Numerička analiza nosive konstrukcije ložišta kotla na kruta goriva

Orešković, Stjepan

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:777408

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**

Repository / Repozitorij:

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

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Stjepan Orešković

Zagreb, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Numerička analiza nosive konstrukcije ložišta kotla na kruta goriva

Mentor:
Doc. dr. sc. Ivica Skozrit

Student:
Stjepan Orešković

Zagreb, 2019.

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem svom mentoru, doc. dr. sc. Ivici Skozritu na ukazanom povjerenju, usmjeravanju, savjetima, uloženom vremenu i pomoći tijekom izrade ovog rada.
Također zahvaljujem svojoj zaručnici koja me bezuvijetno podržavala tokom besanih noći pisanja.
Dodatno zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima koji su bili dio mog puta na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Zagreb, lipanj 2019. Stjepan Orešković

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Stjepan Orešković** Mat. br.: 0035192142

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička analiza nosive konstrukcije ložišta kotla na kruta goriva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical Analysis of the Supporting Structure of the Boiler Furnace on Solid Fuels**

Opis zadatka:

Zahtjevi za električnom energijom postaju svakim danom sve veći tako da se uz obnovljive izvore energije još uvijek moramo oslanjati na konvencionalne termoelektrane i kogeneracijska postrojenja. Ložište kao jedan od glavnih dijelova kotla je podložan raznim proračunima, jedan od tih proračuna je i proračun stabilnosti i nosivosti konstrukcije. Postoje razne izvedbe ložišta i može se reći da je svako ložište specifično upravo za kotao za koje je napravljeno.

U radu je potrebno:
- iz dobivenih dimenzija izraditi tehničku dokumentaciju i 3D model ložišta kotla,
- na izrađenom CAD modelu ukloniti sve dijelove koji dodatno kompliciraju provedu numeričke analize, a ne utječu značajno na nosivost konstrukcije,
- numeričke proračune provesti primjenom programskih paketa Catia® i Abaqus® koji se temelje na metodi konačnih elemenata,
- za diskretizaciju numeričkih modela koristiti dostupne konačne elemente iz korištenih programskih paketa,
- na jednostavnim problemima provesti verifikaciju svih kasnije u numeričkim analizama korištenih konačnih elemenata i rezultate usporediti sa dostupnim analitičkim rješenjima,
- za pojednostavljeni CAD model nosive konstrukcije ložišta kotla, karakteristike materijala te rubne uvjete i opterećenje, provesti numeričke analize te odrediti:
    - optimalnu mrežu konačnih elemenata te prikazati konvergenciju rješenja,
    - potencijalna kritična mjesta na konstrukciji,
- numerički proračun usporediti sa valjanom normom.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: 2. svibnja 2019.

Datum predaje rada: 4. srpnja 2019.

Predviđeni datum obrane: 10., 11. i 12. srpnja 2019.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Ivica Skozrit

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

Sadržaj

Sadržaj **iv**

Popis slika **vi**

Popis tablica **ix**

Popis oznaka **ix**

Sažetak **xi**

Summary **xii**

1. Termoenergetska postrojenja **1**

1.1. Kogeneracijska postrojenja 2

1.1.1. Biomasa 3

1.1.2. Izgaranje na rešetki 4

2. Verifikacija konačnih elemenata **7**

2.1. Pomak kod T spoja 7

2.2. Tlačno opterećenje 11

2.3. Rješenje problema metodom konačnih elemenata u programskom paketu *CATIA* 15

2.3.1. Tlačno opterećenje cijevi 22

2.4. Rješenje problema metodom konačnih elemenata u programskom paketu *Abaqus* 24

2.4.1. Tlačno opterećenje cijevi 31

3. 3D model rešetke **33**

3.1. Detalji konstrukcije 36

4. Analiza u programskom paketu *CATIA* **38**

4.1. Rubni uvjeti i opterećenja 39

4.2. Analiza pomaka konstrukcije 41

4.3. Analiza tlaka i pomaka 51

4.4. Numerička rješenja 57

5. Analiza u programskom paketu *Abaqus* **58**

5.1. Rubni uvjeti i opterećenja 58

5.2. Analiza pomaka konstrukcije 60

5.3. Analiza tlaka i pomaka 65

5.4. Numerička rješenja 69

6. Zaključak **70**

Popis slika

1.1 Shema kogeneracije na biološki otpad [3] 2
1.2 Primjeri biomase, njihovo skladištenje i dobava [5-8] 4
1.3 Suvremeni kotao na biomasu s izgaranjem na nagnutoj rešetki [10] 5
1.4 Nagnuta, vodom hlađena, vibrirajuća rešetka za izgaranje biomase [10] . 6

2.1 Dvije spojene cijevi 7
2.2 Pojednostavljenje cijevi br. 2 8
2.3 Cijev opterećena silom aksijalnom F i unutarnjim tlakom p 11
2.4 Raspodjela radijalnih i cirkularnih naprezanja 13
2.5 Diferencijalni elementi s ucrtanim naprezanjima 14
2.6 Model izrađen iz dva dijela u *CATIA*-i 15
2.7 *Fastened join element* veza u *CATIA*-i 15
2.8 Definirani rubni uvjeti i opterećenje 16
2.9 Prikaz konvergencije rešenja pomaka u mm pomnoženih sa 10^3 17
2.10 Raspodjela pomaka za različitu gustoću mreže za silu F i TE10 KE . . . 18
2.11 Raspodjela naprezanja za različitu gustoću mreže za silu F i TE10 KE . 19
2.12 Raspodjela Von Mises-ovih naprezanja za rubni uvjet pomaka 20
2.13 Detalji koncentracije naprezanja nakon provedene adaptivne analize . . . 21
2.14 Detalji koncentracije naprezanja 22
2.15 Model sa opterećenjima i rubnim uvjetima 23
2.16 Mreža od 21653 konačna elementa 23
2.17 Prikaz naprezanja za model diskretiziran sa 21653 KE 24
2.18 Preuzeta geometrija iz *CATIA*-e u *Abaqus*-u 24
2.19 *Tie* veza u *Abaqus*-u 25
2.20 Rubni uvjeti i opterećenje u *Abaqus*-u 25
2.21 Model diskretiziran sa 20589 konačnih elemenata 25

2.22 Prikaz konvergencije rešenja pomaka u mm pomnoženih sa 10^3 26
2.23 Raspodjela pomaka za različitu gustoću mreže za silu F i C3D10 KE . . 27
2.24 Raspodjela naprezanja za različitu gustoću mreže za silu F i C3D10 KE . 28
2.25 Rubni uvjeti za modela izrađenog uz pomoć veze *Tie* i iz jednog dijela sa zaobljenjem 29
2.26 Diskretizirana geometrija drugog modela sa 16042 konačna elementa . . . 29
2.27 Raspodjela Von Mises-ovih naprezanja za rubni uvjet pomaka 30
2.28 Diskretizirana geometrija drugog modela sa 38215 konačna elementa . . . 30
2.29 Model sa opterećenjima i rubnim uvjetima 31
2.30 Mreža od 22435 konačna elementa 31
2.31 Raspored Von Mises-ovih naprezanja na cijevi 32

3.1 Prikaz dispozicije ložišta sa svim dijelovima 33
3.2 Prikaz pola 3D modela donjeg dijela rešetke 34
3.3 Prikaz pola 3D modela gornjeg dijela rešetke 34
3.4 Prikaz pola 3D modela središnjeg dijela rešetke 35
3.5 Prikaz cijelog 3D modela 35
3.6 Ojačanja na komorama za gornji i donji dio modela 36
3.7 HEA200 i C200 spojeni kao jedan dio sa cijevima 37

4.1 *Fastened join element* veze 39
4.2 Prikaz rubnih uvjeta na pola modela u *CATIA*-i 40
4.3 Dio mreže modela diskretizranog sa 3178980 konačnih elemenata 41
4.4 Nefizikalna koncentracija naprezanja nakon adaptivne analize 42
4.5 Raspodjela pomaka po cijeloj konstrukciji 43
4.6 Raspodjela Von Mises-ovih naprezanja po cijeloj konstrukciji za pomak konstrukcije prema gore 44
4.7 Raspodjela naprezanja na detaljima konstrukcije za pomak prema gore . 45
4.8 Raspodjela naprezanja na detaljima konstrukcije za pomak prema gore . 46
4.9 Raspodjela naprezanja na unutarnjim dijelovima cijevi za pomak prema gore 47
4.10 Raspodjela naprezanja na detaljima konstrukcije za pomak prema dolje . 48
4.11 Raspodjela naprezanja na detaljima konstrukcije za pomak prema dolje . 49

4.12 Raspodjela naprezanja na unutarnjim dijelovima cijevi za pomak prema dolje 50
4.13 Pozicije na kojima će se vršiti simulacija 51
4.14 *smooth spider* element 52
4.15 senzor na GFT pozicije 4 52
4.16 Pozicija 1 sa rubnim uvjetima i opterećenjem 53
4.17 Dio mreže pozicije 1 diskretiziranog s 176593 KE 53
4.18 Raspored Von Mises-ovih naprezanja na poziciji 1 za RU pomaka 54
4.19 Raspodejela Von Mises-ovih naprezanja za poziciju 1 55
4.20 Raspodejela Von Mises-ovih naprezanja za poziciju 2 55
4.21 Raspodejela Von Mises-ovih naprezanja za poziciju 3 56
4.22 Raspodejela Von Mises-ovih naprezanja za poziciju 4 56

5.1 *Tie* veze 59
5.2 Prikaz rubnih uvjeta na pola modela u *Abaqus*-u 59
5.3 Prikaz naprezanja za različitu gustoću mreže 60
5.4 Dio mreže modela diskretizranog sa 2004267 konačnih elemenata 61
5.5 Raspodjela naprezanja po cijeloj konstrukciji za pomak prema gore . . . 62
5.6 Raspodjela naprezanja na detaljima konstrukcije za pomak prema gore . 63
5.7 Raspodjela naprezanja na detaljima konstrukcije za pomak prema dolje . 64
5.8 Pozicija 4 65
5.9 Pozicija 4 sa rubnim uvjetima i opterećenjem 66
5.10 Pozicija 4 diskretizirana s 153732 KE 66
5.11 Detalji raspodjele Von Mises-ovih naprezanja za rubne uvjete pomaka . . 67
5.12 Raspodejela Von Mises-ovih naprezanja za poziciju 1 67
5.13 Raspodejela Von Mises-ovih naprezanja za poziciju 2 68
5.14 Raspodejela Von Mises-ovih naprezanja za poziciju 3 68
5.15 Raspodejela Von Mises-ovih naprezanja za poziciju 4 68

Popis tablica

2.1 Zadani parametri 7
2.2 Vrijednosti dimenzija sa slike 2.3 11
2.3 Konvergencija rješenja pomaka TE10 KE verifikacijskog primjera 17
2.4 Greška koncentracije naprezanja za različiti broj TE10 KE 19
2.5 Usporedba naprezanja za različito spojene modele 21
2.6 Rješenja za diferencijalne elementa A i B 23
2.7 Konvergencija rješenja pomaka C3D10 konačnih elemenata 26
2.8 Usporedba naprezanja za različito spojene modele 29
2.9 Rješenja za diferencijalne elementa A i B 32
4.1 Pomaci GRT i DRT za pozicije 1-4 u mm 52
4.2 Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ u MPa pri različitim temperaturama prema DIN EN10028-2 57
5.1 Pomaci GRT i DRT za pozicije 1-4 u mm 65

Popis oznaka

A_1	mm^2	površina poprečnog presjeka cijevi
a, b, c	mm	duljine
C_1, C_3, C_5	Nmm^2	konstante
C_2, C_4, C_6	Nmm^3	konstante
D	mm	vanjski promjer cijevi
D_1, D_2	mm	vanjski promjeri cijevi
d	mm	unutarnji promjer cijevi
d_1, d_2	mm	unutarnji promjeri cijevi
E	MPa	Youngov modul elastičnosti
F	N	sila
I_y	m^4	aksijalni moment tromosti
L	mm	duljina cijevi
L_1, L_2	mm	duljine cijevi
ΔL	mm	produljenje
M	Nm	moment
p	MPa	tlak
r_1	mm	vanjski polumjer cijevi
r_2	mm	unutarnji polumjer cijevi
x	mm	duljina
δ	mm	debljina stjenke posude
σ_r	MPa	radijalno naprezanje
σ_φ	MPa	cirkularno naprezanje naprezanje
σ_z	MPa	vlačno naprezanje
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	MPa	glavne osi naprezanja
σ_{ekv}	MPa	ekvivalentno naprezanje

Sažetak

U radu je provedena numerička analiza nosive konstrukcije ložišta kotla na kruta goriva u dva programska paketa, *CATIA* i *Abaqus*. Ukratko su opisana termoenergetska postrojenja i njihova važnost i izvedbe. Prikazano je izgaranje na rešetci kao jedno od izvedbi ložišta. Za potrebe vrednovanja simulacije i konačnih elemenata, izrađena su dva verifikacijska primjera te je za njih prikazano analitičko rješenje koje je kasnije uspoređeno sa numeričkim rješenjima iz programskih paketa *CATIA* i *Abaqus*. Prikazana je kovnergencija konačnih elemenata za svaki verifikacijski primjer. Prema dostupnoj dokumentaciji izrađen je 3D model kotla te su sa njega uklonjeni svi dijelovi koji ne utječu na stabilnost konstrukcije. Izrađen je tehnički crtež tog modela. Numerička analiza izrađena je na polovici konvergiranog modela u oba programska paketa. Napravljena su četiri podmodela sa novim i guščim mrežama na mjestima koncentracije naprezanja. Numerička rješenja su uspoređena sa važećom normom.

Ključne riječi: CATIA, Abaqus, ložište, numerička analiza, kogeneracijsko postrojenje, biomasa

Summary

This thesis covers the numerical analysis of the supporting structure of a furnace in a steam boiler operating on solid fuels. The numerical analysis is performed utilizing two computational packages employing the Finite Element Method (FEM) for structural analysis: *CATIA* and *Abaqus*. A brief overview of thermal power plants is given, outlining the major differences in design and construction of such plants. A more detailed description of a combustion system featuring a grate firing design used for solid fuels is presented. Two simplified models were used for the purpose of verifying numerical simulation and finite elements used in the analysis. The verification process was performed by comparing the results of the analytical analysis of the two verification models with the appropriate results of the analyses performed in the aforementioned computational packages and displaying the convergence of finite elements for each model.

Furthermore, a 3D representation of the boiler was modeled based on the given industrial documentation and a simplified 3D model was created retaining only the necessary design features affecting the the stability of the structure and the structural analysis in general. One half of the simplified model was used for numerical simulations in both computational programs (*CATIA* and *Abaqus*). A mesh sensitivity study was performed using four models with varying mesh density near the regions of increased concentration of stresses. The final results of the numerical analyses are presented and verified against the currently valid norms.

Keywords: CATIA, Abaqus, furnace, Finite Element Method, cogeneration, biomass

1 Termoenergetska postrojenja

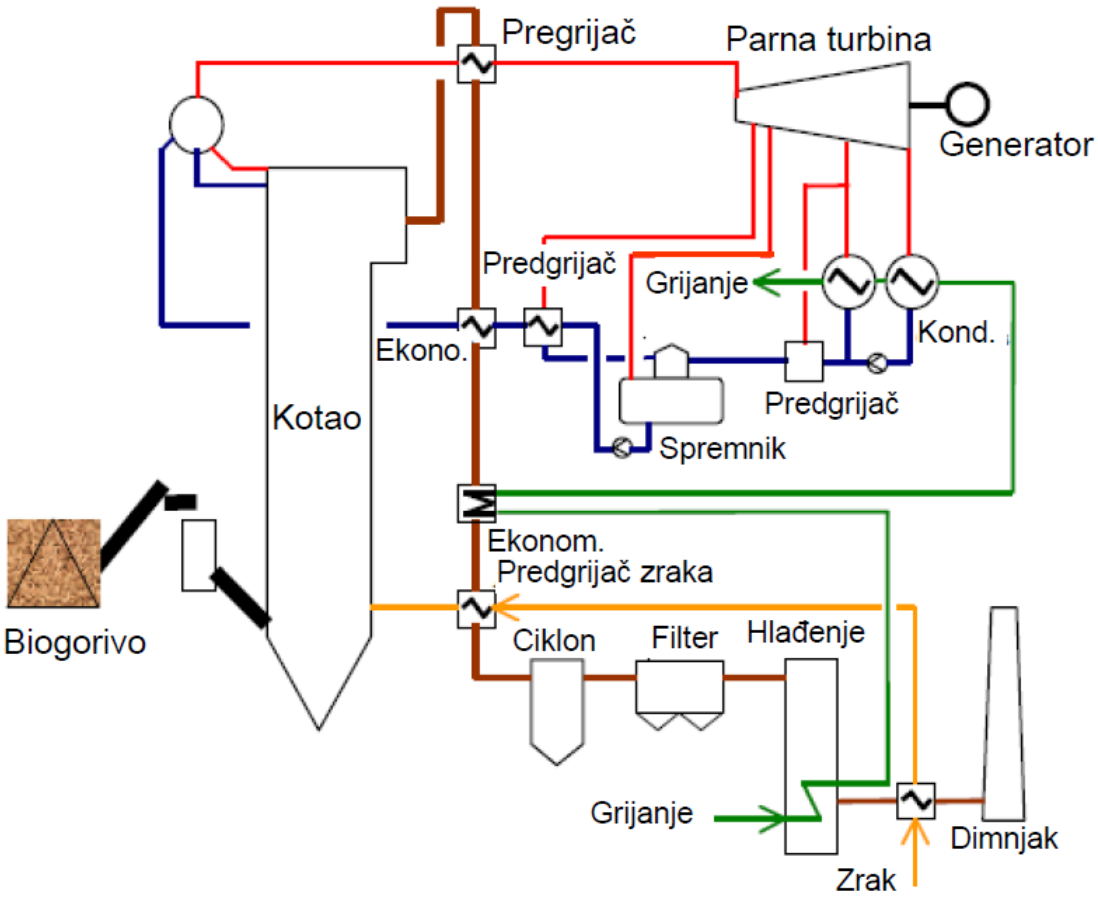
Glavni zadatak svih toplinskih postrojenja je pretvorba energije iz određenog, primarnog oblika energije (fosilna goriva, obnovljivi izvori, nuklearna energija itd.) u energiju prikladnu za iskorištavanje u nekom proizvodnom ili industrijskom procesu (električna, ogrjevna, rashladna energija itd.)[1]. Danas kada na svijetu živi gotovo 7 milijardi ljudi potreba za električnom i ogrijevnom energijom je veća nego ikada prije. Život modernog čovjeka okruženog tehnologijom u gotovo svim aspektima života, kao i želja za ostvarivanjem visokog standarda življenja, nužno dovode do velikih potreba za proizvodnjom električne energije. Upravo je iz tog razloga električna energija temeljni oblik energije, koji se najčešće proizvodi u termoenergetskim postrojenjima.
Termoenergetska postrojenja su toplinska postrojenja koja vrše pretvorbu kemijske energije različitih goriva u mehaničku energiju, a ona se zatim pretvara u električnu i/ili toplinsku energiju. Navedena pretvorba kemijske energije vrši se pomoću različitih tipova energetskih strojeva ovisno o tipu postrojenja.
Općenito se termoenergetska postrojenja, s obzirom na vrstu procesa koji se u njima koristi za pretvorbu energije, mogu podijeliti na sljedeće tipove [2]:

- nuklearna postrojenja koja kao izvore energije koriste nuklearnu fisiju,
- manja postrojenja koja koriste motore s unutarnjim izgaranjem,
- parno-turbinska postrojenja,
- plinsko-turbinska postrojenja,,
- kombinirana postrojenja,
- kogeneracijska postrojenja.

Obnovljivi izvori energije kao što je biomasa, nuklearna, sunčeva energija su sve više zastupljeni kao alternativa fosilnim gorivima ali i dalje u nedovoljnoj mjeri. Obnovljivi izvori energije imaju visoke investicijske troškovi i niske cijene toplinske i električne energije zbog čega je period povrata uloženog kapitala dug.
U nastavku poglavlja govori se nešto općenito kogeneracijskim postrojenjima, što su, koje su vrste, koji su osnovni dijelovi postrojenja, prednosti i nedostatci, vrste goriva koje se koriste itd.

1.1. Kogeneracijska postrojenja

Zbog velikih gubitaka topline u procesu pretvorbe energije efikasnost parno-turbinskih postrojenja je mala. Hlađenje kondenzata najviše doprinosi tom smanjenju efikasnosti zato što se ta toplina nepovratno baca u okoliš. Da bi se povećala iskoristivost termoenergetskog postrojenja napravljena su kogeneracijska postrojenja koja proizvode električnu i najčešće toplinsku energiju. Glavna ideja tih postrojenja je iskorištavanje otpadne topline iz procesa proizvodnje električne energije za proizvodnju toplinske energije. U ovoj tehnologiji dominira izgaranje krute biomase u ložištu. Shema kogeneracijskog postrojenja sa osnovnim dijelovima prikazana je na slici 1.1.



Slika 1.1: Shema kogeneracije na biološki otpad [3]

Toplinska energija nastala kogeneracijom može se koristiti u industrijskim i proizvodnim procesima, ali i kao izvor topline za grijanje prostora. S obzirom na to da ti procesi

najčešće ne zahtijevaju paru visokih parametara, kogeneracijom se proizvodi i para niskih parametara, vrela ili topla voda. Time je omogućena integracija procesa proizvodnje pare visokih parametara, koja se koristi u proizvodnji električne energije na parnoj turbini te procesa proizvodnje pare niskih parametara za potrebe industrije ili grijanja, a da pri tome ne dolazi do velikih gubitaka. Osnovna svrha kogeneracije je postizanje određene uštede u primarnoj energiji u odnosu na odvojenu proizvodnju toplinske i električne energije.

