

Analiza čvrstoće kolone za destilaciju

Smiljanić, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:190:845878>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-03**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

ANALIZA ČVRSTOĆE KOLONE ZA DESTILACIJU

Rijeka, studeni 2023

Domagoj Smiljanić

0035206217

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

ANALIZA ČVRSTOĆE KOLONE ZA DESTILACIJU

Mentor: prof. dr. sc. Marko Čanađija

Rijeka, studeni 2023

Domagoj Smiljanić

0035206217

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE**

Rijeka, 10. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za tehničku mehaniku**
Predmet: **Termomehanika**
Grana: **2.11.01 opće strojarstvo (konstrukcije)**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

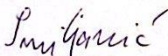
Pristupnik: **Domagoj Smiljanić (0035206217)**
Studij: **Sveučilišni diplomski studij strojarstva**
Modul: **Računarska mehanika i inženjerstvo**

Zadatak: **Analiza čvrstoće kolone za destilaciju**

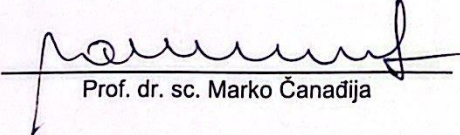
Opis zadatka:

Za zadanu kolonu za destilaciju i radne parametre - temperatura i tlak, napraviti analizu deformacija i naprezanja. Analizu provesti metodom konačnih elemenata. Identificirati kritična mjesta konstrukcije. Uzeti u obzir i vanjske utjecaje - vjetar i potres.

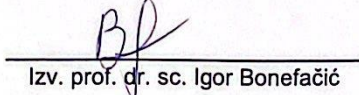
Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.


Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:


Prof. dr. sc. Marko Čanađija

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:


Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

IZJAVA

Sukladno članku 97. Pravilnika o studiranju Tehničkog fakulteta, Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom „Analiza čvrstoće kolone za destilaciju“, uz mentorstvo i konzultacije s mentorom prof. dr. sc. Markom Čanađijom.

Rijeka, studeni, 2023.

Domagoj Smiljanić

ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Marku Čanađiji na strpljenju, pomoći i vodstvu prilikom izrade diplomskog rada.

Posebno bi se zahvalio svojoj obitelji i prijateljima na potpori, strpljenju i razumijevanju tokom studija.

Sadržaj

1. UVOD	1
2. FRAKCIJSKA DESTILACIJA NAFTE	2
2.1 Sirova nafta.....	2
2.2 Kolona za frakcijsku destilaciju	3
3. ANALITIČKI PRORAČUN KOLONE ZA FRAKCIJSKU DESTILACIJU	4
3.1 Radni parametri	5
3.2 Dimenzije kolone.....	5
3.3 Provjera debljini stijenki sferičnih i cilindričnih dijelova	6
3.3.1 Provjera debljine stijenke cilindričnog plašta	7
3.3.2 Provjera debljine sferičnog dna.....	11
3.4 Izbor prirubnica	13
3.5 Plitice.....	14
3.6 Analitički proračun kolone	17
3.6.1 Izrada spremnika u programu PV Elite	17
3.6.2 Mase i težine elemenata	20
3.6.3 Opterećenja uzrokovana vjetrom	22
3.6.4 Opterećenja uzrokovana potresom	24
3.6.5 Provjera naprezanja	26
4. NUMERIČKA ANALIZA KOLONE ZA FRAKCIJSKU DESTILACIJU.....	35
4.1 Izrada mreže	35
4.2 Postavljanje oslonca	41
4.3 Slučajevi opterećenja.....	42
4.3.1 Numerička provjera prvog slučaja	43
4.3.2 Numerička provjera drugog slučaja	49
4.3.3 Numerička provjera trećeg slučaja.....	56
4.3.4 Numerička provjera četvrtog slučaja.....	61
4.3.5 Numerička provjera petog slučaja.....	67

4.3.6	Numerička provjera devetog slučaja	71
5.	ZAKLJUČAK	77
6.	LITERATURA	78
7.	SAŽETAK	79
8.	ABSTRACT	80

1. UVOD

Nafta je neophodan izvor energije potreban za funkcioniranje moderne industrije. Koristi se za promet, proizvodnju električne energije i u proizvodnji mnogih proizvodnih procesa, te se stoga može i smatrati pokretačem globalnog razvoja. Nakon izvlačenja sirove nafte, koja se nalazi ispod površine Zemlje, ona se dalje prerađuje u rafinerijama. Elementi koji služe za odvajanje različitih ugljikovodika na samostalne elemente se nazivaju kolone za destilaciju. U kolonama za destilaciju se odvija proces frakcijske destilacije nafte, u kojemu se pojedini ugljikovodici odvajaju iz smjese. Kako bi se različiti ugljikovodici mogli izdvojiti iz smjese, potrebno ih je zagrijati na povišene temperature. Zbog toga je potrebno vršiti proračune naprezanja elemenata kolone za destilaciju kako ne bi došlo do oštećenja, koja mogu rezultirati velikom materijalnom štetom. Kolone za destilaciju se proračunavaju prema normama koje je propisala Europska Unija, te se svaki element posebno provjerava.

U radu će se provjeriti naprezanja koja se javljaju u koloni za destilaciju. Naprezanja se javljaju zbog tlakova u koloni, zbog vlastite težine spremnika i težina fluida koji se izdvajaju u procesu destilacije. Naprezanja se provjeravaju analitičkim i numeričkim proračunom. Njihovi rezultati će biti uspoređeni, kako bi se provjerila točnost numeričkog proračuna, koji se koristi FEM (Finite Element Method – Metoda konačnih elemenata) analizom. Analitički proračun će se provjeravati preko normi EN 13445, koje služe za izradu tlačnih spremnika, dok se numerički dio rješava uz pomoć programa Femap.

2. FRAKCIJSKA DESTILACIJA NAFTE

2.1 Sirova nafta

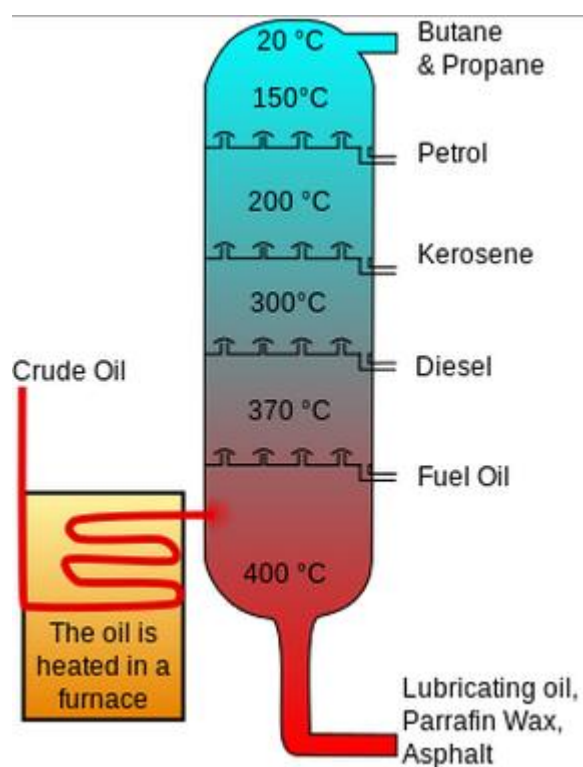
Sirova nafta je kompleksna smjesa, koja se nalazi u okolišu, i koja se većinom sastoji od ugljikovodika, ali uz to sadrži i određene spojeve kisika, dušika i sumpora. Sirova nafta nastaje razgradnjom velikih molekula masti, ulja i voskova koji stvaraju kerogen. Proces nastajanja nafte traje milijune godina. Kako su morske životinje umirale, taložile su se na dnu, te su postupno bivale zatrpane slojem mulja, pijeska i gline. Postupna razgradnja pod utjecajem topline i visokog pritiska rezultirala je stvaranjem ugljikovodičnih spojeva. Sirova nafta sadrži sljedeće elemente: 83-87 % ugljik, 11-16 % vodik, 0-4 % kisik i dušik i 0-4 % sumpor. Većina ugljikovodika od kojih se nafta sastoji sadrže od 5 do 20 atoma ugljika [1]. Sastav sirove nafte nije identičan na svim nalazištima, te njegov sastav najviše ovisi o mjestu na kojemu je pronađen i o dubini na kojoj se nalazište nalazi. Sirova nafta se izvlači pomoću posebnih strojeva, a postrojenja na kojima se to odvija se nazivaju naftne platforme.



Slika 2.1 Naftna platforma [2]

2.2 Kolona za frakcijsku destilaciju

Kolone za frakcijsku destilaciju su osnovni elementi za preradu nafte, te se klasificiraju kao tlačni spremnici. Frakcijska destilacija nafte je postupak u kojemu se smjesa različitih komponenti koje se nalaze u sirovoj nafti, razdvajaju na frakcije. Frakcije se ne sastoje od samo jedne komponente, nego je to smjesa komponenata, koje se nakon razdvajanja mogu koristiti kao takve, ili idu na daljnje prerađivanje [3]. Najvažniji produkti frakcijske destilacije su: benzin, kerozin, plinovi (butan, propan), dizel, vakuumsko plinsko ulje, asfalt i bitumen.



Slika 2.2 Prikaz frakcijske destilacije [4]

3. ANALITIČKI PRORAČUN KOLONE ZA FRAKCIJSKU DESTILACIJU

Kao što je već prethodno navedeno, kolona za frakcijsku destilaciju se promatra kao tlačni spremnik, te će se zbog toga i proračunavati na isti način kao i tlačni spremnici. Proračun se vrši prema europskoj normi EN 13445 [5]. Potrebno je izvršiti provjeru devet različitih slučajeva naprezanja. Ti slučajevi predstavljaju različite kombinacije opterećenja koje se javljaju pri radu kolone za frakcijsku destilaciju, a ti slučajevi su sljedeći:

- Pogon pod unutarnjim tlakom
- Pogon pod unutarnjim tlakom i pod utjecajem vjetra
- Pogon pod vanjskim tlakom i pod utjecajem vjetra
- Pogon bez tlaka i pod utjecajem vjetra
- Instalacija spremnika
- Pogon pod unutarnjim tlakom i pod utjecajem potresa
- Pogon pod vanjskim tlakom i pod utjecajem potresa
- Pogon bez tlaka i pod utjecajem potresa
- Ispitivanje pod vanjskim tlakom, spremnikom punjenim vodom i utjecajem vjetra

Za proračun kompleksnijih koeficijenata i naprezanja nastalih od vjetra i potresa, te za vizualizaciju kolone za frakcijsku destilaciju, koristit će se program PV Elite.

PV Elite je program koji kod proračuna uzima u obzir cijeli spremnik, tj. računa sve potrebne debljine stijenki, sukladno izabranim normama, te odrađuje analizu naprezanja za vertikalne i horizontalne spremnike i izmjenjivače topline. Uz to se može koristiti i za evaluaciju već postojećih spremnika.

Proračun se izvršava za kolonu za frakcijsku destilaciju, tj. za vertikalni tlačni spremnik. Elementi za koje se proračun vrši su: cilindrična stijenka plašta, sferično dno i postolja kolone.

3.1 Radni parametri

Parametri kojima će se proračunavati potrebne debljine stijenki, kojima su definirana naprezanja i preko kojih će se određivati dopuštene vrijednosti naprezanja na konstrukciju su:

- unutarnji tlak od 1.5 bar
- vanjski tlak vrijednosti atmosferskog tlaka
- vanjska temperatura vrijednosti 20 °C
- unutarnja temperatura vrijednosti 400 °C

3.2 Dimenzije kolone

Kolona za frakcijsku destilaciju ima sljedeće parametre (korištena je kolona proizvođača „DeDietrich“ kao predložak, slika 3.1):

- promjer $d = 900$ mm
- visina $h = 10$ m
- zapremnina $V = 5995$ l
- debljina stijenke $e = 10$ mm



Slika 3.1 Predložak prema kojemu se izrađuje spremnik [6]

Uz kolonu potrebno je i postolja na kojemu će kolona stajati. Za postolje nije nađen predložak te je on izrađen prema sljedećim dimenzijama:

- Visina postolja: $h_{postolja} = 2000$ mm
- Promjer na dnu postolja: $d_{dno} = 1100$ mm

Visina kolone i postolja zajedno iznosi 11 metara. Debljina stijenke postolja će biti jednaka debljini stijenke kolone.

3.3 Provjera debljini stijenki sferičnih i cilindričnih dijelova

Debljine stijenki je potrebno provjeriti s obzirom na vanjska i unutrašnja naprezanja. Kako bi se provjera mogla izvršiti potrebno je izabrati materijal od kojega je spremnik izrađen. Budući da su uvjeti unutar spremnika korozivni potrebno je izabrati čelik koji je otporan na korozivne uvjete i koji ima veliku vrijednost čvrstoće pri visokim temperaturama.

Zbog prethodno navedenih razloga izabrat će se austenitni čelik naziva X2CrNiMo17-12. Prema normi taj čelik se označava 1.4404, a također je poznat, prema drugoj klasifikaciji, kao AISI 316L. 1.4404 je austenitni čelik s niskom

količinom ugljika. U njemu se nalaze krom, nikal i molibden. Zbog dodatka molibdena, čiji je udjel između 2 i 2.5 %, ova vrsta čelika pokazuje bolju korozijsku otpornost od drugih vrsta austenitnih čelika. 1.4404 nije otporan na koroziju uzrokovanu morskom vodom. Najviše se koristi u automobilske industriji, preradi nafte, kemijske industriji i farmaceutskoj i medicinske industriji. 1.4404 je pogodan za zavarivanje i može se strojno obrađivati. Primjeren je za upotrebu do 550 stupnjeva Celzijevih [7]. Svojstva čelika 1.4404 pri temperaturi od 20 °C (tablica 3.1) i pri temperaturi od 400 °C (radna temperatura, tablica 3.2) su prikazani u sljedećim tablicama:

Tablica 3.1 Svojstva čelika pri temperaturi od 20 °C

R_e	260 MPa
$R_{p0.2}$	220 MPa
R_m	520 MPa
ρ	7840 kg/m ³

Tablica 3.2 Svojstva čelika pri temperaturi od 400 °C

R_e	135 MPa
$R_{p0.2}$	108 MPa
R_m	380 MPa
ρ	7840 kg/m ³

Nakon izbora materijala moguće je pristupiti provjeri debljine stijenke.

3.3.1 Provjera debljine stijenke cilindričnog plašta

Debljina stijenke cilindričnog plašta se proračuna prema normi EN 13445 [5], paragraf 7, formula 7.4.2. Proračunavati će se najveći komad cilindričnog plašta dužine 6 metara, jer će se u njemu javljati najveća naprezanja. Prvo je potrebno

odrediti potrebnu debljinu stijenke s obzirom na radni (unutrašnji) tlak, gdje se svojstva materijala uzimaju za radnu temperaturu:

$$e = p \cdot \frac{D_i}{(2 \cdot f \cdot z - P)} + c + c_{ext} \quad (1)$$

$$= 0.15 \cdot \frac{900}{(2 \cdot 11250 \cdot 1 - 0.15)} + 1 + 1 = 2.602 \text{ mm}$$

$$f = \max\left(\frac{R_e}{1.5}, \min\left(\frac{R_m}{3}, \frac{R_e}{1.2}\right)\right) = \max(90, \min(126.67, 112.5)) \quad (2)$$

$$= 112.5 \text{ MPa}$$

gdje je:

- e – potrebna debljina stijenke zbog djelovanja unutrašnjeg tlaka, mm
- P – vrijednost unutrašnjeg tlaka, MPa
- D_i – unutarnji promjer spremnika, mm
- f – dopušteno naprezanje materijala, MPa
- c – dopuštena debljina korodiranog dijela stijenke s unutarnje strane spremnika, mm
- c_{ext} – dopuštena debljina korodiranog dijela stijenke s vanjske strane, mm
- z – koeficijent zavora

Debljina stijenke cilindričnog plašta od 10 mm zadovoljava.

Nakon provjere debljine stijenke s obzirom na radne uvjete, potrebno je provjeriti stijenku s obzirom na vanjske uvjete. Kako je prije navedeno vanjski tlak je jednak atmosferskom tlaku, a svojstva stijenke se uzimaju za vanjsku projektну temperaturu od 20 °C. Dopuštena granica tečenja se izračunava prema formuli 8.4.3-1 iz norme EN 13445 [5]:

$$\sigma_e = \frac{R_{p0.2}}{1.25} = \frac{220}{1.25} = 176 \text{ MPa} \quad (3)$$

Nakon određene granice tečenja potrebno je odrediti točku početka granice tečenja, koja se računa prema formuli 8.5.2-4 [5]:

$$p_y = \sigma_e \cdot \frac{e_a}{R} = 176 \cdot \frac{8}{455} = 3.094 \text{ MPa} \quad (4)$$

gdje je:

- e_a – analitička debljina stijenke (ukupna debljina stijenke umanjena za dopuštenu debljinu korodiranog materijala), mm
- R – srednja vrijednost polumjera, mm

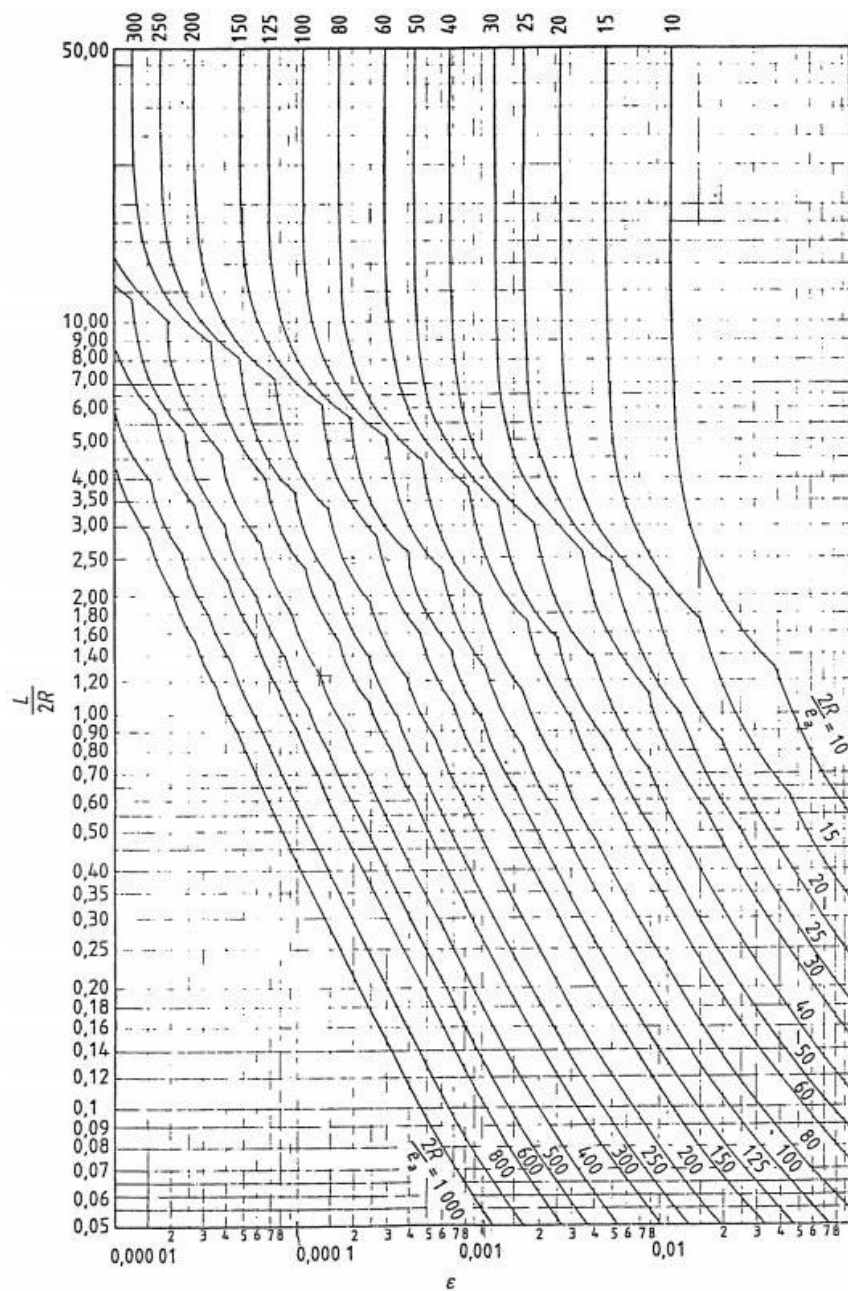
Faktor naprezanja iznosi:

$$Z = \pi \cdot \frac{R}{L} = 3.141 \cdot \frac{455}{6000} = 0.238 \text{ MPa} \quad (5)$$

gdje je L duljina cilindričnog plašta izražena u mm. Potom se izračunava teoretski elastični tlak nestabilnosti cilindričnih, koničnih i sferičnih dijelova P_m prema formuli 8.5.2-5 [5]:

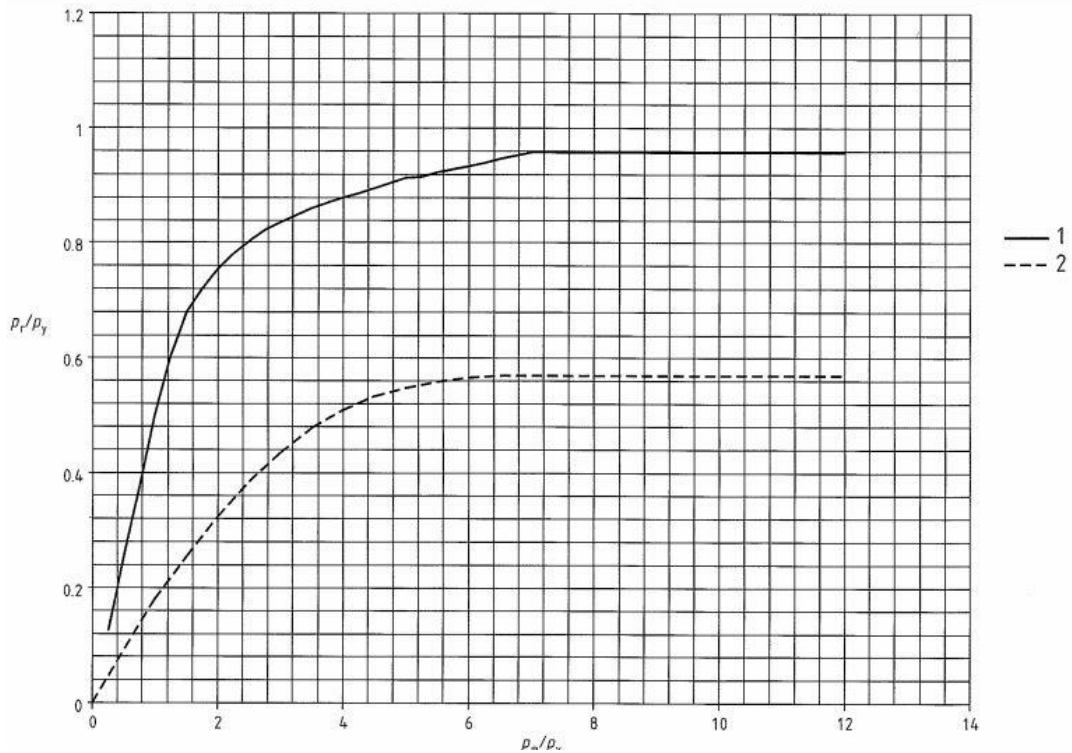
$$p_m = \frac{E \cdot e_a \cdot \varepsilon}{R} = \frac{200000 \cdot 8 \cdot 0.000152}{455} = 0.534 \text{ MPa} = 534 \text{ kPa} \quad 6$$

gdje ε predstavlja vrijednost kritične deformacije koja se određuje iz dijagrama 8.5.3 iz norme EN 13445 [5], prikazanog na slici 3.2.



Slika 3.2 Dijagram za određivanje vrijednosti kritične deformacije [5]

Preko omjera p_m/p_y i dijagrama 8.5.5 se određuje vrijednost omjera p_r/p_y , koji je prikazano na slici 3.3, te ona iznosi 0.086.



Slika 3.3 Dijagram omjera tlakova, linija 1 se koristi za cilindrične elemente, a linija 2 za sferične elemente [5]

Naposljetku se iz prehodno određenih veličina određuje najveći dopušteni vanjski tlak na spremnik, P_{max} :

$$p_{max} = \left(\frac{\left(\frac{p_r}{p_y} \right) / 1.5}{1.5} \right) \cdot p_y = \left(\frac{0.086}{1.5} \right) \cdot 3.094 = 0.177 \text{ MPa} = 177 \text{ kPa}, \quad (7)$$

tj. zadovoljen je uvjet jer je vanjski tlak manji od maksimalno dopuštenog vanjskog tlaka. Stijenka je predimenzionirana kako bi se ostalo na strani sigurnosti.

