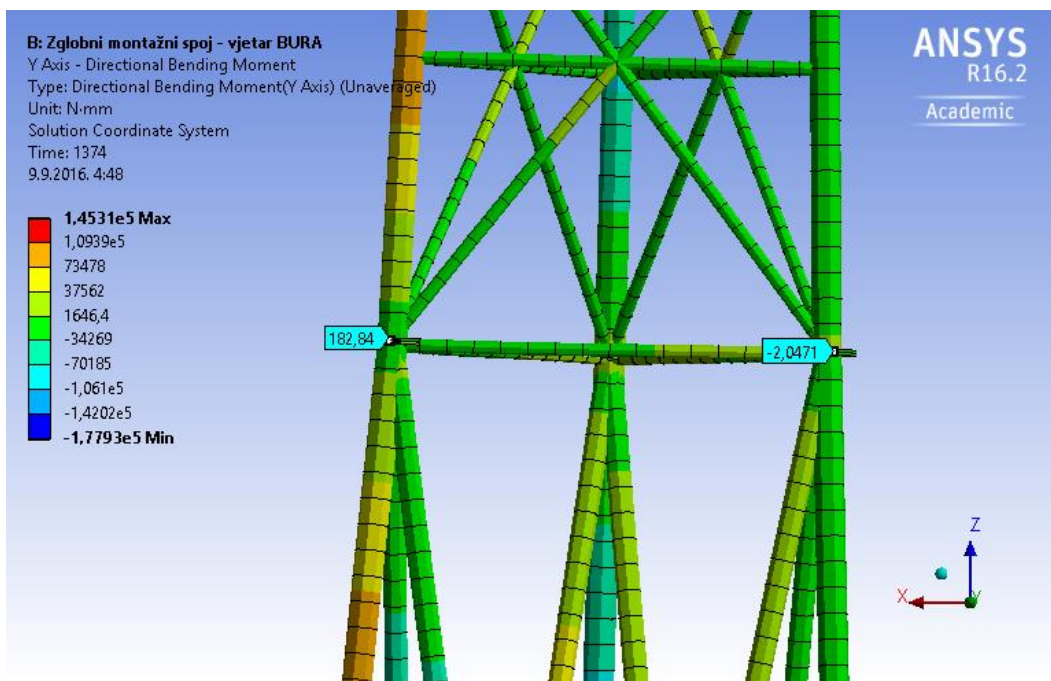


3.79 Max momenti torzije u elementima

Razmatraju se rezne sile najopterećenijeg montažnog spoja u trenutku maksimalnog pomaka vrha stupa za vrijeme djelovanja bure (slike 3.80, 3.81, 3.82).

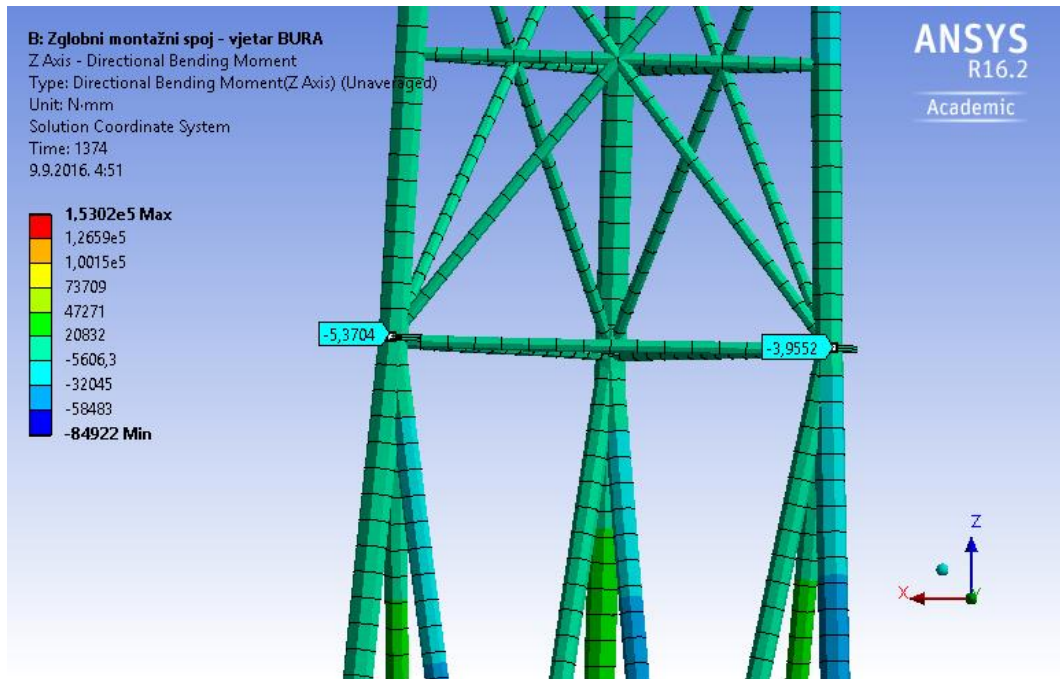


3.80 Uzdužne sile [N]

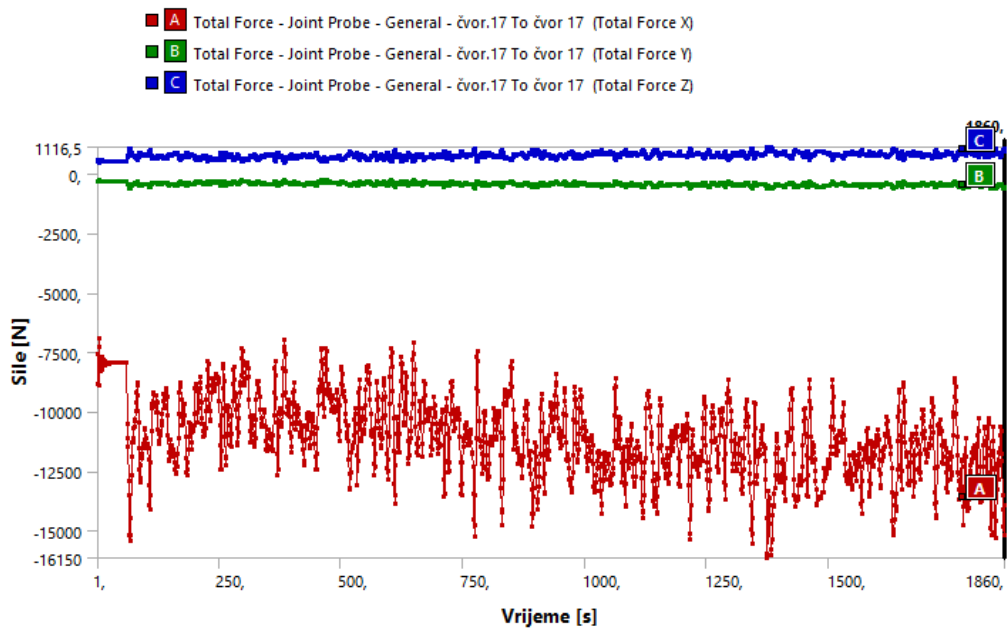


3.81 Savojni moment  $M_y$  [Nmm]

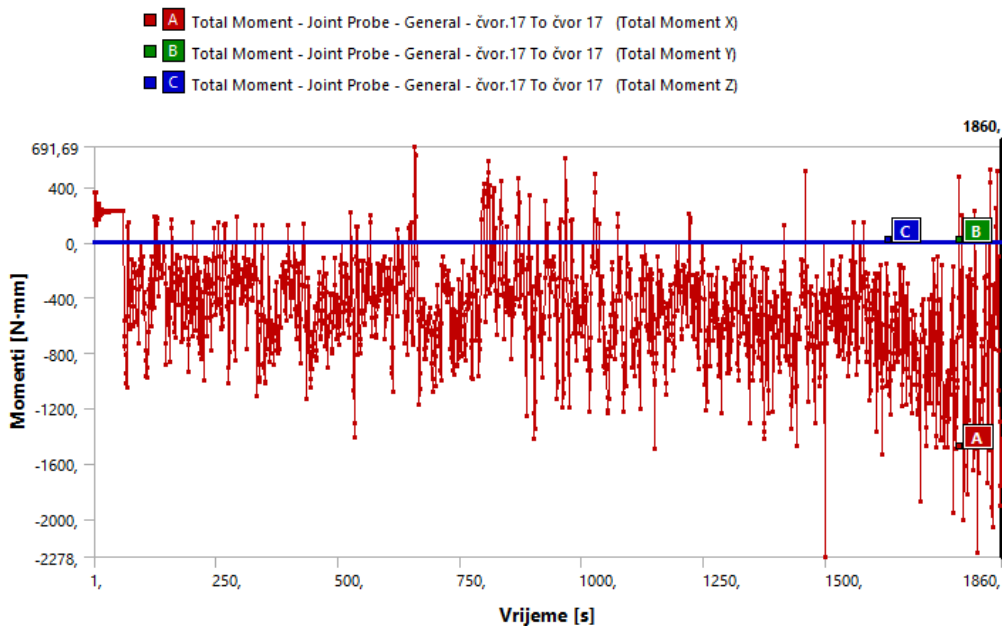
Na slikama 3.81, 3.82,3.84 vidljivo je da su ostvareni slobodni zaokreti bez otpora okomito na uzdužnu os spoja.