1.1.1. Biomasa

Biomasa je biorazgradivi dio ostataka i otpadaka od šumarstva (drvne industrije), komunalnog i industrijskog otpada te poljoprivrede (biljni i životinjski ostaci). Gorivo je uglavnom prirodnog porijekla te je u cijelosti obnovljivo. Naime, biomasa se smatra obnovljivim izvorom energije [4]. Gorivo u kogeneracijskim postrojenjima na biomasu može biti: drvena sječka, peleti, piljevina, životinjski izmet, ostaci žitarica, gradski otpad itd. (slika 1.2 a) i b)). Biomasa kao energent najvećim dijelom obuhvaća šumsku (dominantno), industrijsku šumsku (drveni otpad) i poljoprivrednu biomasu. Skladištenje drvne biomase kao i njezin prijenos do ložišta kogeneracije vidi se na slici 1.2 c) i d). Količina biomase je ograničena iako je ona obnovljivi izvor, ali pravilnim upravljanjem šumama i pošumljavanjem te svakodnevnim kontrolama i nadzorom tih grana industrije može se dovesti do ravnoteže u tome području.
Prema Strategiji energetskog razvoja Hrvatske do 2020. godine [23] predviđa se značajno povećanje sada gotovo zanemarive proizvodnje električne energije iz biomase u elektranama, industrijskim i malim kućanskim kogeneracijama u Hrvatskoj, te se ovisno o scenariju očekuje od preko 500 GWh do preko 4000 GWh električne energije, pri čemu se najveći doprinos očekuje u izgradnji elektrana na biomasu. Šumski potencijal u Hrvatskoj je vrlo velik s obzirom da je gotovo 42 % hrvatskoga teritorija prekriveno šumama. Danas se biomasa sve više počinje koristiti kao zamjena za fosilna goriva zbog mnogo manjih štetnih emisija koje nastaju prilikom izgaranja. Biomasa se također smatra CO_2 neutralnom, jer taj CO_2 koji je nastao izgaranjem, služi kasnije biljkama za rast i razvoj, tj. biljke ga razgrađuju, uz pomoć vode H_2O, na organske tvari (šećere) i kisik O_2.
Biomasa, kao kruto gorivo, u pogledu kemijskih svojstava ima određene prednosti, ali i nedostatke. Većina goriva iz biomase je s vrlo malim udjelom pepela, što olakšava

održavanje opreme i zbrinjavanje otpadnog pepela koji nastaje izgaranjem. Nedostaci goriva iz biomase su znatni udjeli vlage u sastavu goriva (u vezanom i nevezanom obliku), alkalnih spojeva (kalij i natrij) i klora. Povećana vlaga u gorivu smanjuje ogrjevnu vrijednost i zahtjeva izvedbe ložišta s velikim površinama za zagrijavanje i sušenje biomase. Alkalni spojevi i klor doprinose koroziji i eroziji ogrjevnih površina generatora pare ili generatora topline.

a) izgled drvne sječke

b) izgled briketa

c) skladištenje drvne biomase

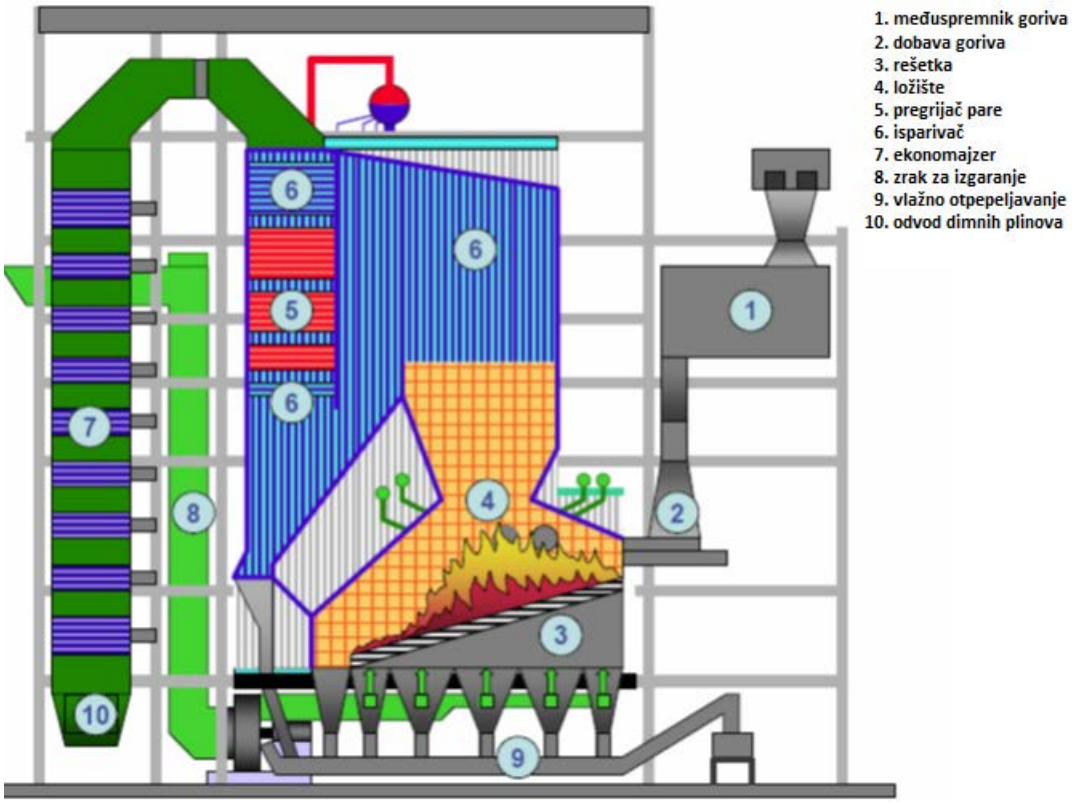
d) prijenos biomase pužnim vijcima

Slika 1.2: Primjeri biomase, njihovo skladištenje i dobava [5-8]

1.1.2. Izgaranje na rešetki

Ova tehnologija izgaranja je tradicionalnija tehnologija. Korištena je duži niz godina i u isto vrijeme se dosta razvila pa su neki nedostatci otklonjeni. Izgaranje se odvija u kotlu (slika 1.3). Na kotlu je smještena rešetka na kojoj se nalaze biomasa i otpad. Tehnologija izgaranja u rešetci je pogodnija za kruta goriva (poljoprivredni i šumarski ostatci) te za postrojenja manje snage (do 5 MW). Kontrola i regulacija izgaranja se temelje na stvaranju turbulencije što pospješuje sam proces izgaranja. To se izvršava na način da se zrak upuhuje ispod same rešetke. Nedostatak ove tehnologije izgaranja

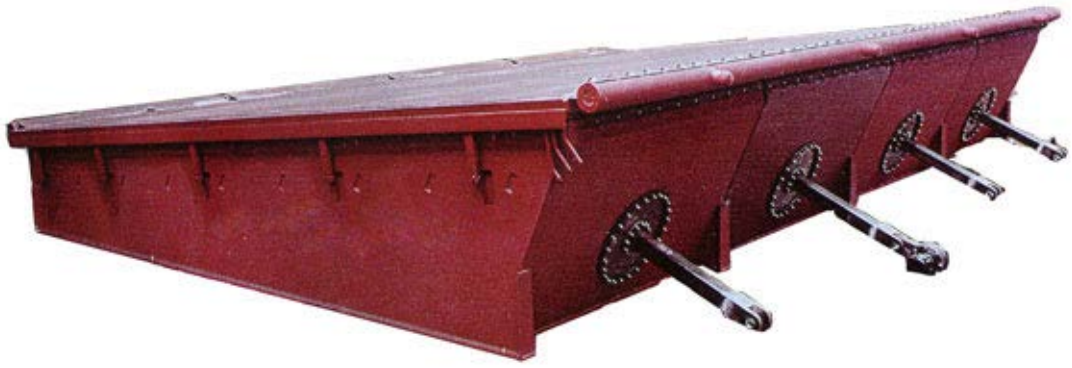
jest veća nepotpunost izgaranja u odnosu na drugu tehnologiju izgaranja. Nepotpunost izgaranja sama po sebi znači gubitak određene topline. To se može dogoditi zbog nedovoljne homogenosti goriva ili zbog nedovoljne količine zraka u ložištu. Zbog toga je pri samom procesu izgaranja potrebno pronaći ravnotežu između tih parametara jer preveliki pretičak zraka znači da je izgaranje nepotpuno te da je izlazna entalpija dimnih plinova veća od poželjne[9].



Slika 1.3: Suvremeni kotao na biomasu s izgaranjem na nagnutoj rešetki [10]

Ložišta s izgaranjem na rešetki predstavljaju razvijenu, tržišno zrelu i dugo vremena standardnu tehnologiju izgaranja biomase koja se u različitim izvedbama nalazi u ponudi brojnih proizvođača energetske opreme. Rešetka omogućava izgaranje sječke, piljevine, krupne i komadne biomase. Prikladna je i za izgaranje vlažnih goriva, različite kvalitete, kao i goriva s visokim udjelom pepela. Kvalitetno vođenje procesa izgaranja na rešetki podrazumijeva homogenu distribuciju goriva po čitavoj površini i ravnomjerno dovođenje primarnog zraka koji se upuhuje ispod rešetke. Nehomogenosti u dovodu primarnog zraka

mogu izazvati stvaranje šljake, povećati količinu letećeg pepela i povećati pretičak zraka potreban za osiguravanje potpunog izgaranja. S obzirom na način dovođenja goriva u ložište razlikuju se rešetke s donjim i rešetke s gornjim dovodom goriva. Rešetke s donjim dovodom goriva prikladne su za postrojenja manjih snaga i za izgaranje biomase koja sadrži malo pepela kao što su drvna sječka i piljevina. Biomasa koja sadrži veće količine pepela, kao što je kora drveta, slama žitarica ili trava, zahtijeva efikasniji sustav uklanjanja pepela. U ložištima s donjim dovodom goriva sinterirane ili rastaljene čestice pepela prekrivaju gorivi sloj. Kroz pokrov od pepela povremeno izbija mješavina goriva i zraka što može nepovoljno djelovati na stabilnost procesa izgaranja [10].
Suvremena rješenja sustava izgaranja uključuju kontinuirano pomičnu i vodom hlađenu rešetku, automatski nadzor i regulaciju visine sloja, te regulaciju brzine vrtnje ventilatora primarnog zraka. Primarni zrak dovodi se ispod rešetke i sekcijski kako bi se osigurala točno određena količina potrebna za pokrivanje potreba za primarnim zrakom u zoni sušenja, zoni rasplinjavanja i zoni izgaranja. Sekcijska regulacija protoka primarnog zraka osigurava stabilan proces izgaranja i na nižim opterećenjima, kao i regulaciju potrebnog omjera primarnog i sekundarnog zraka u cilju minimiziranja produkcije dušikovih oksida. Različite izvedbe nagnutih i vibrirajućih rešetki, s gornjim dovodom goriva koriste se za izgaranje biomase u postrojenjima u relativno širokom rasponu kapaciteta od 5 MWt do 120 MWt. Ilustracija nagnute, vodom hlađene vibrirajuće rešetke prikazana je na slici 1.4.



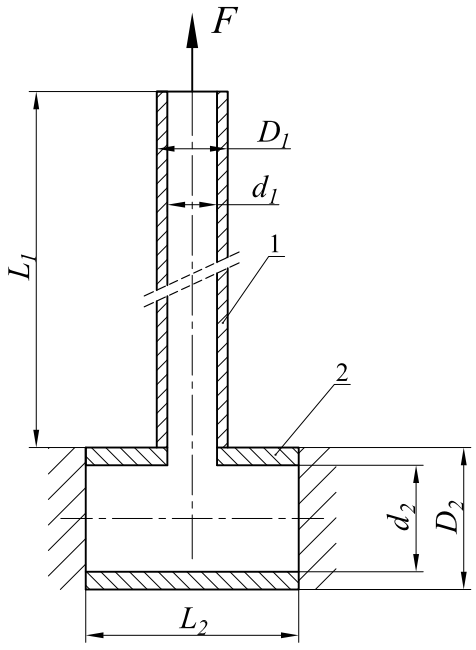
Slika 1.4: Nagnuta, vodom hlađena, vibrirajuća rešetka za izgaranje biomase [10]

2 Verifikacija konačnih elemenata

U ovom poglavlju jednostavan primjer poslužit će za verifikaciju konačnih elemenata i veza između dijelova. Rezultati će biti uspoređeni sa analitičkim rješenjem. Verifikacija konačnih elemenata i veza između dva dijela će biti izvedena u programskim paketima *Abaqus*[11-12] i *CATIA-V5R20*[13-14].

2.1. Pomak kod T spoja

Zadane su dvije cijevi različitih promjera i debljina stjenki te su spojene u obliku slova T. Na gornjoj cijevi zadana je sila F. Pretpostavka je da je cijev 2 kruta jer je zanemarive dužine u odnosu na cijev 1. Dimenzije, svojstva materijala i iznos sile dani su u tablici 2.1. Za dimenzije i opterećenje prema slici 2.1 provesti analizu pomaka spoja dvije cijevi.



Slika 2.1: Dvije spojene cijevi

Tablica 2.1: Zadani parametri

D_1	38	mm
d_1	27,3	mm
D_2	114,3	mm
d_2	74,3	mm
E	200000	MPa
F	10000	N
L_1	1000	mm
L_2	60	mm
ν	0,266	-

Oznake na slici 2.1 i tablici 2.1 su:

D_1, D_2 - vanjski promjeri cijevi u mm,

d_1, d_2 - unutarnji promjeri cijevi u mm,

E - Youngov modul elastičnosti u MPa,

F - sila u N,

L_1, L_2 - duljine cijevi u mm,

ν - Poissonov faktor.

Prvo je analiziran pomak cijevi 1 zbog pretpostavke puno većeg aksijalnog pomaka nego pomak kod savijanja cijevi 2. Aksijalni pomak računa se kao[15]:

$$\Delta l_1 = \frac{F L_1}{A_1 E}, \tag{2.1}$$

gdje je A_1 površina poprečnog presjeka cijevi 1

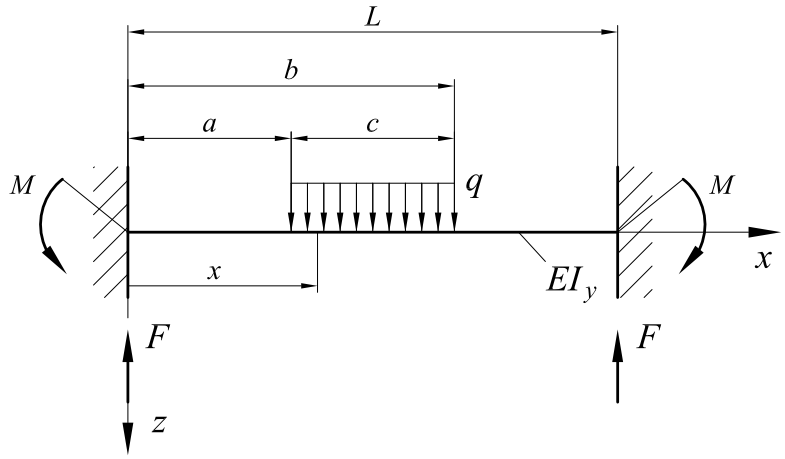
$$A_1 = (D_1^2 - d_1^2)\frac{\pi}{4} = (38^2 - 27,3^2)\frac{\pi}{4} = 548,766\,\text{mm}^2. \tag{2.2}$$

Tako da aksijalni pomak cijevi iznosi:

$$\Delta l_1 = \frac{10000 \cdot 1000}{548,766 \cdot 200000} = 0,09111\,\text{mm}. \tag{2.3}$$

Za pomak cijevi 2 potrebno je pretpostaviti kao dvostruko uklješten statičnki neodređenu gredu kao na slici (2.2).

Zadano je: $a = 11$ mm, $b = 49$ mm, $c = 38$ mm, $L = L_2 = 60$ mm, $q = \frac{500}{19}$ N/mm.



Slika 2.2: Pojednostavljenje cijevi br. 2

Postavljanjem jednadžbe ravnoteže sila po z osi $-F + qc - F = 0$ za sliku 2.2 dobije se da su reakcije u osloncima F jednake:

$$F = \frac{qc}{2} = 5000\,\mathrm{N}. \tag{2.4}$$

Momenti savijanja u presjecima nosača su:

$$\begin{aligned} M_y(x) &= -M + Fx && \text{za} \quad x \le a, \\ M_y(x) &= -M + Fx - \frac{q}{2}(x-a)^2 && \text{za} \quad a \le x \le b, \\ M_y(x) &= -M + Fx - qc\left(x - \frac{L}{2}\right) && \text{za} \quad x \ge b. \end{aligned} \tag{2.5}$$

Nakon uvrštenja u diferencijalne jednadžbe elastične linije i integriranja slijedi.
Za dio $x \le a$:

$$\begin{aligned} EI_y\frac{\mathrm{d}^2w}{\mathrm{d}x^2} &= -M_y(x) = M - Fx / \int, \\ EI_y\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}x} &= Mx - \frac{Fx^2}{2} + C_1 / \int, && (a) \\ EI_y w &= \frac{Mx^2}{2} - \frac{Fx^3}{6} + C_1x + C_2. && (b) \end{aligned} \tag{2.6}$$

Za dio $a \le x \le b$:

$$\begin{aligned} EI_y\frac{\mathrm{d}^2w}{\mathrm{d}x^2} &= -M_y(x) = M - Fx + \frac{q}{2}(x-a)^2 / \int, \\ EI_y\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}x} &= Mx - \frac{Fx^2}{2} + \frac{q}{2}\left(\frac{x^3}{3} - ax^2 + a^2x\right) + C_3 \int, && (c) \\ EI_y w &= \frac{Mx^2}{2} - \frac{Fx^3}{6} + \frac{q}{2}\left(\frac{x^4}{12} - \frac{ax^3}{3} + \frac{a^2x^2}{2}\right) + C_3x + C_4. && (d) \end{aligned} \tag{2.7}$$

Za dio $x \ge b$:

$$\begin{aligned} EI_y\frac{\mathrm{d}^2w}{\mathrm{d}x^2} &= -M_y(x) = M - Fx + qc\left(x - \frac{L}{2}\right) / \int, \\ EI_y\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}x} &= Mx - \frac{Fx^2}{2} + qc\left(\frac{x^2}{2} - \frac{Lx}{2}\right) + C_5 \int, && (e) \\ EI_y w &= \frac{Mx^2}{2} - \frac{Fx^3}{6} + qc\left(\frac{x^3}{6} - \frac{Lx^2}{4}\right) + C_5x + C_6. && (f) \end{aligned} \tag{2.8}$$

Konstante integracije određuju se iz rubnih uvjeta čvrstoće nosača:

1. Iz (2.6) za $x = 0$ progib $w = 0$ te iz (b) slijedi $C_2 = 0$.
2. Također iz (2.6) za $x = 0$ nagib elastične linije $\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}x} = 0$ te iz (a) slijedi $C_1 = 0$.
3. Za $x = a$ vrijedi jednakost izraza $(a) = (c)$ te slijedi:

$$\begin{gathered} Ma - \frac{Fa^2}{2} = Ma - \frac{Fa^2}{2} + \frac{q}{2}\left(\frac{a^3}{3} - a^3 + a^3\right) + C_3, \\ C_3 = -\frac{qa^3}{6}. \end{gathered} \tag{2.9}$$

4. Za $x = a$ vrijedi jednakost izraza $(b) = (d)$ te slijedi:

$$\begin{gathered} \frac{ML^2}{2} - \frac{FL^3}{6} = \frac{ML^2}{2} - \frac{FL^3}{6} + \frac{q}{2}\left(\frac{a^4}{12} - \frac{a^4}{3} + \frac{a^4}{2}\right) - \frac{qa^4}{6} + C_4, \\ C_4 = \frac{qa^4}{24}. \end{gathered} \tag{2.10}$$

5. Iz (2.8) za $x = L$ nagib elastične linije $\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}x} = 0$ te iz (e) slijedi:

$$\begin{gathered} ML - \frac{FL^2}{2} + qc\left(\frac{L^2}{2} - \frac{L^2}{2}\right) + C_5 = 0, \\ C_5 = \frac{FL^2}{2} - ML. \end{gathered} \tag{2.11}$$

6. Iz (2.8) za $x = L$ progib $w = 0$ te iz (f) slijedi:

$$\begin{gathered} \frac{ML^2}{2} - \frac{FL^3}{6} + qc\left(\frac{L^3}{6} - \frac{L^3}{4}\right) + \frac{FL^3}{2} - ML^2 + C_6 = 0, \\ C_6 = \frac{ML^2}{2} - \frac{FL^3}{3} + \frac{qc}{12}. \end{gathered} \tag{2.12}$$

Vidljivo je da je maksimalan progib na sredini nosača stoga iz (c) uz uvjet $\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}x} = 0$ uz $x = \frac{L}{2}$ slijedi da je reaktivni moment $M = 64,9722$ Nm.

Sređivanjem izraza (d) slijedi jednadžba elastične linije za dio $a \leq x \leq b$ gdje se nalazi najveći progib:

$$w = \frac{1}{6EI}\left[Fx^3 - 3Mx^2 - \frac{q}{4}(x-a)^4\right]. \tag{2.13}$$

Moment tromosti cijevi 2 iznosi:

$$I_y = \frac{(D_2^4 - d_2^4)\pi}{64} = \frac{(0,1143^4 - 0,0743^4)\pi}{64} = 6,8823 \cdot 10^{-6}\mathrm{m}^4. \tag{2.14}$$

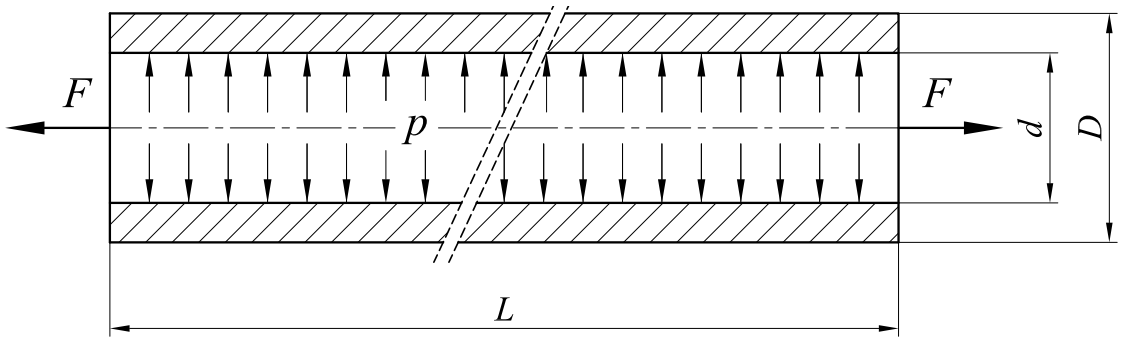
Uvrštavanjem reakcija u osloncima i zamjenom $x = \frac{L}{2}$ dobije se maksimalan progib nosača:

$$w_{\max} = -5,9329 \cdot 10^{-5}\,\text{mm}. \tag{2.15}$$

Aksijalni pomak cijevi 1 je više od 1500 puta veći od progiba cijevi 2 što znači da se ta cijev može smatrati krutom i neće znatno utjecati na ukupan pomak sklopa.

