Analiza čvrstoće okvira kontejnerske cisterne

Lončarić, Damir

Undergraduate thesis / Završni rad

2011

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:220149

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

Sveučilište u zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Damir Lončarić

Zagreb, 2011

Sveučilište u zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:
Prof. dr.sc. Jurica Sorić **Damir Lončarić**

Zagreb, 2011

Sažetak

U radu se rješavala optimizacija konstrukcije okvira kontejnerske cisterne dobivene na temelju analitičkog proračuna. Sama optimizacija radila se u dva koraka. Prvi korak je bio proračun postojeće konstrukcije na slučajeve opterećenja propisane zadanim pravilima za izradu kontejnera, dok se drugi korak sastojao od rekonstrukcije zadane rešetkaste konstrukcije u cilju smanjenja mase.

Proračuni su rađeni u programskom paketu *Abaqus 6.9-1*. Tijekom proračuna korišteni su Euler-Bernoulijevi gredni konačni elementi. U prvom slučaju opterećenja ispituje se konvergencija rješenja i odabire se najpovoljnija mreža koja se koristi u svim ostalim slučajevima. U prvom koraku se u svakom od slučaja računaju osne sile i osna naprezanja u štapovima okvira i uspoređuju s analitički dobivenim vrijednostima. U drugom koraku se smanjuju samo dimenzije profila poprečnih presjeka štapova (rešetka se ne mijenja) u cilju smanjenja mase pritom pazeći da osna naprezanja budu manja od dopuštenog. Nakon optimizacije rešetke, optimirana rešetka se Na kraju, izabran je jedan od slučajeva opterećenja i na njemu je proveden proračun s Timošenkovim grednim konačnim elementom radi usporedbe rješenja s Euler-Bernoulijevim konačnim elementom.

Sadržaj

Sažetak 0

Popis slika 3

Popis tablica 5

Popis oznaka 6

Izjava 7

1. Uvod 8

1.1 Opis problema 8

1.2 Opis slučajeva opterećenja 9

1.2.1 Opterećenje okvira uslijed ukupne težine cisterne 12

1.2.2 Podizanje za donje nauglice 12

1.2.3 Podizanje za gornje nauglice 13

1.2.4 Oslanjanje na donje nauglice 14

1.2.5 Djelovanje horizontalne sile R na donjim nauglicama 14

1.2.6 Djelovanje horizontalne sile F=75 kN na gornjim nauglicama 15

1.2.7 Djelovanje horizontalne sile F=150 kN na gornjim nauglicama 15

1.2.8 Djelovanje uzdužne inercijske sile na bočne rešetke 15

1.2.9 Djelovanje uzdužne inercijske sile na donju rešetku 16

1.2.10 Djelovanje sila kod slaganja kontejnera jadan na drugi 16

1.2.11 Djelovanje bočne inercijske sile na donju rešetku 16

1.3 Opis konačnih elemenata 18

2 Verifikacija korištenih konačnih elemenata 20

2.1 Primjer 1. 20

2.2 Primjer 2. 20

2.3 Primjer 3. 21

2.4 Primjer 4. 24

2.5 Primjer 5. 26

3 Analiza čvrstoće konstrukcije 27

3.1 Podizanje za donje nauglice 27

3.2 Podizanje za gornje nauglice 31

3.3 Djelovanje horizontalne sile R na donjim nauglicama 33

3.4 Ostali slučajevi opterećenja 36

3.4.1 Oslanjanje na donje nauglice 36

3.4.2 Djelovanje horizontalne sile F=75 kN na gornjim nauglicama 36
3.4.3 Djelovanje horizontalne sile F=150 kN na gornjim nauglicama 37
3.4.4 Djelovanje uzdužne inercijske sile na bočne rešetke 38
3.4.5 Djelovanje uzdužne inercijske sile na donju rešetku 39
3.4.6 Djelovanje bočne inercijske sile na donju rešetku 41
3.4.7 Djelovanje sila kod slaganja kontejnera jadan na drugi 41
4 Rekonstrukcija rešetkaste konstrukcije 43
4.1 Opis i rezultati rekonstrukcije 43
4.2 Proračun Timošenkovim konačnim elementima 53
4.3 Proračun izvijanja 54
5 Zaključak 55
6 Literatura 56

Popis slika

Slika 1.1 Skica rešetke okvira kontejnerske cisterne 9
Slika 1.2 Skice slučajeva opterećenja I 10
Slika 1.3 Skice slučajeva opterećenja II 11
Slika 1.4. Inercijsko opterećenje cisterne 12
Slika 1.5 Podizanje za donje nauglice – ekvivalentni rubni uvjeti i sile 13
Slika 1.6 Podizanje za gornje nauglice - ekvivalentni rubni uvjeti i sile 13
Slika 1.7 Oslanjanje na donje nauglice - rubni uvjeti i sile 14
Slika 1.8 Oslanjanje na donje nauglice uz djelovanje horizontalne sile *R* na donjim nauglicama 15
Slika 1.9 Djelovanje bočne inercijske sile – slučaj A (gore) i slučaj B (dolje) 17
Slika 1.10 Prostorni konačni gredni element 18
Slika 2.1 Skica prvog primjera 20
Slika 2.2 Skica drugog primjera 21
Slika 2.3 Skica trećeg primjera 21
Slika 2.4 Raspodjela momenata savijanja po nosaču. Pozitivni momenti su usmjereni u smjeru lokalne osi obojane crvenom bojom. 24
Slika 2.5 Skica četvrtog primjera. Na slici su crvenim krugovima prikazani čvorovi mreže korištene kod proračuna u *Abaqusu* 24
Slika 2.6 Analitički dobiveni dijagrami za tražene veličine 25
Slika 2.7 Raspodjela osne sile na deformiranom obliku 25
Slika 2.8 Lijevo – skica petog primjera; desno – dijagrami momenata savijanja i uvijanja 26
Slika 3.1 Nedeformirani oblik konstrukcijske rešetke 27
Slika 3.2 Oznake štapova na bočnoj rešetki 28
Slika 3.3 Deformirani oblik (lijevo) i raspodjela pomaka u metrima [m] (desno) 29
Slika 3.4 Raspodjela osnih sila izražena u njutnima [N] 30
Slika 3.5 Raspodjela maksimalnih (lijevo) i minimalnih (desno) osnih naprezanja po presjeku izražena u paskalima [Pa] 30
Slika 3.6 Raspodjela momenata savijanja izraženih u njutn metrima [Nm] 30
Slika 3.7 Deformirani oblik (lijevo) i raspodjela pomaka u metrima [m] (desno) 31
Slika 3.8 Raspodjela osnih sila izražena u njutnima [N] 32
Slika 3.9 Raspodjela maksimalnih (lijevo) i minimalnih (desno) osnih naprezanja po presjeku izražena u paskalima [Pa] 32
Slika 3.10 Raspodjela momenata savijanja izraženih u njutn metrima [Nm] 32
Slika 3.11 Deformirani oblik (lijevo) i raspodjela pomaka u metrima [m] (desno) 34
Slika 3.12 Raspodjela osnih sila izražena u njutnima [N] 34
Slika 3.13 Raspodjela maksimalnih (lijevo) i minimalnih (desno) osnih naprezanja po presjeku izražena u paskalima [Pa] 34
Slika 3.14 Raspodjela momenata savijanja izraženih u njutn metrima [Nm] 35
Slika 3.15 numeriranje štapova u prednjoj i stražnjoj rešetci 38
Slika 3.16 Numeracija štapova podne rešetke 40

Slika 4.1 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja - podizanje za donje nauglice 44
Slika 4.2 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja - podizanje za gornje nauglice 44
Slika 4.3 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja - oslanjanje na donje nauglice 45
Slika 4.4 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje horizontalne tlačne sile *R* 45
Slika 4.5 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje horizontalne vlačne sile *R* 46
Slika 4.6 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje horizontalne vlačne sile *F*=75 kN na desnom kraju 46
Slika 4.7 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje horizontalne tlačne sile *F*=75 kN na desnom kraju 47
Slika 4.8 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje horizontalne vlačne sile *F*=75 kN na lijevom kraju 47
Slika 4.9 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje horizontalne tlačne sile *F*=75 kN na lijevom kraju 48
Slika 4.10 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje horizontalne vlačne sile *F*=150 kN 48
Slika 4.11 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje horizontalne tlačne sile *F*=150 kN 49
Slika 4.12 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje uzdužne inercijske sile na bočne rešetke I 49
Slika 4.13 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje uzdužne inercijske sile na bočne rešetke II 50
Slika 4.14 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje uzdužne inercijske sile na podnu rešetku I 50
Slika 4.15 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje uzdužne inercijske sile na podnu rešetku II 51
Slika 4.16 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje bočne inercijske sile na podnu rešetku I 51
Slika 4.17 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje bočne inercijske sile na podnu rešetku I 52
Slika 4.18 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje sila kod slaganja kontejnera jedan ma drugi 52
Slika 4.19 Graf konvergencije maksimalnog ekvivalentnog naprezanja 53

Popis tablica

Tabela 1.1. Svojstva korištenog materijala 8
Tabela 1.2 Dimenzije profila cijevi korištenih u konstrukciji. 8
Tabela 2.1 Primjer 1. – usporedba analitičkih i dobivenih vrijednosti 20
Tabela 2.2 Primjer 2. – usporedba analitičkih i dobivenih vrijednosti 21
Tabela 2.3 Primjer 3. – momenti koji djeluju na nosač 22
Tabela 2.4 Primjer 3. –numerički dobivene vrijednosti 23
Tabela 2.5 Numeričke vrijednosti pojedinih analitičkih izraza 26
Tabela 2.6 Numeričke vrijednosti pojedinih analitičkih izraza 26
Tabela 3.1 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu* 28
Tabela 3.2 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu* 33
Tabela 3.3 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu* 35
Tabela 3.4 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu* 36
Tabela 3.5 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu* 37
Tabela 3.6 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu* 38
Tabela 3.7 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu* 39
Tabela 3.8 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu* 40
Tabela 3.9 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu* 41
Tabela 3.10 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu*. Za polja koja nisu popunjena ili ne postoje numerirani štapovi za taj dio rešetke, ili su osne sile zanemarivo male, reda veličine 1 kN. 42
Tabela 4.1 Dimenzije rekonstruiranih profila 43

Popis oznaka

a, b	m	dimenzije poprečnog presjeka
E	GPa	modul elastičnosti
F, F_i	N	koncentrirana sila opterećenja
g	m/s^2	ubrzanje Zemljine sile teže
I_x, I_y, I_p	m^4	Momenti tromosti
$\boldsymbol{k}$		matrica krutosti Euler-Bernoulijevog konačnog elementa
L	m	duljina štapa
M_i	Nm	momenti sila (savijanja i uvijanja)
N	N	osna sila u štapu
Q	N	poprečna sila u štapu
R	N	ukupna težina cisterne
R_C	N	ukupna težina cisterne
R_O	N	ukupna težina okvira
R_O^f	N	težina optimiranog okvira kontejnera
w, w_x, w_z	m	progib
σ_T	MPa	granica tečenja
σ_M	MPa	vlačna čvrstoća
σ_ω	MPa	naprezanje izvijanja
ω		koeficijent izvijanja
ν		Poissonov koeficijent
σ_{dop}	MPa	dopušteno naprezanje
$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$	rad	kut zakreta

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno, služeći se stečenim znanjem i navedenom literaturom.

Posebno bih se zahvalio mentoru, prof. dr. sc. Jurici Soriću, te asistentu, dr. sc. Tomislavu Jarku, na utrošenom vremenu, strpljenju, pomoći i korisnim savjetima.

1. Uvod

U ovom poglavlju upoznajemo se sa konstrukcijom, izgledom i korištenim materijalom, u prvoj cjelini. U drugoj cjelini poglavlja ukratko su opisani slučajevi opterećenja iz [1] koje treba konstrukcija podnijeti. Nakon toga, u trećoj cjelini, dan je kratki teorijski opis korištenih konačnih elemenata, Euler-Bernoulijevog i Timošenkovog konačnog grednog elementa.

1.1 Opis problema

Konstrukcija okvira kontejnerske cisterne sastoji se od prostorne rešetke izrađene od pravokutnih i kvadratnih čeličnih cijevi izrađenih iz konstrukcijskog čelika (Č 0363). Svojstva čelika dana su u Tabela 1.1., a skica osnovne rešetke iz [1] s osnovnim dimenzijama prikazana je na Slika 1.1 koja je popraćena dimenzijama profila u

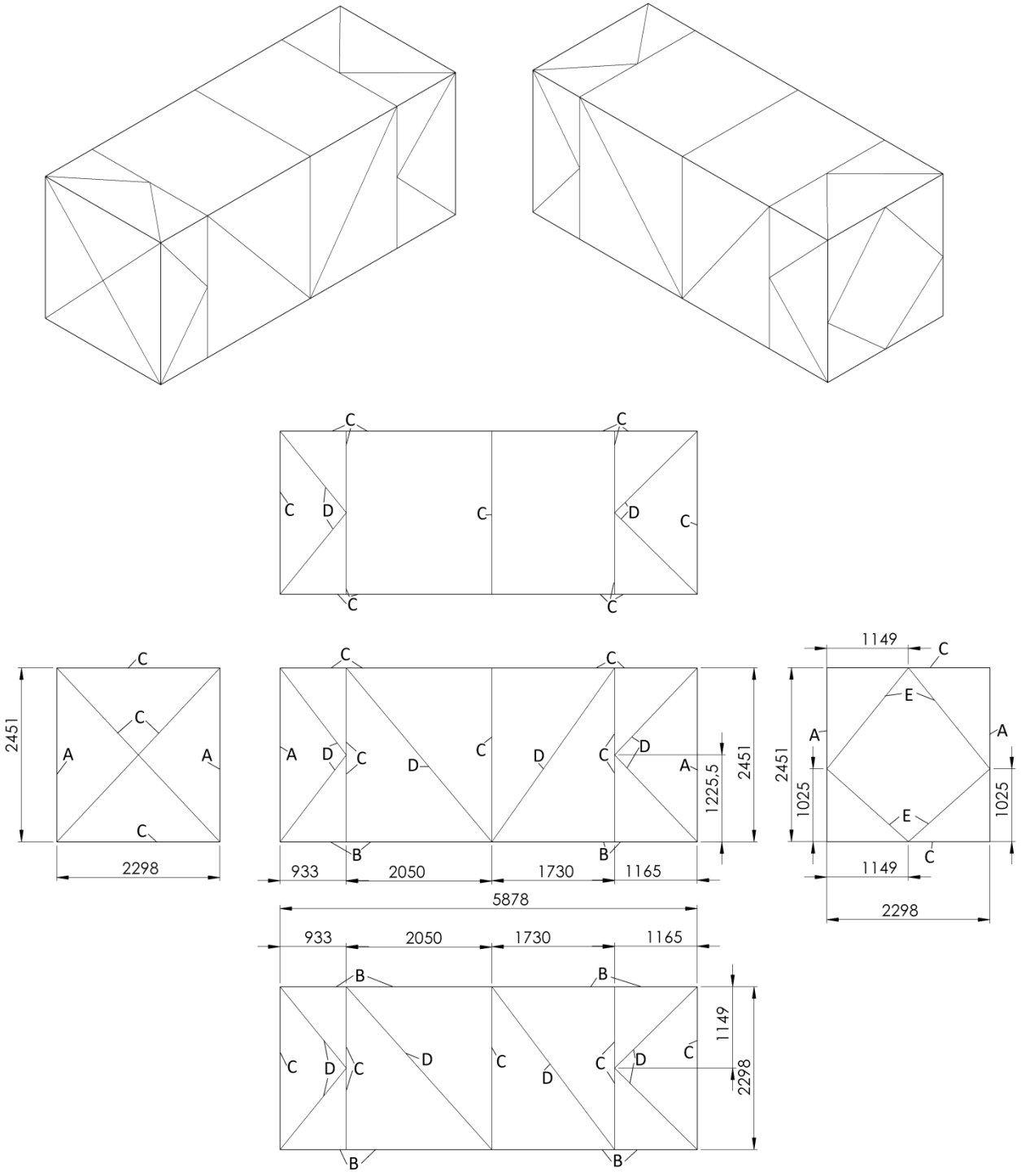
Tabela 1.2. Sve navedene dimenzije na slici i u tablici izražene su u milimetrima.

Tabela 1.1. Svojstva korištenog materijala

	Granica tečenja	Vlačna čvrstoća	Modul elastičnosti	Poissonov faktor
Konstrukcijski čelik Č 0363	$\sigma_T = 240\text{MPa}$	$\sigma_M \geq 370\text{MPa}$	$E = 200\text{GPa}$	$\nu = 0{,}3$

Tabela 1.2 Dimenzije profila cijevi korištenih u konstrukciji.

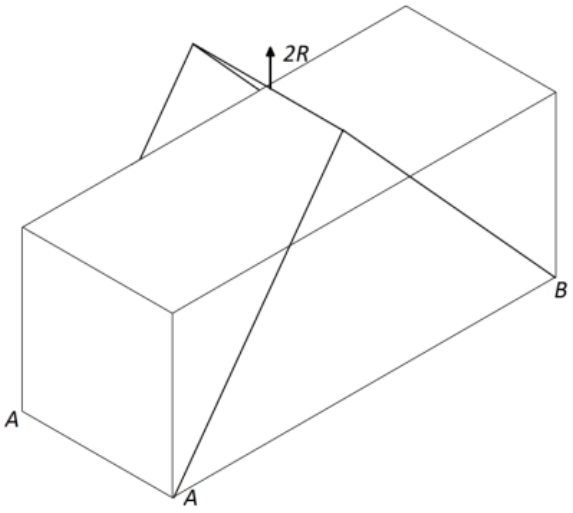
Ime profila	A	B	C	D	E
VxŠxD [mm]	160x160x7,1	150x150x5	100x100x4	70x70x3,5	100x60x5



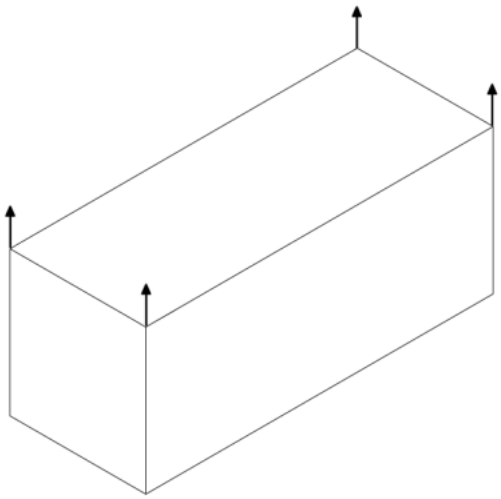
Slika 1.1 Skica rešetke okvira kontejnerske cisterne

1.2 Opis slučajeva opterećenja

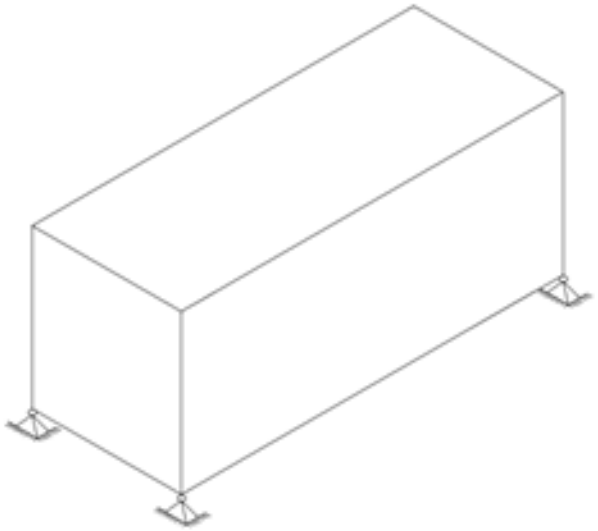
Ova cjelina je podijeljena u nekoliko manjih cjelina u kojima se zasebno opisuju slučajevi opterećenja koje trebamo ispitati. U svakoj od cjelina prikazani su rubni uvjeti te hvatišta i smjer sila koje djeluju u tom slučaju, a skice svih slučajeva su dane na slikama Slika 1.2 i Slika 1.3.



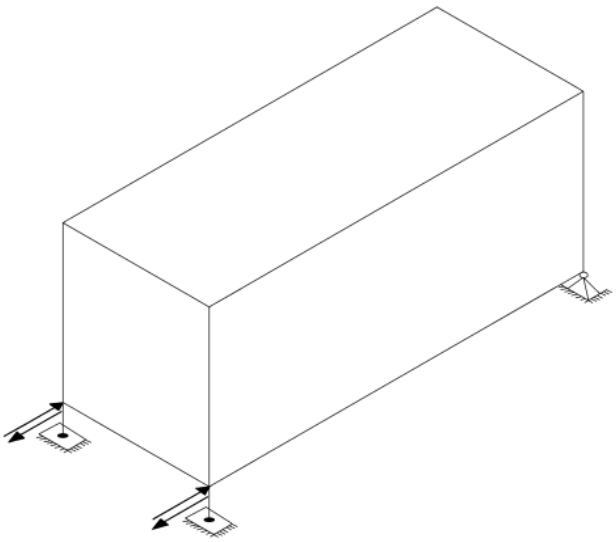
a)



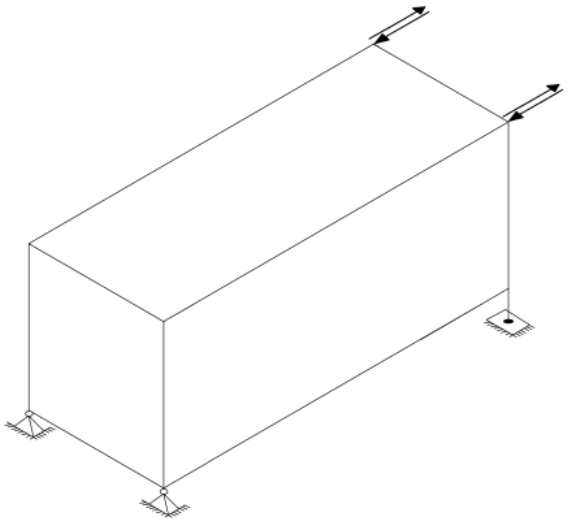
b)



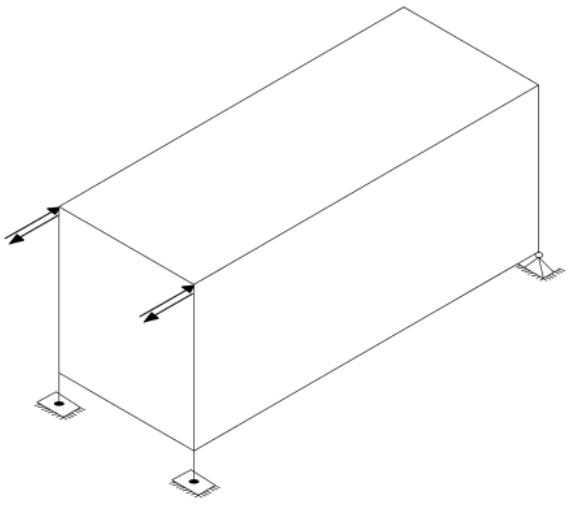
c)



d)

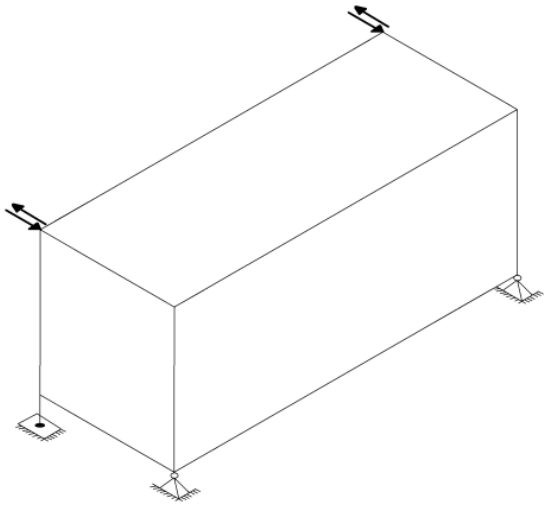


e)

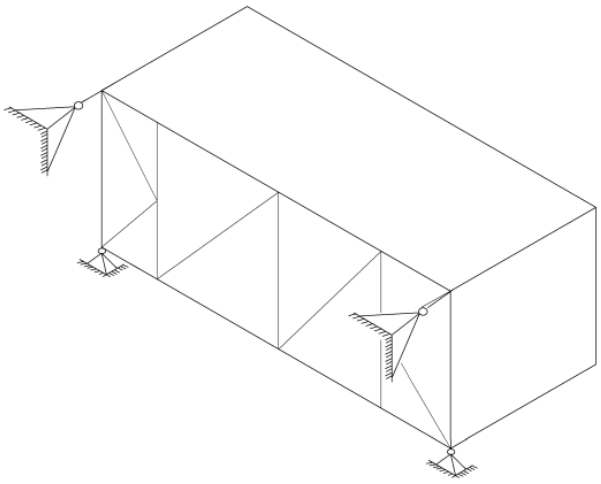


f)

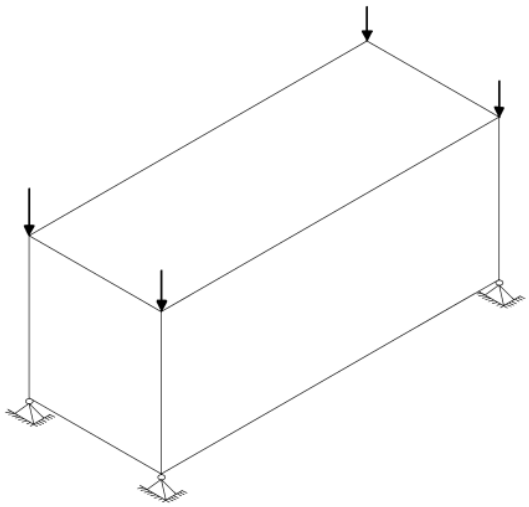
Slika 1.2 Skice slučajeva opterećenja I – *a)* podizanje za donje nauglice; *b)* podizanje za gornje nauglice; *c)* oslanjanje na donje nauglice; *d)* djelovanje horizontalne sile na donje nauglice; *e)* djelovanje horizontalne sile na gornje nauglice;