3.3.2 Provjera debljine sferičnog dna

Nakon provjere cilindričnog plašta potrebno je još izvršiti provjeru debljine stijenke sferičnog dna. Kao i kod cilindričnog plašta prvo se provjera debljina stijenke s obzirom na radne uvjete, prema formuli 7.4.4 [5]:

$$e = p \cdot \frac{D_i}{(4 \cdot f \cdot z - p)} + c + c_{ext} \quad (8)$$

$$= 0.15 \cdot \frac{900}{(4 \cdot 11250 \cdot 1 - 0.15)} + 1 + 1 = 2.301 \text{ mm},$$

gdje su oznake jednake kao i kod jednadžbe (1). S obzirom na radne uvjete debljina stijenke je zadovoljena. Proces provjere debljine stijenke s obzirom na vanjske uvjete je sličan postupku provjere cilindričnog plašta te je jednadžba (3) jednaka za sferično dno kao i za cilindrični plašt. Točka početka granice tečenja se računa prema jednadžbi 8.7.7-1 iz norme EN 13445 [5]:

$$p_y = 2 \cdot \sigma_e \cdot \frac{e_a}{R} = 2 \cdot 176 \cdot \frac{8}{455} = 6.188 \text{ MPa} \quad (9)$$

Potom se izračunava teoretski elastični tlak nestabilnosti, prema jednadžbi 8.7.1-2:

$$p_m = 1.21 \cdot E \cdot \frac{e_a^2}{R^2} = 1.21 \cdot 200000 \cdot \frac{8^2}{455^2} = 74.8 \text{ kPa} \quad (10)$$

Najveći dopušteni vanjski tlak se računa jednako kao i za cilindrični plašt, tj. koristi se jednadžba (7), dok se omjer p_r/p_y uzima sa dijagrama na slici 3.3 i on iznosi 0.57, a p_{max} iznosi:

$$p_{max} = \left(\frac{\left(\frac{p_r}{p_y} \right)}{1.5} \right) \cdot p_y = \left(\frac{0.57}{1.5} \right) \cdot 6.188 \quad (11)$$

$$= 2.352 \text{ MPa} = 2352 \text{ kPa}$$

Vidljivo je da je stijenka predimenzionirana za ove slučajeve, ali potrebno je uzeti u obzir da će se unutar nje nalaziti fluidi i povećati opterećenja na stijenku.

3.4 Izbor prirubnica

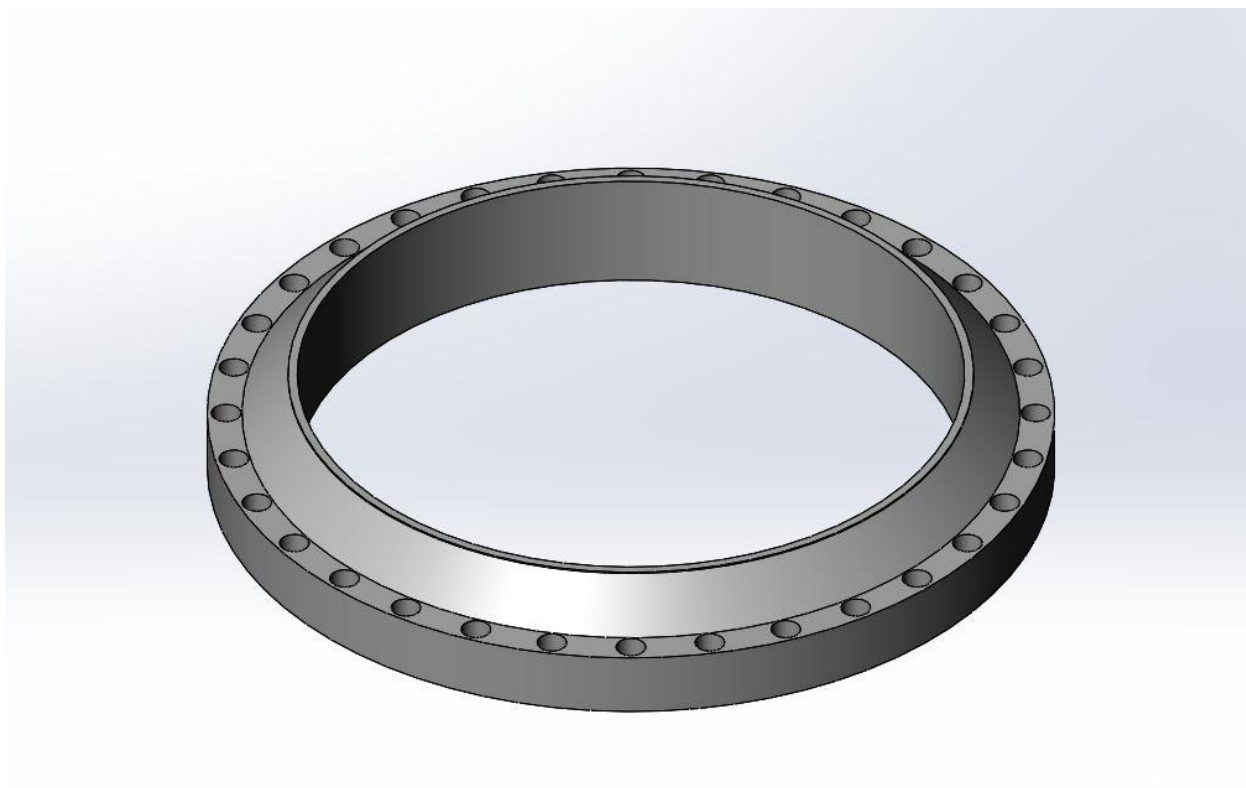
Budući da je spremnik velikih dimenzija potrebno ga je izraditi od više komada. Izrađen je od 3 komada, centralnog cilindričnog plašta i sferičnog dna, koje se nalazi na vrhu i dnu spremnika. Dijelovi se povezuju s prirubnicama. Prirubnice se izabiru prema normi ASME B16.47-2011 [8], prema dijelu „Large Diameter Steel Flanges“. Izabiru se iz druge norme nego ostatak spremnika, jer program PV Elite nema ponuđen izbornik za mjenjanje izbora prirubnica. Program i dalje proračunava prirubnice prema normi EN 13445. Materijal prirubnice je isti kao i materijal spremnika kako bi mogla izdržati veliku radnu temperaturu. Kod izbora prirubnice također je potrebno paziti na tlak koji prirubnica može izdržati. Specifikacije odabrane prirubnice su prikazane u tablici 3.3, a objašnjenja specifikacija su dana ispod tablice.

Tablica 3.3 Specifikacije prirubnice

Klasa	150
Seriya	Seriya A
Razred	2.2
Nominalni promjer	910 mm

Klasa 150 označava da je prirubnica izrađena kako bi mogla izdržati tlak do vrijednosti od 150 psi. Vrijednost 150 psi definira opterećenje od 150 funti po kvadratnom inču, tj. konvergirano u bar je vrijednost od oko 10 bar, što zadovoljava uvjete za radni tlak. Seriya A se odnosi na prirubnice s većim promjerima vijaka koji se nalaze na njima i one se koriste za veće radne tlakove i temperature. Razred 2.2 označava vrstu materijala od kojega je prirubnica izrađena, koji je u ovom slučaju jednak onomu od kojega je ostatak spremnika

izrađen. Nominalni promjer odgovara vanjskom promjeru spremnika. Izgled prirubnice je prikazan na slici 3.4.



Slika 3.4 Prirubnica

Dimenzije prirubnice su dane u prilogu.

3.5 Plitice

Plitice su pladnjevi koji se nalaze unutar spremnika, a na njima se talože različite frakcije ugljikovodika. Oni se nalaze na različitim visinama u koloni, te se na svakome odvaja druga komponenta. U ovoj koloni za destilaciju nalaze se četiri pladnja. Svaki od četiri pladnja je istog oblika, jedina razlika je u tome što gornja tri pladnja imaju otvor za odvod ekstrakta promjera 150 mm, a najniži pladanj ima otvor od 200 mm. Pladnjevi su izrađeni prema uputama rada „Tray Columns: Performance“ [9]. Prvo što je potrebno kako bi se odredila debljina pladnja je izabrati vrstu materijala od kojega će se pladanj izrađivati. Bit će odabran

nehrđajući čelik zbog korozivnih uvjeta koji se javljaju tijekom frakcijske destilacije, tj. bit će odabran isti materijal kao i za ostatak kolone. Rupe za prolaz plinova se mehanički probijaju kroz pladanj. Zbog načina na koji se probijaju potrebno je da debljina stijenke bude manja od promjera rupa. Budući da je odabran nehrđajući čelik, debljina plitice će biti 2.77 mm (da je odabran ugljični čelik debljina plitice bi iznosila 3.40 mm). Rupe koje se nalaze mogu imati veći (od 12.7 do 19 mm) i manji promjer (od 4.76 do 6.35 mm). Izabrane su rupe s većim promjerom, koje su jeftinije za izradu i imaju veću otpornost na zaprljanje [9]. Zaprljanje se odnosi na nakupljanje nečistoća, naslaga ili taloga na površinama pladnjeva, što može dovesti do smanjenja učinkovitosti procesa, uzrokovati smanjenje koeficijenta toplinske provodnosti ili dovesti do ometanja protoka fluida. Veličina površine koje rupe zauzimaju na površini pladnja mora se kretati između 5 – 16 %. Ako je ta površina manja od 5 % udaljenost između rupa postaje prevelika, što se djelomično može smanjiti povećavanjem promjera rupa. Ako je površina rupa veća od 16 % ukupne površine postoji mogućnost da će doći do curenja tekućine s pladnja prema dolje (što se ne smije dogoditi) [9]. Izabrani promjer rupa će biti 19 mm. Površina cijelog pladnja, kojemu je promjer 900 mm, jednak kao i unutarnji promjer kolone za frakcijsku destilaciju, iznosi:

$$A = \frac{d^2\pi}{4} = \frac{900^2\pi}{4} = 636172.5 \text{ mm}^2 \quad (12)$$

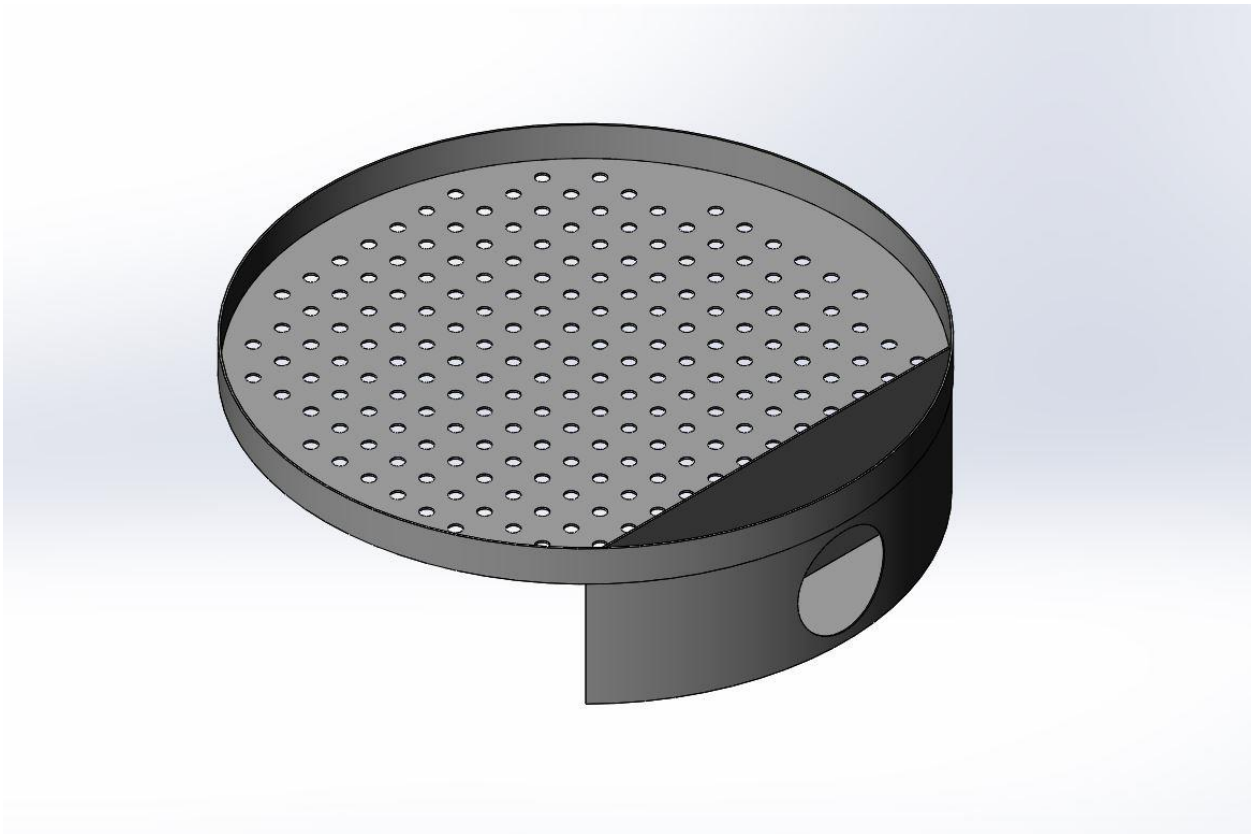
Visina rubova na pladnju je 50 mm, dok visina stijenke koja odvaja fluid od izlaza mora biti 15 mm manja od rubova. Udaljenost stijenke za odvod je 127 mm udaljena od ruba [9]. Debljine stijenki su jednake debljini pladnja. Površina koja preostaje nakon što se od nje oduzmu debljine stijenki i kružni odsječak za odvod fluida iznosi 517782.35 mm². Određeno je da će površine rupa na pladnju iznositi 10% ukupne preostale površine pladnja, tj. 51778.24 mm². Promjer jedne rupe iznosi 283.5 mm². Iz prethodnog je određeno:

$$n = \frac{A_{os}}{A_{1r}} = \frac{51778.24}{283.5} = 182.63 = 183 \quad (13)$$

gdje je:

- n – broj rupa
- A_{os} – površina pladnja nakon što je početne površine oduzeta površina stijenki i odvoda, mm^2
- A_{1r} – površina jedne rupe, mm^2

Potrebno je 183 rupe kako bi se zadovoljili svi prethodno navedeni uvjeti. 3D model pladnja je prikazan na sljedećoj slici.



Slika 3.5 Plitica (rešetkasti pladanj)

Ukupni volumen plitice se uzima iz programa SolidWorks. Volumen plitice s izlaznim promjerom od 150 mm i plitice s izlaznim promjerom od 200 mm prikazani su u tablici 3.4.

Tablica 3.4 Volumeni plitica

V_{150}	2564400 mm ³
V_{200}	2541689 mm ³

Volumeni su potrebni kako bi se mogla izračunati mase pojedinih plitica, jer se u programu PV Elite ne nalaze već definirane plitice, te se opterećenje koje one izazivaju ručno upisuje. Mase plitica se računaju kao umnožak gustoće čelika (koja iznosi 7840 kg/m³) i volumena plitice. Mase plitica i njihove težine su prikazane u tablici 3.5.

Tablica 3.5 Mase i težine plitica

m_{150}	20.10 kg
m_{200}	19.93 kg
G_{150}	197.23 N
G_{200}	195.48 N

3.6 Analitički proračun kolone

3.6.1 Izrada spremnika u programu PV Elite

U prethodnim potpoglavljima su definirane gotovo sve stavke koje je potrebno ručno unjeti u program PV Elite, kako bi on mogao izračunati vrijednosti pojedinih opterećenja na spremnik. Fluidi koji će se ukapljivati na pliticama, i njihove gustoće su navedene u tablici 3.6.

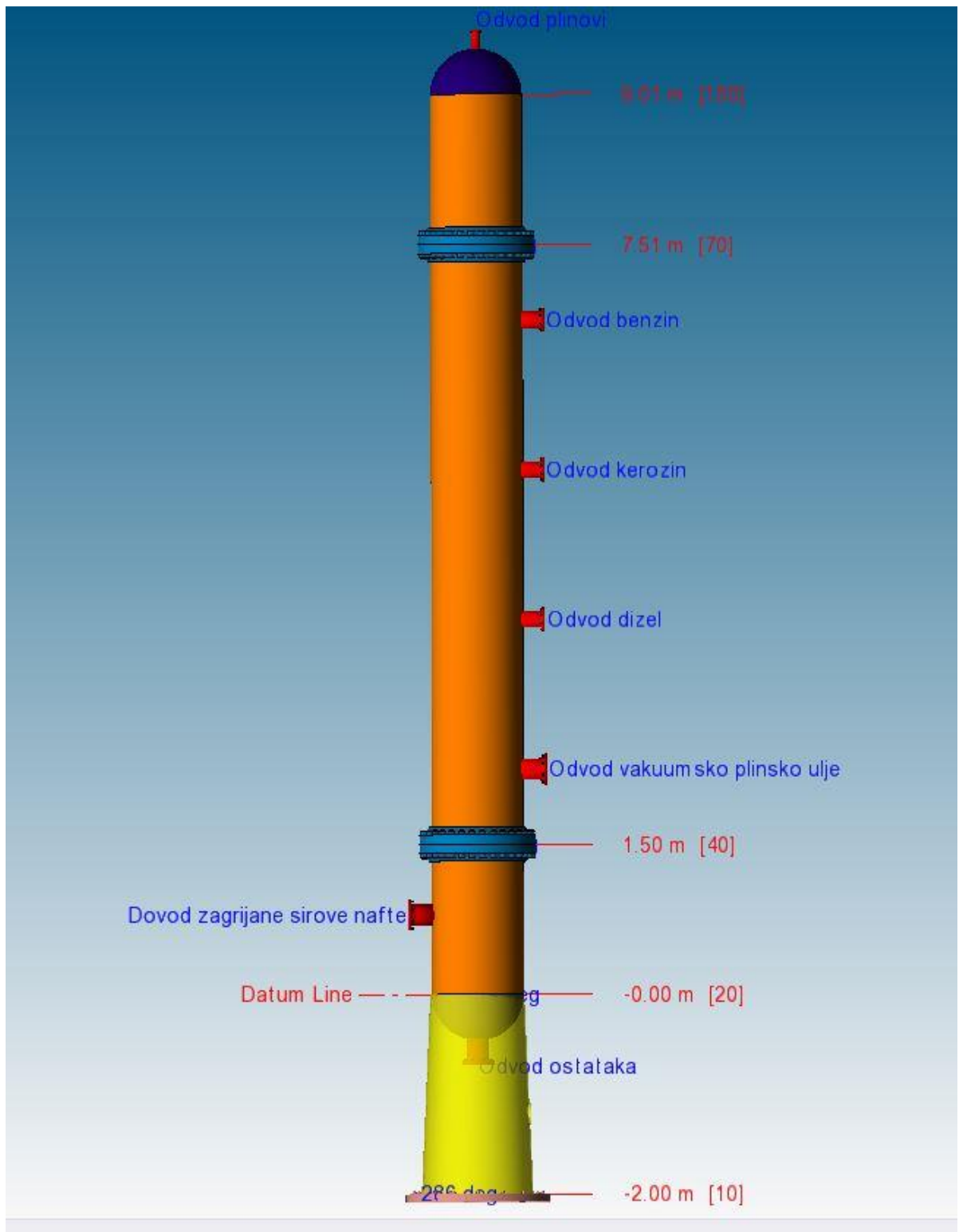
Tablica 3.6 Ekstrakti frakcijske destilacije

Benzin	780 kg/m ³
Kerozin	840 kg/m ³
Dizel	875 kg/m ³

Vakuumsko plinsko ulje	925 kg/m^3
------------------------	----------------------

Uz pladnjeve je potrebno postaviti odvode za fluide. Odabrani promjeri odvoda su 6 in (152.4 mm) za benzin, kerozin i dizel, odvod vakuumskog plinskog ulja koji je 8 in (203.2 mm) i odvod plinova koji je promjera 3 in (76.2 mm). Promjeri su odabrani u inčima prema standardu za cijevi. Mase odvoda program računa automatski, jer se cijevi za odvod i dovod uzimaju iz normi.

Uz to na dnu je postavljen odvod za smjesu koja nakon zagrijavanja u peći ne isparava, već ostaje u tekućem obliku. Ta smjesa sadrži bitumen, asfalt i ostale spojeve, a za gustoću smjese je uzeta gustoća bitumena koji je najgušći u smjesi i ona iznosi 940 kg/m^3 . Kako bi se osiguralo da je proračun na strani sigurnosti, postavljeno je da se smjesa nalazi sve do početka dovoda zagrijane nafte. Kako bi se lakše postavili dovodi i odvodi tekućina, sferična dna su izrađena od dva dijela, tj. od sferičnog dna i komada cilindričnog plašta duljine jednog metra. Za proračun to neće imati nikakvog utjecaja, osim toga što će se posebno izražavati opterećenja na tim dijelovima.



Slika 3.6 Izgled spremnika u programu PV Elite

Za izgled spremnika su u prethodnim potpoglavljima opisani svi parametri. Spremnik se sastoji od: dva sferična dna, dva produžetka sferičnog dna, cilindričnog plašta, postolja i četiri prirubnice. Uz to su i unesena opterećenja koja

izazivaju plitice. Naposljetku je potrebno unjeti parametre vezane za vjetar i potres.

Geografski položaj ima veliki utjecaj na vrijednosti naprezanja izazvanih potresom i vjetrom. Određeno je da će se kolona za frakcijsku destilaciju nalaziti na području kontinentalne Hrvatske, točnije na području Siska. U sljedećim potpoglavljima su opisani koeficijenti koji će služiti za izračun vrijednosti opterećenja uzrokovanih vjetrom i potresom.

3.6.2 Mase i težine elemenata

Kako je i navedeno u potpoglavlju 3.6.1, sferično dno se izrađivalo od dva dijela te će se zbog toga kroz nastavak proračuna ti dijelovi računati zasebno. Dijelovi od kojih se sastoji spremnik i njihove mase i težine su prikazani u tablici 3.7.

Tablica 3.7 Mase i težine elemenata

Naziv elementa	Masa elementa, kg	Težina elementa, N
Postolje	1063.7	10434.9
Sferično dno (x2)	101.99	1000.5
Produžetak sferičnog dna (x2)	336.21	3298.2
Prirubnica (x4)	369.30	3622.9
Cilindrični plašt	1344.82	13192.7
Ukupno	4762.12	46716.4

Uz prethodno navedene mase, potrebno je i izraziti mase i težine dodatka na spremnik. Ti dodatci obuhvaćaju cijevi za odvod i dovod fluida, tekućinu koja se zadržava na dnu spremnika, plitica i tekućine koje se talože na pliticama.

Tablica 3.8 Mase i težine detalja

Naziv dodatka	Masa, kg	Težina, N
Tekućina koja se	202.31	1984.7

nalazi u sferičnom dnu		
Tekućina koja se nalazi u produžetku sferičnog dna	376.93	3697.7
Dovod sirove nafte (promjer Ø200)	20.41	200.2
Odvod vakuumskog plinskog ulja (promjer Ø200)	20.41	200.2
Odvod benzina, kerozina i dizela (promjer Ø150, x3)	14.08	138.2
Plitica 1 (vakuumsko plinsko ulje)	49.41	484.7
Plitica 2 (dizel)	48.01	471
Plitica 3 (kerozin)	46.9	460.5
Plitica 4 (benzin)	44.99	441.3
Odvod plinova (promjer Ø75)	6.87	67.4
Ukupno	830.31	8145.3

Prethodno navedene mase su potrebne kako bi se mogle utvrditi maksimalno i minimalno vlastito opterećenje. Minimalno vlastito opterećenje se sastoji od vrijednosti težina navedenih u tablici 3.7 i elemenata koji su postavljeni na spremnik prije njegovog puštanja u pogon. Maksimalno vlastito opterećenje se sastoji od minimalnog vlastitog opterećenja i težina dijelova koji se montiraju na spremnik nakon postavljanja, ali u ovom slučaju su to jednake težine. Uz njih će biti potrebna i težina tekućine koja se nalazi u koloni za vrijeme rada kolone. Vrijednosti težina su:

Tablica 3.9 Težine

G_{min}	49455.7 N
-----------	-----------

G_{max}	49455.7 N
L	5682.3 N

3.6.3 Opterećenja uzrokovana vjetrom

Određivanje opterećenja uzrokovano vjetrom se radi prema normi EN 1991, prema dijelu „Eurocode 1: Action on structures – Part 1-4: General Actions – Wind Actions“ [10]. Vrijednost srednje brzine vjetra, za područje Siska, koju je potrebno unjeti u program, $v_{b,0}$ iznosi 16.3 m/s [11].

