

# Numerička analiza konstrukcije modularnih uredskih kontejnera

---

**Golob, Petar**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:186651>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-26**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**NUMERIČKA ANALIZA KONSTRUKCIJE MODULARNIH  
UREDSKIH KONTEJNERA**

Rijeka, srpanj 2024.

Petar Golob  
0069079287

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**NUMERIČKA ANALIZA KONSTRUKCIJE MODULARNIH  
UREDSKIH KONTEJNERA**

Mentor: prof. dr. sc. Marino Brčić

Rijeka, srpanj 2024.

Petar Golob  
0069079287

Rijeka, 12.03.2024.

Zavod: Zavod za tehničku mehaniku  
Predmet: Metoda konačnih elemenata čvrstih tijela

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Petar Golob (0069079287)**  
Studij: Sveučilišni diplomski studij strojarstva (1100)  
Modul: Računarska mehanika i inženjerstvo (1120)

Zadatak: **Numerička analiza konstrukcije modularnih uredskih kontejnera /  
Numerical analysis of the modular office container structure**

### Opis zadatka:

Metodom konačnih elemenata provesti analizu naprezanja i deformacija konstrukcije modularnih uredskih kontejnera. Provesti optimizaciju elemenata konstrukcije kontejnera. Dati prijedlog poboljšanja konstrukcije. Sve izvršene analize popratiti odgovarajućim skicama, a dati i sliku konstrukcijskog elementa u cjelini.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:  
prof. dr. sc. Marino Brčić

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:  
izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

# **IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA**

Izjavljujem da sam, sukladno članku o diplomskom radu Tehničkog fakulteta u Rijeci, samostalno izradio diplomski rad „Numerička analiza konstrukcije modularnih uredskih kontejnera“ uz pomoć navedene literature te da sam samostalni autor svih njegovih dijelova.

Rijeka, srpanj 2024.

Petar Golob  
0069079287



# SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1
2.	UVOD U ZADATAK.....	2
3.	UVOD U METODU KONAČNIH ELEMENATA .....	9
3.1.	Diskretizacija domene konačnim elementima.....	10
3.2.	Vrste elemenata u metodi konačnih elemenata .....	11
3.3.	Pretpostavke Timoshenko grednog elementa.....	14
3.4.	Kinematska pretpostavka .....	15
3.5.	Tenzor deformacije .....	16
4.	NUMERIČKA ANALIZA UREDSKOG KONTEJNERA.....	20
4.1.	Postavke numeričke analize .....	21
4.1.1.	Ograničenja analize .....	23
4.1.2.	Opterećenja analize.....	24
4.1.3.	Opterećenje dizanja kontejnera.....	27
5.	REZULTATI PRELIMINARNE NUMERIČKE ANALIZE.....	29
5.1.	Dodavanje vertikalnih ojačanja.....	30
5.2.	Rezultati analize sa dodatnim vertikalnim ojačanjima.....	32
6.	UVOD U OPTIMIZACIJU .....	36
6.1.	Proces optimizacije dizajna .....	36
6.2.	Formulacija optimizacijskog problema.....	40
6.3.	Varijable dizajna.....	41
6.4.	Funkcija cilja.....	43
6.5.	Ograničenja.....	44
6.6.	Izraz optimizacijskog problema .....	45
7.	OPTIMIZACIJA DIZAJNA.....	47
7.1.	Prva iteracija .....	47
7.2.	Druga iteracija.....	50
7.3.	Rezultati optimizacije .....	54
8.	PROVJERA OPTIMALNOG DIZAJNA .....	57
8.1.	Ograničenja analize provjere .....	59
8.2.	Opterećenja analize provjere .....	60
8.3.	Rezultati analize provjere .....	63

9.	ZAKLJUČAK .....	66
10.	IZVORI.....	67
11.	SAŽETAK .....	68



# 1. UVOD

U modernom svijetu, modularni objekti se koriste sve češće jer raste potražnja za brzim, učinkovitim i isplativim rješenjima za uredske prostore koji mogu biti privremeno ili trajno postavljeni. Modularni uredski kontejneri nude brzu implementaciju i prilagodljivost različitim okolišnim i prostornim potrebama. Takav pristup pojednostavljuje proces izgradnje te promiče održivost i troškovnu učinkovitost. Međutim, izazov održavanja strukturalnog integriteta i osiguravanja funkcionalnosti pod različitim uvjetima opterećenja je problem koji zahtjeva detaljnu analizu.

Ovaj diplomski rad ima za cilj provesti numeričku analizu konstrukcije modularnih kontejnera s fokusom na korištenje čeličnih profila proizvođača *Schrag*. Definirat će se korišteni profili i njihova konfiguracija te vrste opterećenja. Sam kontejner je najčešće obložen kompozitnim panelima s PUR pjenom ili kamenom vunom ali njihov utjecaj na stabilnost konstrukcije će se zanemariti jer paneli sami po sebi nisu konstrukcijski elementi već uvijek zahtijevaju dodatnu konstrukciju. Kontejner mora moći podnijeti vlastitu težinu te težinu još jednog takvog kontejnera za slučaj slaganja kontejnera jedan na drugog.

Za provođenje analize koristit će se metoda konačnih elemenata (MKE) a korišteni program će biti *Femap* švedske tvrtke Siemens. MKE omogućuje diskretizaciju složenih struktura u manje elemente kojima možemo upravljati, olakšavajući istraživanje raspodjele naprezanja, deformacije i potencijalnih kritičnih točaka pod različitim uvjetima opterećenja te će biti detaljnije opisana u drugom poglavlju. Koristit će se 1D konačni elementi sa svojstvima definiranih profila s obzirom na njihovu orijentaciju.

Cilj je analizirati naprezanja i deformacije unutar okvira kontejnera i optimizirati debljinu korištenih čeličnih profila kako bi se mogla postići ušteda prilikom proizvodnje. Unutar okvira masovne proizvodnje smanjenje debljine profila i za 1 mm može nositi velike uštede na proizvodnji.

## 2. UVOD U ZADATAK

Modularni kontejnerski ured je tip prijenosnog uredskog prostora koji su najčešće gabarita brodskih kontejnera. To pojednostavljuje prijevoz i manipulaciju ureda. Jednostavni kvadratni okvir se proizvede od čeličnih profila te bude obložen limom ili termoizolacijskim panelima ovisno o upotrebi. Iznutra se postavljaju instalacije struje i vode po potrebi. Ovakav stil gradnje postaje sve popularniji jer se može napraviti uredski prostor privremeno ili trajno u veoma kratkom roku s obzirom na klasičnu gradnju, a u kombinaciji sa termoizolacijskim panelima pružaju i bolju energetska učinkovitost.

Takvi uredi se mogu lako proširiti dodavanjem ili micanjem uredskih jedinica. Zbog takve fleksibilnosti idealni su za poduzeća koja očekuju rast ili promjene u potrebnom uredskom prostoru. Također su prenosivi što znači da se mogu dovesti na potrebno mjesto poput gradilišta čime se osigura kvalitetan uredski prostor koji se po završetku posla može dalje preseliti na sljedeće gradilište uz minimalan trud i trošak.



*Slika 2.1. Modularni ured obložen termopanelima*

Modularni uredi se koriste u raznim sektorima: rudarenju za administrativne i operacijske centre, mali poduzetnici koji traže povoljna uredska rješenja, prilikom većih događanja za privremene blagajne, urede i komunalije. Također su popularni u edukacijskim institucijama za dodatni prostor učionica.

U proteklih 10 godina proizvodnja okvira modularnih kontejnera se je promijenila. U prošlosti su se najčešće proizvodili od zatvorenih zavarenih metalurških profila što je značajno ograničavalo proizvodnju u kasnijim koracima. Profili se bili dostupni u komercijalnim duljinama i imali ograničene geometrije i debljine stjenki. Nije bilo moguće zaštititi unutrašnjost profila što je ubrzavalo koroziju a uz to okviri su bili teški što je direktno utjecalo na troškove proizvodnje kontejnera.

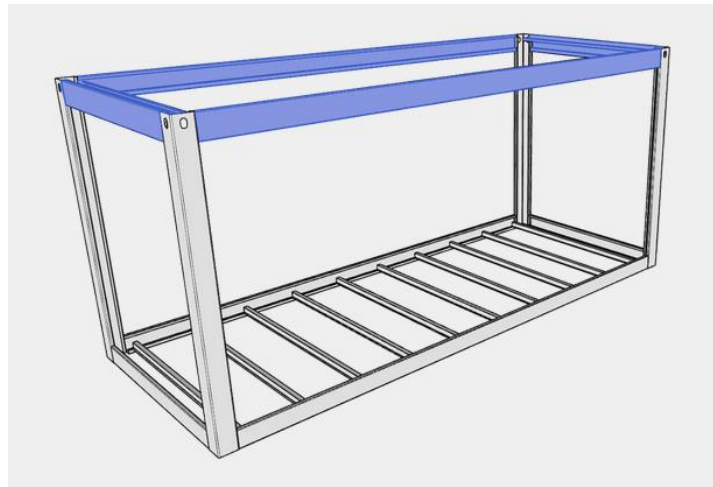
Alternativa tome je okvir napravljen o hladno oblikovanih profila. Savijaju se od ravnih limova potrebnih debljina i karakteristika. Prednosti hladno oblikovanih profila leži u tome što se profili mogu prilagoditi po narudžbi, široke mogućnosti poprečnog presjeka profila, niža masa konstrukcije te niža cijena. Profili se mogu proizvoditi na dva načina: rubnim savijanjem i profiliranjem. Rubno savijanje je svestranije jer je tom tehnikom proizvodnje moguće proizvesti kompleksnije profile raznih debljina. Doduše takva proizvodnja je vremenski dugotrajna s obzirom na profiliranje i zahtijeva više truda. Prednosti profiliranje leže u tome što je moguće proizvesti dulje profile. Najčešće se koristi za proizvodnju Z i C profila.



*Slika 2.2. Primjer okvira modularnog kontejnera*

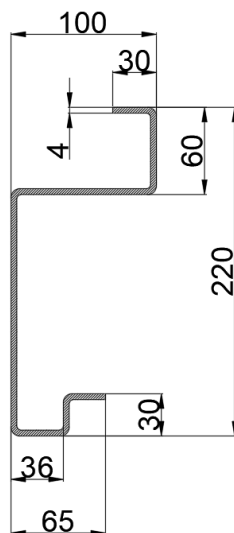
U ovom radu će se koristiti profili tvrtke Schrag iz poljske koja ima dostupne profile na svojoj web stranici. Na stranici je ponuđeno više izbora za svaki profil svaki sa svojom razinom kompleksnosti.

Kao početno stanje debljina svakog profila će biti maksimalna debljina lima koji imaju u ponudi a to je 4 mm te će se kroz optimizaciju stanjiti oni profili na kojima je to moguće.

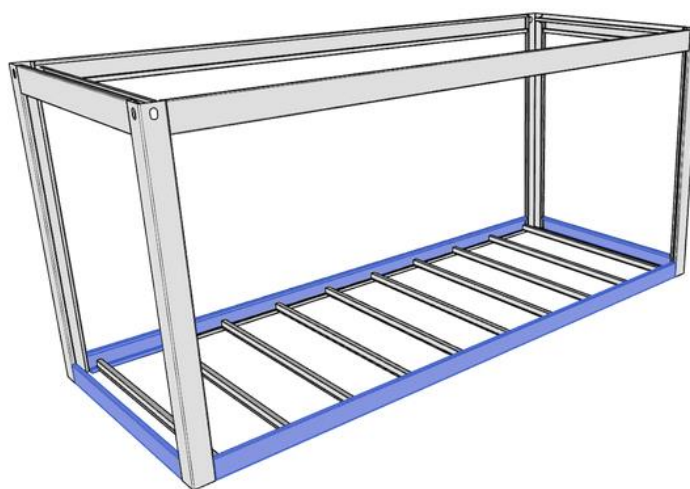


*Slika 2.3. Pozicije krovnih profila*

Krovni profil je najkompleksniji element čitavog okvira kontejnera zbog svog poprečnog presjeka. Služi kao nosivi element kontejnera ali može i služiti kao oluk po obodu kontejnera za odvodnju kišnice s krova. Takovo rješenje rezultira bržom proizvodnjom a s obzirom da se profili vare skupa, to osigurava nepropusnost i funkcionalnost. S obzirom da je profil otvorenog presjeka to olakšava zaštitu od korozije. Poslije varenja čitav okvir se može zaštititi slojem zaštitne i dekorativne boje. Ako se želi postići dodatna zaštita moguće je napraviti krovni profil od galvaniziranog lima. Za krovni profil koristit će se profil savijen 6 puta.

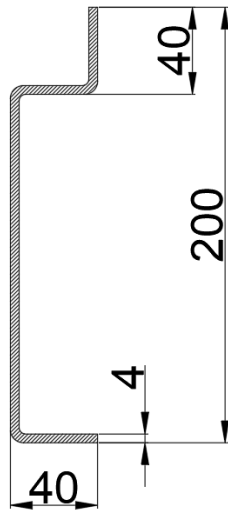


*Slika 2.4. Dimenzije i oblik krovnog profila*

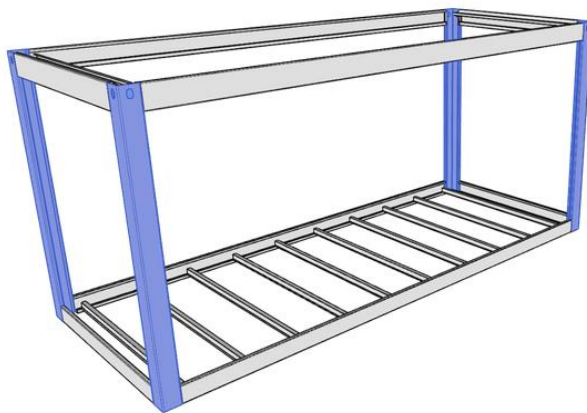


*Slika 2.5. Pozicije podnih profila*

Podni profil ima funkciju nosivosti čitavog okvira. Po potrebi može imati rupe koje bi bile potrebne za provlačenje instalacija ili komunalija. U slučaju ove simulacije neće se uzimati u obzir takvi otvori jer će su elementi simulacije jednodimenzionalni. Nema kompleksan oblik kao krovni nosač ali zbog otvorenog oblika jednako ga je lako zaštititi od korozije. Za podni profil koristit će se profil savijen 3 puta.

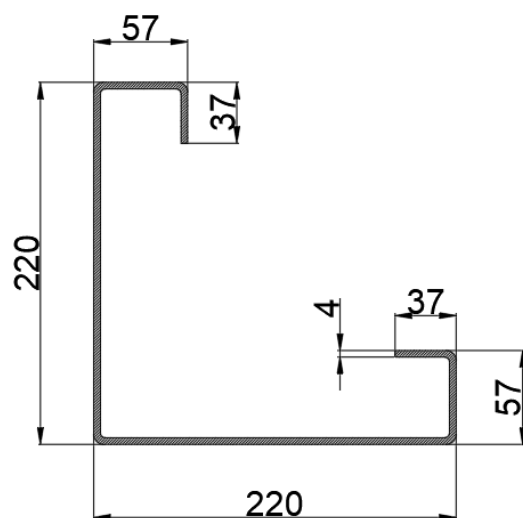


*Slika 2.6. Oblik i dimenzije podnog profila*

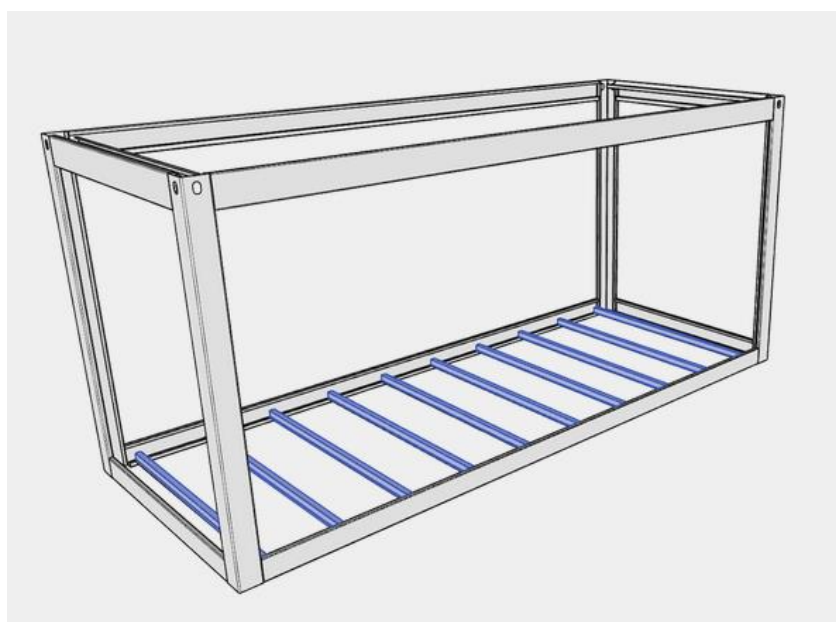


*Slika 2.7. Pozicije vertikalnih profila*

Vertikalni profili upotpunjuju okvir kontejnera. Najčešće se radi od 4 mm lima s obzirom da treba nositi težinu kontejnera koji bi se mogli složiti na njega. Rubovi okvira su savijeni kako bi njihova debljina bila kompatibilna se termoizolacijskim panelima kojim će se obložiti kontejner. Dodatno se na vrhovima profila dodaju transportne rupe sa valjanim rubovima kako bi se olakšalo transport samog kontejnera. Poput krovnih i podnih profila, vertikalni profili su također otvorenog presjeka. Odabrao se je profil savijen 5 puta.

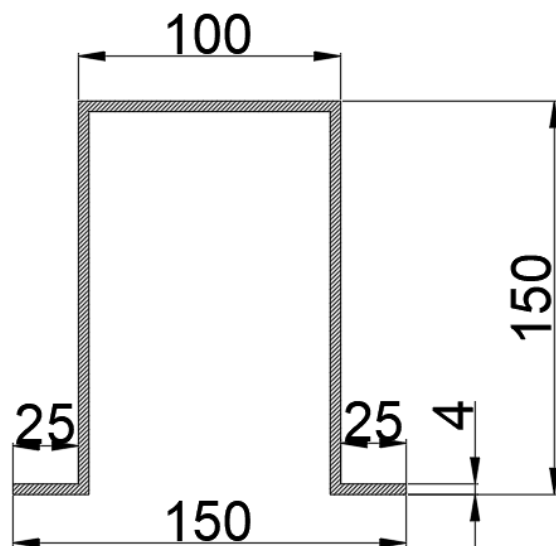


*Slika 2.8. Dimenzije i oblik vertikalnog profila*



*Slika 2.9. Pozicije podnih ojačanja*

Na kraju se dodaju podna ojačanja kako bi se mogao kvalitetno montirati pod. Oblik podnih profila i njihova gustoća razmještaja ovisi o opterećenju koje će morati podnijeti. U ovoj simulaciji podna ojačanja će biti omega profili razmješteni svakih 0,7 metara.



*Slika 2.10. Dimenzije i oblik podnih ojačanja*



### 3. UVOD U METODU KONAČNIH ELEMENATA

Metoda konačnih elemenata (MKE) je jako bitan pristup rješavanju problem u području računarske analize kojim možemo razumjeti ponašanje kompleksnih sustava u raznim uvjetima. Računarska tehnika koja je razvijena sredinom dvadesetog stoljeća revolucionirala način na koji inženjeri pristupaju problemima u mnogo sfera strojarstva. U suštini, pomoću MKE moguće je aproksimirati rješenja kompleksnih diferencijalnih jednadžbi koje opisuju fizičke zakone i pojave te omogućuje analizu predmeta i sustava koji bi inače bili gotov nemogući za riješiti.

U MKE terminologiji najbitniji i najčešći izrazi su stupnjevi slobode, matrica krutosti i vektor sila. Oni su potekli iz strukturalne mehanike za čiju primjenu se i izumila MKE metoda. S obzirom da je MKE diskretizacijska metoda, broj stupnjeva slobode je konačan. Stupnjevi slobode su sadržani u vektoru  $u$ . Taj vektor se generalno zove vektor stupnjeva slobode ili vektor stanja. S obzirom na vektor  $u$  postoji i skup konjugiranih vrijednosti koje se zovu sile. Te vrijednosti su sadržane u vektoru  $f$ , vektoru sila. Uzima se da je odnos između  $u$  i  $f$  linearan i homogen. Odnos tih vektora je izražen glavnom jednadžbom krutosti:  $Ku = f$

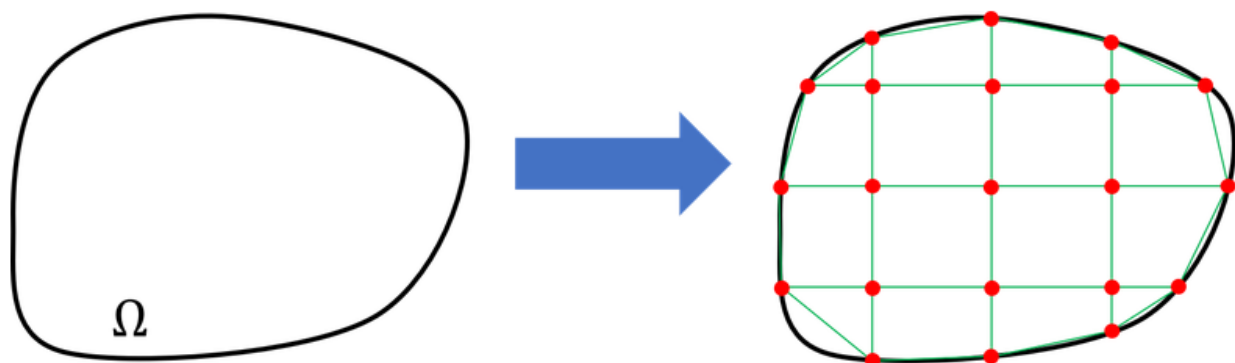
$K$  se univerzalno zove matrica krutosti čak i u ne strukturalnim primjenama.

Tablica 3.1. Fizička značenja vektora  $u$  i  $f$  u različitim MKE primjenama

Primjena	Vektor stupnjeva slobode $u$	Konjugirani vektor $f$
Strukture i mehanika čvrstih tijela	Pomak	Mehanička sila
Provođenje topline	Temperatura	Izvor topline
Potencijalni protok	Tlak	Brzina čestica
Opći protok	Brzina	Izvori
Elektrostatika	Električni potencijal	Gustoća naboja
Magnetna statika	Električni potencijal	Magnetni intenzitet

### 3.1. Diskretizacija domene konačnim elementima

Objekt iz stvarnog svijeta može biti beskonačno kompleksan. Prvi korak je napraviti matematički opis te domene. To se napravi pomoću mreže koja diskretizira tu domenu.

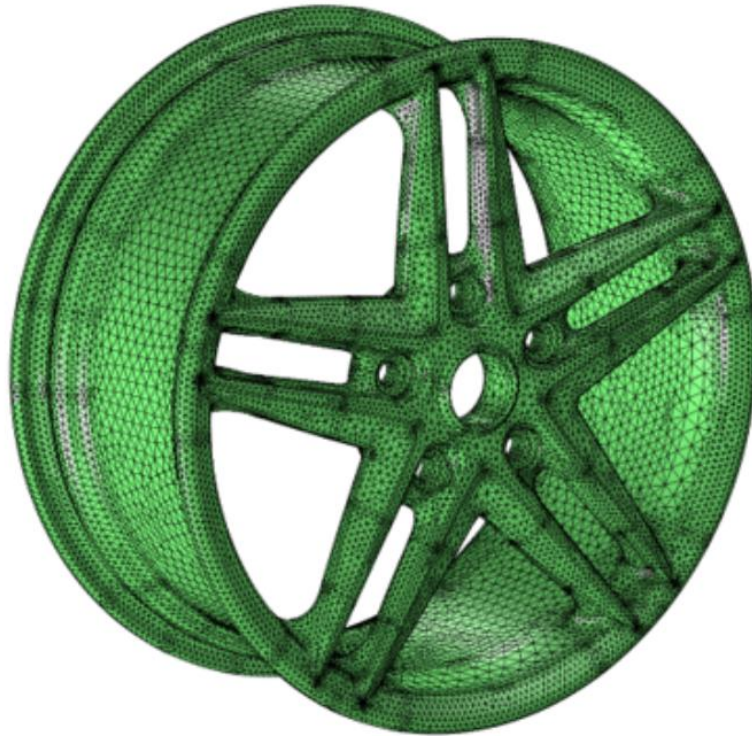


Slika 3.1. Diskretizacija 2D domene matematički određenom mrežom

Mreža se sastoji od čvorova (crvene točke) povezanih zajedno kako bi činili elemente (zelene ćelije). Vidljivo je da je mreža idealizacija početne domene. Kontrolirajući mrežu i njezinu finoću, može se postići točniji matematički opis domene.