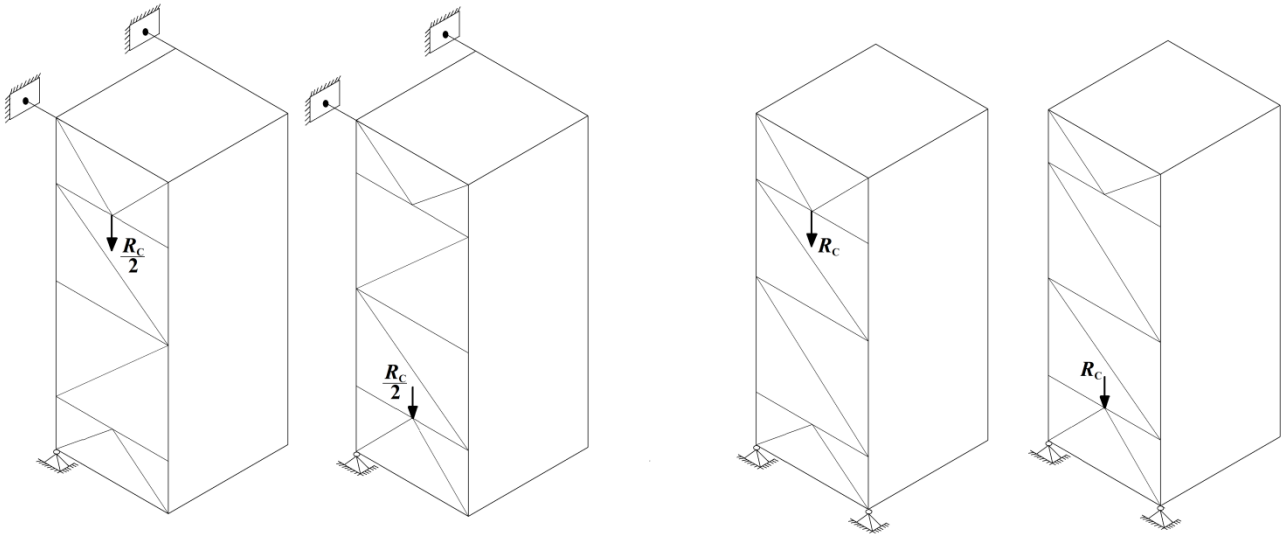
a)



b)



c)



d) *e)*

Slika 1.3 Skice slučajeva opterećenja II – *a)* poprečno djelovanje horizontalne sile na gornje nauglice; *b)* bočna inercijska sila; *c)* slaganje kontejnera jadan na drugi; uzdužno djelovanje inercijske sile na *d)* bočne i *e)* podnu rešetku

1.2.1 Opterećenje okvira uslijed ukupne težine cisterne

Opterećenje okvira uslijed ukupne težine cisterne je preuzeto iz [1] gdje je modelirano kako je prikazano na slici 1.4. Ukupna težina cisterne iznosi

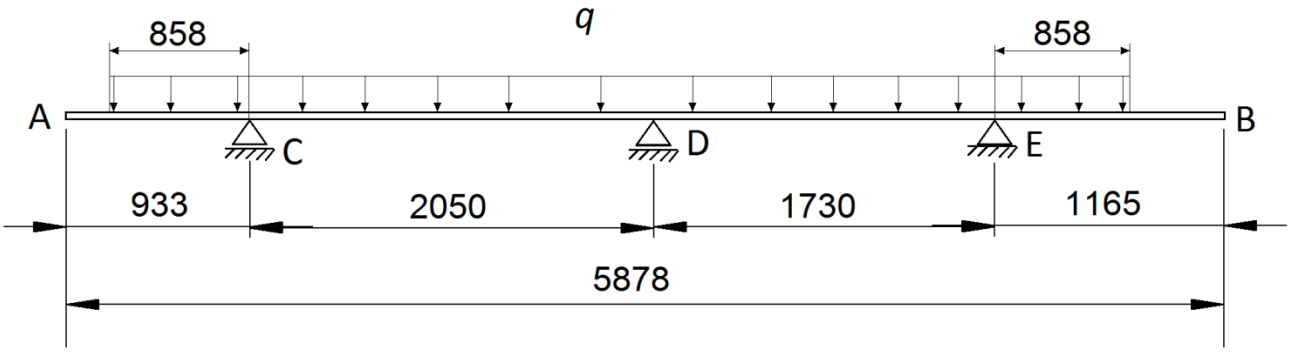
$$\boldsymbol{R_C = 220\ \text{kN}} \tag{1.1}$$

Reakcije u osloncima, a time i sile kojima cisterna djeluje na okvir, su određene pomoću Castiglianova teorema u [1] i direktno su preuzete odatle:

$$F_C = 77\ \text{kN} \tag{1.2}$$

$$F_D = 71{,}1\ \text{kN} \tag{1.3}$$

$$F_E = 71{,}9\ \text{kN} \tag{1.4}$$



Slika 1.4. Inercijsko opterećenje cisterne

Težina samog okvira se ne unosi kao eksplicitna veličina u sam program, već kao iznos ubrzanja sile teže g i gustoće, te volumena cijevi. Ona je dana s (1.5)

$$R_O = 16{,}357\ \text{kN} \tag{1.5}$$

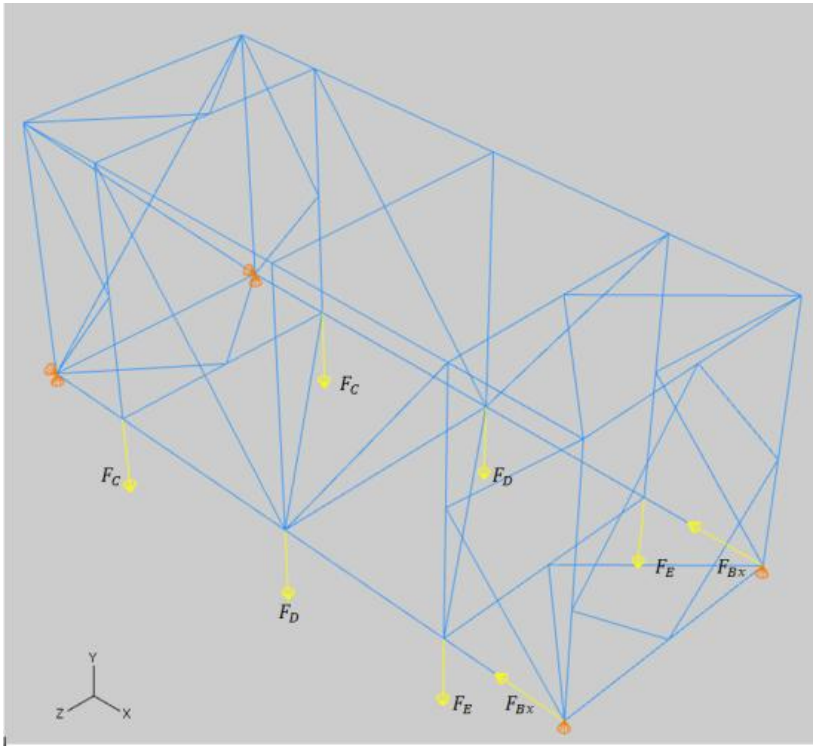
Unijeta na ovaj način razlikuje se od one korištene u [1] koja iznosi 20 kN. Ukupna težina kontejnera dana je s:

$$R = 236{,}357\ \text{kN} \tag{1.6}$$

1.2.2 Podizanje za donje nauglice

Podizanje za donje nauglice vrši se prema slici 1.2.*a*. Da bi izbjegli nepotrebne rotacije kontejnera, sila podizanja *2R* mora biti iznad težišta. To se postiže na taj način da sile u točki *A* zatvaraju s horizontalnom osi kut od 45^0, a sile u točki *B* kut od $42{,}888^0$. Te sile dane su u (1.7). Pritom, da bi izbjegli pomake krutog tijela, stavljamo ekvivalente rubne uvjete kako je prikazano na slici 1.5 te sile reakcije koje ćemo dobiti moraju biti jednake silama kojima podižemo kontejner na slici 1.2.*a*. Sile koje djeluju na okvir su sile od ukupne težine cisterne (izrazi (1.2) do (1.4)), sila F_{Bx} te dvostruka težina samog okvira (kontinuirana po okviru, nije naznačena na slikama).

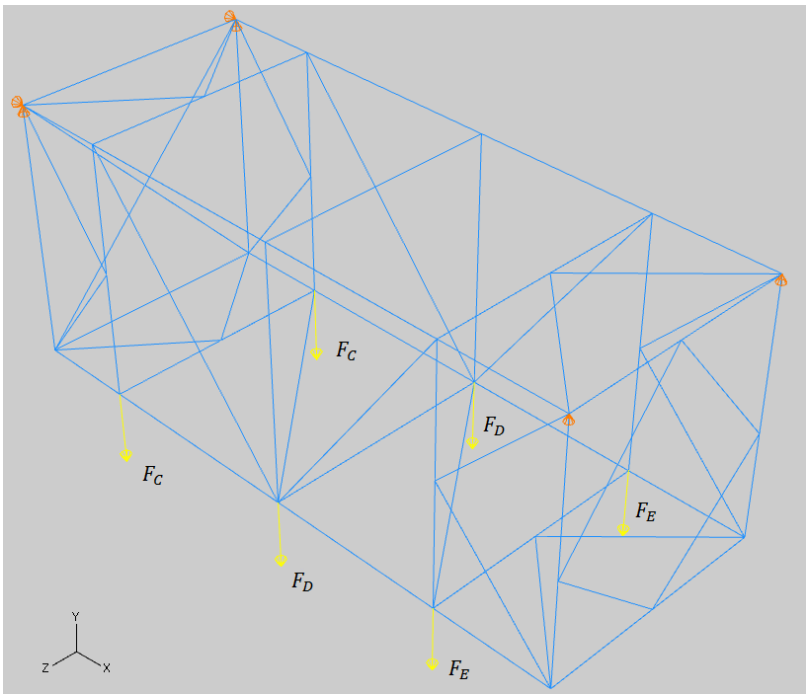
$$F_{Ax} = 122{,}537\ \text{kN} \quad F_{Ay} = 122{,}537\ \text{kN} \quad F_{Bx} = -122{,}537\ \text{kN} \quad F_{By} = 113{,}82\ \text{kN} \tag{1.7}$$



Slika 1.5 Podizanje za donje nauglice – ekvivalentni rubni uvjeti i sile

1.2.3 Podizanje za gornje nauglice

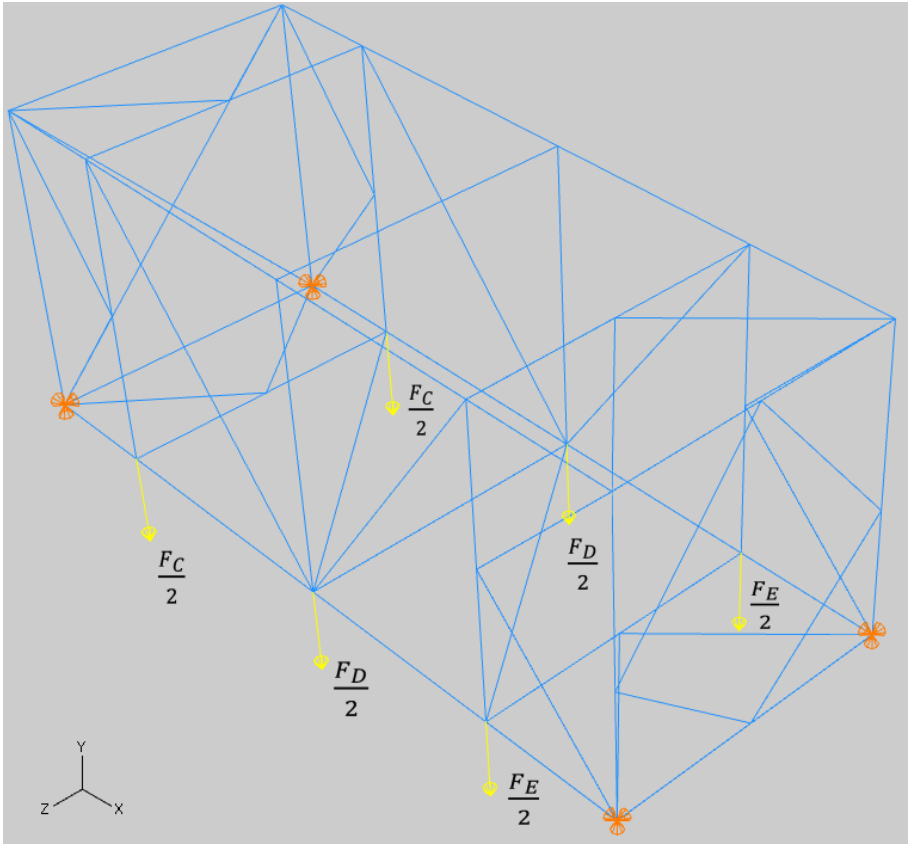
Podizanje za gornje nauglice prikazano je na slici 1.2.*b*. Ekvivalentna sila kojom se podiže iznosi, kao i u prethodnom slučaju, *2R*. Da bi izbjegli pomake krutog tijela, uvodimo rubne uvjete kako je prikazano na slici 1.6. Sile koje djeluju na okvir su sile od ukupne težine cisterne (izrazi (1.2) do (1.4)) te dvostruka težina samog okvira (kontinuirana po okviru, nije naznačena na slikama).



Slika 1.6 Podizanje za gornje nauglice - ekvivalentni rubni uvjeti i sile

1.2.4 Oslanjanje na donje nauglice

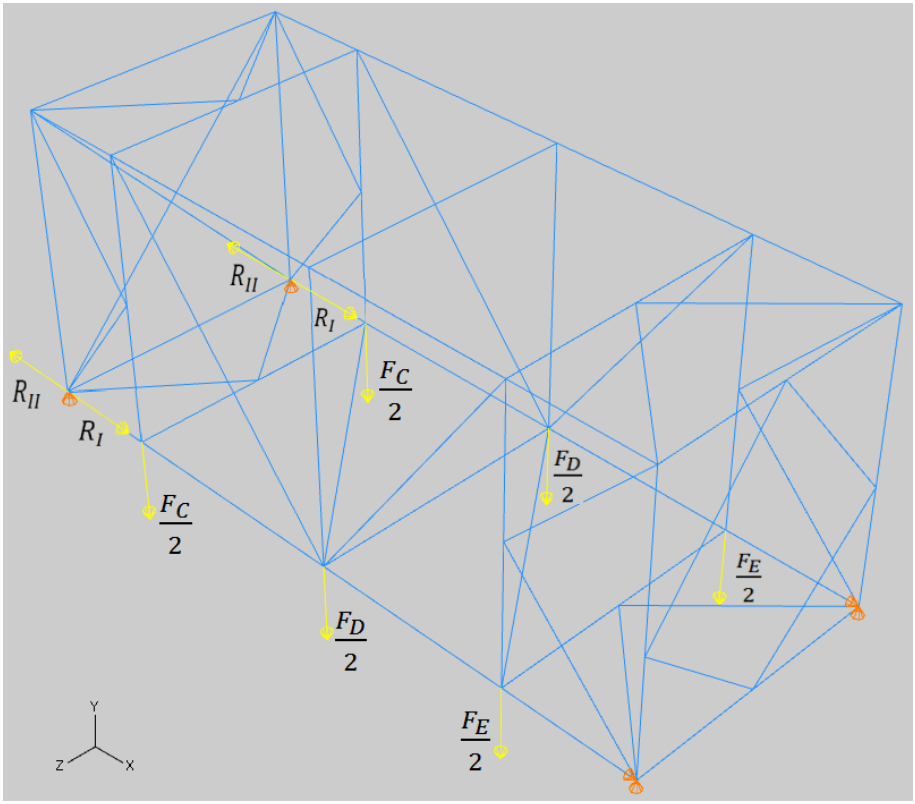
Skica ovog slučaja prikazana je na slici 1.2 *c*. Kod ovog slučaja kontejner je opterećen samo ukupnom težinom cisterne (izrazi (1.2) do (1.4)) i vlastitom težinom (nije prikazana na slici), a zglobno je učvršćen na sve četiri donje nauglice, kako prikazuje slika 1.7.



Slika 1.7 Oslanjanje na donje nauglice - rubni uvjeti i sile

1.2.5 Djelovanje horizontalne sile R na donjim nauglicama

U ovom slučaju opterećenja, čija je skica prikazana na slici 1.2 *d*, okvir je opterećen silom težom te horizontalnim silama iznosa ukupne težine dane u (1.6) koje su u prvom slučaju tlačne (R_I), a u drugom vlačne (R_{II}). Na slici 1.8 su prikazana oba slučaja zajedno, sve sile koje djeluju osim vlastite težine okvira koja je kontinuirano raspodijeljena po cijelom okviru.



Slika 1.8 Oslanjanje na donje nauglice uz djelovanje horizontalne sile *R* na donjim nauglicama

1.2.6 Djelovanje horizontalne sile F=75 kN na gornjim nauglicama

Ovdje imamo ukupno četiri slučaja opterećenja. Prva dva su prikazana na slici 1.2 *e*, a druga dva na slici 1.2 *f*. U sva četiri slučaja okvir je opterećen silom istog iznosa, *F=75* kN, ali su smjerovi i hvatišta različita, kako je prikazano na slikama. Također se vidi da one donje nauglice koje su ispod hvatišta sile *F* klizno učvršćene, dok su preostale dvije zglobno učvršćene.

1.2.7 Djelovanje horizontalne sile F=150 kN na gornjim nauglicama

Razlika ovog i prethodnog slučaja je ta da ovdje sila *F* djeluje u smjeru osi *z* (u prošlom je u smjeru osi *x*) i ima dvostruki iznos od one u prethodnom slučaju. Posebno, zbog simetrije konstrukcije nije potrebno raditi sva četiri slučaja, već je dovoljno samo dva, koja su prikazana na slici 1.3 *a*.

1.2.8 Djelovanje uzdužne inercijske sile na bočne rešetke

Kako je vidljivo na slici 1.4, cisterna je učvršćena za okvir samo u točki *E* i preko te točke se prenosi težina kad je kontejner u uspravnom položaju kao na slici 1.3 *d*. U ovom slučaju, pretpostavlja se da se ukupna težina cisterne prenosi samo na bočne rešetke (općenito, prenosi se na bočne i donju rešetku). Okvir je, dakle, opterećen polovicom ukupne težine cisterne na svakoj od bočnih rešetki i još je dodatno opterećen vlastitom težinom. Kako konstrukcija nije simetrična u smjeru djelovanja sila, potrebno je ispitati oba slučaja uspravnog položaja kontejnera. Pritom su oba slučaja prikazana na istoj slici imajući na umu

da vlastita težina okvira koja je kontinuirano raspodijeljena po okviru i nije prikazana na slici, ima isti smjer kao i sila R_C.

1.2.9 Djelovanje uzdužne inercijske sile na donju rešetku

Slično slučaju opisanom u 1.2.8. gdje se pretpostavlja najnepovoljniji slučaj opterećenja bočnih rešetki, ovdje se pretpostavlja najnepovoljniji slučaj opterećenja podne rešetke, to jest pretpostavlja se da se cijela težina cisterne prenosi na podnu rešetku. Isto imamo dva slučaja, kao i u prethodnom odjeljku, zbog istog razloga nesimetričnosti konstrukcije u smjeru djelovanja sila. Uz inercijsku silu cisterne, djeluje još i vlastita težina okvira koja nije prikazana na slici. Rubni uvjeti i djelovanje sila prikazani su na slici 1.3 *e* za oba slučaja.

1.2.10 Djelovanje sila kod slaganja kontejnera jadan na drugi

Prema pravilima, kontejner mora izdržati težinu pet istih kontejnera stavljenih na njega, jedan na drugi. Izraz za silu koja djeluje u kutnim stupovima (štapovi *A* profila) prema [1]:

$$F = 1{,}8\, R\, \frac{n-1}{4} \tag{1.8}$$

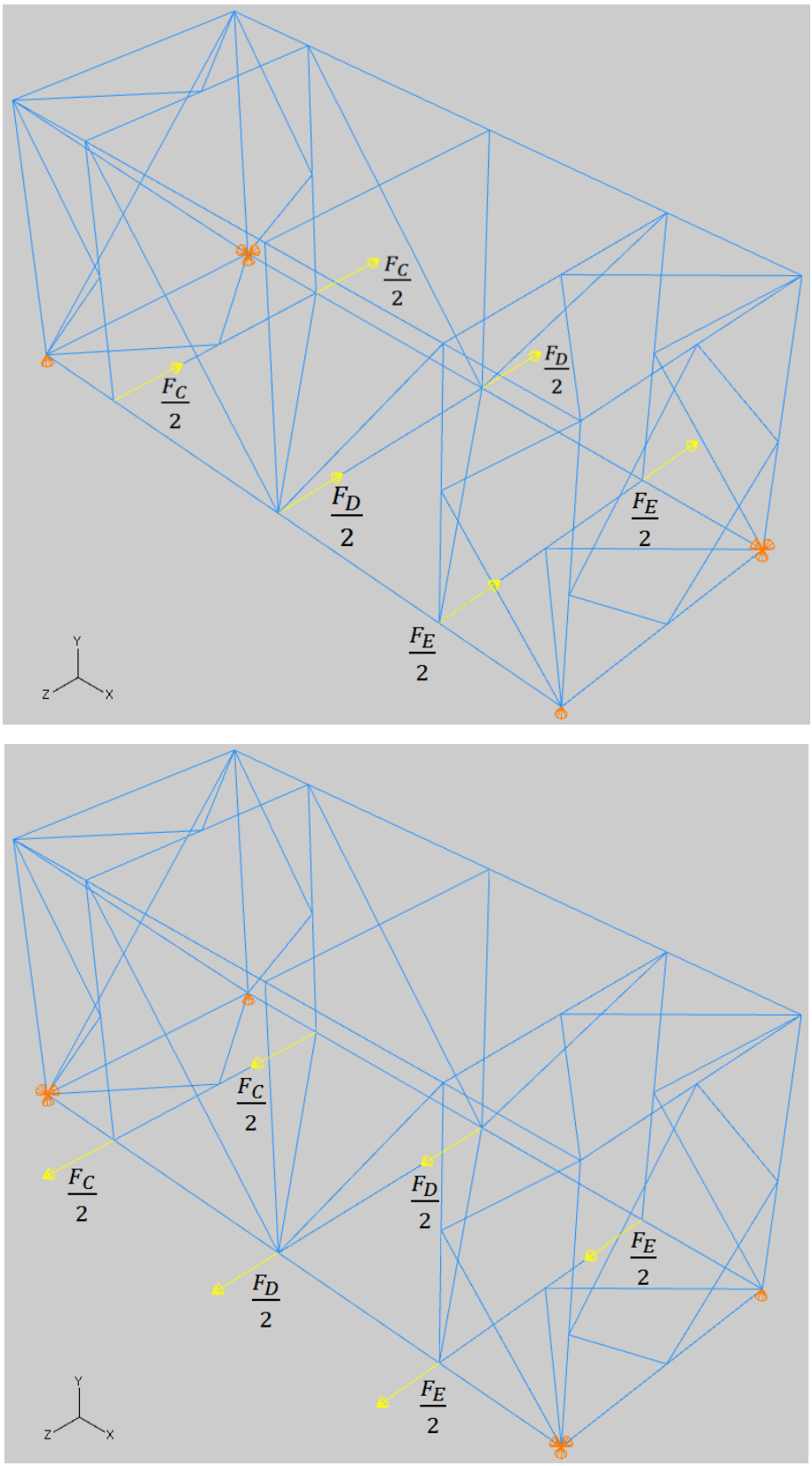
gdje je $n = 6$ broj kontejnera koji se slažu jedan na drugi. Ako uvrstimo težinu kontejnera iz (1.6) dobivamo

$$F = 1{,}8 \cdot\ 236{,}357 \cdot \frac{6-1}{4} = 531{,}803\ \text{kN} \tag{1.9}$$

Izgled opterećenja i rubnih uvjeta dan je na slici 1.3 *c*.

1.2.11 Djelovanje bočne inercijske sile na donju rešetku

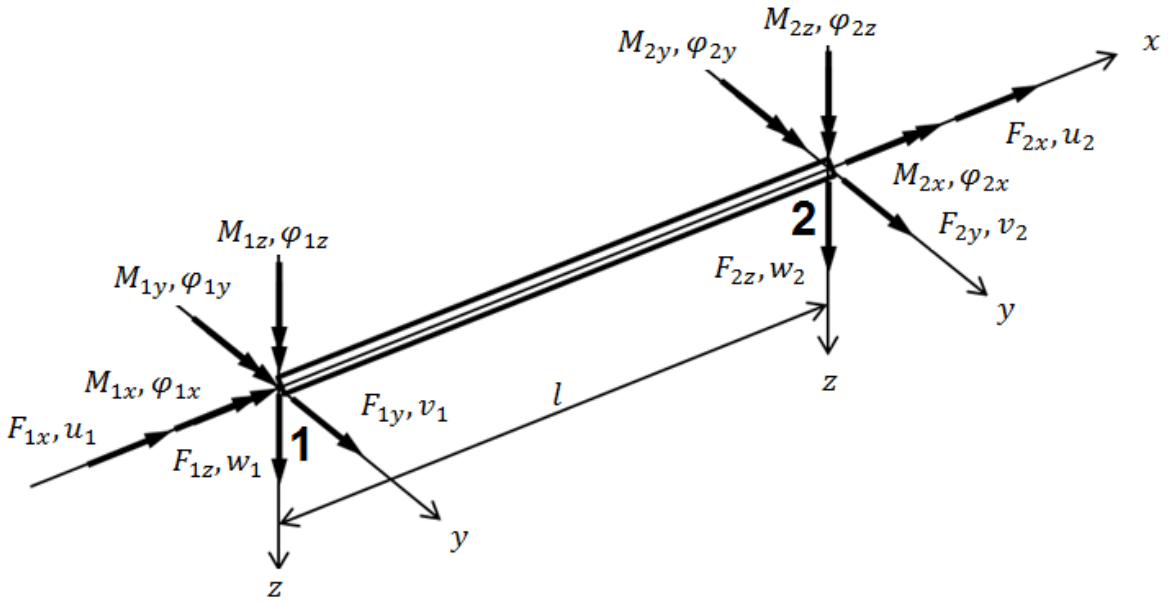
Na slici 1.3 *b* prikazana je skica ovog slučaja. Ovdje se ispituje izdržljivost kontejnera na bočnu silu inercije. Ovo se ispituje na način da se kontejner položi na obje bočne strane, a učvrsti se samo pomoću donjih nauglica. Na ovaj način se cjelokupna sila težine cisterne prenosi na podnu rešetku. Zbog asimetrije u *z* smjeru, potrebno je obaviti ispitivanje postavljanja kontejnera na obje bočne strane. Oba slučaja prikazana su na slici 1.9 (nije prikazana kontinuirana sila težine okvira koja se također uzima u obzir u ovome slučaju).