Vrijednost proračunske brzine vjetra iznosi:

$$v_b = c_d \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1 \cdot 1 \cdot 16.3 = 16.3 \text{ m/s} \quad (14)$$

gdje je:

- $v_{b,0}$ – vrijednost srednje brzine vjetra za područje Siska, m/s
- c_d – dinamički koeficijent (preporučena vrijednost je 1)
- c_{season} – faktor godišnjeg doba (preporučena vrijednost je 1)

Vrijednost opterećenja koji vjetar izaziva na stijenku:

$$q_{ref} = 0.5 \cdot \rho \cdot v_b^2 = 0.5 \cdot 1.250 \cdot 16.3^2 = 0.166 \text{ kPa} = 3.47 \text{ psf} \quad (15)$$

gdje je ρ gustoća zraka i ona iznosi 1.250 kg/m³. Vrijednost opterećenja je napisana i u imperijalnom sustavu mjerenja, jer u nastavku postoje jednadžbe koje koriste isključivo taj sustav jedinica.

Koeficijent hrapavosti se razlikuje za svaki dio. U jednadžbi 16 prikazat će se izračun za postolje, a za ostale dijelove neće jer je postupak ponavljajući.

$$c_r(z) = K_t \cdot \ln\left(\frac{h_{min} + h_{base}}{z_0}\right) = 0.22 \cdot \ln\left(\frac{8 + 0}{0.3}\right) \quad (16)$$

$$= 0.722$$

gdje je:

- K_t – koeficijent terena
- h_{min} – minimalna potrebna visina spremnika (određuje se iz norme Eurocode 1. Actions on Structure, Part 1-4, General Actions – Wind Actions [10], iz tablice 4.1), m
- h_{base} – udaljenost dna elementa od poda, m
- z_0 – dužina hrapavosti (također određeno iz norme Eurocode 1.), m

Za određivanje sile na elementu je još potrebno izračunati koeficijent izloženosti vjetru:

$$c_e = c_r(z)^2 \cdot \left(1 + 2 \cdot q_{ref} \cdot \frac{K_t}{(c_r(z) \cdot c_t)}\right) \quad (17)$$

$$= 0.722^2 \cdot \left(1 + 2 \cdot 3.5 \cdot \frac{0.22}{(0.722 + 1)}\right) = 1.634$$

gdje je:

- c_t – koeficijent temperature

Sila koja se javlja na postolje će iznositi:

$$R_f = q_{ref} \cdot c_e \cdot c_d \cdot c_f \cdot A = 0.166 \cdot 1.634 \cdot 1 \cdot 0.7 \cdot 0.0172 = 469.8 \text{ N} \quad (18)$$

gdje je c_f koeficijent vjetra, koji se prema normi uzima 0.7 [10]. Kao što je već navedeno postupak je jednak za svaki element te će se zbog toga u tablici 3.10 prikazati vrijednosti sila na ostale elemente:

Tablica 3.10 Vrijednosti sila na elementima uzrokovane vjetrom

Element	Sila, N
Postolje	469.8
Sferično dno (1)	0.006
Produžetak sferičnog dna (1)	314.7
Prirubnica (1)	35
Prirubnica (2)	35
Cilindrični plašt	1258.9
Prirubnica (3)	37.3
Prirubnica (4)	37.6
Produžetak sferičnog dna (2)	346.9
Sferično dno (2)	86.4
Ukupno	2621.6

3.6.4 Opterećenja uzrokovana potresom

Opterećenja uzrokovana potresom se određuju prema normi EN 1998-1 [12], te je za njihov izračun u programu potrebno unjeti nekoliko koeficijenata: koeficijent tla (S), koeficijent ponašanja tla (q) i koeficijent horizontalnog vršnog ubrzanja tla (a_g). Koeficijent ubrzanja tla se određuje preko web aplikacije „Karte potresnih područja Republike Hrvatske“ [13] te ona iznosi 0.152 m/s^2 za područje Siska [13]. Za podlogu je izabran beton, te koeficijent tla u tom slučaju iznosi 1. Koeficijent ponašanja tla također iznosi 1. Prvo je potrebno odrediti osnovno razdoblje vibracije T , koje se odnosi na razdoblje u kojemu građevina nastavlja s vibriranjem nakon vanjskog podražaja:

$$T = \frac{1}{f_n} = \frac{1}{4.083} = 0.245 \text{ s} \quad (19)$$

gdje je f_n prirodna frekvencija strukture i ona iznosi 4.083 Hz, a izračunava se iterativnim postupkom u kojemu se koriste matrice krutosti i mase spremnika. Vrijednost lateralnog ubrzanja iznosi:

$$S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left(\frac{2.5}{q}\right) = 0.152 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2.5}{1}\right) = 0.380 \quad (20)$$

Sila u osi F_b iznosi:

$$F_b = S_d(T) \cdot W \cdot \lambda = 0.380 \cdot 55138 \cdot 0.85 = 17809.55 \text{ N} \quad (21)$$

gdje je:

- W – težina spremnika za vrijeme rada, N
- λ – korekcijski faktor, koji za ovu vrstu spremnika iznosi 0.85 (vertikalni spremnik)

Opterećenje za prvi element (postolja), iznosi:

$$F_1 = \frac{F_b \cdot W_1 \cdot h_1}{m_{sum} \cdot h_{sum}} \cdot Sc = \frac{17810 \cdot 10434 \cdot 1}{4762 \cdot 59.88} \cdot 1 = 651.73 \text{ N} \quad (22)$$

gdje je:

- W_1 – težina prvog elementa, N
- h_1 – udaljenost težišta elementa od dna, m
- m_{sum} – ukupna masa svih elemenata, kg
- h_{sum} – suma udaljenosti težišta svih elemenata, m
- Sc – skalarni faktor korekcije

Zbog toga što je postupak jednak za sve elemente, opterećenja za ostale elemente su dana u sljedećoj tablici:

Tablica 3.11 Opterećenja na elemente uzrokovane potresom

Element	Udaljenost težišta, m	Opterećenje, N
Postolje	1	651.73
Sferično dno (1)	1.9998	406.3
Produžetak sferičnog dna (1)	2.75	1230.89
Prirubnica (1)	3.5833	827.94
Prirubnica (2)	3.5928	830.14
Cilindrični plašt	6.51	6503.14
Prirubnica (3)	9.5928	2216.46
Prirubnica (4)	9.6024	2218.66
Produžetak sferičnog dna (2)	10.27	2160.06
Sferično dno (2)	11.02	750.47
Ukupno	59.88	17795.79

3.6.5 Provjera naprezanja

Za provjeru dopuštenih vlačnih i tlačnih naprezanja na spremniku potrebno je odrediti dopuštena naprezanja za ta dva slučaja. Dopuštena vrijednost vlačnog naprezanja je prethodno izračunata (2) i iznosi 112.5 MPa. Za vrijednost dopuštenog tlačnog naprezanja, koje je za ovaj spremnik važnije, prvo je potrebno izračunati koeficijente K , α i Δ . Jednadžbe potrebne za proračun koeficijenata i dopuštenog tlačnog naprezanja $\sigma_{c,all}$ su dane u nastavku:

$$K = \frac{1.21 \cdot E \cdot e_a}{\sigma_{e,400}} = \frac{1.21 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 8}{86.4} \quad (23)$$

gdje je:

- E – modul elastičnosti odabranog materijala, MPa

- $\sigma_{e,400}$ – dopuštena granica elastičnosti na radnoj temperaturi ((3), korištena granica tečenja za radnu temperaturu), MPa

Za koeficijent α potrebno je poznavati omjer D/e_a , kako bi se mogla izabrati formula iz norme EN 13445 [5] koja se koristi za izračun:

$$\frac{D}{e_a} = \frac{900}{8} = 112.5 < 424 \quad (24)$$

Te se zbog toga koristi jednadžba 16.14.17 [5]:

$$\alpha = \frac{0.83}{\sqrt{1 + 0.005 \cdot \frac{D}{e_a}}} = \frac{0.83}{\sqrt{1 + 0.005 \cdot 112.5}} = 0.664 \quad (25)$$

Nakon toga potreban je umnožak prethodno navedenih koeficijenata, koji iznosi 16.53 te se zbog toga za izračun koeficijenta Δ koristi jednadžba 16.14.18 iz norme EN 13445 [5]:

$$\Delta = \frac{1 - 0.4123/\alpha K^{0.6}}{1.5} = \frac{1 - 0.4123/16.53^{0.6}}{1.5} = 0.6156 \quad (26)$$

Naposljetku se računa vrijednost dopuštenog tlačnog naprezanja za stijenke:

$$\sigma_{c,all} = \sigma_{e,400} \cdot \Delta = 86.4 \cdot 0.6156 = 53.19 \text{ MPa} \quad (27)$$

Naprezanja koja uzrokuju radni tlak i vanjski tlak se računaju prema sljedećoj jednadžbi:

$$P = \frac{D \cdot p}{(D + 2 \cdot e_a)^2 - D^2} \quad (28)$$

gdje je:

- D – unutarnji promjer spremnika, mm
- e_a – debljina stijenke umanjena za dopušteni korodirani dio stijenke, mm
- p – tlak, N/mm^2

Vrijednosti naprezanja izazvanih tlakom su prikazana u sljedećoj tablici:

Tablica 3.12 Naprezanja uzrokovana unutrašnjim i vanjskim tlakom

P_i	4.19 MPa
P_e	-2.99 MPa

Naprezanje koja izaziva atmosferski tlak će se koristiti kod proračuna opterećenja na spremnik i postolje. Naprezanja koja uzrokuje unutrašnji (radni) tlak će se koristiti samo za provjeru spremnika.

Naprezanja uzrokovana težinom će se koristiti kod provjere čvrstoće spremnika i postolja. Za izračun naprezanja na postolje će se koristiti površina presjeka postolja na dnu, a za spremnik se koristi površina poprečnog presjeka spremnika. Površine se računaju prema sljedećoj jednadžbi:

$$A = \frac{D_v^2 - D_u^2}{4} \cdot \pi \quad (29)$$

Veličine površina koje se koriste u proračunu čvrstoće su:

Tablica 3.13 Površine elemenata

Postolje	29239 mm^2
Spremnik	28581 mm^2

Na postolje i spremnik djeluju težine glavnih dijelova spremnika, dodatnih dijelova i tekućine. Za opterećenja koja djeluju na postolje u obzir će se uzimati težina zajedno s tekućinom koja se nalazi u spremniku dok je spremnik u pogonu. Uz to će se provjeriti i naprezanja prilikom probnog rada spremnika gdje je spremnik napunjen s vodom. Težina vode koja se nalazi u spremniku iznosi:

$$L_{test} = V \cdot \rho_w \cdot g = 5.995 \cdot 1000 \cdot 9.81 = 58810.95 \text{ N} \quad (30)$$

Opterećenja koja djeluju na spremnik u sebi neće uključivati težinu postolja. Naprezanja na spremnik i postolje uzrokovana težinom se računaju prema jednadžbi 31:

$$\sigma_G = \frac{G}{A} \quad (31)$$

Vrijednosti naprezanja su prikazana u sljedećoj tablici:

Tablica 3.14 Naprezanja od težine

Naprezanje od težine spremnika s postoljem	$\sigma_{G,p}$	−1.63 MPa
Naprezanje od težine spremnika bez postolja	$\sigma_{G,s}$	−1.33 MPa
Naprezanje od radne tekućine i težine spremnika s postoljem	$\sigma_{G,L,p}$	−1.91 MPa
Naprezanje od radne tekućine i težine spremnika bez postolja	$\sigma_{G,L,s}$	−1.71 MPa
Naprezanje izazvano vodom u probnom radu i težine spremnika s postoljem	$\sigma_{test,p}$	−3.7 MPa

Naprezanje izazvano vodom u probnom radu i težine spremnika bez postolja	$\sigma_{test,s}$	-3.42 MPa
--	-------------------	-----------

Uz prethodno navedena naprezanja za provjeru svih slučajeva čvrstoće su potrebna još naprezanja uzrokovana potresom i vjetrom. Naprezanja uzrokovana vjetrom i potresom softverski paket PV Elite računa automatski te su njihove vrijednosti prikazane u sljedećoj tablici:

Tablica 3.15 Naprezanja uzrokovana vjetrom i potresom

	Spremnik s postoljem	Spremnik bez postolja
Oznaka	W_p, E_p	W_s, E_s
Savijanje uzrokovano vjetrom, MPa	1.9	1.99
Savijanje uzrokovano potresom, MPa	16.84	17.61

Naprezanja nastala od vjetra i potresa djeluju u svim smjerovima, tj. opterećuju spremnik i na tlak i na vlak.

Postolje će se provjeravati na 5 od 9 kombinacija naprezanja, a spremnik se ispituje na sve kombinacije. Budući da je dopušteno tlačno naprezanje manje od vlačnog, ispitivat će se samo tlačna čvrstoća. Kod svih kombinacije su uzimani isti smjerovi naprezanja, te je zbog toga svugdje jednak predznak.

Za postolje se ispituju sljedeće kombinacije naprezanja:

- 1) Pogon pod vanjskim tlakom i pod utjecajem vjetra

$$P_e + \sigma_{G,L,p} + 1.1 \cdot W_p = 2.99 + 1.91 + 1.1 \cdot 1.9 = 6.99 \text{ MPa} \quad (32)$$

$$< \sigma_{c,all} = 53.19 \text{ MPa}$$

Ovaj uvjet za postolje zadovoljava.

2) Pogon bez tlaka pod utjecajem vjetra

$$\sigma_{G,L,p} + 1.1 \cdot W_p = 1.91 + 1.1 \cdot 1.9 = 4 \text{ MPa} < \sigma_{c,all} \quad (33)$$

$$= 53.19 \text{ MPa}$$

Ovaj uvjet za postolje zadovoljava.

3) Pogon pod vanjskim tlakom pod utjecajem potresa

$$P_e + \sigma_{G,L,p} + E_p = 2.99 + 1.91 + 16.84 = 21.74 \text{ MPa} < \sigma_{c,all} \quad (34)$$

$$= 53.19 \text{ MPa}$$

Ovaj uvjet za postolje zadovoljava.

4) Pogon bez tlaka pod utjecajem potresa

$$\sigma_{G,L,p} + E_p = 1.91 + 16.84 = 18.75 \text{ MPa} < \sigma_{c,all} = 53.19 \text{ MPa} \quad (35)$$

Ovaj uvjet za postolje zadovoljava.

5) Ispitivanje s vanjskim tlakom, spremnikom napunjenim vodom i pod utjecajem vjetra

$$P_e + \sigma_{test,p} + 0.6 \cdot W_p = 2.99 + 3.42 + 0.6 \cdot 1.9 = 7.55 \text{ MPa} \quad (36)$$

$$< \sigma_{c,all} = 53.19 \text{ MPa}$$

Ovaj uvjet za postolje zadovoljava.

Nakon provjere postolja potrebno je provjeriti spremnik. Naprezanja nastala vjetrom i potresom djeluju u svim smjerovima, tako da će se njihov predznak uzimati za onaj slučaj gdje će kombinirana naprezanja biti najveća. Na spremnik se vrše sve provjere kako je već ranije navedeno:

1) Pogon pod unutarnjim tlakom

$$P_i + \sigma_{G,s} = 4.19 + 1.33 = 5.52 \text{ MPa} < \sigma_{c,all} = 53.19 \text{ MPa} \quad (37)$$

Ovaj uvjet za spremnik zadovoljava.

2) Pogon pod unutarnjim tlakom i pod utjecajem vjetra

$$\begin{aligned} 0.9 \cdot P_i + \sigma_{G,L,s} + 1.1 \cdot W_s &= 0.9 \cdot 4.19 + 1.71 + 1.1 \cdot 1.99 \\ &= 7.67 \text{ MPa} < \sigma_{c,all} = 53.19 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (38)$$

Ovaj uvjet za spremnik zadovoljava.

3) Pogon pod vanjskim tlakom i pod utjecajem vjetra

$$\begin{aligned} P_e + \sigma_{G,L,s} + 1.1 \cdot W_s &= 2.99 + 1.71 + 1.1 \cdot 1.99 = 6.89 \text{ MPa} \\ &< \sigma_{c,all} = 53.19 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (39)$$

Ovaj uvjet za spremnik zadovoljava.

4) Pogon bez tlaka i pod utjecajem vjetra

$$\begin{aligned} \sigma_{G,L,s} + 1.1 \cdot W_s &= 1.71 + 1.1 \cdot 1.99 = 3.9 \text{ MPa} < \sigma_{c,all} \\ &= 53.19 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (40)$$

Ovaj uvjet za spremnik zadovoljava.

5) Instalacija spremnika

$$\begin{aligned}\sigma_{G,s} + 0.7 \cdot W_s &= 1.33 + 0.7 \cdot 1.99 = 2.72 \text{ MPa} < \sigma_{c,all} \\ &= 53.19 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (41)$$

Ovaj uvjet za spremnik zadovoljava.

6) Pogon pod unutarnjim tlakom i pod utjecajem potresa

$$\begin{aligned}0.9 \cdot P_i + \sigma_{G,L,s} + E_s &= 0.9 \cdot 4.19 + 1.33 + 17.61 = 22.71 \text{ MPa} \\ &< \sigma_{c,all} = 53.19 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (42)$$

Ovaj uvjet za spremnik zadovoljava.

7) Pogon pod vanjskim tlakom i pod utjecajem potresa

$$\begin{aligned}P_e + \sigma_{G,L,s} + E_s &= 2.99 + 1.33 + 17.61 = 21.93 \text{ MPa} < \sigma_{c,all} \\ &= 53.19 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (43)$$

Ovaj uvjet za spremnik zadovoljava.

8) Pogon bez tlaka i pod utjecajem potresa

$$\sigma_{G,L,s} + E_s = 1.71 + 17.61 = 19.32 \text{ MPa} < \sigma_{c,all} = 53.19 \text{ MPa}\quad (44)$$

Ovaj uvjet za spremnik zadovoljava.

9) Ispitivanje s vanjskim tlakom, spremnikom napunjenim vodom i pod utjecajem vjetra

$$\begin{aligned}P_e + \sigma_{test,s} + 0.6 \cdot W_s &= 2.99 + 3.42 + 0.6 \cdot 1.99 = 7.61 \text{ MPa} \\ &< \sigma_{c,all} = 53.19 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (45)$$

Ovaj uvjet za spremnik zadovoljava.

Vidljivo je da prema normi EN 13445 [5] kolona za frakcijsku destilaciju zadovoljava čvrstoću za sve zadane kombinacije.

4. NUMERIČKA ANALIZA KOLONE ZA FRAKCIJSKU DESTILACIJU

Nakon izvršetka analitičkog proračuna za kolonu radi se numerička analiza kolone kako bi se mogli usporediti dobiveni rezultati. Numerička analiza se odrađuje s programom Femap.

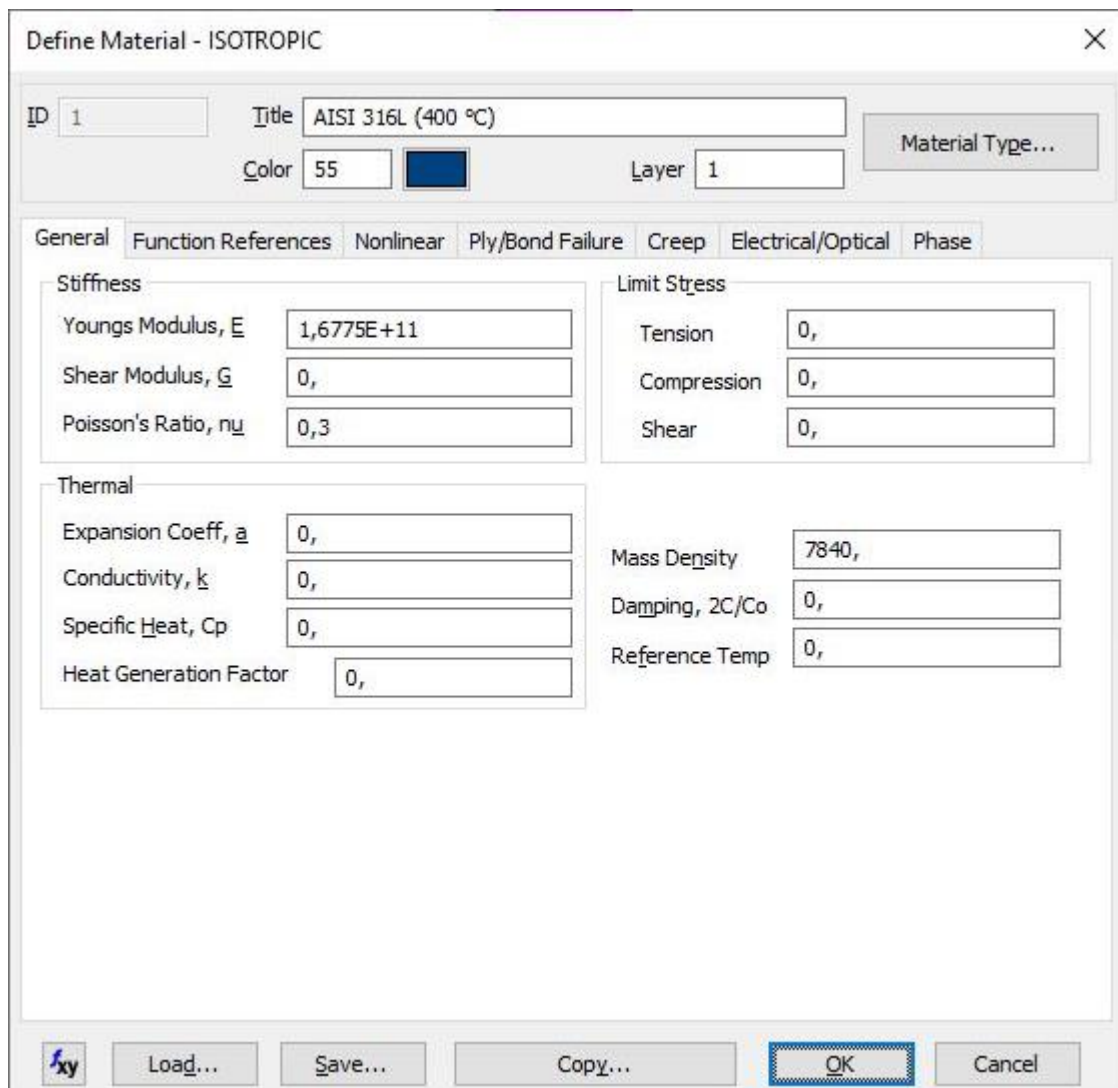
4.1 Izrada mreže

Za početak je potrebno izraditi model kolone za frakcijsku destilaciju. On je izrađen u programu SolidWorks. File se sprema u .STEP formatu kako bi se lakše mogla izraditi njegova mreža u programu Femap. Model se u program ubacuje naredbama *File\Import\Geometry*. Prilikom ubacivanja modela faktor skaliranja je definiran kao 1 kako bi dimenzije modela bile u metrima.



Slika 4.1 Model kolone unutar programa Femap

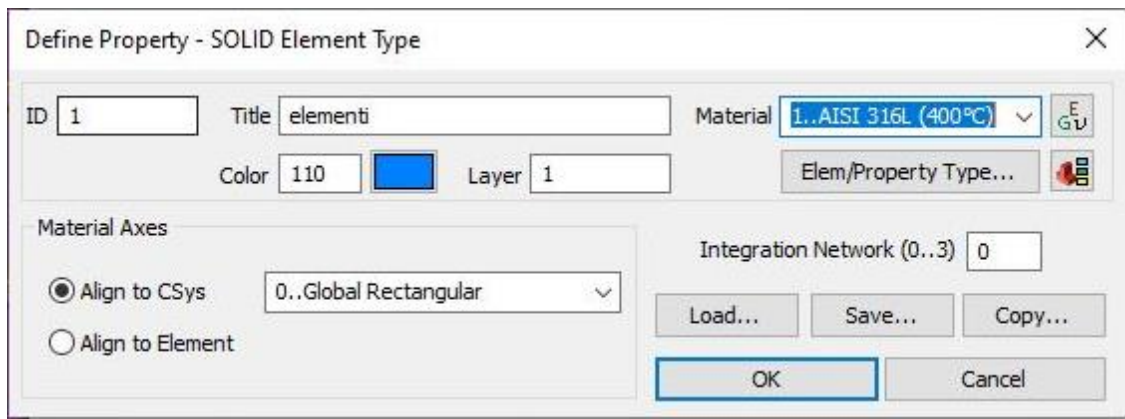
Nakon što je ubačena geometrija kolone potrebno je definirati materijal od kojeg je izrađena. To se radi u izborniku *Model* i potom izborom na opciju *Material*.



Slika 4.2 Definiranje materijala

Kao što je vidljivo, materijal je definiran za radnu temperaturu od 400°C.