Najčešće se mreža radi pomoću kompjuterskog programa zvanog umreživač (*mesher*). Zadaća tog programa je minimizirati odstupanja od početne zadane domene i broj čvorova. Taj proces ne može biti u potpunosti automatiziran već zahtjeva djelovanje korisnika. Uloga korisnika je da odredi veličinu elemenata te koji automatski generirani elementi su zadovoljavajuću a koji trebaju daljnje razrađivanje. Glavni problem je postići dovoljnu finu mrežu koja će moći kvalitetno izračunati

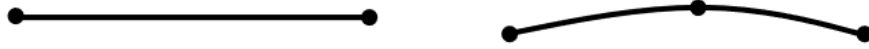
naprezanja ili pomake bez učinimo umreženi model nepotrebno kompleksnim i teškim za računanje.



*Slika 3.2. Automobilaska felga umrežena trodimenzionalnim elementima*

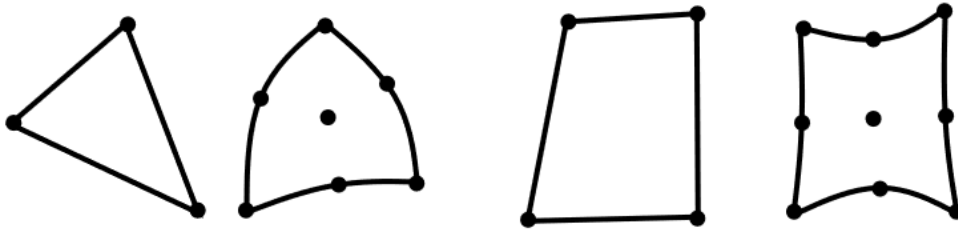
### 3.2. Vrste elemenata u metodi konačnih elemenata

Elementi u MKE su generalno grupirani u jednodimenzijske elemente, dvodimenzijske elemente i trodimenzijske elemente. Razlikuju se po svojem obliku. Elementi mogu poprimiti oblik ravne crte ili krivulje, trokuta ili četverokuta, tertaedra i mnogo drugih oblika. Najjednostavniji element je linija omeđena sa dvije točke. Svi linijski elementi, bili ravni ili krivulje, se zovu jednodimenzijski (1D) elementi koji imaju translacijske i rotacijske prijenosne funkcije. Primjeri 1D elemenata su štapni i gredni elementi.



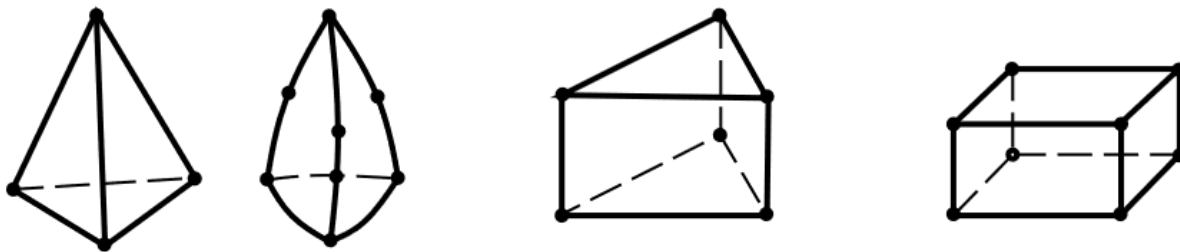
*Slika 3.3. Domene konačnih elemenata u jednoj dimenziji*

Dvodimenzijски (2D) elementi su tipično ravninski elementi sa trokutnog ili četverokutnog oblika. Primjeri 2D elemenata su trokutni elementi s 3 čvora, trokutni elementi sa 6 čvorova, među ostalom. Ovi ravninski elementi mogu imati pravilan i nepravilan oblik. S obzirom da uzimaju u obzir ravninska naprezanja često se koriste za rješavanje 2D elastičnih problema.



*Slika 3.4. Domene konačnih elemenata u dvije dimenzije*

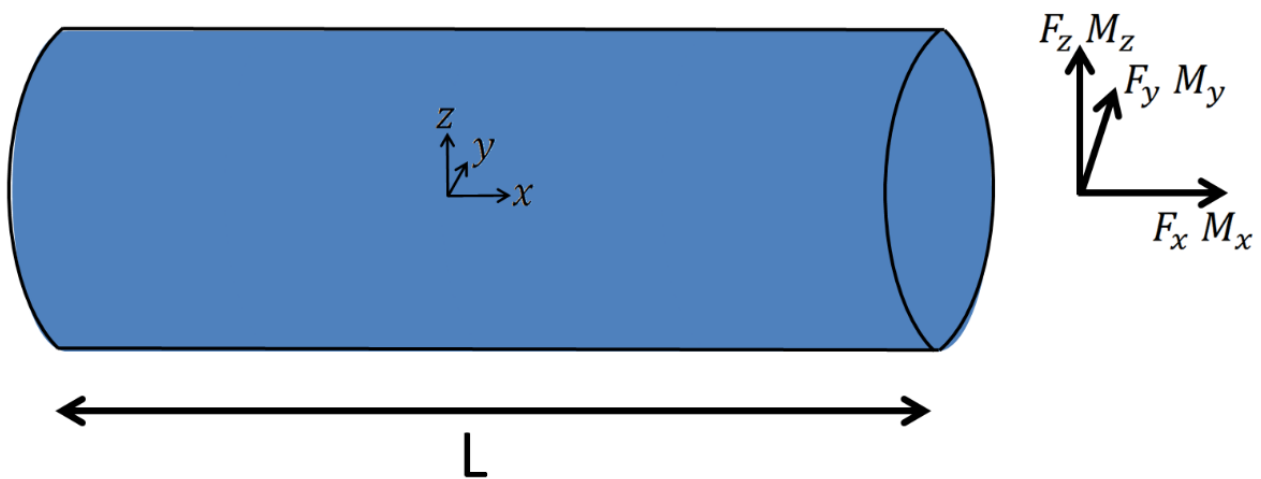
Trodimenzijски (3D) elementi se koriste za umrežavanje volumena. Koriste se kada se problem ne može pojednostaviti na jednostavnije 1D ili 2D elemente. Primjeri 3D elemenata su tetraedar sa 4 čvora, tetraedar sa 10 čvorova, heksaedar sa 6 čvorova itd.



Slika 3.5. Domene konačnih elemenata u tri dimenzije

S obzirom da će se u ovom radu koristiti 1D gredni elementi u sljedećem djelu će se pobliže oni objasniti. Gredni elementi su veoma česti u strukturalnim analizama. Fokus će biti na Timoshenko grednim elementima jer su oni najčešći gredni elementi implementirani u FEM software-e što vrijedi i za Femap koji po tvorničkim postavkama analizira gredne elemente tako.

Gredni elementi relevantni su za upotrebu pri analizi vitkih struktura koja je izložena silama i momentima u bilo kojem smjeru. Greda se može jednostavno prikazati na sjedeći način:



Slika 3.6. Pojednostavljeni prikaz grede sa označenim koordinatnim sustavom i opterećenjima

Iz teorije grednih elemenata relevantni geometrijski parametri grede su:

- Duljina grednog elementa:  $L$
- Površina poprečnog presjeka:  $A$
- Momenti inercije poprečnih presjeka:

$$I_y = \iint_A z^2 dy dz$$

$$I_z = \iint_A y^2 dy dz$$

- Produkt momenata inercije poprečnih presjeka:

$$I_{yz} = \iint_A zy dy dz$$

- Polarni moment inercije poprečnih presjeka:

$$I_x = \iint_A (y^2 + z^2) dy dz$$

### 3.3. Pretpostavke Timoshenko grednog elementa

Gredni element možemo promatrati kao pojednostavljene kompleksnije 3D strukture. Kada se radi takav element, gleda se smanjiti trošak računanja te donošenje pretpostavki o tome kako se element ponaša. Glavne pretpostavke Timoshenko elementa su sljedeće:

Pretpostavka naprezanja

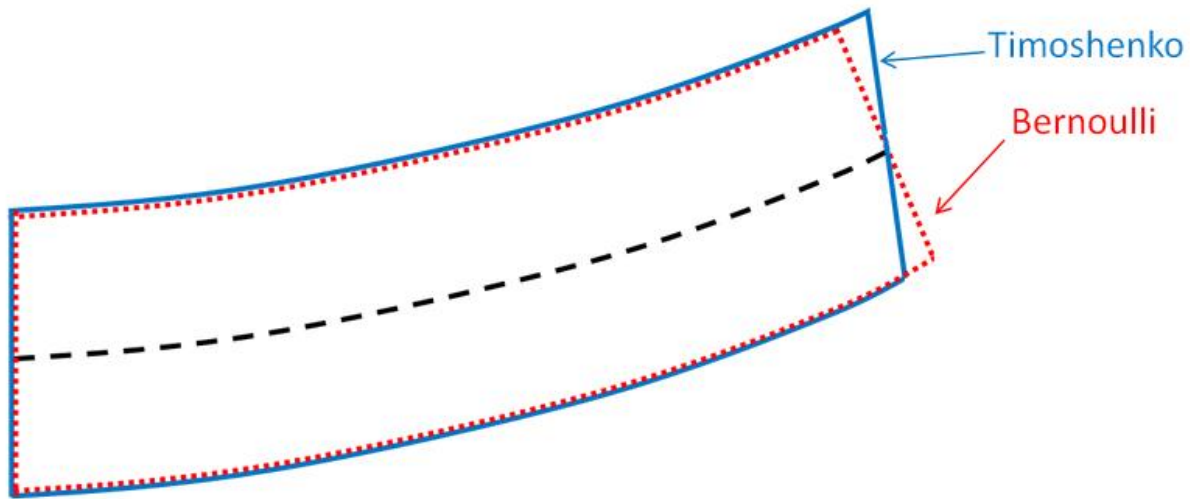
Greda mora moći podnijeti poprečna opterećenja, stanje naprezanja mora dopuštati smična naprezanja kako i aksijalna naprezanja kako bi mogla pretrpjeti savijanje i aksijalna opterećenja.

Tada se može odrediti:

$$\sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma_{23} = 0 \quad (1)$$

### 3.4. Kinematska pretpostavka

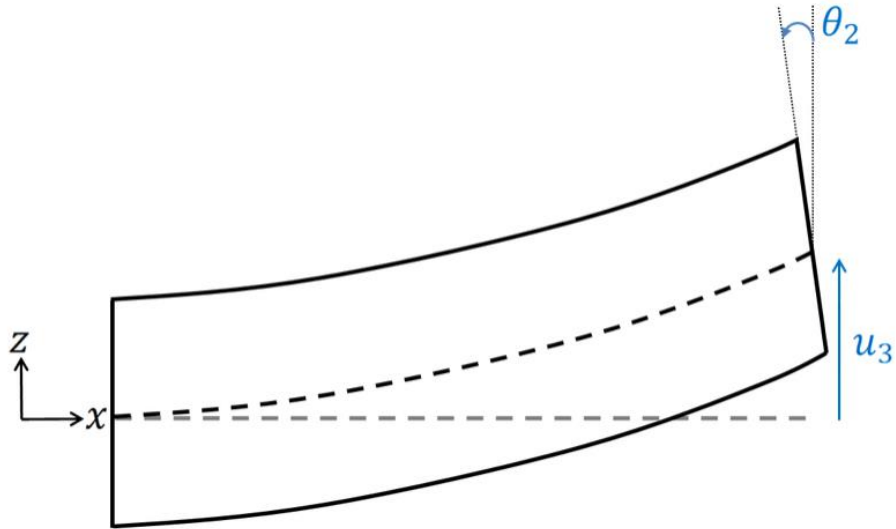
Glavna pretpostavka povezana s grednim elementima je ta da gredni poprečni presjek ostaje ravan prilikom deformacije. Timoshenko-va teorija o gredama ne podržava ideju da površina normalna na neutralnu os grede ostaje normalna za vrijeme deformacije kao što je to definirano u Bernoulli-jevoj teoriji.



Slika 3.7. Deformacije rubnih linija grednih nosača prilikom deformacije prema Timoshenku i Bernoulliju

Timoshenkova greda je poželjnija jer daje labavije pretpostavke o kinematici grede. Doduše, Bernoullijeva greda se smatra točnom za tipične dimenzije poprečnog presjeka manje od 1/15 duljine grede. Dok se Timoshenkova greda smatra točnom za tipične dimenzije poprečnog presjeka manje od 1/8 duljine grede. Pomaci unutar grede definiraju se iz pomaka po neutralnoj osi  $u_1^0(x)$ ,  $u_2^0(x)$ ,  $u_3^0(x)$  kao i rotacije poprečnog presjeka  $\theta_1(x)$ ,  $\theta_2(x)$ ,  $\theta_3(x)$ :

$$\underline{u} = \begin{cases} u_1(x, y, z) = u_1^0(x) + z\theta_2(x) - y\theta_3(x) \\ u_2(x, y, z) = u_2^0(x) - z\theta_1(x) \\ u_3(x, y, z) = u_3^0(x) + y\theta_1(x) \end{cases} \quad (2)$$



Slika 3.8. Odnosi pomaka i rotacije elementa u  $xz$  ravnini

Kada znamo pomake i rotacije na grednim osima, možemo izračunati pomak kroz čitavu gredu. Stoga, gredni element je 1-dimenzionalni element. Element na prijašnjoj slici je linearni gredni element sastavljen od dvije točke (node) spojenih zajedno pomoću segmenta.

Pretpostavka inercije

Pretpostavlja se da su glavne osi presjeka grede duž osi  $y$  i  $z$  što znači:

$$I_{yz} = 0 \quad (3)$$

### 3.5. Tenzor deformacije

Pomaci i rotacije su poznati u čvorovima. Kako bismo dobili pomak i rotaciju unutar grednog elementa (ali i dalje na neutralnoj osi) linearno interpoliramo kvantitete na nodama:

$$\begin{cases} u_j^0(x) = N^I(x)u_j^I \\ \theta_j(x_1) = N^I(x)\theta_j^I \end{cases}$$

Gdje  $N^I$  predstavlja funkcije oblika za taj element:

$$\begin{cases} N^1(x) = 1 - \frac{x}{L} \\ N^2(x) = \frac{x}{L} \end{cases}$$

Pomoću pretpostavke (1) možemo izračunati deformacije:



$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1,x}^0 + z\theta_{2,x} - y\theta_{3,x} \\ 0 \\ 0 \\ u_{2,x}^0 + z\theta_{1,x} - \theta_3 \\ 0 \\ u_{3,x}^0 + y\theta_{1,x} - \theta_2 \end{bmatrix}$$

S obzirom da tangencijalne deformacije nisu konstantne kroz cijeli poprečni presjek, Timoshenko-va teorija greda uvodi tangencijalne korekcijske faktore (ovisno o obliku poprečnog presjeka).

Kako bi se olakšale stvari definiramo sljedeće veličine:

- Zakrivljenost  $\kappa_1 = \theta_{2,x}$  i  $\kappa_2 = \theta_{3,x}$
- Tangencijalne deformacije  $\gamma_1 = u_{2,x} - \theta_3$  i  $\gamma_2 = u_{3,x} - \theta_2$
- Aksijalne deformacije  $\varepsilon_{ax} = u_{1,x}$
- Uvijanje  $\psi = \theta_{1,x}$

Potom možemo nanovo ispisati deformacije:

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{ax} + z\kappa_1 - y\kappa_2 \\ 0 \\ 0 \\ \kappa_2\gamma_1 - z\psi \\ 0 \\ \kappa_3\gamma_2 + y\psi \end{bmatrix} \quad (4)$$

Gdje zakrivljenosti, tangencijalne deformacije, aksijalne deformacije i uvijanje se dobiju pomoću funkcija oblika:

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= N^I_x \theta_2^I \\ \kappa_2 &= N^I_x \theta_3^I \\ \gamma_1 &= N^I_x u_2^I - N^I \theta_3^I \\ \gamma_2 &= N^I_x u_3^I - N^I \theta_2^I \\ \varepsilon_{ax} &= N^I_x u_1^I \\ \psi &= N^I_x \theta_1^I \end{aligned} \quad (5)$$

Kako bismo povezali naprezanja sa deformacijama moramo primijeniti Hooke-ov zakon o linearno elastičnim materijalima.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 + 2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 + 2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 + 2\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix}$$

Koristeći pretpostavku (1) na desnoj strani te koristeći rezultat koji se je dobio u (4) na lijevoj strani dobivamo odnos:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{ax} + z\kappa_1 - y\kappa_2 \\ 0 \\ 0 \\ \kappa_2\gamma_1 - z\psi \\ 0 \\ \kappa_3\gamma_2 + y\psi \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ -\nu\sigma_{11} \\ -\nu\sigma_{11} \\ (2 + 2\nu)\sigma_{12} \\ 0 \\ (2 + 2\nu)\sigma_{13} \end{bmatrix}$$

Kada se rade kinematičke pretpostavke zanimaju nas makroskopsko ponašanje grede. Pretpostavke naprezanja su više vezane uz mikroskopsko ponašanje. Ispada da ako je  $\varepsilon_{22}$  i  $\varepsilon_{33}$  nisu 0 (mikroskopsko mjerilo) njihov utjecaj na pomak (makroskopsko mjerilo) je zanemariv u odnosu na utjecaj  $\varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{12}$ ,  $\varepsilon_{13}$ .

Može se pojednostaviti taj odnos:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{ax} + z\kappa_1 - y\kappa_2 \\ 0 \\ 0 \\ \kappa_2\gamma_1 - z\psi \\ 0 \\ \kappa_3\gamma_2 + y\psi \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ 0 \\ 0 \\ (2 + 2\nu)\sigma_{12} \\ 0 \\ (2 + 2\nu)\sigma_{13} \end{bmatrix}$$

Te se može napraviti inverzija i dobiti naprezanja iz pomaka:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & 0 & 0 \\ 0 & \frac{E}{2(1+\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{ax} + z\kappa_1 - y\kappa_2 \\ \kappa_2 y_1 - z\psi \\ \kappa_3 y_2 + y\psi \end{bmatrix}$$

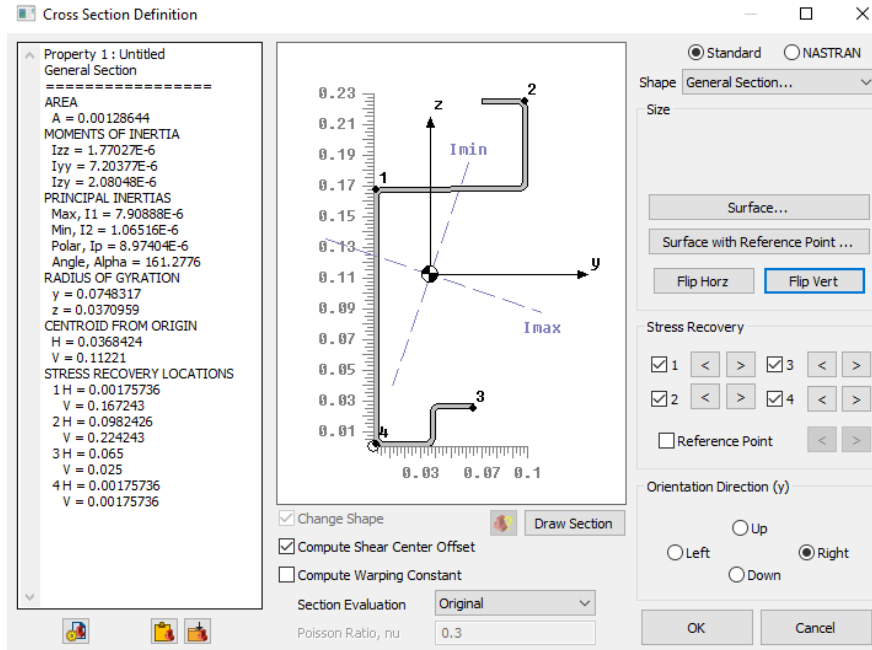
## 4. NUMERIČKA ANALIZA UREDSKOG KONTEJNERA

Materijal koji će se koristiti u simulaciji je čelik S235. Svojstva materijala će se odrediti prema stranici eurocodeapplied.com [2].

- *Gustoća* :  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
- *Modul elastičnosti*:  $E = 210 \text{ GPa}$
- *Poissonov omjer*:  $\nu = 0.3$

Gustoća je potrebna za definiranje težine profila za simuliranje utjecaja gravitacije na sam kontejner. Modul elastičnosti i poissonov omjer je potreban za definiranje čvrstoće materijala i način deformiranja. Taj materijal će biti zadan za sve profile korištene u simulaciji.

Za simulaciju je potrebno pripremiti potrebne profile jer profili korišteni u kontejneru nisu klasični industrijski profili već su savijeni po mjeri i svrsi. Kako bismo mogli postaviti potrebne profile i njihove karakteristike u simulaciji treba nacrtati zadane profile te ih uvesti u program kao svojstva grednih elemenata. Profili su se nacrtali u programu AutoCAD te su izvezeni u .dxf obliku kako bi se mogli uvesti u Femap. Kad su profili uvezeni u Femap od pomoći linija se napravi „boundary surface“ odnosno površinu određenu granicama. Tu površinu koristimo za definiranje poprečnog presjeka profila u „general section“ izborniku oblika svojstva.



Slika 4.1. Zadavanje svojstva krovnog nosača od 3 milimetra

#### 4.1. Postavke numeričke analize

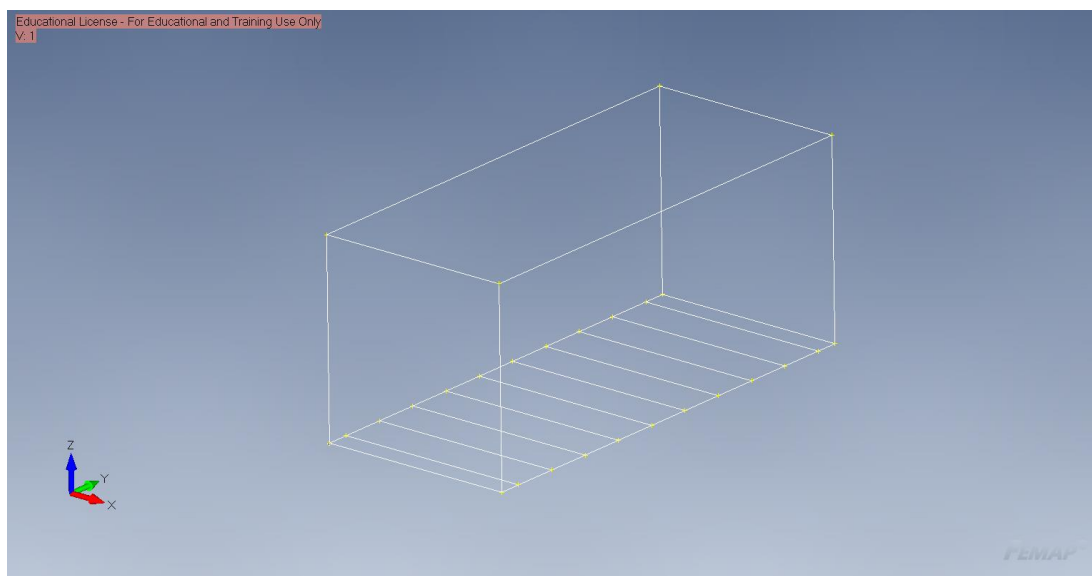
Gabaritne mjere kontejner su:

- Širina: 7 m
- Dubina: 3 m
- Visina: 3.2 m

Podna ojačanja su postavljena u razmaku od 70 cm s tim da su sa svake strane od podnog okvira udaljeni 35 cm. Prema tim mjerama su napravljene točke u Femap-u. Te točke su potom spojene linijskim elementima kojima se mogu dati svojstva zadanih profila.