3.82 Savojni moment  $M_z$  [Nmm]

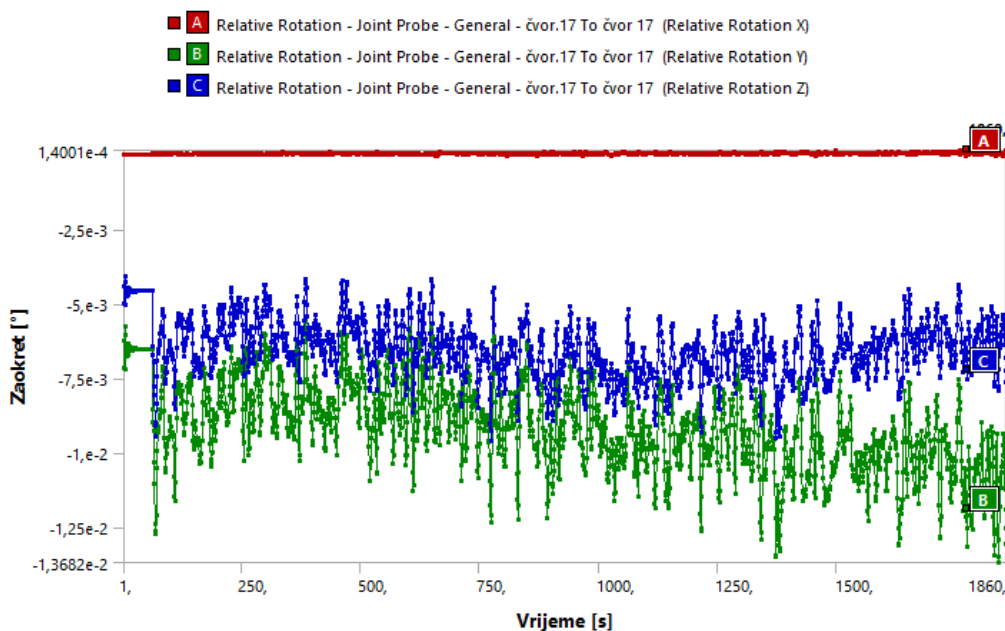


3.83 Sile u montažnom spoju



### 3.84 Momenti u montažnom spoju

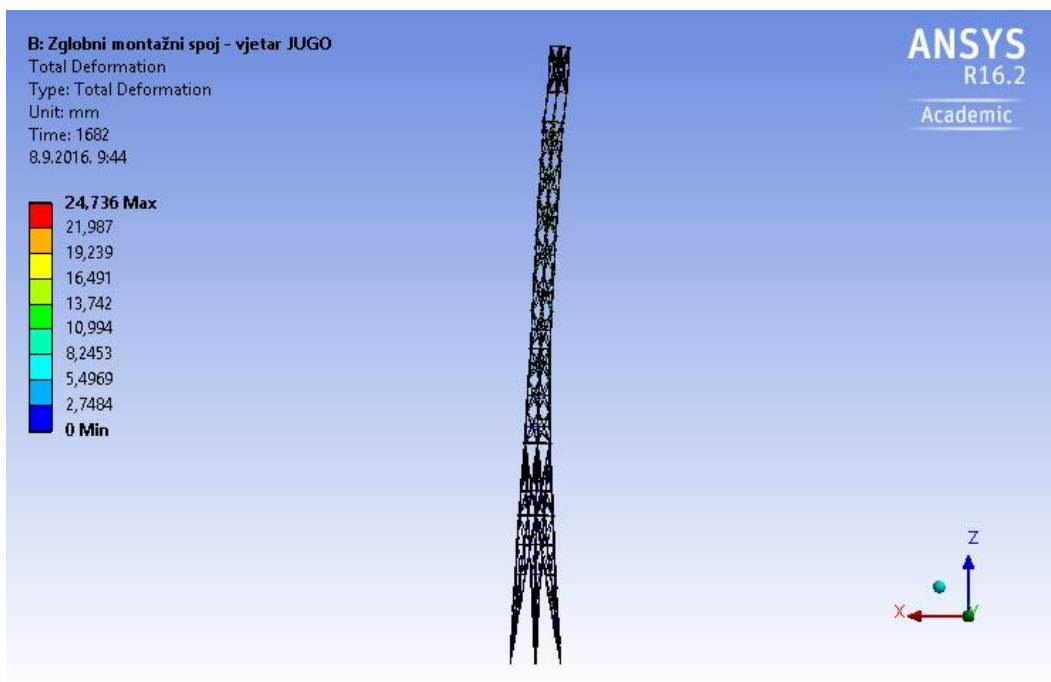
Usporedbom rezultata zaokreta spoja modela s deformabilnim (slika 3.52) i modela sa zglobnim spojevima (slika 3.85) vidljivo je da su maksimalni zaokreti zglobnog spoja značajno veći (približno 2 puta) u odnosu na deformabilni za isto djelovanje bure.



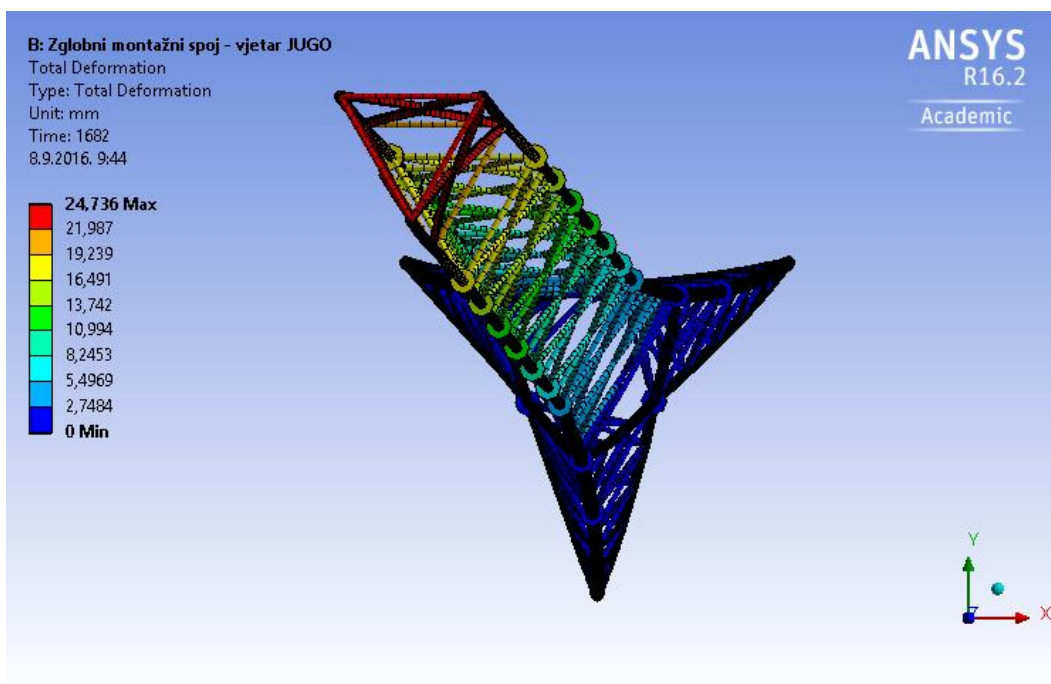
### 3.85 Zaokreti montažnog spoja

### 3.1.6 Odgovor modela sa zglobnim spojevima na djelovanje juga

U nastavku je prikazan odgovor modela tijekom trajanja odabranog zapisa juga. Slike 3.86, 3.87 prikazuju maksimalne ukupne pomake čvorova po visini konstrukcije stupa u trenutku  $t=1682s$ .



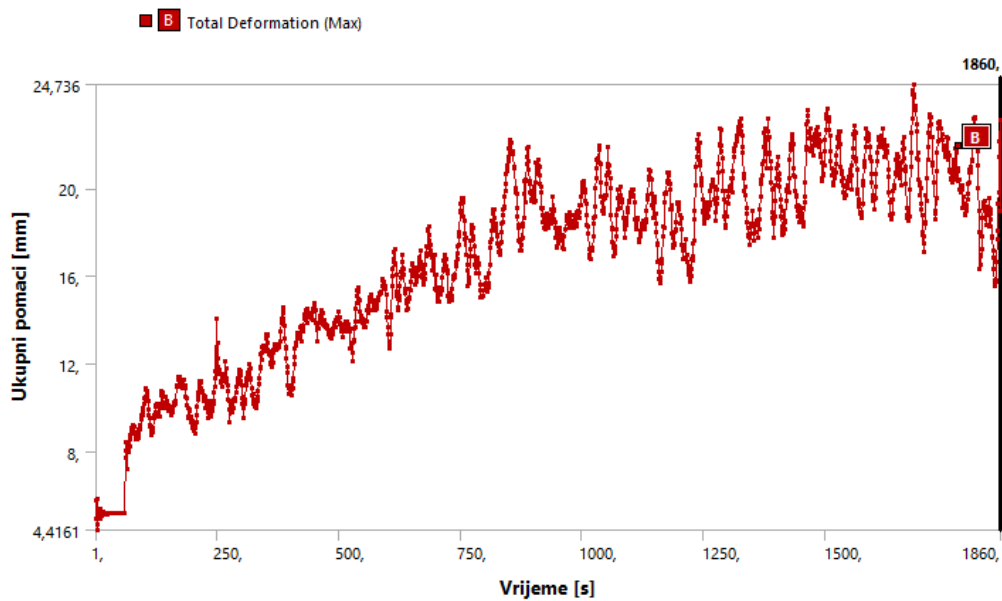
3.86 Ukupni pomaci po visini stupa - pogled [mm]



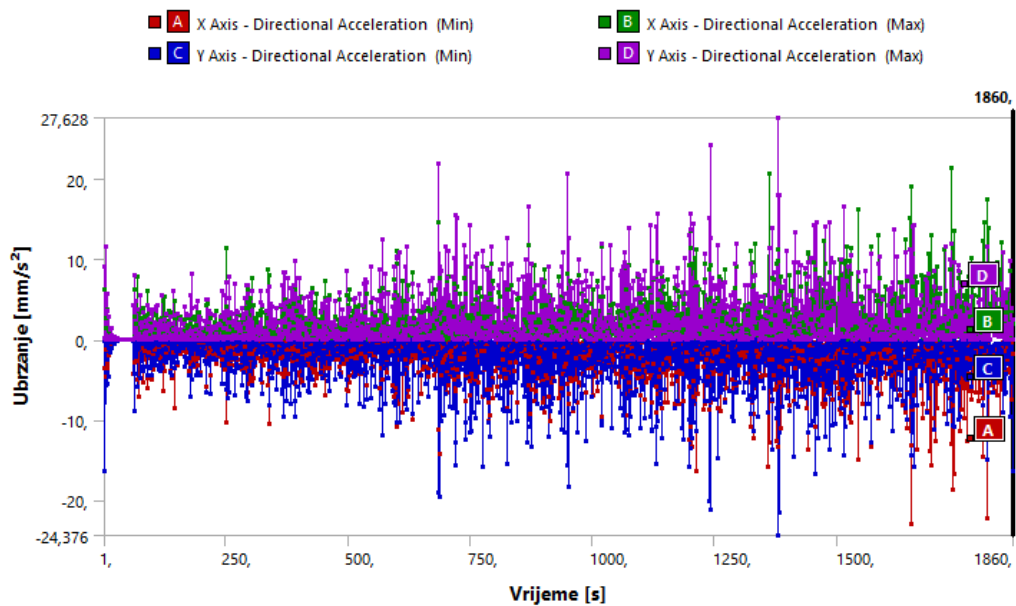
3.87 Ukupni pomaci po visini stupa - tlocrt [mm]



Slikama 3.88, 3.89 prikazani su pomaci i akceleracije čvorova vrha stupa.