Slika 1.9 Djelovanje bočne inercijske sile – slučaj A (gore) i slučaj B (dolje)

1.3 Opis konačnih elemenata

Konačni elementi kojima ćemo analizirati konstrukciju zovu se trodimenzionalni kubični Euler-Bernoulijevi konačni elementi (kraće: E.-B. konačni elementi) i u *Abaqusu* se označuju oznakom B33. Ovi končani elementi imaju dva čvora, po jedan na svakom kraju. U svakom čvoru ima ukupno šest stupnjeva slobode: tri translacijska u smjerovima lokalnih koordinatnih osi i tri rotacijska oko smjerova lokalnih koordinatnih osi. Tim stupnjevima slobode pridružene su odgovarajuće sile i momenti na način kao na slici 1.10. Matricu krutosti [2] moguće je izvesti superpozicijom matrica krutosti različito opterećenih jednodimenzionalnih konačnih elemenata, a izraz (1.10) za matricu krutosti direktno je preuzet iz [2].



Slika 1.10 Prostorni konačni gredni element

$$\boldsymbol{k} = \begin{pmatrix}
\frac{AE}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{AE}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2} \\
0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{l^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 \\
0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_x}{l} & 0 & 0 \\
0 & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{4EI_y}{l} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{2EI_y}{l} & 0 \\
0 & \frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l} & 0 & -\frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{l} \\
-\frac{AE}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{AE}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -\frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{l^2} & 0 & \frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{l^2} \\
0 & 0 & -\frac{12EI_y}{l^3} & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3} & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 \\
0 & 0 & 0 & -\frac{GI_x}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{l} & 0 & 0 \\
0 & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{2EI_y}{l} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{4EI_y}{l} & 0 \\
0 & \frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{l} & 0 & \frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l}
\end{pmatrix} \tag{1.10}$$

Prilikom izvođenja navedenih elemenata koristi se Euler-Bernoulijeva teorija čije je glavna pretpostavka da se zanemaruje deformacije zbog posmičnih naprezanja. Zbog toga, poprečni presjeci ostaju u istoj ravnini (ako nema uvijanja koje uzrokuje deplanaciju) i okomiti su na neutralnu liniju. Da bi ova pretpostavka bila ispunjena, omjer dimenzija poprečnog presjeka štapa i duljine štapa mora biti manji od 1/5 (greška manja od 2%) [3].

Na kraju rada dana je analiza slučaja opisanog u 1.2.2 Podizanje za donje nauglice s Timošenkovim konačnim grednim elementima radi usporedbe rezultata. Za razliku od Euler-Bernoulijevih konačnih elemenata, kod Timošenkovih konačnih grednih elemenata koristi se Timošenkova teorija koja pretpostavlja kutne deformacije prvog reda, tj. nakon deformacije poprečni presjeci i dalje leže u ravnini, ali više nisu okomiti na neutralnu os štapa već su zakrenuti za dodatni kut. Ta dodatna kutna deformacija je konstantna po presjeku, ali nije nužno po duljini štapa, a uzrokovana je posmičnim naprezanjima. Zbog toga se zakret kuta uvodi kao nova varijabla. Deformacija presjeka [4] je zbroj deformacije zbog savijanja (kao u E.-B. teoriji) i deformacije uslijed posmičnih naprezanja.

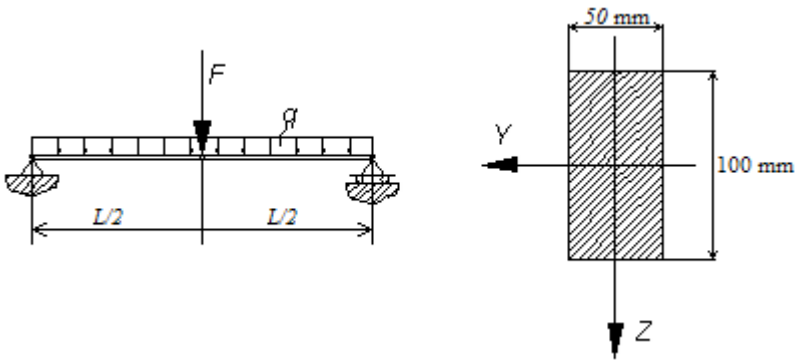
2 Verifikacija korištenih konačnih elemenata

U ovom poglavlju prikazana je točnost korištenih Euler-Bernoulijevih grednih konačnih elemenata na nekoliko verifikacijskih primjera.

2.1 Primjer 1.

Za gredu zadanu i opterećenu prema slici 2.1 potrebno je odrediti progib na njenoj sredini uslijed svakog pojedinačnog opterećenja te uslijed svih opterećenja zajedno.

Zadano : koncentrirana sila F = 3000 N
kontinuirano opterećenje q = 20 N/mm
modul elastičnosti E = 210 GPa
razmak među osloncima L = 2 m



Slika 2.1 Skica prvog primjera

Za ovaj primjer osnovna mreža koju smo koristili je bila mreža s dva B23 konačna elementa (Euler-Bernoulijev element u dvije dimenzije) jednake duljine. Rezultati za dvostruko i trostruko gušću mrežu daju iste rezultate pa zaključujemo da je rješenje odmah konvergiralo. Usporedba analitički dobivenih vrijednosti i onih dobivenih u *Abaqusu* dana je u slijedećoj tablici:

Tabela 2.1 Primjer 1. – usporedba analitičkih i dobivenih vrijednosti

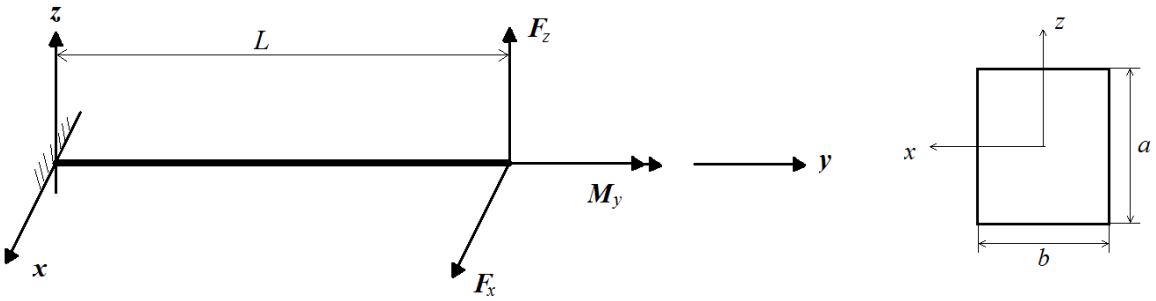
	Progib w [mm] na sredini ($x=L/2$)		
	Sila ***F***	Kontinuirano opterećenje ***q***	***F*** i ***q*** zajedno
Analitički	0,5714	4,7619	5,333
Abaqus	0,57143	4,76191	5,3333

2.2 Primjer 2.

Za gredu zadanu i opterećenu prema slici 2.2 potrebno je odrediti progibe i kutove zakreta na slobodnom kraju.

Zadano: duljina grede L = 1 m
dimenzije poprečnog presjeka a x b = 0,02 m x 0,01 m
modul elastičnosti E = 200 GPa
Poissonov faktor ν = 0,3

Sila u smjeru x osi	F_x = 5 N
Sila u smjeru z osi	F_z = 10 N
Moment u smjeru y osi	M_y = 1 Nm



Slika 2.2 Skica drugog primjera

U slijedećoj tablici prikazane su veličine dobivene analitički [5] i numerički u *Abaqusu* na mreži od samo jednog B33 konačnog elementa. Rezultati za dvostruko i trostruko gušću mrežu daju iste rezultate pa zaključujemo da je rješenje odmah konvergiralo.

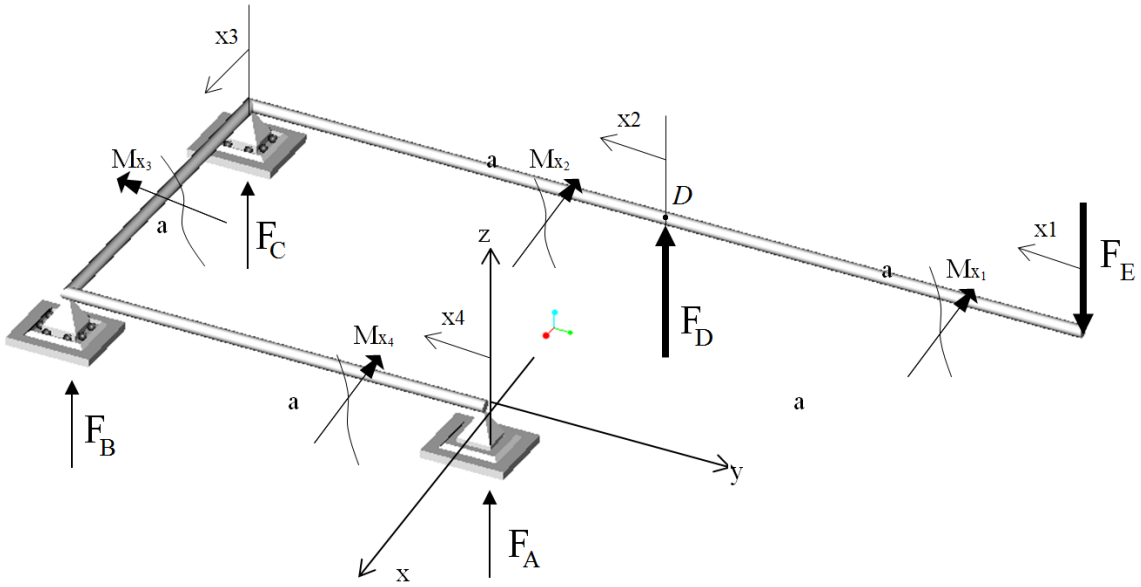
Tabela 2.2 Primjer 2. – usporedba analitičkih i dobivenih vrijednosti

	w_x [mm]	w_z [mm]	α_x [10^{-3}rad]	α_y [10^{-3}rad]	α_z [10^{-3}rad]
Analitički [2]	5,0003	2,5008	3,7500	2,8384	-7,5000
Abaqus	5,00000	2,50000	3,75000	2,8643	-7,5000

2.3 Primjer 3.

Za okvirni nosač, zadan i opterećen prema slici, potrebno je odrediti vertikalni pomak točke D.

Zadano: F = 100 N E = 200 GPa $F_D = F_E = F$
a = 1 m ∅=30 mm



Slika 2.3 Skica trećeg primjera

Problem rješavamo analitički na način da zadovoljimo uvjete ravnoteže dane u (2.1) do (2.5).

$$\Sigma \mathrm{F}_x = 0 \implies F_{\mathrm{Ax}} = 0 \tag{2.1}$$

$$\Sigma \mathrm{F}_y = 0 \implies F_{\mathrm{Ay}} = 0 \tag{2.2}$$

$$\Sigma \mathrm{F}_z = 0 \implies F_{\mathrm{Az}} + F_{\mathrm{B}} + F_{\mathrm{C}} + F_{\mathrm{D}} - F_{\mathrm{E}} = 0 \tag{2.3}$$

$$\Sigma \mathrm{M}_x = 0 \implies -aF_{\mathrm{B}} - aF_{\mathrm{C}} - aF_{\mathrm{E}} = 0 \tag{2.4}$$

$$\Sigma \mathrm{M}_y = 0 \implies aF_{\mathrm{C}} + aF_{\mathrm{D}} - aF_{\mathrm{E}} = 0 \tag{2.5}$$

Iz jednadžbi (2.3), (2.4) i (2.5) dobivamo izraze za sile reakcije:

$$F_{\mathrm{C}} = F - F_{\mathrm{D}} = 0\ \mathrm{N} \tag{2.6}$$

$$F_{\mathrm{B}} = -F_{\mathrm{C}} - F_{\mathrm{E}} = -F = -100N \tag{2.7}$$

$$F_{\mathrm{Az}} = F_{\mathrm{E}} - (F_{\mathrm{B}} + F_{\mathrm{C}} + F_{\mathrm{D}}) = -F_{\mathrm{B}} = 100N \tag{2.8}$$

S obzirom da tražimo progib u točki D, možemo ga odrediti pomoću drugog Castiglianovog teorema (2.9).

$$w_D = \frac{\partial U}{\partial F_D} \tag{2.9}$$

Momenti koji djeluju na nosaču dani su u slijedećoj tablici. Donji indeks označava smjer, a gornji na kojem dijelu nosača moment djeluje. Također je dan i izraz derivacije svakog momenta po sili koja djeluje u točki u kojoj želimo izračunati pomak, sili F_{D}.

Tabela 2.3 Primjer 3. – momenti koji djeluju na nosač

M_{Xi}	$\frac{\partial M_{Xi}}{\partial F_D}$
$\mathrm{M}_x^{\mathrm{ED}} = -x_1 F_{\mathrm{E}}$	0
$\mathrm{M}_x^{\mathrm{DC}} = -(x_2 + a)F_{\mathrm{E}} + x_2 F_{\mathrm{D}}$	x_2
$\mathrm{M}_y^{\mathrm{CB}} = x_3(F_{\mathrm{D}} - F_{\mathrm{E}} + F_{\mathrm{C}}) = 0$	0
$\mathrm{M}_x^{\mathrm{BA}} = aF_{\mathrm{D}} - 2aF_{\mathrm{C}}$	a
$\mathrm{M}_x^{\mathrm{BA}} = -x_4 F_{\mathrm{Az}} = -2x_4 F + x_4 F_{\mathrm{D}}$	x_4

Sad možemo napisati izraz za pomak w_D:

$$w_D = \frac{\partial U}{\partial F_D} = \frac{1}{EI}\left\{\int_0^a \left[-F\cdot(a+x_2) + F_D \cdot x_2\right]\cdot(x_2)dx_2 + \int_0^a \left[x_4 F_D - 2Fx_4\right]\cdot(x_4)dx_4\right\} + \\ + \frac{1}{\mathrm{GI_p}}\int_0^a \left[F_D \cdot a^2 - 2F\cdot a^2\right]\cdot(a)dx_3 \tag{2.10}$$

$$I_1 = \int_0^a \left[-F \cdot a \cdot x_2 - F \cdot x_2^2 + F_D \cdot x_2^2 \right] dx_2 = -F \cdot a \cdot \frac{x_2^2}{2}\Big|_0^a - F \cdot \frac{x_2^3}{3}\Big|_0^a + F_D \cdot \frac{x_2^3}{3}\Big|_0^a = -F \cdot \frac{a^3}{2} - F \cdot \frac{a^3}{3} + F_D \cdot \frac{a^3}{3} \quad (2.11)$$

$$I_2 = \int_0^a \left[F_D \cdot x_4^2 - 2F \cdot x_4^2 \right] dx_4 = -F_D \cdot \frac{x_4^3}{3}\Big|_0^a - 2F \cdot \frac{x_4^3}{3}\Big|_0^a = F_D \cdot \frac{a^3}{3} - 2F \cdot \frac{a^3}{3} \quad (2.12)$$

$$I_3 = \int_0^a \left[F_D \cdot a^2 - 2F \cdot a^2 \right] dx_3 = F_D \cdot a^3 - 2F \cdot a^3 \quad (2.11)$$

Momenti tromosti potrebni za račun dani su u (2.12)

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32}$$
$$I_y = \frac{I_p}{2} = \frac{\pi \cdot 30^4}{64} = 39760{,}782 \text{ mm}^4 \quad (2.12)$$

Na kraju, analitička vrijednost progiba u točki D iznosi:

$$w_D = \frac{1}{EI}\left\{ F_D \cdot \frac{a^3}{3} + F_D \cdot \frac{a^3}{3} - F \cdot \frac{3 \cdot a^3 + 2 \cdot a^3 + 4 \cdot a^3}{6} \right\} + \frac{1}{GI_p}\left\{ F_D \cdot a^3 - 2F \cdot a^3 \right\} \quad (2.13)$$

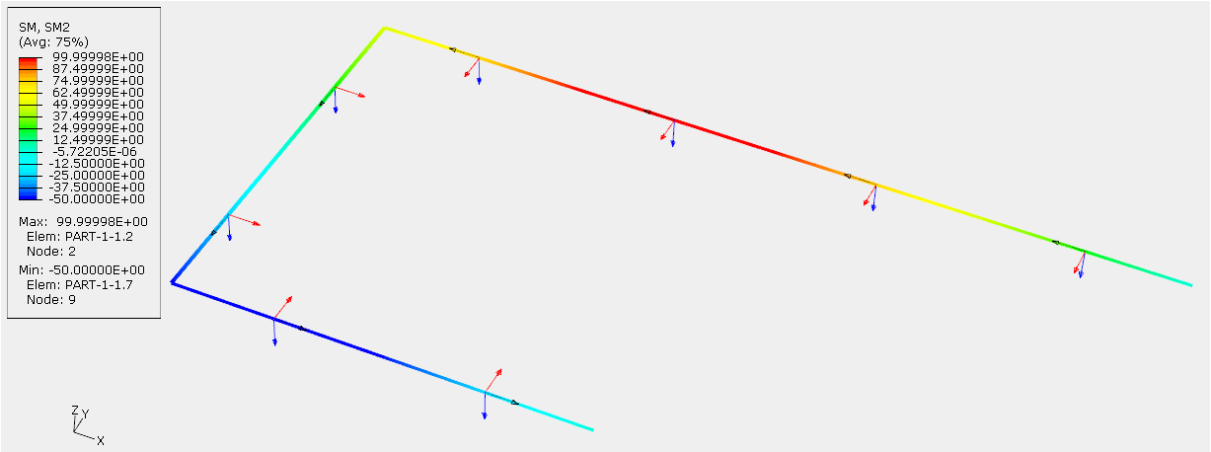
$$w_D = -26{,}827 \text{ mm} \quad (2.14)$$

Rješenje je dobiveno uz pretpostavku zbrajanja elastičnih deformacija nastalih djelovanjem pojedinačnih opterećenja.

Vrijednosti pojedinih izraza korištenih u rješavanju problema dobivene numeričkim rješavanjem u *Abaqusu* na mreži gdje je svaki dio nosača zamijenjen jednim konačnim B33 elementom, dane su u tablici 2.4, a na slici 2.4 može se vidjeti raspodjela momenta savijanja (moment je usmjeren u smjeru lokalne osi 2, koja je označena crvenom strelicom na slici)

Tabela 2.4 Primjer 3. –numerički dobivene vrijednosti

w_D [mm]	F_B [N]	F_{Az} [N]
-26,827	-100,00	100,00

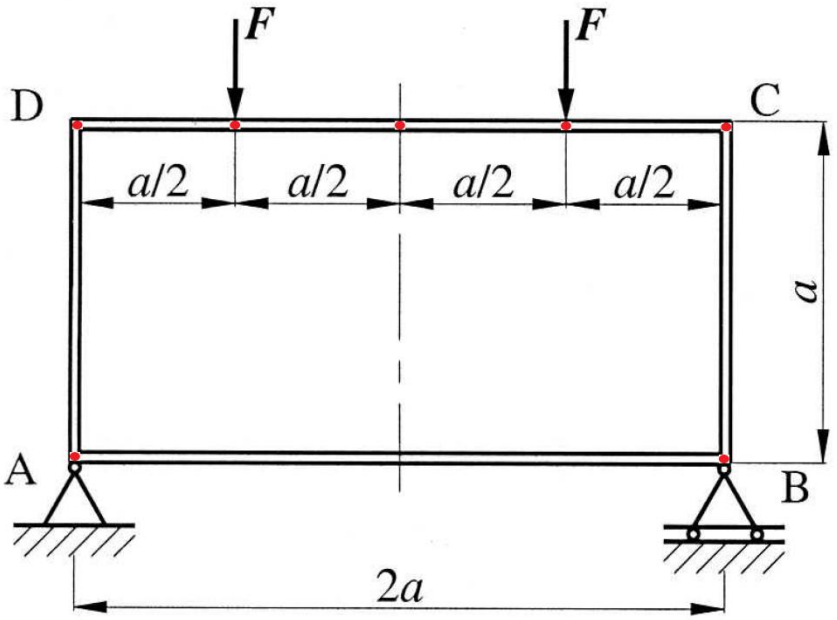


Slika 2.4 Raspodjela momenata savijanja po nosaču. Pozitivni momenti su usmjereni u smjeru lokalne osi obojane crvenom bojom.

2.4 Primjer 4.

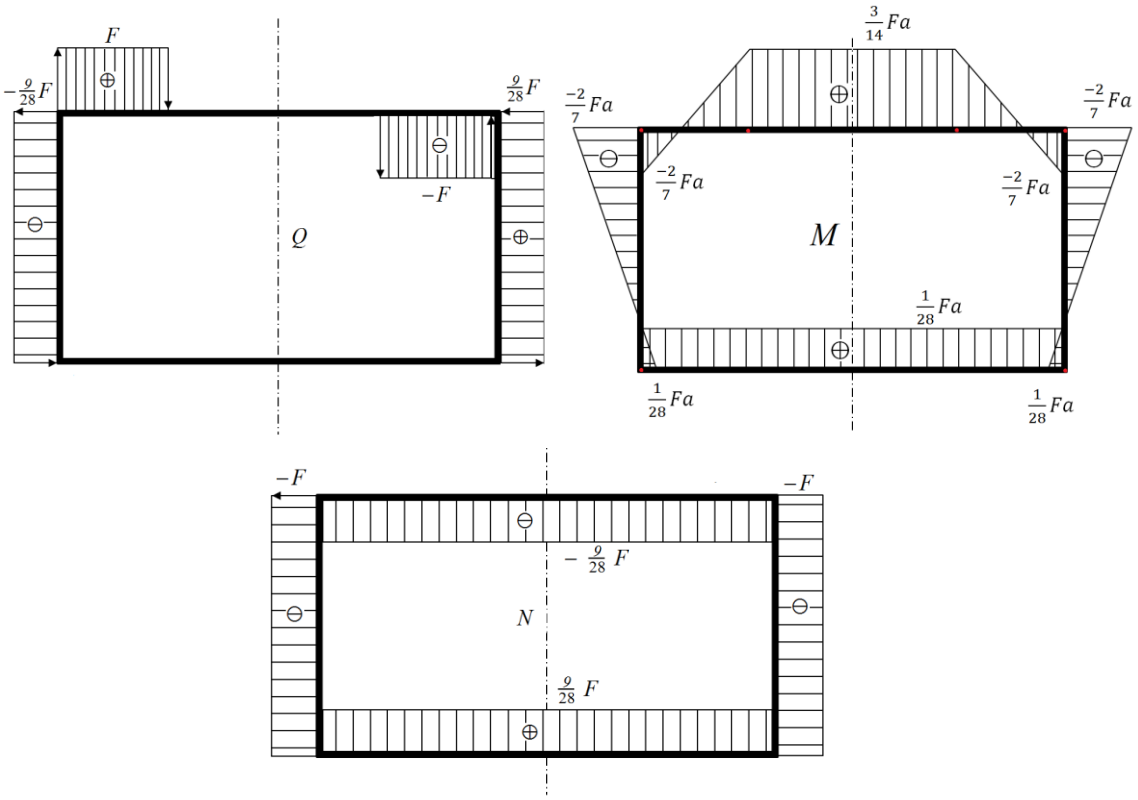
Za nosač zadan i opterećen prema slici 2.5 skicirati i kotirati N, Q i M dijagrame.