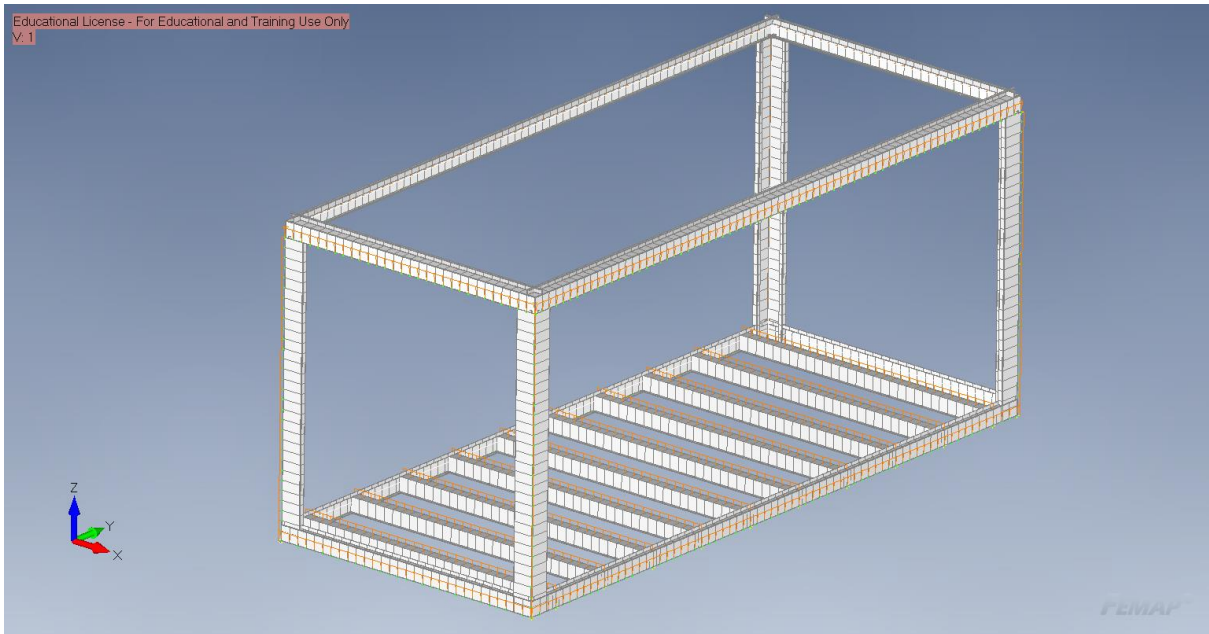


*Slika 4.2. Točke modela kontejnera*



*Slika 4.3. Linijski elementi kontejnera*

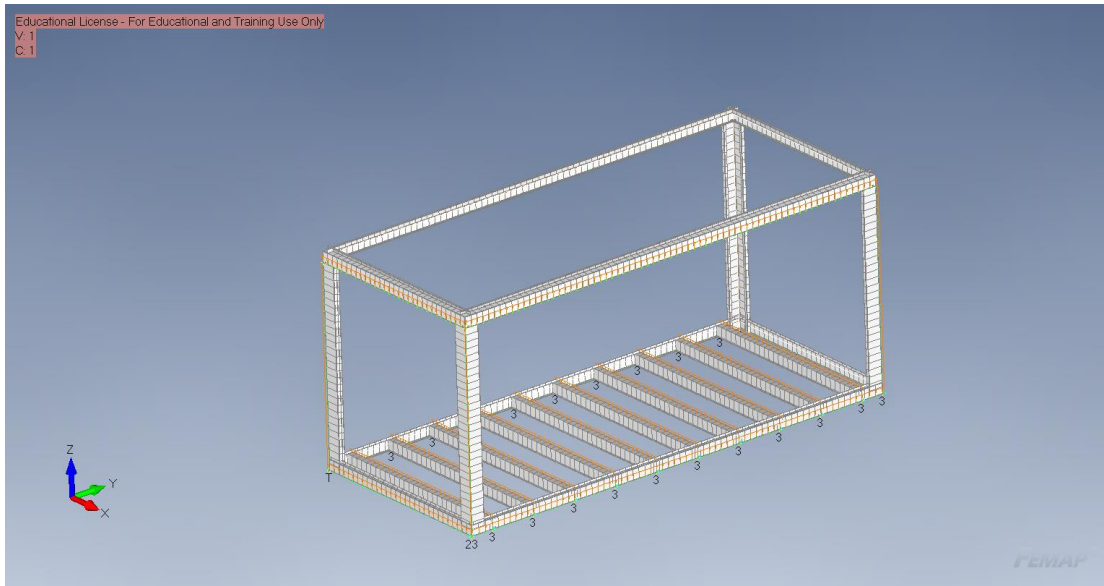
Na linijskim elementima se je odredila veličina elementa od 0.1 m te je njima umrežen cijeli kontejner. Potom se zadaju svojstva umreženim linijski elementima tako da se orijentacije momenata inercije poklapaju s orijentacijom koji profili imaju u stvarnom svijetu. Pomoću opcije cross section mogu se vidjeti orijentacije profila te se tako može provjeriti da li su postavke svojstava ispravne.



*Slika 4.4. Umrežen model sa definiranim svojstvima profila*

#### 4.1.1. Ograničenja analize

Za ograničenje modela koristi se metoda 3-2-1. Donji lijevi kut kontejnera ima spriječen pomak po sve tri osi, kut uz njega ima spriječen pomak po Y i Z osi a treći kut na drugo strani kontejnera ima spriječen pomak po Z osi. Uz ta ograničenja dodana su ograničenja po dnu kontejnera kako bi si simuliralo ležanje kontejnera na betonskoj podlozi.

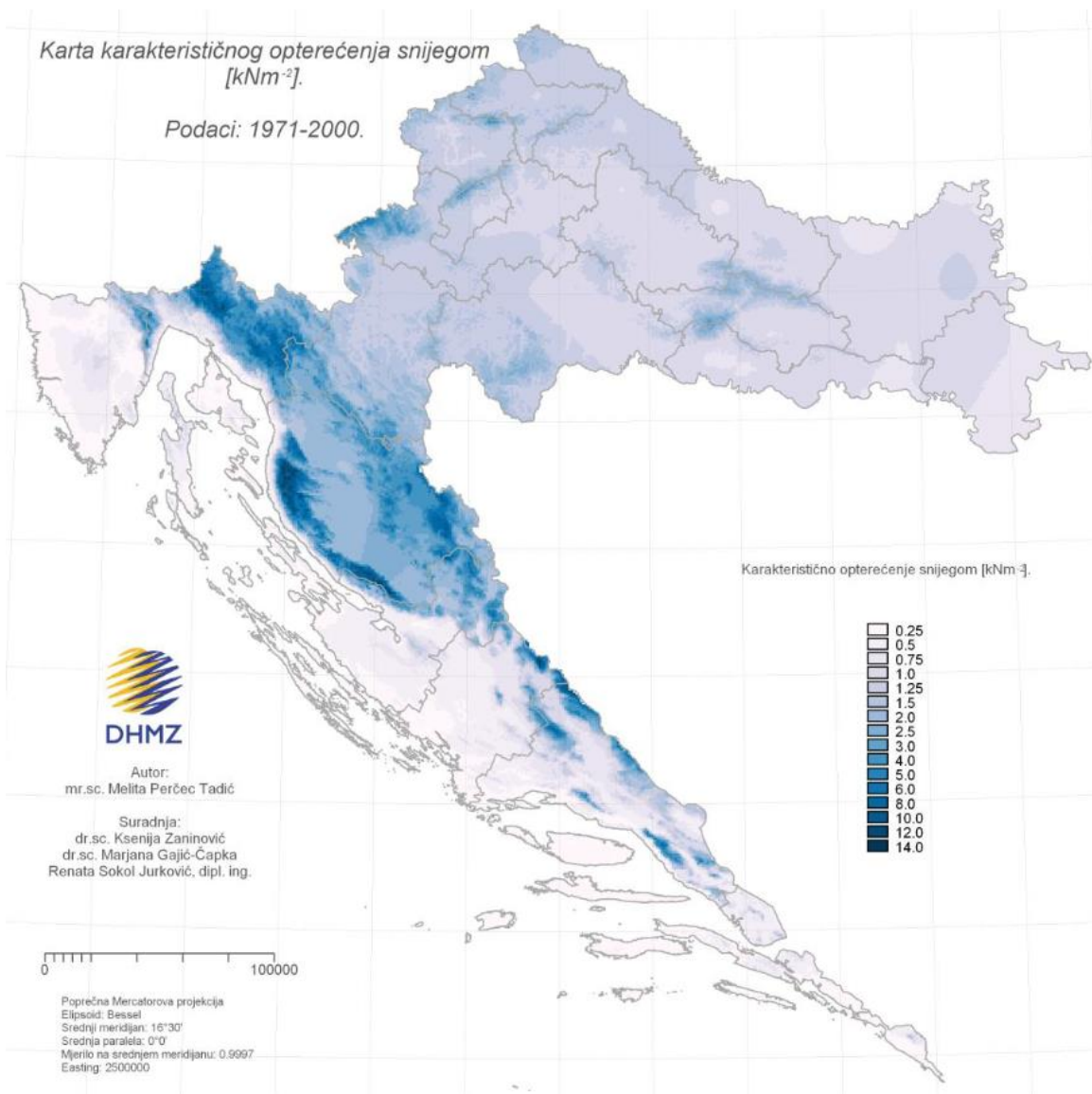


*Slika 4.5. Ograničenja modela kontejnera*

#### 4.1.2. Opterećenja analize

Opterećenje je određeno jer kontejner takvih dimenzija u prosjeku ima masu od 2200 kg. Uz to se unutar kontejnera mogu nalaziti oprema i ljudi do ukupne težine 1000 kg. S obzirom da se na kontejner tovari još dva kontejnera, ukupna težina punih kontejnera iznosi 6400 kg. Uz to se mora uračunati opterećenje padalina, snijega.





Slika 4.6. Karakteristično opterećenje snijegom

Opterećenje snijega na krovu računa se pomoću izraza:  $S = s_k \mu_i C_0 C_1$

Gdje je  $S$  ukupno opterećenje snijegom,  $s_k$  je karakteristično opterećenje snijega na pod (s obzirom na podneblje),  $\mu_i$  koeficijent oblika objekta (u slučaju kontejnera je 0.8) dok su  $C_0$  i  $C_1$  koeficijenti izloženosti i temperaturni koeficijenti zagrijavanja objekta koji će se za slučaj kontejnera uzeti da iznose 1, odnosno da neće utjecati na proračun.

Za područje Istre karakteristično opterećenje snijega iznosi 1.0 kN/m<sup>2</sup> što se može očitati sa slike karakterističnog opterećenja snijegom.

Za dane vrijednosti dobiva se opterećenje snijegom:

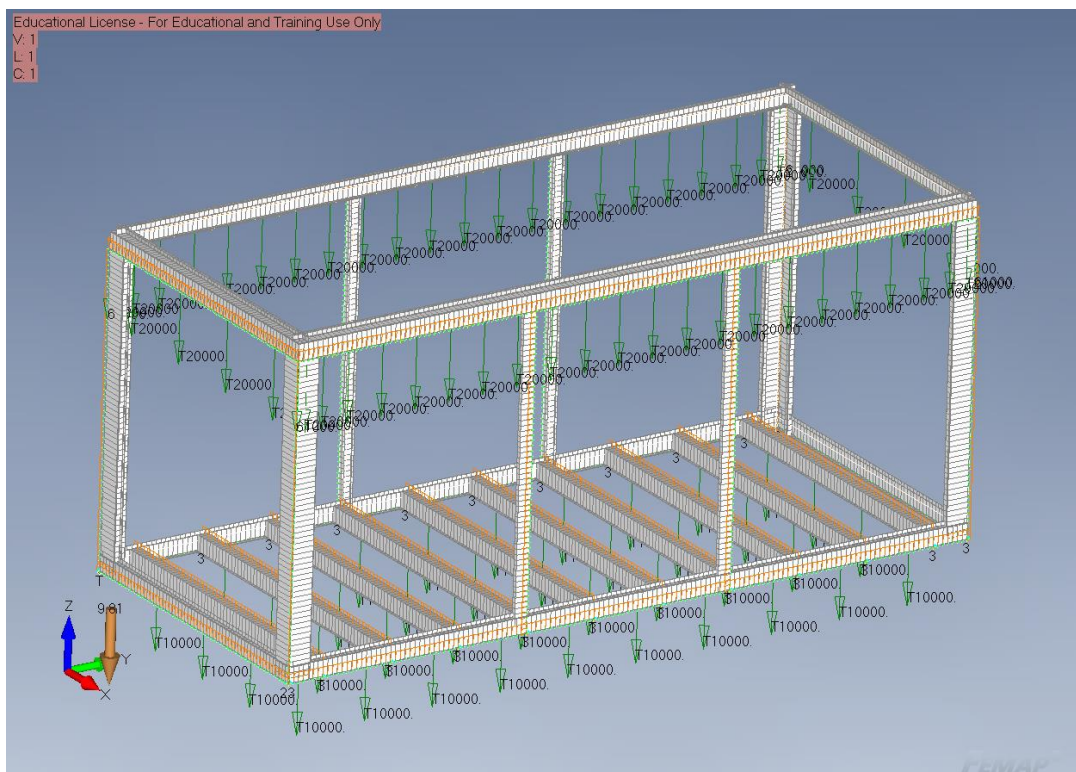
$$S = 1000 \cdot 0.8 \cdot 1 \cdot 1$$

$$S = 800 \text{ N/m}^2$$

A s obzirom da su mjere gabaritne krova kontejnera 3x7m površina krova iznosi 21 m<sup>2</sup>. To donosi ukupno opterećenje snijega na 16 800 N.

Kada se zbroji opterećenja, ukupno opterećenje iznosi 81 000 N.

Opterećenje kontejnera je izvedeno na način da se na krovne profile zada kontinuirano opterećenje od 20 000 N te da se na vertikalne profile zada opterećenje od 15 250 N na svaku vertikalnu, odnosno 61 000 N sveukupno jer je zbog geometrije kontejnera većina opterećenja na kutnim vertikalama, ostatak naprezanja dolazi od deformacije dna kontejnera koji se stavlja na najdonji kontejner.

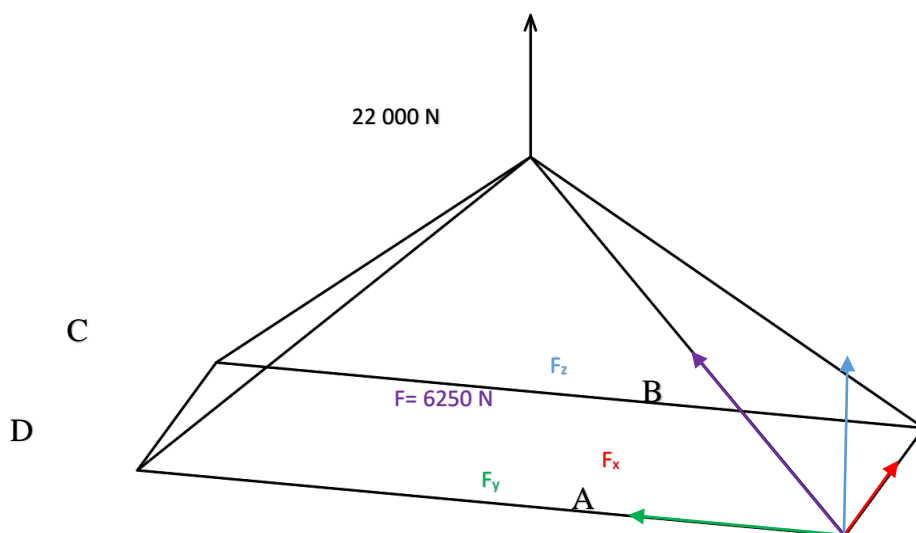


*Slika 4.7. Opterećenje kontejnera*

### 4.1.3. Opterećenje dizanja kontejnera

Dodano je kontinuirano opterećenje na podne profile težine 10 000 N da simulira prije spomenutu težinu ljudi i objekata unutar kontejnera. Na kraju je definirano opterećenje vlastitom težinom profila definiranjem ubrzanja gravitacije.

Nakon analize slaganja kontejnera jedan na drugog, provest će se analiza dizanja kontejnera dizalicom. U tom slučaju zadat će se sile u kutovima krovnog dijela kontejnera. Svaki kut će nositi jednu četvrtinu težine (22 000 N) kontejnera podijeljenu na svoje vektorske komponente. Točka hvatišta za dizanje kontejnera se uzima kao točka 3 m iznad sredine krova.



Slika 4.8. Opterećenje jednog kuta krovne konstrukcije prilikom dizanja kontejnera

Komponente sile u kutovima:

**Kut A (0, 0, 3):**

- $F_x = 1933.91 \text{ N}$
- $F_y = 4512.47 \text{ N}$
- $F_z = 3867.83 \text{ N}$

**Kut B (3, 0, 3):**

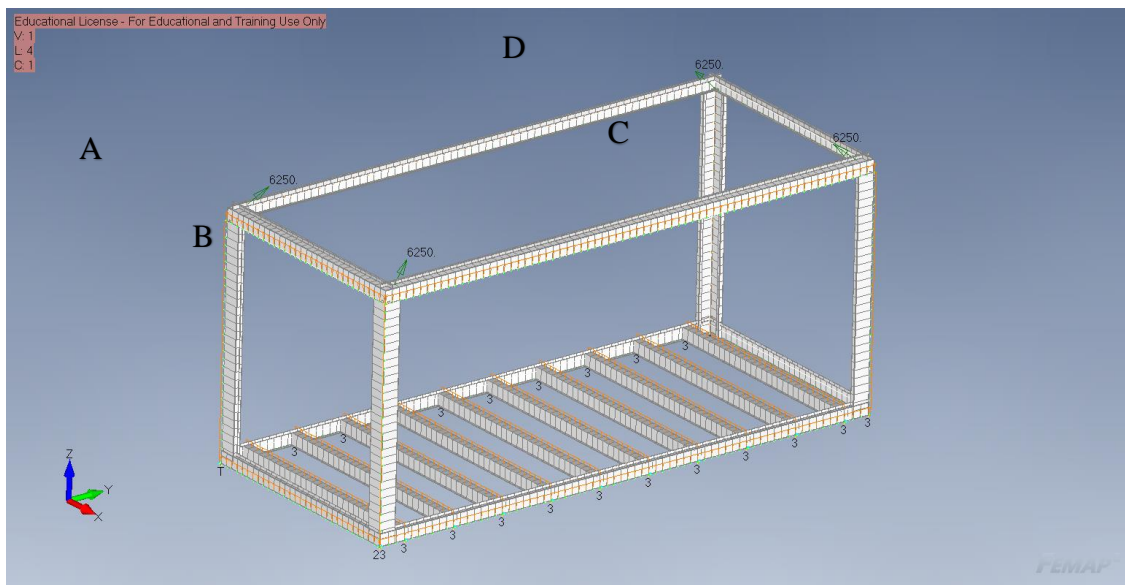
- $F_x = -1933.91 \text{ N}$
- $F_y = 4512.47 \text{ N}$
- $F_z = 3867.83 \text{ N}$

**Kut C (3, 7, 3):**

- $F_x = -1933.91 \text{ N}$
- $F_y = -4512.47 \text{ N}$
- $F_z = 3867.83 \text{ N}$

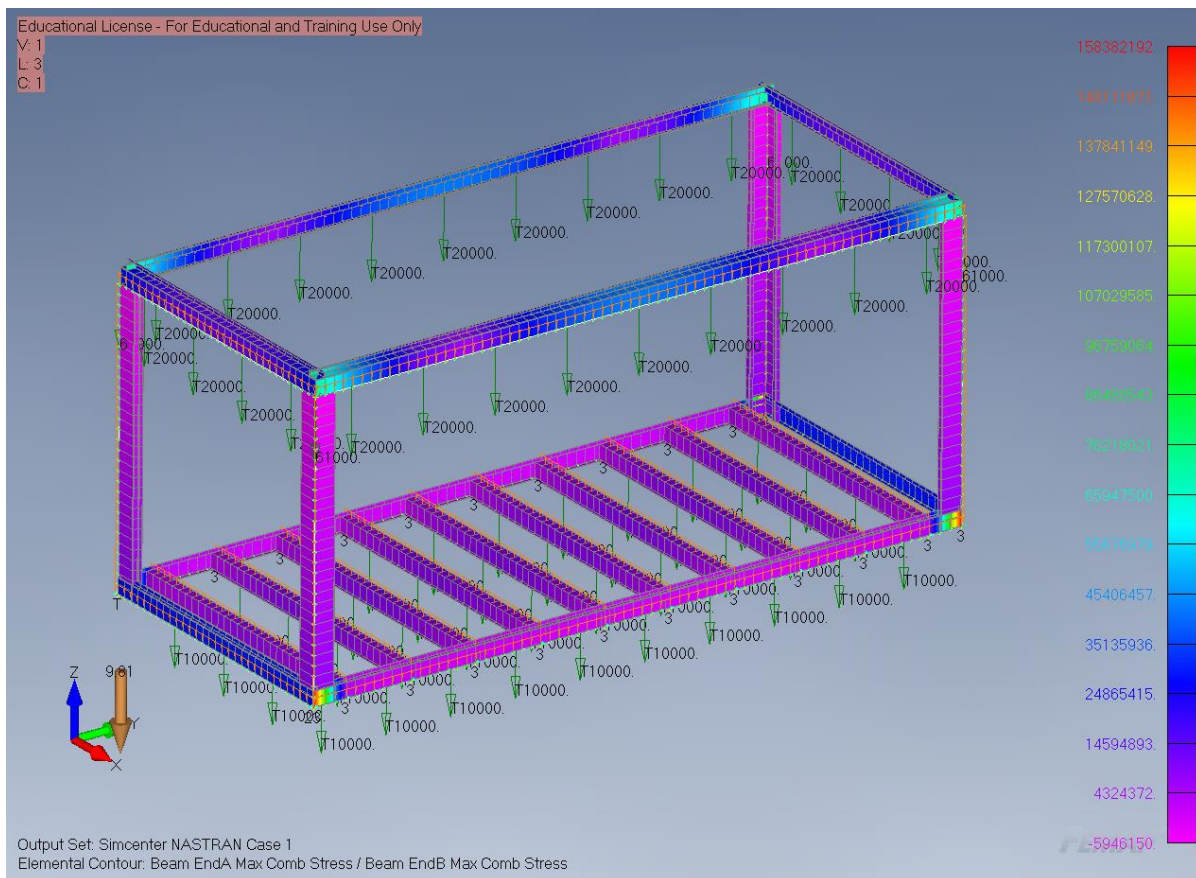
**Kut D (0, 7, 3):**

- $F_x = 1933.91 \text{ N}$
- $F_y = -4512.47 \text{ N}$
- $F_z = 3867.83 \text{ N}$