2.2. Tlačno opterećenje

U ovome primjeru riječ je o otvorenoj cijevi opterećenoj unutarnjim tlakom p i aksijalnom silom F prema slici. Potrebno je odrediti radi li se o tankostjenoj ili debelostjenoj konstrzukciji i odrediti glavna i ekvivalentno naprezanje prema teoriji najveće distorzijske energije poznatije kao 4. teorija čvrstoće ili HMH teorija.



Slika 2.3: Cijev opterećena silom aksijalnom F i unutarnjim tlakom p

Dimenzije, modul elastičnosti i iznos sile dan je tablicom 2.2.

Tablica 2.2: Vrijednosti dimenzija sa slike 2.3

D	38	mm	- vanjski promjer cijevi
d	27,3	mm	- unutarnji promjer cijevi
E	200000	MPa	- Youngov modul elastičnosti
F	10000	N	- sila
L	1000	mm	- duljina cijevi
p	60	bar	- tlak
ν	0,266	-	- Poissonov faktor

Iz zadanih parametara prvo je potrebno provjeriti radi li se o debelostjenoj ili tankostjenoj konstrukciji. Da bi šuplji cilindar, odnosno cijev, smatrali debelostjenim cilindrom, mora biti ispunjen sljedeći kriterij [19]:

$$\delta = r_2 - r_1 > \frac{1}{10}\frac{r_1 + r_2}{2}. \tag{2.16}$$

Gdje je

- r_1 - vanjski vanjski polumjer cijevi u mm,
- r_2 - unutarnji polumjer cijevi u mm,
- δ - debljina stjenke posude mm.

Uvrštavanjem vrijednosti iz tablice 2.2 u jednadžbu (2.16) dobije se:

$$\begin{gathered} 19 - 13,7 > \frac{1}{10}\frac{19 + 13}{2}, \\ 5,35 > 1,6325. \end{gathered} \tag{2.17}$$

Ovo je uvjet koji odgovara debelostjenim cilindrima te se mogu koristiti izrazi raspodjelu radijalnog i cirkularnog naprezanja po debljini stijenke cijevi opterećenu unutarnjim tlakom koji prema [19] glase:

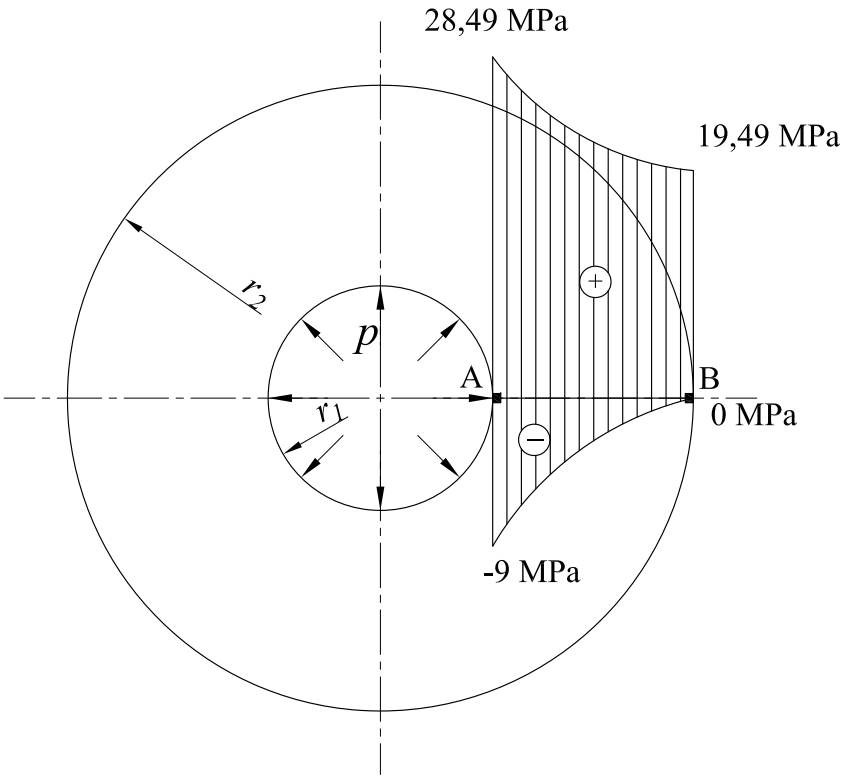
$$\begin{aligned} \sigma_r &= p\frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}\left[1 - \left(\frac{r_2}{r}\right)^2\right], \\ \sigma_\varphi &= p\frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}\left[1 + \left(\frac{r_2}{r}\right)^2\right]. \end{aligned} \tag{2.18}$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz tablice 2.2. u jednadžbe (2.18) dobiju se radijalna i cirkularna naprezanja za unutarnji i vanjski radius uzrokovana unutarnjim tlakom p:

$$\begin{aligned} \sigma_r(r = r_1) &= -p = -9\,\text{MPa}, \\ \sigma_r(r = r_2) &= 0, \\ \sigma_\varphi(r = r_1) &= p\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} = 28,494\,\text{MPa}, \\ \sigma_\varphi(r = r_2) &= 2p\frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} = 19,439\,\text{MPa}. \end{aligned} \tag{2.19}$$

Raspodjela naprezanja po debljini stjenke cijevi, uzrokovana djelovanjem unutarnjeg tlaka p, prikazana je dijagramski na slici 2.4. Vrijednosti prikazane na dijagramu su

rješenja jednadžbe (2.19). U ovom slučaju debelostijena cijev je otvorena pa se u poprečnom presjeku neće pojaviti aksijalna vlačna naprezanja uzrokovana tlakom, ali zato će aksijalna sila F uzrokovati konstantna aksijalna vlačna naprezanja σ_z duž cijele cijevi.



Slika 2.4: Raspodjela radijalnih i cirkularnih naprezanja

Aksijalno vlačno naprezanje računa se prema [20]. Ako za A uvrstimo A_1 iz jednadžbe (2.2) pošto se radi o cijevi istog vanjskog promjera i debljine te aksijalnu silu F iz tablice 2.2 dobije se :

$$\sigma_z = \frac{F}{A} = 18,22\,\text{MPa}. \tag{2.20}$$

Ekvivalentno naprezanje σ_{ekv} prema teoriji najveće distorzijske energije računa se prema formuli [20]:

$$\sigma_{\text{ekv}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2} \tag{2.21}$$

Gdje su $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ glavna naprezanja i moraju zadovoljavati uvjet $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$. Ako tako

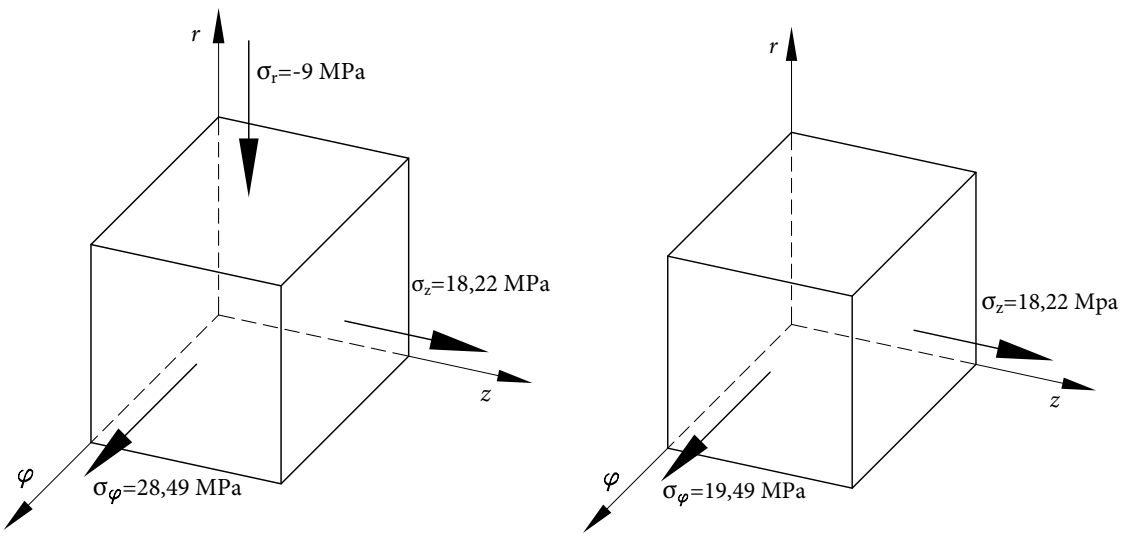
postavimo izračunata radijalna, cirkularna i aksijalna naprezanja iz jednadžbe (2.19) za diferencijalni element A sa slike 2.4 može se pisati:

$$\begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_\varphi(r = r_1) &= 28,494\,\text{MPa}, \\ \sigma_2 = \sigma_z(r = r_1) &= 18,22\,\text{MPa}, \\ \sigma_3 = \sigma_r(r = r_1) &= -9\,\text{MPa}. \end{aligned} \tag{2.22}$$

Ta ista naprezanja za diferencijalni element B iznose:

$$\begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_\varphi(r = r_2) &= 19,49\,\text{MPa}, \\ \sigma_2 = \sigma_z(r = r_2) &= 18,22\,\text{MPa}, \\ \sigma_3 = \sigma_r(r = r_2) &= 0. \end{aligned} \tag{2.23}$$

Diferencijalni elementi A koji se nalazi na unutarnjoj stjenci i B koji se nalazi na vanjskoj stjenci cijevi, prikazani su na slici 2.5.



a) element A b) element B

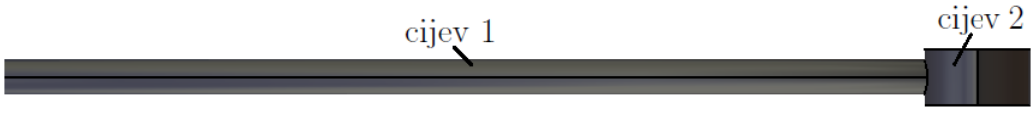
Slika 2.5: Diferencijalni elementi s ucrtanim naprezanjima

Uvrštavanjem rješenja iz (2.22) i (2.23) u (2.21) dobijemo dva ekvivalentna naprezanja po 4. teoriji čvrstoće za diferencijealne elemente A i B koji glase:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ekvA}} &= 33,61\,\text{MPa}, \\ \sigma_{\text{ekvB}} &= 18,89\,\text{MPa}. \end{aligned} \tag{2.24}$$

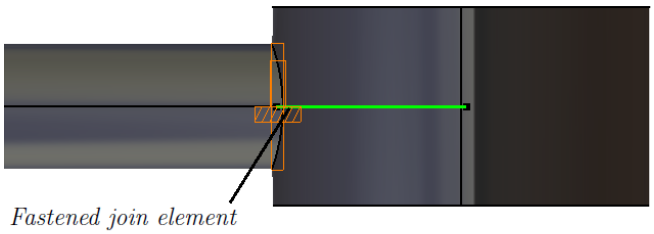
2.3. Rješenje problema metodom konačnih elemenata u programskom paketu *CATIA*

Prvi primjer proračuna metodom konačnih elemenata izvršen je pomoću programskog paketa *CATIA*. Prikazana je konvergencija rješenja, tj. približavanje numeričkog rješenja analitičkom prikazanom u prethodnom poglavlju. Kovergencijom će se provjeravati pomak na mjestu djelovanja sile F, a rezultati će biti prikazani grafički i tablično. Svaka cijev je napravljena kao zasebni *Part* te su naknadno spojene u *Assembly* sučelju. Prikaz modela korištenog u simulaciji je na slici 2.6.



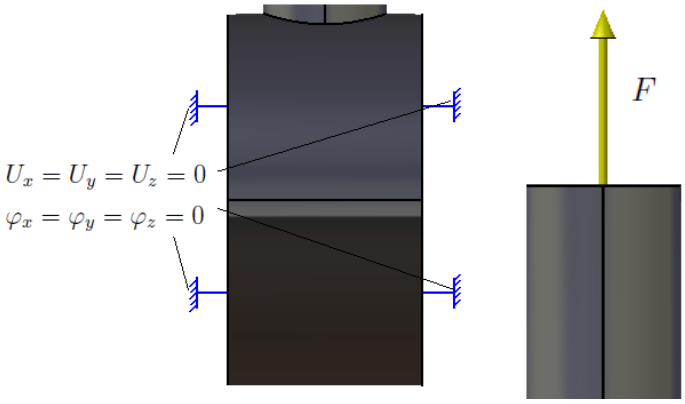
Slika 2.6: Model izrađen iz dva dijela u *CATIA*-i

Korištena je *Fastened join element* veza koja ostvaruje vezu između dva tijela na način da ih povezuje zajedno na njihovoj zajedničkoj plohi te se oni ponašaju kao jedno tijelo. U modelu konačnih elemenata to znači da su odgovarajući čvorovi dvije kompatibilne mreže povezani zajedno. Međutim, kako tijela mogu biti diskretizirana neovisno jedno o drugome *Fastened join element* povezuje nekompatibiline mreže te uzima u obzir elastičnu deformabilnost mreže. Svaki čvor finije mreže projicira se paralelno s lokalnom vanjskom normalnom prve plohe na drugu plohu mreže. Definiraju se kinematske relacije između stupnjeva slobode početnog čvora i stupnjeva slobode pridruženih čvorova [16]. Veza je postavljena na spoju dvije cijevi kao što je prikazano na 2.7.



Slika 2.7: *Fastened join element* veza u *CATIA*-i

Rubni uvjet uklještenja postavljen je na cijev broj 2 s obje strane, pomaci i kutevi zakreta u svim osima izjccednačeni su s nulom, dok je opterećenje od 10000 N postavljeno na kraj cijevi broj 1 (slika 2.8). 3D konačni elementi (KE) korišteni u numeričkom proračunu su parabolični tetraedarski konačni elementi drugog reda s 10 čvorova (TE10), u kojem svaki čvor ima 3 stupnja slobode gibanja, odnosno 3 translacije znači ukupno 30 stupnjeva slobode po elementu. Diskretizirani modeli sa različitim brojem konačnih elemenata mogu se vidjeti na slici 2.9 koja ujedno pokazuje i raspodjelu pomaka.



a) uklještenje b) sila F na kraju

Slika 2.8: Definirani rubni uvjeti i opterećenje

Sve karakteristike materijala, uklještenja i sile ostaju identični kao u analitičkom rješenju i ne mijenjaju se tokom proračuna. Mijenja se samo broj konačnih elemenata. Slijedi tablični prikaz dobivenih rezultata za različite gustoće mreže konačnih elemenata odnosno a prikazana je i relativna razlika u odnosnu na analitičko rješenje pomaka prema jednadžbi (2.3) i iznosi $\Delta l = 0,0911$ mm. Relativna razlika računa se prema izrazu:

$$\Delta x = \frac{x - x'}{x} \cdot 100\% \tag{2.25}$$

gdje je:

Δx - relativna razlika,

x - analitičko rješenje,

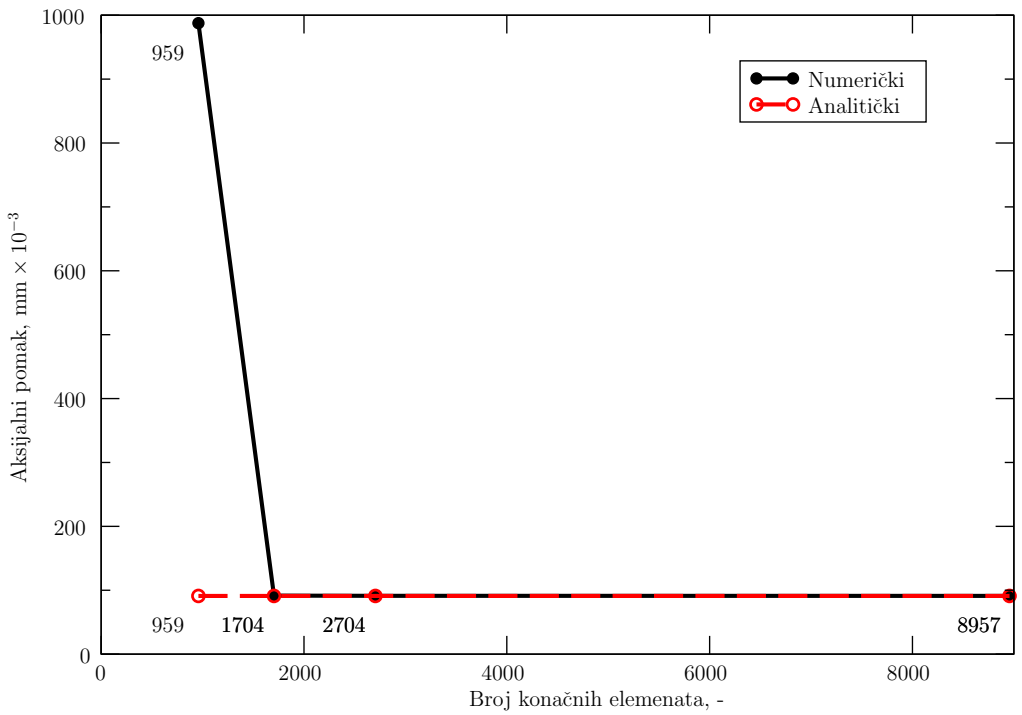
a x' - numeričko rješenje.

U tablici 2.3 je prikazano približavanje numeričkog rješenja analitičkom povećavanjem broja konačnih elemenata. Na slici 2.9 je prikaz tablice 2.3 u obliku dijagrama, radi lakšeg prikaza rezultata pomaci su pomnoženi sa 10^3 . A na slici 2.10 je prikazana raspodjela pomaka za različitu gustoću konačnih elemenata, odnosno konvergencija rješenja,

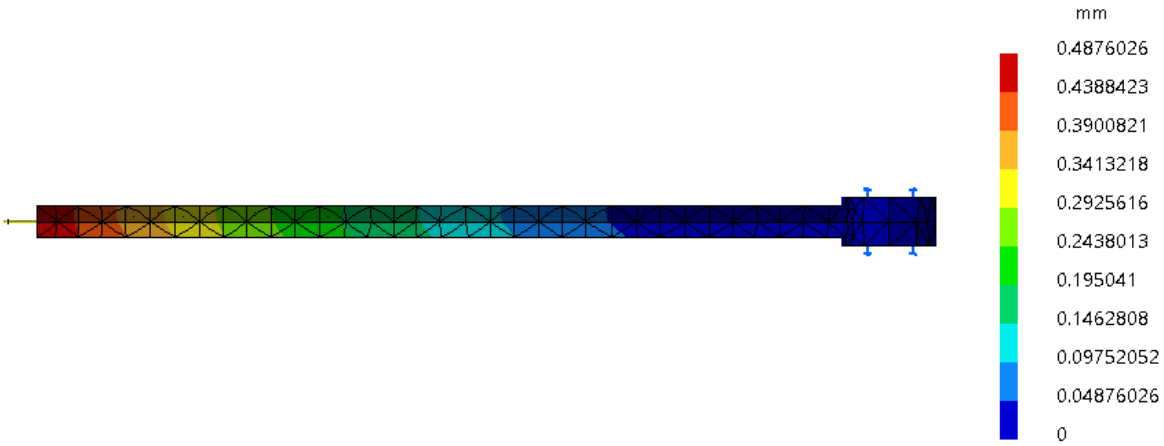
dok je na slici 2.11 prikazana koncentracija naprezanja na konstrukciji. Uzrok greške koja se javlja na modelu s 959 KE od 983,94 % rezultat je loše diskretizacije modela. Premalim brojem konačnih elemenata dolazi do savijanja cijevi broj 1 što prema analitičkom rješenju nije točno te dolazi do nefizikalnih pomaka konstrukcije. Povećanjem broja KE za samo 700 relativna greška pada ispod 1% što je znatno bolje rješenje. Povećavanjem broja KE za više od 10000 pokazalo se nepotrebnim jer numeričko rješenje s 8957 KE pokazuje grešku manju od 0,01%, znači može se smatrati da je model opterećen aksijalnom silom F konvergirao.