Zadano: *F, a, EI = konst.*



Slika 2.5 Skica četvrtog primjera. Na slici su crvenim krugovima prikazani čvorovi mreže korištene kod proračuna u *Abaqusu*

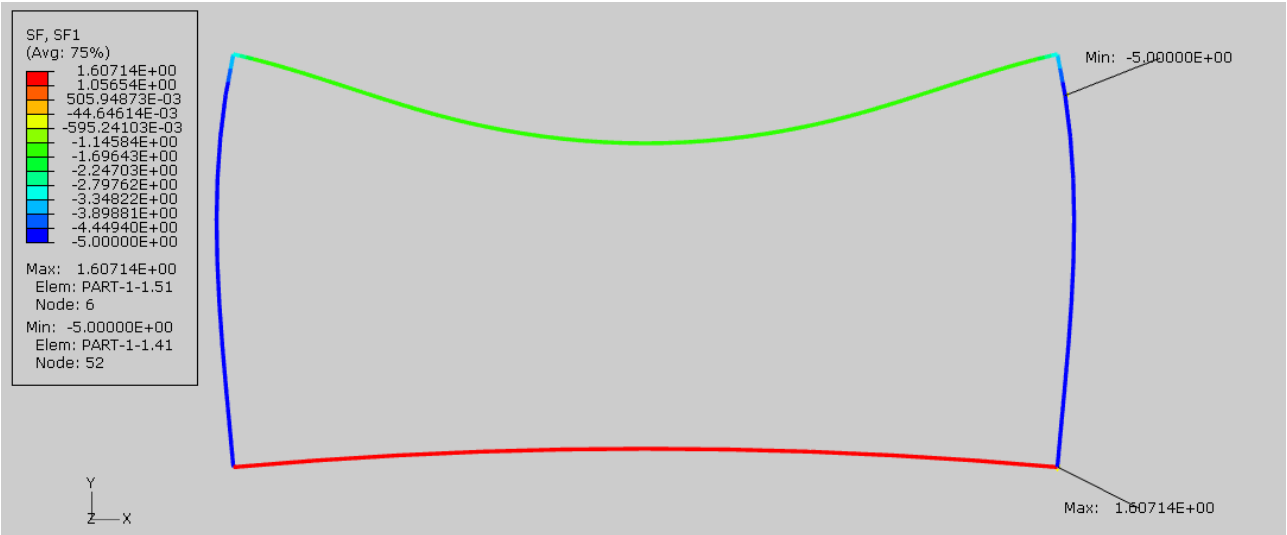
Analitička rješenja prikazana su na sljedećoj slici:



Slika 2.6 Analitički dobiveni dijagrami za tražene veličine

Kod rješavanja u *Abaqusu*, zbog same prirode numeričkog rješavanja, potrebno je zadati numeričke vrijednosti za parametre koje unosimo u račun. Te vrijednosti su dane u (2.15). Drugi problem do kojeg dolazimo je taj da *Abaqus* kod korištenja B23 elemenata (Euler-Bernoulijevi 2D konačni elementi) ne računa poprečnu silu. Zato ćemo prikazati samo raspodjelu momenta savijanja i osne sile. Vrijednosti koje smo dobili u čvorovima na mreži iste su kao i analitičke vrijednosti (Tabela 2.5) za dane vrijednosti ulaznih parametara. Na slici 2.8. dana je raspodjela osne sile na deformiranom obliku.

$$F = 5\ \text{N} \qquad a = 1\ \text{m} \qquad EI = 1\ \text{Nm}^2 \tag{2.15}$$



Slika 2.7 Raspodjela osne sile na deformiranom obliku

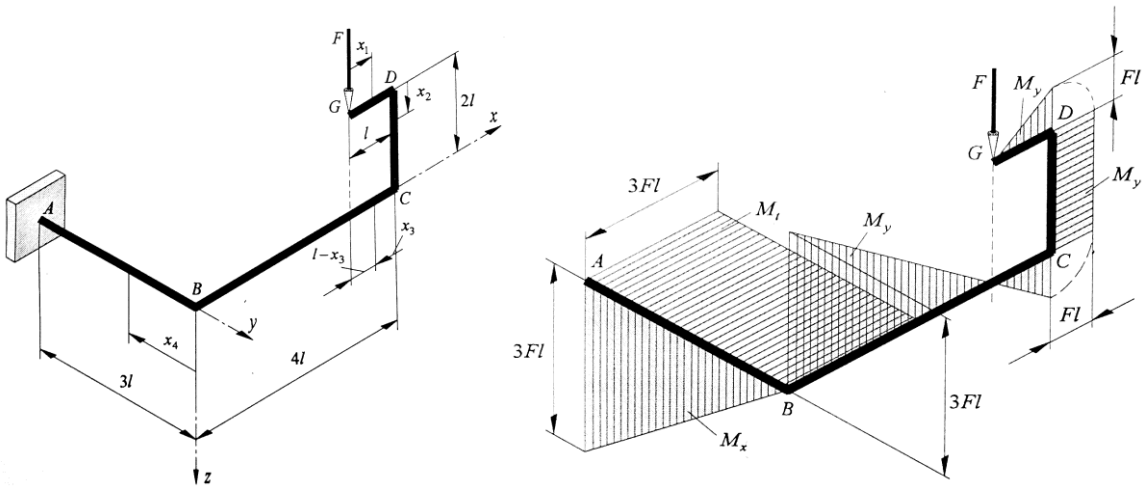
Tabela 2.5 Numeričke vrijednosti pojedinih analitičkih izraza

Veličina	*F* [N]	9*F*/28 [N]	2/7 *Fa* [Nm]	3/14 *Fa* [Nm]	*1/*28 *Fa* [Nm]
Num. vrijednost	5	1,607	1,4286	1,071	0,1786

2.5 Primjer 5. [1]

Zadana je prostorna štapna konstrukcija prema slici 2.9. Skicirati dijagrame momenata savijanja i momenata uvijanja.

Zadano: F, l, E, $I_y = I_x$



Slika 2.8 Lijevo – skica petog primjera; desno – dijagrami momenata savijanja i uvijanja

Kao i u prethodnom primjeru, potrebno je zadati ulazne vrijednosti u numeričkom obliku da bi *Abaqus* mogao riješiti ovaj problem. Te vrijednosti za pojedine veličine prikazane su u (2.16)

$$F = 5\ \text{N} \qquad l = 2\ \text{m} \qquad E = 200 \cdot 10^9\ \text{GPa} \qquad \text{I}_y = 5 \cdot 10^{-15}\ \text{m}^4 \tag{2.16}$$

Dobivene vrijednosti kod najgrublje rešetke su iste analitičkima dobivenim za slučaj vrijednosti parametara iz (2.16) prikazanima u Tabela 2.6, međutim, kao i u prošlom primjeru, korištena je finija rešetka za prikaz dijagrama momenata savijanja i uvijanja.

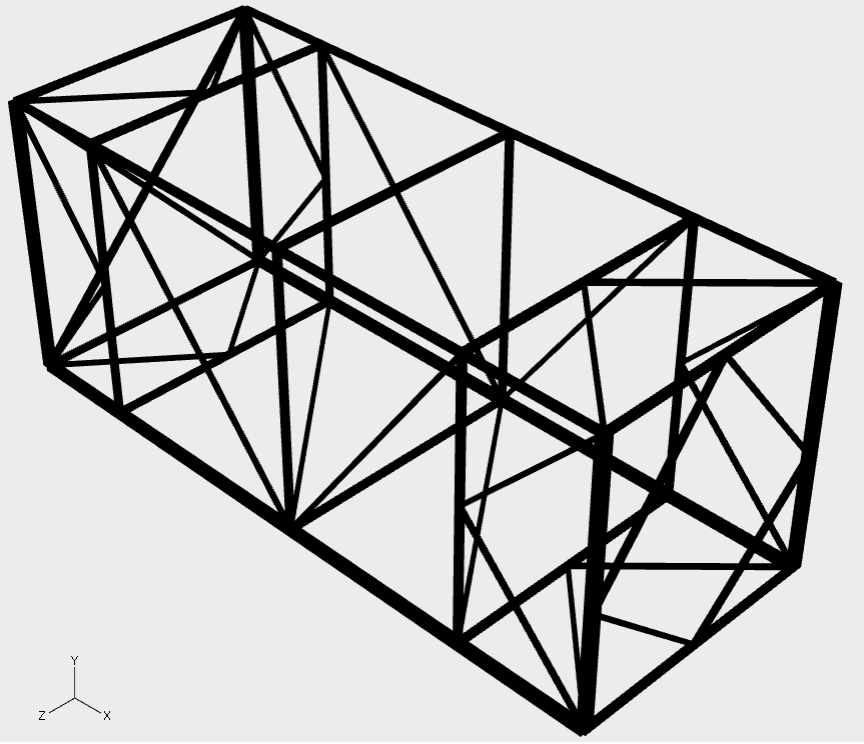
Tabela 2.6 Numeričke vrijednosti pojedinih analitičkih izraza

Veličina	M_y^D, [Nm]	M_y^C, [Nm]	M_y^B, [Nm]	M_x^A, [Nm]	$\text{M}_y^A = M_t$, [Nm]
Num. vrijednost	Fl = 10	Fl =10	$-3Fl = -30$	$3Fl$ =30	$3Fl = -30$
Abaqus	10	10	-30	30	-30

[1] Primjer je preuzet iz [6] zajedno sa slikama 2.8 i 2.9.

3 Analiza čvrstoće konstrukcije

Opis slučajeva opterećenja dan je u prvom poglavlju, dio 1.2 Opis slučajeva opterećenja, a ovdje se navode rezultati provedene analize u programskom paketu *Abaqus 6.9-1* koristeći Euler-Bernoulijeve trodimenzionalne konačne gredne elemente opisane u 1.3 Opis konačnih elemenata. Pritom, detaljno će se obraditi tri slučaja opterećenja, a za ostale dat će se samo tablična usporedba rezultata s analitički dobivenim referentnim vrijednostima iz [1]. U prvoj cjelini obrađuje se slučaj iz 1.2.2 Podizanje za donje nauglice, prikazan na slici 1.2. *a* i na njemu se ispituje konvergencija rješenja s obzirom na gustoću mreže i odabire se najpovoljnija mreža za računanje. S obzirom da je tip opterećenja u svim slučajevima isti, naime, radi se o koncentriranim silama u čvorištima štapova i kontinuirano konstantno opterećenje vlastite sile teže, ta mreža se koristi u svim ostalim slučajevima u kojima se ne ispituje konvergencija. Sljedeći slučaj koji se obrađuje jest iz cjeline 1.2.3 Podizanje za gornje nauglice, prikazan na slici 1.2 *b*, a nakon njega slijedi slučaj opisan u 1.2.4 Oslanjanje na donje nauglice, prikazan na slici 1.2 *d*. Za sve ostale slučajeve dana je samo tablična usporedba rezultata za osnu silu s referentnim vrijednostima uzetima iz [1]. Oblik nedeformirane konstrukcije vidljiv je na slici 1.1 i na slici 3.1.



Slika 3.1 Nedeformirani oblik konstrukcijske rešetke

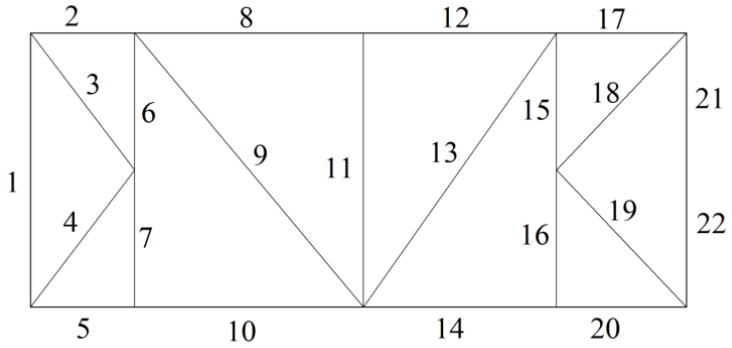
3.1 Podizanje za donje nauglice

Kao što je objašnjeno u poglavlju 1.2.2 Podizanje za donje nauglice, sile podizanja su zamijenjene zglobnim i kliznim osloncima u tim točkama. Slučaj rješavamo na tri mreže različite gustoće. U najgrubljoj, svaki štap je opisan jednim konačnim grednim elementom, zatim u finijoj sa dva, te u najfinijoj sa četiri konačna gredna elementa. Rezultate osnih sila za

štapove bočne rešetke označene prema slici 3.2 prikazujemo u tablici 3.1 u kojoj drugi stupac označava referentne vrijednosti iz [1] dobivene analitički, a treći, četvrti i peti stupac su vrijednosti dobivene proračunom u *Abaqusu*. Pritom broj u oblim zagradama označuje s koliko konačnih elemenata su štapovi opisani u pojedinoj mreži.

Tabela 3.1 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu*

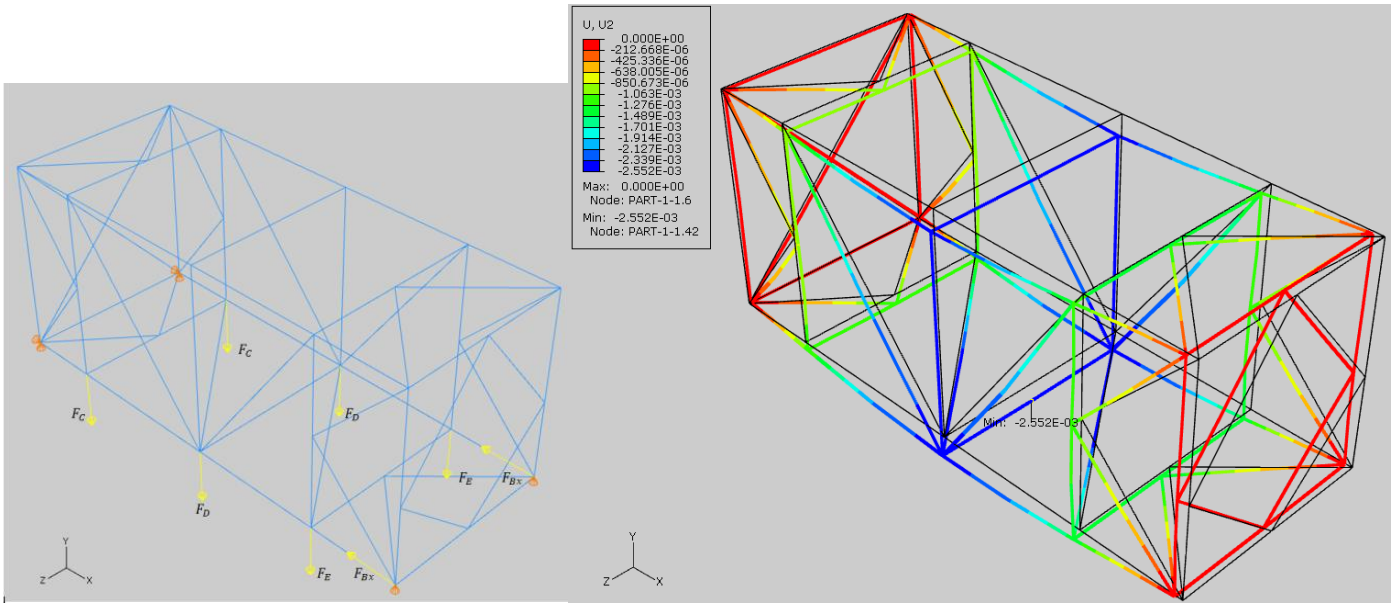
	Osna sila [kN]			
Štap	Referentna vrijednost [1]	Gruba mreža (1)	Srednja mreža (2)	Fina mreža (4)
1	-62,2	-53,65	-53,65	-53,65
2	-49,8	-43,12	-43,12	-43,12
3	79,8	67,98	67,98	67,98
4	-79,8	-68,85	-68,85	-68,85
5	-74,6	-77,91	-77,91	-77,91
6	-40,4	-36,54	-36,54	-36,54
7	84	72,05	72,05	72,05
8	-85,6	-76,74	-76,74	-76,74
9	53,8	49,68	49,68	49,68
10	-74,6	-77,35	-77,35	-77,35
11	0	-0,05	-0,05	-0,05
12	-85,6	-76,65	-76,65	-76,65
13	46,4	42,38	42,38	42,38
14	-66,6	-70,30	-70,30	-70,30
15	-37,2	-34,02	-34,02	-34,02
16	78,4	68,79	68,79	68,79
17	-57,9	-50,25	-50,25	-50,25
18	81,8	70,56	70,56	70,56
19	-81,8	-71,61	-71,61	-71,61
20	-66,6	-70,74	-70,74	-70,74
21	-57,8	-54,20	-54,20	-54,20



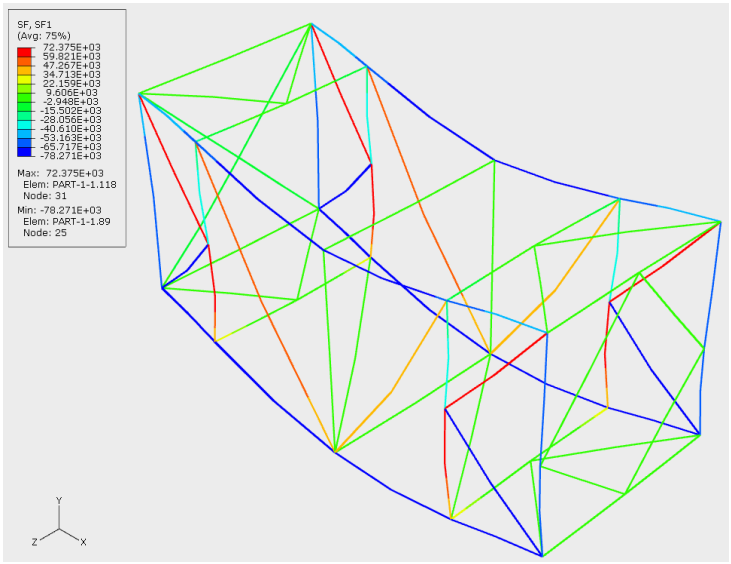
Slika 3.2 Oznake štapova na bočnoj rešetki

Kao što se vidi iz tablice, dobili smo iste vrijednosti osnih sila u štapovima bočne rešetke za sve mreže. No, isto tako je i vidljivo da te vrijednosti podosta odstupaju od referentnih vrijednosti. Razlog tome može biti radi sitnih razlika u dimenzijama rešetke, ali isto tako i razlika u profilima poprečnih presjeka cijevi, jer su oni uneseni u *Abaqus* bez zaobljenih vrhova i s ostalim pojednostavljenjima pa i imaju veću površinu. Također, na razliku rezultata može utjecati razlika u težini same konstrukcije i činjenica da je ona računana kao kontinuirano opterećenje, a ne kao koncentrirana sila kao u [1]. Kao najpovoljniju mrežu odabiremo mrežu u kojoj je pojedini štap opisan s dva konačna elementa iz razloga što iako mreža s jednim konačnim elementom daje vrlo slične rezultate, ona isto tako ne opisuje dobro pomake cijele rešetke jer u štapovima dolazi do savijanja koje nije moguće opisati samo s jednim konačnim elementom. Zbog ovog razloga smo se odlučili za mrežu s po dva konačna elementa po štapu kao najpovoljniju.

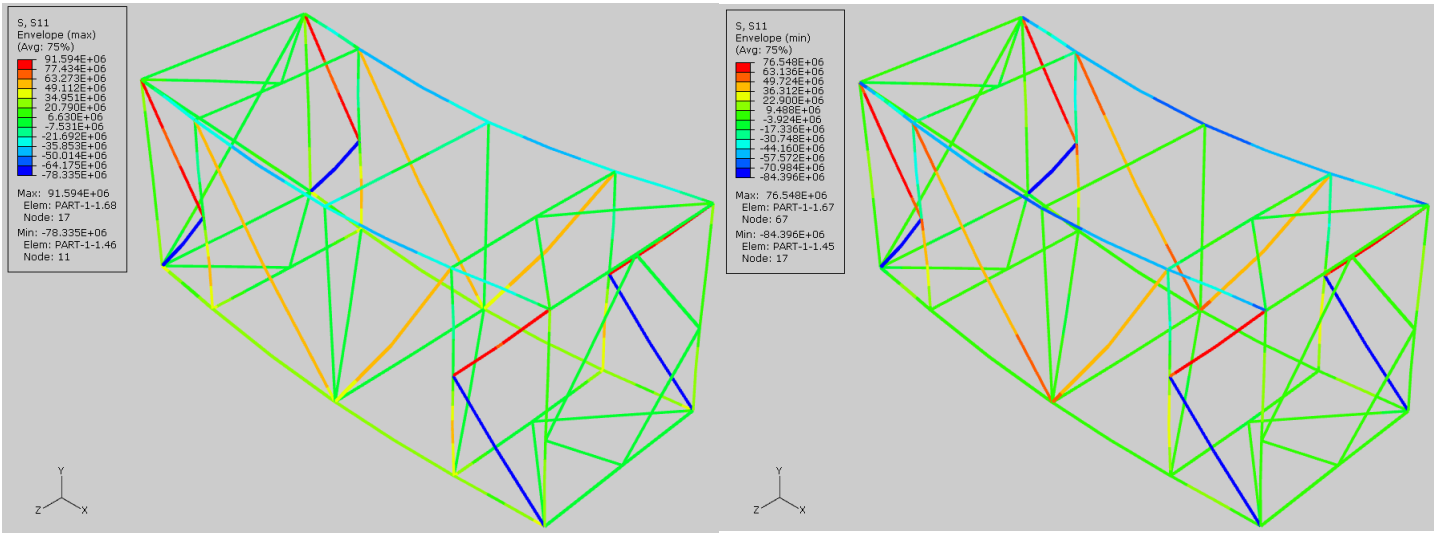
Na slici 3.3 može se vidjeti proračunski model te raspodjela pomaka, zatim na slici 3.4 prikazana je raspodjela osnih sila. Slika 3.5 prikazuje osna naprezanja u cijelome okviru i to na lijevome dijelu slike prikazane su maksimalne vrijednosti osnog naprezanja za određeni presjek, dok su na desnoj prikazana minimalna osna naprezanja po presjeku. Iz obiju slika je vidljivo da glavninu opterećenja podnose bočne rešetke. Na slici 3.6 prikazani su momenti savijanja štapova okvira. Ova slika također ima dva dijela i svaki prikazuje jedan od momenata savijanja usmjerenog u smjeru lokalnih koordinatnih osi konačnog elementa.



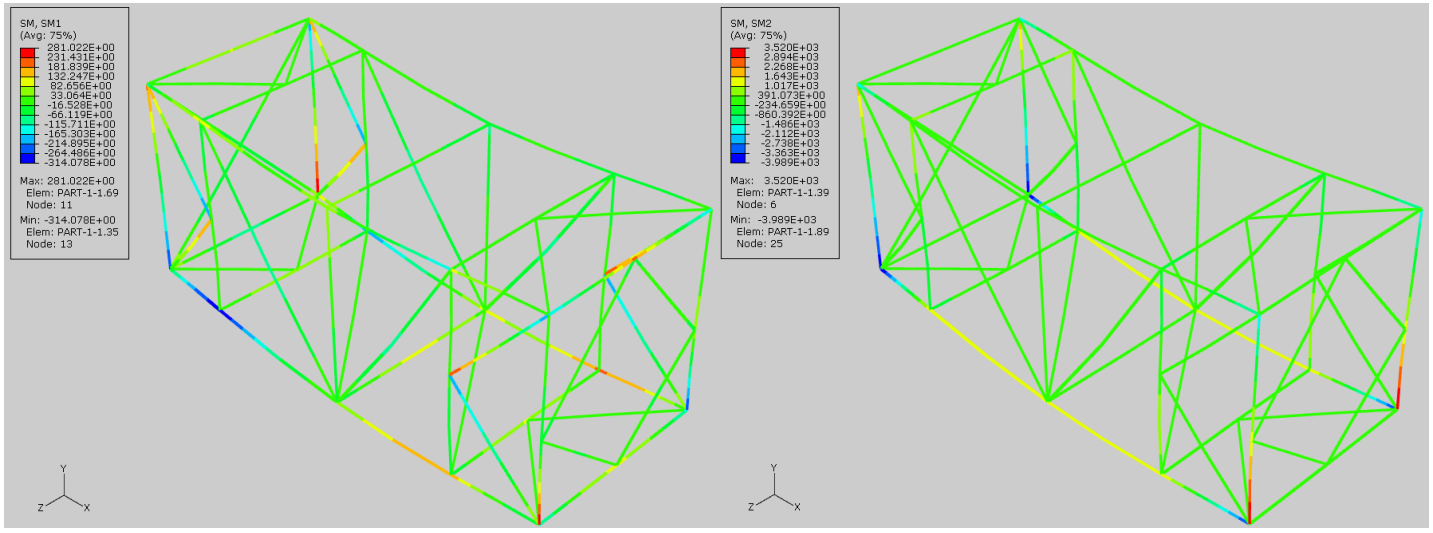
Slika 3.3 Deformirani oblik (lijevo) i raspodjela pomaka u metrima [m] (desno)



Slika 3.4 Raspodjela osnih sila izražena u njutnima [N]



Slika 3.5 Raspodjela maksimalnih (lijevo) i minimalnih (desno) osnih naprezanja po presjeku izražena u paskalima [Pa]



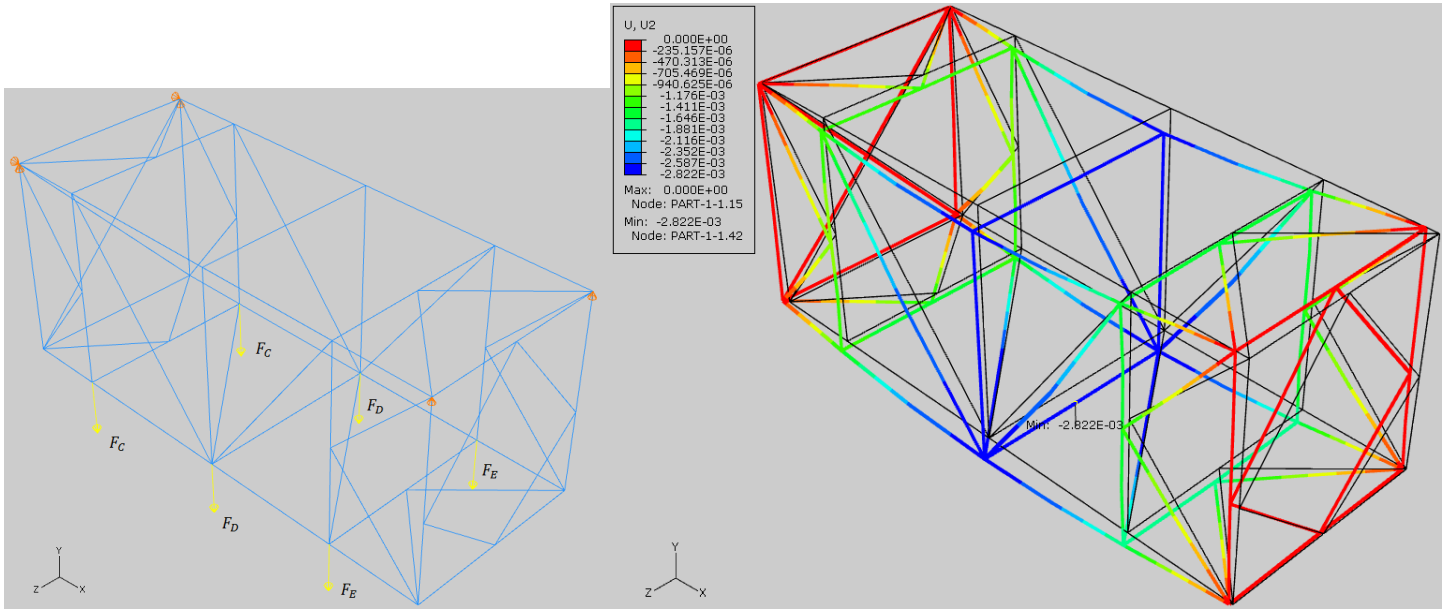
Slika 3.6 Raspodjela momenata savijanja izraženih u njutn metrima [Nm]

3.2 Podizanje za gornje nauglice

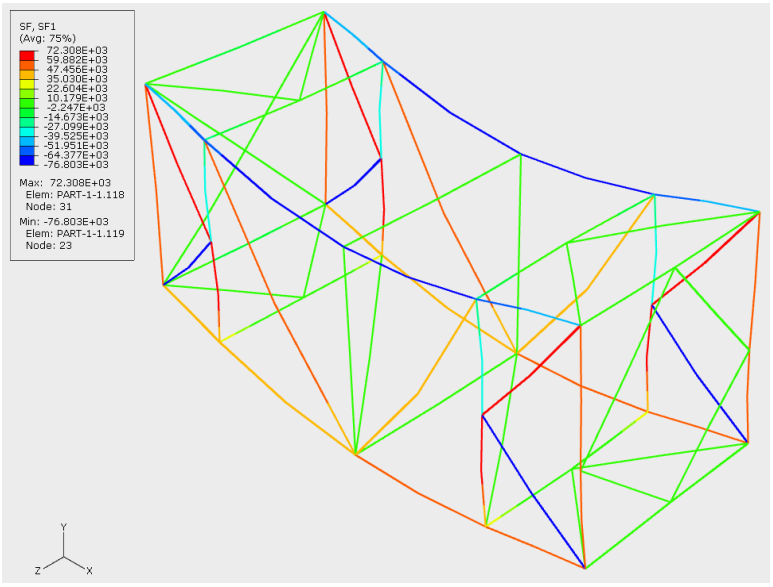
Opis slučaja dan je u 1.2.3 Podizanje za gornje nauglice. Kod podizanja za gornje nauglice potrebno je bilo zamijeniti rubne uvjete sila s rubnim uvjetima pomaka kako je objašnjeno u spomenutoj cjelini. Slika 1.6 Podizanje za gornje nauglice - ekvivalentni rubni uvjeti i sileSlika 1.6 prikazuje rubne uvjete koji su se koristili prilikom analize u *Abaqusu*.