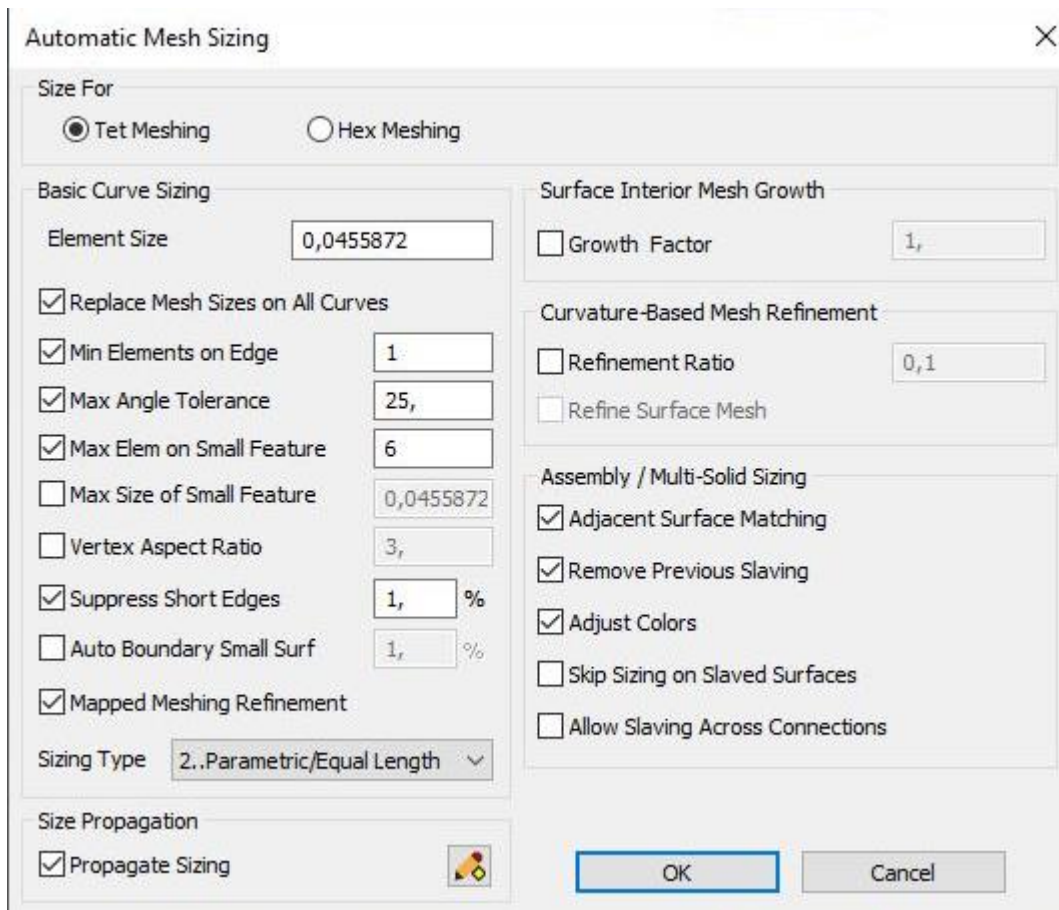
Nakon izbora materijala potrebno je definirati elemente koji se koriste pri umrežavanju modela. Za umrežavanje će se koristiti *Solid* elementi, s kojima se najjednostavnije umrežava kod 3D modela, te će im se uključiti i opcija *Parabolic Elements*.



Slika 4.3 Definiranje elemenata

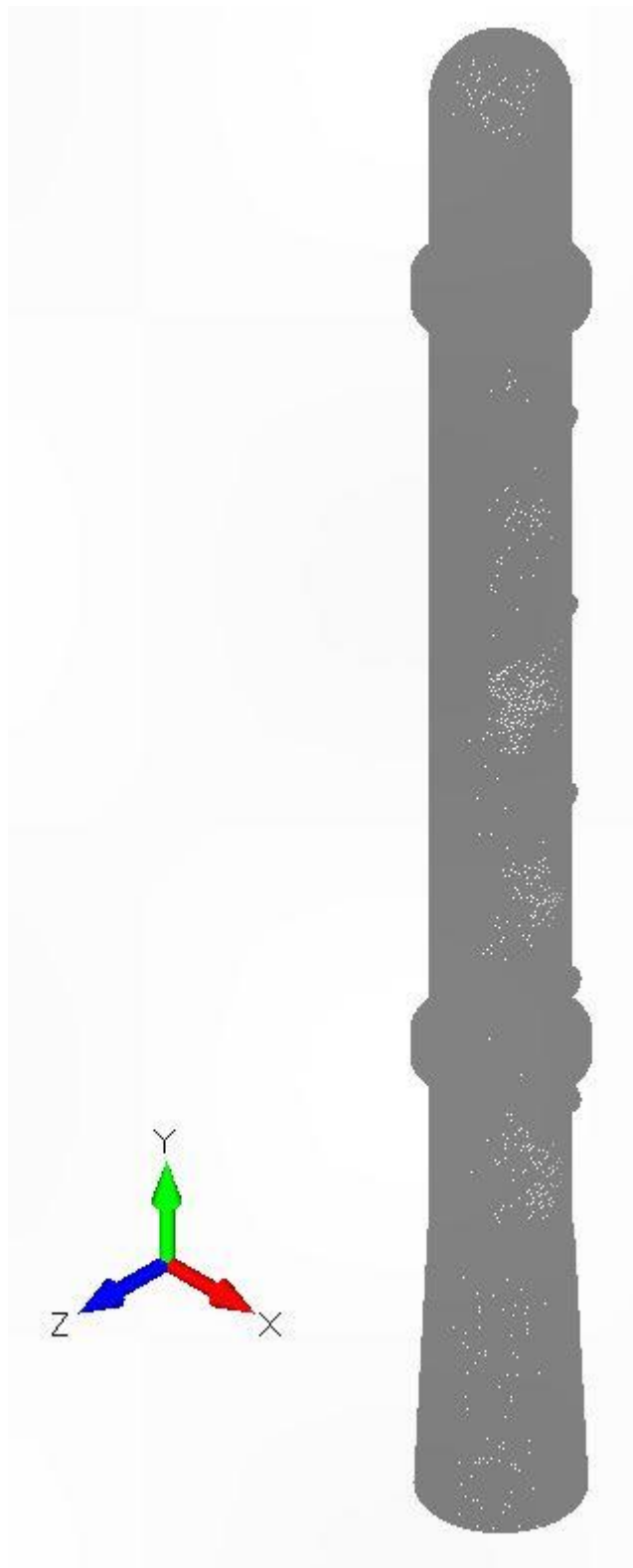
Nakon definiranja elemenata, potrebno je definirati odnose između kontakata površina različitih dijelova modela (model se sastoji od dijelova koji su nabrojani u poglavlju 3.). Te dodirne površine se definiraju pomoću opcije *Connect/Automatic*, te im se kao kontakt postavlja *Glued*, koji predstavlja postojanje zavara između tih komponenti.

Prije postavljanja oslonaca i opterećenja potrebno je definirati mrežu. Veličina elementa će biti 0.02 m, tj. 20 mm.

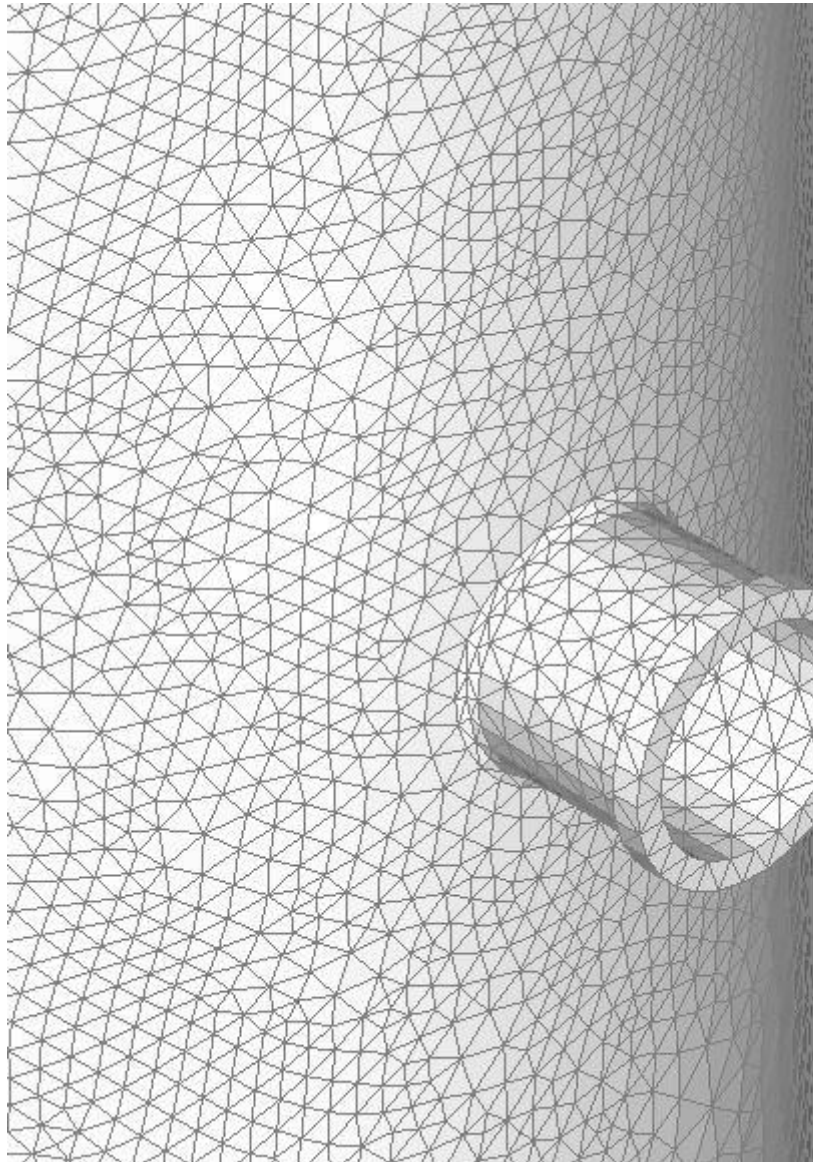


Slika 4.4 Postavke vezane za definiranje mreže konačnih elemenata

Vrsta elemenata postavljena na geometriju su tetraedarski elementi. Prikaz generirane mreže je prikazan na slici 4.5, dok je na slici 4.6 prikazan detalj, jer zbog male veličine elemenata u usporedbi s veličinom modela, mreža nije najbolje vidljiva na slici 4.5.



Slika 4.5 Mreža konačnih elemenata



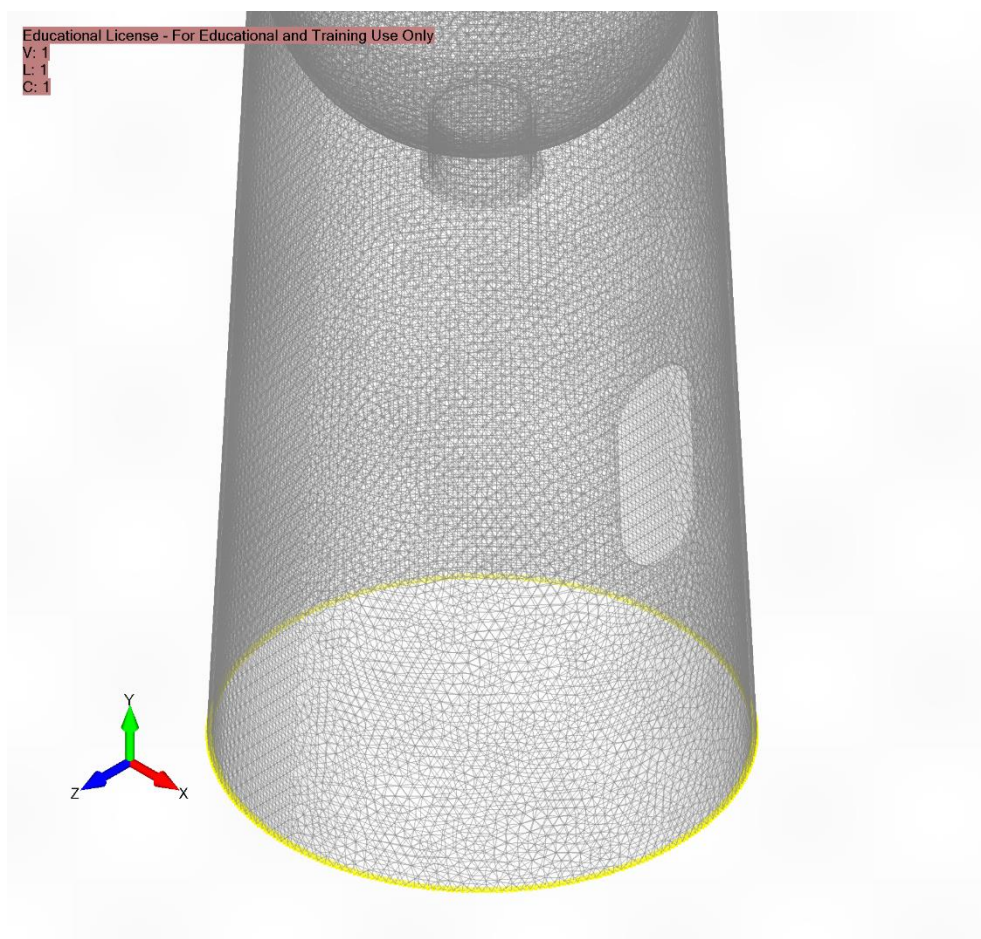
Slika 4.6 Detalj mreže konačnih elemenata na jednom od odvoda

4.2 Postavljanje oslonca

Zajednički dio svih numeričkih simulacija koje će se izvršavati, osim mreže, je i oslonac. Opterećenja koja djeluju na kolonu su za svaki slučaj drugačija, te će se ona objasniti u nadolazećim poglavljima.

Oslonac se postavlja na površinu postolja koja je u kontaktu s betonom. Na tu površinu se postavlja uklještenje, tj. sprječavaju se pomaci u smjerovima x , y i z

osi, te rotacije oko tih istih osi. Površina na koju je postavljen uvjet uklještenja je prikazana na sljedećoj slici.



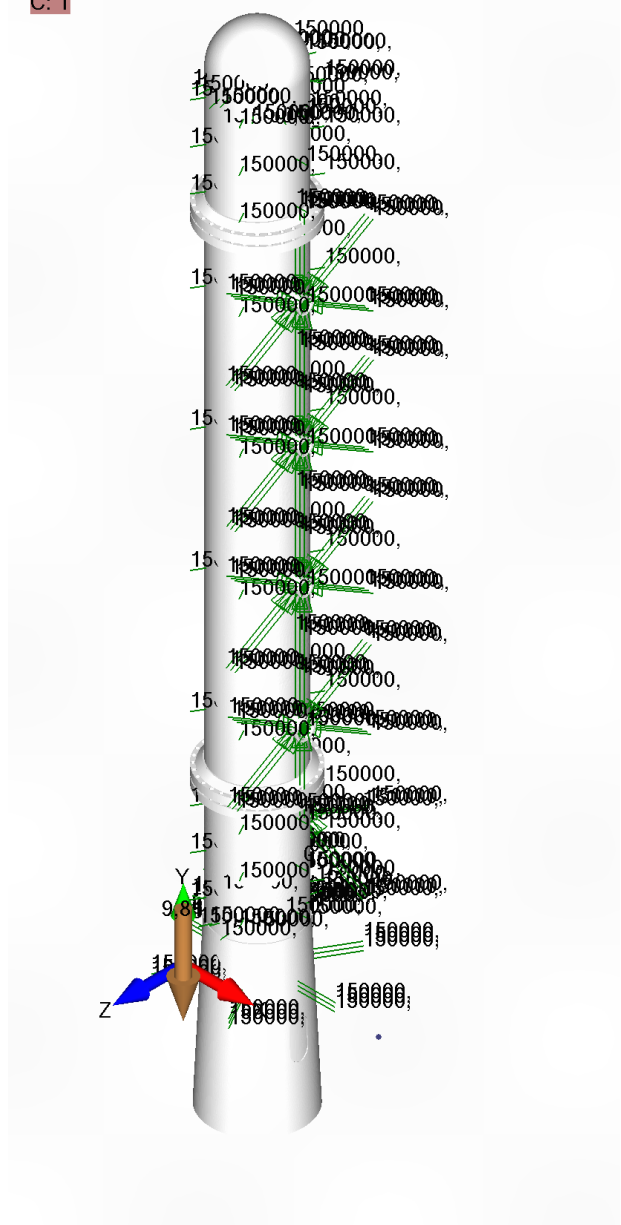
Slika 4.7 Prikaz površine na kojoj se nalazi uklještenje

4.3 Slučajevi opterećenja

U ovom potpoglavlju će se izvršavati numerička provjera slučajeva opisanih u potpoglavlju 3.6.5. Slučajevi koji se neće provjeravati su oni kod kojih su prisutna potresna opterećenja, zbog kompleksnosti izvođenja takvih analiza.

4.3.1 Numerička provjera prvog slučaja

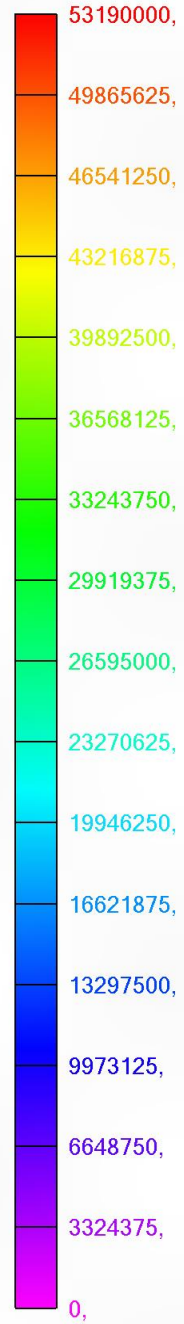
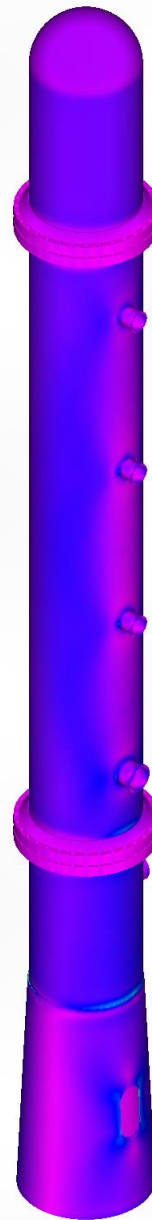
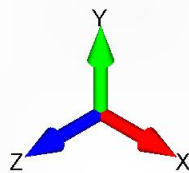
Kao što je navedeno u potpoglavlju 3.6.5, opterećenja koja se javljaju kod prvog slučaja su težina spremnika i unutarnji (radni) tlak. Djelovanje vlastite težine se u programu Femap aktivira tako da se postavi ubrzanje u smjeru y-osi u iznosu od 9.81 m/s . Unutarnji tlak se postavlja na unutarnje površine spremnika, i to u iznosu od 1.5 bar . Prikaz opterećenja je prikazan na slici 4.8.



Slika 4.8 Opterećenja u prvom slučaju

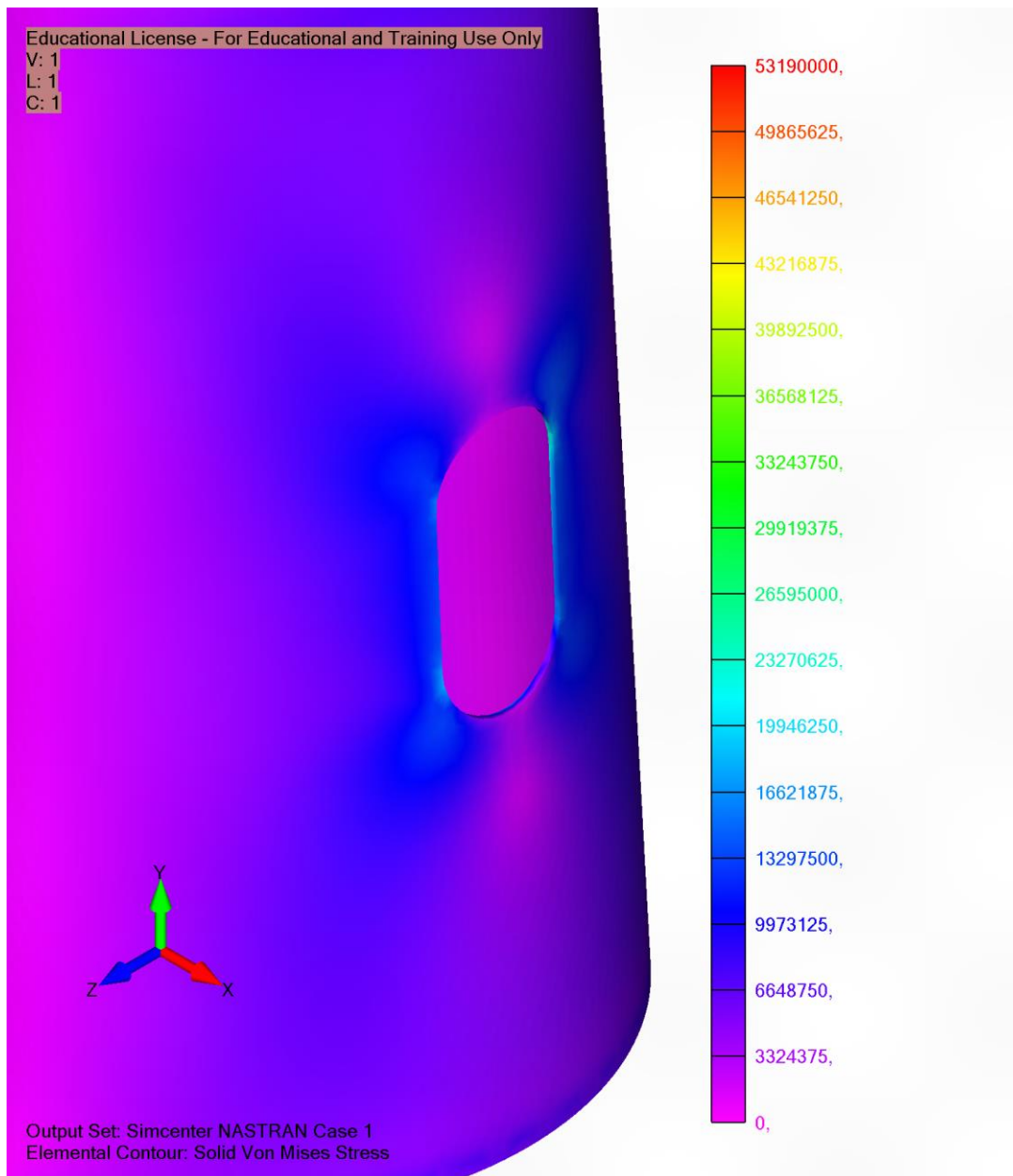
Nakon aktiviranih opterećenja pokreće se analiza. Rezultati numeričke analize prvog slučaja su prikazani na sljedećim slikama.