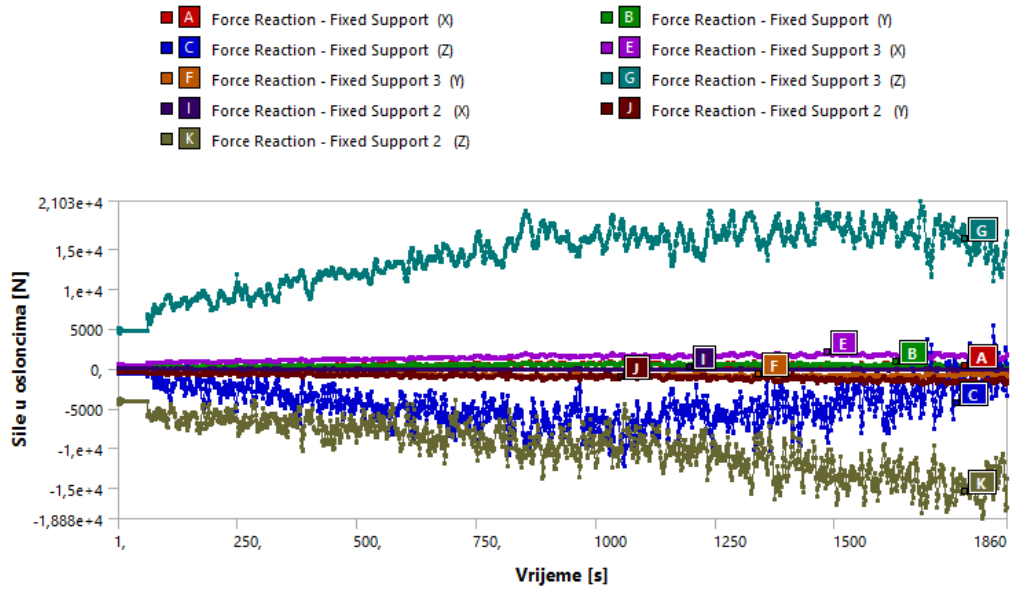


3.88 Ukupni pomaci vrha stupa

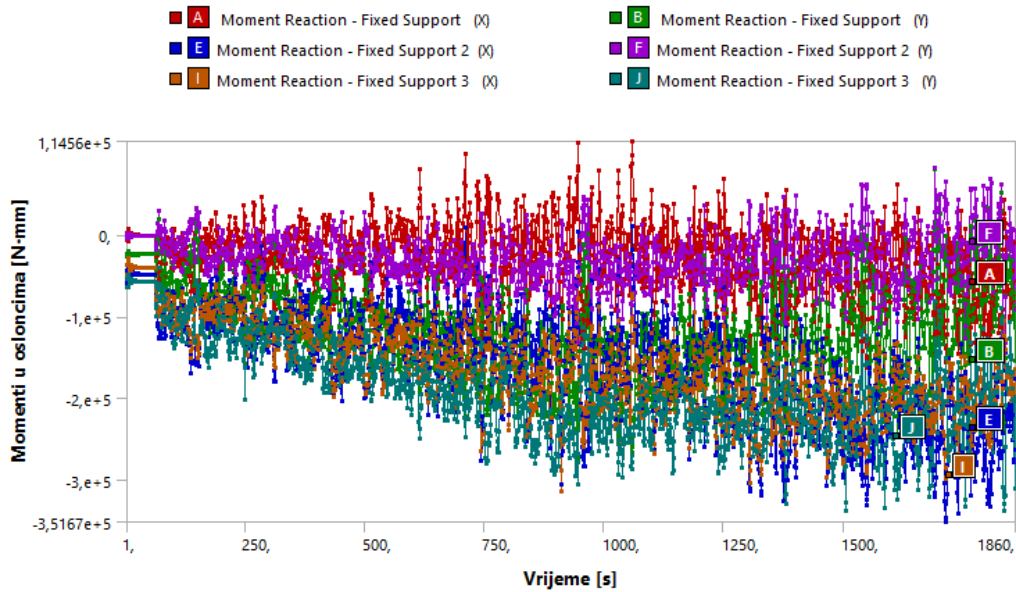


3.89 Ubrzanja vrha stupa

U nastavku su prikazani odgovori upetog spoja stup temelj.



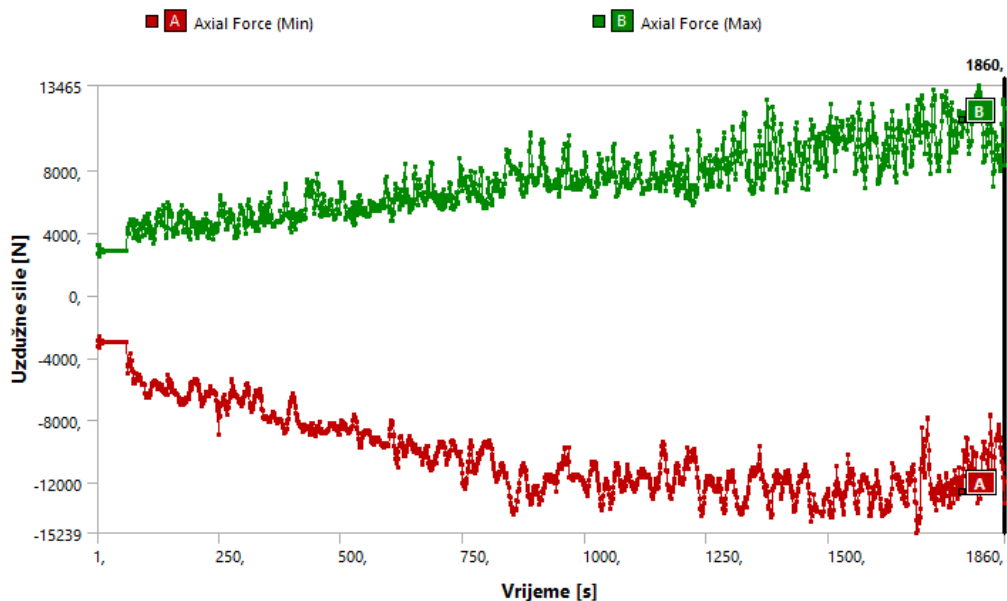
3.90 Sile u osloncima



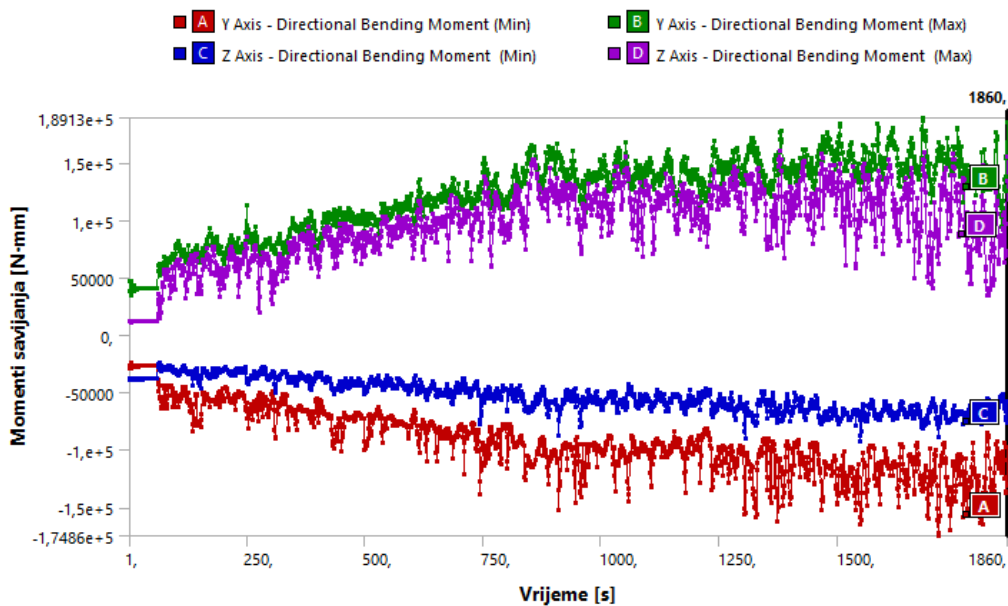
3.91 Momenti u osloncima



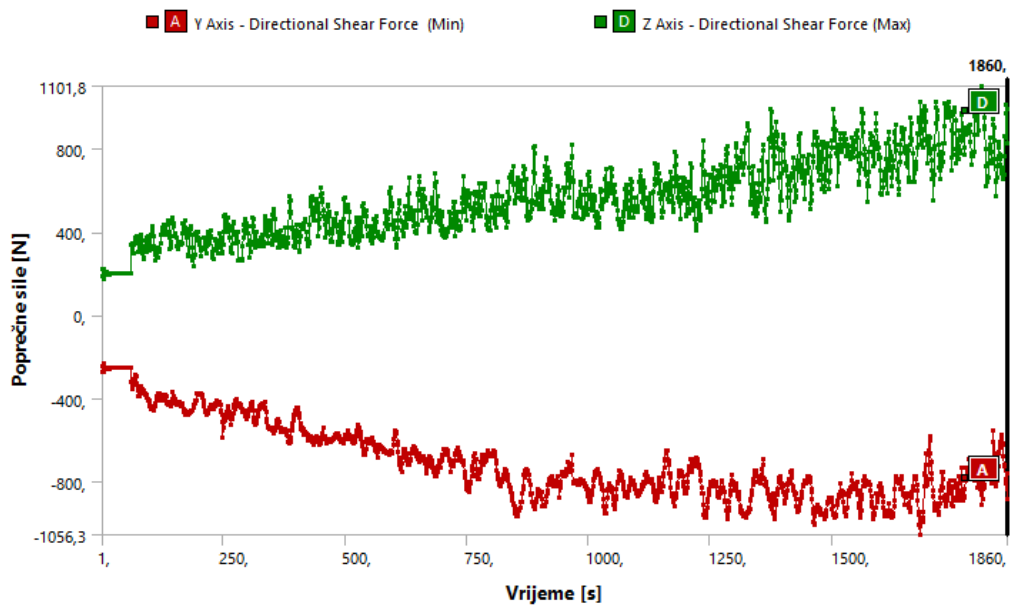
Sljedećim slikama prikazane su maksimalne rezne sile u maksimalno opterećenim elementima konstrukcije stupa.