Na slici 3.7 prikazan je proračunski model sa slike 1.6 zajedno s raspodjelom pomaka na kojoj je označeno mjesto maksimalnog progiba u smjeru *y* osi uzrokovano ovim tipom opterećenja. Sa slici 3.8 i slici 3.9, koje prikazuju raspodjele osnih sila te osnih naprezanja, vidljivo je da većinu opterećenja podnose bočne sile, kao i u prethodnom slučaju. U [1] je upravo to i pretpostavljeno pa se proračun samo za bočnu rešetku, kao da ona preuzima sve opterećenje. Usporedba referentnih vrijednosti dobivenih na ovaj način i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu* dana je u Tabela3.2.

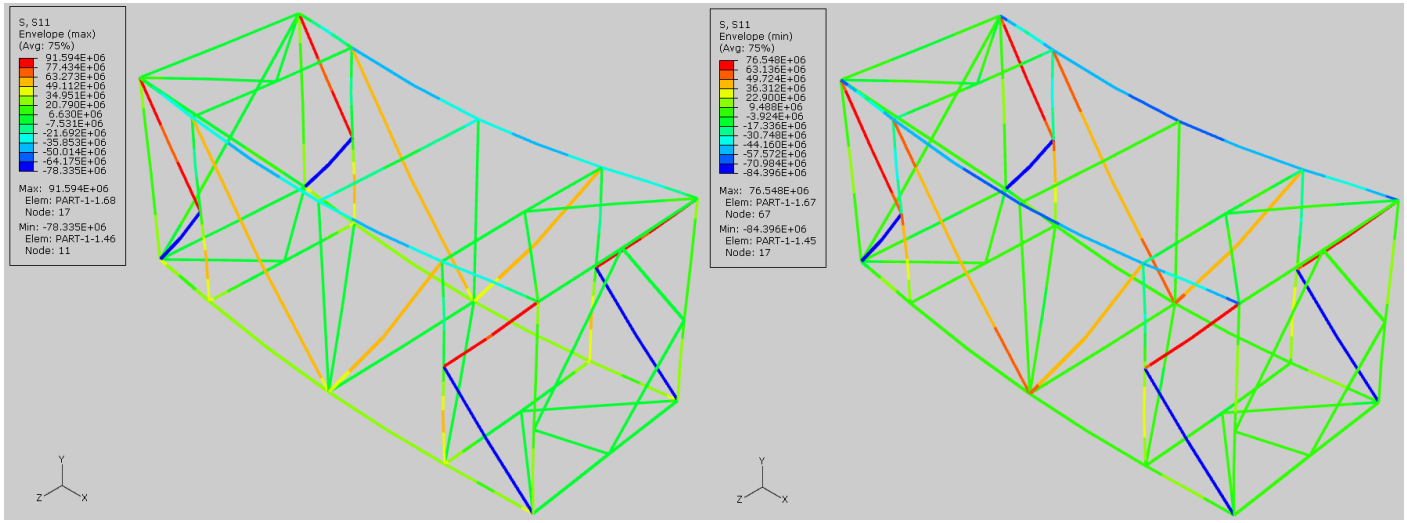
Slika 3.10 prikazuje raspodjelu momenata savijanja na deformiranom obliku sa koje se jasno vidi da djeluju momenti savijanja koji deformiraju kontejner u obliku slova U, što je bilo i za očekivati s obzirom da imamo sile koje djeluju između dva zglobna učvršćenja.



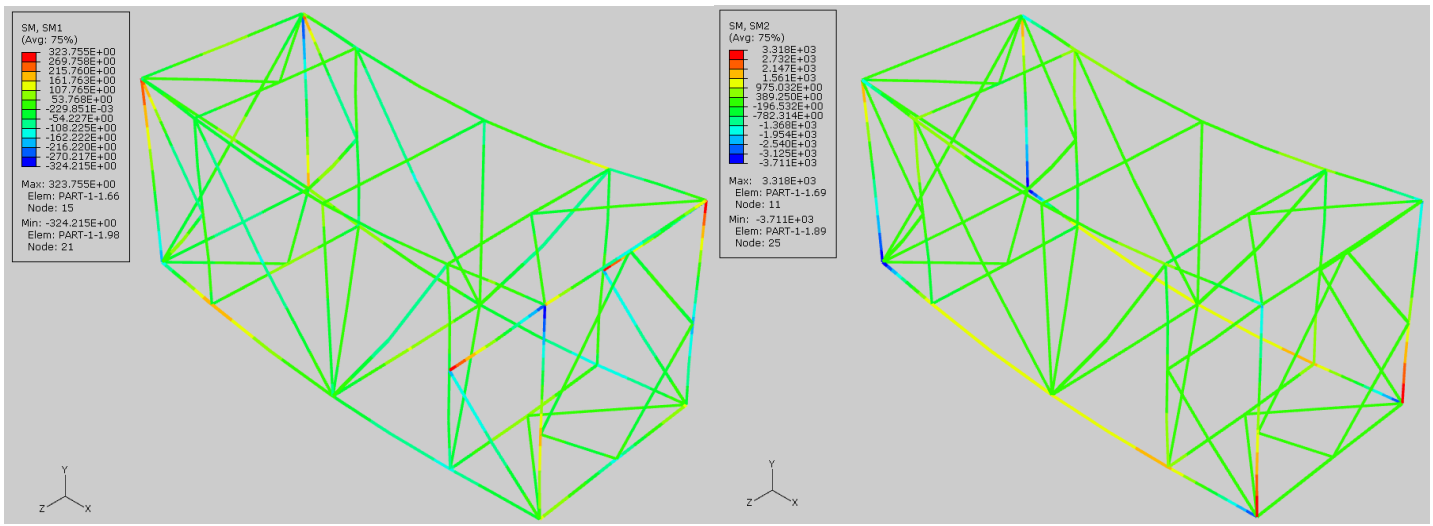
Slika 3.7 Deformirani oblik (lijevo) i raspodjela pomaka u metrima [m] (desno)



Slika 3.8 Raspodjela osnih sila izražena u njutnima [N]



Slika 3.9 Raspodjela maksimalnih (lijevo) i minimalnih (desno) osnih naprezanja po presjeku izražena u paskalima [Pa]



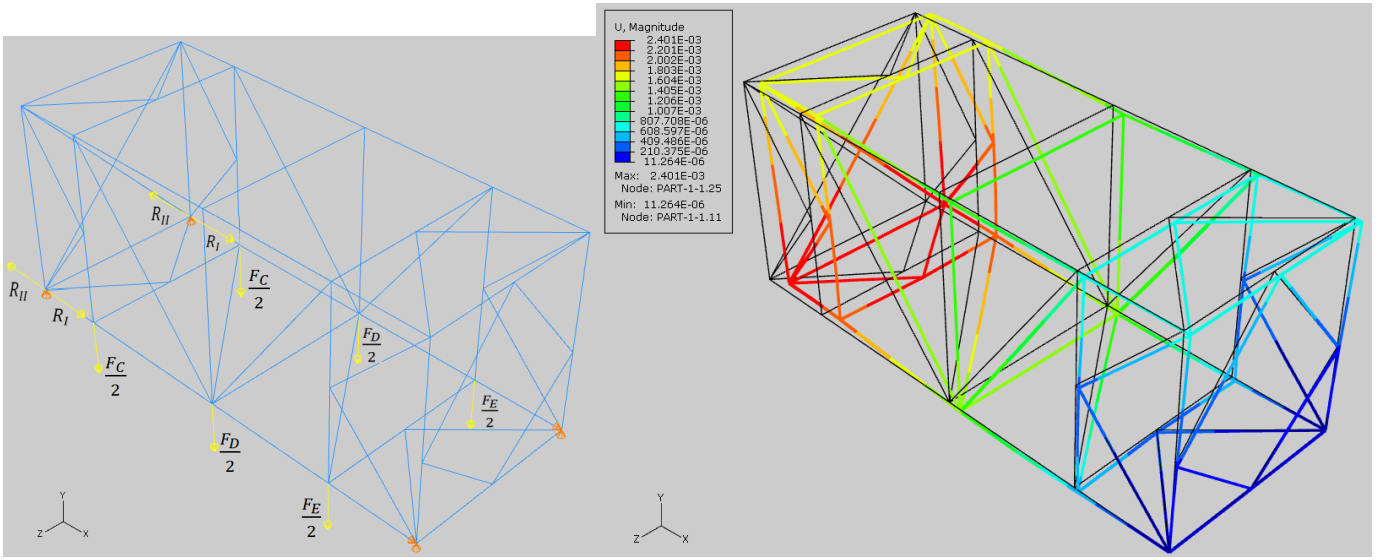
Slika 3.10 Raspodjela momenata savijanja izraženih u njutn metrima [Nm]

Tabela 3.2 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu*

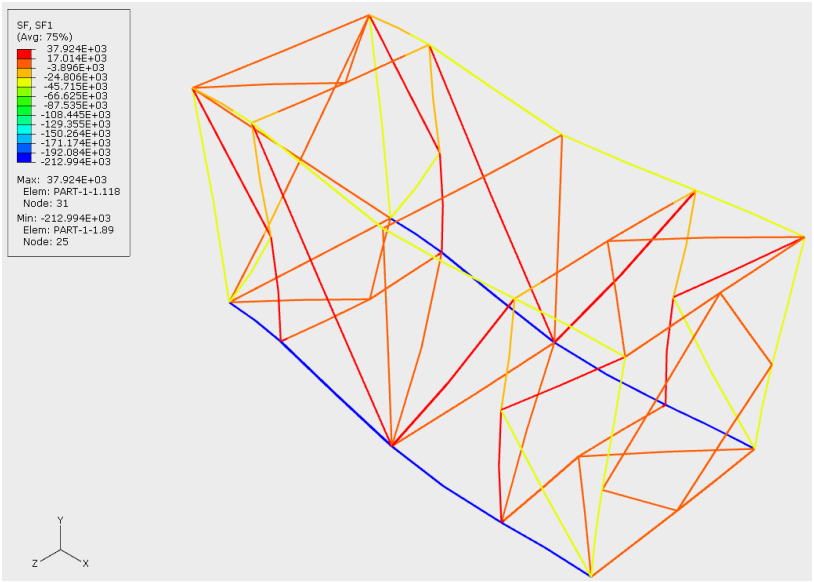
	Osna sila [kN]	
Štap	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*
1	+62,2	56,097
2	-49,8	-43,3998
3	+79,8	68,5556
4	-79,8	-67,4258
5	+50,0	43,0309
6	-40,4	-35,9828
7	+84,4	71,9726
8	-85,6	-76,7512
9	+53,8	49,7753
10	+50	44,6133
11	0,0	-0,579
12	-85,6	-76,7946
13	+46,4	43,0612
14	+57,9	51,874
15	-37,2	-34,0002
16	+78,4	68,5793
17	-57,9	-50,5282
18	+81,8	71,2658
19	-81,8	-70,5554
20	+57,9	50,4897
21	+57,8	58,688
22	+57,8	56,8169

3.3 Djelovanje horizontalne sile R na donjim nauglicama

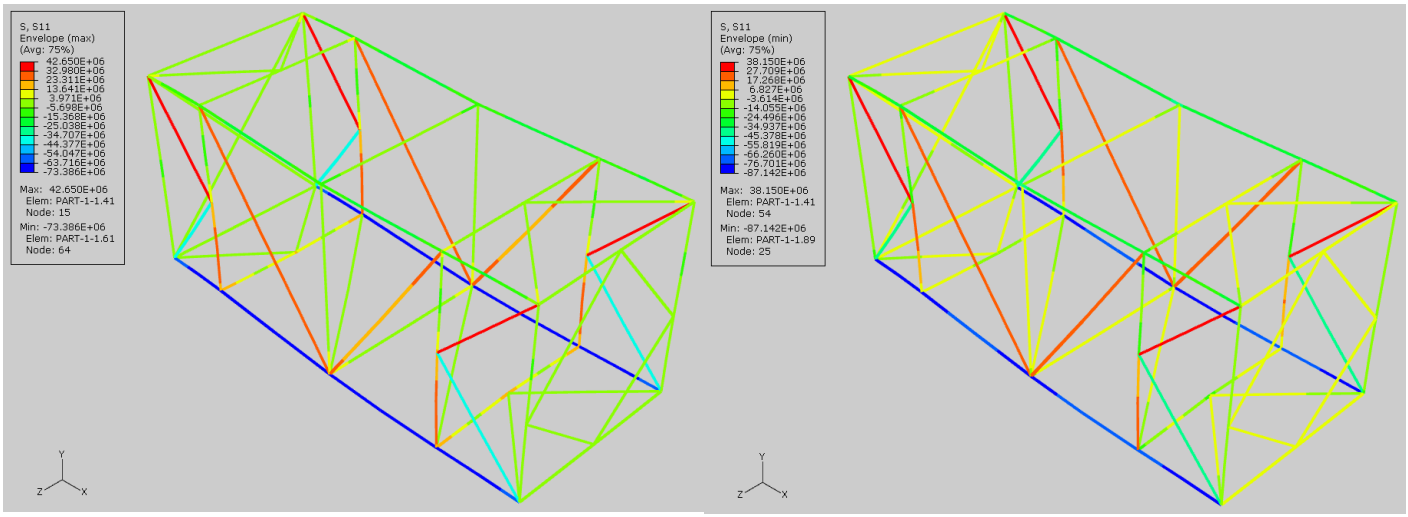
Opis slučaja dan je u 1.2.5. Djelovanje horizontalne sile R na donjim nauglicama. Na slici 3.11 dan je izgled proračunskog modela zajedno s raspodjelom pomaka. Raspodjela osnih sila (slika 3.12) i osnih naprezanja (slika 3.13) pokazuje nam da ovdje također bočna rešetka preuzima najviše opterećenja. Usporedba dobivenih i referentnih vrijednosti dana je u tablici 3.3, a raspodjela momenata savijanja prikazana je na slici 3.14.



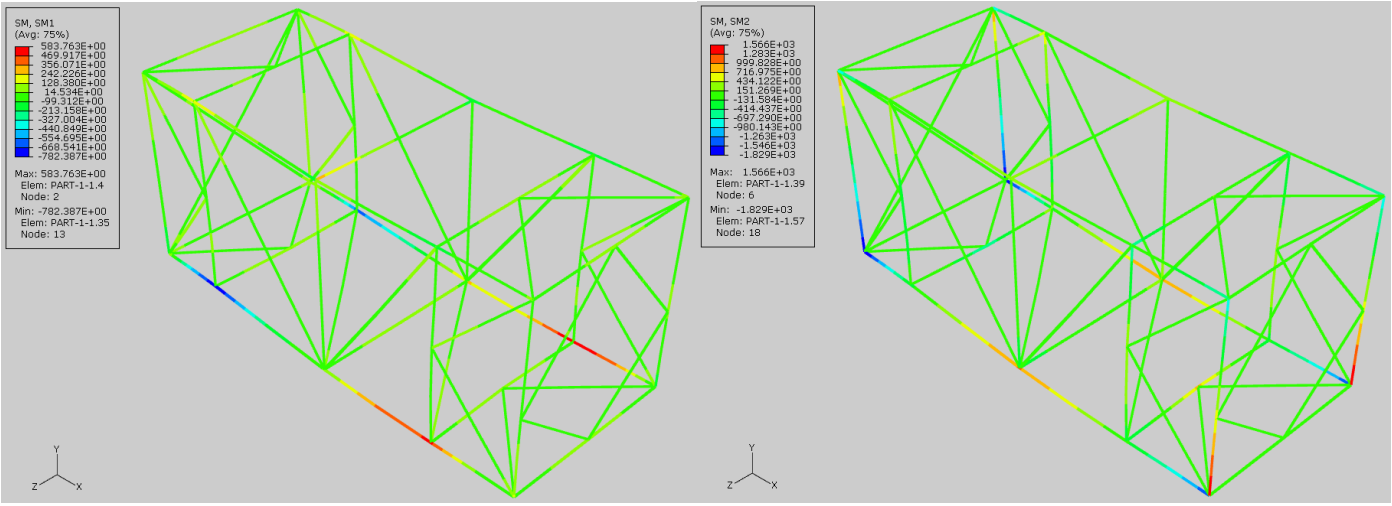
Slika 3.11 Deformirani oblik (lijevo) i raspodjela pomaka u metrima [m] (desno)



Slika 3.12 Raspodjela osnih sila izražena u njutnima [N]



Slika 3.13 Raspodjela maksimalnih (lijevo) i minimalnih (desno) osnih naprezanja po presjeku izražena u paskalima [Pa]



Slika 3.14 Raspodjela momenata savijanja izraženih u njutn metrima [Nm]

Tabela 3.3 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu*

	Osna sila [kN]			
	Slučaj tlačne sile R_I		Slučaj vlačne sile R_{II}	
Štap	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*
1	-31,1	-27,28	-31,1	-26,06
2	-25,0	-21,63	-25,0	-21,45
3	+39,9	34,52	+39,9	33,09
4	-39,9	-36,07	-39,9	-31,63
5	-215,0	-211,92	+265	255,05
6	-20,2	-18,23	-20,2	-18,34
7	+42,0	37,76	+42,0	33,08
8	-42,8	-38,28	-42,8	-38,53
9	+26,9	24,29	+26,9	25,78
10	-215,0	-212,77	+265,0	257,26
11	0,0	0, 391	0,0	-0,73
12	-42,8	-38,04	-42,8	-38,80
13	+23,2	19,79	+23,2	23,57
14	-211,0	-209,56	+269,0	261,32
15	-18,6	-16,26	-18,6	-18,27
16	+39,2	36,00	+39,2	31,66
17	-29,0	-25,24	-29,0	-24,93
18	+40,9	35,30	+40,9	35,25
19	-40,9	-37,04	-40,9	-33,71
20	-211,0	-208,83	+269,0	259,49
21	-28,9	-26,93	-28,9	-27,39
22	-28,9	-27,55	-28,9	-28,81

3.4 Ostali slučajevi opterećenja

Ovdje su obrađeni svi preostali slučajevi iz cjeline 1.2 Opis slučajeva opterećenja. Dani su samo iznosi osnih sila i to samo u onim dijelovima okvira koji podnose najviše opterećenja. Te vrijednosti su dane tablično u usporedbi s referentnim vrijednostima.

3.4.1 Oslanjanje na donje nauglice

Opis slučaja dan je u 1.2.4 Oslanjanje na donje nauglice. U ovome slučaju, glavninu opterećenja podnose bočne rešetke pa je zbog toga prikazana usporedba sila s referentnim vrijednostima u tablici 3.4 pri čemu su štapovi označeni prema slici 3.2.

Tabela 3.4 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu*

	Osna sila [kN]	
Štap	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*
1	-31,1	-26,36
2	-25,0	-21,55
3	+39,9	33,88
4	-39,9	-34,07
5	+25,0	21,57
6	-20,2	-18,28
7	+42,0	35,66
8	-42,8	-38,39
9	+26,9	24,96
10	+25,0	22,24
11	0,0	-0,11
12	-42,8	-38,38
13	+23,2	21,49
14	+29,0	25,88
15	-18,6	-17,17
16	+39,2	34,05
17	-29,0	-25,10
18	+40,9	35,28
19	-40,9	-35,54
20	+29,0	25,33
21	-28,9	-27,14
22	-28,9	-28,11

3.4.2 Djelovanje horizontalne sile F=75 kN na gornjim nauglicama

Opis slučaja dan je u 1.2.6 Djelovanje horizontalne sile F=75 kN na gornjim nauglicama. Ovdje također većinu opterećenja preuzimaju bočne rešetke i zbog toga su u tablici 3.5 prikazane vrijednosti osnih sila u štapovima bočne rešetke prema slici 3.2.

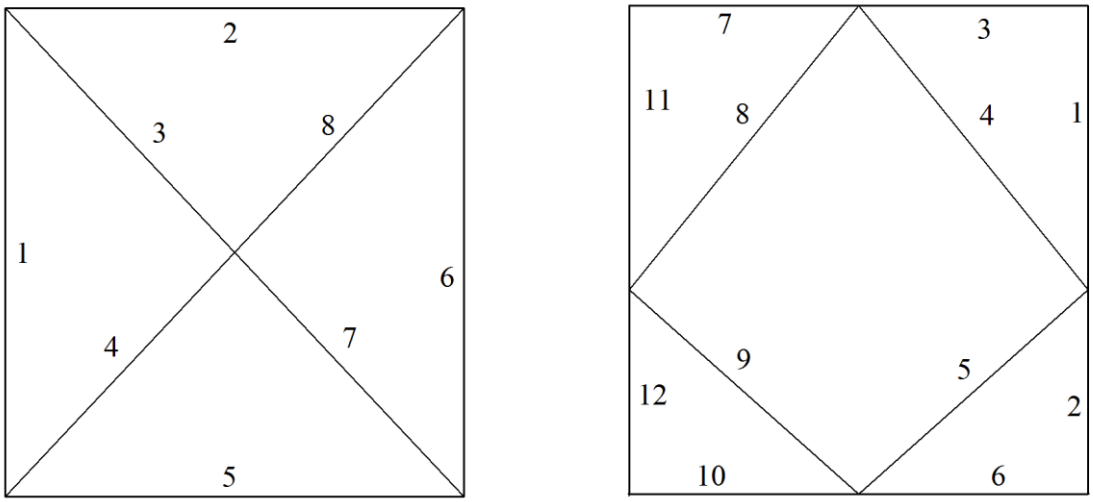
Tabela 3.5 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu*

	Osna sila [kN]							
	Slučaj vlačne sile F_I		Slučaj tlačne sile F_{II}		Slučaj vlačne sile F_I		Slučaj tlačne sile F_{II}	
Štap	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*
1	+14,8	14,40	-14,8	-14,40	-14,8	-14,35	+14,8	+14,35
2	+11,9	11,69	-11,9	-11,69	+63,1	62,43	-63,1	-62,43
3	-19,0	-18,74	+19,0	18,74	+19,0	19,07	-19,0	-19,07
4	+19,0	19,47	-19,0	-19,47	-19,0	-18,49	+19,0	+18,49
5	+63,1	62,28	-63,1	-62,28	+11,9	11,63	-11,9	-11,63
6	+29,7	29,64	-29,7	-29,64	-29,7	-30,11	+29,7	+30,11
7	0,0	-0, 84	0,0	0,84	0,0	-0,18	0,0	+0,18
8	+38,0	37,66	-38,0	-37,66	+36,9	36,99	-36,9	-36,99
9	-39,6	-39,41	+39,6	39,41	+39,6	40,14	-39,6	-40,14
10	+63,1	62,36	-63,1	-62,36	+11,9	12,19	-11,9	-12,19
11	0,0	-0,16	0,0	0,16	0,0	-0,27	0,0	0,27
12	+38,0	38,00	-38,0	-38,00	+36,9	36,57	-36,9	-36,57
13	+37,0	37,73	-37,0	-37,73	-37,0	-36,65	+37	36,65
14	+14,9	15,30	-14,9	-15,30	+60,2	59,42	-60,2	-59,42
15	-29,7	-30,47	+29,7	30,47	+29,7	29,71	-29,7	-29,71
16	0,0	0,06	0,0	-0,06	0,0	-0,95	0,0	+0,95
17	+60,1	59,28	-60,1	-59,28	+14,8	14,63	-14,8	-14,63
18	+21,0	21,41	-21,0	-21,41	-21,0	-20,77	+21,0	+20,77
19	-21,0	-20,62	+21,0	20,62	+21,0	21,41	-21,0	-21,41
20	+14,9	14,53	-14,9	-14,53	+60,2	59,58	-60,2	-59,58
21	-14,8	-15,94	+14,8	15,94	+14,8	15,61	-14,8	-15,61
22	-14,8	-16,03	+14,8	16,03	+14,8	15,58	-14,8	-15,58

3.4.3 Djelovanje horizontalne sile F=150 kN na gornjim nauglicama

Opis slučaja dan je u 1.2.7 Djelovanje horizontalne sile F=150 kN na gornjim nauglicama.