V: 1
L: 1
C: 1

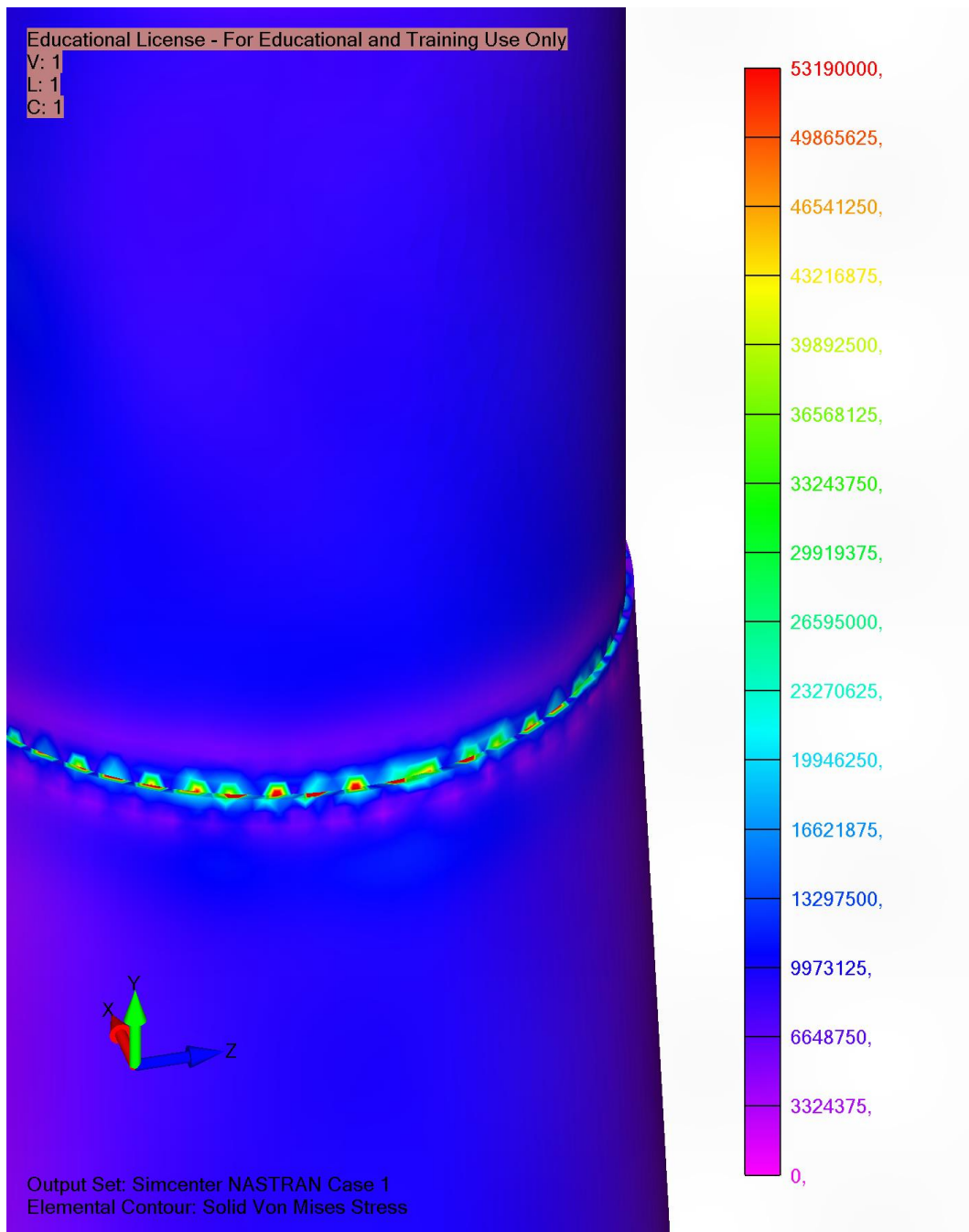


Output Set: Simcenter NASTRAN Case 1
Elemental Contour: Solid Von Mises Stress

Slika 4.9 Raspodjela Von Misesovih naprezanja na koloni u prvom slučaju



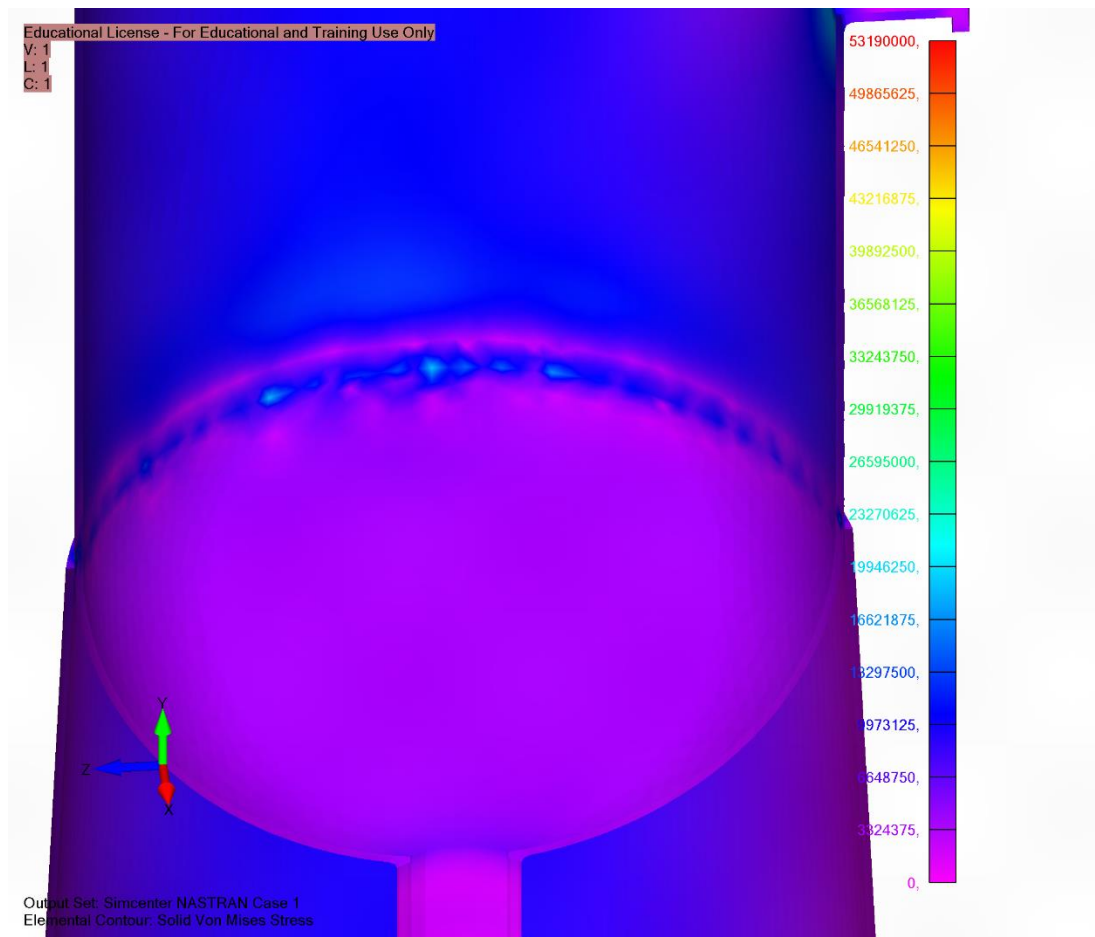
Slika 4.10 Detalj Von Misesovih naprežanja kod provrta na postolju



Slika 4.11 Detalj Von Misesovih naprezanja na mjestu spoja postolja i kolone

Na slici 4.9 je prikazana raspodjela naprezanja po cijeloj koloni i postolju. Za maksimalnu vrijednost na skali je odabrana vrijednost maksimalnog dopuštenog naprezanja za temperaturu od 400 °C za odabrani čelik, a minimalna vrijednost je postavljena na 0. Na slikama 4.10 i 4.11 su prikazani detalji na kojima se javljaju najveća naprezanja u ovome slučaju. Na slici 4.10 je prikazan provrt na postolju kroz kojega prolazi cijev koja će odvoditi bitumen. Provrt je napravljen prema uputama u normi EN 13445 [5]. Drugi detalj koji je izdvojen se nalazi na mjestu

spoja kolone i postolja. Inače se na tome mjestu nalazi zavar, te onda ne postoje koncentratori naprezanja tamo.



Slika 4.12 Naprezanja na unutarnjem dijelu spremnika

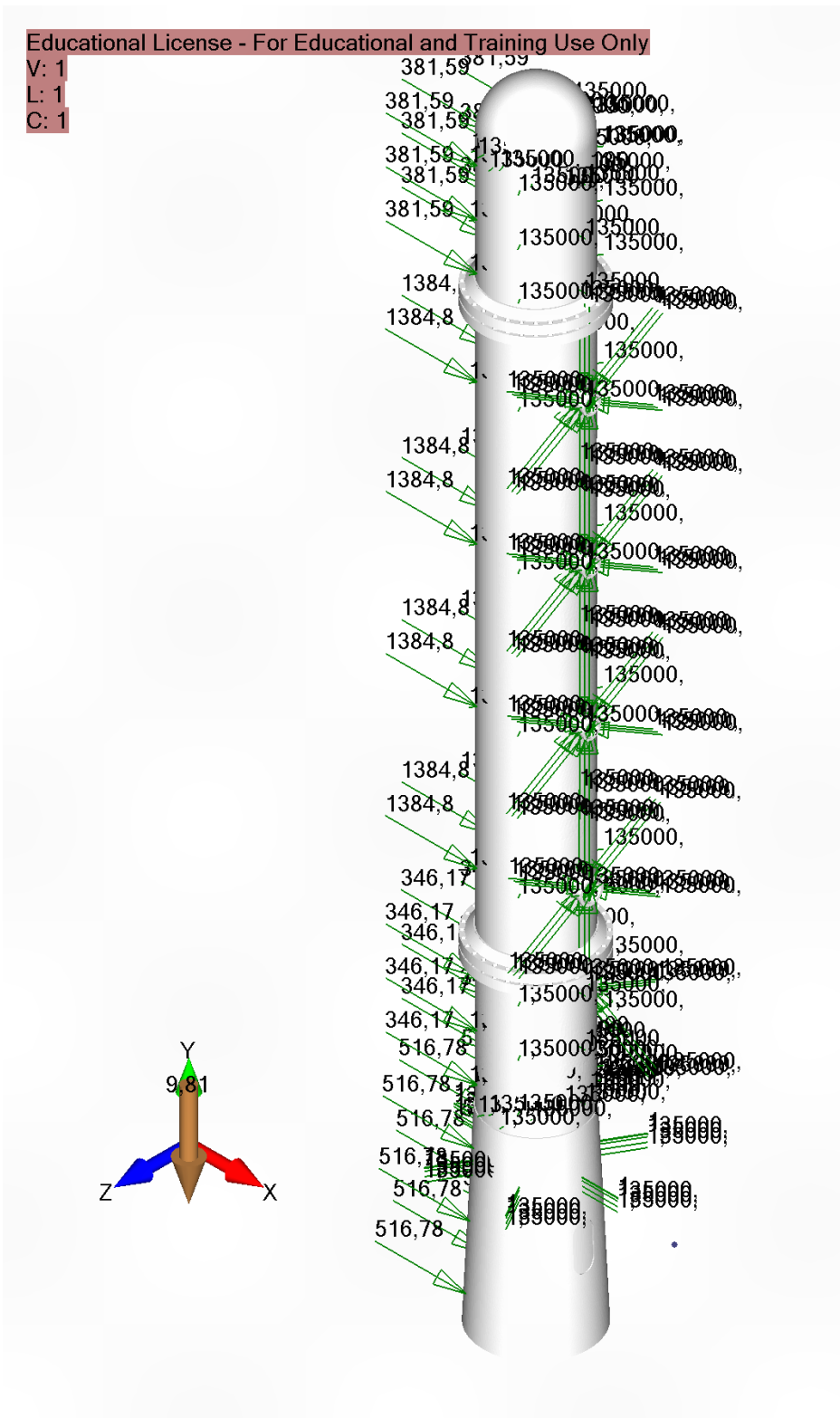
U unutrašnjem dijelu spremnika najveća naprezanja se javljaju na spoju kolone i postolja, tj. na koncentratoru naprezanja. Ta naprezanja su veća na jednom dijelu zbog toga što se centar težine kolone ne nalazi točno u osi, zbog odvoda za tekućine nastale destilacijom.

Femap također nudi opciju izbora elemenata u kojima se naprezanja nalazi u izabranom rasponu. Preko te vrste provjere ispada da se u 11 % elemenata vrijednost naprezanja poklapa s onom izračunatom analitičkim proračunom, što je i očekivano jer se najveća naprezanja ne javljaju u cijeloj koloni. Na mjestima gdje se nalaze koncentratori naprezanja dolazi do pojave naprezanja većih od

dopuštenih, što se u stvarnosti ne događa zbog drugačije izvedbe. Naprezanja veća od maksimalnog dopuštenog se javljaju u 3.5% elemenata.

4.3.2 Numerička provjera drugog slučaja

Kao i kod prethodno slučaja prvo je potrebno postaviti opterećenja koja se javljaju u ovom slučaju. U drugom slučaju, tj. slučaju pogona pod unutarnjim tlakom i utjecajem vjetra, opterećenja koja se javljaju se opterećenja uzrokovana naletima vjetra, unutarnjim tlakom i težinom spremnika i fluida koji se nalazi u njemu.

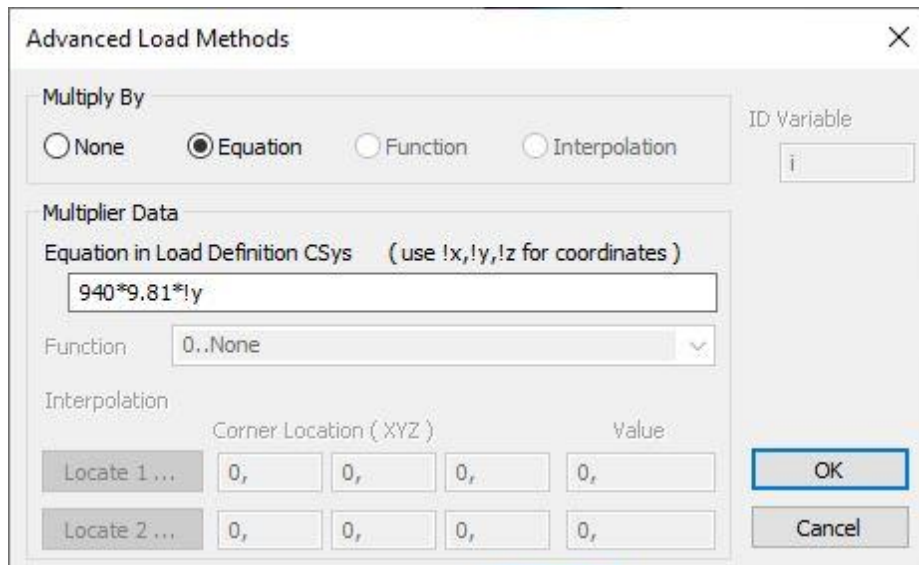


Slika 4.13 Opterećenja na kolonu

U Femap-u se hidrostatski tlak kojeg proizvodi bitumen na dnu spremnika unosi posebno. Unosi se kao tlak na površinama na kojima se bitumen nalazi:

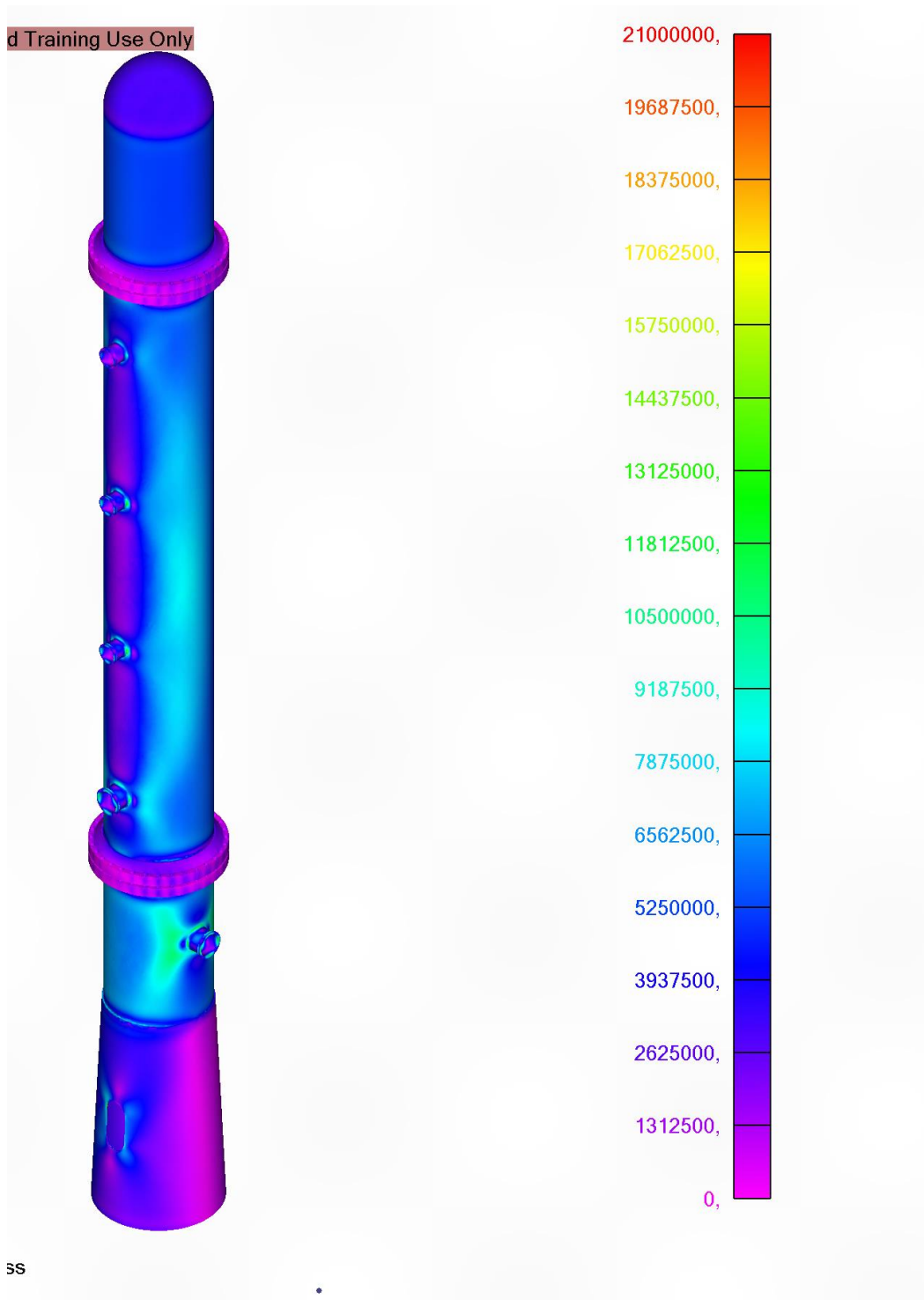
$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

(46)

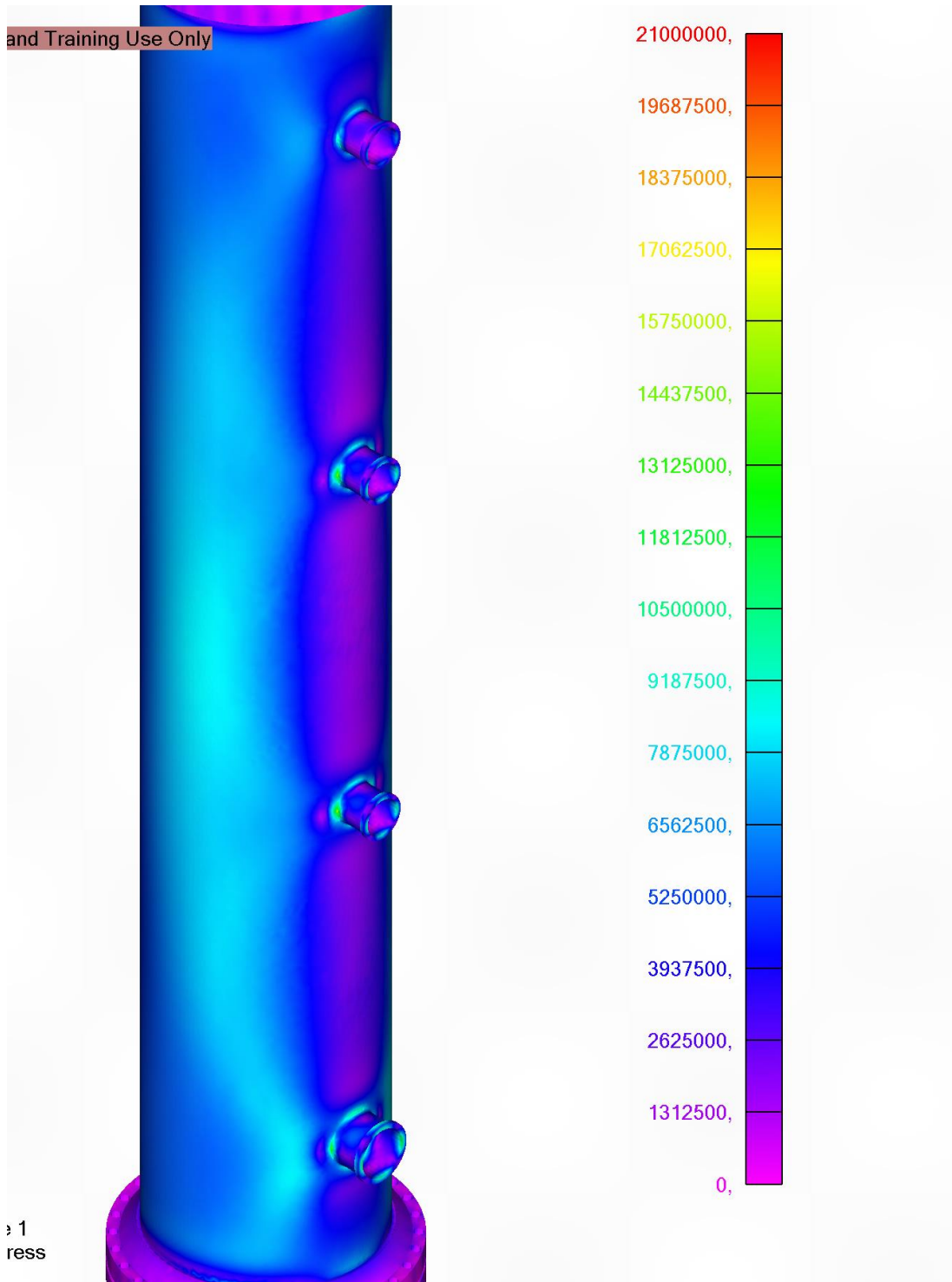


Slika 4.14 Definiranje hidrostatskog tlak uzrokovanog tekućinom na dnu kolone

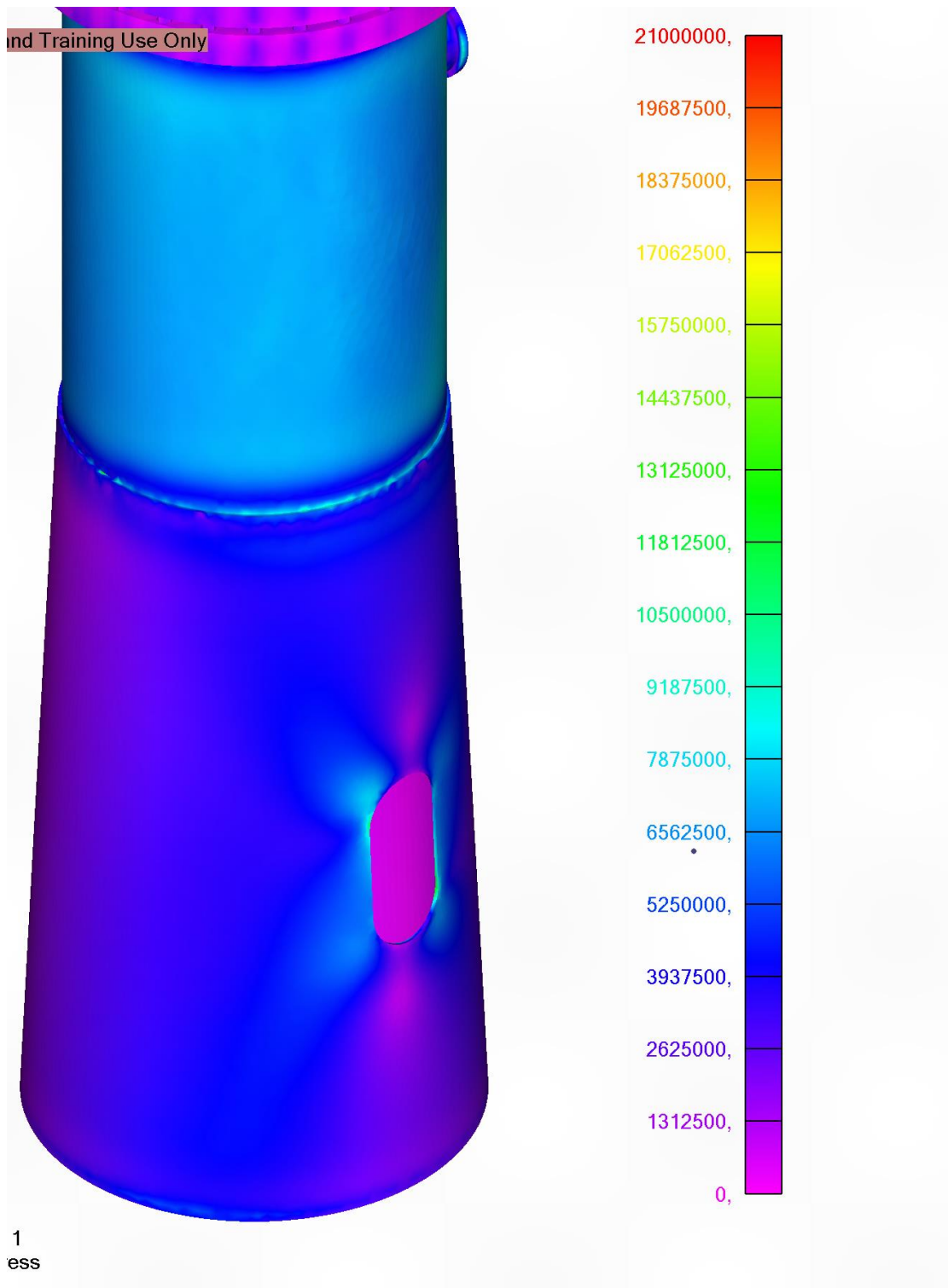
Prikaz raspodjele naprezanja po koloni i postolju, te detalji gdje se događaju kritična naprezanja, su prikazani na sljedećim slikama.