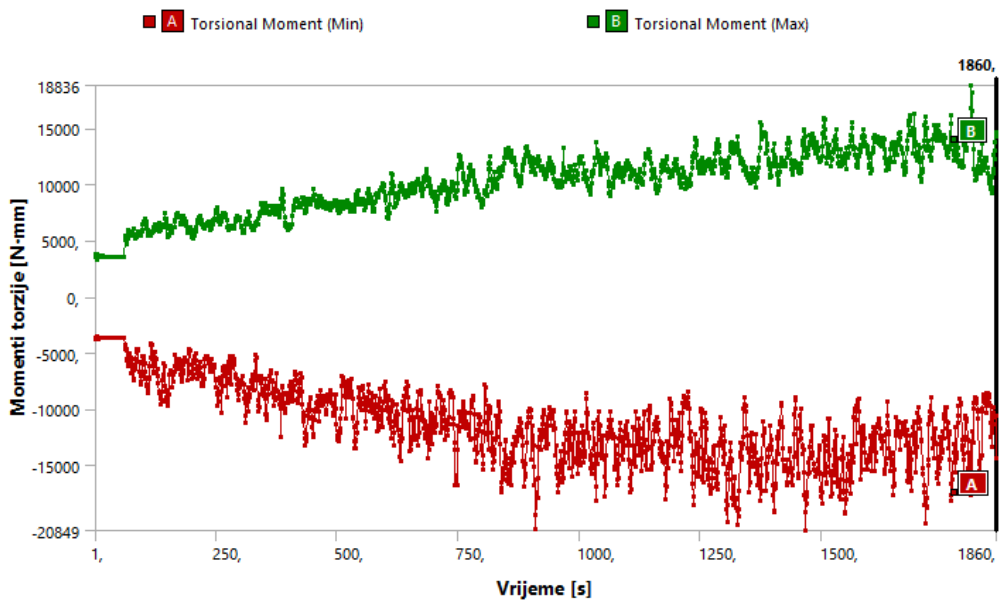
3.92 Max uzdužne sile u elementima



3.93 Max momenti savijanja u elementima

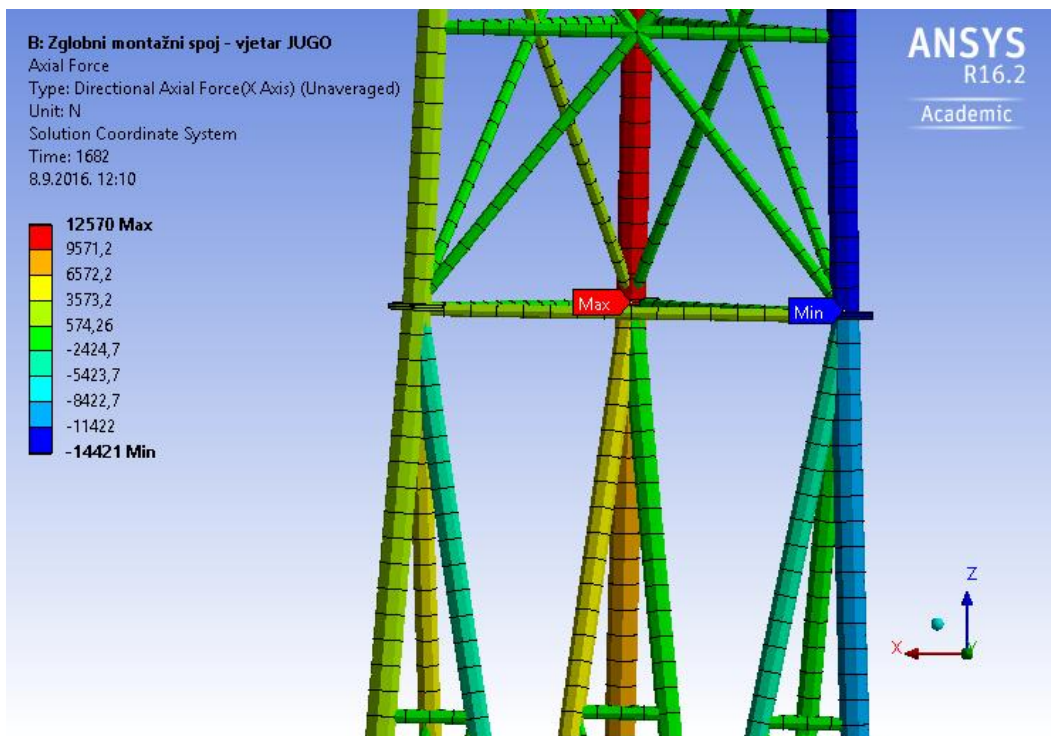


3.94 Max poprečne sile u elementima

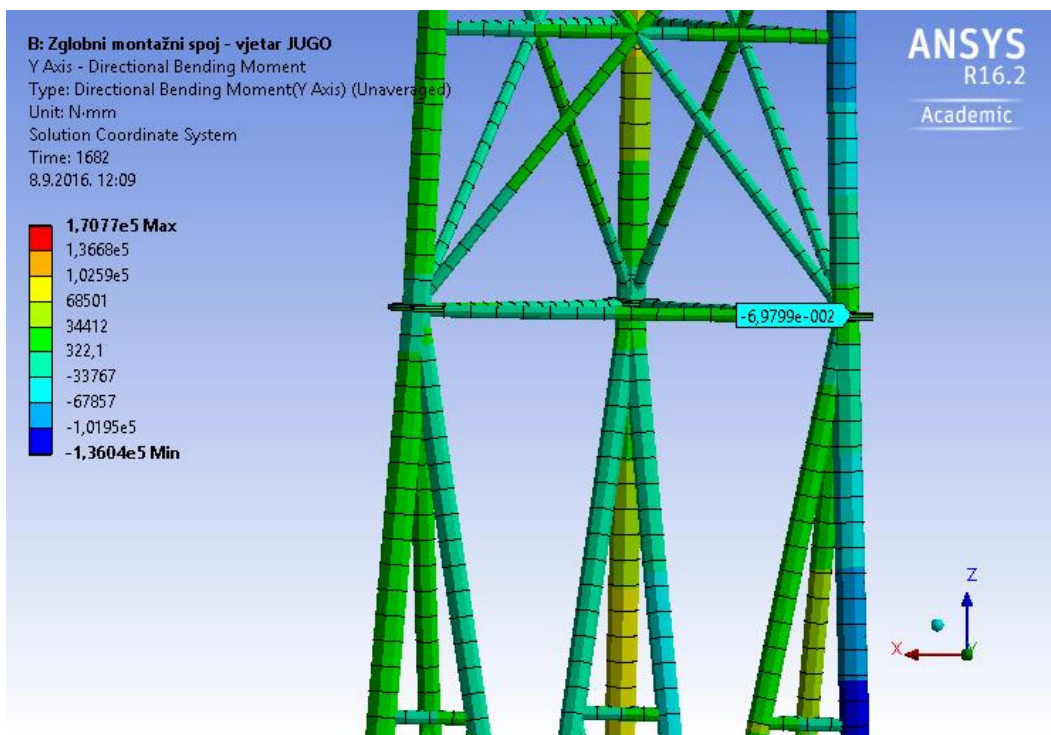


3.95 Max momenti torzije u elementima

Razmatraju se rezne sile najopterećenijeg montažnog spoja u trenutku maksimalnog pomaka vrha stupa za vrijeme djelovanja juga (slike 3.96, 3.97, 3.98).

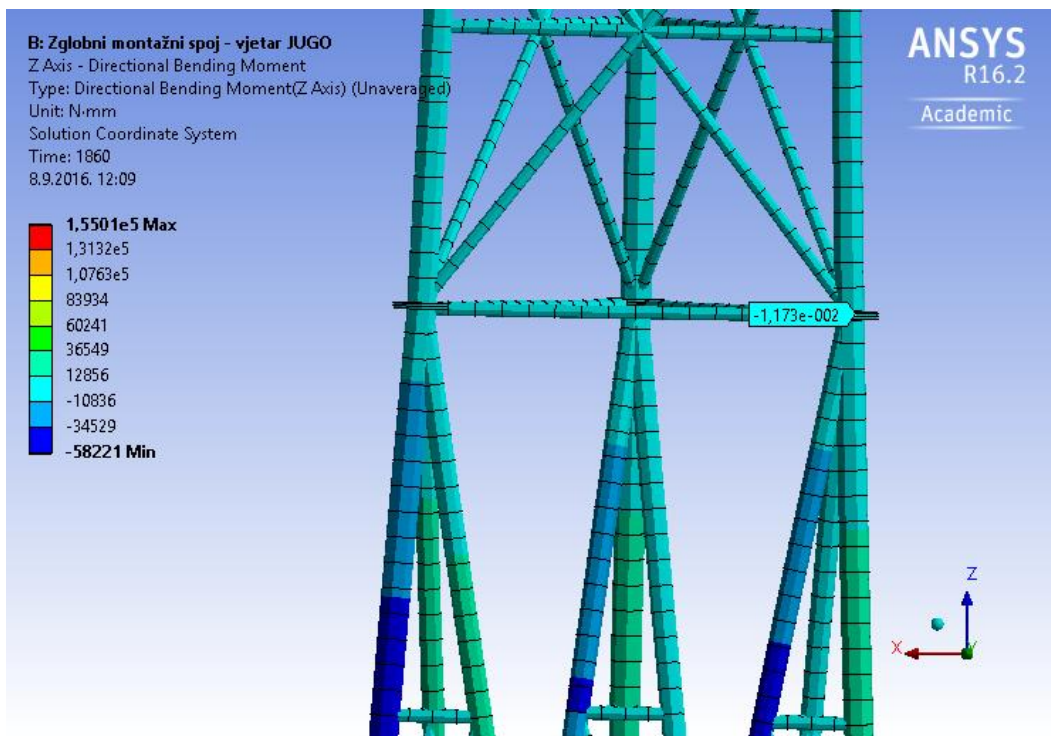


3.96 Uzdužne sile [N]

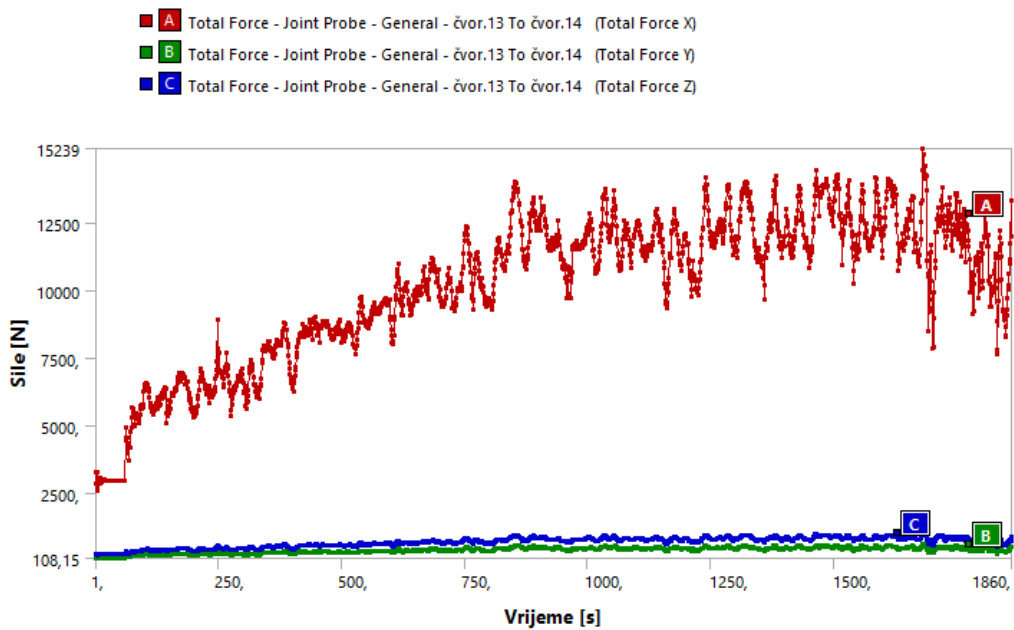


3.97 Savojni moment  $M_y$  [Nmm]

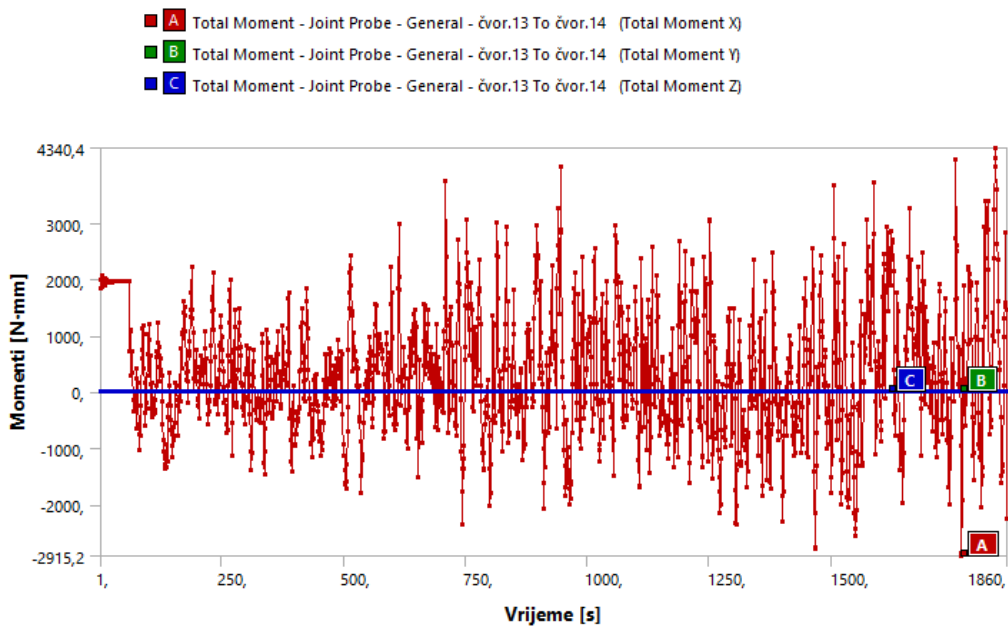
Na slikama 3.97, 3.98, 3.100 vidljivo je da su ostvareni slobodni zaokreti bez otpora okomito na uzdužnu os spoja.