S obzirom da u ovom slučaju djeluje opterećenje koje najviše tereti prednju i stražnju rešetku, u tablici 3.6 su dane vrijednosti osnih sila u štapovima upravo tih rešetki. Numeracija štapova prikazana je na slici3.15 za obje rešetke.



Slika 3.15 numeriranje štapova u prednjoj i stražnjoj rešetci

Tabela 3.6 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu*

	Osna sila [kN]							
Štap	Prednja rešetka				Stražnja rešetka			
	Slučaj vlačne sile *F*		Slučaj tlačne sile *F*		Slučaj vlačne sile *F*		Slučaj tlačne sile *F*	
	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*
1	-163,5	-96,41	0	96,41	0,0	-2,04	0,0	+2,04
2	0,0	57,82	-150	-57,82	-163,5	-157,66	+163,5	+157,66
3	+222	131,51	0,0	-131,51	+150	146,57	-150	-146,57
4	0,0	-84,38	+222	84,38	-121,3	-115,29	+121,3	+115,29
5	0,0	57,25	-150	-57,25	+101,6	99,14	-101,6	-99,14
6	0,0	62,34	-163,5	-62,34	0,0	-0,23	0,0	+0,23
7	+222	131,80	0,0	-131,80	0,0	0,61	0,0	-0,61
8	0,0	-84,10	222	84,09	+121,3	117,17	-121,3	-117,17
9					-101,6	-95,97	+101,6	+95,97
10					+150	145,40	-150	-145,40
11					0,0	0,71	0,0	-0,71
12					+163,5	155,85	-163,5	-155,85

3.4.4 Djelovanje uzdužne inercijske sile na bočne rešetke

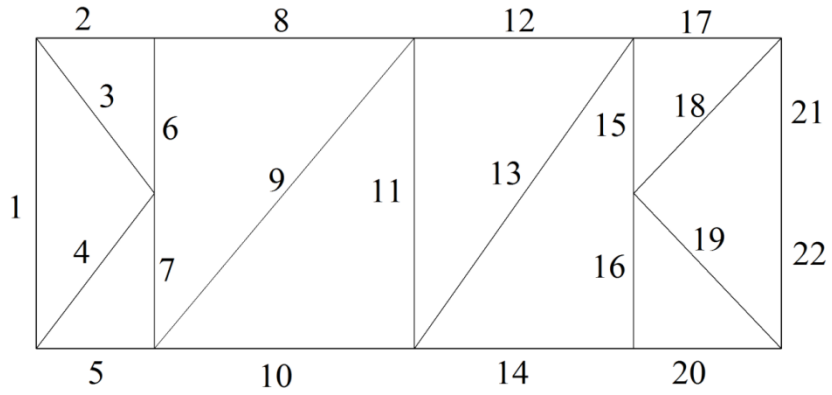
Opis slučaja dan je u 1.2.8 Djelovanje uzdužne inercijske sile na bočne rešetke. S obzirom da ovdje većinu opterećenja preuzimaju bočne rešetke, u Tabela 3.7 su dane osne sile u štapovima bočne rešetke. Numeriranje štapova je prikazano na slici 3.2.

Tabela 3.7 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu*

	Osna sila [kN]			
	Slučaj sile R_{CI}		Slučaj sile R_{CII}	
Štap	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*
1	+11,9	11,56	-12	-11,89
2	+9,5	8,64	-9,6	-8,69
3	-15,2	-15,19	+15,4	15,57
4	+15,2	15,84	-15,4	-17,02
5	-9,5	-11,05	-110,4	-113,8
6	+23,7	25,09	-23,7	-25,06
7	0,0	0,329	0,0	0,923
8	+30	30,01	-30,5	-29,95
9	-31,6	-33,24	+31,6	32,84
10	-9,5	-11,89	+110,4	-113,70
11	0,0	-0,459	0,0	0,758
12	+30	29,84	-30,5	-29,64
13	+29,6	30,73	-29,6	-31,75
14	-47,6	-52,29	-71,9	-73,58
15	-23,8	-25,49	+23,7	26,02
16	0,0	0,309	0,0	0,852
17	+47,6	44,33	-48,1	-44,41
18	-67,3	-63,69	+68	63,71
19	-101	-99,18	+101,7	98,29
20	-47,6	-56,15	-71,9	-69,03
21	+47,6	46,33	-48	-46,21
22	+47,6	46,46	-48	-46,13

3.4.5 Djelovanje uzdužne inercijske sile na donju rešetku

Opis slučaja dan je u 1.2.9 Djelovanje uzdužne inercijske sile na donju rešetku. U ovom se slučaju pretpostavlja da se cijela težina cisterne prenosi na donju rešetku pa je ona zbog toga najviše opterećena i zbog toga štapovi u podnoj rešetci imaju najveće osne sile koje su prikazane u tablici 3.8. Numeriranje štapova je prikazano na slici 3.16.



Slika 3.16 Numeracija štapova podne rešetke

Tabela 3.8 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu*

	Osna sila [kN]			
	Slučaj sile R_{CI}		Slučaj sile R_{CII}	
Štap	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*
1	0,0	-0,37	0,0	0,6
2	0,0	-1,76	-60	-64,69
3	0,0	0,2	0,0	-0,96
4	0,0	0,2	0,0	-0,47
5	0,0	-1,76	-60	-64,04
6	0,0	0,4	0,0	0,08
7	0,0	0,4	0,0	-0,3
8	0,0	-2,28	-60	-64,60
9	0,0	-0,03	0,0	-0,57
10	0,0	-2,36	-60	-64,55
11	0,0	-1,00	0,0	1,53
12	0,0	-5,60	-60	-61,40
13	0,0	-0,06	0,0	-0,39
14	0,0	-5,68	-60	-61,25
15	0,0	0,1	0,0	-0,01
16	0,0	0,2	0,0	0,17
17	0,0	-9,81	-60	-56,83
18	-84,4	-77,74	+84,4	77,29
19	-84,4	-77,77	+84,4	77,04
20	0,0	-9,79	-60	-56,58
21	+59,4	54,48	-59,4	-54,13
22	+59,4	54,47	-59,4	-54,23

3.4.6 Djelovanje bočne inercijske sile na donju rešetku

U ovom slučaju, kako je opisano u 1.2.11 Djelovanje bočne inercijske sile na donju rešetku, testira se izdržljivost okvira kad se postavi na bok s time da je pričvršćen samo s nauglicama na podnoj rešetci od kojih su u ovome slučaju dvije na vrhu. U ovom slučaju najviše opterećenja podnosi bočna rešetka pa je u tablici 3.9 dan popis osnih sila koje djeluju u štapovima podne rešetke. Numeriranje štapova je prikazano na slici 3.16.

Tabela 3.9 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu*

	Osna sila [kN]			
Štap	Slučaj sile R_{CI}		Slučaj sile R_{CII}	
	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*	Referentne vrijednosti [1]	*Abaqus*
1	-62,3	-52,56	-62,3	-53,16
2	-50,3	-43,45	+50,3	44,46
3	+79,9	68,24	-79,9	-70,10
4	-79,9	-69,79	+79,9	67,98
5	+50,3	44,27	-50,3	-43,28
6	-42	-37,10	+42	34,75
7	+82,4	69,93	-82,4	-72,32
8	-50,3	-45,19	+50,3	45,22
9	-54	-48,66	+54	48,66
10	+86,3	77,58	-86,3	-77,56
11	+1,6	2,52	-1,6	-0,72
12	-86,3	-77,36	+86,3	77,36
13	+46,5	41,32	-46,5	-41,31
14	+58,4	52,52	-58,4	-52,51
15	-76,4	-67,39	+76,4	65,42
16	+39,2	33,28	-39,2	-35,23
17	-58,4	-50,72	+58,4	51,63
18	+82,2	70,98	-82,2	-72,38
19	-82,2	-72,49	+82,2	71,07
20	+58,4	51,71	-58,4	-50,78
21	-57,6	-52,72	-57,8	-57,90
22	-57,6	-58,41	-57,8	-52,21

3.4.7 Djelovanje sila kod slaganja kontejnera jadan na drugi

Opis slučaja dan je u 1.2.10. Djelovanje sila kod slaganja kontejnera jadan na drugi. Ovdje se najveće osne sile pojavljuju u takozvanim stupnim štapovima (štapovi poprečnog presjeka A). No, kako pokazuje analiza u *Abaqusu*, pojavljuju se i znatne sile u dijagonalnim štapovima prednje rešetke. Zbog tog razloga ovdje su tablično prikazane vrijednosti cijele

prednje rešetke i samo stupni štapovi stražnje s obzirom da u ostalim štapovima su sile zanemarivo male. Numeriranje štapova je prikazano na 3.15. U [1] se pretpostavlja da cijelu težinu preuzimaju samo kutni stupovi, pa je osna sila u njima jednaka onoj izračunatoj u (1.9).

Tabela 3.10 Usporedba referentnih vrijednosti osnih sila u štapovima i vrijednosti dobivenih u *Abaqusu*. Za polja koja nisu popunjena ili ne postoje numerirani štapovi za taj dio rešetke, ili su osne sile zanemarivo male, reda veličine 1 kN.

	Osna sila [kN]	
Štap	*Abaqus*	
	Prednja rešetka	Stražnja rešetka
1	-470,96	-525,78
2	51,10	-526,55
3	-76,63	
4	-76,78	
5	0,00	
6	-470,98	
7	-76,64	
8	-76,77	
9		
10		
11		-525,79
12		-526,55

4 Rekonstrukcija rešetkaste konstrukcije

U ovom poglavlju opisani je način rekonstrukcije u cilju smanjenja mase konstrukcije okvira kontejnera i dani su dijagrami maksimalnih ekvivalentnih naprezanja po presjecima tako da se to naprezanje može usporediti s maksimalnim dopuštenim naprezanjem. Nakon rekonstrukcije konstrukcije, dan je proračun slučaja podizanja kontejnera za donje nauglice opisanog u 1.2.2 pomoću Timošenkovih konačnih grednih elemenata i rezultati su uspoređeni s onima dobivenim E.-B. konačnim elementima.

4.1 Opis i rezultati rekonstrukcije

Glavni cilj rekonstrukcije konstrukcije je smanjenje mase uz ograničenje maksimalnih dopuštenih naprezanja. Maksimalno dopušteno naprezanje iz [1] iznosi

$$\sigma_{\text{dop}} = \frac{\sigma_T}{1{,}5} = 160 \text{ MPa} \tag{4.1}$$

Rekonstrukcija je vršena na način da su smanjene dimenzije profila poprečnih presjeka danih u Tabela 1.2, dok je sama rešetkasta konstrukcija ostala nepromijenjena. Na taj način, nismo promijenili gabarite kontejnera, niti smo smanjili njegov unutrašnji prostor, a i veze između pojedinih štapova ostaju iste (nemamo slučajeva gdje se spajaju tri štapa da zbog promjene dimenzija rešetke imamo dva spajanja po dva štapa). Dimenzije profila poprečnih presjeka cijevi koje ćemo koristi kao konačne dani su u Tabela 4.1. Pritom su u zagradi dane početne dimenzije radi usporedbe i kao što je vidljivo, promijenili smo samo dimenzije profila B, C i D.

Tabela 4.1 Dimenzije rekonstruiranih profila

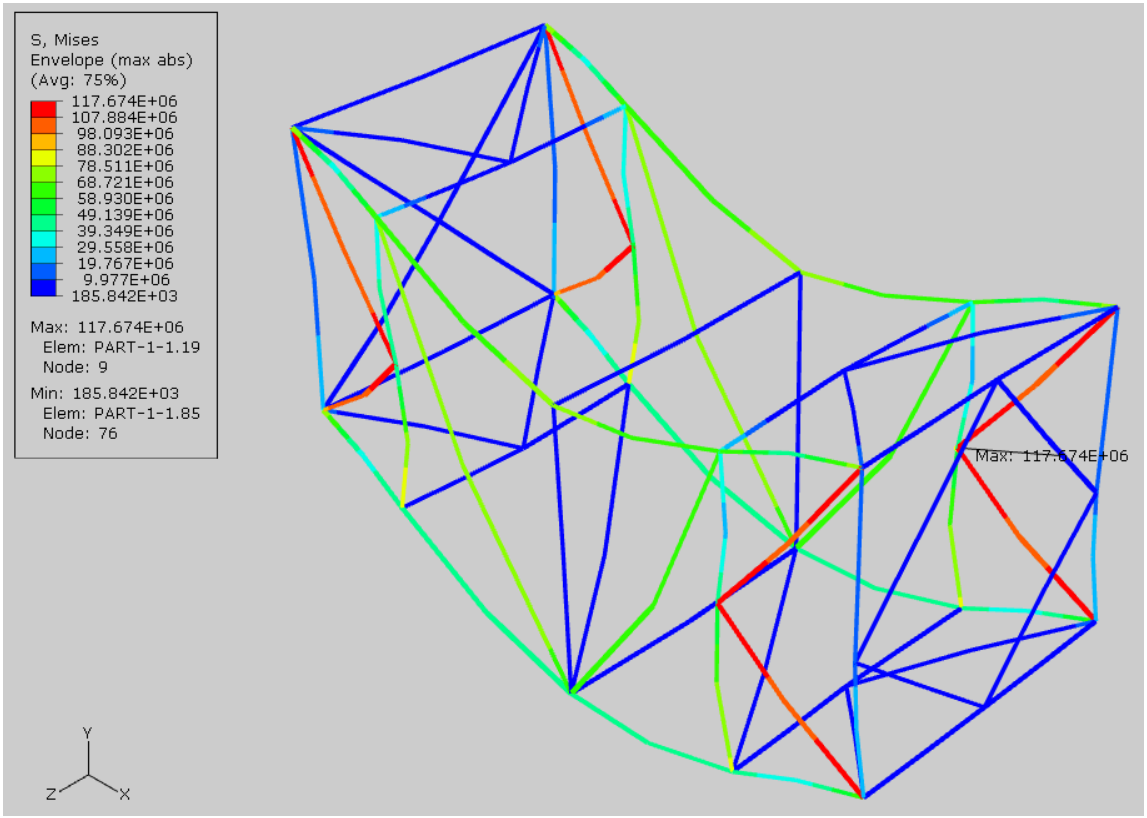
Ime profila	A	B	C	D	E
VxŠxD[mm]	160x160x7,1 (160x160x7,1)	120x120x5 (150x150x5)	80x80x4 (100x100x4)	60x60x3 (70x70x3,5)	100x60x5 (100x60x5)

Uz korištenje profila opisanih tim dimenzijama, težina okvira se smanjila na slijedeću:

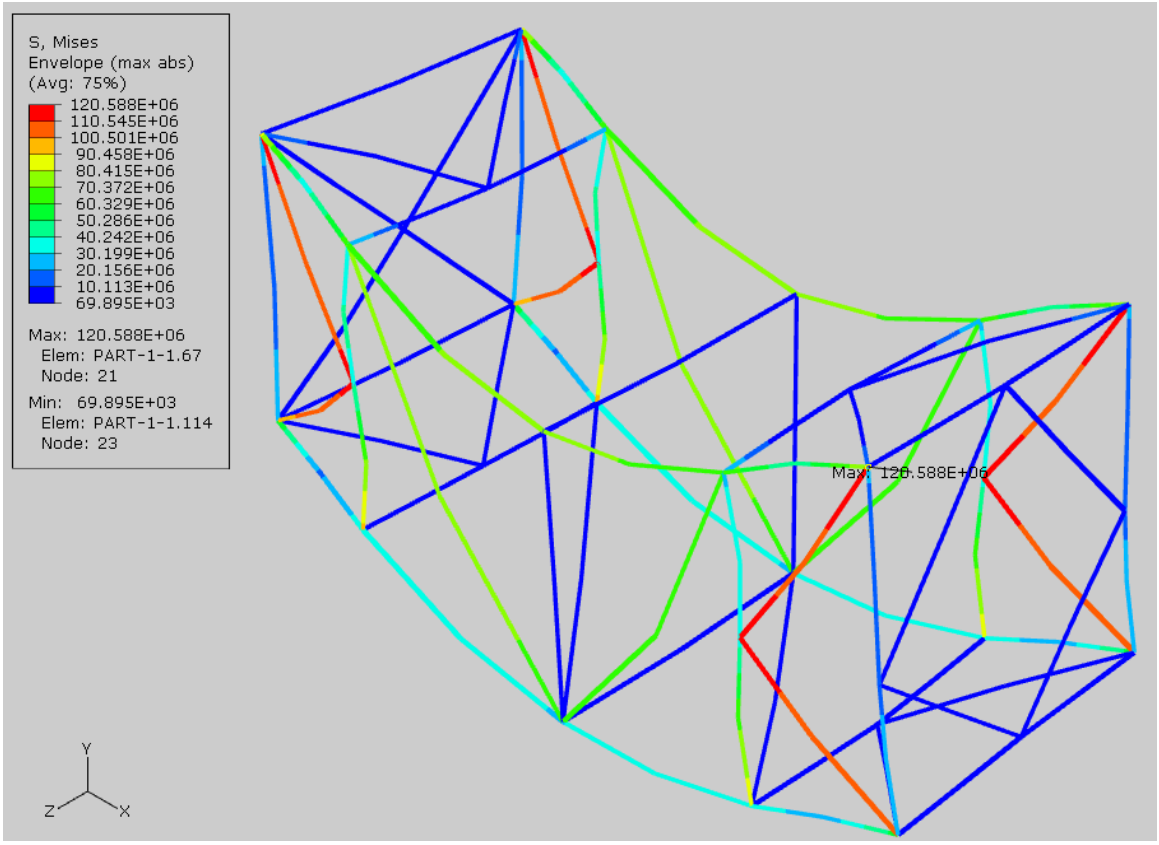
$$R_o^f = 13{,}610 \text{ kN} \quad (16{,}357 \text{ kN}) \tag{4.2}$$

gdje je u zagradi dana početna vrijednost težine okvira iz izraza (1.5). Kao što je vidljivo, uspjeli smo smanjiti težinu za 2,747 kN, odnosno za 16,8%. Važno je također napomenuti i to da kod svih ispitanih slučajeva, maksimalni pomak je unutar 4 mm.

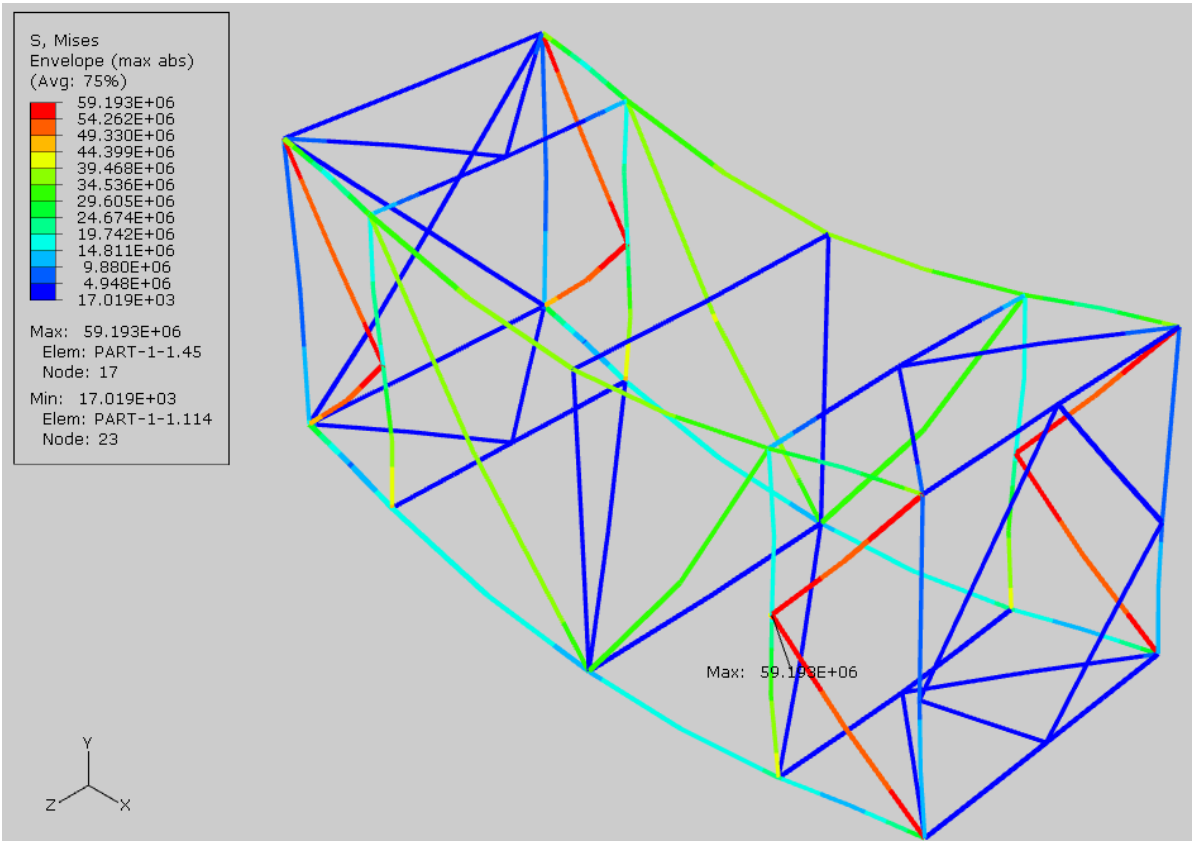
Slijedi niz dijagrama ekvivalentnog maksimalnog naprezanja po presjeku štapova prikazanog na deformiranom obliku za sve slučajeve opisane u odjeljku 1.2 Opis slučajeva opterećenja.