Tablica 2.3: Konvergencija rješenja pomaka TE10 KE verifikacijskog primjera

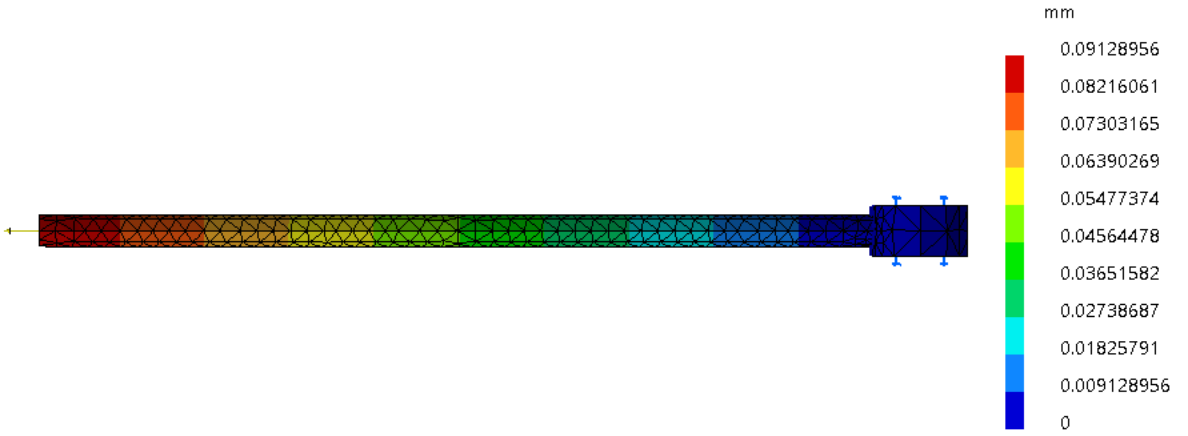
Broj konačnih elemenata	**Numeričko rješenje**	**Relativna razlika**
959	0,9876 mm	983,96 %
1704	0,091624 mm	0,57 %
2704	0,091290 mm	0,19%
8957	0,091185 mm	0,082 %



Slika 2.9: Prikaz konvergencije rešenja pomaka u mm pomnoženih sa 10^3



a) 973 KE



b) 2704 KE

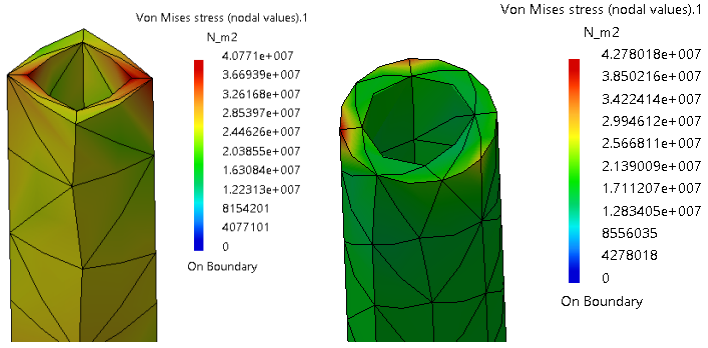
Slika 2.10: Raspodjela pomaka za različitu gustoću mreže za silu F i TE10 KE

Odabir konačnih elemenata, rubnih uvjeta i veza se pokazao dobrim u usporedbi sa analitičkim rješenjima ako promatramo pomake. Kasnije u radu biti će zadan rubni uvjet pomaka te će se onda promatrati rješenja naprezanja konvergiranom modelu.
U tablici 2.4 prikazana je relativna razlika numeričkog i analitičkog rješenja za naprezanja na konstrukciji. To je greška modeliranja i programskog paketa *Catia*. Zato što na relativno malom presjeku djelujemo velikom silom. Povećanjem stupnjeva slobode gibanja ta greška raste ali se smanjuje njezin volumen u odnosu na cijelu konstrukciju te je možemo zanemariti, zato što neposredno ispod greške javlja se rješenje približno analitčkom. Problem se javlja čak i nakon Adaptivne analize. Na slici 2.11. vidi se greška koncentracije naprezanja na mjestu djelovanja sile F za različitu gustoću mreže

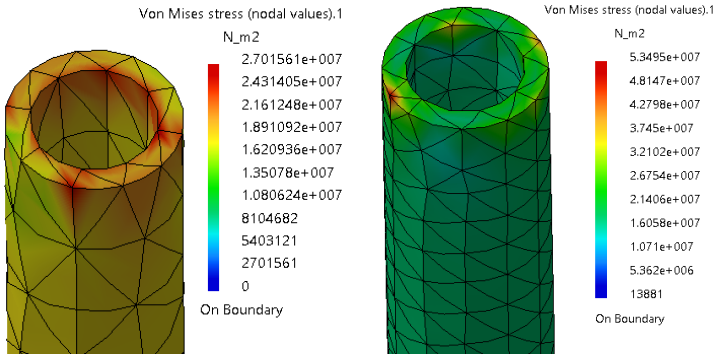
KE.

Tablica 2.4: Greška koncentracije naprezanja za različiti broj TE10 KE

Broj konačnih elemenata	**Numeričko rješenje**	**Relativna razlika**
959	40,77 MPa	123,32 %
1704	42,78 MPa	134,33 %
2704	27,02 MPa	48,01%
8957	53,5 MPa	193,05 %



a) 973 KE b) 1704 KE

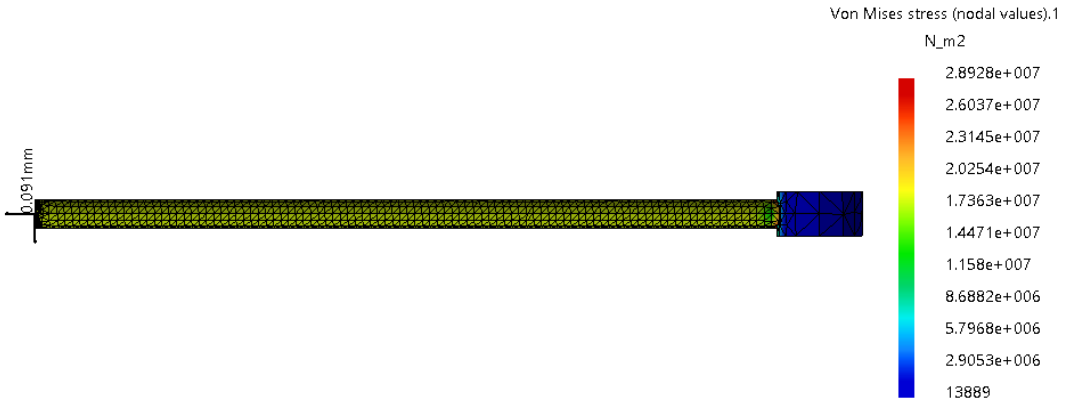


c) 2704 KE d) 8957 KE

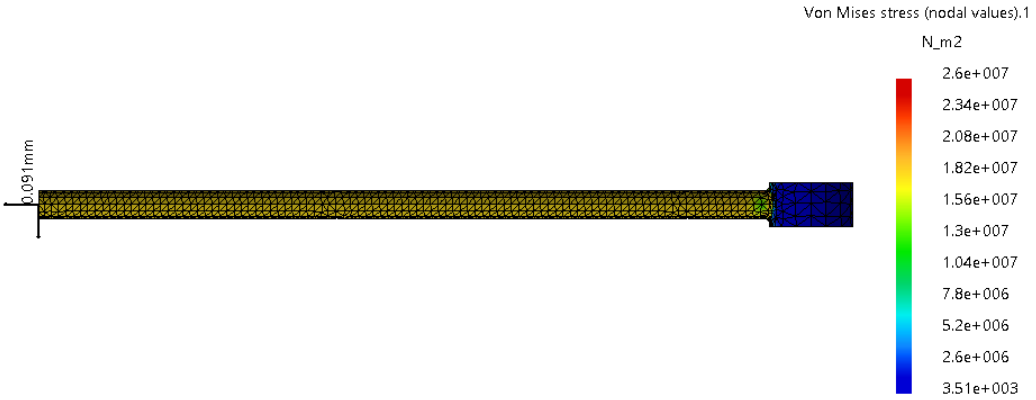
Slika 2.11: Raspodjela naprezanja za različitu gustoću mreže za silu F i TE10 KE

Razlika u gore prikazanom modelu i novim modelima je u rubnom uvjetu pomaka zadanom na vrhu dulje cijevi. Pomak je zadan tako da odgovara analitčkom rješenju $\Delta l = 0,09111$ mm. Osim promjene rubnog uvjeta pomaka na mjestu djelovanja aksijalne sile F spoj cijevi napravljen je na dva načina. Prvi kako je opisano u prethodno u

polgavlju 2.3 upotrebnom *Fastened join element* veze (slika 2.6). Drugi model prikazan diskretiziran na slici 2.12 b) napravljen je kao jedan dio bez upotrebe veze između cijevi 1 i 2. Na slici 2.12 prikazana su rješenja samo konvergiranih modela sa najvećim brojem konačnih elemenata.



a) model iz dva dijela s 9780 KE



b) model iz jednog dijela s 9685 KE

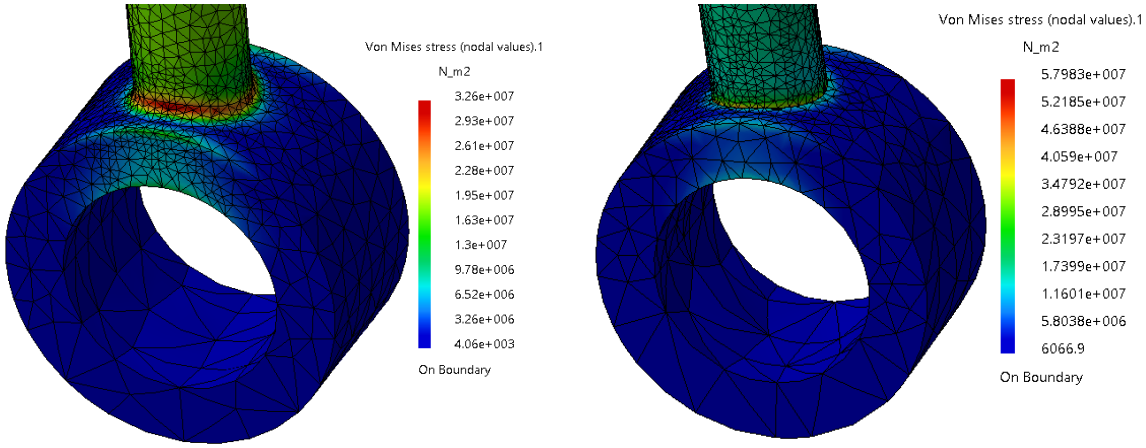
Slika 2.12: Raspodjela Von Mises-ovih naprezanja za rubni uvjet pomaka

Tablica 2.5 prikazuje rezultate naprezanja za rubni uvjet pomaka za oba modela prikazana na slici 2.12. Razlika je manja zbog definiranja rubnog uvjeta kao takvog da se cijeli gornji dio cijevi pomakne za točnu vrijednost. Raspored naprezanja duž cijevi je jednolika sve do korijena cijevi, odnosno spoja dvaju cijevi. Prikazana ja relativna greška u oba slučaja prije i nakon provedbe adaptivne analize (slika 2.13). Detalji na slici 2.14 pokazuju isti trend rasta koncentracije naprezanja povećanjem broja stupnjeva slobode kao i prethodni primjer ali ovoga puta na spoju dvije cijevi. Kao pokušaj smanjenja

te greške napravljena je adaptivna analiza (slika 2.13), odnosno progušćivanje mreže konačnih elemenata u prostoru koncentracije naprezanja na prelasku sa jedne cijevi na drugu. U oba slučaja nije se pokazalo kao idealno rješenje ali iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je rješenje bez upotreba kinematičkih veza između dijelova znatno bolje. Prvenstveno jer vezom dodajemo nepoznanice u sustav diferencijalnih jednadžbi te se greška gomila. U slučaju modela izrađenog iz jednog dijela vidimo da se greška s korjena spoja dvije cijevi "preselila" malo iznad samog spoja cijevi 1 i 2 te je sada na spoju dodanog radijusa i vertikalne cijevi. Može se zaključiti da je izrada većeg modela moguća ali uz uvjet da se ne koriste veze koje spajaju dva elementa što je više moguće te da očekujemo nefizikalna rješenja na spoju dvije cijevi.

Tablica 2.5: Usporedba naprezanja za različito spojene modele

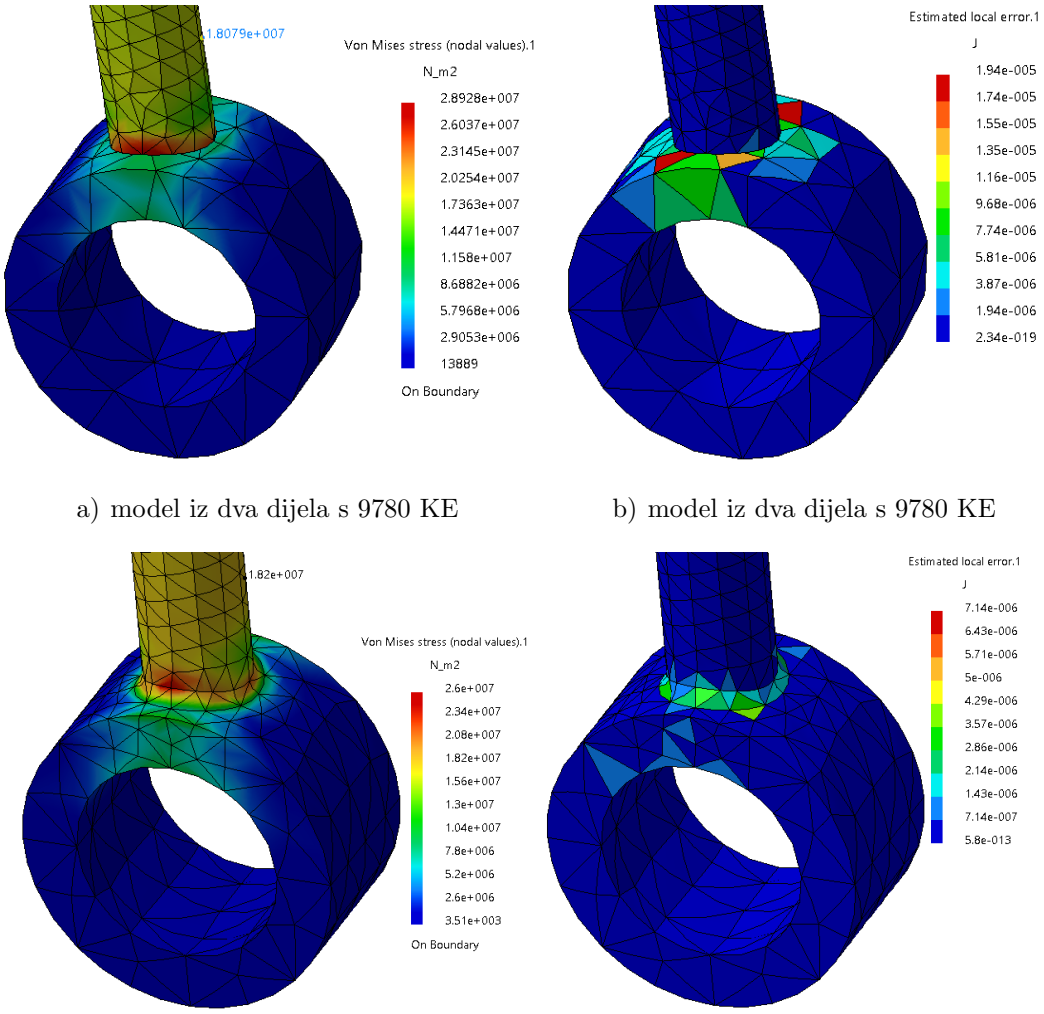
Model	**Numeričko rješenje**	**Relativna razlika**
Iz dva dijela	28.92 MPa	58.41 %
Iz jednog dijela	26 MPa	42.42 %



a) Model iz dva dijela s 21586 KE b) Model iz jednog dijela s 21560 KE

Slika 2.13: Detalji koncentracije naprezanja nakon provedene adaptivne analize

Ovime je pokazano da usitnjavanjem mreže konačnih elemenata na modelu će rasti naprezanja u spojevima do beskonačnosti i zbog toga ti dijelovi spoja neće biti razmatrani kao numerička rješenja nego kao greške.



a) model iz dva dijela s 9780 KE

b) model iz dva dijela s 9780 KE

c) model iz jednog dijela s 9685 KE

d) model iz jednog dijela s 9685 KE

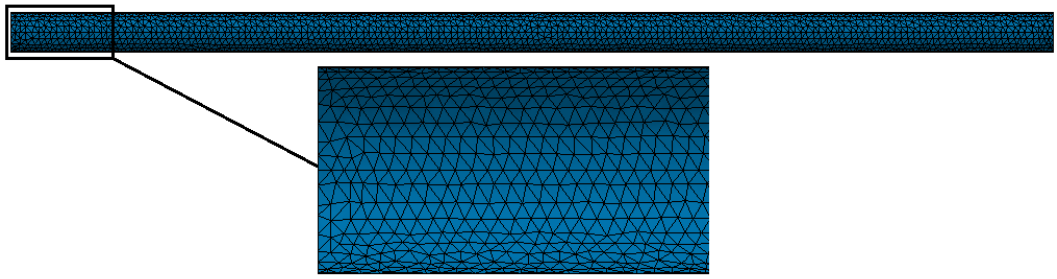
Slika 2.14: Detalji koncentracije naprezanja

2.3.1. Tlačno opterećenje cijevi

U poglavlju 2.2 napravljen je analitički proračun cijevi opterećene unutarnjim tlakom p i vanjskom aksijalnom silom F. Numerički model napravljen je u *CATIA*-i i prikazan je na slici 2.15 zajedno sa rubnim uvjetima i opterećenjima. Unutarnji tlak je 9 Mpa (90 bara) i konstantan je cijelom dužinom cijevi a aksijalna sila F djeluje na lijevom kraju cijevi. Glavna razlika između numeričkog i analitičkog modela je u dodavanju uklještenja na desni kraj cijevi umjesto sile. Na taj način izbjegava se gibanje krutog tijela i osigurava da se izvrši statička analiza u navedenom programskom paketu.

Slika 2.15: Model sa opterećenjima i rubnim uvjetima

Korišteni su tetraedarski konačni elementi drugog reda, oznake TE10 u *CATIA*-i isto kao u prethodnome primjeru. Iako je numerički proračun napravljen na konvergiranoj mreži KE, konvergencija neće biti prikazana. Prikazana su rješenja na konvergiranoj mreži koja se mogu vidjeti na slici 2.16. Radi boljeg prikaza mreže prikazan je cijeli model i detalj.

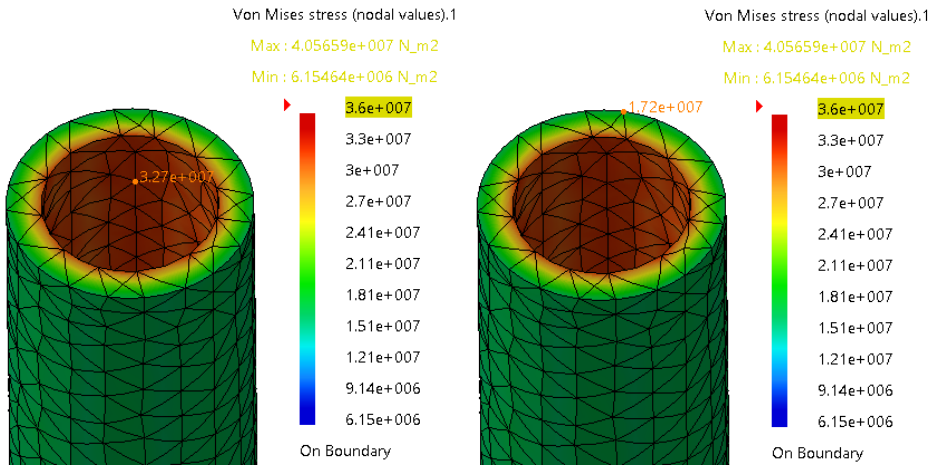


Slika 2.16: Mreža od 21653 konačna elementa

U tablici 2.6. prikazana su numerička rješenja naprezanja s unutarnje i vanjske strane cijevi. Poklapanje rješenja je vrlo dobro na konvergiranom modelu. Relativna razlika između numeričkog i analitičkog rješenja za naprezanje na diferencijalnom elementu A koji se nalazi na unutarnjoj strani cijevi manja su od 3%, dok je ta razlika nešto veća za diferencijalni element B koji se nalazi s vanjske strane cijevi i iznosi 6,26%. Oba rezultata smatraju se zadovoljavajućima. Na slici 2.17 prikazani su detalji konstrukcije na kojima se može očitati naprezanja na cijevi.

Tablica 2.6: Rješenja za diferencijalne elementa A i B

Element	**Numeričko rješenje**	**Relativna razlika**
A	32,78 MPa	2,71 %
B	17,28 MPa	6,26 %



a) diferencijalni element A b) diferencijalni element B

Slika 2.17: Prikaz naprezanja za model diskretiziran sa 21653 KE

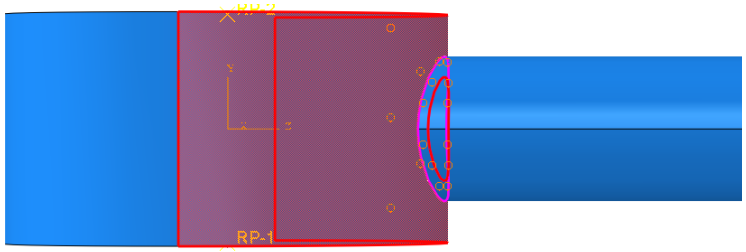
2.4. Rješenje problema metodom konačnih elemenata u programskom paketu *Abaqus*

Problem opisan u poglavlju 2.1 riješen je i upotrebom programskog paketa *Abaqus*. 3D model je napravljen i preuzet iz programskog paketa *CATIA* (slika 2.18). Ovdje je prvi primjer proračuna napravljen na identičan način kao i u prethodnom poglavlju. Napravljena je kontrola dimenzija nakon preuzimanja geometrije.

Slika 2.18: Preuzeta geometrija iz *CATIA*-e u *Abaqus*-u

Preuzeta *Assembly* geometrija iz programskog paketa *CATIA* sastoji se od dvije cijevi. Te cijevi su u modulu *Interaction* spojene vezom *Create constraint-Tie* (slika 2.19). Veza *Tie* povezuje dvije površine za vrijeme trajanja simulacije krutom vezom, odnosno veže čvorove *slave* površine sa *master* površinom na način da svaki čvor ima istu vrijednost gibanja, tlaka, temperature ili električnog potencijala. Veza je korisna i za potrebe poboljšavanja mreže, osobito za trodimenzionalne probleme kao što je ovaj. Također u istom modulu *Interacion* napravljene su referentne točke na simetralama

rubnih uvjeta i sile F te su spojeni sa površinama upotrebom *Continuum distributing coupling* da bi se izbjegla singularnost rješenja na rubovima (slika 2.20).



Slika 2.19: *Tie* veza u *Abaqus*-u

Slika 2.20: Rubni uvjeti i opterećenje u *Abaqus*-u

3D konačni elementi korišteni u ovom proračunu su također tetraedri. Tetraedri zbog zakrivljenosti stranica mogu znatno bolje opisati složene geometrijske oblike. Oznaka ovog izoparametarskog tetraedarskog konačnog elemenata u *Abaqus*-u je (C3D10) i izvode se iz jediničnog tetraedarskog elementa drugog reda preslikavanjem iz lokalnog prirodnog koordinatnog sustava u globalne Kartezijeve kooridnate. Sastoji se od 10 čvorova koji sadrže po 3 stupnja slobode u svakom čvoru (ukupno 30 stupnjeva slobode)[12]. Diskretizirani model sa 20589 konačnih elemenata prikazan je na slici 2.21.