Slika 4.15 Raspodjela Von Misesovih naprezanja na cijelom modelu



Slika 4.16 Detalj – Von Misesova naprezanja na otvorima za odvod tekućina

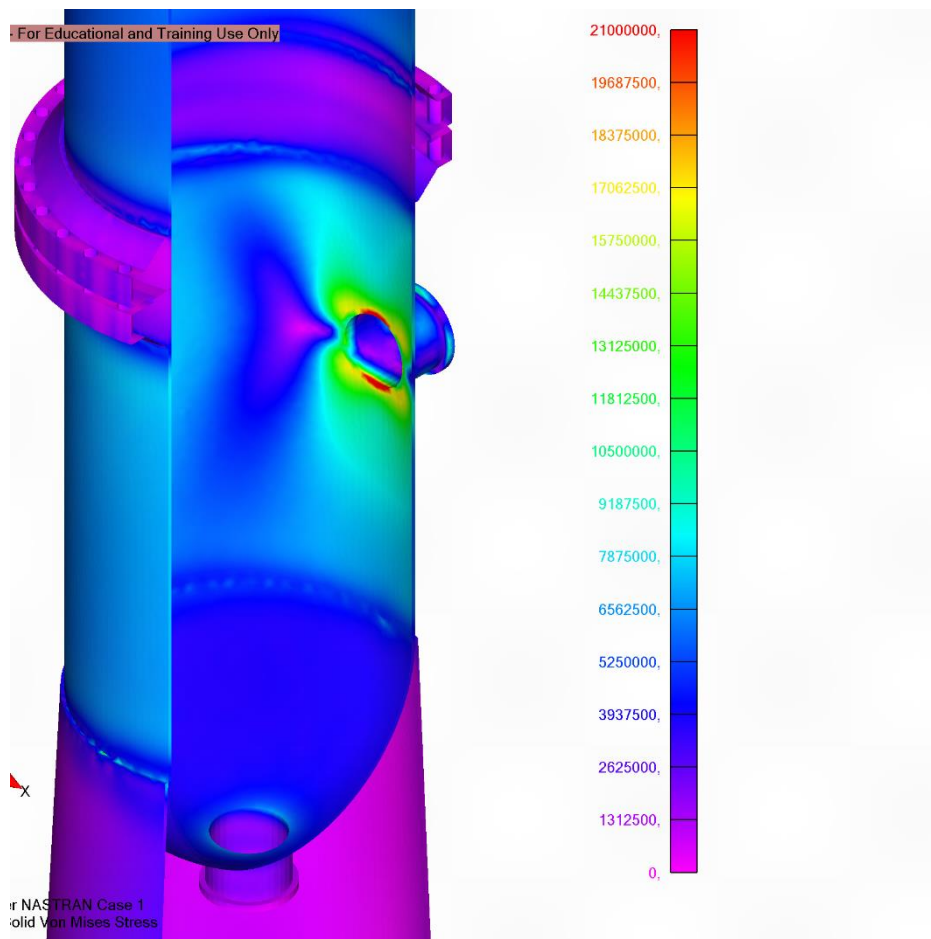


Slika 4.17 Detalj Von Misesovih naprezanja kod provrta na postolju

Budući da se u ovom slučaju nisu javljala naprezanja s vrijednošću većom od 21 MPa, maksimum skale vrijednosti naprezanja je postavljen na tu veličinu.

U ovom slučaju je vidljivo da se najveća naprezanja javljaju na cilindričnom plaštu na sredini i na dnu kolone. Ona se javljaju najviše zbog utjecaja vjetrova, tj

zato što je to najveća površina kolone na koju nalijeću udari vjetra. Također su zbog toga i utjecaja radnog tlaka povećane vrijednosti naprezanja na odvodima tekućina. Kao i u prethodnom slučaju zbog utjecaja težine, te zbog toga što je otvor na postolju konzentror naprezanja, tamo se također javljaju povišena naprezanja.



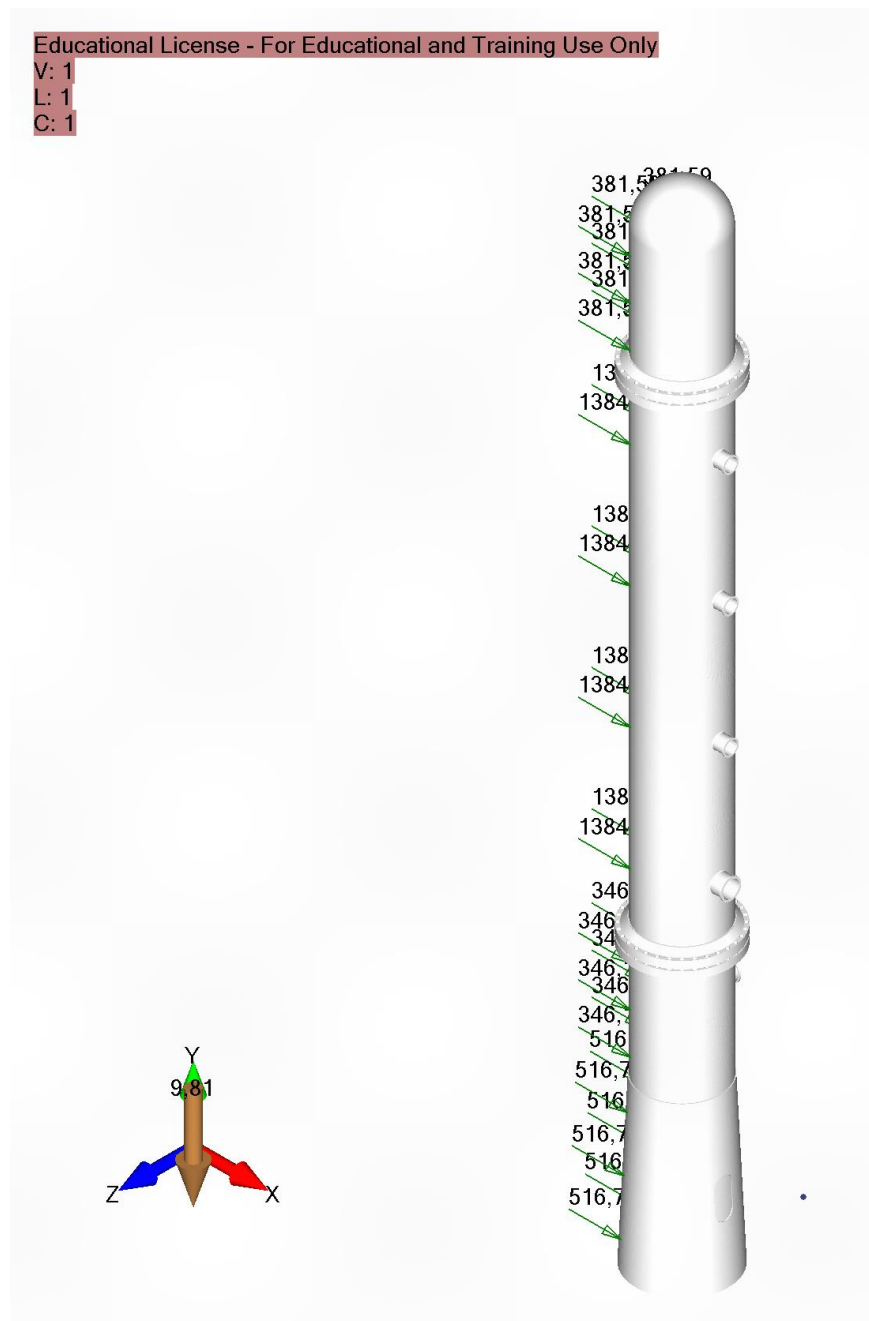
Slika 4.18 Raspodjela naprezanja u sferičnom dnu – detalj

S unutrašnje strane kolone najveća naprezanja se javljaju kod dovoda zagrijane nafte. Tamo se javljaju zbog kombinacije hidrostatskog tlaka, zbog vjetra koji nalijeće na površinu nasuprot ulaza nafte i zbog težine kolone koja djeluje tamo. Prema analizi na tom mjestu je moguća pojava naprezanja od 21 MPa, što bi i dalje zadovoljavalo čvrstoću spremnika, ali bi dovele do pojave zamora materijala. Međutim tolika vrijednost naprezanja na ovome mjestu je posljedica nedovoljno dobre kvalitetne mreže na tom mjestu.

U ovom slučaju naprezanje koje je dobiveno analitičkim proračunom se pojavljuje u 17.5% elemenata, dok se vrijednost veća od te javlja u 13 % elemenata.

4.3.3 Numerička provjera trećeg slučaja

Na početku je potrebno postaviti opterećenja koja se javljaju u ovom slučaju. U ovome slučaju opterećenja su uzrokovana težinom kolone, tekućine koja se nalazi u koloni, utjecajem vjetra i vanjskim (atmosferskim tlakom).



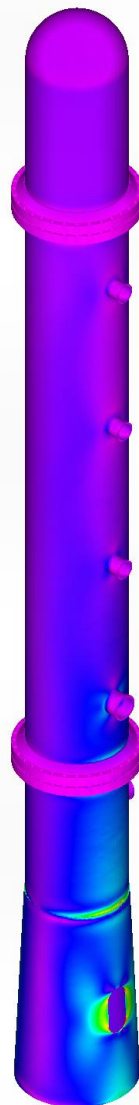
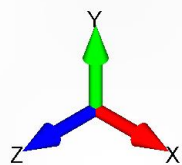
Slika 4.19 Opterećenja na koloni za destilaciju

Uz opterećenja koja su prikazana na slici 4.17, koja predstavljaju samo opterećenja uzrokovana vjetrom, u Femap-u se postavlja još i vanjski tlak. On na ovoj slici nije prikazan zbog toga što se on nalazi na svim površinama te se u slučaju njihovog prikaza ostale sile ne bi mogle razlučiti.

Prikaz raspodjele naprezanja na koloni je prikazan na sljedećim slikama.

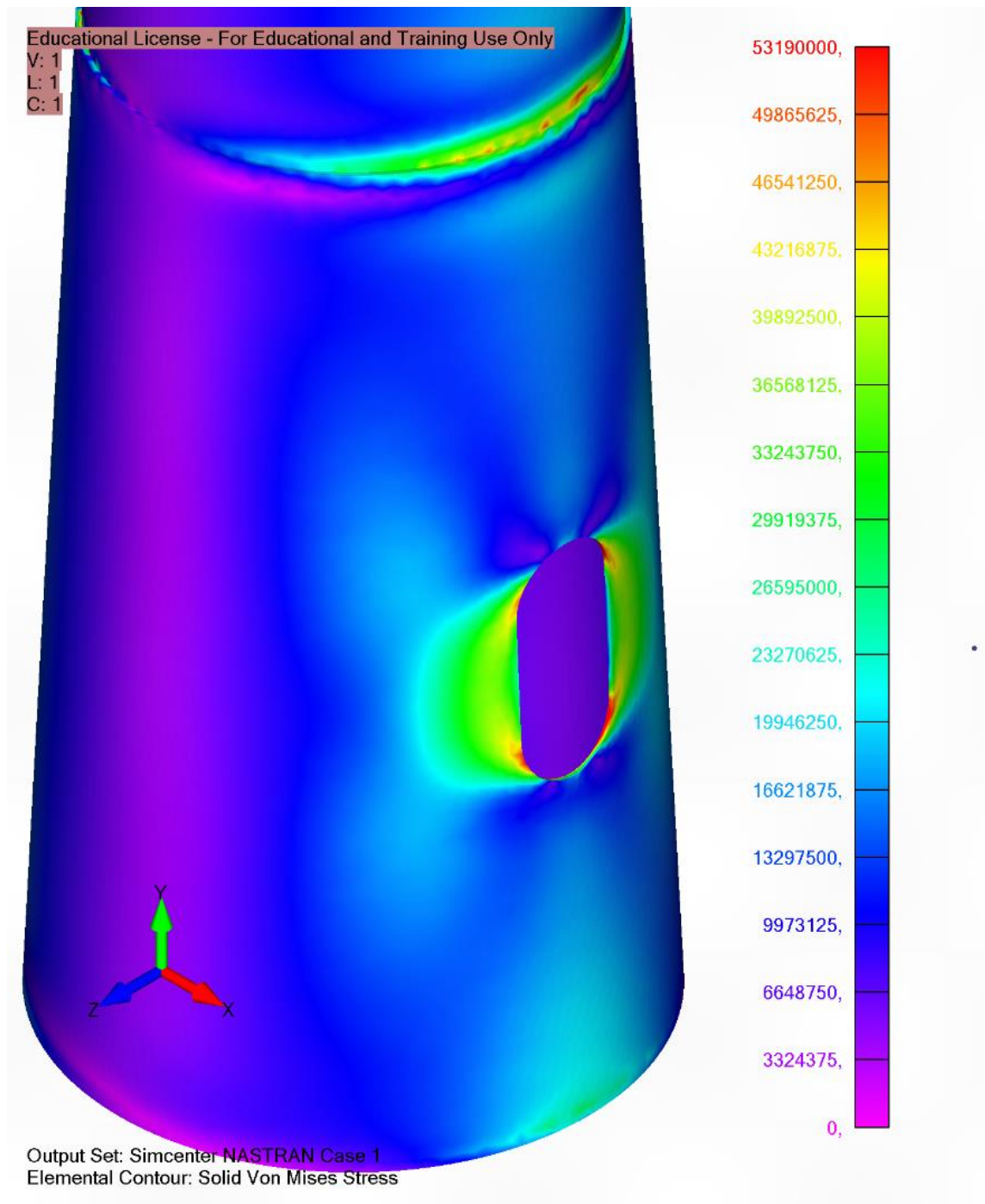
Educational License - For Educational and Training Use Only

V: 1
L: 1
C: 1

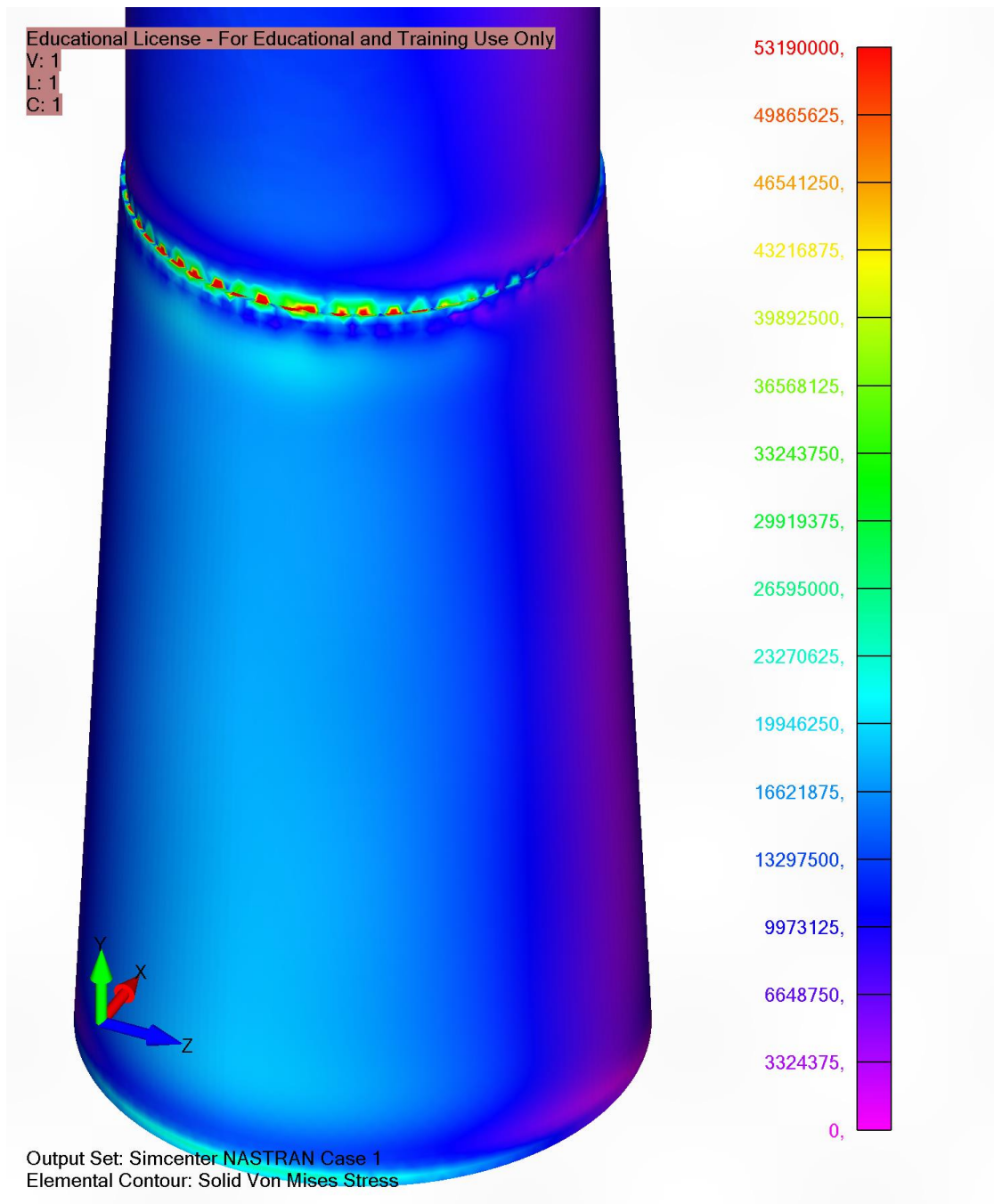


Output Set: Simcenter NASTRAN Case 1
Elemental Contour: Solid Von Mises Stress

Slika 4.20 Raspodjela Von Misesovih naprezanja po cijeloj koloni

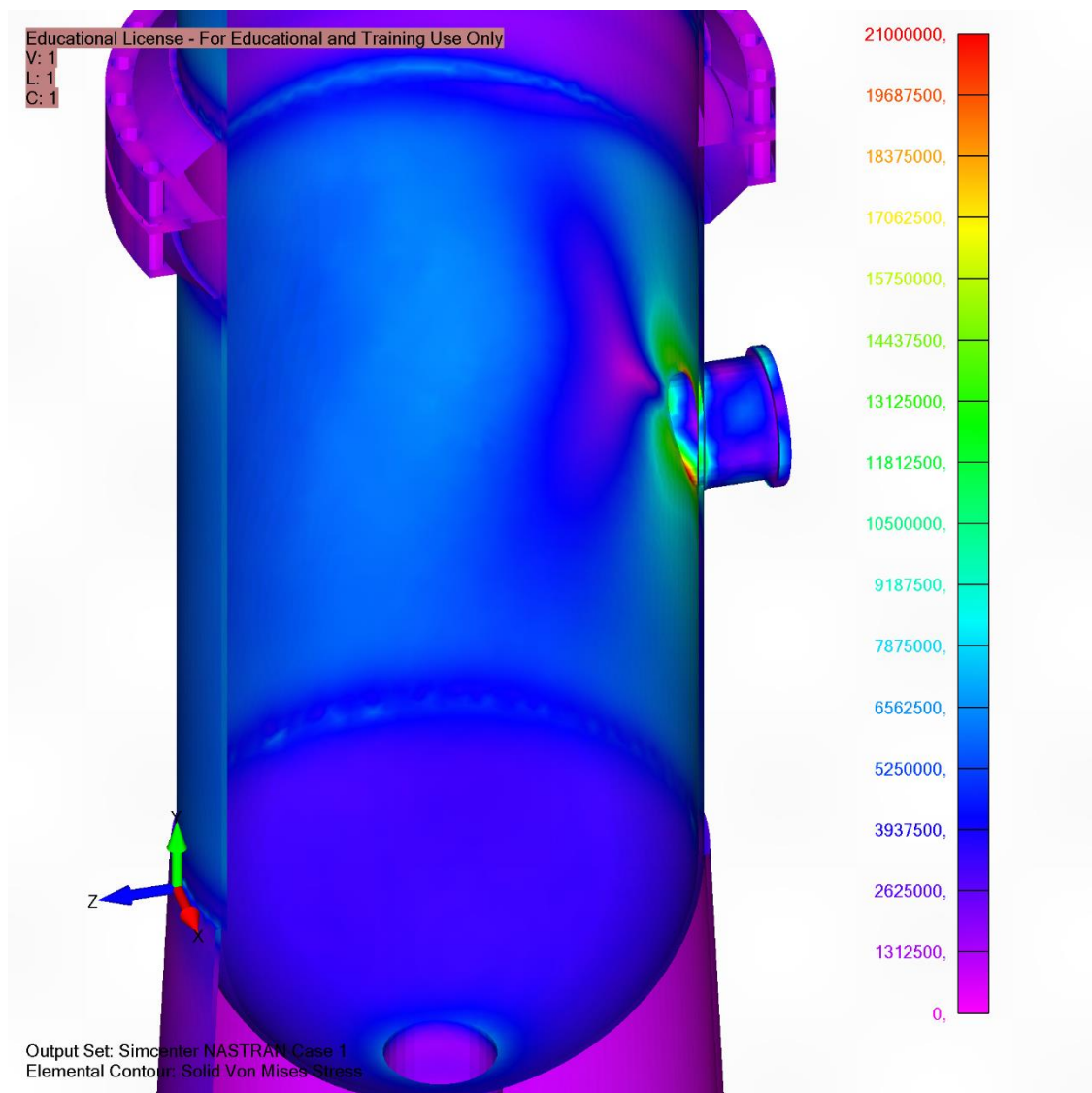


Slika 4.21 Detalj postolja – Von Misesova naprezanja



Slika 4.22 Detalj Von Misesovih naprezanja spoja između kolone i postolja

Vidljivo je da se kao i kod prethodnih slučajeva najveća naprezanja nalaze na mjestu gdje je spoj između kolone i postolja i na mjestu gdje se nalazi otvor na postolju, što je i očekivano budući da se tamo nalaze koncentratori naprezanja. U ovom slučaju su veća naprezanja nego u drugom slučaju, te se zbog toga skala vrijednosti naprezanja postavlja između 0 i 53.19 MPa.



Slika 4.23 Naprezanja unutar kolone

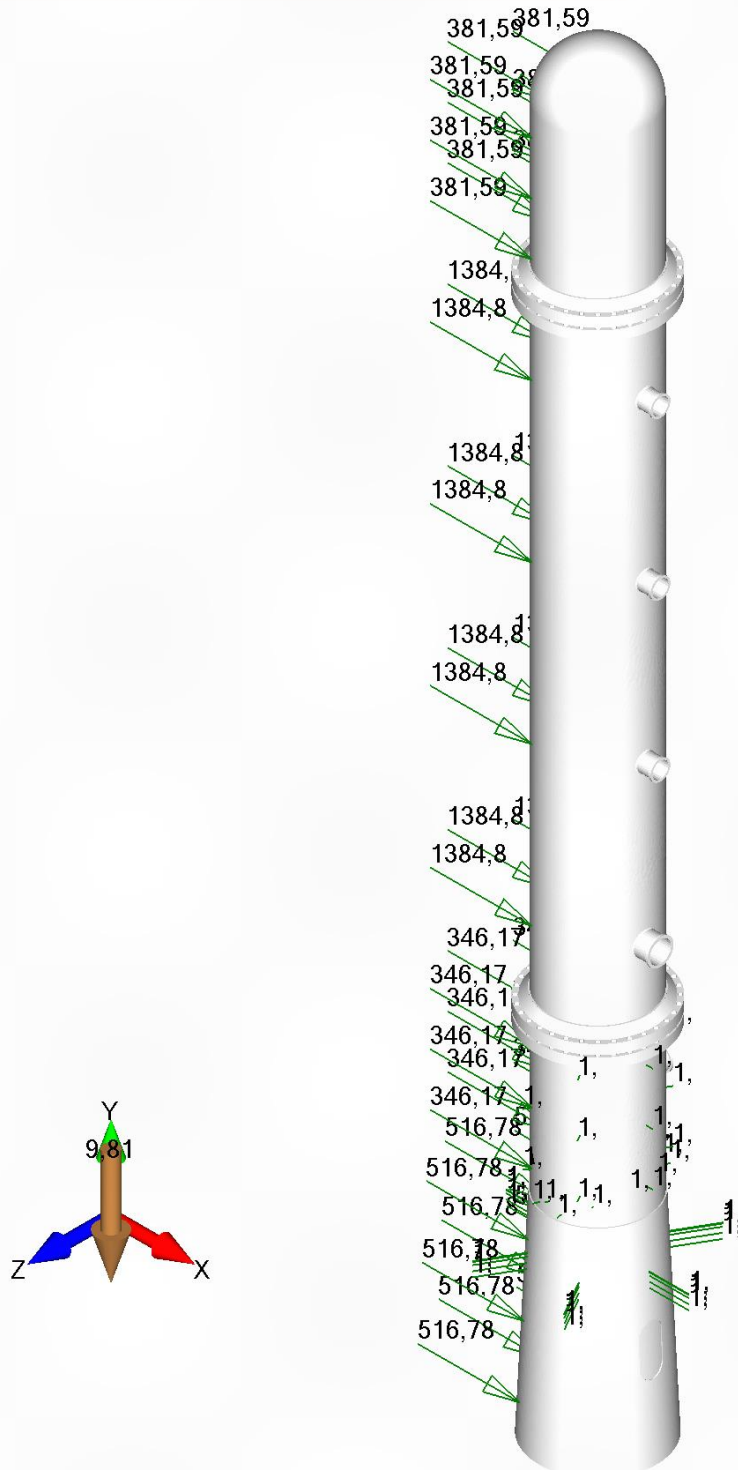
Kao i u prethodnom slučaju zbog djelovanja hidrostatskog tlaka uzrokovanog bitumenom koji se nalazi na dnu kolone i djelovanja vjetera, najveća naprezanja se nalaze na dovodu zagrijane nafte.