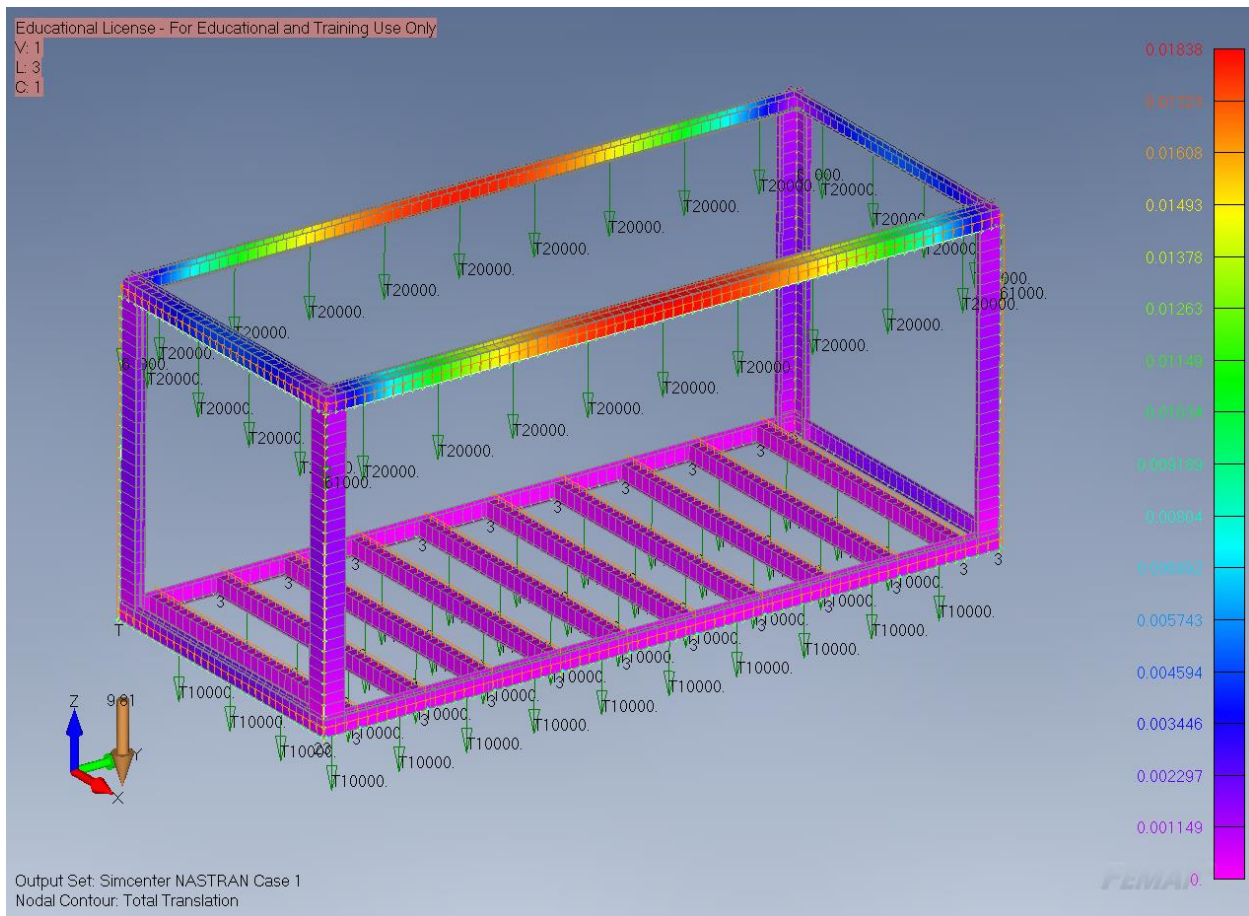
*Slika 4.9. Opterećenje dizanja sa označenim kutovima*

## 5. REZULTATI PRELIMINARNE NUMERIČKE ANALIZE



Slika 5.1. Rezultati numeričke analize, maksimalna kombinirana naprezanja

Maksimalno kombinirano naprezanje u čitavoj konstrukciji iznosi 158 MPa. To je značajno ispod maksimalnog dopuštenog naprezanja od 235 MPa za odabranu vrstu čelika. U većini konstrukcije maksimalno naprezanje ne prelazi 50 MPa što znači da ima dosta prostora za optimizaciju debljine profila.



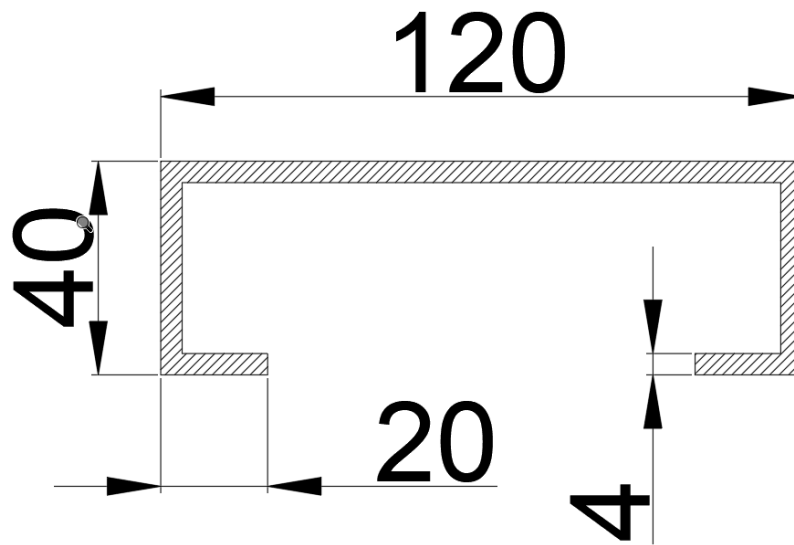
*Slika 5.2. Rezultati numeričke analize, ukupni pomak*

Maksimalni ukupni pomak je očekivano na krovnim nosačima. On iznosi 18,4 mm dok je u ostatku konstrukcije maksimalni pomak manji od 2 mm.

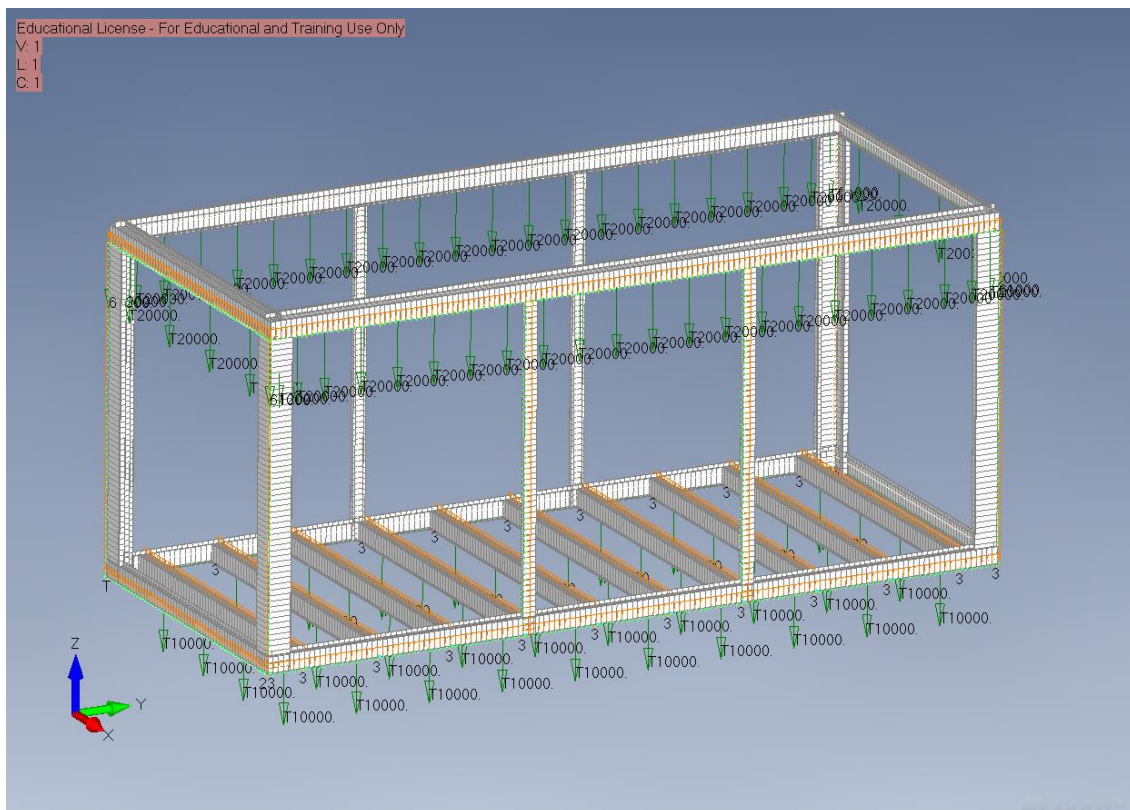
Što se tiče napreznja, čitava konstrukcija je unutar zadovoljavajućih vrijednosti dok su pomaci krovnih nosača preveliki. Stoga će se na duže stranice kontejnera dodati dva vertikalna ojačanja. Dodat će se na poziciju tako da se duljina podijeli na približno trećine. Opterećenja i ograničenja su ista kao u prvoj simulaciji.

### 5.1. Dodavanje vertikalnih ojačanja

Vertikalna ojačanja su takvog oblika da se na njih mogu vijcima učvrstiti paneli te su također otvorenog presjeka što olakšava proizvodnju i zaštitu od korozije.

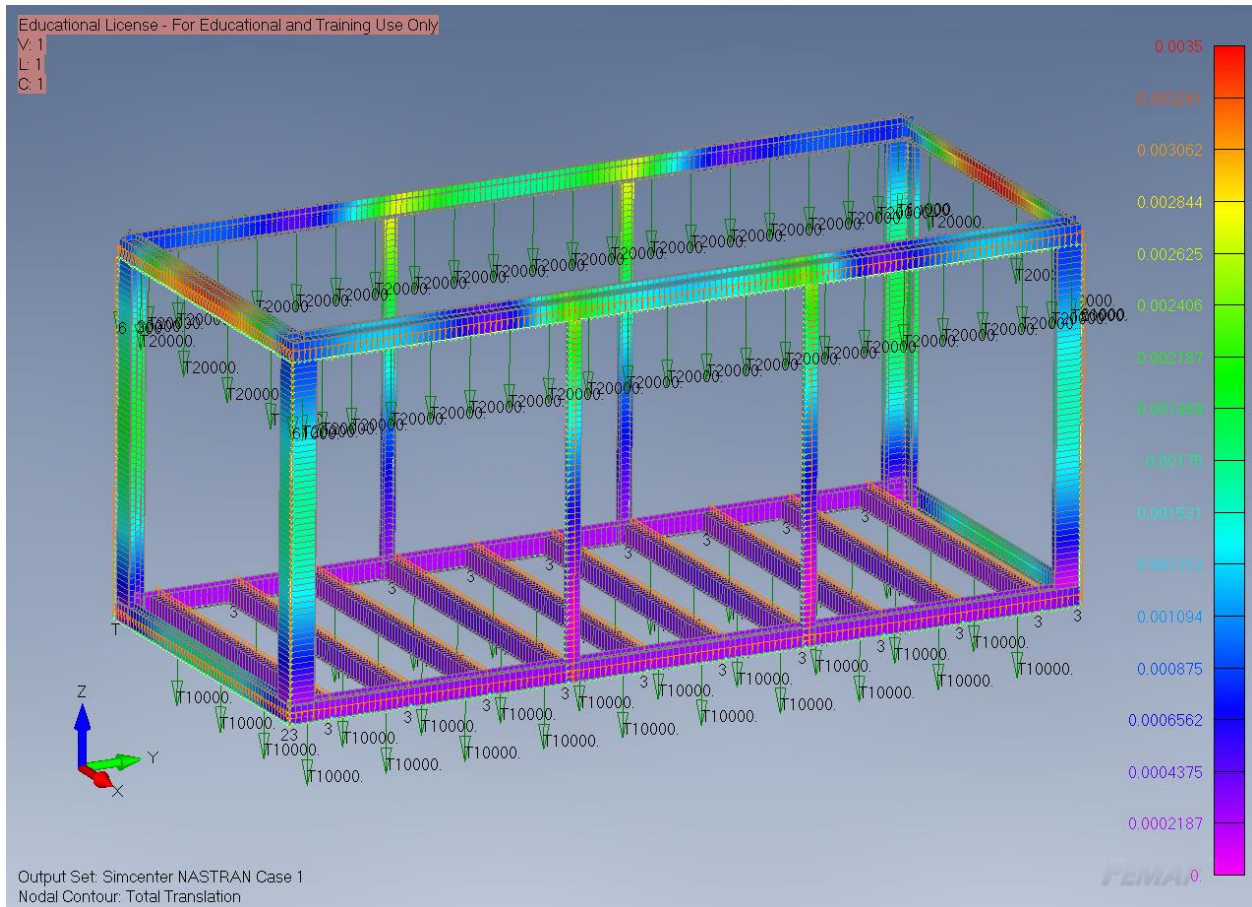


*Slika 5.3. Dimenzije i oblik vertikalnih ojačanja*



*Slika 5.4. Geometrija kontejnera sa novim ojačanjima*

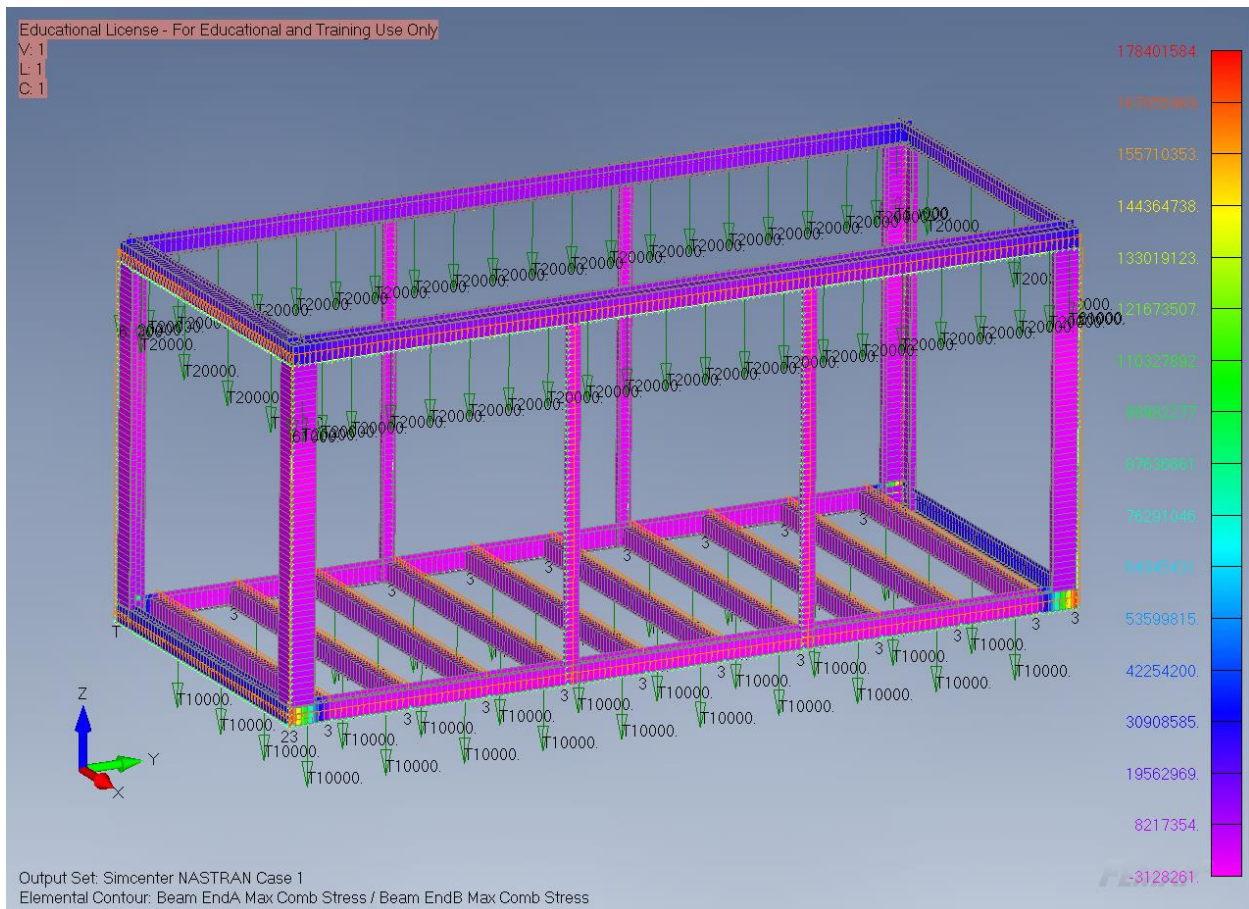
## 5.2. Rezultati analize sa dodatnim vertikalnim ojačanjima



*Slika 5.5. Pomaci konstrukcije sa dodanim vertikalnim ojačanjima*

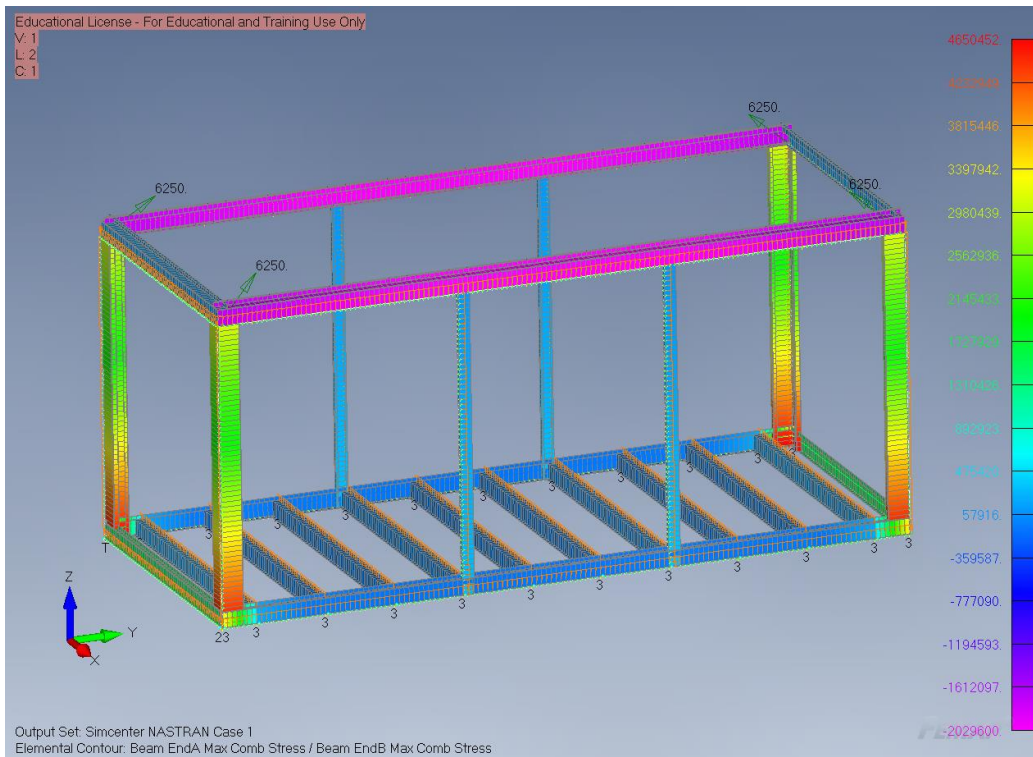
Nakon dodanih ojačanja maksimalni progib iznosi 3,5 mm. Za dobiti maksimalni dopušteni progib koristit će se izraz koji govori da maksimalni progib mora biti manji od  $L/270$  što bi u slučaju krovnih nosača gdje se nalaze maksimalni pomaci iznosilo 11 mm.



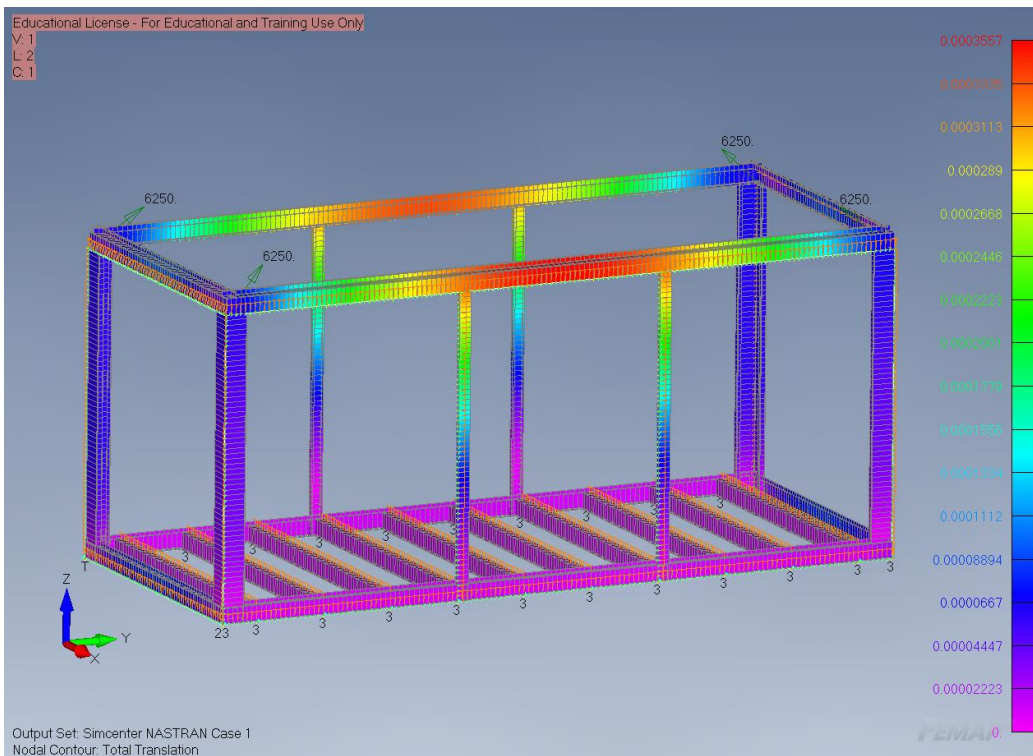


Slika 5.6. Maksimalna kombinirana naprezanja sa dodanim ojačanjima

Maksimalna naprezanja su pala na 178 MPa. To znači da originalna konstrukcija sa dodanim vertikalnim ojačanjima zadovoljava kriterije naprezanja i pomaka.



*Slika 5.7. Maksimalna kombinirana naprezanja prilikom dizanja kontejnera*



*Slika 5.8. Ukupni pomaci prilikom dizanja kontejnera*

Dizanje kontejnera ne rezultira nikakvim kritičnim napreznjima ili pomacima. Napreznja ne prelaze 4,9 MPa a pomaci ne prelaze 0,4 mm.

Kada se ima početni dizajn koji zadovoljava sve postavljene uvijete može početi postupak optimizacije.

## 6. UVOD U OPTIMIZACIJU

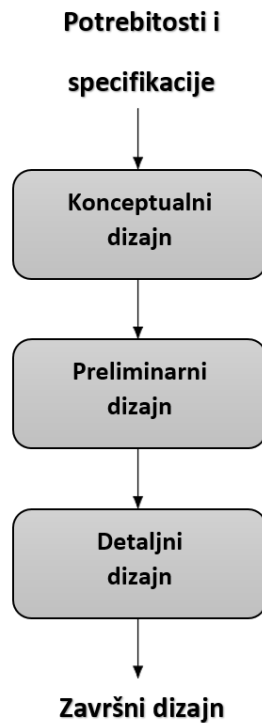
Optimizacija je naziv za proces kojim se određeni sustav može učiniti učinkovitijim ili funkcionalnijim za dane uvijete. Zanimljivost optimizacije leži u njezinoj primjeni u gotovo svim domenama. Bilo koji problem gdje treba donijeti odluku se može postaviti kao optimizacijski problem.

Iako se neki optimizacijski problemi mogu riješiti analitički, većina praktičnih problema su prekompleksni za takvo rješavanje. Razvoj numeričkih računala zajedno sa razvijanjem optimizacijskih algoritama nam je omogućilo rješavanje problema visokih kompleksnosti.