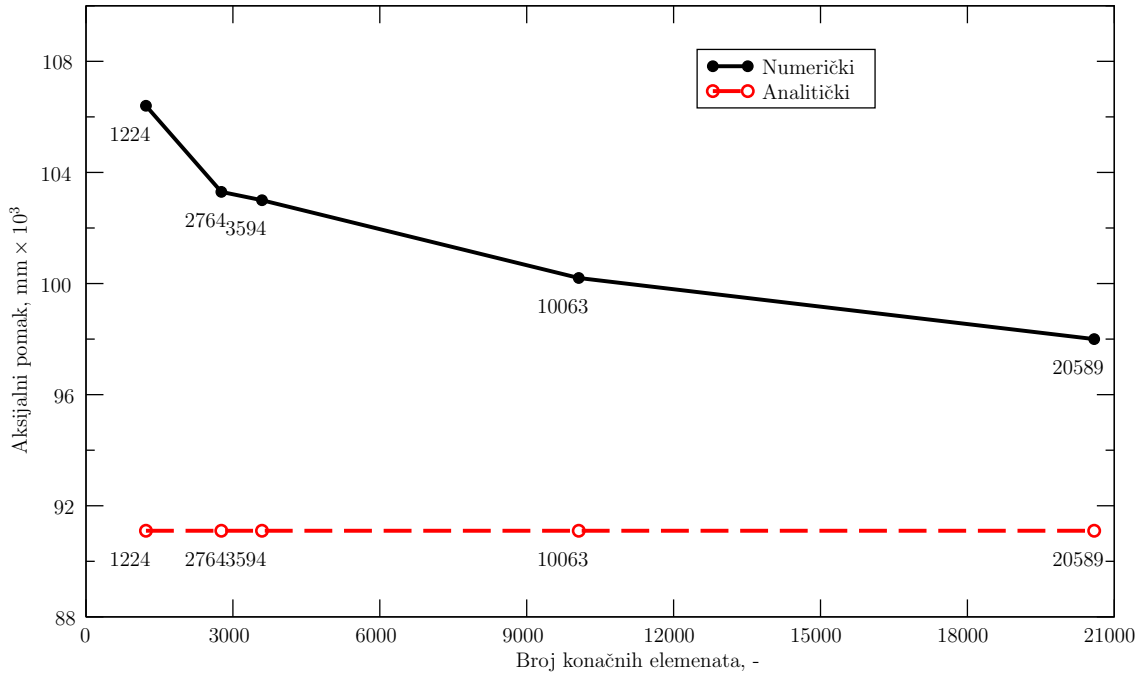
Slika 2.21: Model diskretiziran sa 20589 konačnih elemenata

U tablici 2.7 su prikazana rješenja za opterećenje modela sa silom $F = 10000\,\mathrm{N}$. Sve karakteristike materijala i dimenzije su identične analitičkom rješenju. Vidljivo je monotono približavanje numeričkom rješenju povećanjem broja stupnjeva slobode kao što je i očekivano. Isto tako rješenja iz programskog paketa *CATIA* pokazuju puno bolje rezultate za manji broj konačnih elemenata ali uz opasku dužeg računanja za gotovo duplo manji broj konačnih elemenata.

Tablica 2.7: Konvergencija rješenja pomaka C3D10 konačnih elemenata

Broj konačnih elemenata	**Numeričko rješenje**	**Relativna razlika**
1224	0,1064 mm	16,78 %
2764	0,1033 mm	13,38 %
3594	0,1030 mm	13,05%
10063	0,1002 mm	9,97 %
20589	0,0980 mm	7,56 %

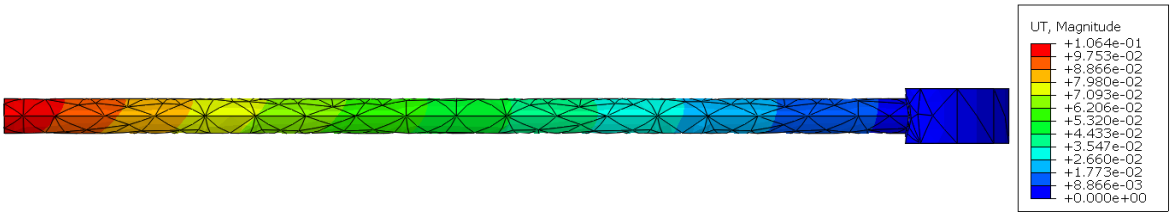
Dijagramski prikaz gornje tablice prikazan je na slici 2.22 s time da su rješenja pomaka pomnožena sa 10^3 zbog lakšeg prikaza rezultata.



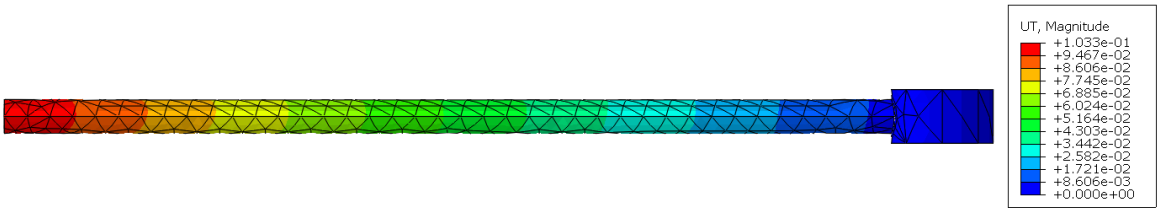
Slika 2.22: Prikaz konvergencije rešenja pomaka u mm pomnoženih sa 10^3

Na slici 2.23 prikazana su numerička rješenja pomaka za različitti broj konačnih elemenata uz opterećenje silom od 10000 N.

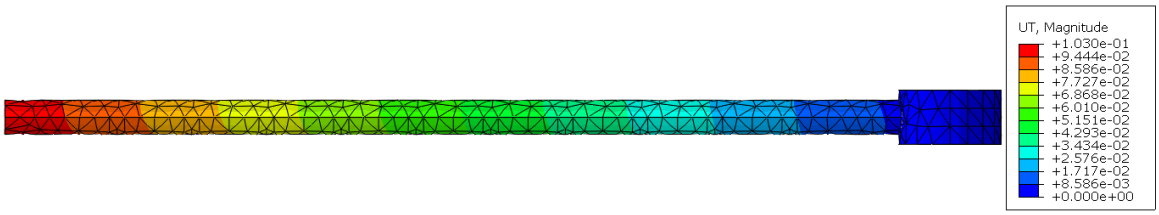
Rasporedjela Von Mieses-ovih naprezanja su uz duž cijele cijevi konstantna osim na spoju dvije cijevi (slika 2.24). Upotrebnom *Continuum distributing coupling* ne javlja se problem singularnosti na vrhu cijevi ali problem ostaje u spoju. Ovdje se javlja greška



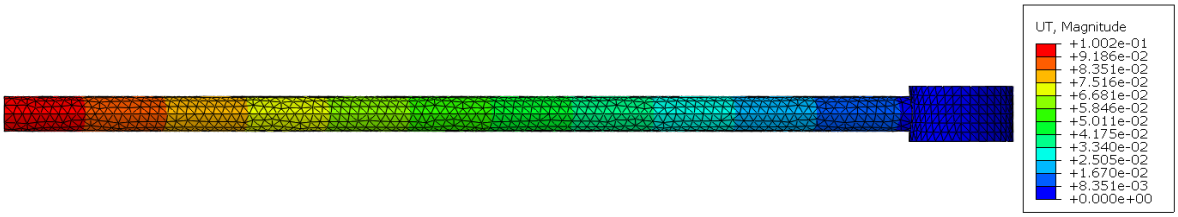
a) 1224 KE



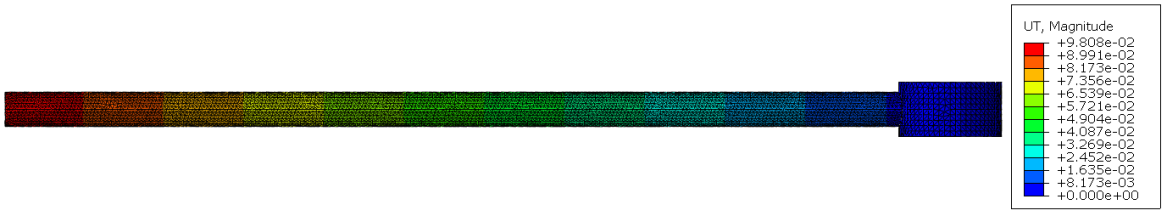
b) 2764 KE



c) 3594 KE

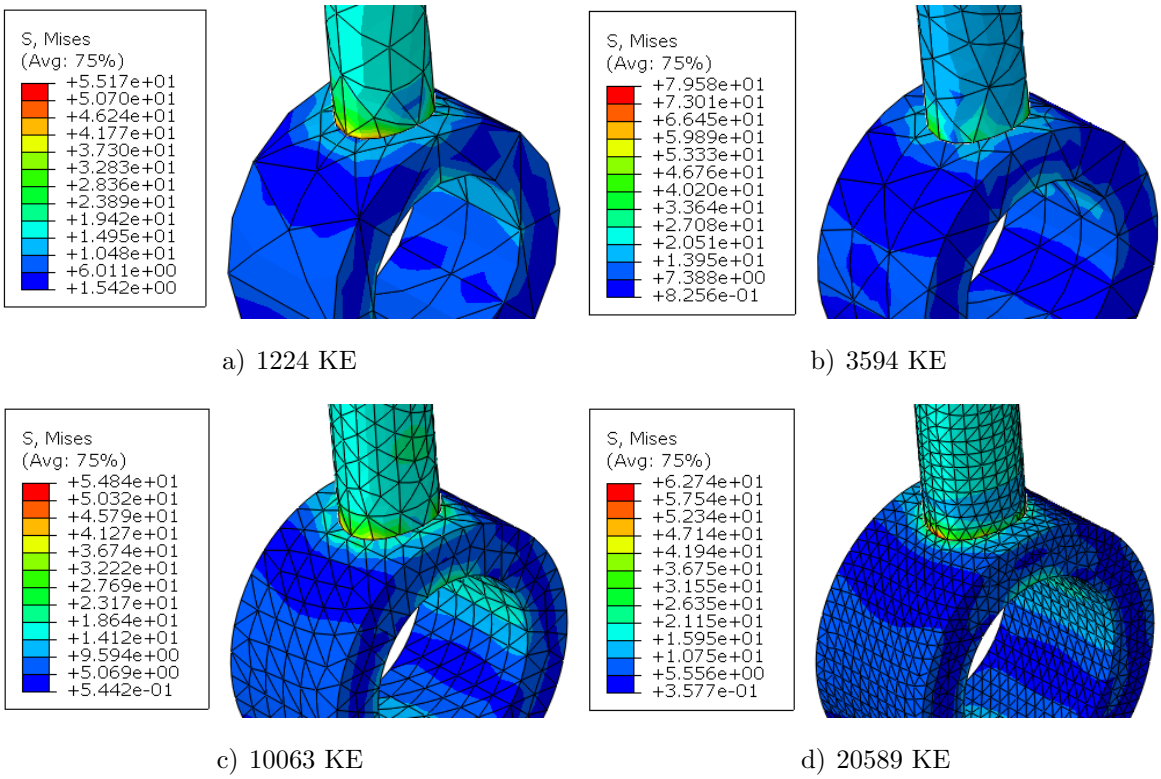


d) 10063 KE



e) 20589 KE

Slika 2.23: Raspodjela pomaka za različitu gustoću mreže za silu F i C3D10 KE



a) 1224 KE b) 3594 KE

c) 10063 KE d) 20589 KE

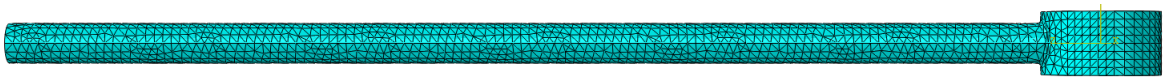
Slika 2.24: Raspodjela naprezanja za različitu gustoću mreže za silu F i C3D10 KE

modeliranja i programskog paketa. Povećanjem broja stupnjeva slobode modela raste i greška ali se njezin volumen smanjuje. Ponovno se dolazi do istoga zaključka da je moguća upotreba ovoga programskog paketa za numeričku simulaciju velikog modela ako se zanemare nefizikalna rješenja dobivena na spojevima cijevi.

Druga dva modela napravljena su na istoj geometriji ali sa rubnim uvjetom pomaka $U_z = 0,09111\,\text{mm}$ na mjestu djelovanja sile F. Taj pomak odgovara analitičkom rješenju danom formulom (2.3). Također razlika u modelima je način spajanja dvije cijevi. U prvome slučaju cijevi su spojene kao u prethodnom primjeru, upotrebom *Tie* veze između dvije cijevi dok je za drugi slučaj preuzet model napravljen iz jednog dijela sa zaobljenjima na spoju. Na ovaj način se provjerava utjecaj veze na numerička rješenja Von Mises-ovih naprezanja duž cijevi. Na slici 2.25 prikazana su oba modela sa pripadajućim rubnim uvjetima, u oba slučaja biti će prikazana samo konvergirana mreža konačnih elemenata.

Na slici 2.26 prikazana je mreža konačnih elemenata korištena za izračun drugog modela izrađenoga iz jednog dijela sa zaobljenjima na mjestu spoja dvije cijevi.

Slika 2.25: Rubni uvjeti za modela izrađenog uz pomoć veze *Tie* i iz jednog dijela sa zaobljenjem



Slika 2.26: Diskretizirana geometrija drugog modela sa 16042 konačna elementa

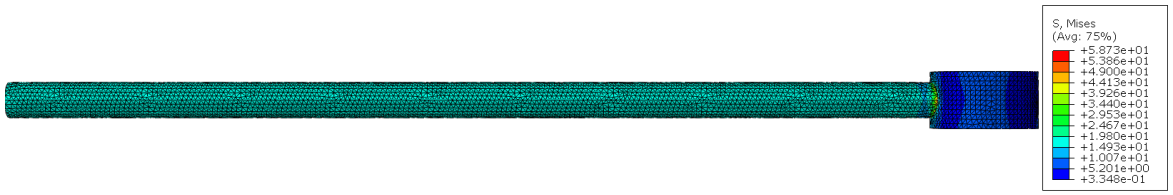
U tablici 2.8. su prikazani rezultati maksimalnog naprezanja za dva različito spojena modela. Model napravljen iz dvija dijela i spojen *Tie* vezom daje lošije rezultate nego model istih dimenzija izrađen iz jednog dijela.

Tablica 2.8: Usporedba naprezanja za različito spojene modele

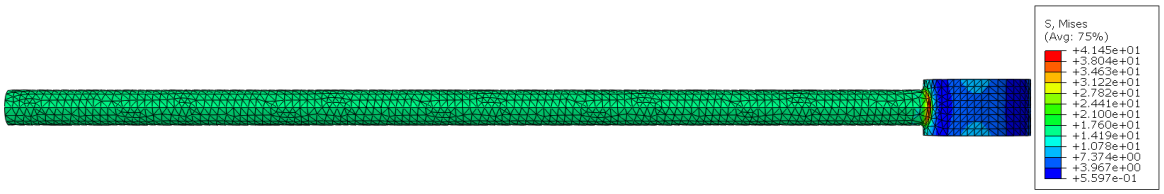
Model	**Numeričko rješenje**	**Relativna razlika**
Iz dva dijela	58,73 MPa	221,78 %
Iz jednog dijela	41,45 MPa	127,1 %

Raspodjelu naprezanja po cijelom modelu možemo vidjeti na slici 2.27. Oba modela pokazuju isto mjesto koncentracije naprezanja a to je upravo na spoju dvije cijevi. Isti trend povećanja maksimalnog naprezanja povećanjem broja konačnih elemenata vidljiv je i u prethodnom potpoglavlju (slika 2.14). Tamo je također pokazano da povećanjem broja konačnih elemenata raste naprezanje u spoju cijevi ali mu relativni volumen u odnosu na ostatak konstrukcije pada. Detalje kocentracije naprezanja na modelu izrađenog sa zaobljenjem na spoju cijevi prikazani su na slici 2.28.

Osim što slike 2.27 i 2.28 prikazuju postojanje koncentracije naprezanja također prikazuju da se naprezanje neposredno iznad te koncentracije vrlo blizu približava analitičkom rješenju. Razlog tome je skupljanje materijala uslijed produljenja odnosno nije dobro modeliran prijelaz sa cijevi 2 na cijev 1. Relativno velika zakrivljenost i debljina cijevi



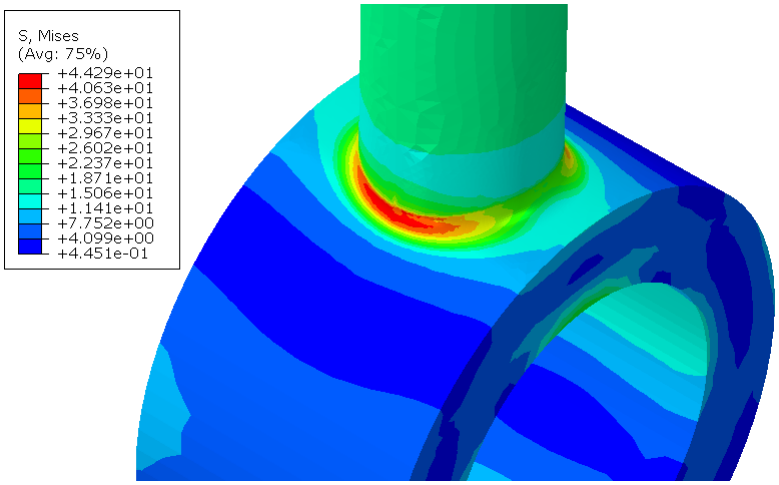
a) Model iz dva dijela s 20589 KE



b) Model iz jednog dijela s 16042 KE

Slika 2.27: Raspodjela Von Mises-ovih naprezanja za rubni uvjet pomaka

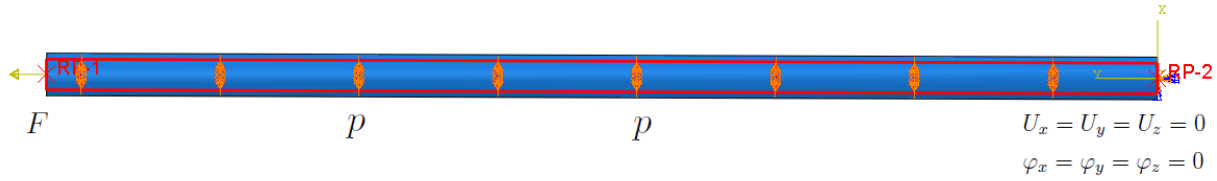
2 s obzirom na cijev 1 rezultira ponašanjem cijevi 2 kao krutog tijela. Iako je radius zakrivljenosti tangencijalan na obje cijevi riješenje nije konvergiralalo u spoju kao što je očekivano. Ovime se pokazalo da krajevi cijevi u slučaju vlačnoga naprezanja su kritična mjesta konstrukcije i sukladno tome na tim mjestima na modelu ložišta kotla na kruta goriva biti će postavljene nešto deblje cijevi čime će se pokušati izbjeći koncentracija naprezanja.



Slika 2.28: Diskretizirana geometrija drugog modela sa 38215 konačna elementa

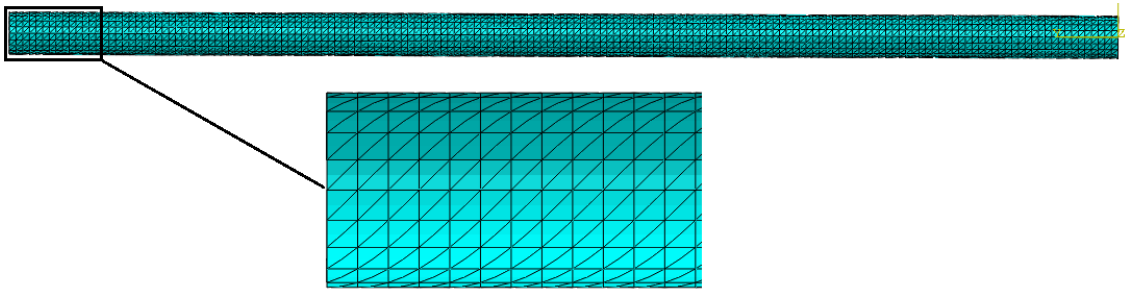
2.4.1. Tlačno opterećenje cijevi

U potpoglavlju 2.3.1 napravljena je analiza opterećene cijevi unutarnjim tlakom p i vanjskom sliom F u programskom paketu *CATIA*. Model napravljen za potrebe toga proračuna koristi se u ovoj analizi i nije ponovno modeliran. Model sa svim opterećenjima i rubnim uvjetima u *Abaqus*-u može se vidjeti na slici 2.29. Na desno kraju cijevi u referentnoj točci dodan je rubni uvjet uklještenja te je ona spojena s rubom cijevi uz pomoć *Continuum distributing coupling*, isto tako je lijeva referentna točka u kojoj je zadana sila F spojena sa lijevim rubom.



Slika 2.29: Model sa opterećenjima i rubnim uvjetima

Korišteni su tetraedarski konačni elementi drugog reda, oznake C3D10 u *Abaqus*-u isto kao u prethodnome primjeru. Neće biti prikazana konvergencija rješenja nego samo rješenja na konvergiranoj mreži koja se može vidjeti na slici 2.30.