U ovome slučaju 22 % elemenata ima naprezanje skoro jednako analitičkom rješenju, dok je 17% elemenata prešlo tu vrijednost.

4.3.4 Numerička provjera četvrtog slučaja

Opterećenja koja se javljaju u ovome slučaju su izazvana naletima vjetra i težinom same kolone i tekućine koja se nalazi unutar nje.

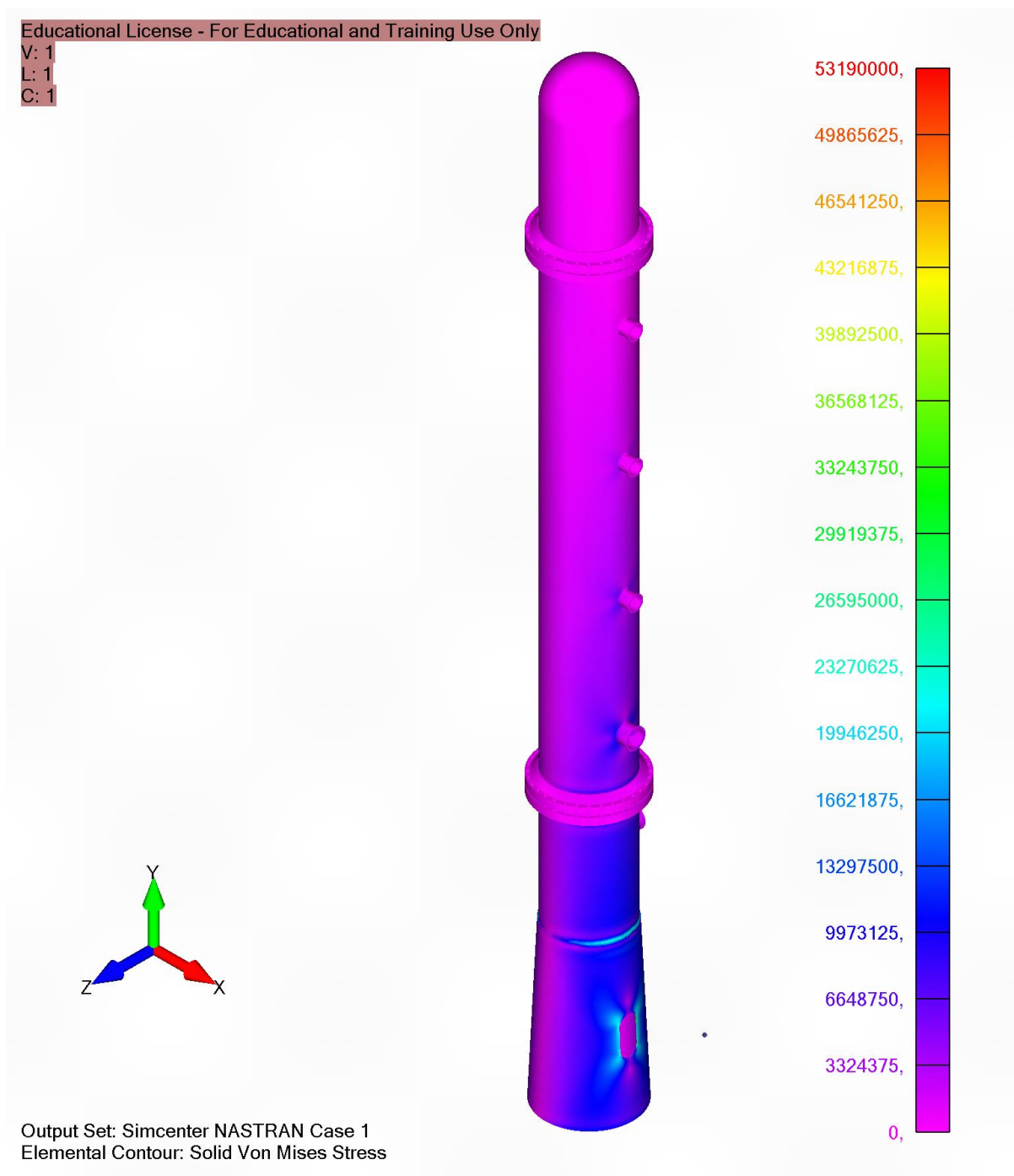
V: 1
L: 1
C: 1



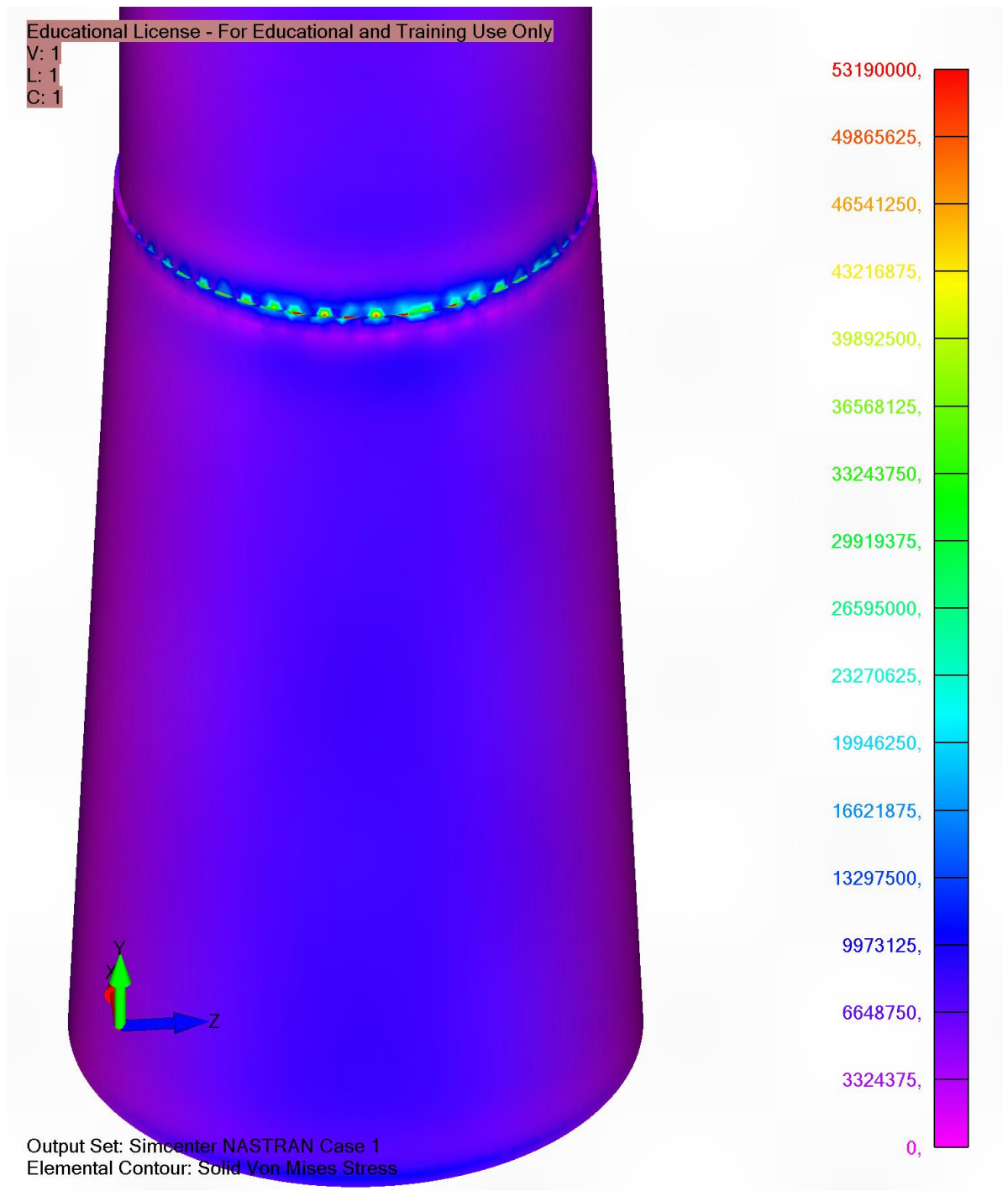
Slika 4.24 Opterećenja

Opterećenja koja su prikazana kao 1 predstavljaju hidrostatski tlak.

Na sljedećim slikama su prikazane raspodjela naprezanja na koloni i detalji dijelova na kojima se javljaju koncentracije naprezanja.

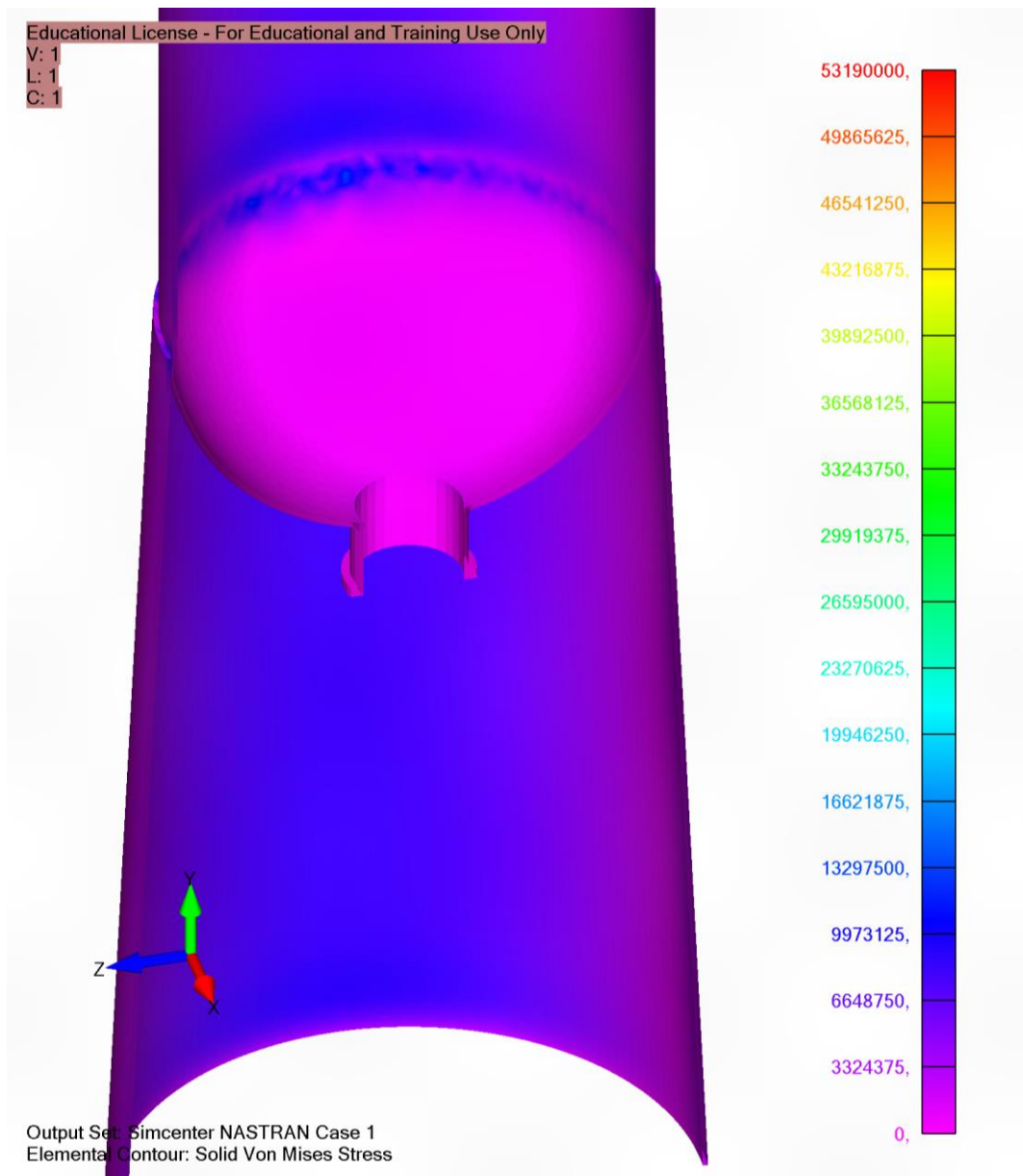


Slika 4.25 Raspodjela Von Misesovih naprezanja na cijeloj koloni



Slika 4.26 Prikaz najvećih naprezanja na koloni i postolju

Vidljivo je da se naprezanja povećavaju prema dnu kolone, što je i očekivano zbog utjecaja tekućine koja se nalazi u koloni. Kao i kod prethodnih slučajeva najveća naprezanja se javljaju na mjestima gdje se nalaze koncentratori naprezanja.



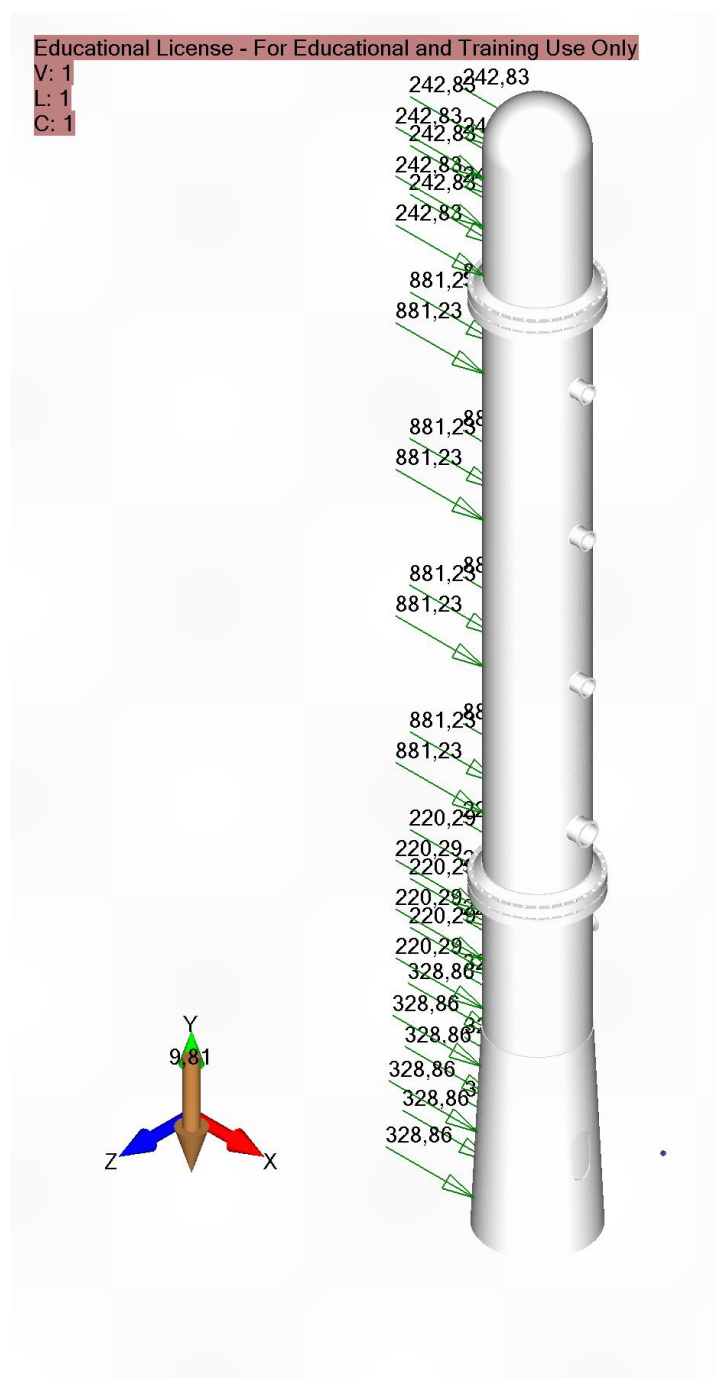
Slika 4.27 Naprezanja unutar kolone

U ovome slučaju najveća naprezanja unutar spremnika se nalaze na mjestu spoja kolone i postolja. Ta naprezanja se tamo pojavljuju zbog koncentrata naprezanja koji se nalaze na vanjskoj strani kolone.

Naprezanja jednaka onima dobivenim analitičkim proračunom u ovom slučaju se pojavljuju u 23 % elemenata, dok se već od tih javljaju u 20 % elemenata, što je direktna posljedica koncentrata naprezanja.

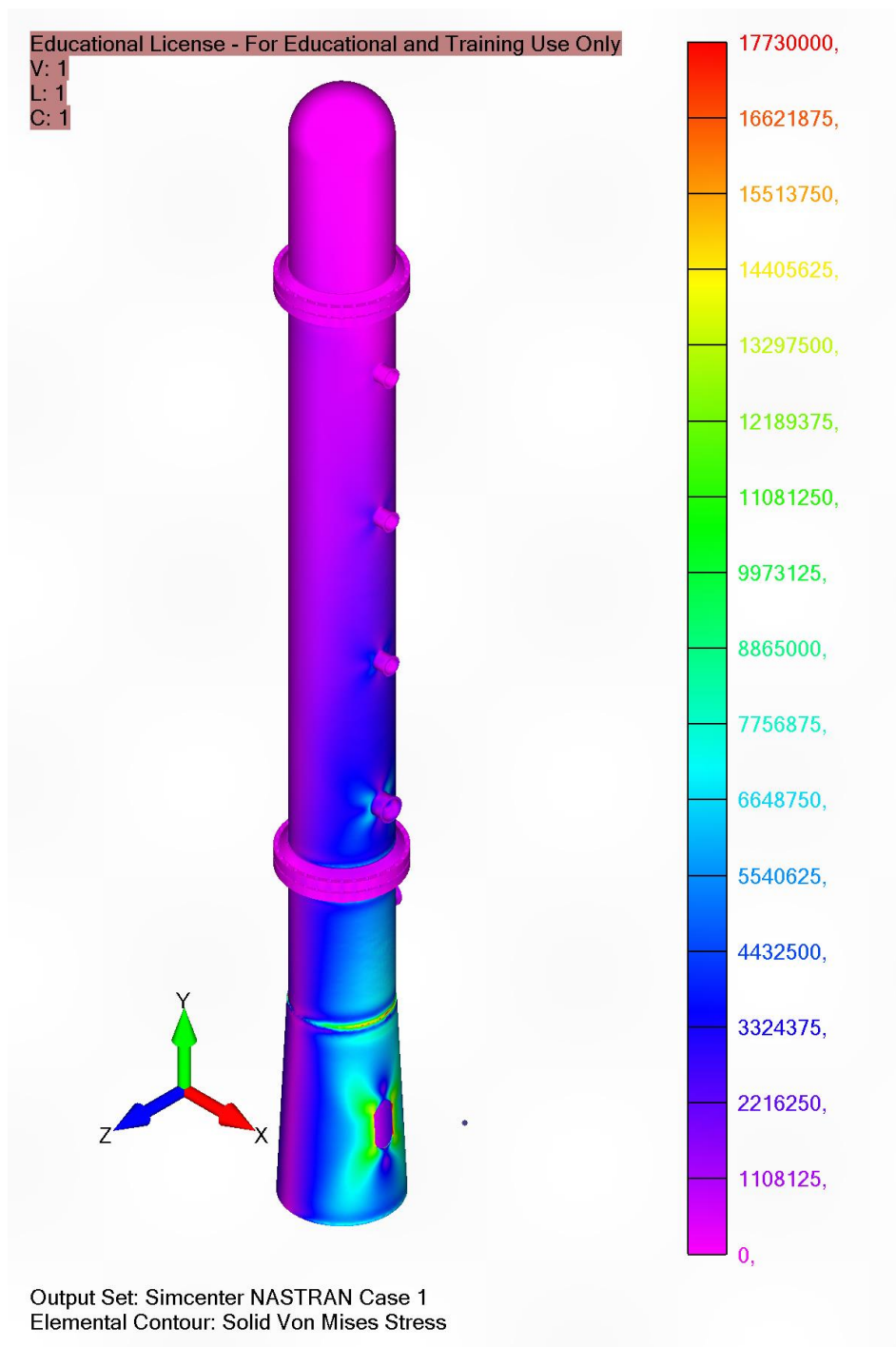
4.3.5 Numerička provjera petog slučaja

Peti slučaj predstavlja pojave naprezanja pri instalaciji (postavljanju) kolone. Opterećenja koja se javljaju su rezultat težine spremnika i djelovanja naleta vjetra. Opterećenje vjetra je umanjeno zbog toga što je u ovom slučaju kolona prazna.

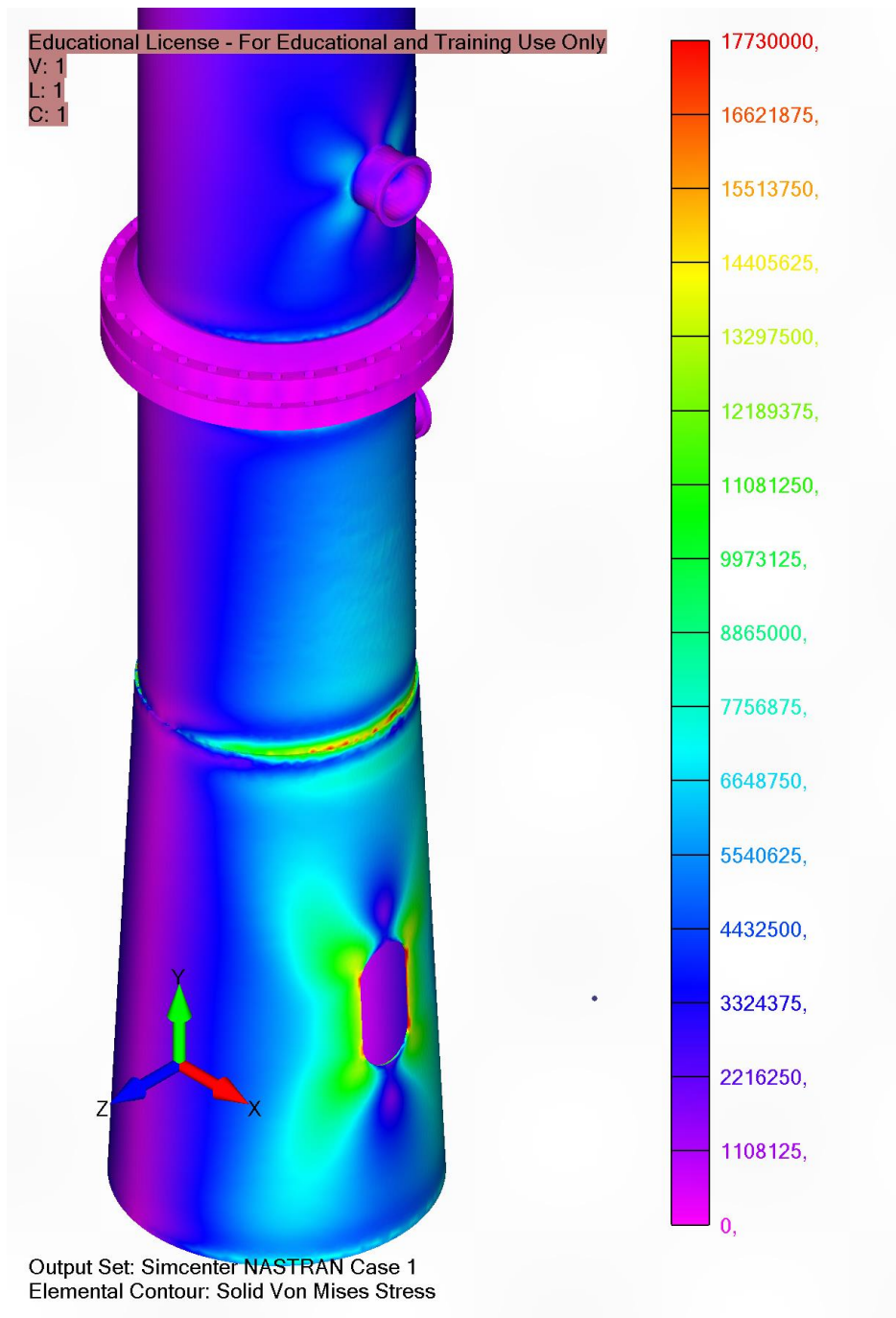


Slika 4.28 Opterećenja koja se javljaju na koloni

Naprezanja koja se javljaju u spremniku imaju sličnu raspodjelu kao i u prethodnim slučajevima. Najveća naprezanja će se javljati na spoju kolone i postolja, te na mjestu gdje se nalazi otvor na postolju.