Optimizacijski problemi se pojavljuju u raznim područjima poput ekonomije, menadžmentu, proizvodnji, biologiji, fizici i strojarstvu.

### 6.1. Proces optimizacije dizajna

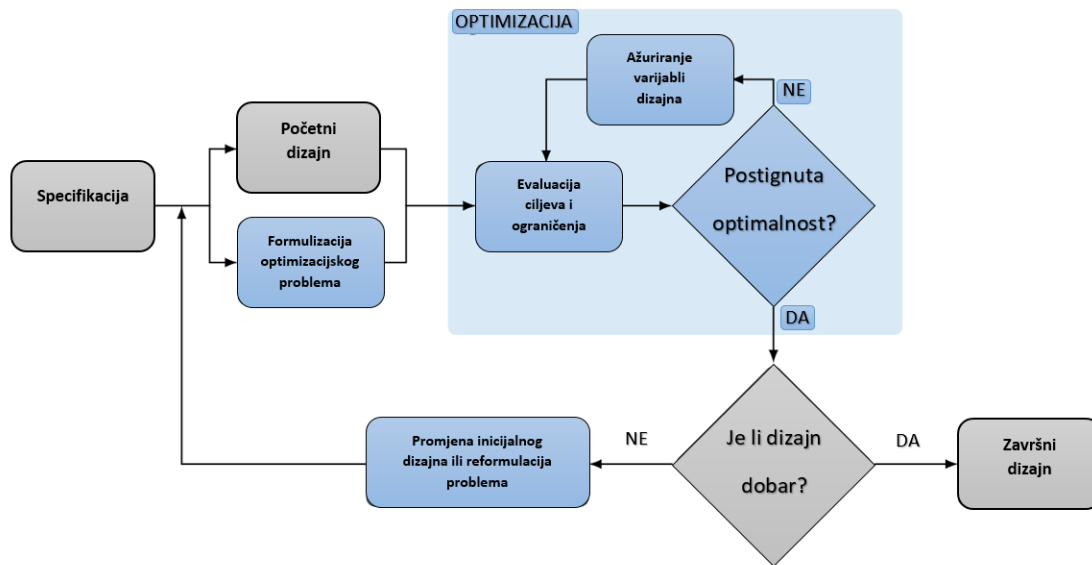
Inženjerski dizajn je iterativni proces koji inženjeri prate kako bi razvili proizvod koji ispunjava željene ciljeve. Bilo koji proizvod veće kompleksnosti taj proces zahtjeva tim inženjera i više iterativnih petlji za rješavanje svih problema. Proces dizajniranja se može podijeliti u slijed faza pokazanih na slici 6.1.



*Slika 6.1. Proces dizajniranja*

Prije nego počne proces dizajniranja, moraju se odrediti potrebitosti i specifikacije. To može uključivati istraživanje tržišta, analiza trenutno dostupnih rješenja, itd. Konceptualna faza dizajniranja je kratka te se najčešće oslanja na pojednostavljene modele i ljudsku intuiciju. U detaljnijoj razradi dizajna kompletiraju se svi problemi sustava do zadnjeg detalja kako bi se taj dizajn mogao proizvesti. Sve te faze sadrže iteracije unutar sebe. Kada god se naiđe na veliki problem možda je potrebno vratiti se na početak i promijeniti inicijalni dizajn.

Optimizacija dizajna je alat koji može zamijeniti iterativni proces kako bi se ubrzao ciklus dizajniranja i dobio bolji rezultat. Kako bi se bolje razumjela uloga optimizacije dizajna pokazan je konvencionalni inženjerski proces dizajniranja sa jednom iterativnom petljom na slici 6.2.

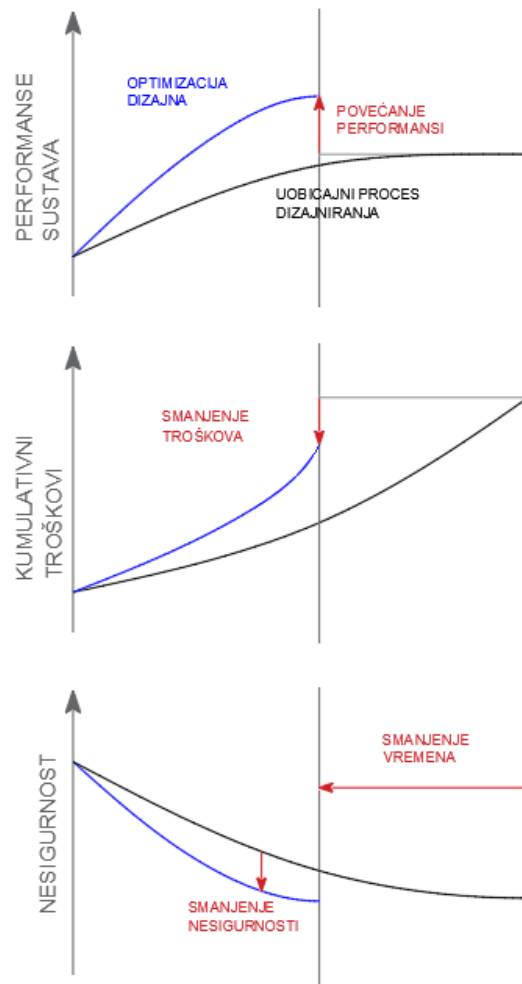


Slika 6.2. Konvencionalni proces dizajniranja sa jednom iterativnom petljom

Određivanje specifikacija i početnog dizajna nisu različite od konvencionalnog dizajna ali optimizacija dizajna zahtijeva formulaciju optimizacijskog problema koji uključuje varijable dizajna koje se trebaju mijenjati kako bi se cilj minimizirao a ograničenja zadovoljila. Evaluacija dizajna je strogo bazirana na numeričkim vrijednostima cilja i ograničenja. Promjene dizajna radi automatski optimizacijski algoritam te nije potrebna ljudska pomoć.

Ovaj automatizirani proces ne pruža gotova rješenja pritiskom gumba već je potrebno znanje inženjera, često i više nego u tradicionalnom procesu dizajniranja. Ljudske odluke su i dalje potrebne u dizajniranju optimizacijskog procesa. Prije pokretanja optimizacije, uz definiranje specifikacija i početnog dizajna, inženjeri moraju formulirati problem dizajna. To zahtjeva poznavanje u području proizvoda i u području numeričke optimizacije. Inženjer mora odrediti što je cilj, koji parametri se mogu mijenjati te koja ograničenja se moraju poštovati. Te odluke imaju veliki utjecaj na dobiveno rješenje tako je presudno da se kvalitetno odredi optimizacijski problem.

Nakon izvršenja optimizacije, inženjeri moraju procijeniti dizajn jer je malo vjerojatno da je prvo rješenje dati validno i praktično rješenje. Kada se napravi procjena optimalnog rješenja, inženjeri mogu odlučiti reformulirati optimizacijski problem promjenom funkcije cilja, dodavanjem ili oduzimanjem ograničenja te mijenjanjem varijabli u vektoru dizajna.

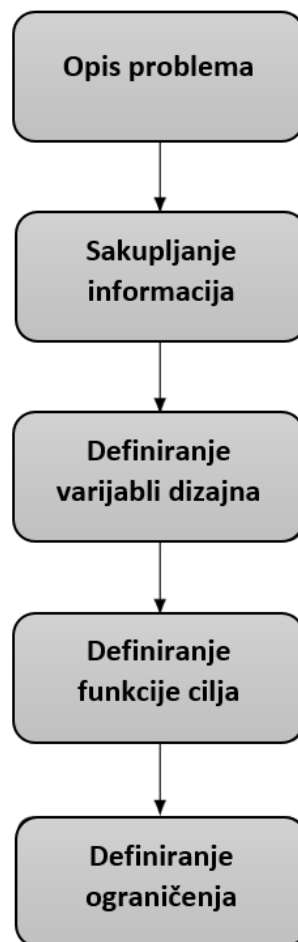


*Slika 6.3. Poboljšanja koje pruža optimizacija dizajna*

Optimizacija dizajna može biti korištena u bilo kojoj fazi dizajniranja pokazanih na slici 6.1, gdje svaka faza može sadržavati pokretanje jedne ili više optimizacija dizajna. Prednosti optimizacije dizajna su vidljive na slici 6.4 koja prikazuje promjenu općih vrijednosti performansi sustava, kumulativnih troškova te nesigurnosti po funkciji vremena dizajniranja. Kada koristimo optimizaciju, performanse sustava se povećaju puno više nego kod konvencionalnog dizajniranja, postiže se bolje dobiveno rješenje u manjem vremenskom periodu. Rezultat sveg navedenog je manji trošak. Uz to nesigurnost sustava je značajno manja kod optimizacije.

## 6.2. Formulacija optimizacijskog problema

Proces optimizacije dizajna zahtjeva inženjera da *prevede* svoju namjeru u matematičke izraze koje kasnije može riješiti optimizacijski algoritam. Bitno je kvalitetno definirati matematičke izraze jer optimizacijski algoritam zna izrabljivati slabosti loše definiranih sustava. Neadekvatno definiran model može napraviti da optimizacijski algoritam ne može funkcionirati ili da konvergira u matematički optimum koji je nepoželjan ili nerealističan iz inženjerskog gledišta. Kako bi se formulirao optimizacijski problem, prati se proces na slici 6.4.



Slika 6.4. Koraci za formulaciju optimizacijskog problema



Prvi korak je napraviti opis problema, uključujući opis sustava, opis ciljeva i zahtjeva. Sljedeći korak je sakupiti što je više informacija moguće.

Neke informacije su već specificirane u opisu problema ali daljnje prikupljanje informacija je poželjno kako bi se moglo bolje pretpostaviti željeno rješenje te identificirati eventualne probleme u rješenjima.

U tom koraku je potrebno da se definira analitički proces. Analiza može biti bazirana na jednostavnom modelu ili na skupu kompleksnih alata. Moraju se naći svi mogući ulazi i izlazi analize te se moraju razumjeti ograničenja. Treba uzeti u obzir i vrijeme analize jer optimizacije zahtjeva ponavljanje analize.

### 6.3. Varijable dizajna

Sljedeći korak je identificirati varijable koje opisuju sustav, tako zvane Varijable dizajna. Njih predstavlja stupčasti vektor:

$$\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix}$$

Ovaj vektor definira jedan dizajn što znači da različiti vektori  $X$  odgovaraju različitim dizajnima. Broj varijabla  $x_n$  određuje dimenzionalnost problema.

Varijable dizajna ne smiju biti ovisne jedna o drugoj niti bilo koji drugi parametar jer optimizacijski algoritam mora moći slobodno birati elemente  $X$  neovisno. To znači da u analizi danog dizajna, varijable moraju biti ulazni parametri koji ostaju nepromjenjivi kroz proces analize. Potencijalna pogreška koja se može napraviti u ovom koraku je da se definira varijabla koja je u linearnoj vezi s drugom varijablom što rezultira modelom koji može dati beskonačni broj kombinacija varijabli dizajna koji predstavljaju isti dizajn.

Izbor varijabli najčešće nije jedinstven. Kvadratni poprečni presjek se može parametrizirati pomoću duljine stranica ili pomoću njegove površine tako da se mogu koristiti različite mjerne jedinice. Izbor varijabli može utjecati na funkcionalnost cilja i ograničenja. Npr. Neki nelinearni odnosi se mogu pretvoriti u linearne pomoću promjene varijabli. Također je moguće uvesti ili eliminirati diskontinuitete kroz odabir varijabli.

Prilikom definiranja vrijednosti varijabli dopuštenog dizajna treba odrediti jesu li varijable kontinuirane ili diskretne. Kontinuirane varijable dizajna su realni brojevi koji mogu varirati kontinuirano unutar određenog raspona što se zapisuje:

$$\underline{x}_i \leq x_i \leq \overline{x}_i, \quad i = 1, \dots, n_x$$

Gdje su  $\underline{x}_i$  i  $\overline{x}_i$  donja i gornja granica varijable dizajna. To je ograničena varijabla. Varijable također mogu biti ograničene samo s jedne strane ili bez ograničenja. Kada su sve varijable kontinuirane onda se i optimizacijski problem može opisati kao kontinuirani. Kada jedna ili više varijabli imaju diskretne vrijednosti onda govorimo o diskretnoj optimizaciji. Primjer tog bi bio diskretne varijable dizajna u strukturalnom dimenzioniranju gdje su dostupne varijable određenih poprečnih presjeka i debljina nosača.

Razlikujemo granice varijabli dizajna i ograničenja jer optimizacijski algoritam ima izravnu kontrolu nad vrijednostima varijabli za vrijeme rješavanja optimizacijskog problema. Kada se definiraju te granice treba se paziti da se ne prostor optimizacije ne ograničava nepotrebno što bi spriječilo algoritam da postigne najoptimalniji dizajn. Manji dopušteni raspon rješenja čini optimizaciju lakšom ali granice varijabli trebaju biti bazirane na stvarnim fizičkim ograničenjima umjesto da se umjetno smanjuje prostor optimizacije. Primjer fizičkog ograničenja je donja granica za debljinu konstrukcijskog čelika u problemu minimizacije težine. U protivnom će algoritam optimizacije otkriti da negativna debljina rezultira sa smanjenjem težine.

U prvim koracima treba navesti što je moguće više nezavisnih varijabli. Doduše je primjereno početi sa malim skupom varijabli pri prvom rješavanju te kasnije proširivati set varijabli dizajna.

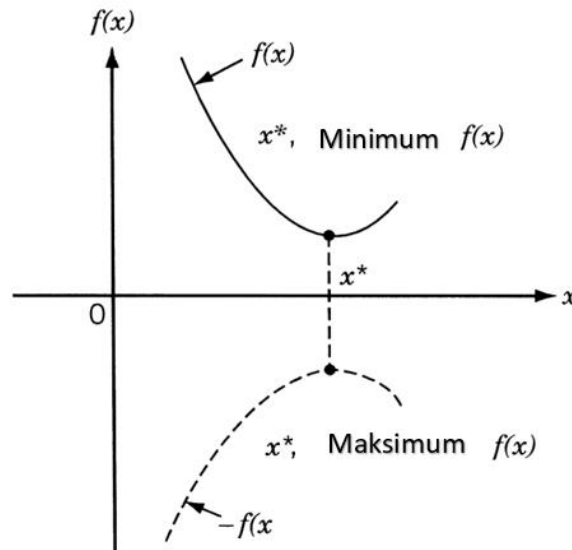
Neki optimizacijski algoritmi zahtijevaju da korisnik zada početne vrijednosti vektora dizajna. Početni dizajn se najčešće bazira na najboljoj pretpostavki korisnika.

## 6.4. Funkcija cilja

Za pronalazak najboljeg dizajna potrebna je funkcija cilja što je vrijednost koja određuje je li jedan dizajn bolji od drugog. Ta funkcija mora biti skalar koji se može izračunati da dani vektor dizajna  $X$ . Funkcija cilja se može minimizirati ili maksimizirati ovisno o problemu. Problem minimizacije može biti problem težine konstrukcije dok problem maksimizacije može biti problem dometa automobila.

Konvencionalno se problemi zadaju kao minimizacija ali svaka maksimizacija funkcije  $f$  se može zadati kao minimizacijski problem gdje se nalazi minimum negative funkcije  $f$ :

$$\max|f(x)| = -\min|-f(x)|$$



Slika 6.5. Minimum  $f(x)$  jednak je maksimumu  $-f(x)$

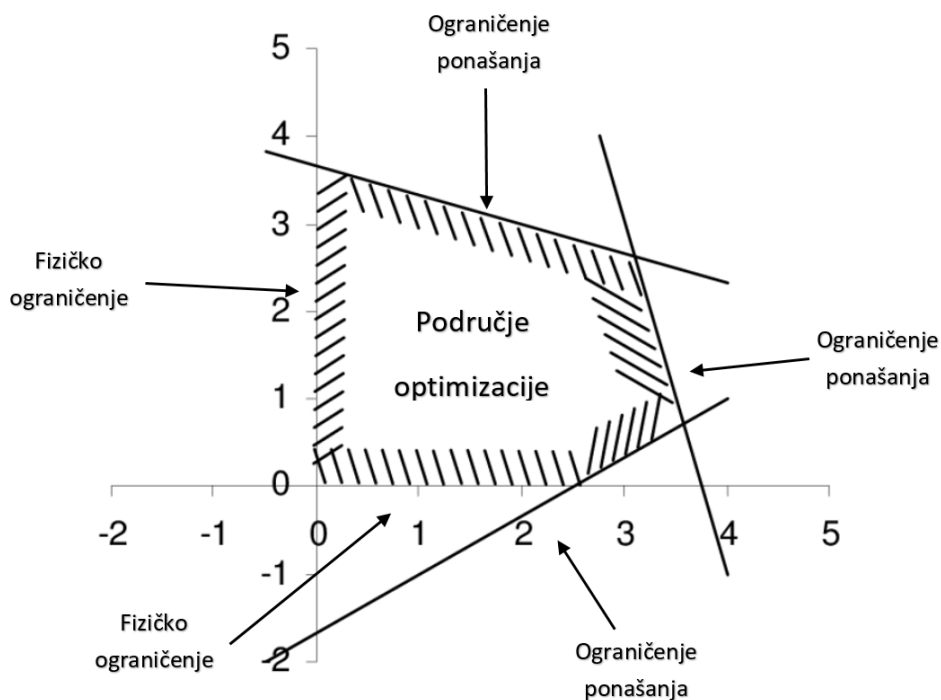
Izbor funkcije cilja je presudan za uspješnu optimizaciju cilja. Ako funkcija cilja ne predstavlja pravu namjeru inženjera, nije bitno koliko je točno računano rješenje funkcije i varijable vektora dizajna, matematički optimum neće zadovoljavati s inženjerskog gledišta.

Odabir funkcije cilja nije uvijek očit. Na primjer minimizacija mase automobila zvuči kao dobra ideja ali to može rezultirati visokim troškovima proizvodnje. U tom slučaju troškovi proizvodnje bi bili bolji cilj. Ta dva cilja se ne mogu oba ispuniti simultano tako da se mora napraviti kompromis između njih. Što je bolje od ta dva cilja uvelike je određeno željama kupaca.

Takvi problemi rezultiraju višeciljnim (*multiobjective*) optimizacijama, optimizacija više ciljeva. Takva optimizacija ne daje jedan dizajn već više njih, svaki sa svojim prednostima i manama. Kako bi se takvi problemi lakše riješili mogu se dati težinski faktori na svaki cilj te tako algoritam optimizacije može lakše konvergirati u jedno rješenje s obzirom na prioritetniji cilj.

## 6.5. Ograničenja

Većina praktičnih optimizacija dizajna zahtjeva primjenjivanje ograničenja. To su funkcije varijabli dizajna koje želimo ograničiti na neki način. Poput funkcije cilja, ograničenja se računaju pomoći modela čija kompleksnost može varirati. Područje izvedivosti je set točaka koje zadovoljavaju sva ograničenja. Gleda se minimizirati funkciju unutar tog područja izvedivosti dizajna. Kada ograničavamo funkciju tako da bude jednaka nekoj vrijednosti onda se radi o funkciji jednakosti  $h(x) = 0$ . Kada funkcija treba biti manja ili jednaka neke vrijednosti onda se radi o funkciji nejednakosti  $g(x) \leq 0$ .



Slika 6.6. Područje izvedivosti dizajna ograničeno uvjetima

Moguće se problem prekomjerno ograničiti na način da ne postoji rješenje. To se događa kao pogreška programiranja ali može i nastati u početnim fazama optimizacije. Za kompleksnije probleme dizajna moguće je da je nemoguće zadovoljiti sva ograničenja čak i ako imaju smisla. Kada se to dogodi ograničenja treba opustiti ili maknuti.

Problem ne smije biti prekomjerno ograničen jer inače ne postoji izvedivo područje u prostoru dizajna u kojem se funkcija treba minimizirati. Stoga broj neovisnih funkcija jednakosti mora biti manje ili jednako broju varijabli u vektoru dizajna ( $n_h \leq n_x$ ). Ne postoji ograničenje na broj funkcija nejednakosti.

Područje izvedivosti raste kako se eliminiraju ograničenja te se smanjuje kako se ograničenja dodaju (osim ako ograničenja nisu suvišna).

## 6.6. Izraz optimizacijskog problema

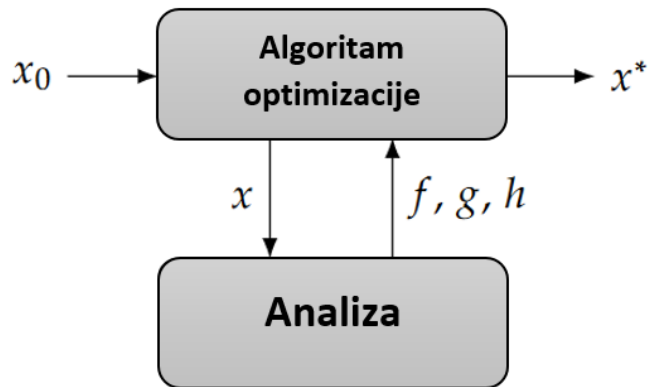
Kada se zadaju varijable dizajna, funkcije cilja i ograničenja mogu se zajedno napisati kao optimizacijski problem: minimiziraj funkciju cilja varirajući varijable dizajna unutar njihovih granica koje podređene ograničenjima.

$$\begin{array}{ll}
 \text{minimiziraj} & f(x) \\
 \text{varirajući} & \underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i \quad i = 1, \dots, n_x \\
 \text{ograničeno} & g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, \dots, n_g \\
 & h_l(x) = 0 \quad l = 1, \dots, n_h
 \end{array}$$

Ovo je standardna formulacija zadavanja problema optimizacije iako može varirati s obzirom na određeni software. Mogu se koristiti drugačiji simboli „veće ili jednako“ za funkciju nejednakosti ili maksimizacija umjesto minimizacije.

Vrijednosti cilja i ograničavajućih funkcija za dani set varijabli dizajna računaju se pomoću analize koja se sastoji od jedne ili više numeričkih metoda. Analiza mora biti potpuno automatska tako da se više optimizacijskih ciklusa mogu obaviti bez ljudske pomoći.

Algoritam optimizacije najčešće zahtijeva početni dizajn  $X_0$  od te početne točke nastavlja daljnju optimizaciju dok ne dođe do optimuma  $X^*$ .



Slika 6.7. Analiza računa cilj ( $f$ ) i vrijednosti ograničenja ( $g, h$ ) za dani set varijabli dizajna ( $x$ )

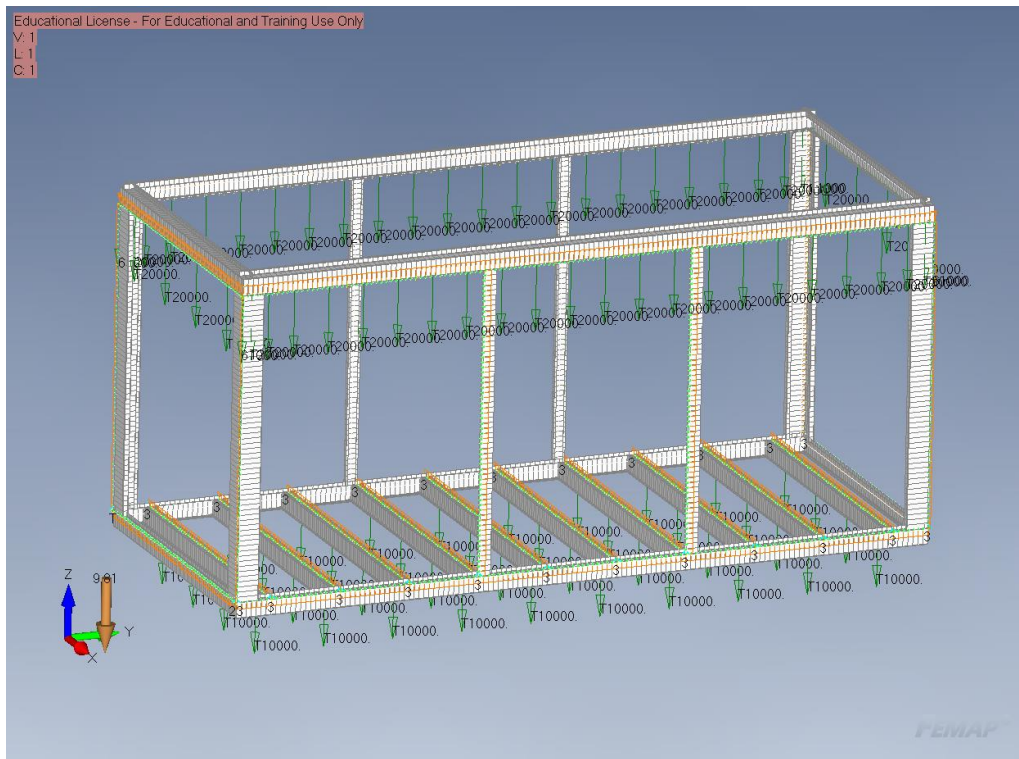
Funkcije cilja i ograničenja moraju ovisiti o varijablama dizajna; ako funkcija ne ovisi o ikojoj varijabli unutar domene, može se zanemariti i se ne smije pojavljivati unutar zadanog problema. U idealnom slučaju  $f$ ,  $g$  i  $h$  bi se trebali moći izračunati za sve vrijednosti  $X$  koje imaju smisla. Određivanje adekvatnog seta varijabli dizajna, ciljeva i ograničenja je ključni aspekt vanjske petlje na slici 6.2.