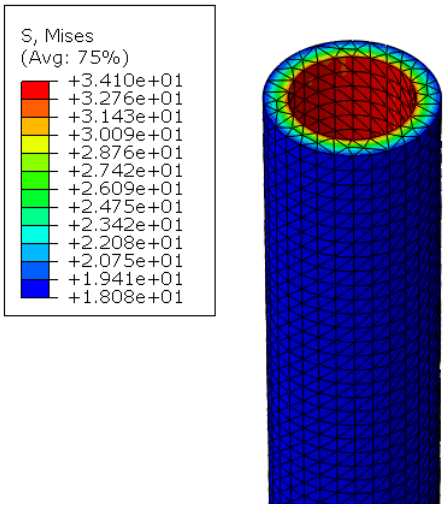
Slika 2.30: Mreža od 22435 konačna elementa

U tablici 2.9. prikazana su numerička rješenja naprezanja s unutarnje i vanjske strane cijevi. Poklapanje rješenja je odlično na konvergiranom modelu. Relativna razlika između numeričkog i analitičkog rješenja za naprezanje na diferencijalnom elementu A su do 2%, dok je ta razlika nešto veća za diferencijalni element B 3,98%. Ako usporedimo rješenja iz tablice 2.6 vidimo da se za gotovo isti broj konačnih elemenata *Abaqus* bolje približi analitičkom rješenju. Razlog tome je što je bolje definiran rubni uvjet uklještenja u

Abaqusu. Uporabom *Continuum distributing coupling* nismo previše ukrutili desni kraj cijevi te smo se na taj način bolje približili analitički postavljenom zadatku. Odnosno reakcija u referentnoj točki iznositi će isto 10000 N ali u suprotnom smjeru te će pomaci uzrokovani tlakom biti omogućeni na desnoj strani cijevi. Na slici 2.31 prikazan je detalj cijevi odnosno raspored Von Mises-ovh naprezanja na konvergiranom modelu diskretiziranom sa 20435 konačnih elemenata.

Tablica 2.9: Rješenja za diferencijalne elementa A i B

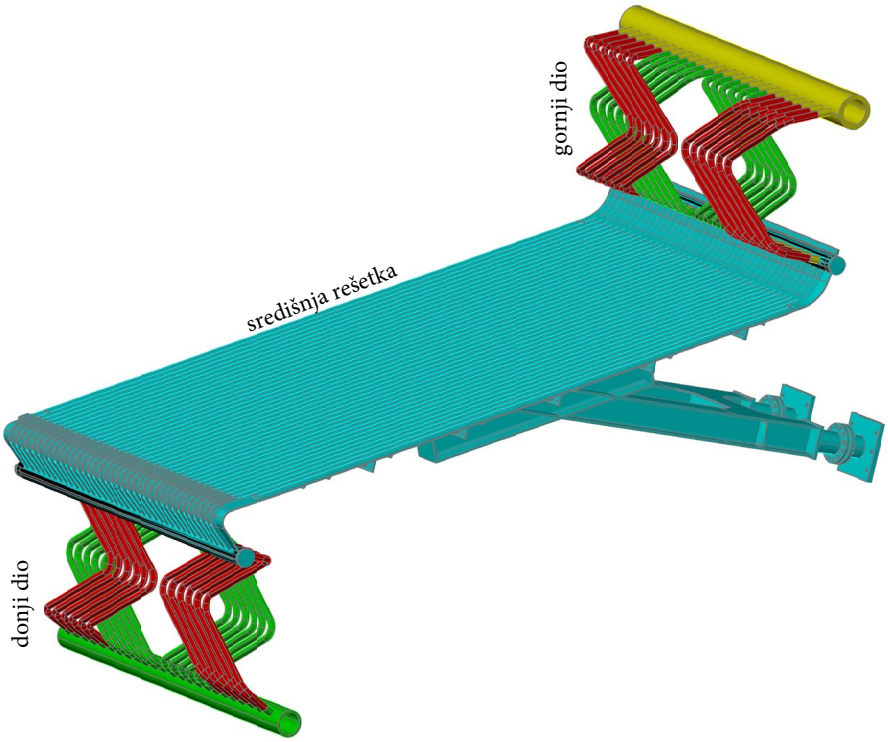
Element	**Numeričko rješenje**	**Relativna razlika**
A	34,1 MPa	1,47 %
B	18,08 MPa	3,98 %



Slika 2.31: Raspored Von Mises-ovih naprezanja na cijevi

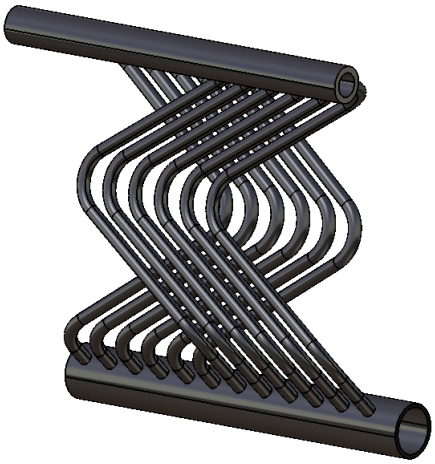
3 | 3D model rešetke

Ložišta kod kojih se izgaranje odvija na pomičnoj rešetki u sloju spadaju u klasične tipove ložišta. Postoje različite vrste izvedbi ložišta koja karakterizira ovaj tip izgaranja,a dijele se prema načinu pomicanja rešetke (kosa nepomična rešetka, kontinuirano pomična rešetka, rešetka s sustavom pomicanja naprijed-nazad i vibrirajuća rešetka). Konkretan model je predviđen kao izvedba vibrirajuće rešetke. donji dio središnja rešetka gornji dio Model nosive konstrukcije ložišta kotla napravljen je pomoću dispozicije istoga napravljenog u jednom od CAD programskih paketa (slika 3.1) te taj model nije podržan u programskim paketima *CATIA* i *Abaqus*. Iz dispozicije su preuzete osnovne dimenzije konstrukcijskih dijelova kao što su: debljina i debljina cijevi, kutovi nagiba savijene cijevi u prostoru, korišteni profili itd.



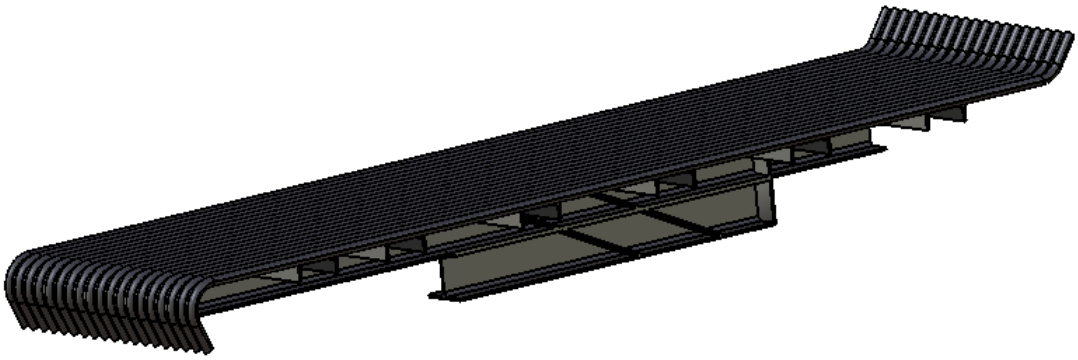
Slika 3.1: Prikaz dispozicije ložišta sa svim dijelovima

Novi 3D model sa izmjenama napravljen je u programskom paketu *CATIA*. Potrebno je bilo napraviti izmjene na geometriji odnosno pojednostaviti je. Uklonjeni su svi dijelovi koji dodatno kompliciraju geometriju a ne utječu značajno na nosivost konstrukcije. Konstrukcija je radi jednostavnosti izrade podijeljena na tri dijela. Donje savijene cijevi (slika 3.2), rešetka (slika 3.4) i gornje savijene cijeli (slika 3.3). Limovi predviđeni za spajanje na druge dijelove konstrukcije nisu uzeti u obzir, isto tako i vijci te rupe za primarni zrak izbušene na limovima koji spajaju cijevi rešetke.
Sike 3.2, 3.3, 3.4 prikazuju izrađene polovice cjelokupnog modela koje su kasnije zrcaljene da bi se dobio cijeli model (slika3.5).

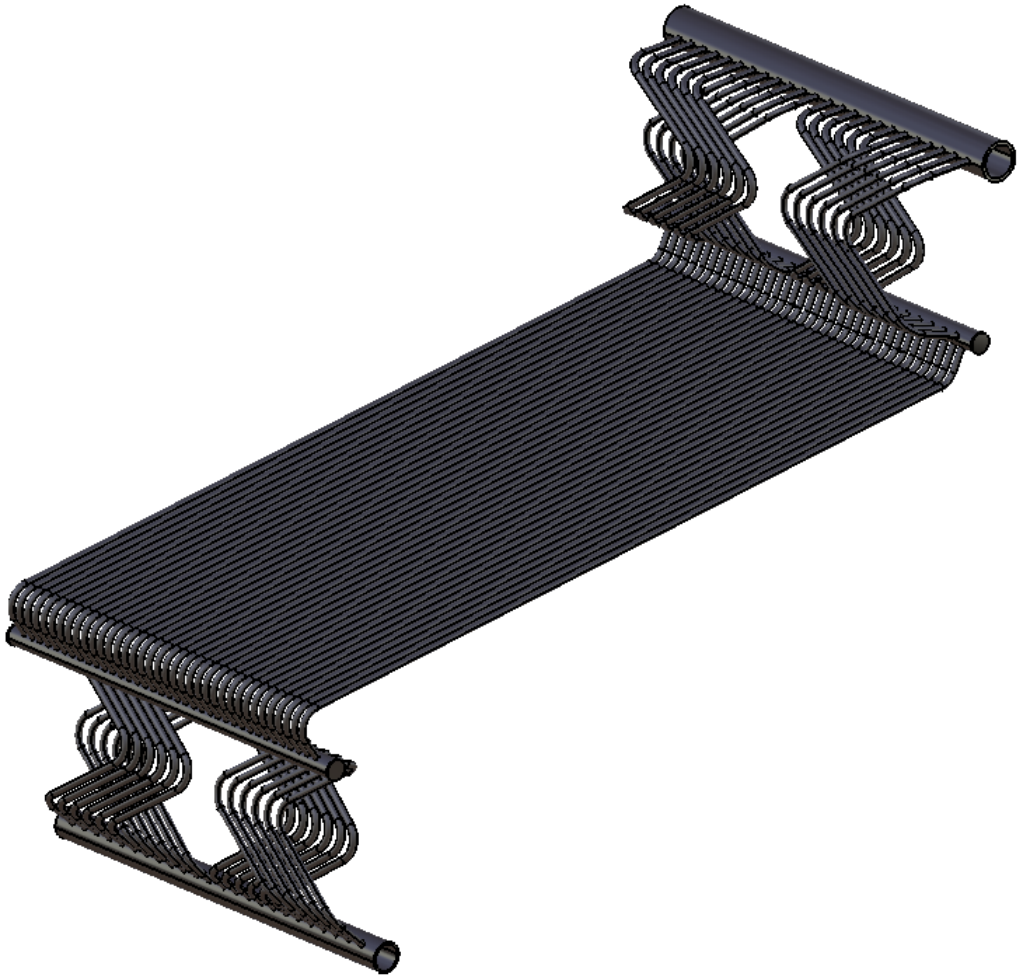


Slika 3.2: Prikaz pola 3D modela donjeg dijela rešetke

Slika 3.3: Prikaz pola 3D modela gornjeg dijela rešetke



Slika 3.4: Prikaz pola 3D modela središnjeg dijela rešetke



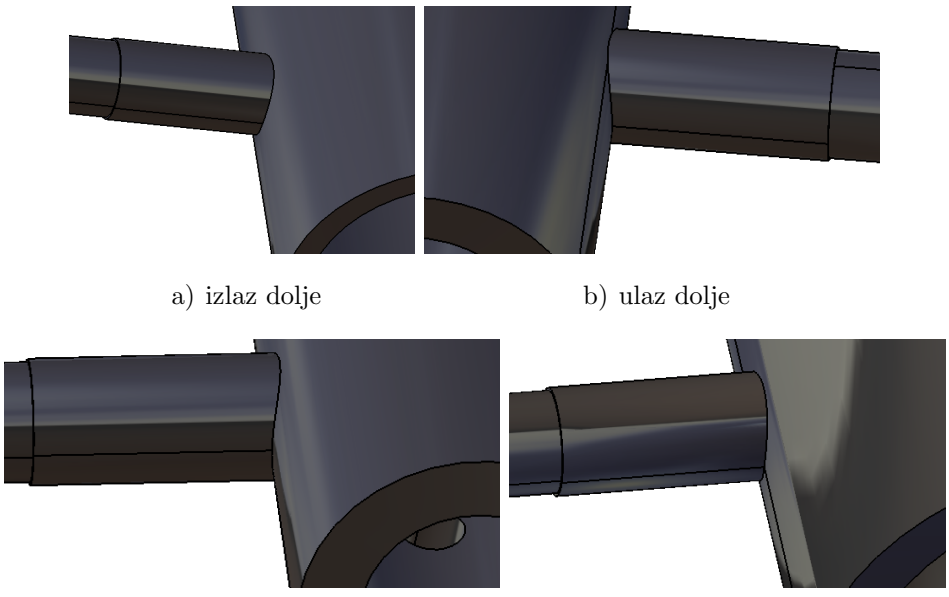
Slika 3.5: Prikaz cijelog 3D modela

Važno je napomenuti da su modeli sa slika 3.2, 3.3 i 3.4 napravljeni kao jedan dio.

Odnosno svaka savijena cijev je modelirana na glavne komore te zajedno s njima čine jedan dio (eng. *part*). Ovime je otežana izrada 3D modela ali kao što smo vidjeli u prethodnom poglavlju spajanjem dva dijela uvodimo nove nepoznanice u diferencijalne jednadžbe. Donji i gornji dio se sastoje od ukupno 24 savijene cijevi dimenzija 38 x 4 mm dok središnji dio ima 37 cijevi dimenzija 38 x 6,4 mm. Spajanjem tolikog broja cijevi zahtijevalo bi veliku računalnu snagu i otvara prostora za numeričke greške.

3.1. Detalji konstrukcije

Primjeri iz prakse su pokazali da se svaka savijena cijev ne spaja izravno na komoru (ravna cijev velikog promjera) nego se prvo zavare kraće deblje cijevi na komoru te onda čeonim zavarom se zavaruju savijena i kraća deblja cijev (slika 3.6). Razlog tome je što se očekuje najveće naprezanje upravo u tom spoju cijevi sa komorom te ti zavari moraju biti najdeblji i najkvalitetniji te se na taj način osigurava cjelovitost konstrukcije. Takve cijevi istog unutarnjeg promjera ali 2 mm deblje postavljene su na ulazne i izlazne komore gornjeg i donjeg dijela konstrukcije. Također su izrađene kao jedan cjeloviti dio konstrukcije.

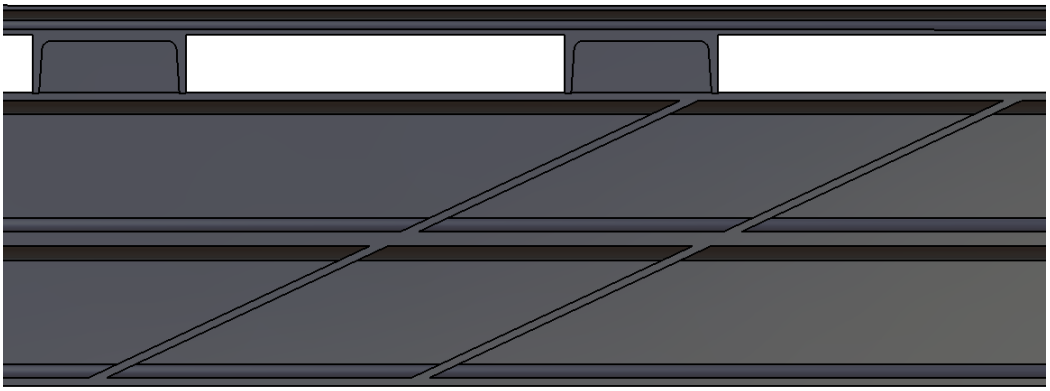


a) izlaz dolje b) ulaz dolje

c) izlaz gore d) ulaz gore

Slika 3.6: Ojačanja na komorama za gornji i donji dio modela

HEA200 i C200 profili korišteni u središnjem dijelu ložišta su također modelirani kao sastavni dio cijevi središnjeg dijela ložišta (slika 3.7). Oni prenose silu elektromotora na ravne cijevi ložišta i njihova pozicija na ložištu odgovara težištu toga ložišta. Izračun težišta također je odrađen numerički u *CATIA*-i. Izrada modela ovih dimenzija i ovako komplicirane geometrije zahtjeva konstantnu upotrebu više programskih paketa kao i znanja tehničkog crtanja i nacrtne geometrije gdje uz sve to mora paziti na greške modeliranja koje kasnije u numeričkom proračunu konstrukcije mogu napraviti veliku grešku.



Slika 3.7: HEA200 i C200 spojeni kao jedan dio sa cijevima

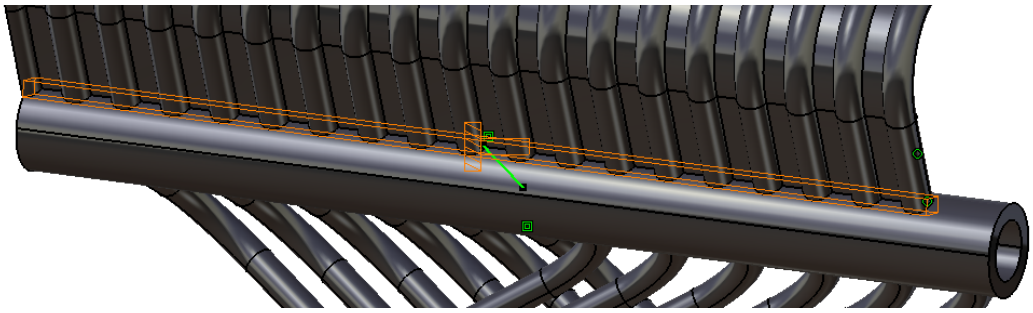
Isto tako kako je potrebno napraviti analizu u dva programska paketa, izrada oba modela zasebno bi oduzela previše vremena jer *Abaqus* jednostavno nije prilagođen za izradu tako komplicirane geometrije pa je jednostavno model preuzet iz *CATIA*-e kao *part* u *GUI* sučelje *Abaqus*-a. Napravljena je provjera dimenzija nakon preuzimanja geometrije iz jednog programa u drugi da ne bi došlo do krivih rezultata uzrokovanih uvrštavanjima krivih mjernih jedinica.

4 Analiza u programskom paketu CATIA

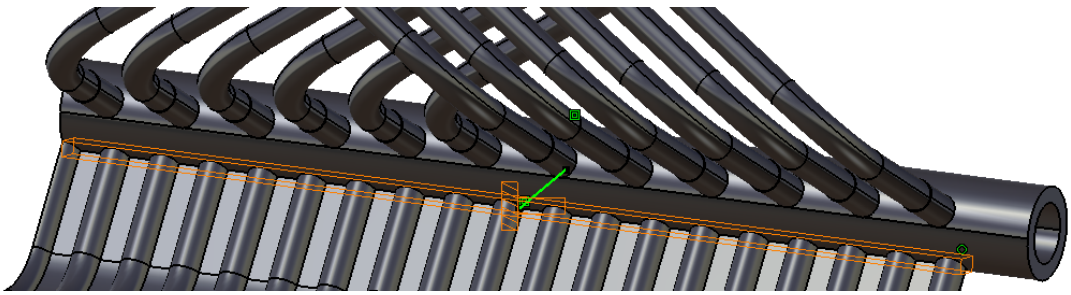
U pupoglavljima 1 i 3 opisan je način rada ložišta kod kojeg je izgaranje na vibracijskoj rešetci. Kruto gorivo izgara na rešetci te ona ostatke izgaranja vibracijom kompletnog ložišta preko elektormotora baca u pepelnicu. Voda koja prolazi cijevima služi za hlađenje konstrukcije i za potrebe proračuna uzeta je temperatura pothlađene vode pri tlaku od 9 MPa (90 bara) što je prema [12] 303,35 °C. To je granična temperature nakon koje se počinju pojavljivati prvi mjehurići pare. To je i temperatura koju ćemo pretpostaviti da je na materijalu cijevi. U praksi je to drugačije te nikada u tome dijelu kotla neće doći do isparavanja vode. Tako da ovo možemo smatrati graničnim slučajem. Pretpostavlja se dovoljno dobra odvodnja topline sa cijevi ložišta tako da temperatura konstrukcije nikada ne prijeđe 303,35 °C. Ovdje je razmatran samo statičko i tlačno opterećenje kao kritično. Da bi napravili što stvarniji numerički model ovoga ložišta potrebno je odraditi prvih par vlastitih frekvencija. To nije moguće korištenjem samo pola modela jer nije poznato analitičko rješenje vlastitih vrijednosti modela, tako da se ne može ni pretpostaviti prva vlastita frekvencija. Stohastička uzbuda koju generira elektromotor nije konstantna nego ona napravi 2 ciklusa gore-dolje svakih par minuta što omogućava da ostatci izgaranja padnu u takozvanu pepelnicu. Znači za modeliranje ovakve uzbude potrebna je dinamička analiza u vremenskoj domeni za što je potrebna znatno veća računalna memorija. Razlog tome je što se simulacija mora odvijati na cijelom modelu a ne na njegovoj polovici i treba uzeti dovoljan vremenski period koji će obuhvatiti sve pojave koje se događaju zbog stohastičke uzbude. Daljnjim razvojem računala i računalnih programa ova analiza će biti moguća ali za sada u sklopu ovoga rada neće biti obuhvaćena. Također toplinska naprezanja nisu uzeta u obzir jer se cijelo postrojenje pri visokim temperaturama širi relativno proporcionalno tako da rubni uvjeti uklještenja ne bi imali smisla.