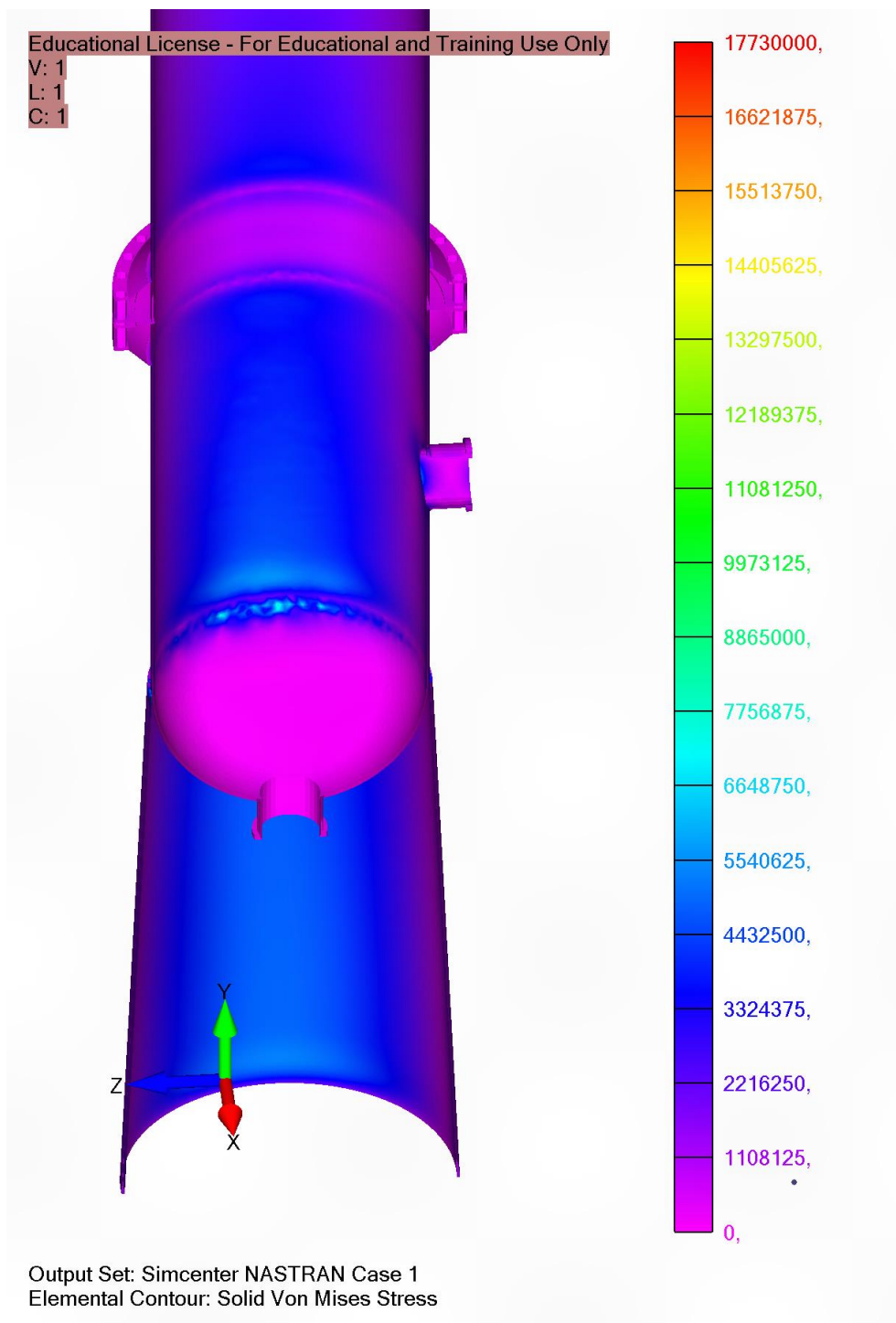
Slika 4.29 Raspodjela Von Misesovih naprezanja



Slika 4.30 Najveća naprezanja - detalj

U ovome slučaju gornja granica skale naprezanja je smanjena na trećinu dopuštenog naprezanja, zbog pojave malih vrijednosti naprezanja. Kao što je već navedeno, najveća naprezanja su se javila na konzentatorima naprezanja.

Prikaz najvećeg naprezanja s unutrašnje strane kolone je prikazan na sljedećoj slici.



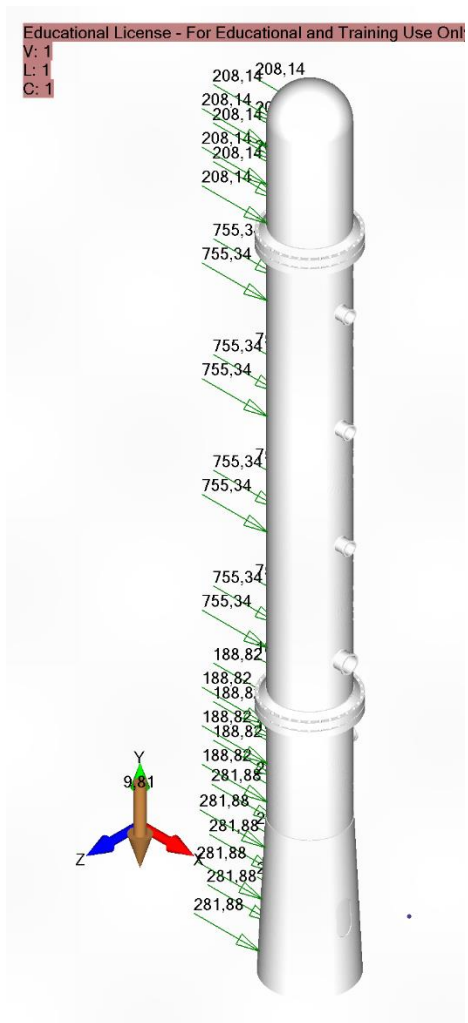
Slika 4.31 Najveća naprezanja s unutrašnje strane kolone

S unutarnje strane spremnika se najveća naprezanja također javljaju na spoju kolone i postolja. Ona se javljaju zbog savijanja koje uzrokuje vjetar.

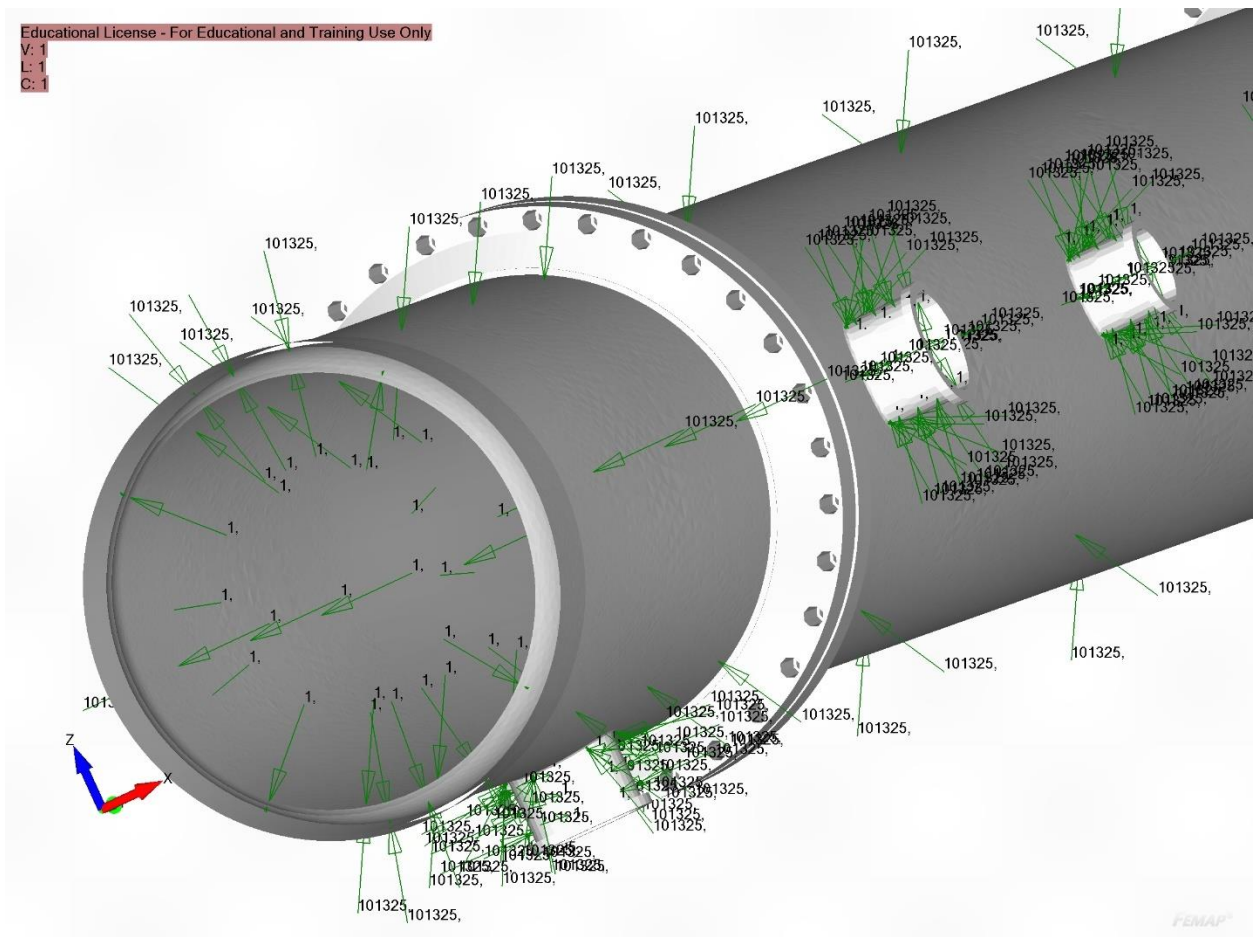
U 23 % elemenata naprezanja su jednaka onim dobivenim analitičkim proračunom, 19 % ih ima veću vrijednost od te, ali u nijednom elementu se ne javlja vrijednost naprezanja veća od 15 MPa.

4.3.6 Numerička provjera devetog slučaja

Posljednji slučaj za kojega se provjeravaju rezultati numeričke analize je ispitivanje kolone s naprezanjima uzrokovanim vodom. Opterećenja koja se javljaju u ovom slučaju su uzrokovana hidrostatskim tlakom od vode, vjetrom i vanjskim (atmosferskim) tlakom. Kao i u prethodnom slučaju opterećenja uzrokovana vjetrom su umanjena.



Slika 4.32 Opterećenja uzrokovana vjetrom



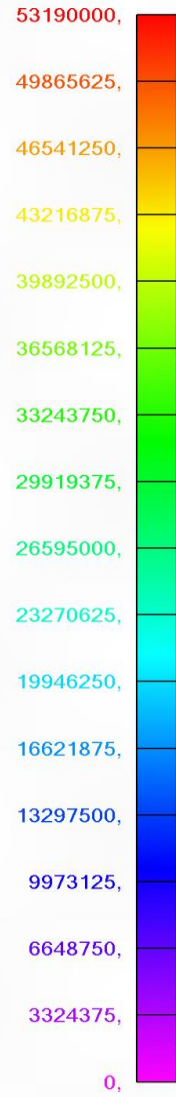
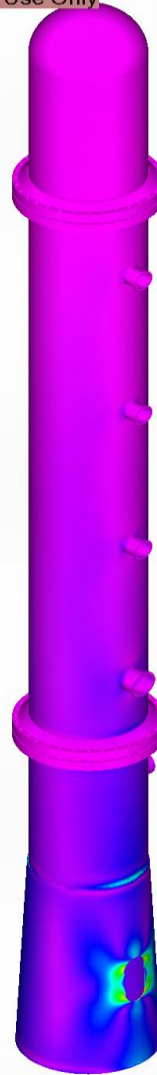
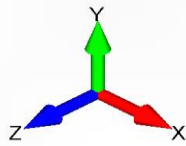
Slika 4.33 Opterećenja uzrokovana hidrostatskim i vanjskim tlakom

Na prethodnoj slici je vidljivo kako se s unutrašnje strane nalazi hidrostatski tlak uzrokovan vodom u koloni, dok je s vanjske strane aktivan atmosferski tlak. Način na koji je definiran hidrostatski tlak je jednak onome prikazanom na slici 4.13, jedina razlika je u tome što je gustoća tu $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Raspodjela naprezanja po koloni je prikazana na sljedećim slikama.

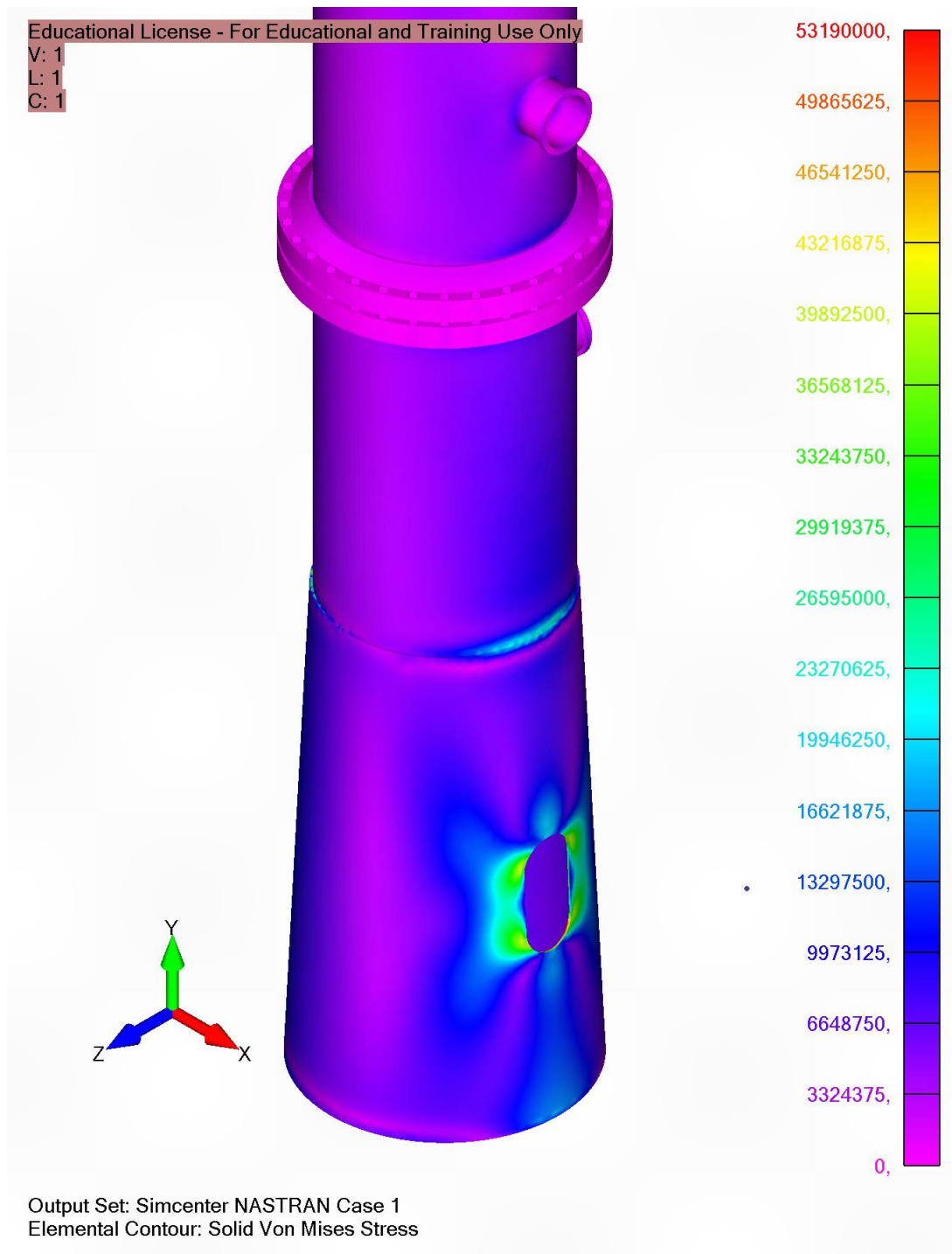
Educational License - For Educational and Training Use Only

V: 1
L: 1
C: 1



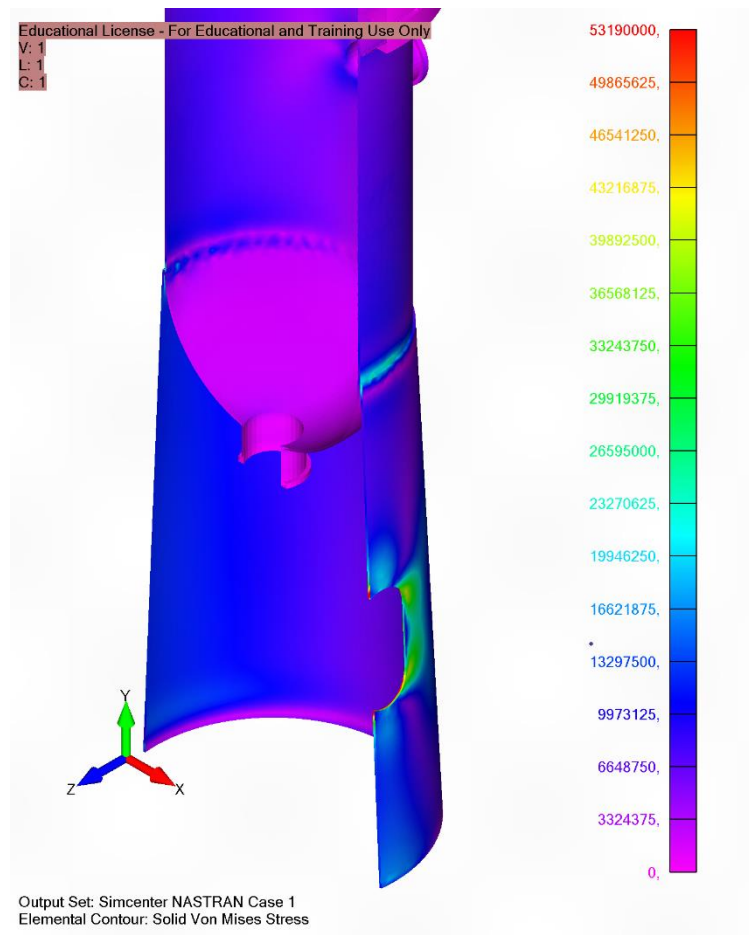
Output Set: Simcenter NASTRAN Case 1
Elemental Contour: Solid Von Mises Stress

Slika 4.34 Raspodjela Von Misesovih naprezanja po modelu



Slika 4.35 Mjesto gdje se javljaju kritična naprezanja

Kao i u svim slučajevima najveća naprezanja se nalaze na spoju kolone i postolja i na otvoru u postolju. Vidljivo je da se prema dnu naprezanja povećavaju, što je direktna posljedica djelovanja težine vode i težine same kolone. Budući da je centar ravnoteže kolone zamaknut zbog odvoda tekućina, ta naprezanja su veća na jednoj strani kolone.



Slika 4.36 Naprezanja na unutrašnjoj strani spremnika

Naprezanja na unutrašnjoj spremnika su najveća na dijelu gdje je spoj između kolone i postolja, što je posljedica koncentrata naprezanja na tom spoju. Također je vidljivo koliko se naprezanja povećava prema dnu spremnika. Na sferičnom dnu su manja naprezanja nego na cilindričnom plaštu zbog toga što na njega vjetar nema nikakvog utjecaja.

Samo 4 % elemenata ima naprezanja jednaka onim dobivenim analitičkim proračunom, a 18 % elemenata ima naprezanja veća od te vrijednosti. To je posljedica manjih naprezanja po cijeloj koloni nego u ostalim slučajevima, tj. sva veća naprezanja se javljaju na dnu spremnika zbog težine vode i kolone.

5. ZAKLJUČAK

Analitički proračuni daju točne rezultate, ali su ograničeni u tome što ne mogu dati odgovor na to kakva će biti raspodjela naprezanja po modelu. Analitički modeli služe isključivo za provjeru je li odabran materijal zadovoljavajući za odabranu geometriju. Kao alat za pomoć u vizualizaciji raspodjele naprezanja, na važnosti su dobile numeričke analize koje se za proračune služe metodom konačnih elemenata.

Numeričke analize nisu točne kao analitički proračuni, ali mogu prikazati raspodjelu naprezanja, te ukazati koji dijelovi modela su kritično opterećeni, te gdje će eventualno biti potrebno mjenjati geometriju, ili dodati ojačanja. Najveći problem numeričkih proračuna, kao i kod analitičkih proračuna leži u mogućim ljudskim pogreškama. Kod izrade modela u programima namjenjenim analizama metodom konačnih elemenata potrebno je paziti na velik broj različitih faktora. Nepravilna geometrija, nepravilan unos konstanti materijala, kao i neodgovarajuće postavljena opterećenja i oslonci mogu dovesti do prikaza naprezanja koja nisu realna. Zato je potreban veliki oprez pri korištenju numeričkih proračuna, te se trenutno oni ne bi trebali uzimati kao definitivna rješenja, nego ih je potrebno koristiti kao pomoćni alat pri provjerama analitičkih proračuna.

Daljnjim razvojem tehnologije, povećanjem računalne snage, a i razvojem umjetne inteligencije, numeričke analize će dobivati sve više na važnosti, zbog veće točnosti rješenja koju će moći postići.

6. LITERATURA

- [1] Radovic, Chapter 8, Petroleum,
<https://personal.ems.psu.edu/~radovic/Chapter8.pdf>, 28.08.2023
- [2] <https://pastor-inz.hr/lukoil-naftna-platforma-rusiji-co2-instalacija/>, 02.studeni 2023
- [3] Aspen Icarus Reference Guide, Version V8.0, 2012
- [4] https://energyeducation.ca/encyclopedia/Fractional_distillation, 30. listopad 2023
- [5] EN13445 , Unfired pressure vessels – Part 3: Design, 2009
- [6] <http://www.ippe.com/Process-Equipment/Subcategory0/COLUMN/Subcategory1/GLASS%20LINED/StockDetails/212447>, 15. lipnja 2023
- [7] <https://www.stahlportal.com/en/stock/14404-x2crnimo17-12-2-solution-annealed-and-quenched/>, 15.rujna 2023
- [8] ASME B16.47-2011, 2011
- [9] Tray Columns: Performance, K. Nandakumar, K. T. Chuang, University of Alberta, 2000
- [10] Eurocode 1: Action on structures – Part 1-4: General Actions – Wind Actions, 2010
- [11] Karta osnovne brzine vjetra, A. Bajić, Državni hidrometereološki zavod, 2012
- [12] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, 2004
- [13] <http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/karta.php>, 19. rujna 2023

7. SAŽETAK

U ovome diplomskom radu prikazana je provjera čvrstoće kolone za frakcijsku destilaciju. Kolona se provjeravala analitički i numerički. Analitička provjera se vršila pomoću normi EN 13445, dok se numerička analiza odrađivala u programu Femap. Pri konstruiranju kolone koristio se program PV Elite, koji također vrši proračune prema normi EN 13445. Kolona je izrađena u programu SolidWorks prije njenog ubacivanja u program Femap.

Ključne riječi: kolona, frakcijska destilacija, metoda konačnih elemenata, opterećenje, naprezanje, PV Elite, Femap

8. ABSTRACT

In this master's thesis, a strength verification of a column for fractional distillation is presented. The column was verified both analytically and numerically. The analytical verification was conducted using the EN 13445 standards, while the numerical analysis was performed in the Femap software. The column was designed using the PV Elite program, which also performs calculations according to the EN 13445 standard. The column was created in the SolidWorks program before being imported into Femap.

Keywords: column, fractional distillation, finite element method, load, stress, PV Elite, Femap.