## 7. OPTIMIZACIJA DIZAJNA

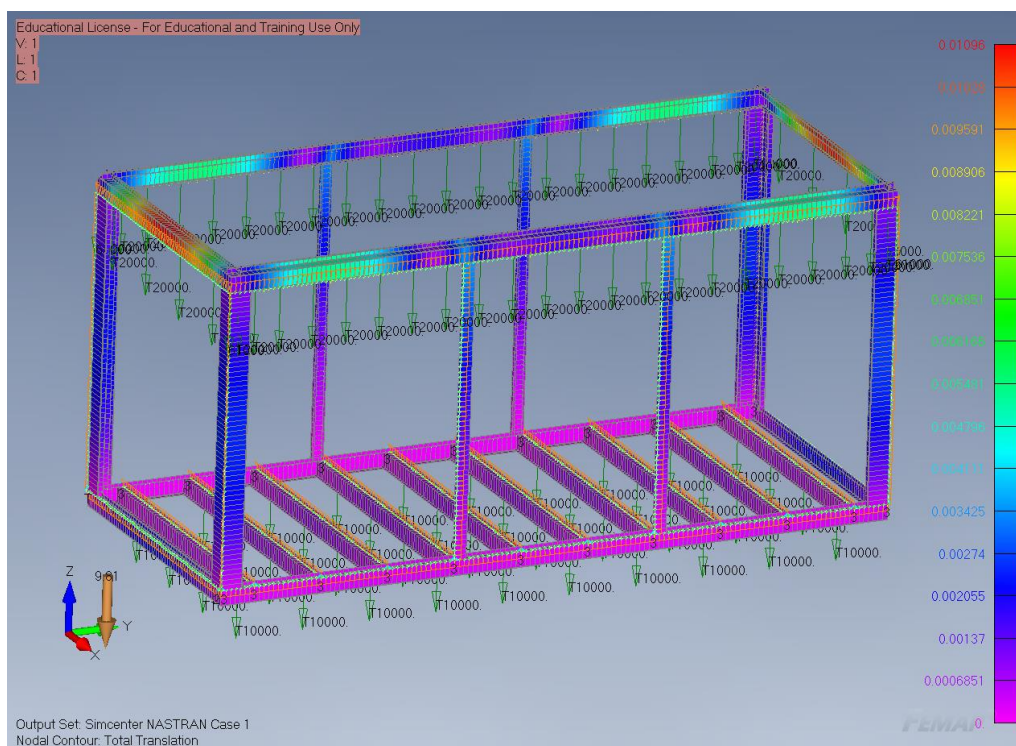
S obzirom da postoji jako ograničen broj konfiguracija kontejnera zbog malog izbora debljina profila a ovi profili nisu kompatibilni sa originalnom knjižnicom profila Femap-a optimizacija će se provesti *brute force* metodom gdje će se u više navrata smanjivati debljine profila s obzirom na osobnu procjenu te će se gledati kako se to odnosi na rezultate te iterativno ponoviti postupak dok se ne postigne optimalno rješenje.

### 7.1.Prva iteracija

Krovni nosači imaju najveći progib tako da će se debljinu krovnih nosača smanjiti za 1 mm, odnosno krovni nosači će biti 3 mm debeli. U ostatku konstrukcije nema značajnih pomaka iako ima značajnih naprezanja tako da će se debljina ostalih nosača smanjiti na pola, odnosno profili će biti debljine 2 mm. Unutar optimizacije kutni vertikalni profili se neće optimizirati već će ostati maksimalne debljine (4 mm) s obzirom da nose većinu opterećenja te bi bila loša praksa da dođe do većih deformacija kod njih. Sa novim vrijednostima će se generirati novi model sa istim opterećenjima i ograničenjima te će se gledati promjene naprezanja i pomaka.

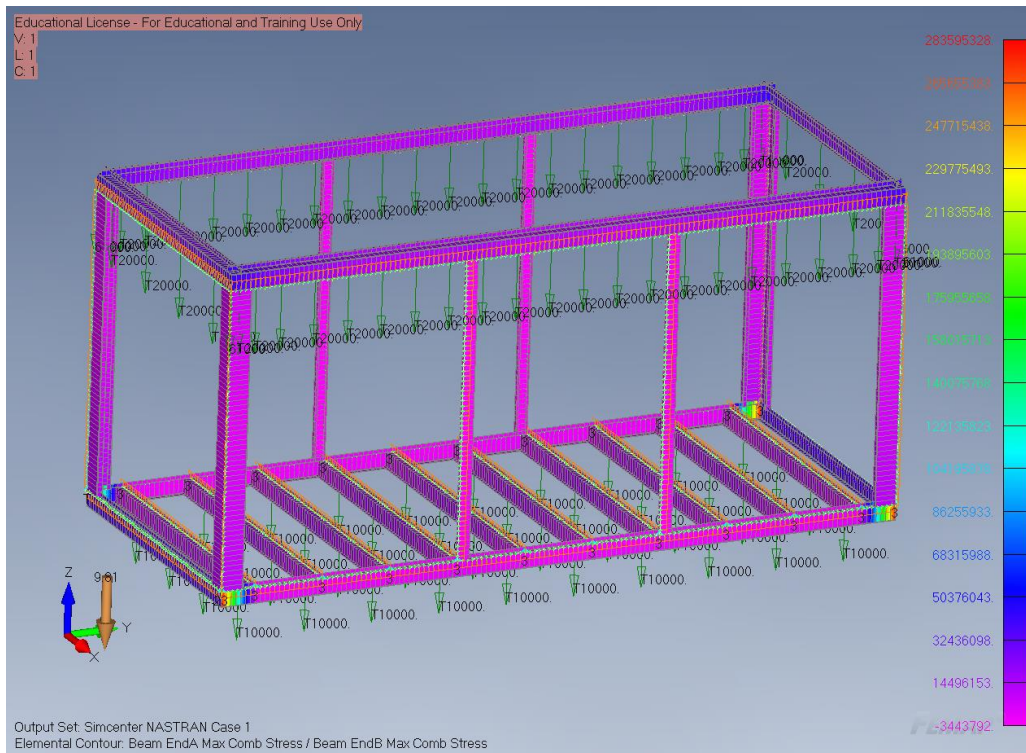


Slika 7.1. Model sa novim debljinama profila, prva iteracija optimizacije

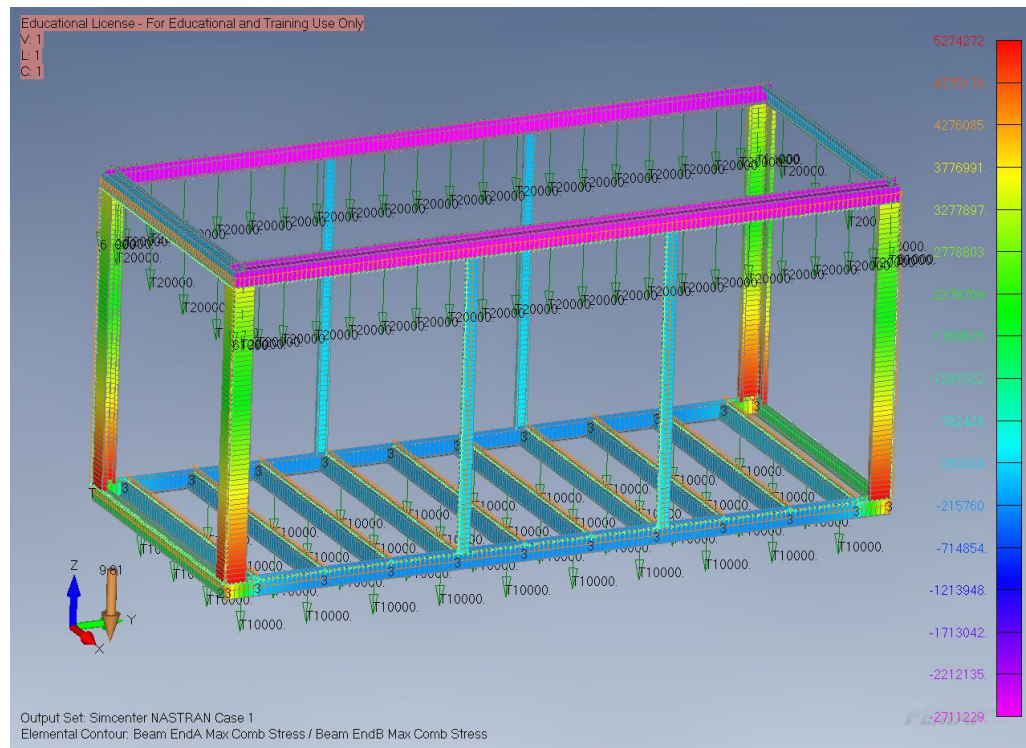


Slika 7.2. Maksimalni pomaci prve iteracije optimizacije





Slika 7.3. Maksimalna kombinirana naprezanja prve iteracije optimizacije



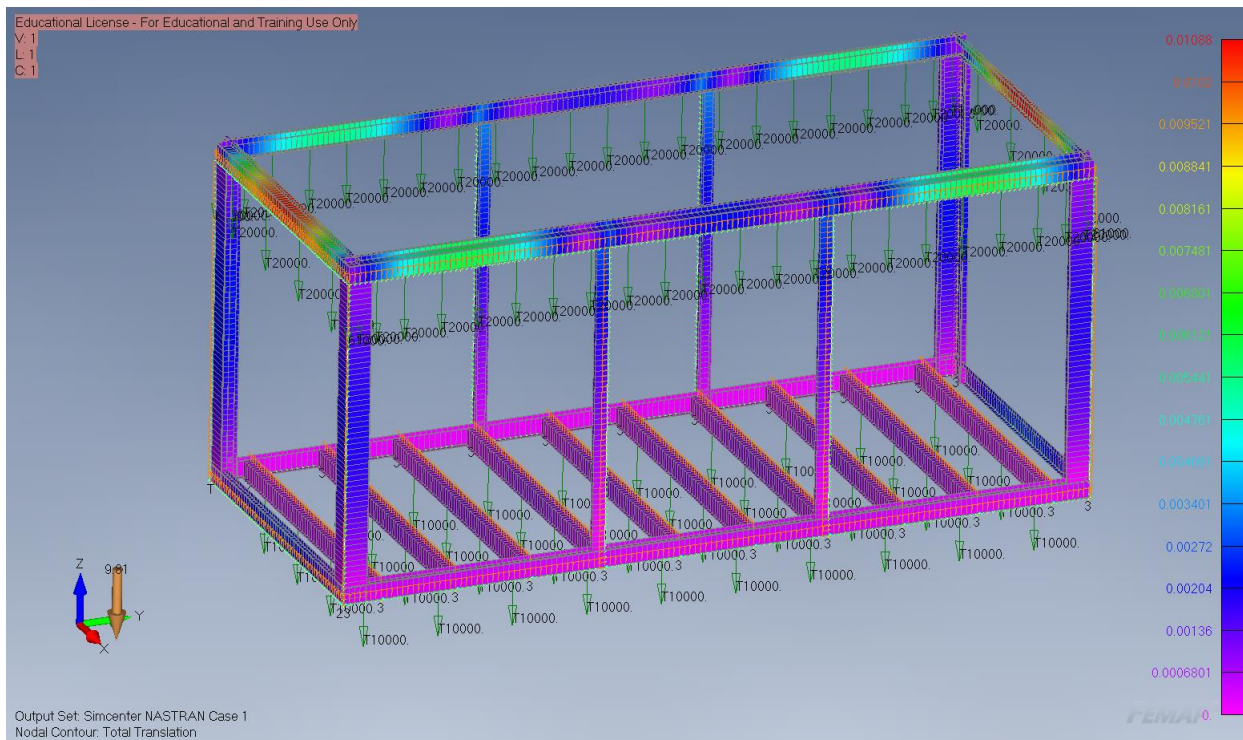
Slika 7.4. Maksimalna kombinirana naprezanja prilikom dizanja kontejnera prve iteracije

Rezultati prve iteracije optimizacije pokazali su da su pomaci krovnih nosača iznosili 10,9 mm što je vrlo blizu maksimalne dopuštene granice pomaka te se krovni nosači neće dalje optimizirati iako su opterećenja krovnih nosača daleko ispod dopuštenih. Što se tiče naprezanja ona dosežu maksimum u podnim profilima te iznose 283,5 MPa što je prekoračenje dopuštenih naprezanja stoga će se debljina podnog nosača povećati na 3 mm. Kod vertikalnih i podnih ojačanja se ne javljaju veliki pomaci ni naprezanja te će se njihova debljina u sljedećoj iteraciji smanjiti na 1 mm. Dizanje kontejnera I dalje ne zadaje više kritična naprezanja od statičkog opterećenja drugim kontejnerima.

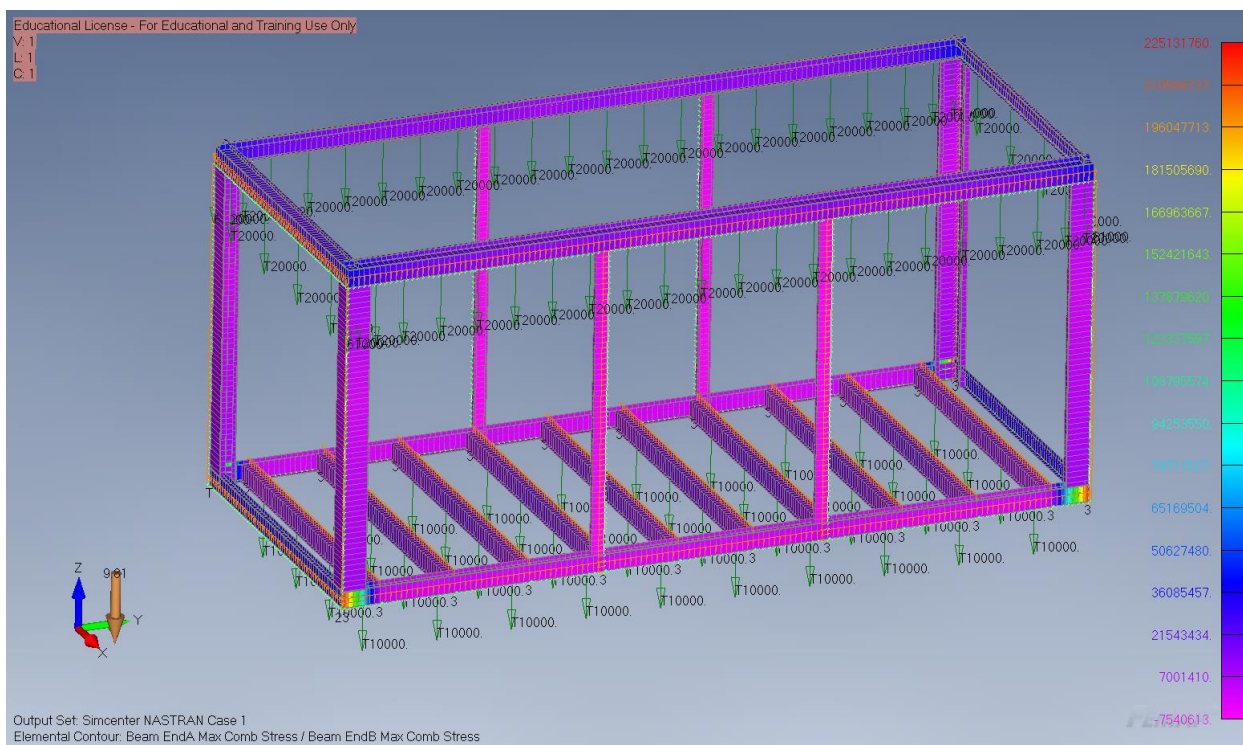
## 7.2. Druga iteracija

Stoga za sljedeću iteraciju optimizacije uzet će se sljedeće debljine nosača:

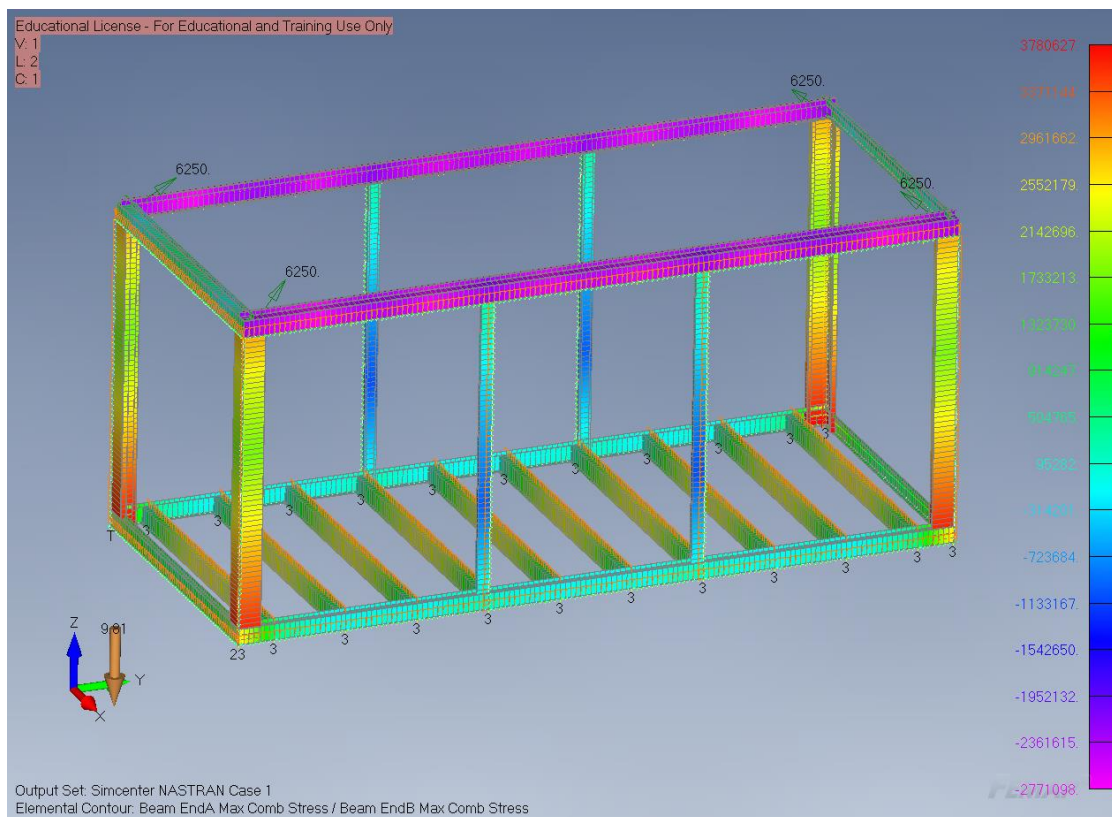
- Krovni nosač: 3 mm
- Podni nosač: 3 mm
- Kutni vertikalni nosač: 4 mm
- Vertikalna ojačanja: 1 mm
- Podna ojačanja: 1 mm



Slika 7.5. Maksimalni pomaci druge iteracije optimizacije



Slika 7.6. Maksimalna kombinirana naprezanja druge iteracije optimizacije

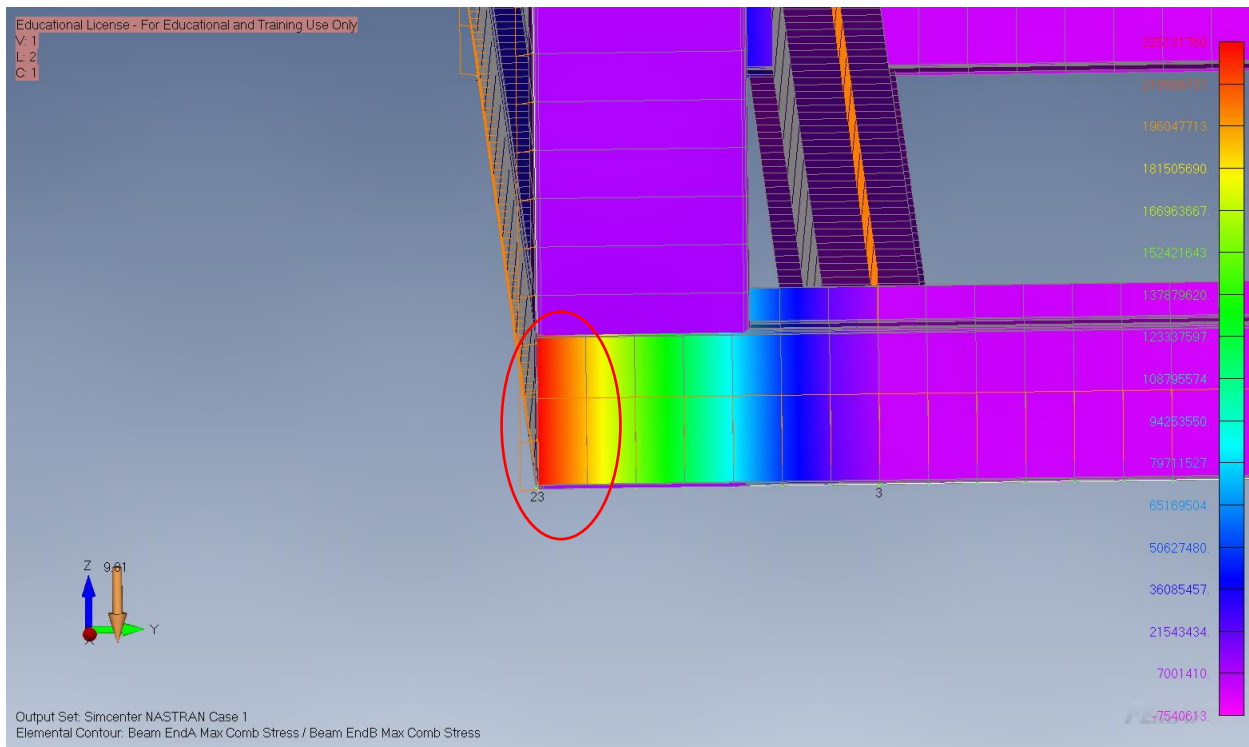


*Slika 7.7. Maksimalna kombinirana naprezanja prilikom dizanja kontejnera druge iteracije*

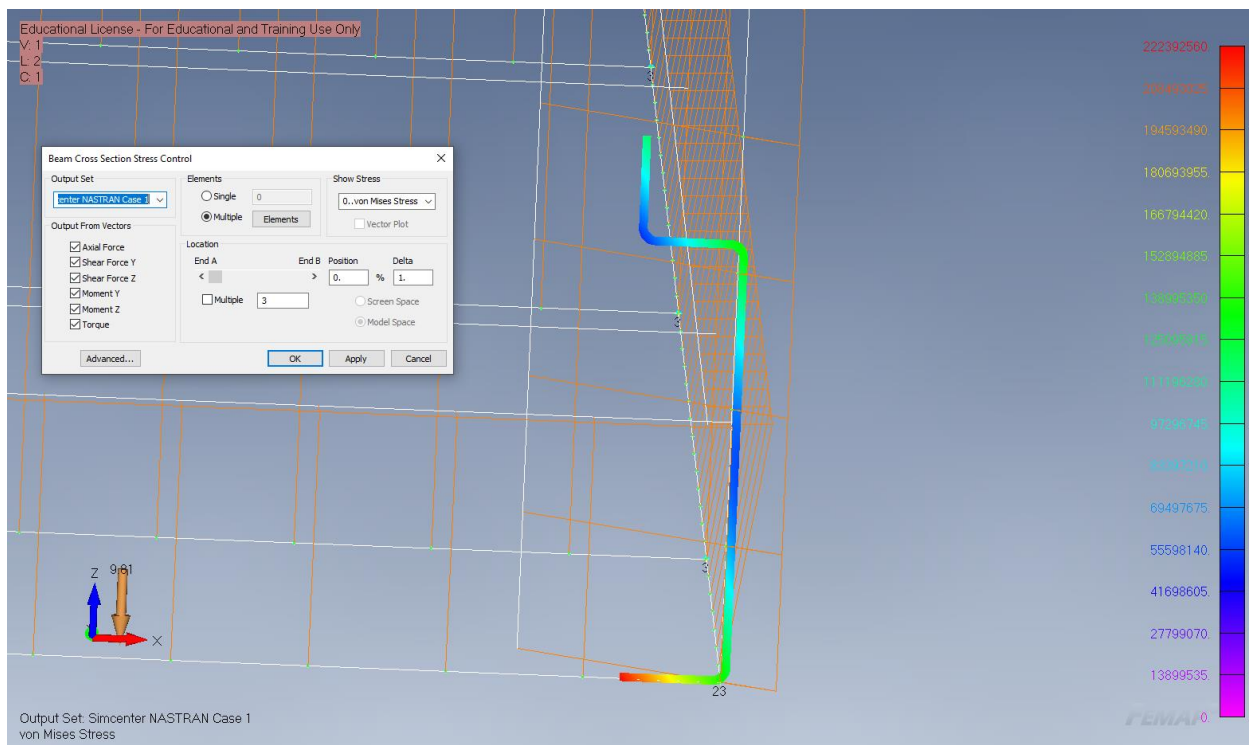
Sa trenutnim rezultatima se je postigao optimum s obzirom na zadane uvijete. Jedno mjesto gdje bi bilo dobro napraviti dodatnu provjeru je u elementu gdje se javlja maksimalno kombinirano naprezanje. U tom segmentu se može vidjeti Von Mises-ovo naprezanje kako bismo mogli potvrditi rezultate po drugom kriteriju čvrstoće. Formula za ukupno Von Mises-ovo naprezanje glasi:

$$\sigma' = \sqrt{0.5 \cdot \sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

Pomoću nje će se napraviti dodatna provjera za kritični dio kontejnera.