4.1. Rubni uvjeti i opterećenja

Model opisan u poglavljima 3i 4 korišten je za numeričku simulaciju. Kako je model simetričan radi uštede na računalnoj memoriji korišteno je samo pola modela. Rad i sa najgrubljom mrežom, znači velikim dimenzijama konačnih elemenata, postaje vrlo računalno zahtjevno za 3D analizu ovako velikog i kompleskong modela. Konačni elementi korišteni za ovaj model su isti opisani u poglavlju Verifikacije a to su 3D parabolični tetraedri sa 10 čvorova (TE10). Veze između donjeg i srednjeg dijela te između srednjeg i gornjeg su također iste kao poglavlju 2. Korištena je *Fastened join element* veza koja ostvaruje vezu između dva tijela na način da ih povezuje zajedno na njihovoj zajedničkoj plohi te se oni ponašaju kao jedno tijelo (slika 4.1).



a) donji i srednji dio

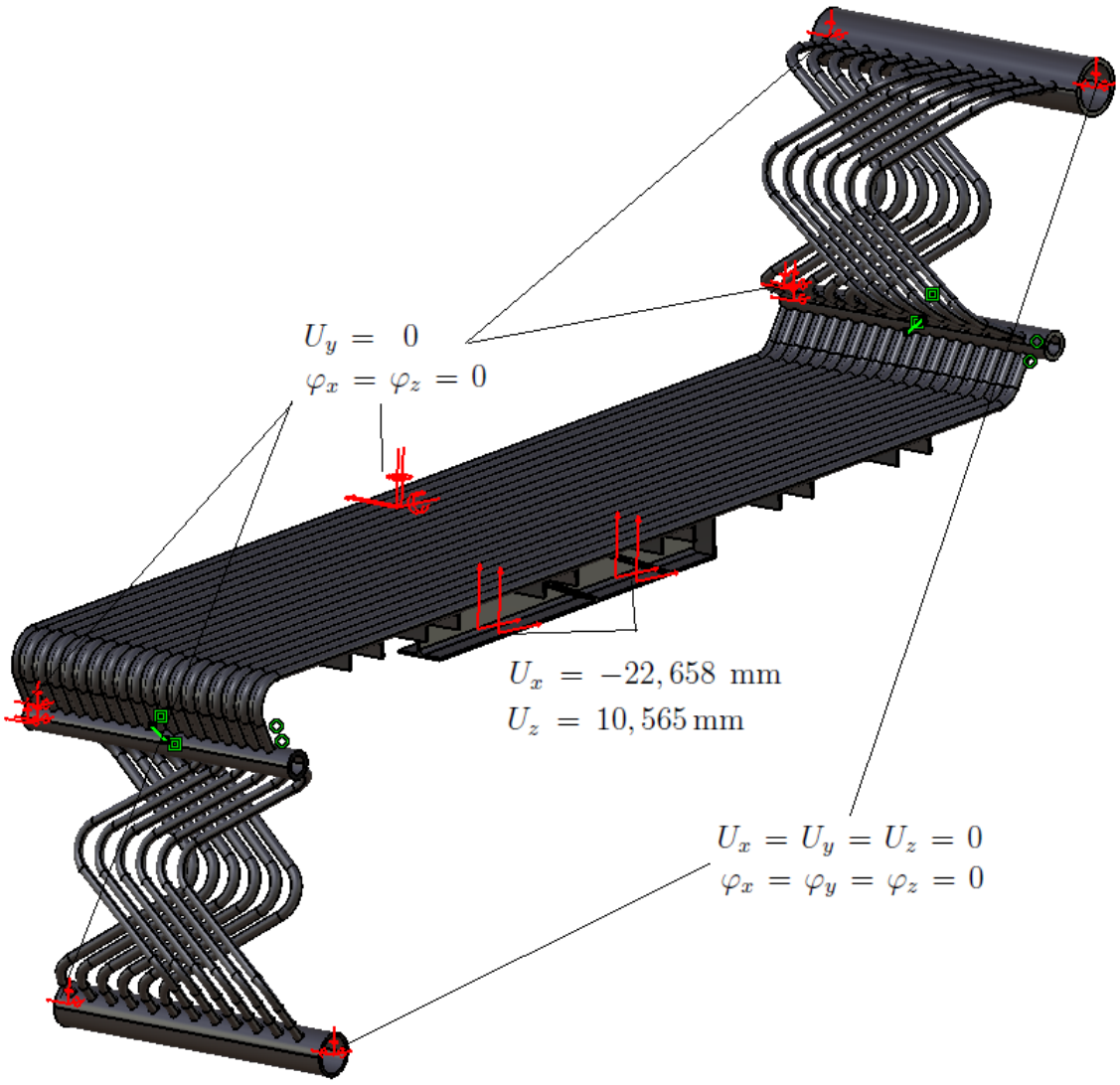


b) srednji i gornji dio

Slika 4.1: *Fastened join element* veze

Na modelu su korišten rubni uvjet simetrije što znači da je duž lijevog kraja onemogućen pomak u smjeru osi y i kutevi zakreta oko osiju x i z. Uklještenje je korišteno na desnom kraju obje velike cijevi iz čega slijedi $U_x = U_y = U_z = 0$ i $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$. Pomak konstrukcije je zadan takav da bude 25 mm pod kutom upada HEA200 profila koji povezuju elektromotor i središnji dio konstrukcije. Što bi u globalnom koordinatnom

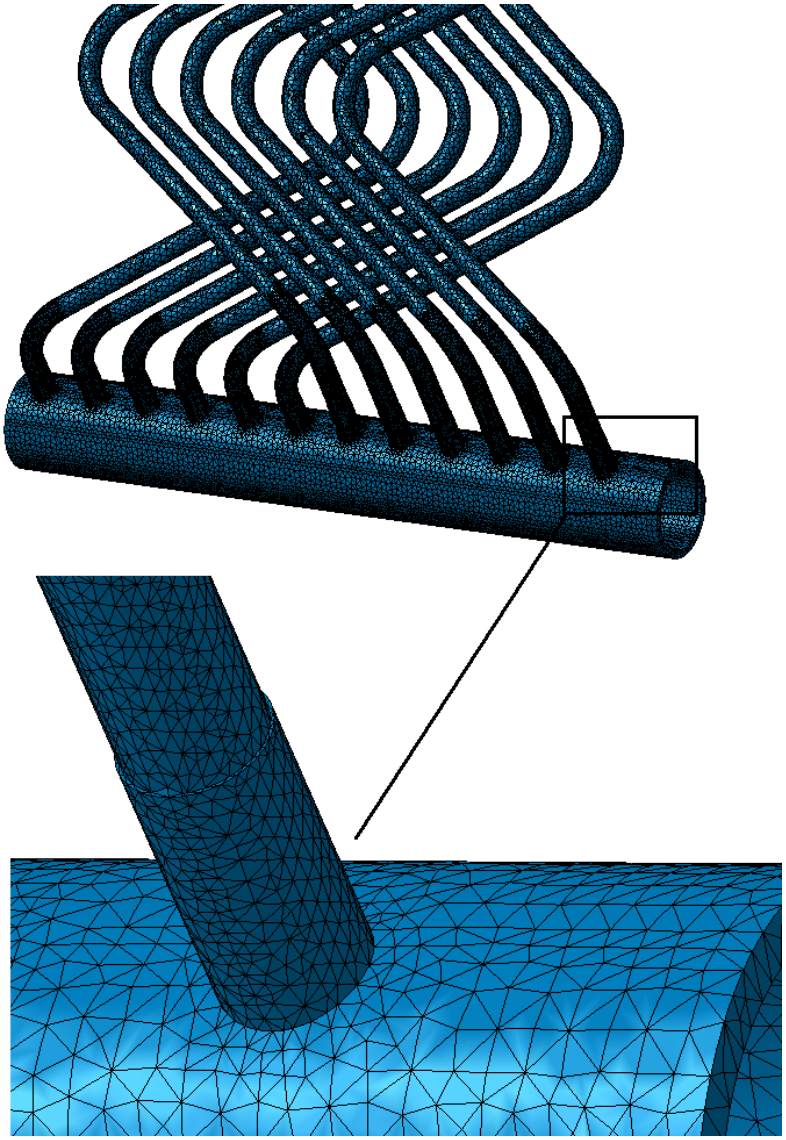
sustavu glasilo $U_x = -22,658$ mm i $U_z = 10,565\,\text{mm}$. Oni su postavljeni na donju strani HEA profila. Pola modela sa rubnim uvjetima i vezama prikazan je na slici 4.2. Razmatrati će se i ista vrijednost pomaka od 25mm ali u suprotnom smjeru $U_x = 22,658\,\text{mm}$ i $U_z = -10,565\,\text{mm}$, znači dva odvojena statička modela ali uz ostale rubne uvjete ne promijenjene. Modul elastičnosti za oba modela iznosi $E = 210000$ MPa a Poissonov faktor $\nu = 0,266$.



Slika 4.2: Prikaz rubnih uvjeta na pola modela u *CATIA*-i

4.2. Analiza pomaka konstrukcije

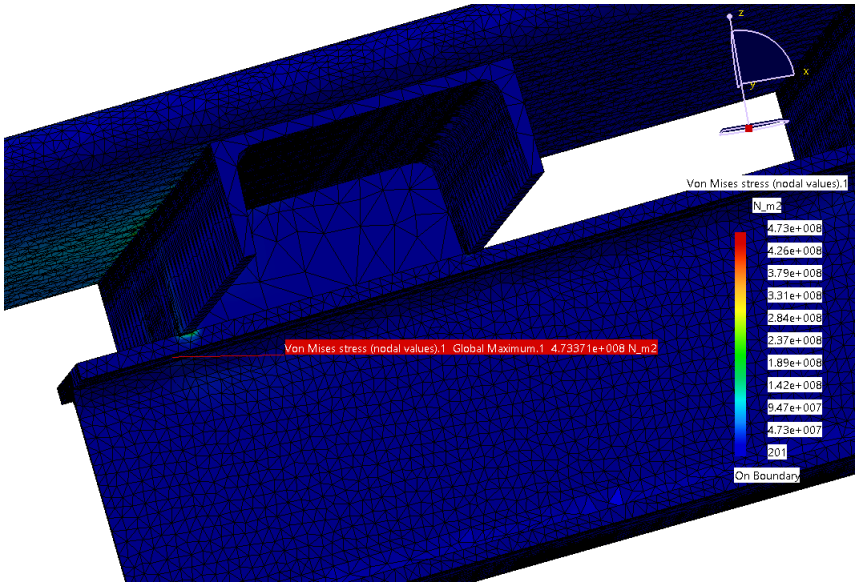
U prvom slučaju biti će razmatran pomak cijele konstrukcije prema gore. Rubni uvjet zadan je na donjem profilu kako je prikazano na slici 4.2. Konvergirana mreža konačnih elemenata prikazana je na slici 4.3.



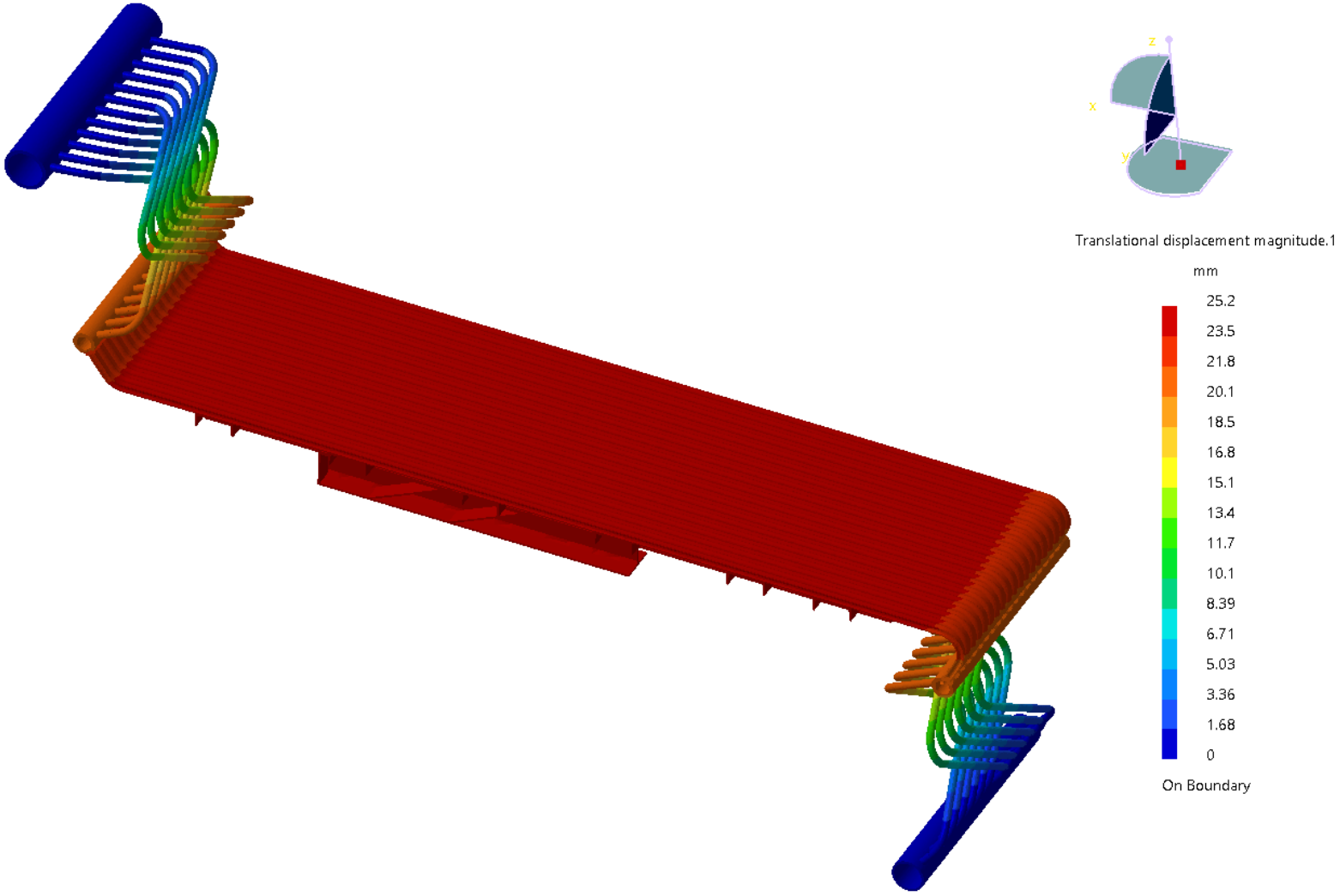
Slika 4.3: Dio mreže modela diskretizranog sa 3178980 konačnih elemenata

Vrijeme trajanja numeričke simulacije za ovakav broj elemenata je približno 220 minuta. Ono se moglo smanjiti izradom cijelog modela iz jednog dijela što bi za posljedicu imalo smanjivanje broja nepoznanica uvedenih *Fastend Jont element* vezom. Također sma-

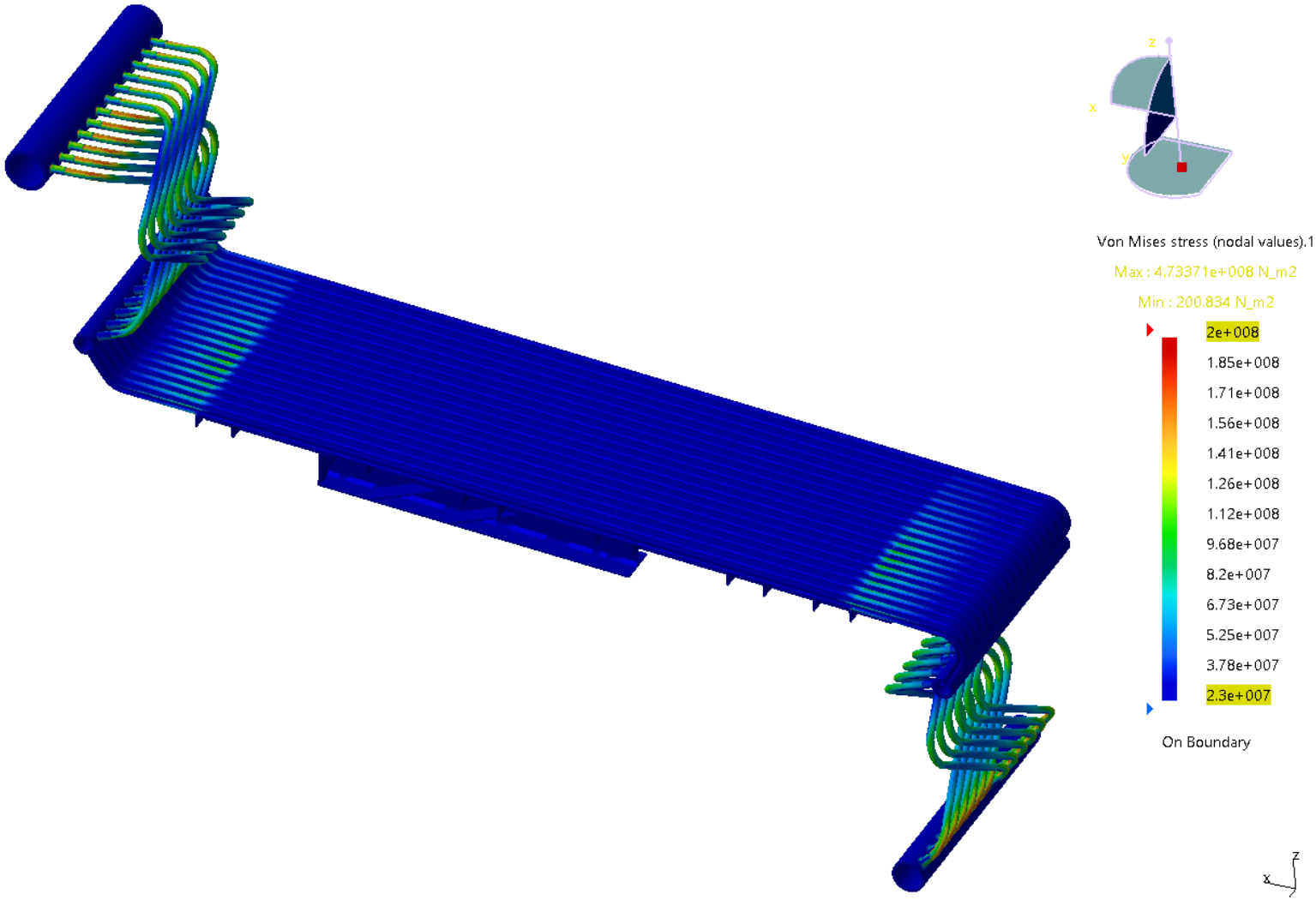
njivanje vremena simulacije moguće je uporabom strukturirane mreže ali strukturiranje ovako velike i kompliciranе geometrije nije bilo moguće. Nestrukturirana mreža tetraedarskih KE drugog reda je progušćena na mjestima gdje se očekuju najveća naprezanja: na spojevima cijevi manjeg promjera na cijevi većega promjera i na mjestima savijanja cijevi. Upravo na tim mjestima biti će prikazana rješenja te će se ona uzimati kao najrelevantija rješenja za integritet konstrukcije. Detalji konstrukcije i raspored naprezanja na njima za pomak cijele konstrukcije prema gore prikazani su na slikama 4.7-4.9 dok je prikaz pomaka i naprezanja na cijelom modelu dan slikama 4.5 i 4.6. Naprezanja na dijelovima konstrukcije za rubni uvjet pomaka prema dolje prikazani su na slika 4.10-4-12. Sva naprezanja su uspoređena sa dopuštenim naprezanja čelika koji se koriste u posudama pod tlakom i pri visokim teperaturama prema normi DIN EN 10028-2. Na taj način će se određuje optimalan čelik koji je potrebno koristiti za izradu konstrukcije. Vidimo u legendi na slikama 4.4 i 4.6 da je maksimalno naprezanje na cijelom modelu 473 MPa što je naravno nefizikalno rješenje uzrokovano veličinom modela i lošom nestrukturiranom mrežom konačnih elemenata. Greška se javlja na dijelu prijelaza sa HEA profila na C profil. Kompliciranі prijelazi u geometriji nisu dovoljno dobro riješeni iako je cijeli srednji dio napravljen iz jednog dijela i ne koristi se nikakva veza između komponenti. Koncentracija naprezanja se može vidjeti na slici 4.9 koja prikazuje globalni maksimum nakon odrađene adaptivne analize na modelu.