3.98 Savojni moment  $M_z$  [Nmm]

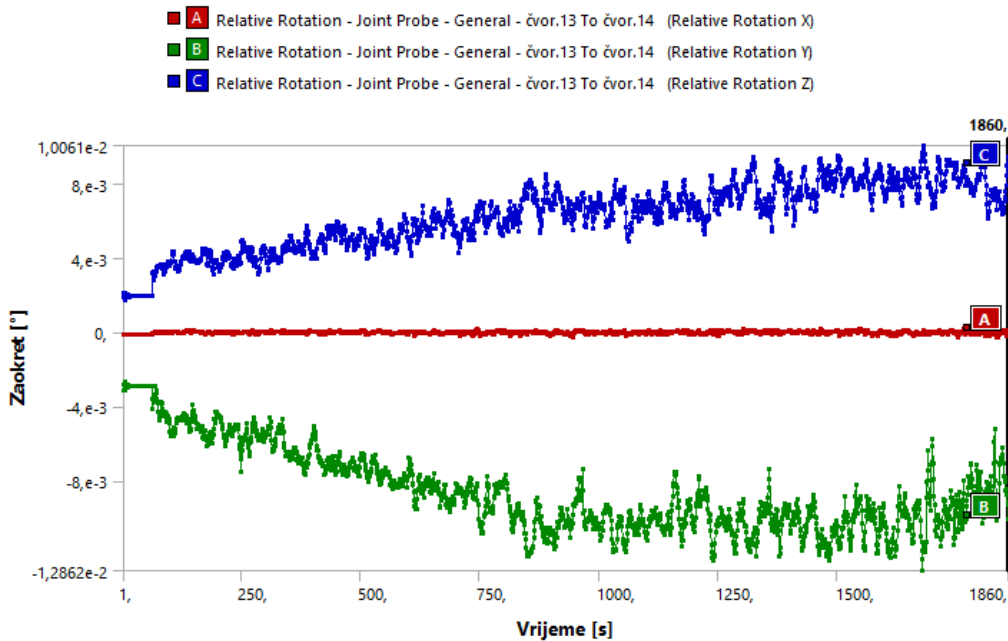


3.99 Sile u montažnom spoju



### 3.100 Momenti u montažnom spoju

Usporedbom rezultata zaokreta spoja modela s deformabilnim (slika 3.69) i modela sa zglobnim spojevima (slika 3.101) vidljivo je da su maksimalni zaokreti zglobnog spoja značajno veći (približno 2 puta) u odnosu na deformabilni za isto djelovanje juga.



### 3.101 Zaokreti montažnog spoja

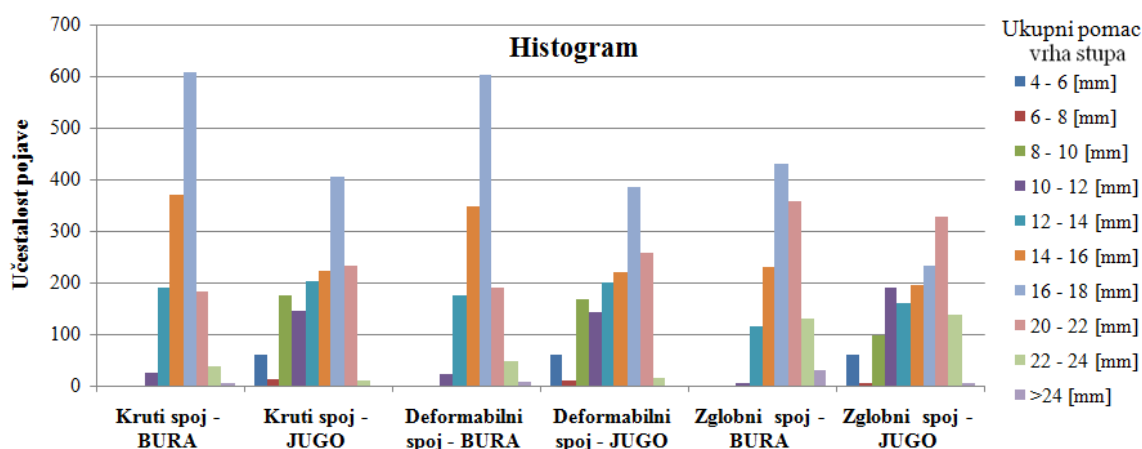
## 3.2 Analiza rezultata

### 3.2.1 Statistička analiza

Programom Microsoft Excel 2007 provedena je statistička analiza rezultata ukupnog pomaka na vrhu stupa, brzine vjetra na 38m visine stupa te koeficijenta oblika vjetrovnog profila  $\alpha$  u smislu definiranja statističkih parametara maksimalne, minimalne i srednja vrijednosti te standardne devijacije. Histogram (slika 3.102) prikazuje učestalost ostvarenih pomaka prema definiranim razredima pomaka.

#### 3.5 Prikaz izračunatih statističkih parametra

		BURA			JUGO		
		Kruti spoj	Deformabilni spoj	Zglobni spoj	Kruti spoj	Deformabilni spoj	Zglobni spoj
<b>Ukupni pomak na vrhu stupa u [mm]</b>	$u_{max}$	24,70	24,93	26,55	23,20	23,41	24,74
	$u_{min}$	11,05	11,15	11,89	6,79	6,85	7,22
	$u_{mean}$	17,29	17,45	18,59	15,98	16,12	17,04
	$\sigma$	2,34	2,37	2,52	3,73	3,76	3,97
<b>Brzina na 38m [m/s]</b>	$v_{max}$	14,52			12,78		
	$v_{min}$	8,36			7,12		
	$v_{mean}$	11,31			10,82		
	$\sigma$	0,80			1,35		
<b>Koeficijent oblika <math>\alpha</math></b>	$\alpha_{max}$	0,087			0,245		
	$\alpha_{min}$	0,056			0,174		
	$\alpha_{sr}$	0,069			0,206		
	$\sigma$	0,005			0,012		



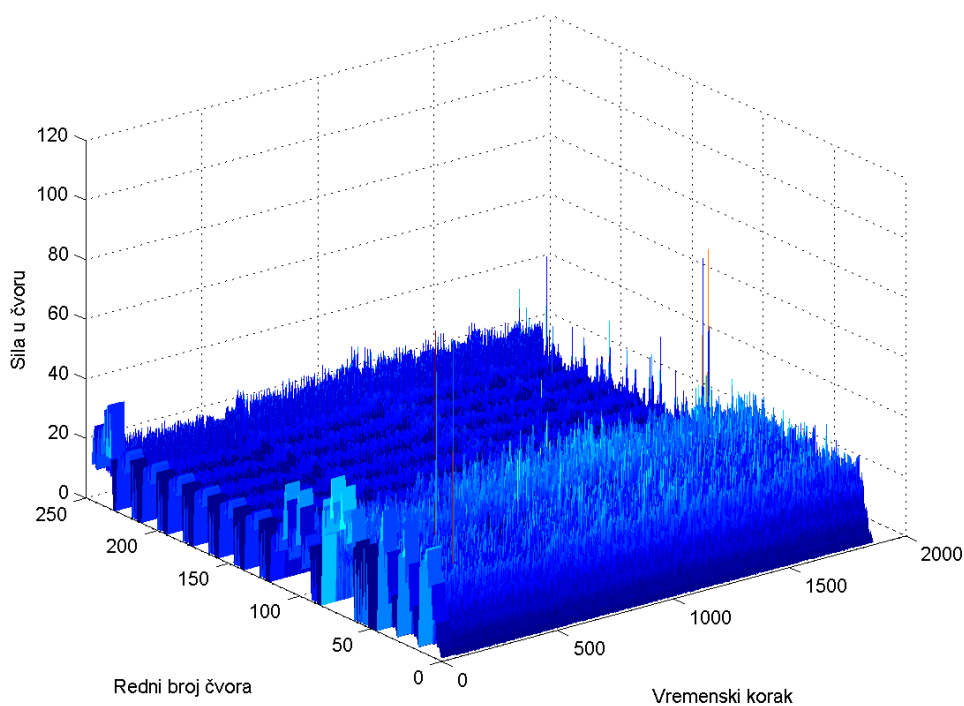
3.102 Histogram učestalosti pomaka prema definiranim razredima

### 3.2.2 Fourierova analiza

U nastavku je za vjetrove bure i juga provedena Fourierova transformacija srednje vrijednosti veličina sila u svim čvorovima antenskog stupa te ukupnog pomaka vrha stupa za svaki vremenski korak ( $\Delta t=1s$ ) trajanja niza. Na temelju omjera srednje sile u čvorovima i ukupnog pomaka vrha stupa izračunata je dinamička krutost antenskog stupa. Rezultati su prikazani u nastavku.

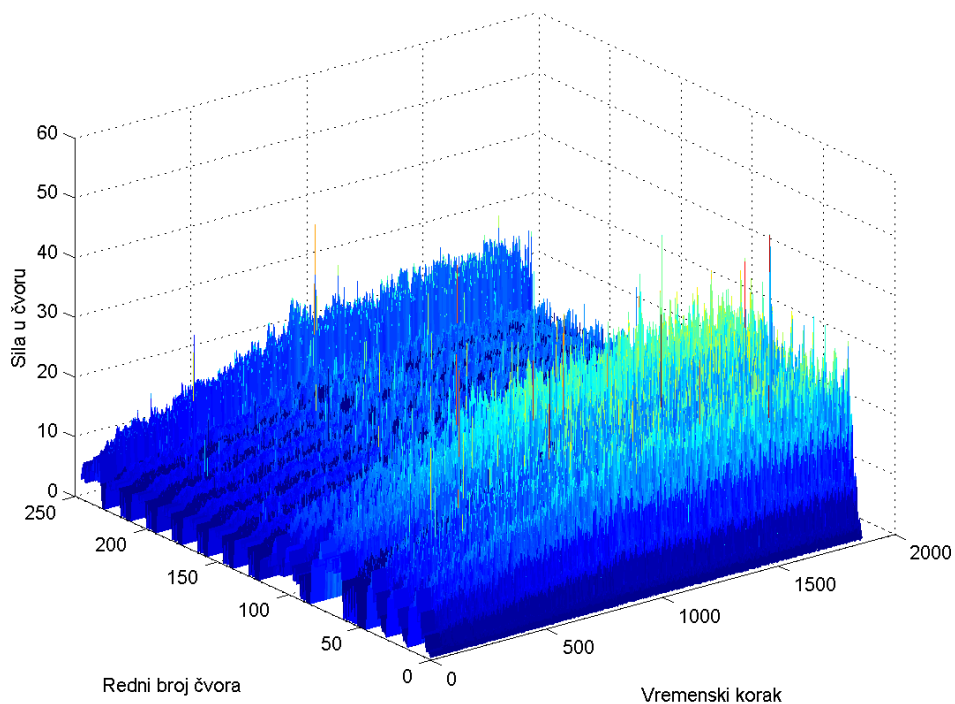
#### 3.2.2.1 Prikaz rezultata

Na temelju resultantnih čvornih sila na grafovima (slike 3.103 i 3.104) vidimo distribuciju istih po vremenu za djelovanje bure i juga.