Slika 7.8. Kritično mjesto naprezanja u kontejneru (zaokruženo crvenom bojom)



Slika 7.9. Von Mises-ova naprezanja unutar kritičnog elementa

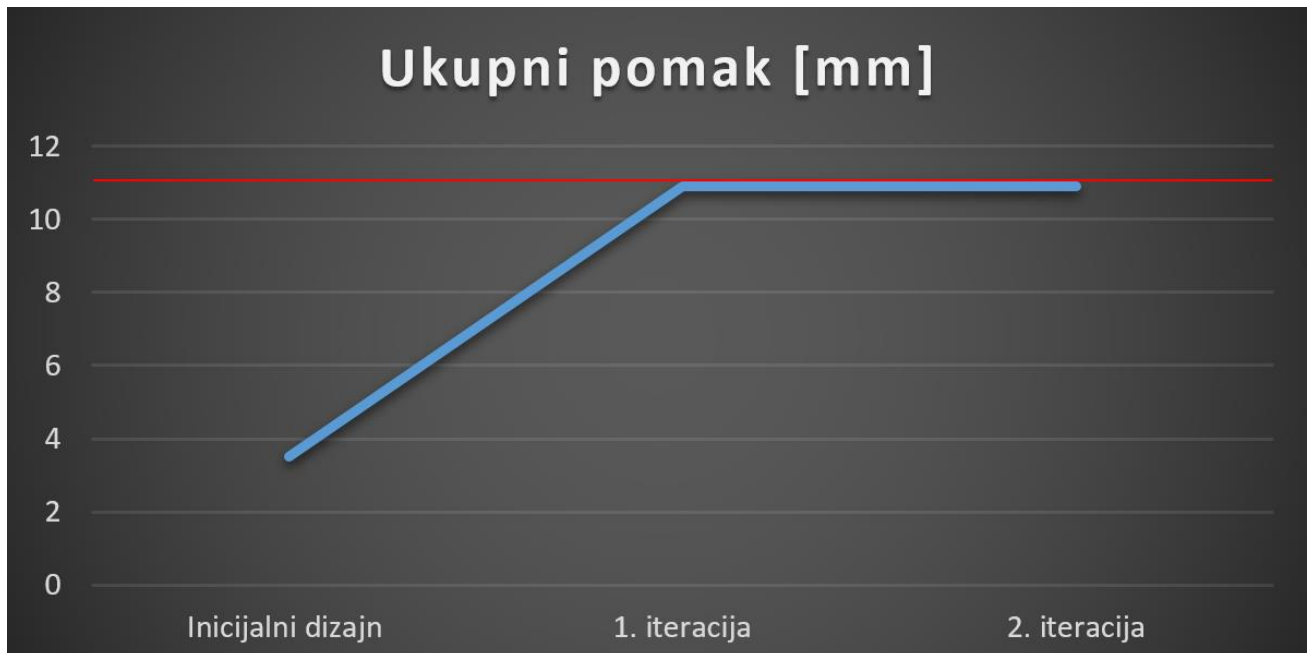
Sa slike je vidljivo da naprezanja unutar profila ne prelaze 215 MPa. Time se je potvrdilo da se unutar kontejnera ne javljaju naprezanja veća od dopuštenog koristeći dva kriterija.

Druga iteracija bila bi ujedno i posljednja s obzirom da su se postigli minimalne debljina s obzirom na maksimalne dopuštena naprezanja, pomak ili jednostavno ne postoji tanji profil. Krovni nosač je dosegao minimum preko dopuštenih pomaka, podni nosač preko dopuštenih naprezanja dok su pomoćni vertikalni i pomoćni podni nosač su minimalne debljine dostupne proizvodnjom. Time su se dosegla sva ograničenja optimizacije bez da se prekrše definirani uvjeti koje konstrukcija mora zadovoljavati. Time je postignut optimalni dizajn modularnog kontejnera.

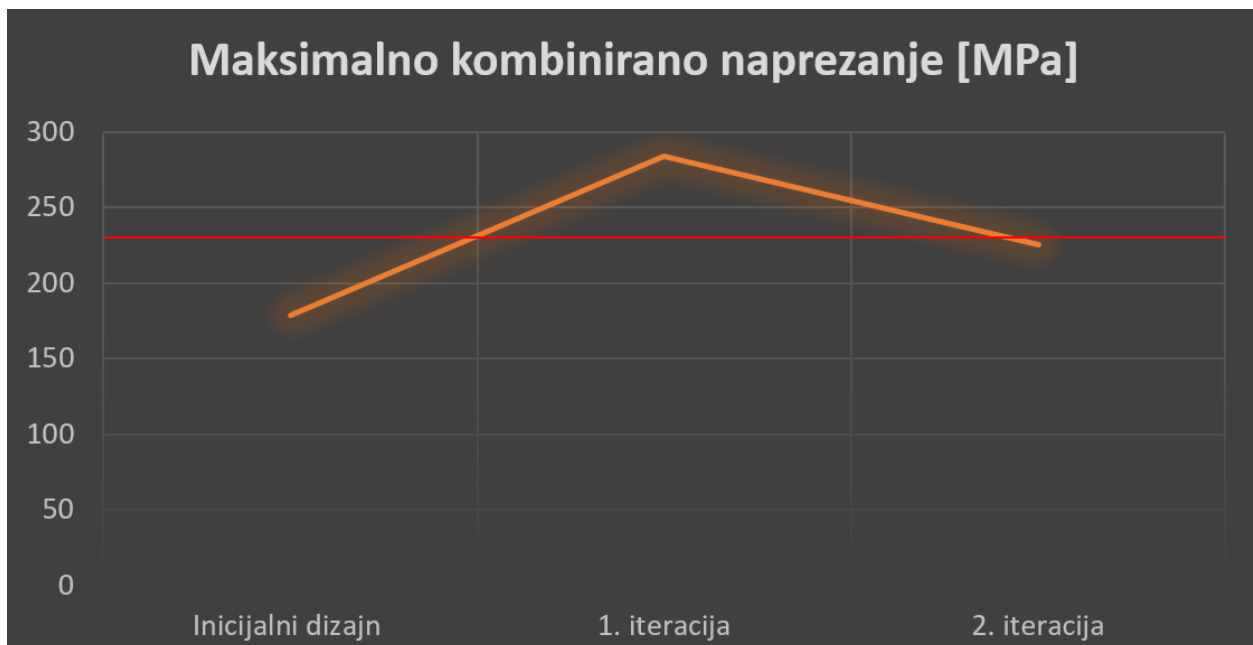
### 7.3.Rezultati optimizacije

*Tablica 7.1: iznosi naprezanja, pomaka i mase kontejnera pod opterećenjem*

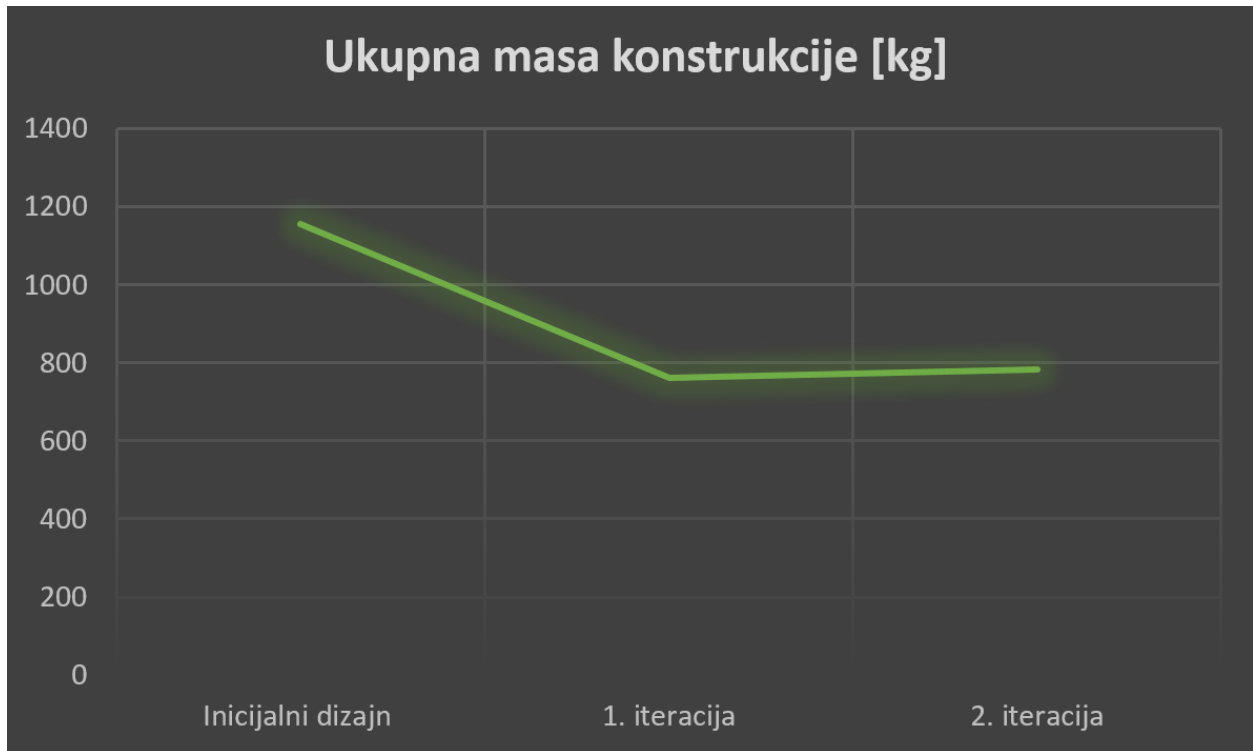
	<i>Inicijalni dizajn</i>	<i>1. iteracija</i>	<i>2. iteracija</i>
<i>Ukupni pomak [mm]</i>	3.5	10.9	10.9
<i>Maksimalno kombinirano naprezanje [MPa]</i>	178.4	283.5	225.1
<i>Ukupna masa [kg]</i>	1154	761	782



Slika 7.10. Graf konvergencije ukupnih pomaka (crvena linija je prikaz maksimalnog dopuštenog pomaka)



Slika 7.11. Graf konvergencije maksimalnih kombiniranih naprezanja (crvena linija je prikaz maksimalnog dopuštenog naprezanja)

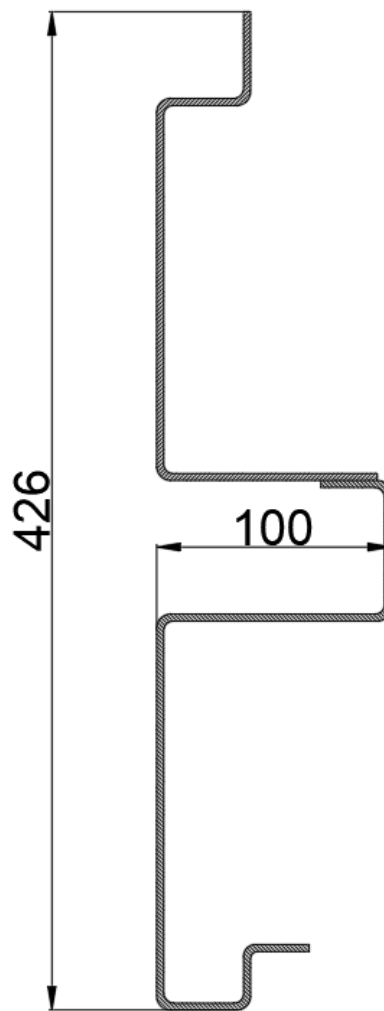


*Slika 7.11. Graf mase kontejnera*



## 8. PROVJERA OPTIMALNOG DIZAJNA

Za provjeru optimalnog dizajna kontejnera napravit će se numerički model gdje su tri kontejnera naslagana jedan na drugi. S obzirom da se koristi 1D simulacija, mjesto gdje gornji kontejner liježe na donji se mora posebno modelirati. Taj element će biti sastavljen od dva elementa podnog i krovnog da simulira kontakt krovnog profila sa podnim profilom i djelomičnog kontakta sa podnim omega profilom. U praksi bi se dva kontejnera spojila koristeći vijčane spojeve ali u simulaciji će biti modelirani kao jedan element.



*Slika 8.1. Element kontakta krovnog i podnog profila*

Svaki kontejner ima dimenzije širina 3 metra, dubina 7 metra i visina 3,2 metra. Dimenzije profila će se uzeti iz zadnje optimizacije:

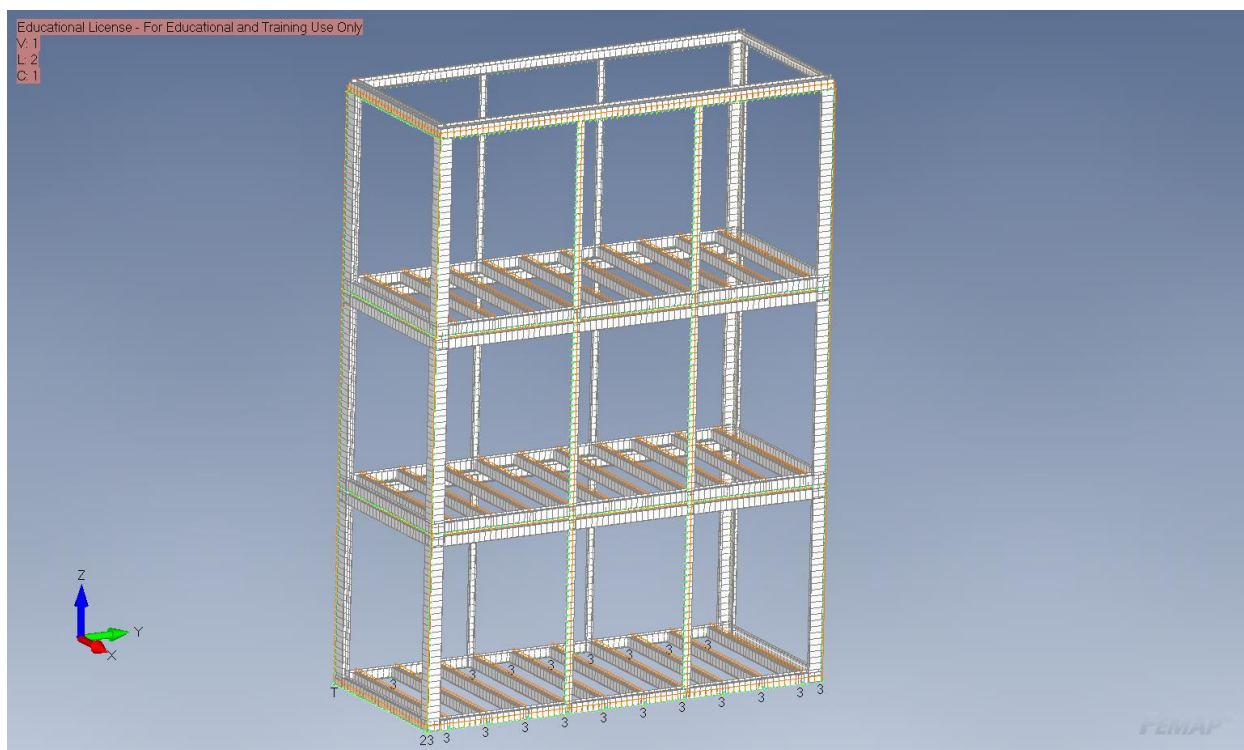
- Krovni nosač: 3 mm
- Podni nosač: 3 mm
- Kutni vertikalni nosač: 4 mm
- Vertikalna ojačanja: 1 mm
- Podna ojačanja: 1 mm



*Slika 8.2. Kreirana geometrija tri kontejnera*

## 8.1. Ograničenja analize provjere

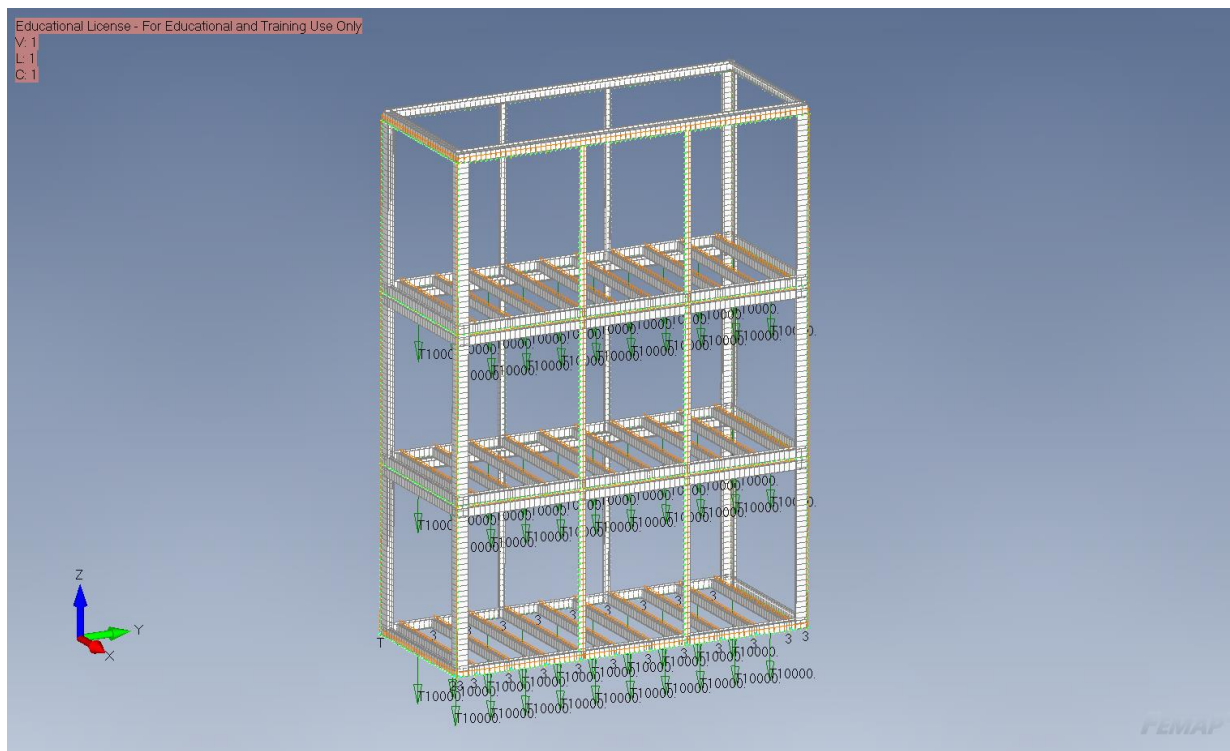
Ograničenja kontejnera su zadana metodom 3-2-1 te u ostalim podnim točkama je ograničen pomak po z osi.



*Slika 8.3. Kontejneri sa zadanim ograničenjima*

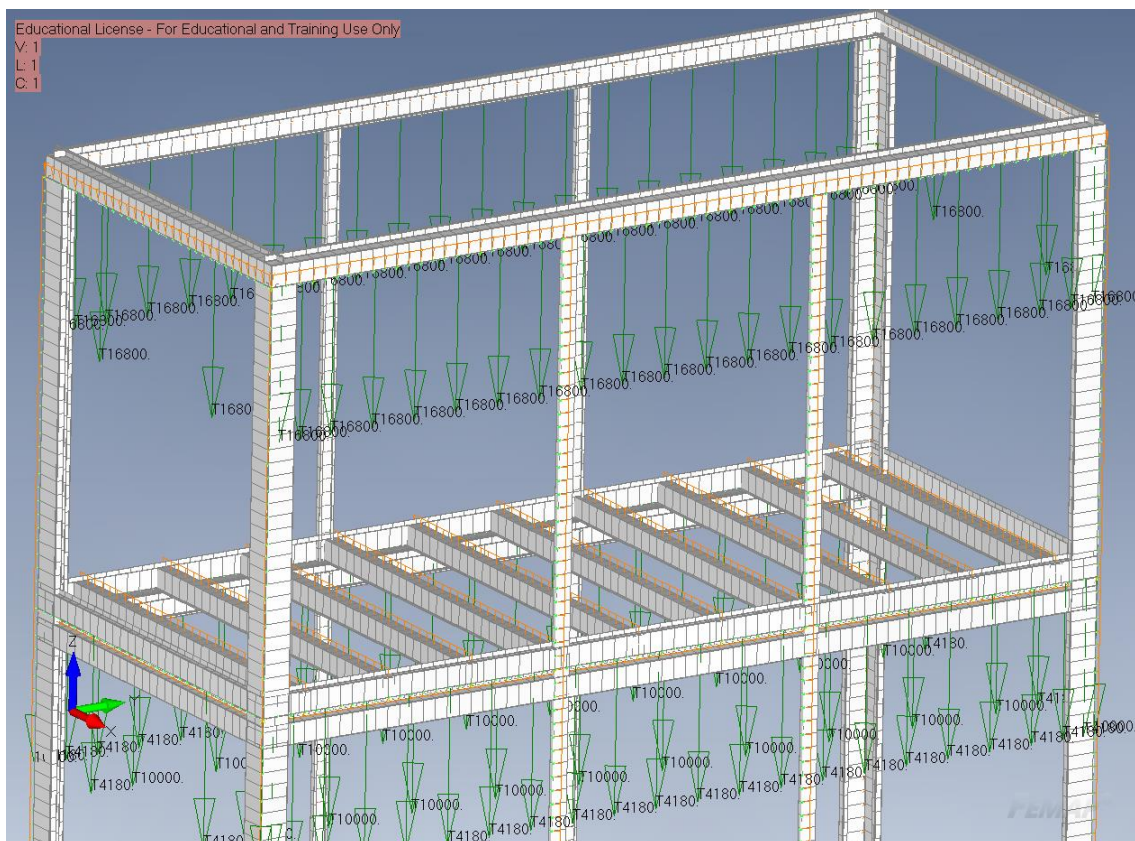
Opterećenja su zadana na način da je na sva tri podna ojačanja zadano kontinuirano opterećenje od 10 000 N što bi bilo opterećenje osoba i predmeta unutar kontejnera.