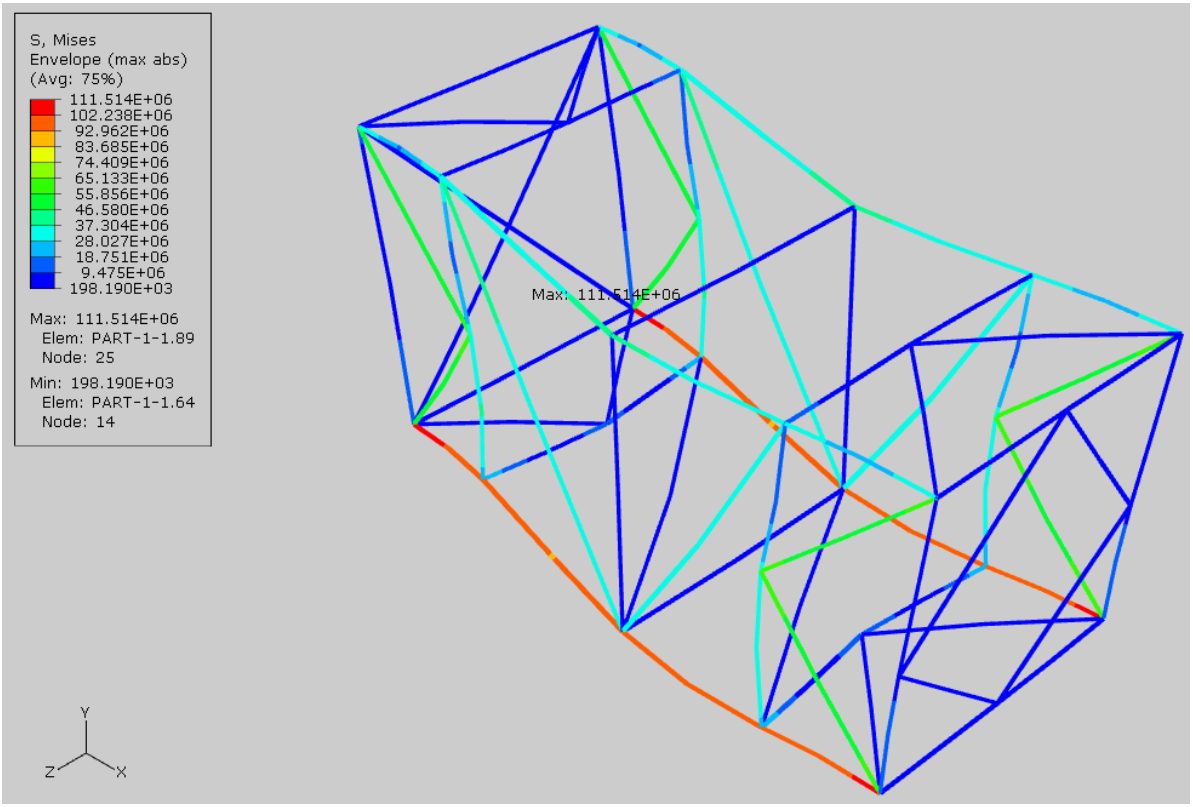
Slika 4.1 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja - podizanje za donje nauglice



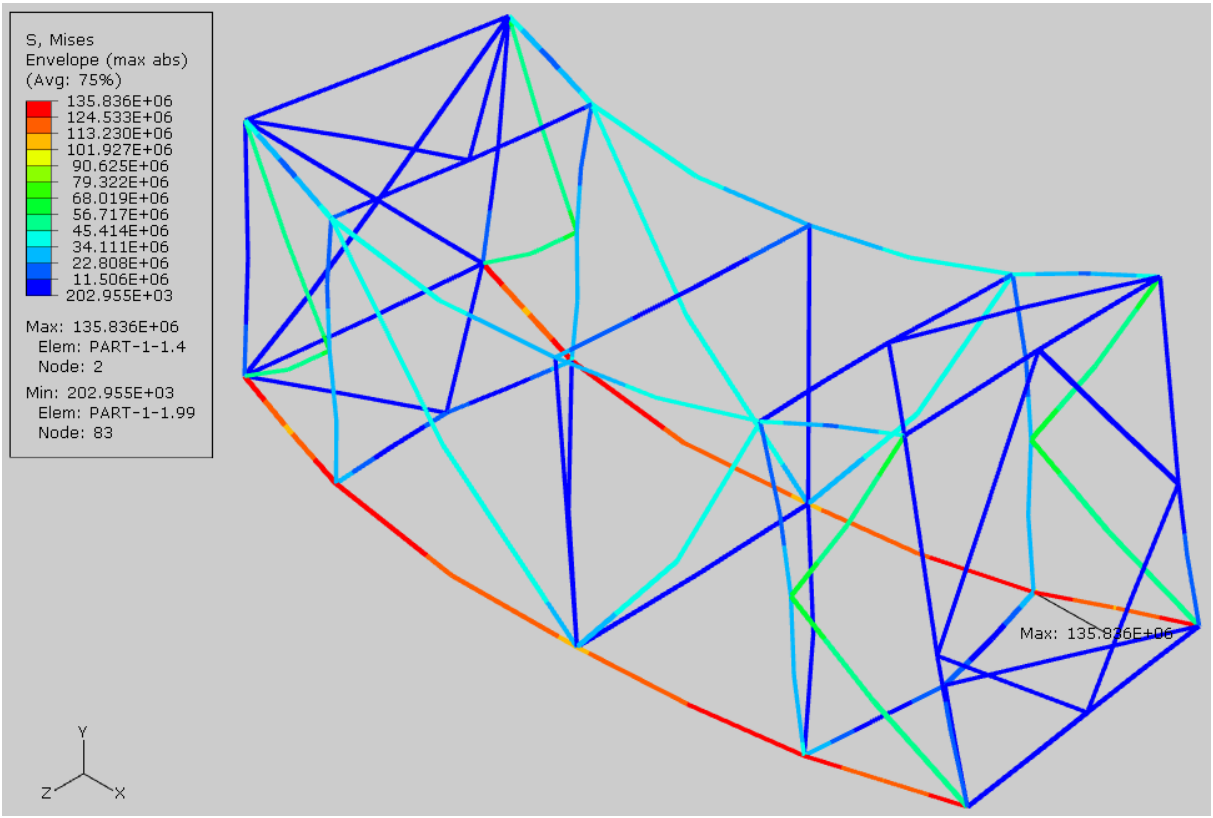
Slika 4.2 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja - podizanje za gornje nauglice



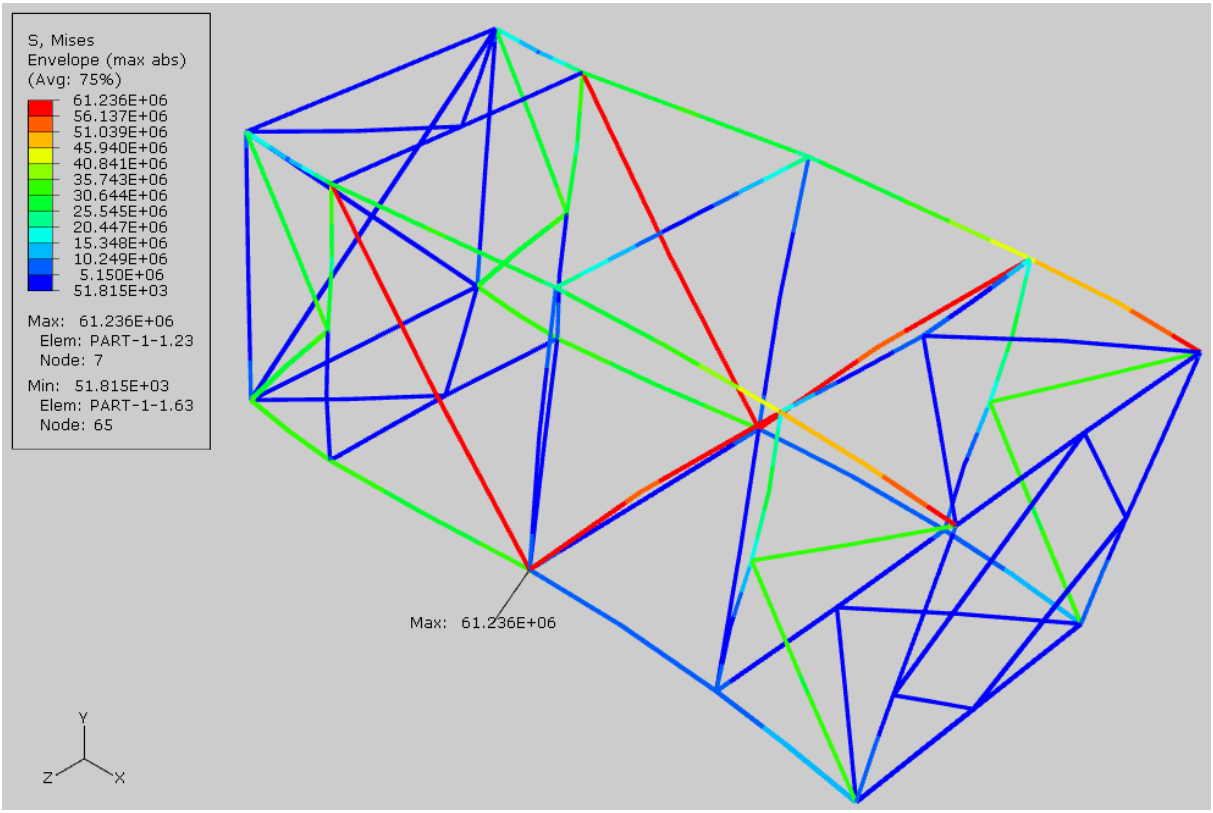
Slika 4.3 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja - oslanjanje na donje nauglice



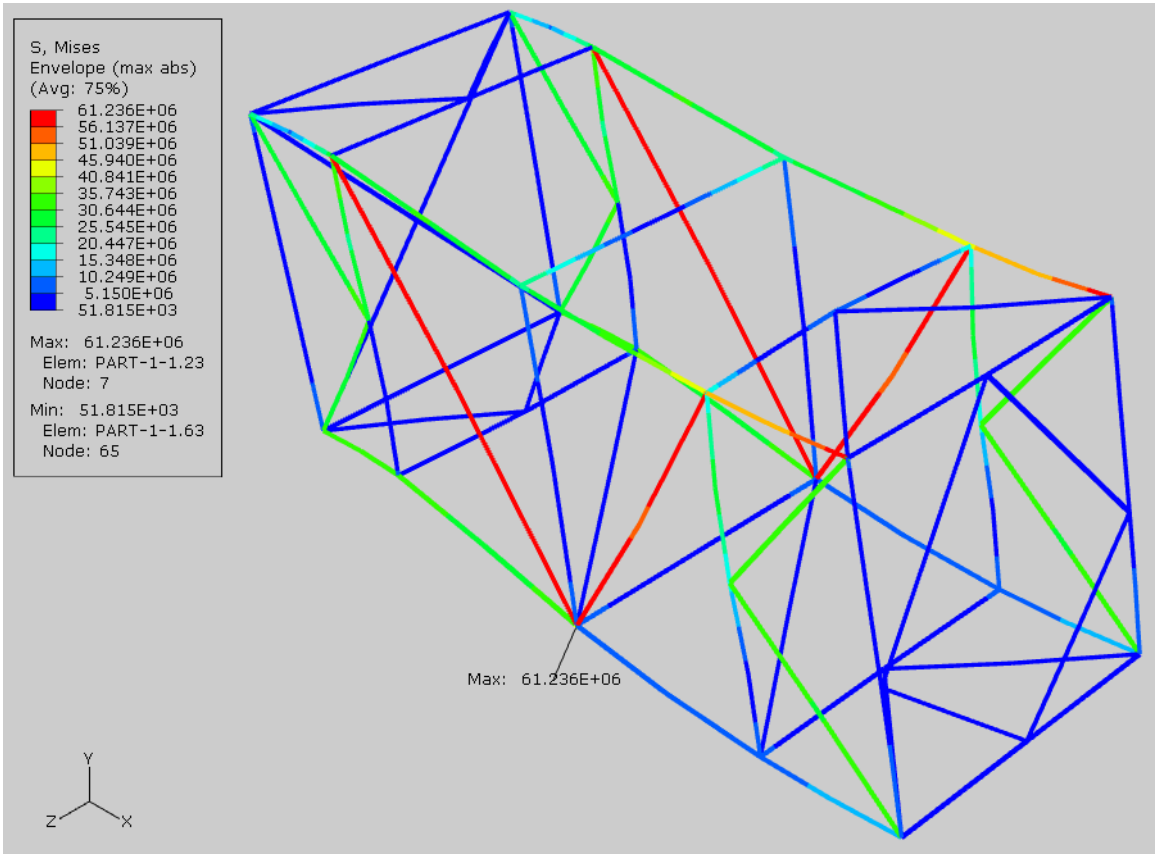
Slika 4.4 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje horizontalne tlačne sile *R*



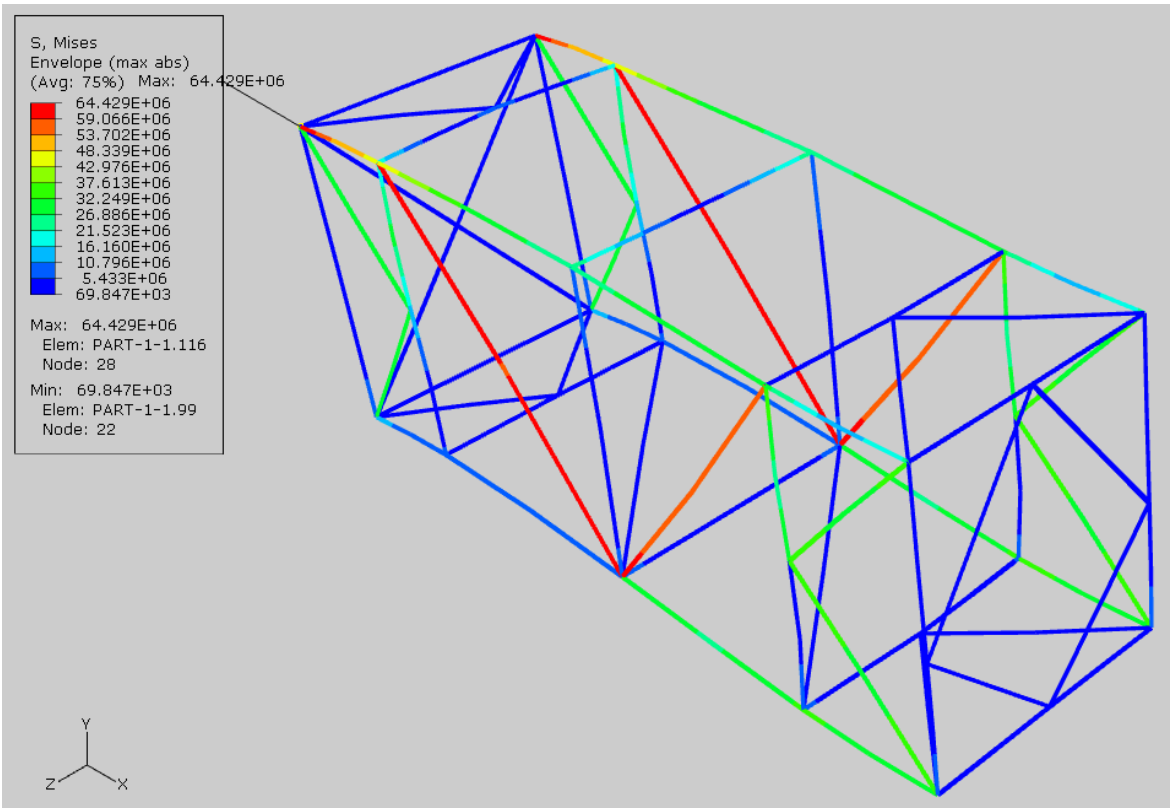
Slika 4.5 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje horizontalne vlačne sile *R*



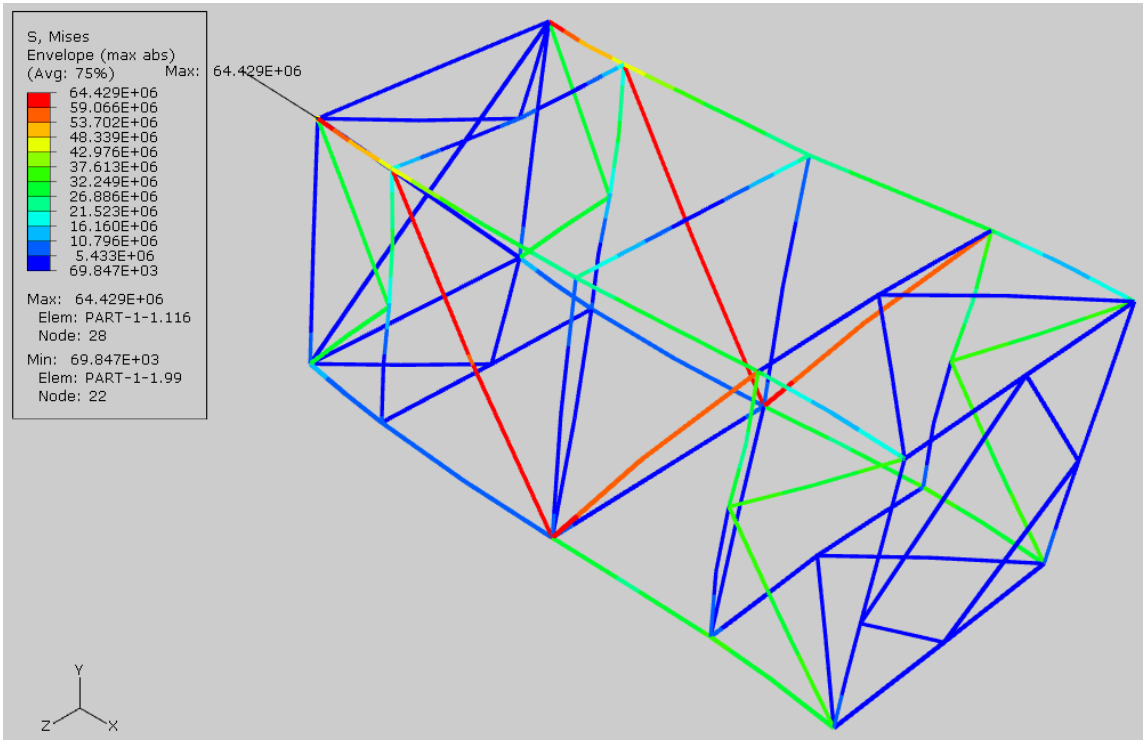
Slika 4.6 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje horizontalne vlačne sile *F*=75 kN na desnom kraju



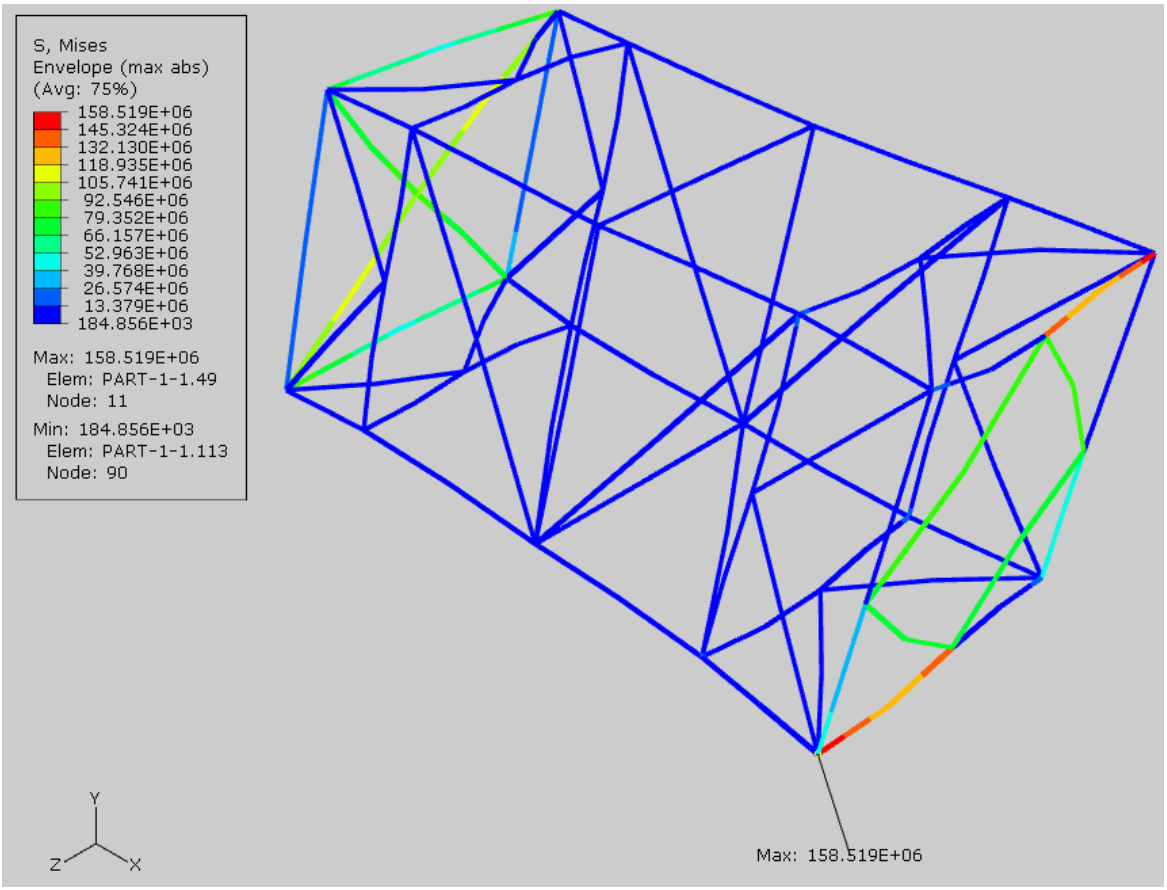
Slika 4.7 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje horizontalne tlačne sile *F*=75 kN na desnom kraju



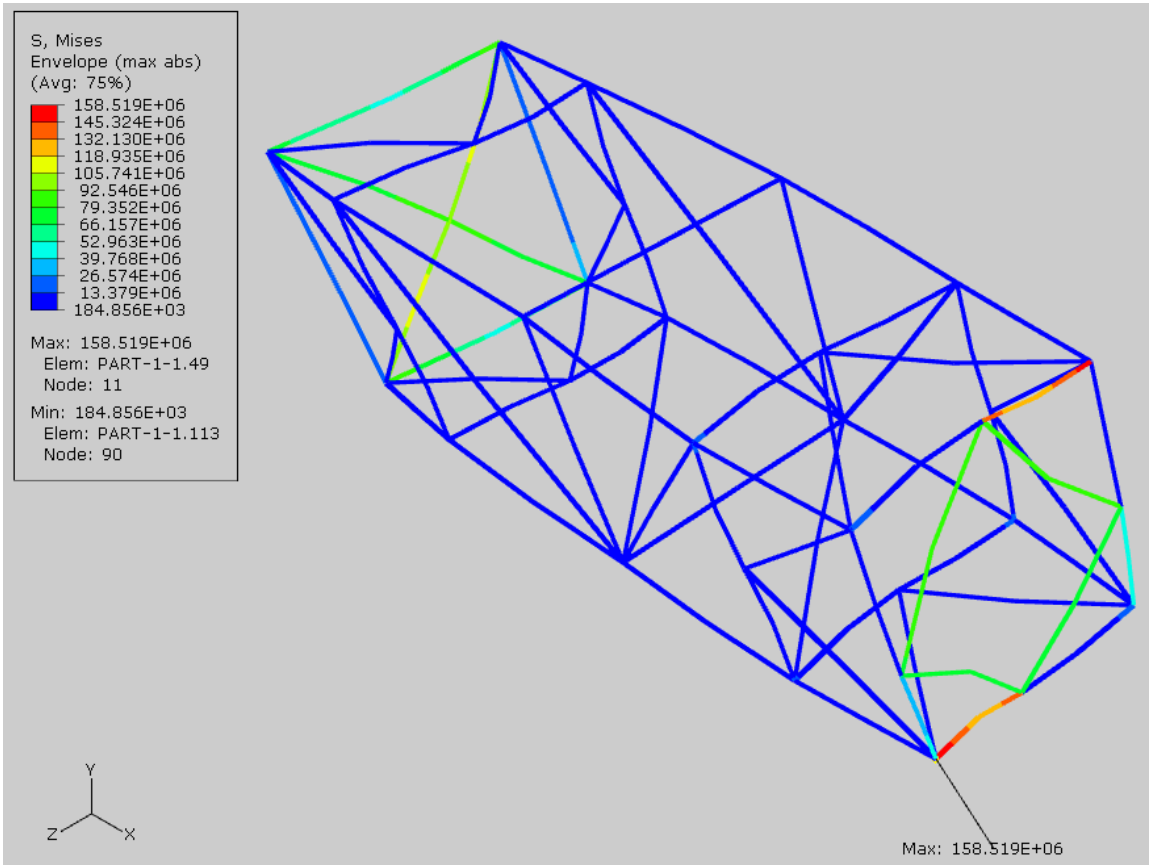
Slika 4.8 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje horizontalne vlačne sile *F*=75 kN na lijevom kraju



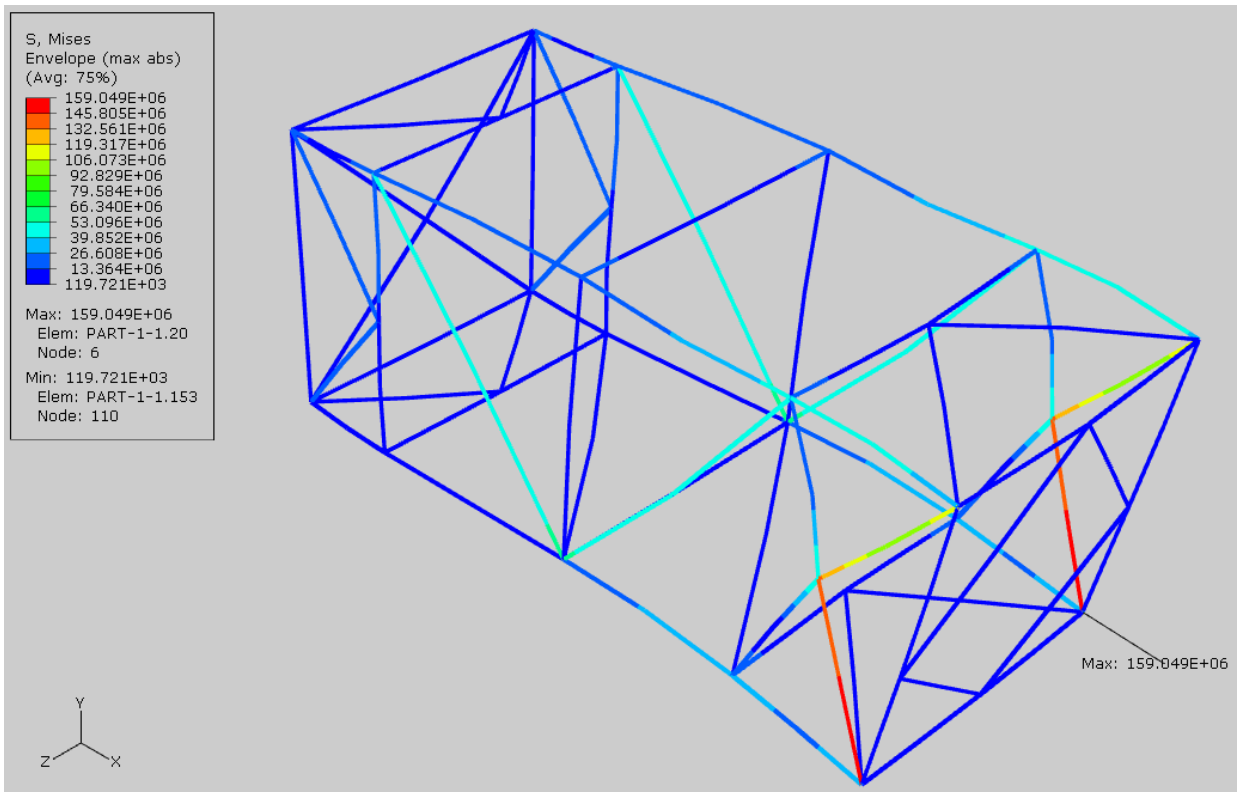
Slika 4.9 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje horizontalne tlačne sile *F*=75 kN na lijevom kraju