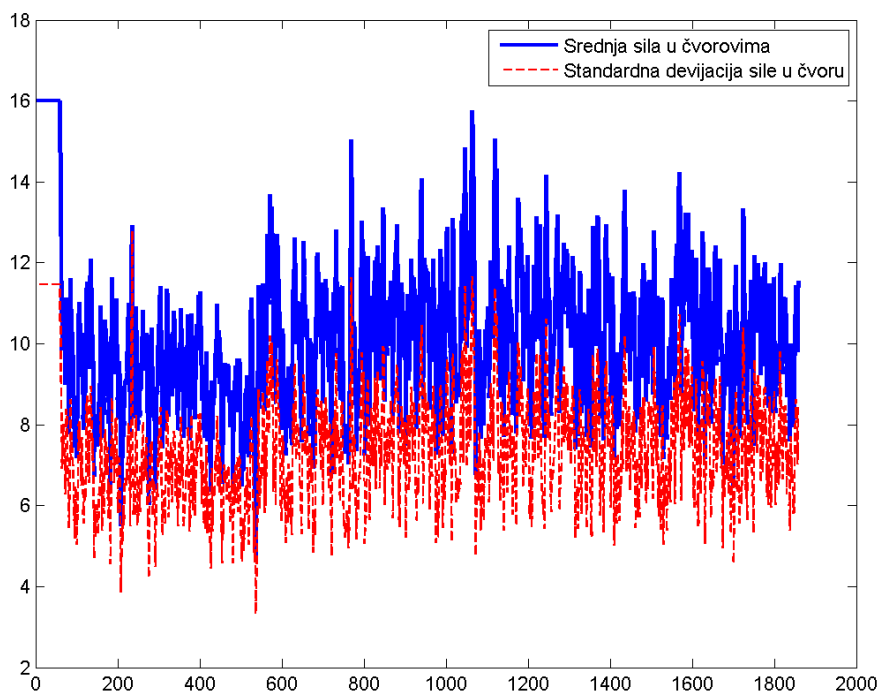
3.103 Vrijednosti ukupne sile u svakom pojedinom čvoru stupa za djelovanje bure [N]





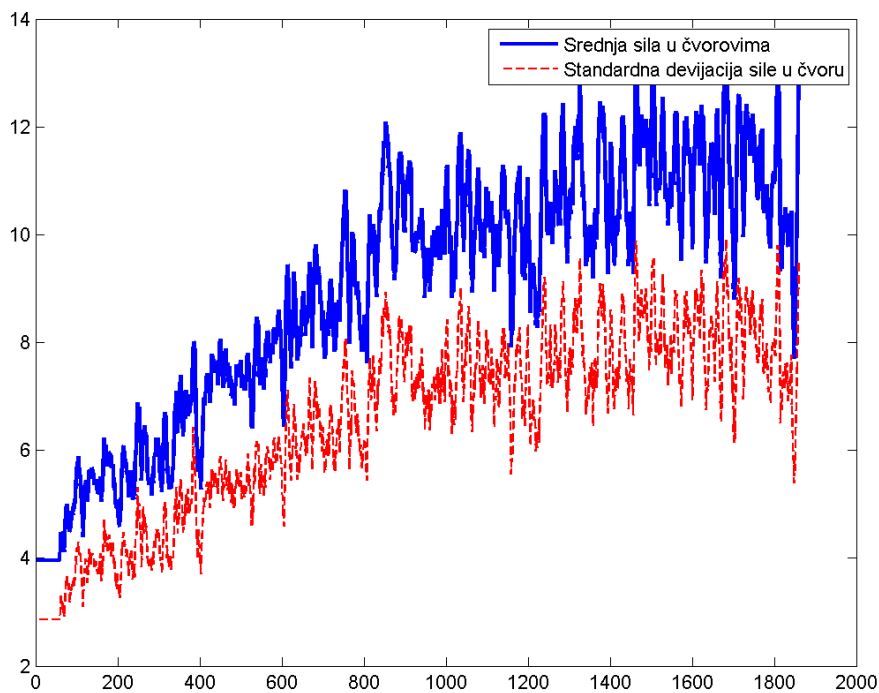
**3.104 Vrijednosti ukupne sile u svakom pojedinom čvoru stupa za djelovanje juga [N]**

Kako bi olakšali procjenu dinamičke krutosti, djelovanje sila u svakom pojedinom čvoru stupa zamjenjujemo s jednom ekvivalentnom silom dobivenom kao aritmetička sredina čvornih sila. Kao ocjena te ekvivalente sile i njezinog odstupanja izračunata je standardna devijacija čvornih sila po vremenu. Obje vrijednosti prikazane su slikama 3.105, 3.106.



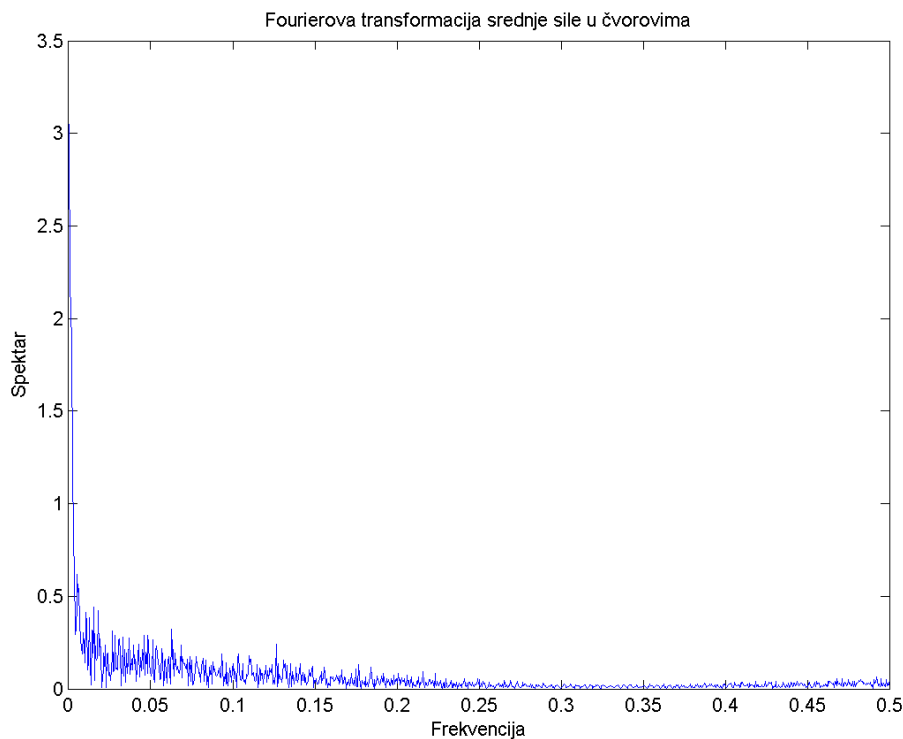
**3.105 Ekvivalentna sila za djelovanje bure [N]**



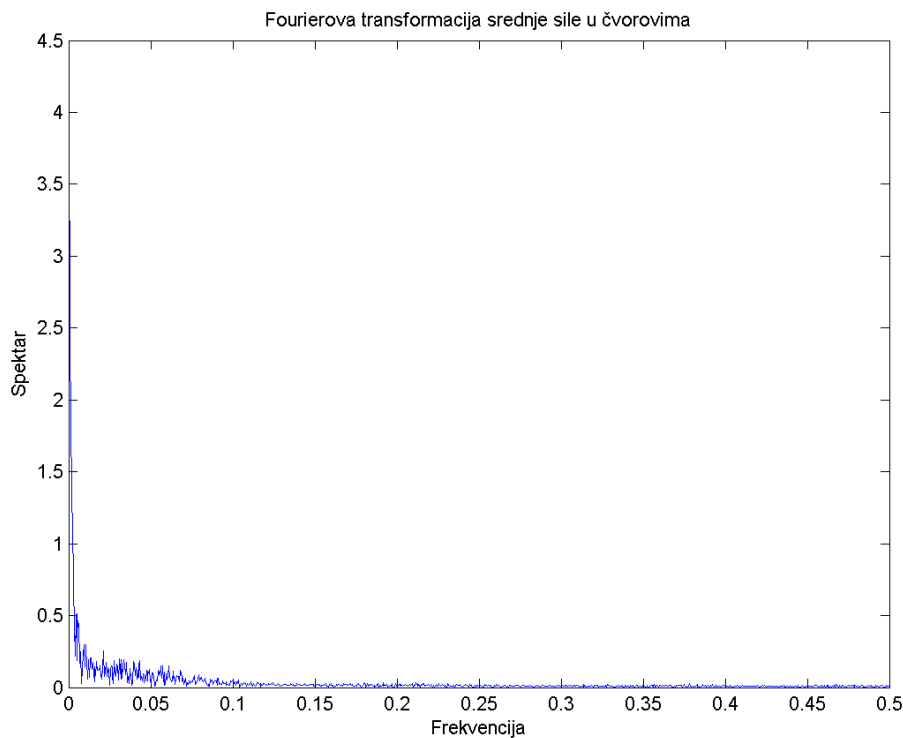


**3.106 Ekvivalentna sila za djelovanje juga [N]**

Provedbom spektralne analize dobivamo spektar ekvivalentne sile za djelovanje bure i juga prikazano na slikama 3.107, 3.108.

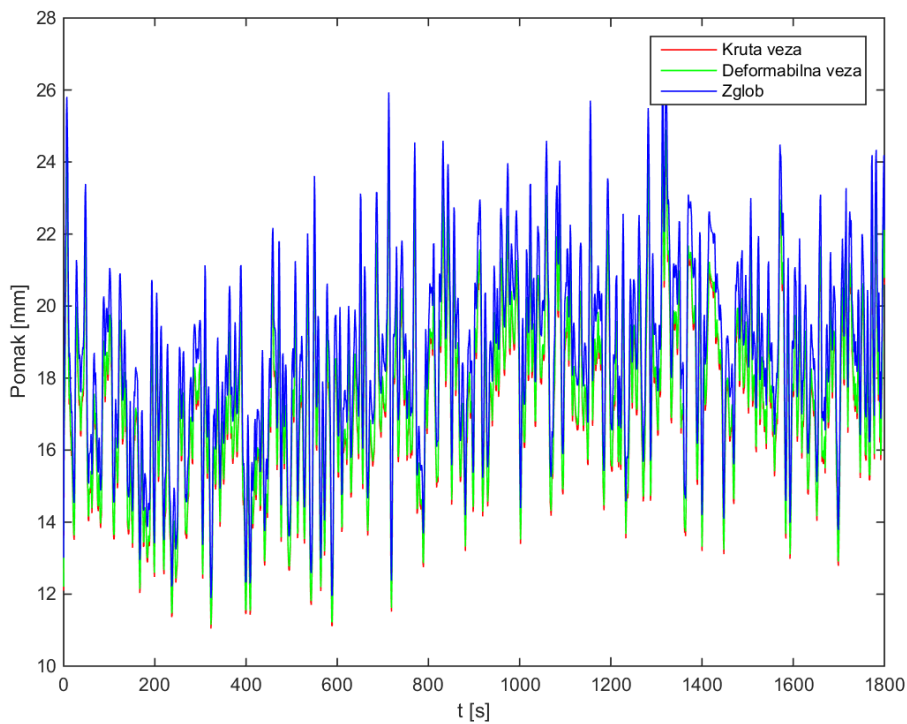


**3.107 Fourierova transformacija ekvivalentne sile za djelovanje bure**

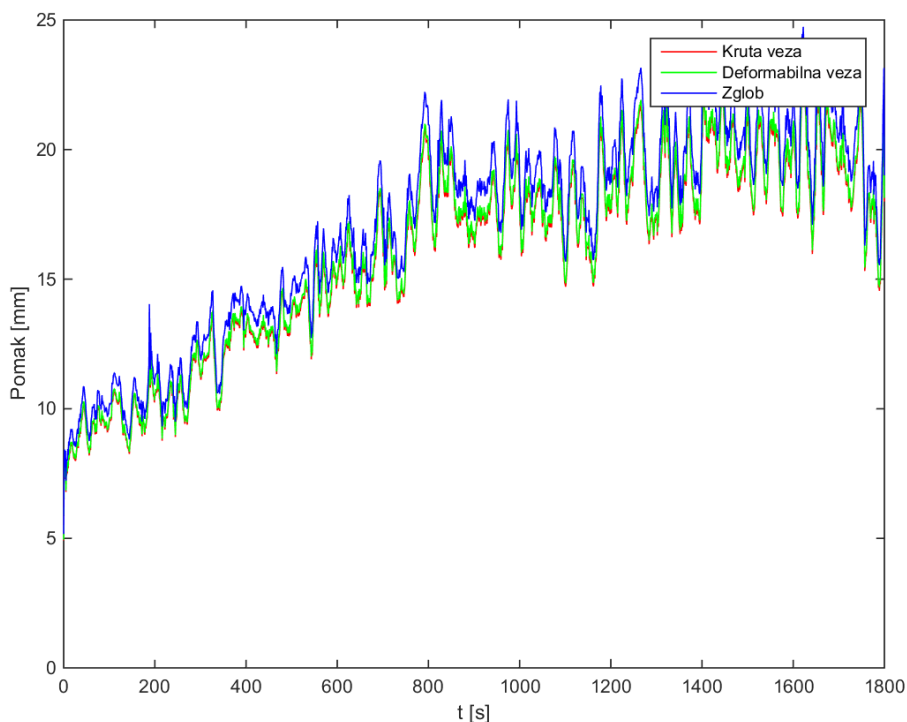


**3.108 Fourierova transformacija ekvivalentne sile za djelovanje juga**

Pomaci konstrukcije opisani su pomakom vrha kao točkom najvećeg pomaka konstrukcije stupa.