## 8.2. Opterećenja analize provjere



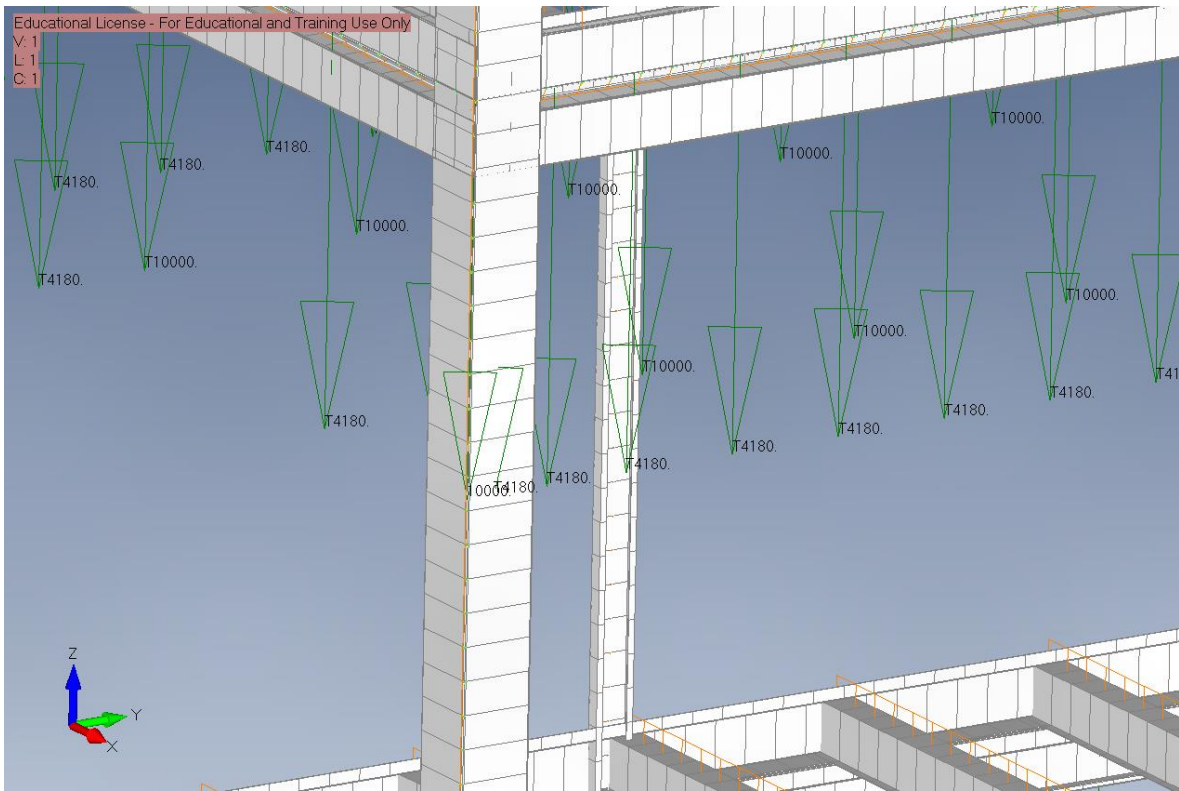
*Slika 8.4. Kontejneri sa opterećenjima na podnim omega profilima*

Na krovni nosač najgornjeg kontejnera je zadano kontinuirano opterećenje snijega od 16 800 N.

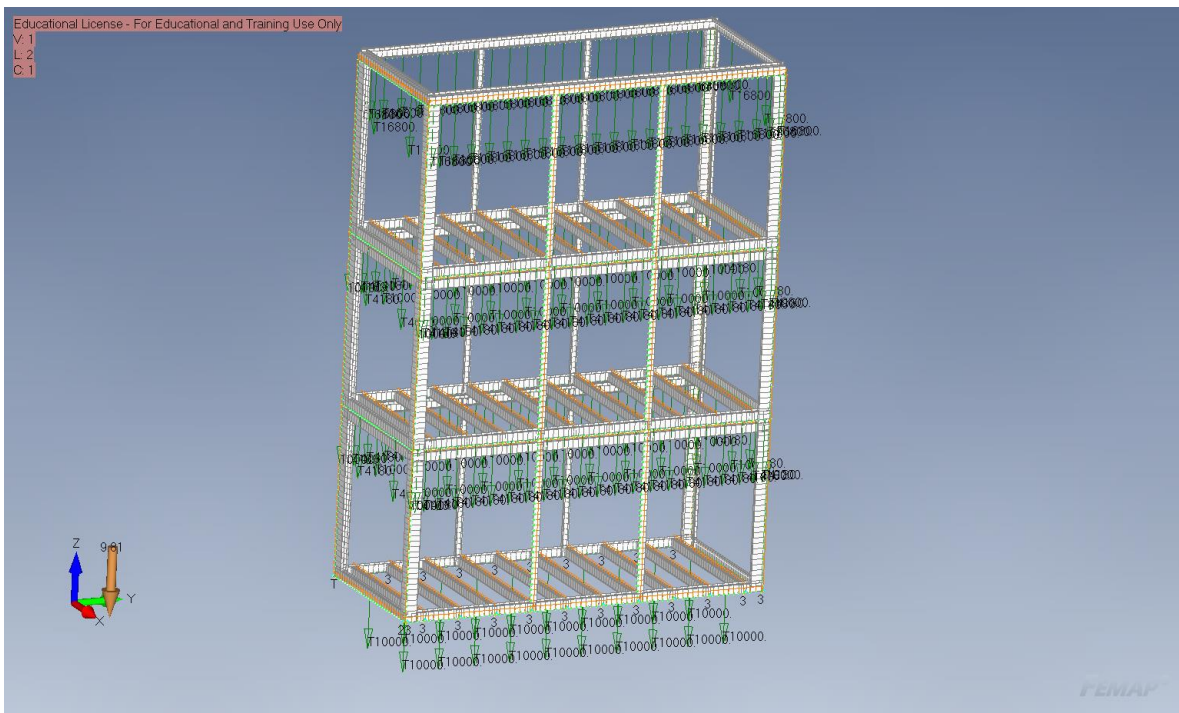


*Slika 8.5. Zadano opterećenje snijega*

Ranije se je definiralo da gotov useljiv kontejner ima masu 2200 kg a sama konstrukcija ima masu 782 kg što znači da u simulaciju moramo dodati opterećenje mase obloga kontejnera od 14 180 N na krov donja dva kontejnera. Ona će se zadati kao u ranijim analizama da većina opterećenja ide na kutne vertikalne profile (10 000 N) dok ostatak (4180 N) ide kontinuirano na krovni/podni nosač. Težina same konstrukcije je zadana preko gustoće čelika i zadavanja ubrzanja sile teže.



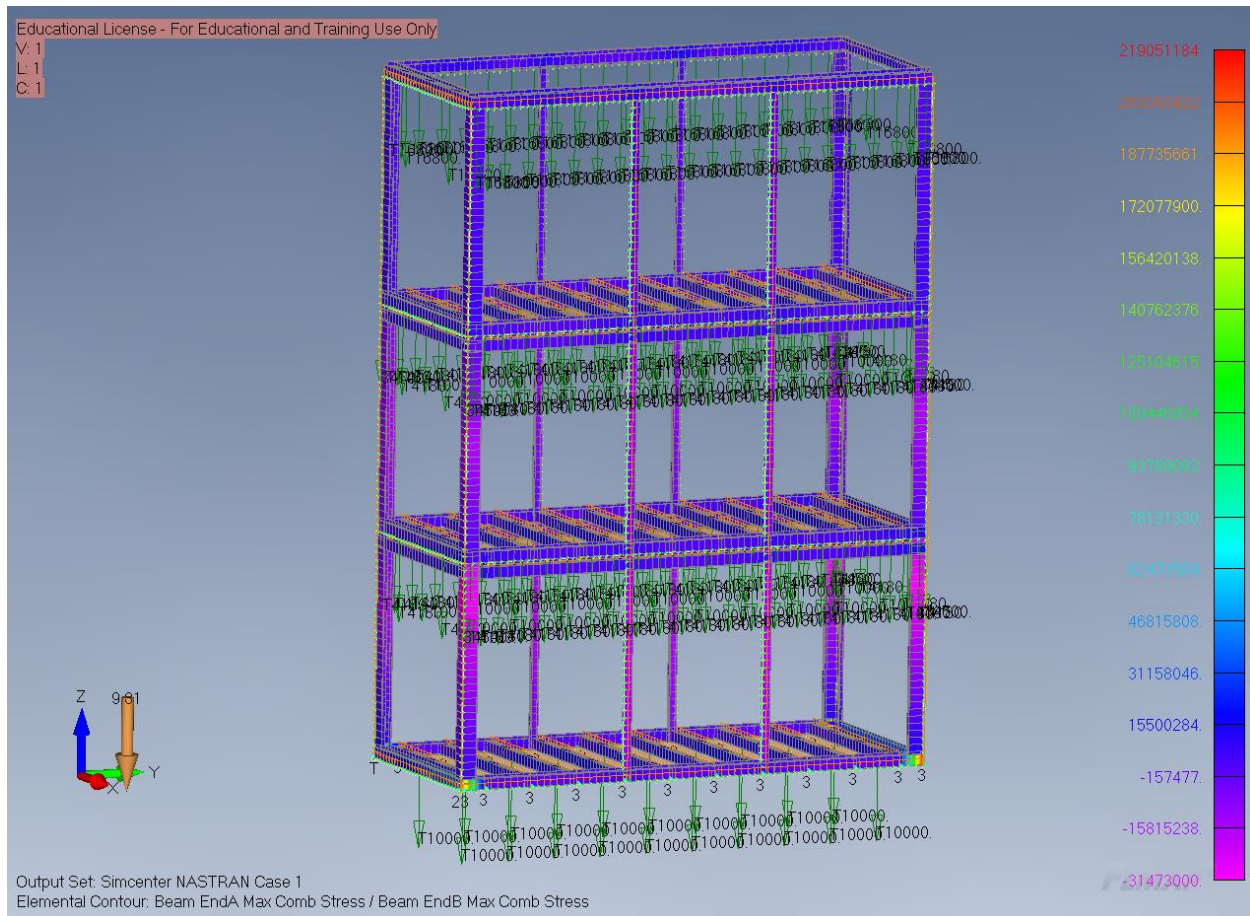
Slika 8.6. Detalj zadanog opterećenja ostatka težine opremljenog kontejnera



Slika 8.7. Kontejneri sa svim zadanim opterećenjima

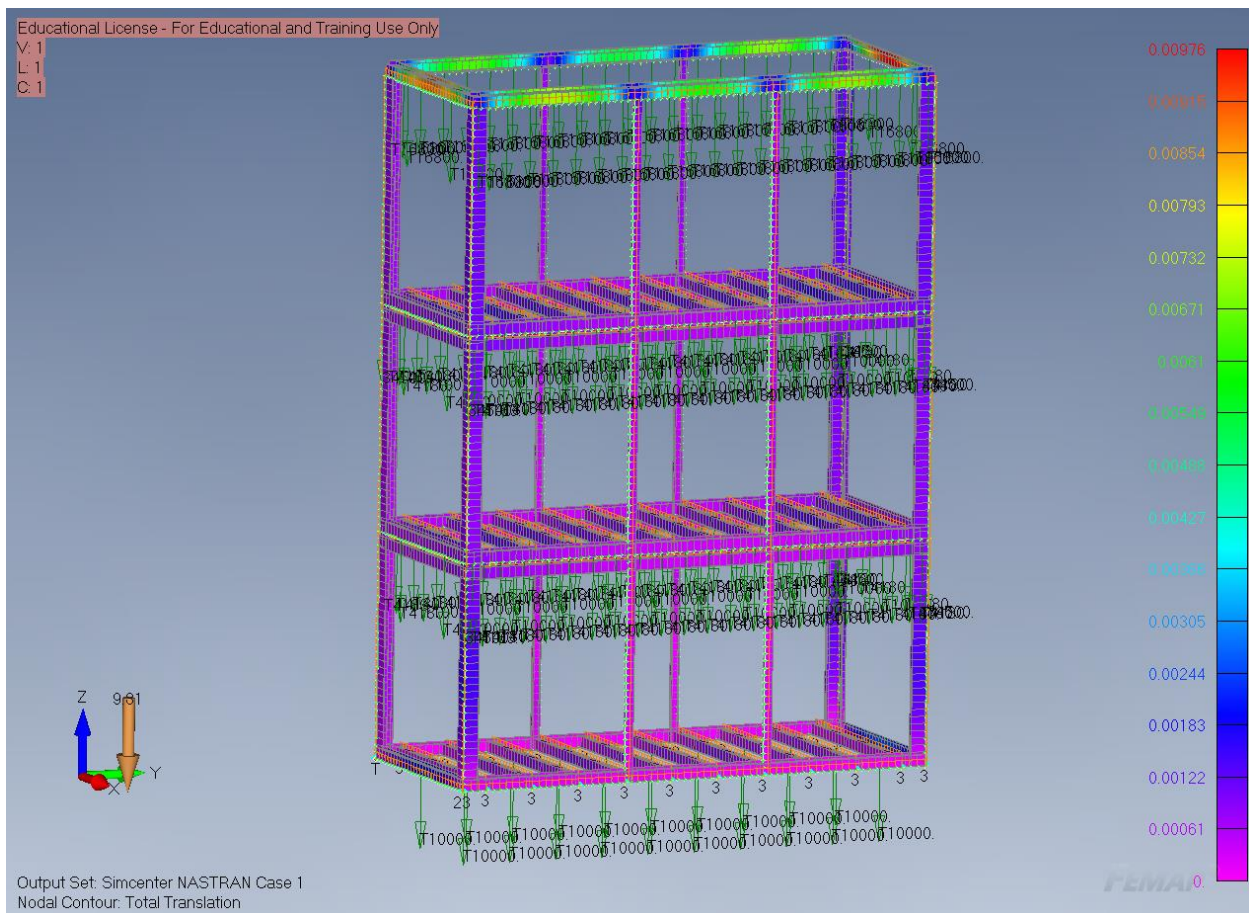
Nakon zadavanja potrebnih parametara napravljena je statička simulacija pomoću rješavača NX Nastran.

### 8.3.Rezultati analize provjere



Slika 8.8. Maksimalna kombinirana napreznja analize tri kontejnera

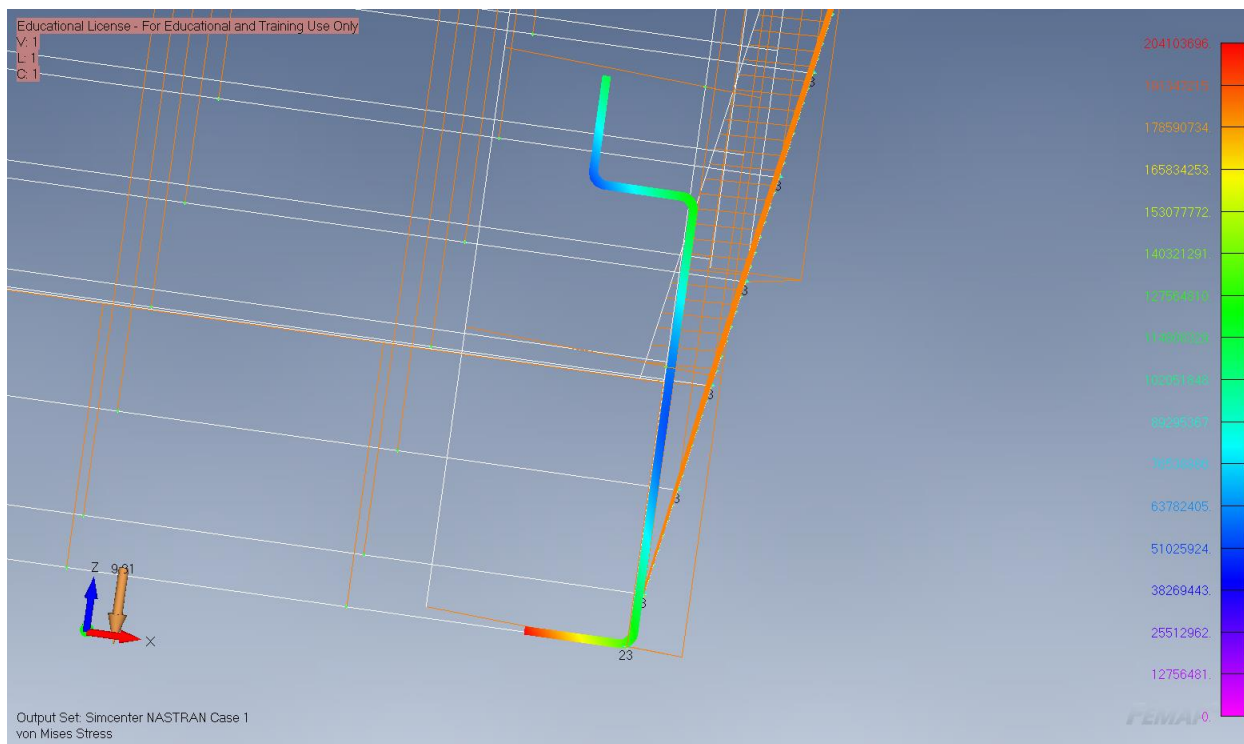
Iz rezultata numeričke analize je vidljivo da maksimalna kombinirana napreznja ne prelaze dopuštena napreznja te iznose 219 MPa dok najveći ukupni pomaci iznose 9,8 mm. Napreznja i pomaci su manji nego u analizi jednog kontejnera što znači da su se je optimizacija provela kvalitetno.



Slika 8.9. Ukupni pomaci analize tri kontejnera

Rješenja ove simulacije su dosljedna sa prije dobivenima rezultatima najdonjeg kontejnera iako rezultati odstupaju donekle. To je zbog činjenice da su se opterećenja u simulacijama jednog kontejnera zadavala prema određenim pretpostavkama te ne simuliraju savršeno opterećenja u stvarnom slučaju. To nije idealno ali prilikom modeliranja problema on se aproksimira te se moraju raditi određene pretpostavke kako bi se problem mogao riješiti u vremenski prihvatljivom vremenu. Potrebno je pobrinuti se da ta odstupanja budu minimalna ili zanemariva.





*Slika 8.10. Von Mises-ova naprezanja u kritičnom profilu konstrukcije*

Ni Von Mises-ova naprezanja ne prelaze dopuštena naprezanja te s time se usvaja da je čitav proces optimizacije proveden dobro te je provjera potvrdila rezultate optimizacije kao valjane.

## 9. ZAKLJUČAK

Procesom optimizacije u ovom radu dobivene su debljine lima potrebnog za proizvodnju kontejnera koji se može slagati jedan na drugi do tri kata. Tim postupkom je masa preliminarnog kontejnera smanjena za 32%. Unutar industrije već postoje iskustveni podatci za debljine tih limova pa prava ušteda bi bila manja od navedenog postotka ali ovim postupkom se može provjeriti postoji li mogućnost za većom uštedom ili ako postojeći profili mogu podnijeti više opterećenja nego što je trenutna praksa. Uz to ovakvim simulacijama se može vidjeti postoji li mogućnost da se u asortiman limova uvede debljina između dvije postojeće debljine kako bi se smanjili troškovi proizvodnje ako uvođenje nove debljine lima ne diže troškove više od uštede na masi.

Unutar procesa definiranja opterećenja napravile su se određene pretpostavke koje su kasnije provjerene dodatno nakon optimizacije te se je pokazalo da podatci koreliraju te da je optimizacija provedena uspješno. Prilikom numeričkih analiza potrebno je provjeriti rezultate jer se pogreška mogu jako lako dogoditi, pogotovo ako inženjer nema puno iskustva u provođenju numeričkih analiza. U slučaju analize kontejnera provjera je pokazala kako su naprezanja i pomaci nešto manji nego što je to optimizacijska analiza pokazala te time se može reći kako sama konstrukcija ima mali dodatni faktor sigurnosti.

## 10. IZVORI

- [1] <https://profilekontenerowe.com/en/> 28. ožujka 2024.
- [2] <https://eurocodeapplied.com/design/en1993/steel-design-properties> 14. travnja 2024.
- [3] Papadopoulos, P.: „ME280A: Introduction to finite element method“ 2010. , s interneta, <https://me.berkeley.edu/wp-content/uploads/2019/01/ME-280A.pdf>, 27. svibnja 2024.
- [4] Singiresu S. Rao, Engineering optimization theory and practice, John Wiley & Sons Inc., s interneta, <https://industri.fatek.unpatti.ac.id/wp-content/uploads/2019/03/018-Engineering-Optimization-Theory-and-Practice-Singiresu-S.-Rao-Edisi-4-2009.pdf> 2. lipnja 2024.
- [5] N. Ottosen, H. Petersson: Introduction to the Finite Element Method, Prentice-Hall 1992.
- [6] Brnić, J. Čanađija, M.: „Analiza deformabilnih tijela metodom konačnih elemenata“, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2008.
- [7] Državni hidrometeorološki zavod
- [8] J. Chaskalovic: Finite Elements Methods for Engineering Sciences, Springer Verlag, 2008.

## 11. SAŽETAK

U ovom radu je prikazan primjer optimizacije konstrukcije modularnih kontejnera koji se mogu slagati jedan na drugi. Kako bi se optimizacija mogla provesti bilo je potrebno preliminarno odrediti mnogo stvari potrebnih za definiranje problema. Definirani su karakteristike materijala, geometrije profila koji se mogu koristiti za konstrukciju, ograničenja same konstrukcije i profila u obliku dopuštenih naprezanja i pomaka te sva opterećenja koja se javljaju u standardnom korištenju samih kontejnera. Dan je uvid u metodu konačnih elemenata i proces optimizacije. Opisan je proces optimizacije kontejnera i njegove iteracije. Na kraju optimizacije usvojene su završne debljine limova od kojih bi se mogao napraviti kontejner koji zadovoljava definirane uvijete te je provedena provjera završnog dizajna gdje se je provela numerička analiza tri kontejnera naslaganog jedan na drugog.

Ključne riječi: FEMAP, uredski kontejner, optimizacija konstrukcije, profili otvorenog presjeka

### SUMMARY

This paper presents an example of optimizing the frame of a modular office containers that can be stacked on top of each other. To conduct the optimization it was necessary to preliminarily determine many aspects required to define the problem. The characteristics of the materials, the geometry of the profiles that can be used for the construction, the constraints of the construction and the profiles in terms of allowable stresses and displacements were defined, as well as all the loads that occur during the standard use of the containers. An overview of the finite element method and the optimization process was provided. The container optimization process and its iterations were described. At the end of the optimization, the final sheet thicknesses were adopted to create a container that meets the defined conditions, and the final design was verified by conducting a numerical analysis of three containers stacked on top of each other.

Keywords: FEMAP, office container, construction optimization, open section profiles