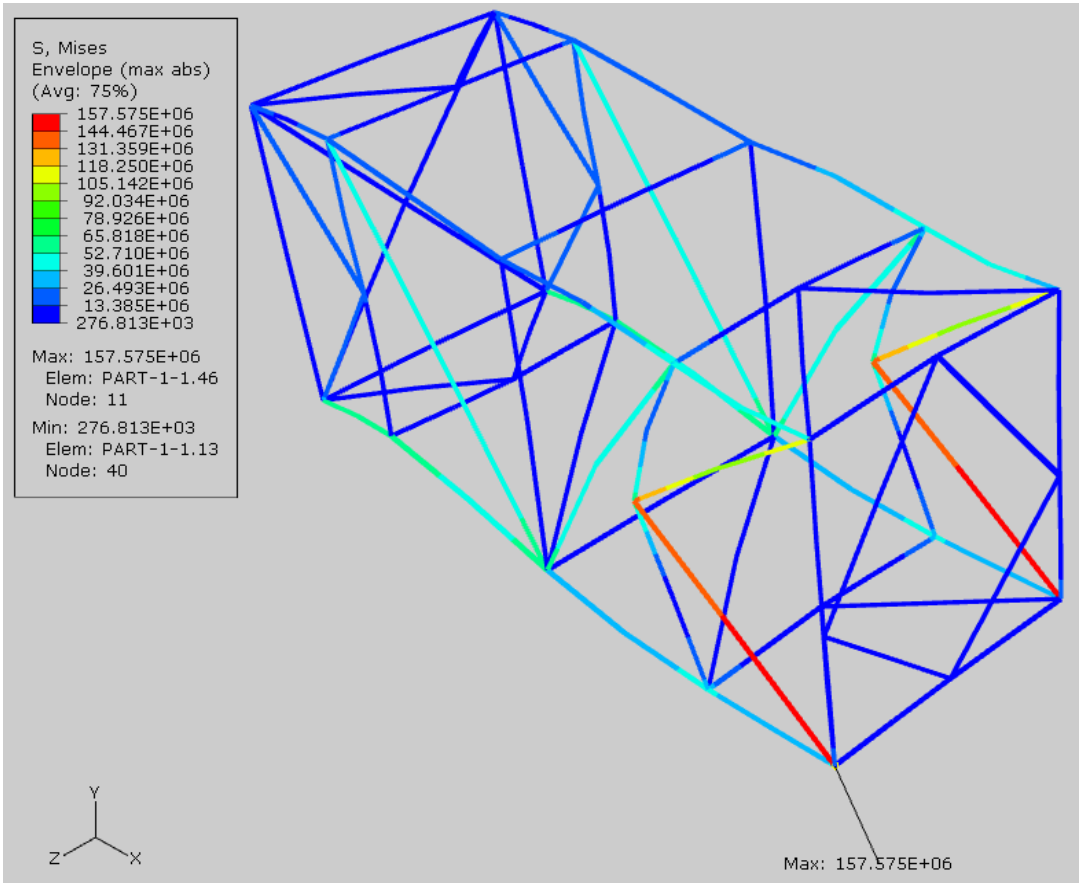
Slika 4.10 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje horizontalne vlačne sile *F*=150 kN



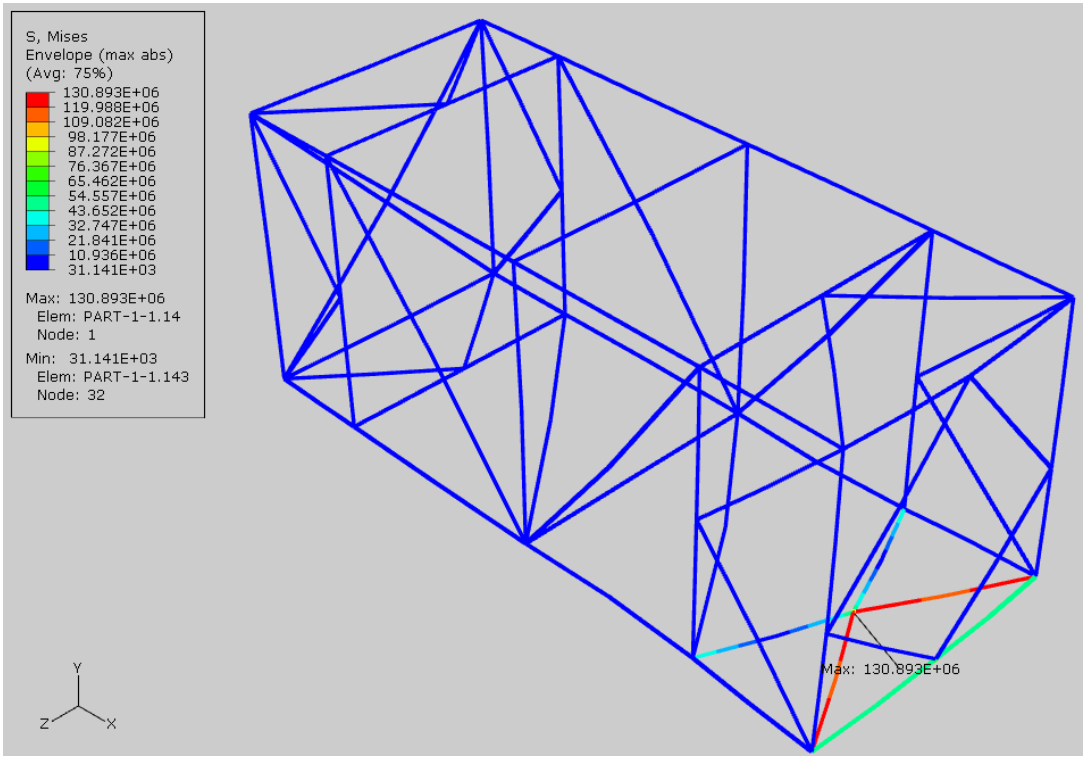
Slika 4.11 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje horizontalne tlačne sile *F*=150 kN



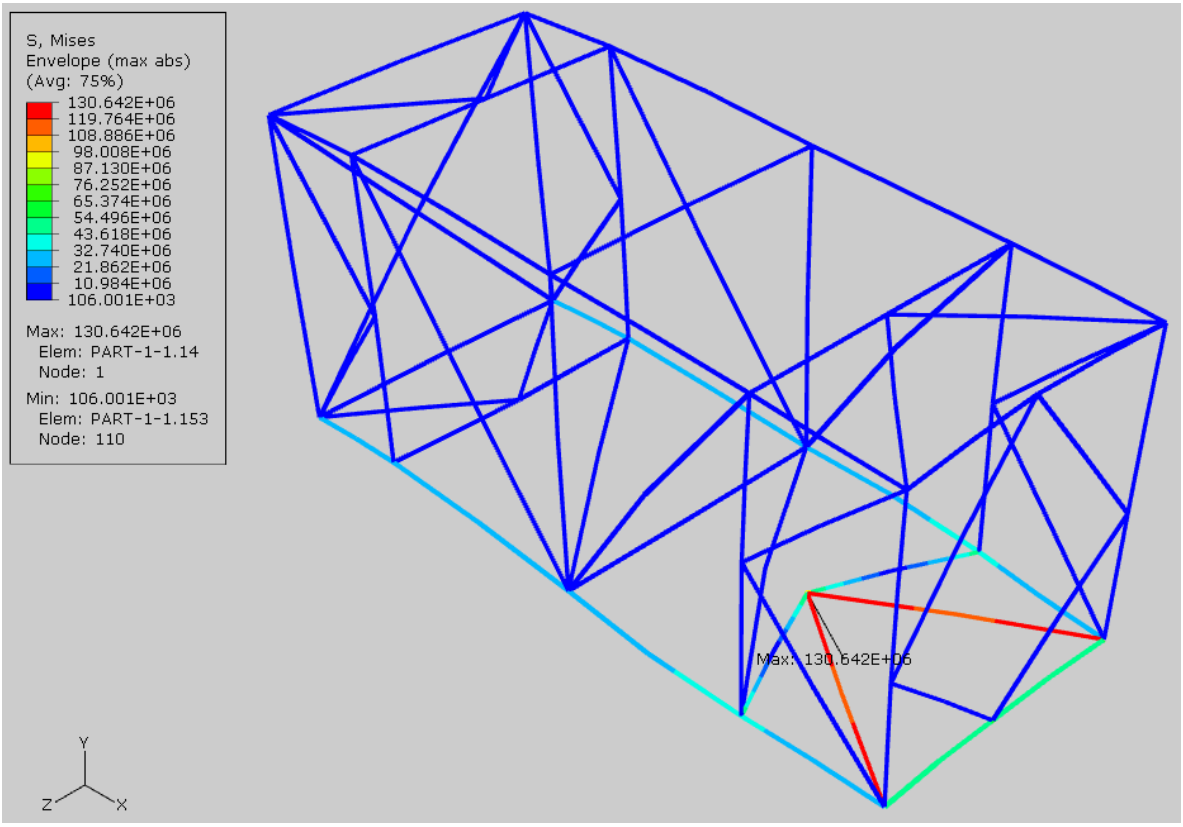
Slika 4.12 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje uzdužne inercijske sile na bočne rešetke I



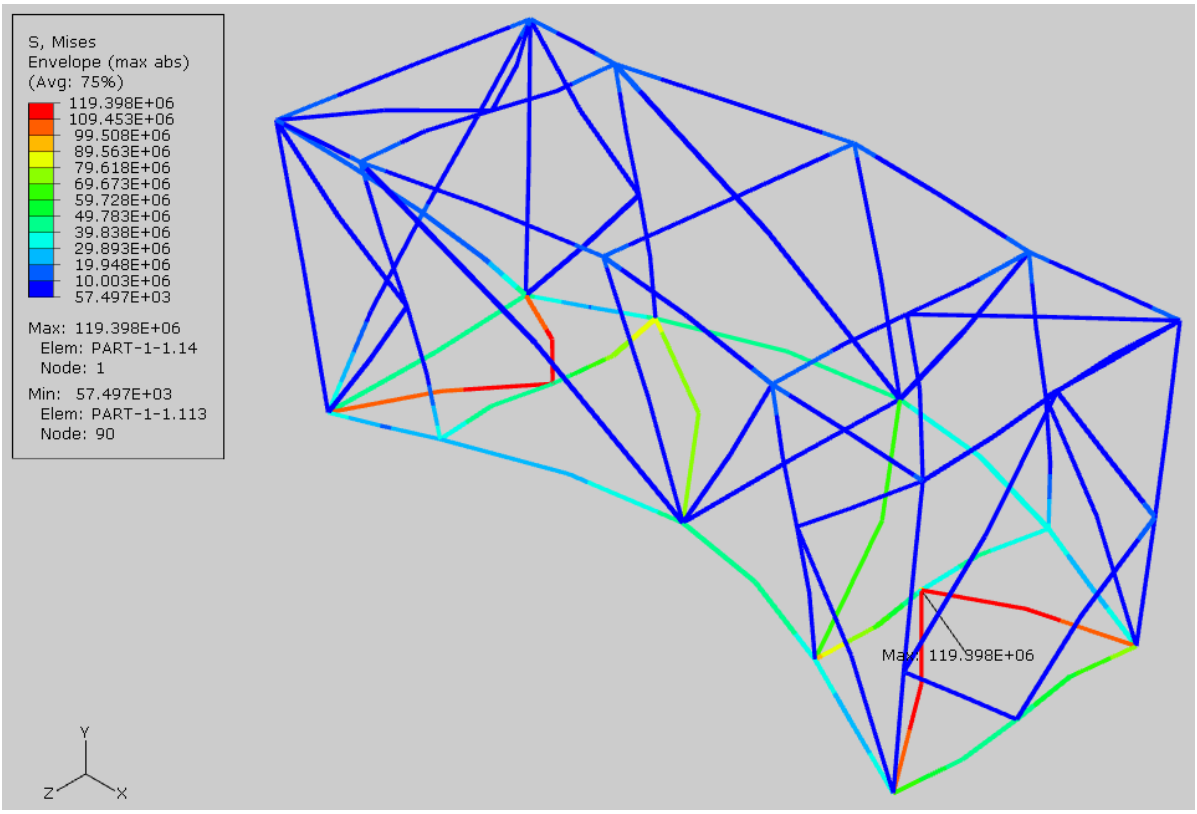
Slika 4.13 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje uzdužne inercijske sile na bočne rešetke II



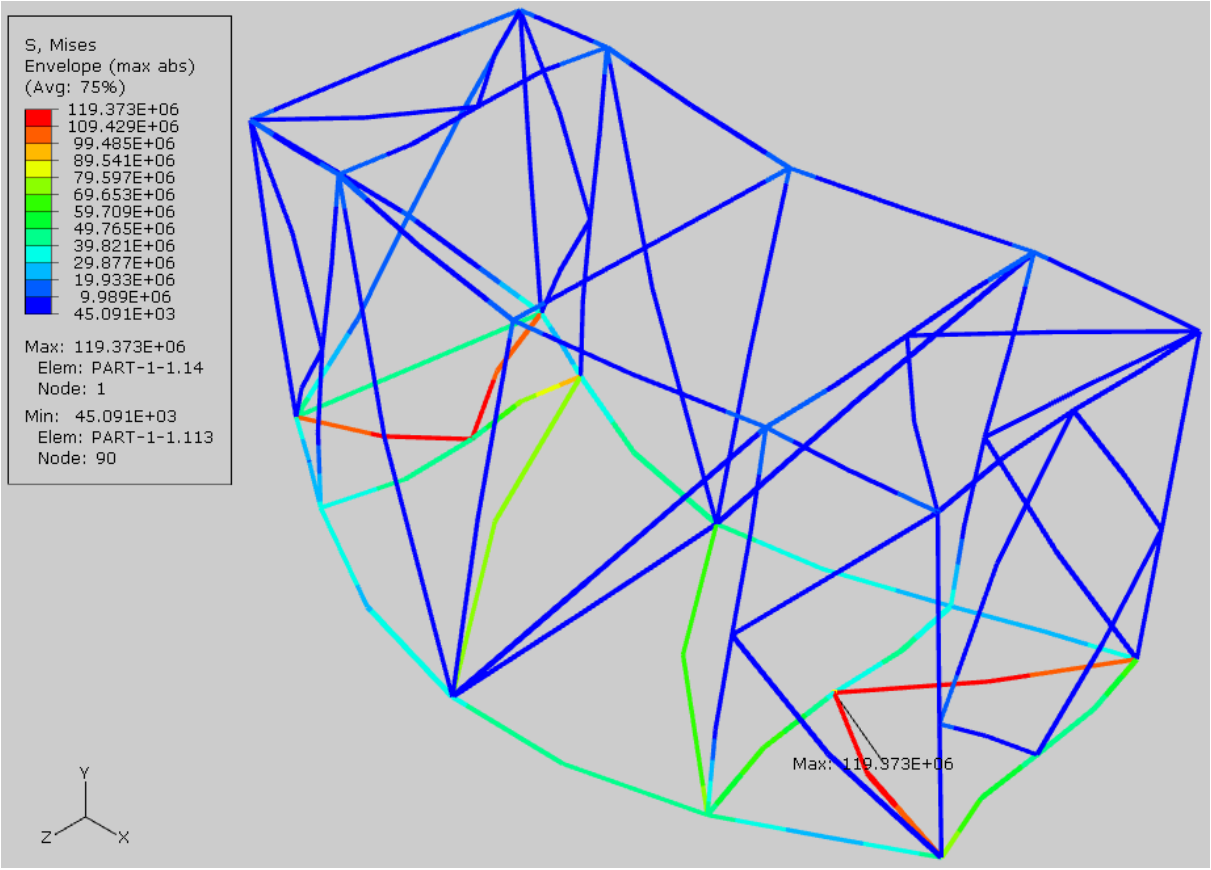
Slika 4.14 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje uzdužne inercijske sile na podnu rešetku I



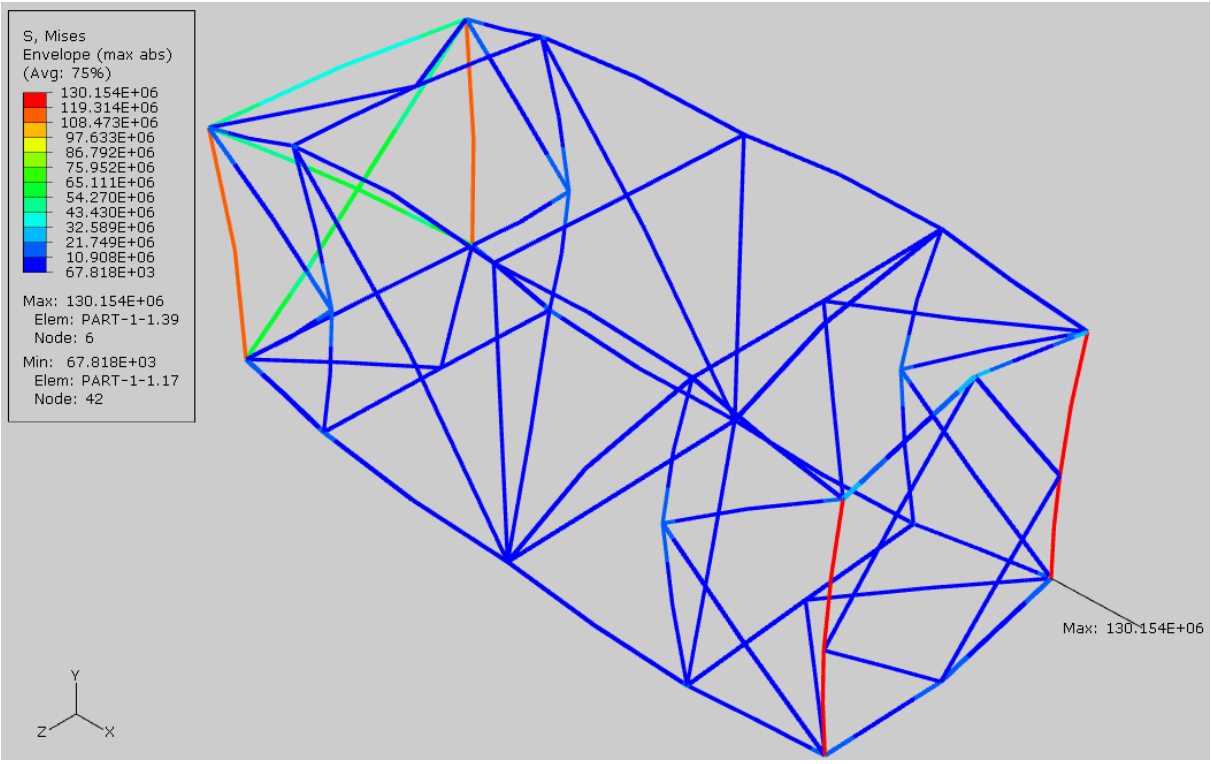
Slika 4.15 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje uzdužne inercijske sile na podnu rešetku II



Slika 4.16 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje bočne inercijske sile na podnu rešetku I



Slika 4.17 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje bočne inercijske sile na podnu rešetku I



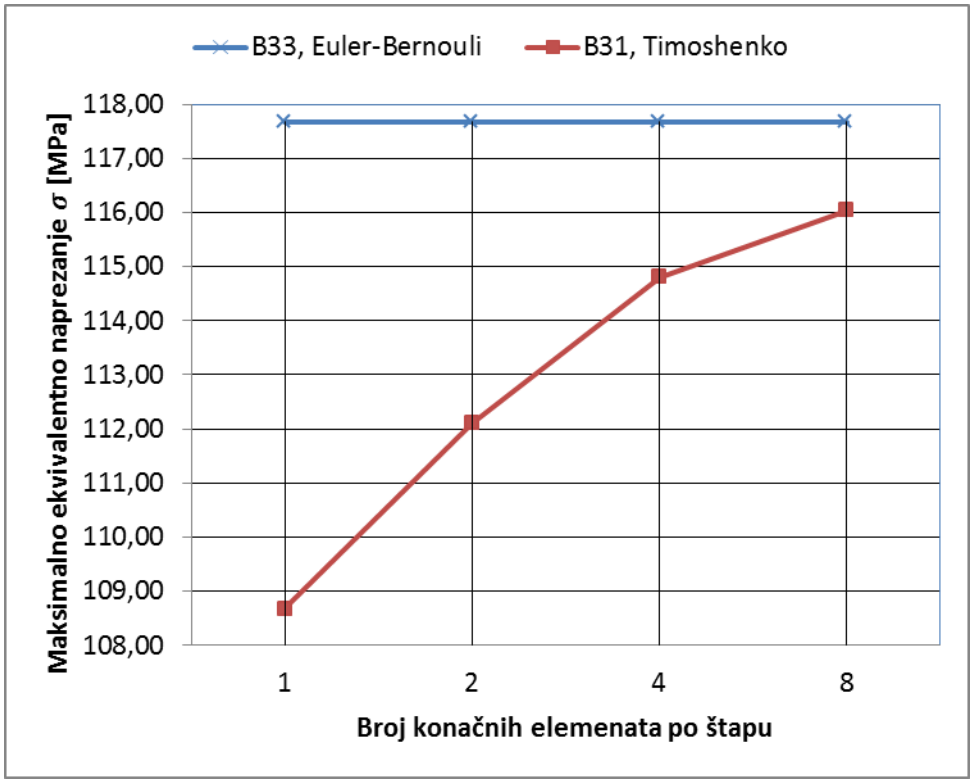
Slika 4.18 Rekonstruirana rešetka - prikaz maksimalnih ekvivalentnih naprezanja – djelovanje sila kod slaganja kontejnera jedan ma drugi

4.2 Proračun Timošenkovim konačnim elementima

Ovdje ćemo slučaj podizanja za donje nauglice, opisanog u 1.2.2, proračunati s Timošenkovim konačnim elementom i s E.-B. konačnim elementom i usporediti rješenja. Uzeli smo baš taj slučaj jer u njemu se javlja znatno savijanje štapova, a kako je opisano u cjelini 1.3, Timošenkovi konačni elementi pretpostavljaju postojanje konstantne kutne deformacije duž presjeka uslijed posmičnih naprezanja, dok E.-B. konačni elementi pretpostavljaju deformacije samo uslijed savijanja.

Slučaj smo računali za različite gustoće mreža i pritom pratili konvergenciju maksimalnog ekvivalentnog naprezanja za cijeli okvir. Graf konvergencije prikazan je na slici 4.19.

Kao što je vidljivo sa slike, B33 elementi konvergiraju odmah, na najgrubljoj mreži, dok B31 polako konvergira k točnom rješenju. Razlog što B33 odmah konvergira je u tome što B33 koristi kubnu interpolaciju i sposoban je točno opisati linearnu raspodjelu sila koju imamo u ovom slučaju, dok B31 koji koristi linearnu interpolaciju kojom može opisati samo linearnu raspodjelu pomaka, a time i konstantnu silu. Međutim, iako B33 odmah konvergira, njegovo rješenje nije točno zbog činjenice što se kod tog elementa zanemaruju deformacije uslijed posmičnih naprezanja.



Slika 4.19 Graf konvergencije maksimalnog ekvivalentnog naprezanja

4.3 Proračun izvijanja

Proračun izvijanja ćemo provesti za slučaj najvećeg opterećenja, slučaj opterećenja kod slaganja kontejnera jedan na drugi, opisan u 1.2.10 i numerički analiziran u 3.4.7. S obzirom da kod optimirane rešetke nije došlo do promjene u kutnim stupovima kod kojih se javlja najveće naprezanje, možemo iz [1] preuzeti vrijednost koeficijenta izvijanja

$$\omega = 1{,}136 \tag{4.3}$$

Vrijednost za silu uzimamo iz tablice 3.10, a naprezanje izvijanja u ovom je slučaju dano s

$$\sigma_{\omega} = \frac{\omega \mathrm{F}}{A} = \frac{1{,}135 \cdot 526{,}55}{4{,}342410^{-3}} = 137{,}63 \ \mathrm{MPa} \tag{4.4}$$

što je manje od istog naprezanja u [1] iz razloga što u štapu djeluje manja osna sila.

5 Zaključak

U ovom završnom radu proveden je proračun čvrstoće postojeće konstrukcije okvira kontejnerske cisterne i dana optimirana konstrukcija s reduciranom masom koja zadovoljava uvjete maksimalnih dopuštenih naprezanja.

Proračun postojeće konstrukcije izveden u *Abaqusu* poklapa se unutar 5-10% s analitičkim vrijednostima dobivenim u [1] s iznimkom slučaja opisanog u 1.2.7 gdje je okvir opterećen s bočnom silom od 150 kN. razlog tome je što se u analitičkom proračunu uzeo maksimalno nepovoljni oblik opterećenja i stoga dobiveea sila većeg iznosa.

Optimiranje konstrukcije se vršilo na način smanjenja dimenzija poprečnih presjeka dok se dimenzije same rešetke nisu mijenjale. Na taj način uspjeli smo smanjiti težinu okvira za 16.8% i ona iznosi

$$R_o^f = 13{,}610 \text{ kN} \quad (16{,}357 \text{ kN}) \tag{4.2}$$

odnosno masa iznosi 1387,36 kg, a prije optimiranja je iznosila 1667,38 kg.

Pokazana je još i razlika u dobivenom rješenju za maksimalno ekvivalentno naprezanje u slučaju podizanja za donje nauglice (opisano u 1.2.2) kod rješavanja Euler-Bernoulijevim kubičnim konačnim grednim elementima te Timošenkovim linearnim konačnim grednim elementima.

U ovom se radu uzimalo da težina cisterne djeluje preko sila koncentriranih u nekoliko točaka i korak k realnijem rješenju bio bi rješavanje uz kontinuiranu raspodjelu težine po cijevima na koje su sedla cisterne pričvršćena. Na taj način bi raspodjela opterećenja bila raspršenija, a time bi se i naprezanja smanjila što bi omogućilo daljnju redukciju težine okvira (što se može vidjeti iz 2.1 Primjer 1. ako se uzme da je ukupna sila kojom djeluje q istog iznosa kao i sila F). Također, daljnja optimizacija bila bi u promjeni prostornog razmještaja rešetke što se ovdje nije razmatralo.

Ovim radom je potvrđeno da konstrukcija koja podnosi opterećenja izračunata analitički u [1] sigurna za eksploataciju s obzirom da su tamo uzeti najnepovoljniji oblici podnošenja opterećenja koji se u stvarnosti ne događaju te su na taj način dobivene puno veće vrijednosti naprezanja

6 Literatura

[1] Alfirević, I., Sorić, J.: Proračun čvrstoće cisterne-kontejnera V=18 m^3, FSB, Zagreb
[2] Sorić, J.: *Metoda konačnih elemenata*, Golden marketing-Tehnička knjiga, Zagreb, 2004.
[3] Alfirević, I.: *Nauka o čvrstoći I*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1995.
[4] http://www.gorgulu-home.com/Index_files/Pages/Useful_Notes/studies/Useful_notes/BEAM%20THEORIES.pdf
[5] Roark, R.J.: *Formulas for Stress and Strain*, Fourth Edition, McGraw-Hill, 1965.
[6] Alfirević, I.: N*auka o čvrstoći II*, Golden marketing, Zagreb, 1999.