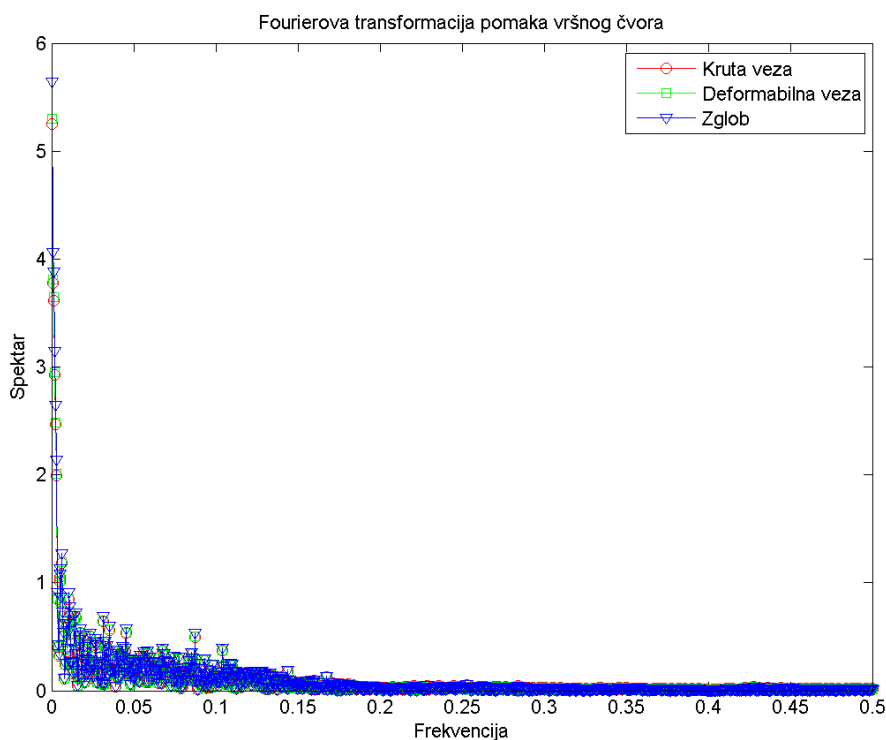


**3.109 Ukupni pomak vrha stupa za slučajeve različitih krutosti montažnih spojeva za djelovanje bure [mm]**

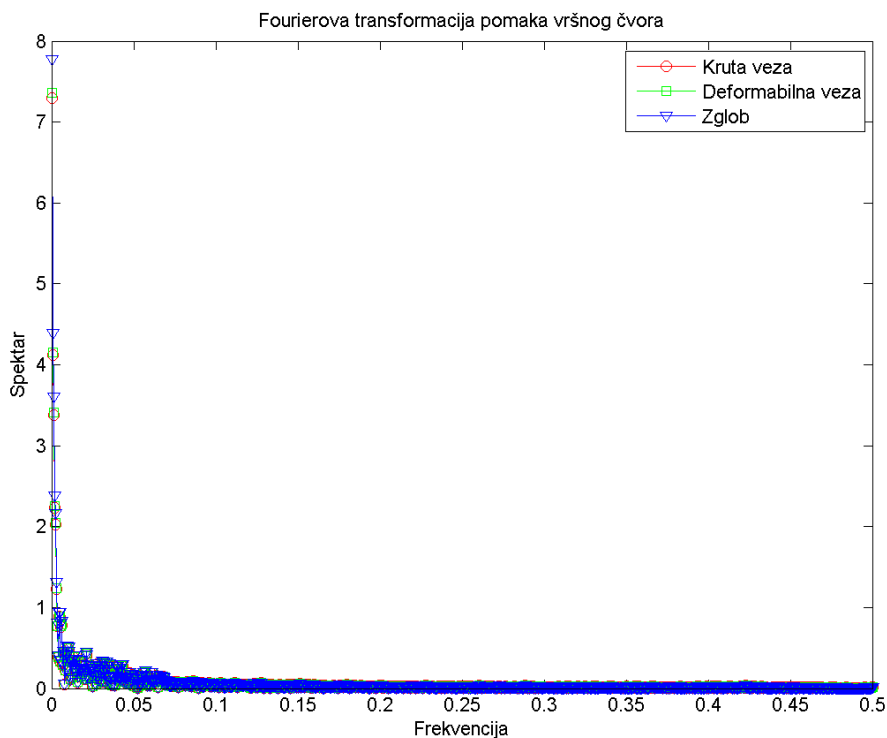


**3.110 Ukupni pomak vrha stupa za slučajeve različitih krutosti montažnih spojeva za djelovanje juga [mm]**

Spektralnom analizom sva tri statička sustava dobivamo tri spektra odgovora (slike 3.109, 3.110).

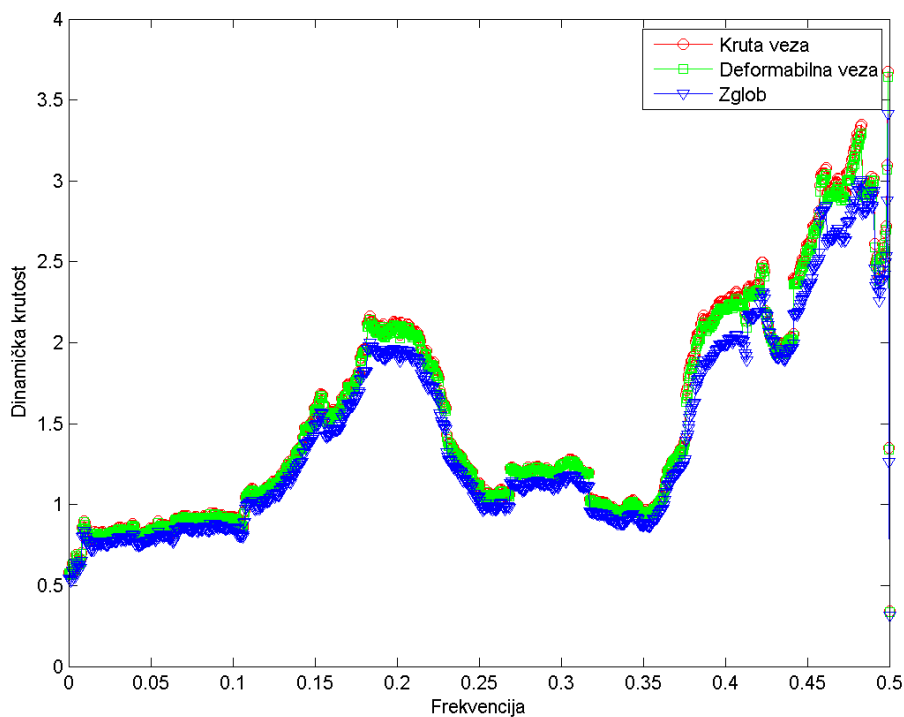


**3.111 Fourierova transformacija ukupnog pomaka vrha stupa za djelovanje bure**

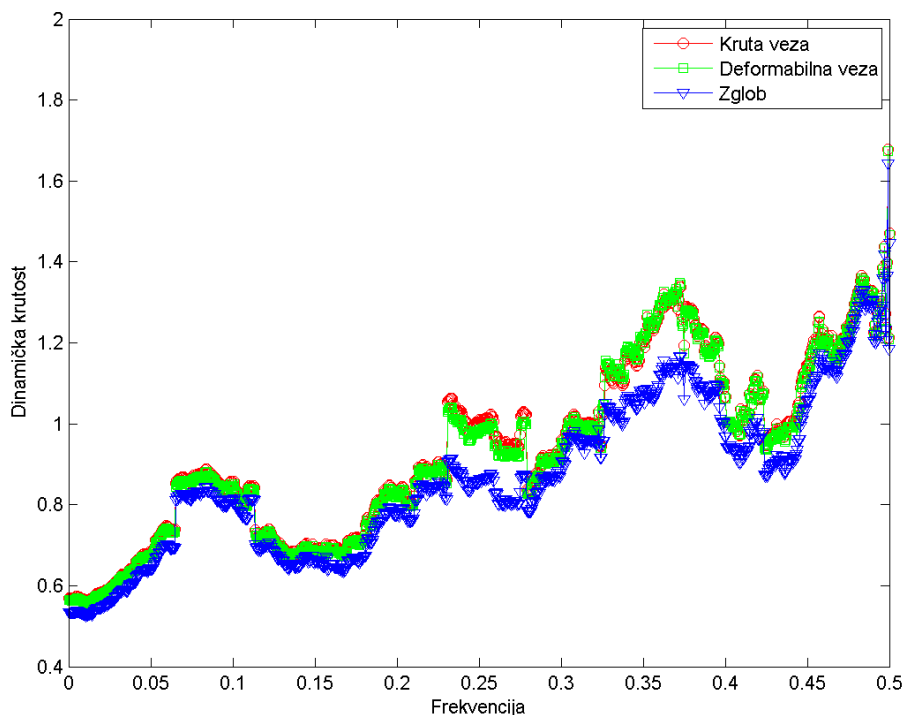


3.112 Fourierova transformacija ukupnog pomaka vrha stupa za djelovanje juga

Dinamička krutost konstrukcije stupa dobivena je dijeljenjem spektra srednje sile sa spektrom ukupnog pomaka vrha stupa.



3.113 Dinamička krutost antenskog stupa za djelovanje bure



**3.114 Dinamička krutost antenskog stupa za djelovanje juga**

Na slikama 3.113, 3.114 razlikujemo 3 različite dinamičke krutosti za 3 različita statička sustava uslijed djelovanja bure i juga.

Očekivano kruta veza daje dinamički najkruću, a zglobna veza montažnih spojeva najmekšu konstrukciju za sve frekvencije. Usporedbom dobivenih spektara odgovora možemo zaključiti da se konstrukcija ponaša krućom za djelovanje bure, a posebno na višim frekvencijama (od 0.35 do 0.5Hz).

## 4 ZAKLJUČAK

Koristeći numerički model tipskog čeličnog antenskog stupa prikazan u ovom radu, uspješno je modeliran utjecaj dvaju dominantnih vjetrova registriranih na lokaciji "Bobani" u blizini Splita. U analizi odgovora konstrukcije stupa na djelovanje vjetrova s uključenom geometrijskom nelinearnosti varirani su sustavi s različitim krutostima montažnih spojeva. Analizom rezultata te napravljenim procjenama dinamičke krutosti za djelovanje bure i juga dobiveni su pretpostavljeni rezultati u smislu veće krutosti statičkog sustava stupa s krutim montažnim spojevima u odnosu na statički sustav sa zglobnim spojevima.

Rezultati ukupnih pomaka vrha stupa za vrijeme djelovanja vjetrova bure i juga sa sličnim srednjim brzinama u referentnoj točki konstrukcije, pokazali su značajno veće progibe uslijed djelovanja bure.

Razmatrajući ukupne pomake vrha stupa i pripadajuće maksimalne rezne sile u elementima s aspekta različitih rotacijskih krutosti u ravninama okomito na osi montažnih spojeva, pokazalo se da je razlika u rezultatima odgovora konstrukcije za krute i deformabilne spojeve inženjerski zanemariva. Navedeno dovodi do zaključka da za ovakve tipove konstrukcija nema smisla modelirati stvarne krutosti montažnih spojeva, ukoliko inženjerski program za proračun konstrukcija ima mogućnost modeliranja te iste krutosti primjenom metode komponenti i sličnih.

Prema prikazanim rezultatima, iz omjera dinamičke krutosti očekivamo kruću konstrukciju za djelovanje bure na svim frekventnim područjima, što nam u pogledu pomaka predstavlja povoljniju situaciju. S druge strane veća krutost implicira veće inducirane sile uslijed dinamičkog opterećenja. Posljedice veće inducirane sile uslijed djelovanja bure su poznate iz havarije uslijed udara bure na čelični antenski stup istog tipa kao i stup opisan ovim radom (slika 4.1)



**4.1 Antenski stup "Marune", Velebit, 2013**

U konačnici, ovim radom je pokazano da je primjenom inženjerskog programa Ansys moguće modelirati spojeve čeličnih konstrukcija stvarnim rotacijskim krutostima te u analizu odgovora uključiti geometrijsku nelinearnost. Ovo je izrazito važno kod vitkih čeličnih konstrukcija pri simuliranju što realnijeg ponašanja na djelovanje dinamičkog opterećenja vjetrom. Također, važno je napomenuti da je primjenom navedenog programa moguće provesti dinamičku analizu optjecanja konstrukcije fluidom uključujući modeliranje problema turbulencije fluida koristeći CFD metodu, ali postupak nije jednostavan. U suprotnom mogu se raditi jednostavniji modeli opterećenje vjetrom rešetkastih konstrukcija koristeći metodologiju prikazanu u ovom radu baziranu na istraživanju [15].

## 5 LITERATURA

- [1] Ansys Release 15.0 Documentation, Mechanical APDL Structural Guide, ANSYS Inc., 2013
- [2] Couchaux, M., Hjjaj, M., Ryan, I., Behaviour of bolted circular flange joints subjected to a bending moment and an axial force,
- [3] Md Riasat Azim, An analytical investigation on bolt tension of a flanged steel pipe joint subjected to bending moments, International Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 2, No.3, 2013
- [4] Zafheem, T., Amanat, K.M., Investigation on bolt tension of flanged pipe joint subjected to bending, 4th Annual Paper Meet and 1st Civil Engineering Congress, 2011
- [5] Smolnicki, T., Rusinski, E., Karlinski, J., FEM modeling of fatigue loaded bolted flange joints, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 22, Issue 1, 2007
- [6] Jerome Montgomery, Methods for Modeling Bolts in the Bolted joint, Proc. of the ANSYS 2002 User's Conference, Pittsburg, USA, 2002
- [7] Kim, J., Yoon, J.C., Kang, B.S., Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints, Applied Mathematical Modeling, Vol. 31, Issue 5, pp.895-911, 2007
- [8] Ansys Release 15.0 Documentation, Mechanical APDL Element reference, ANSYS Inc., 2013
- [9] Ansys Training in ANSYS Modules, Mechanical Introduction to Structural Nonlinearities, Introduction to Contact Lecture 3, ANSYS Inc., 2014
- [10] Piscan, I., Predincea, N., Pop, N., Finite element analysis of bolted joint, Proceedings in Manufacturing Systems, Vol. 5, No.3, 2010
- [11] Oliver Michael, Modeling threaded bolted joints in Ansys Workbench, Ansys, INC., 2012
- [12] Vice Šimić, Otpornost materijala II, Školska knjiga, 1995

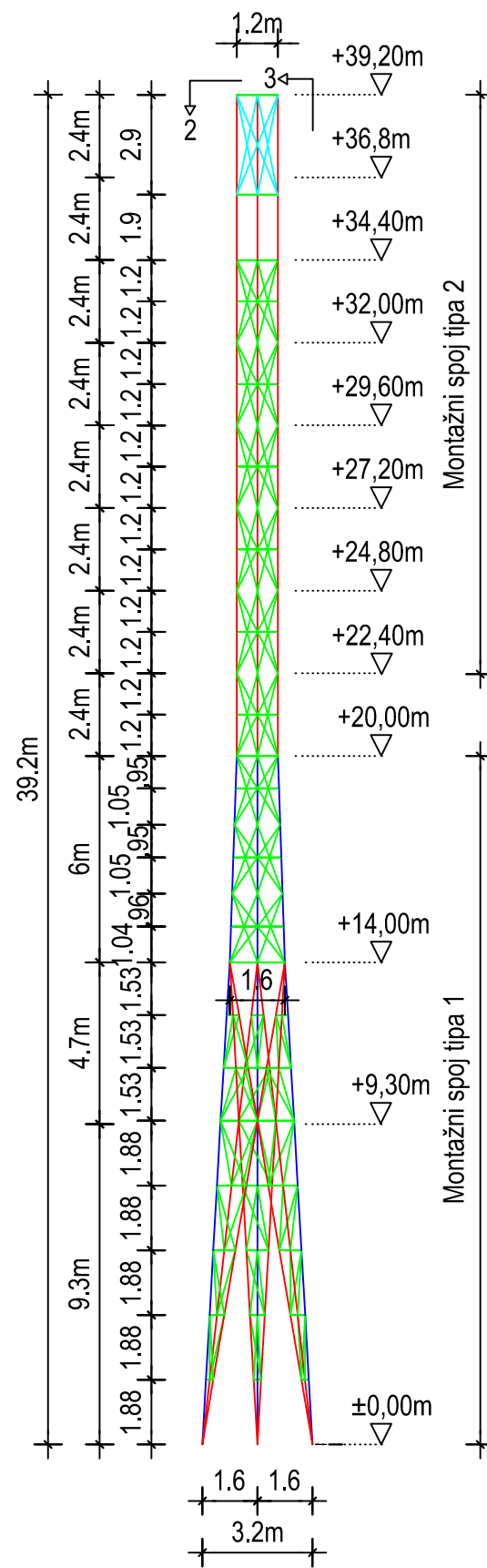


- [13] Divić Vladimir, Simulacije krajnjih graničnih stanja pod djelovanjem vjetra metodom konačno-diskretnih elemenata, Doktorska disertacija, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2014
- [14] MATLAB, Mathworks, 2012, Natick, USA
- [15] Poulin, S., Larsen, A., Drag loading of circular cylinders inclined in the along-wind direction, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic* 95, pp.1350-1363, 2007

## **6 GRAFIČKI PRILOZI**

Dispoziciono rješenje antenskog stupa.....List 1

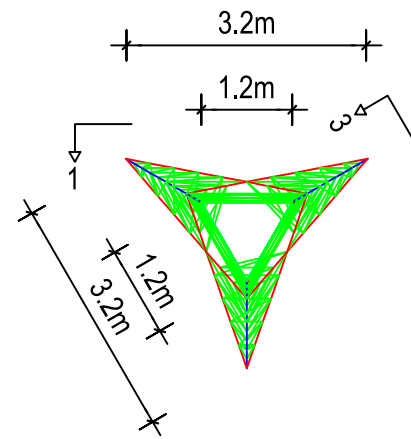
Pogled 1  
mj: 1:200



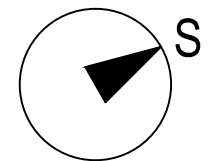
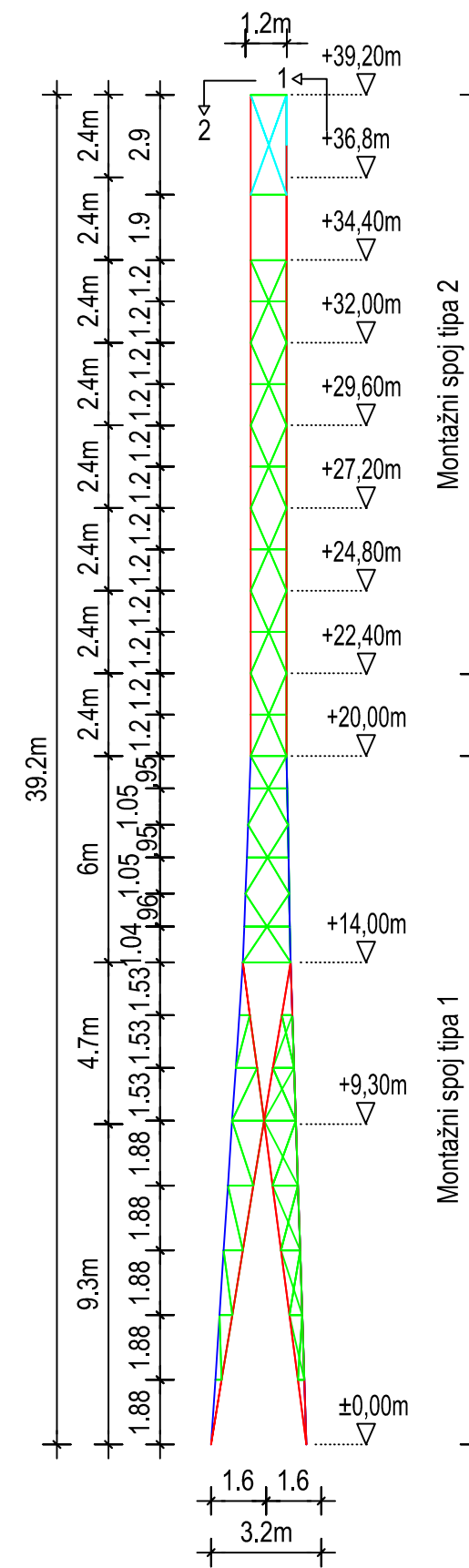
Dimenzije poprečnih presjeka:

- ○ 114.3/4.5mm
- ○ 88.3/5mm
- ○ 48.3/3.2mm
- ⊏ 60/60/5mm

Pogled 3  
mj: 1:200



Pogled 2  
mj: 1:200



FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE	
SVEUČILIŠTE U SPLITU	
Studij : Diplomski	Smjer : Konstrukcije
Katedra za metalne i drvene konstrukcije	Diplomski rad
Dispoziciono rješenje antenskog stupa	
mjerilo: 1:200	
Izradio: Hrvoje Botić, univ. bacc. ing. aedif	
Split, 2016.	
List 1	