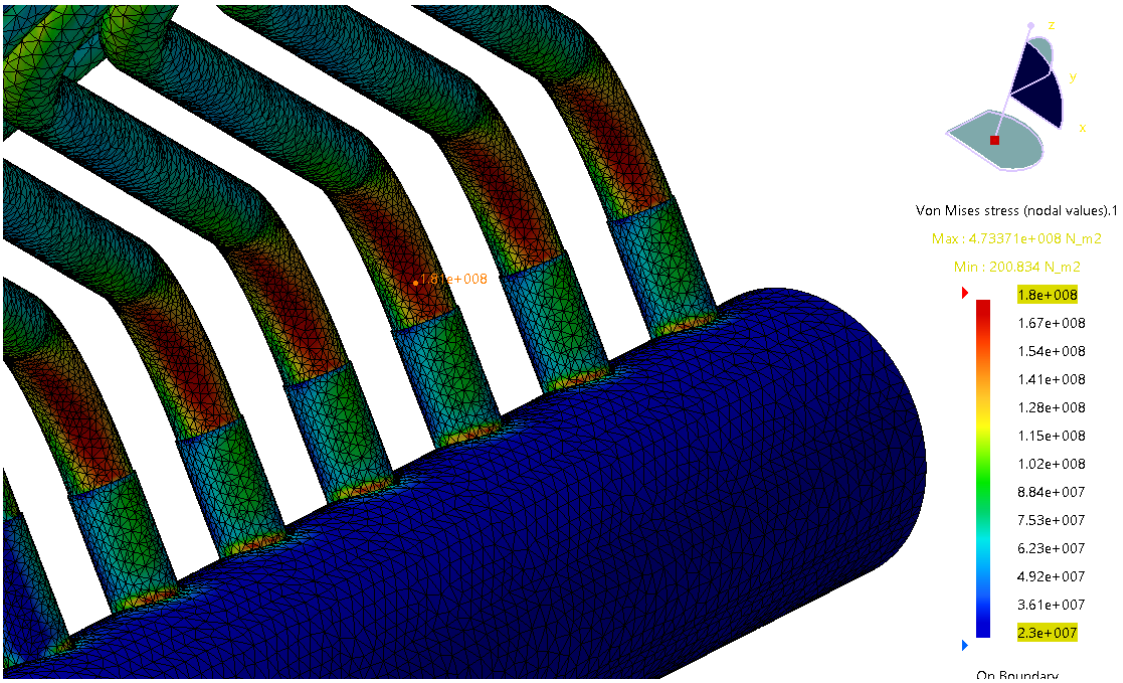
Slika 4.4: Nefizikalna koncentracija naprezanja nakon adaptivne analize



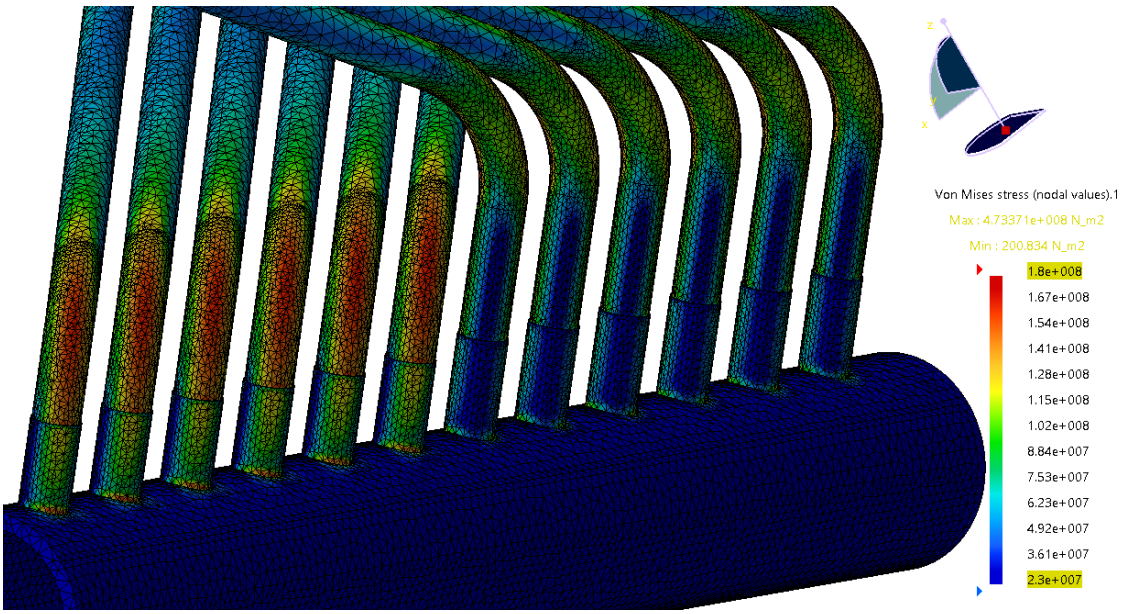
Slika 4.5: Raspodjela pomaka po cijeloj konstrukciji



Slika 4.6: Raspodjela Von Mises-ovih naprezanja po cijeloj konstrukciji za pomak konstrukcije prema gore

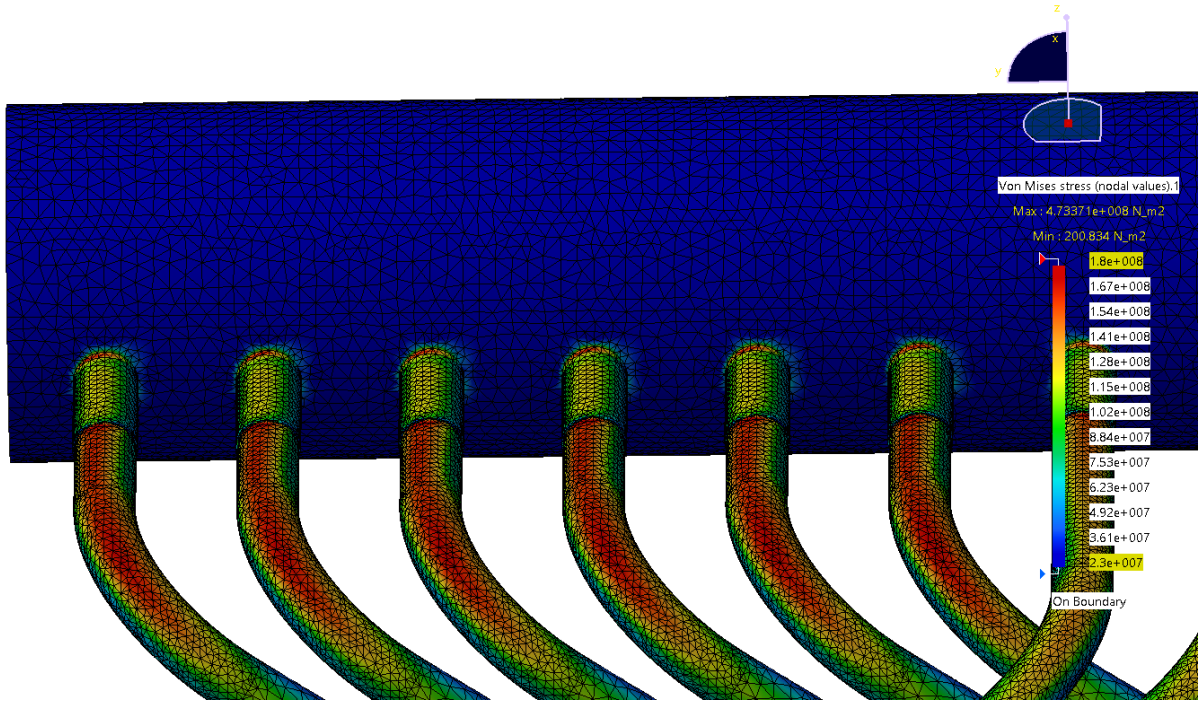


a) donji dio A

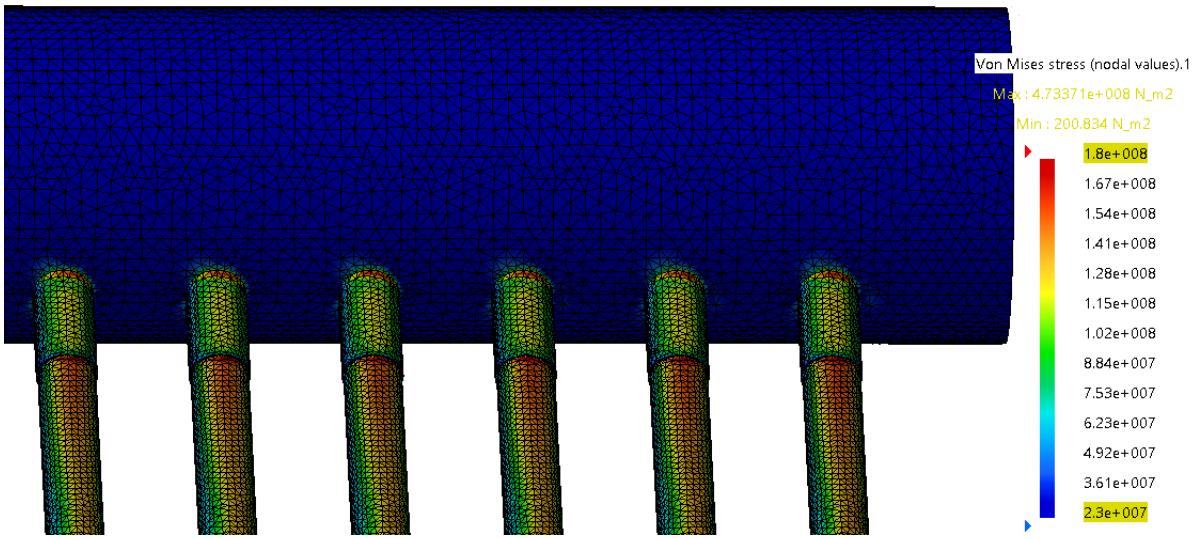


b) donji dio B

Slika 4.7: Raspodjela naprezanja na detaljima konstrukcije za pomak prema gore

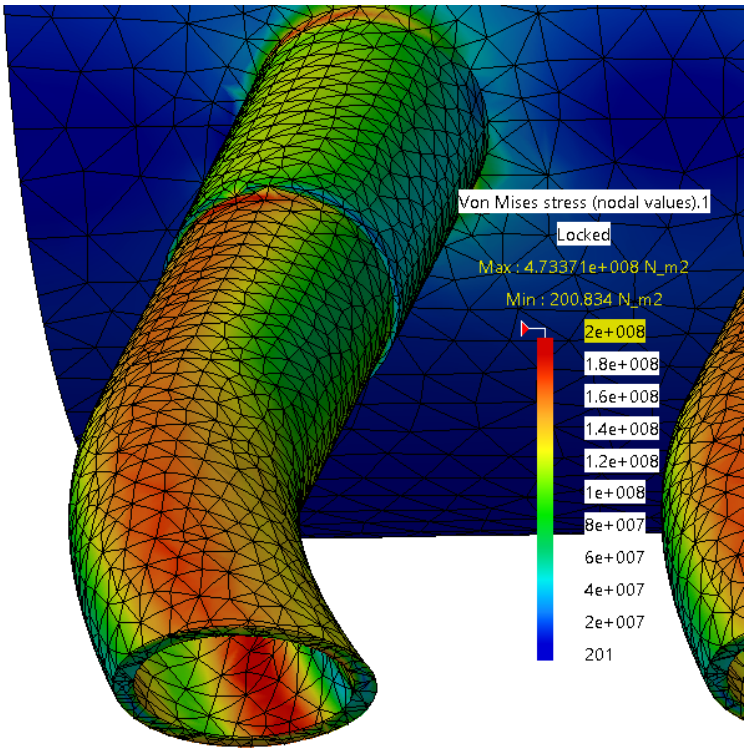


a) gornji dio A

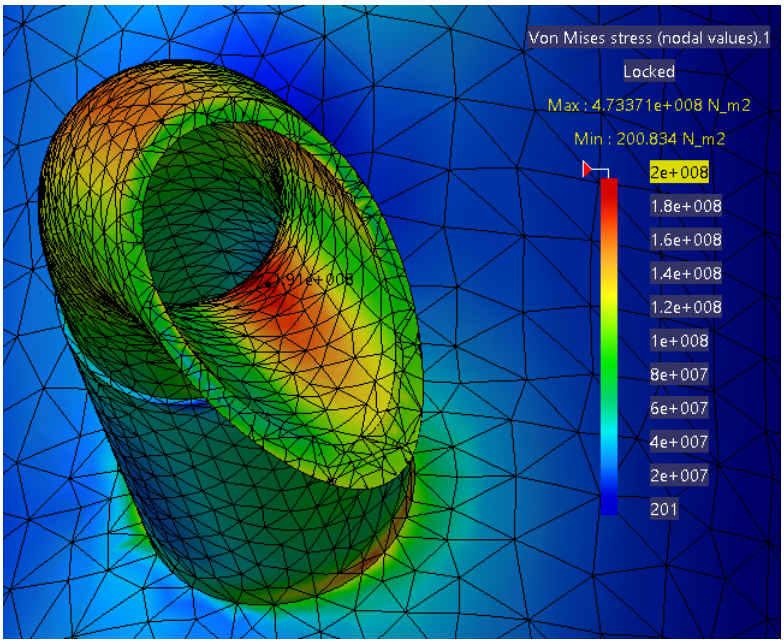


b) gornji dio B

Slika 4.8: Raspodjela naprezanja na detaljima konstrukcije za pomak prema gore

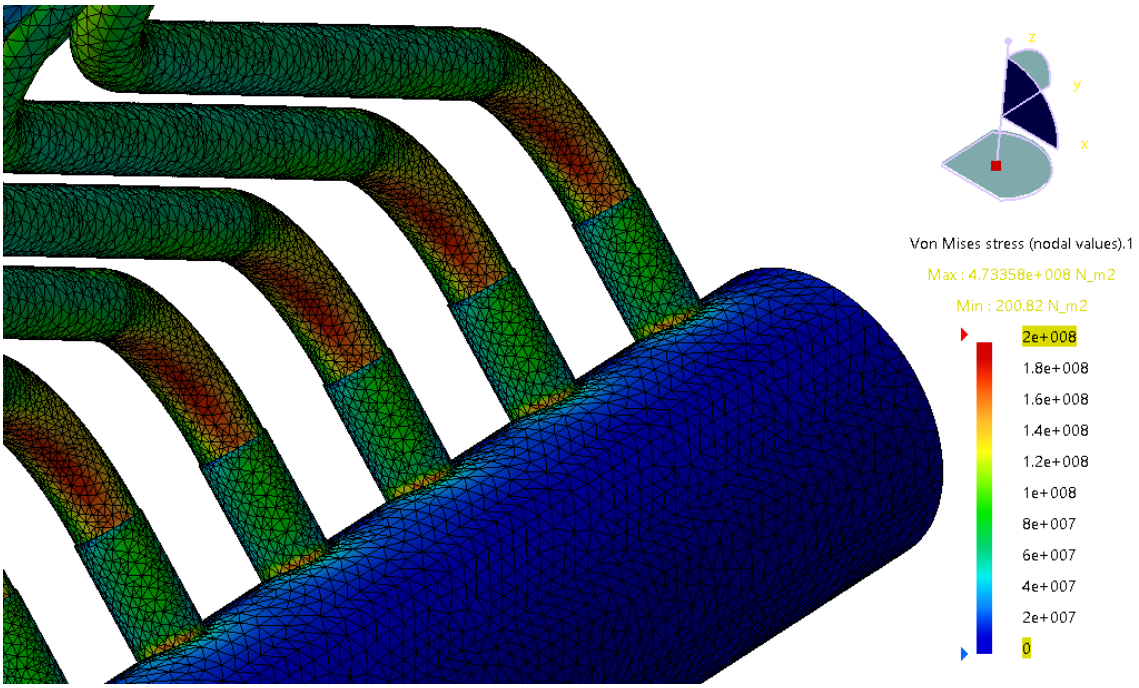


a) presjek donji dio A

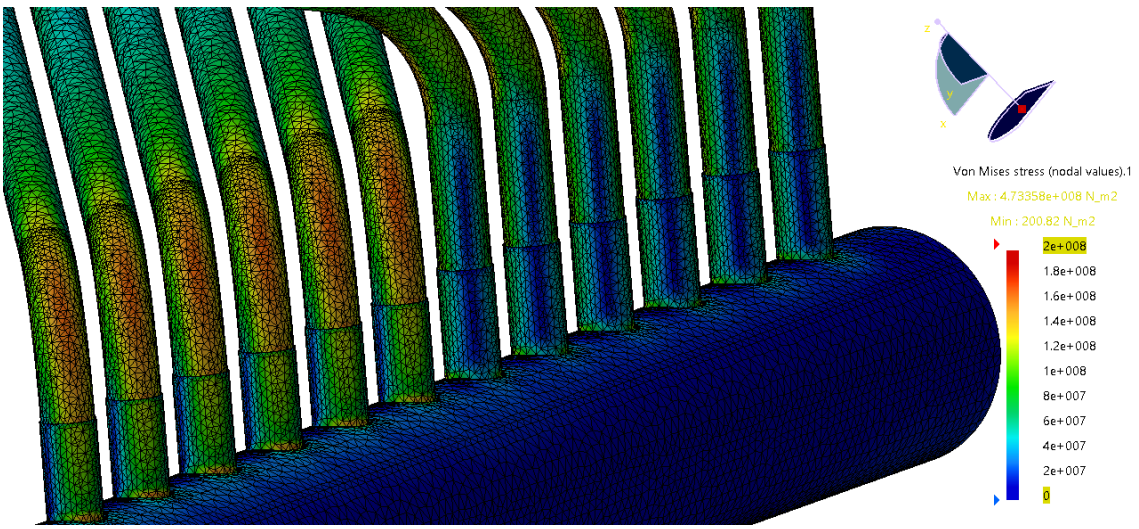


b) presjek gornji dio A

Slika 4.9: Raspodjela naprezanja na unutarnjim dijelovima cijevi za pomak prema gore

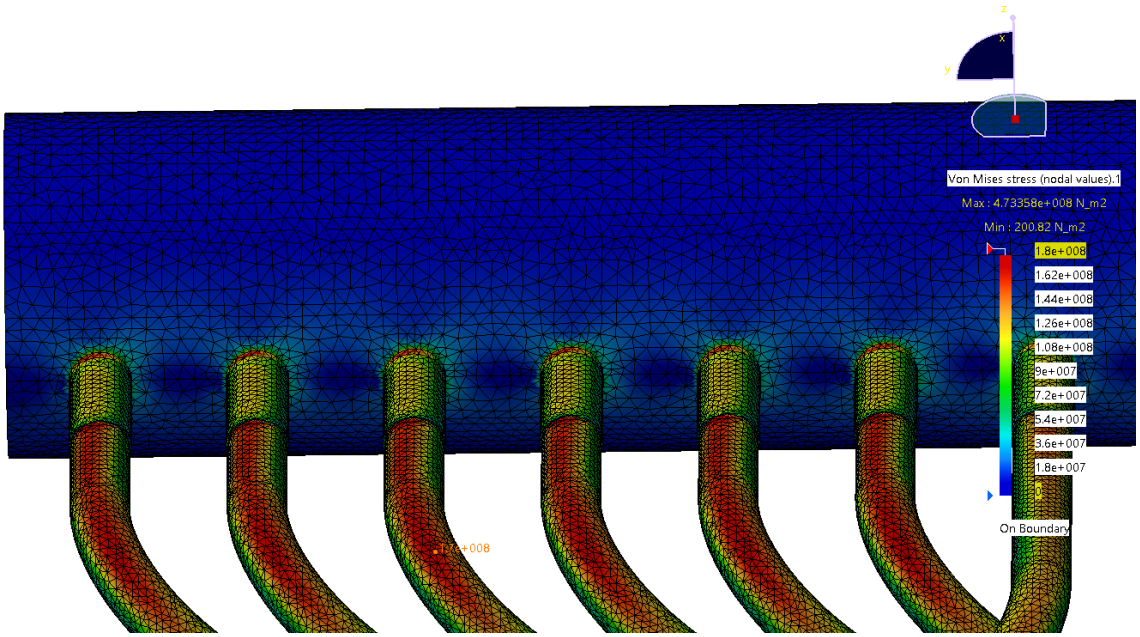


a) donji dio A

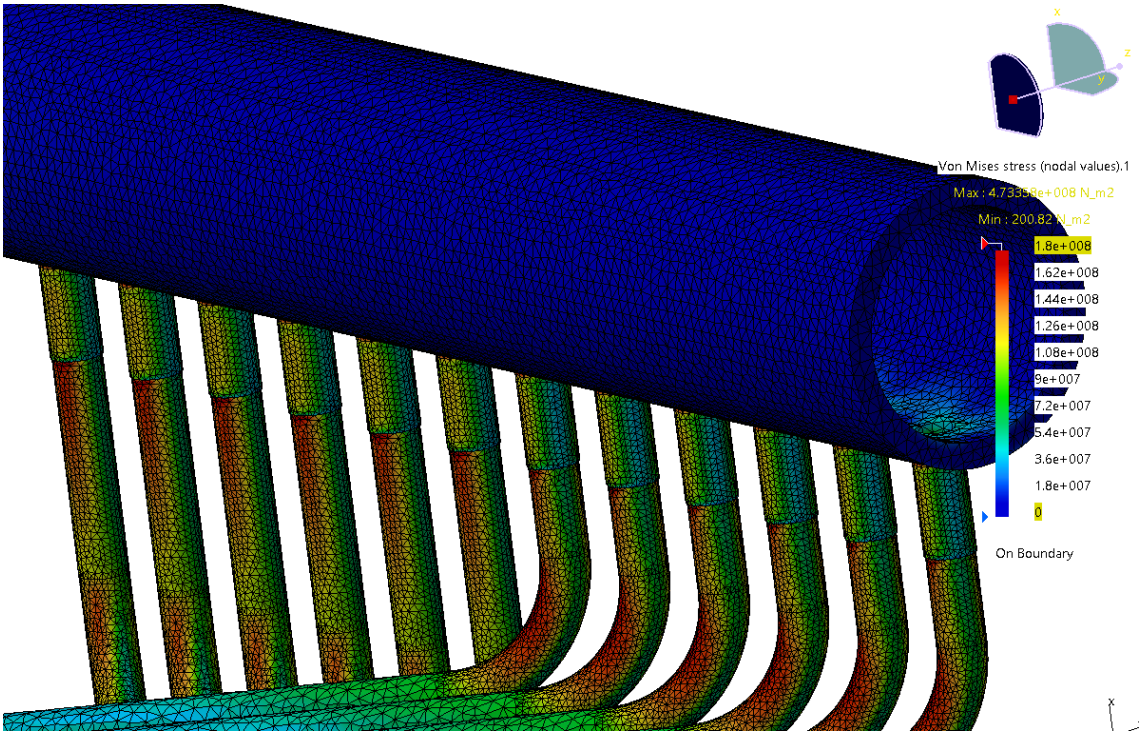


b) donji dio B

Slika 4.10: Raspodjela naprezanja na detaljima konstrukcije za pomak prema dolje

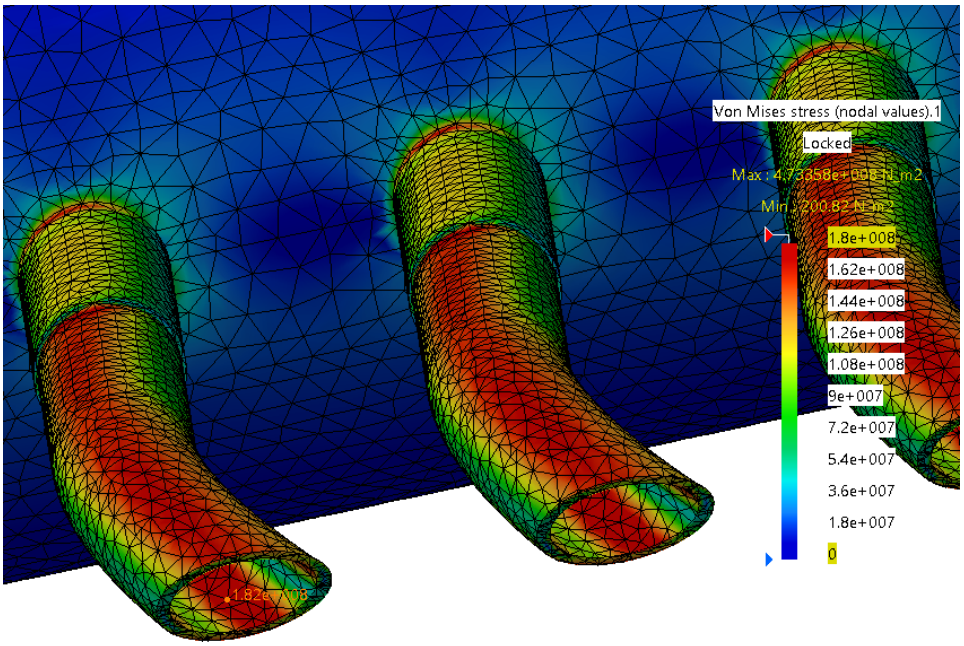


a) gornji dio A

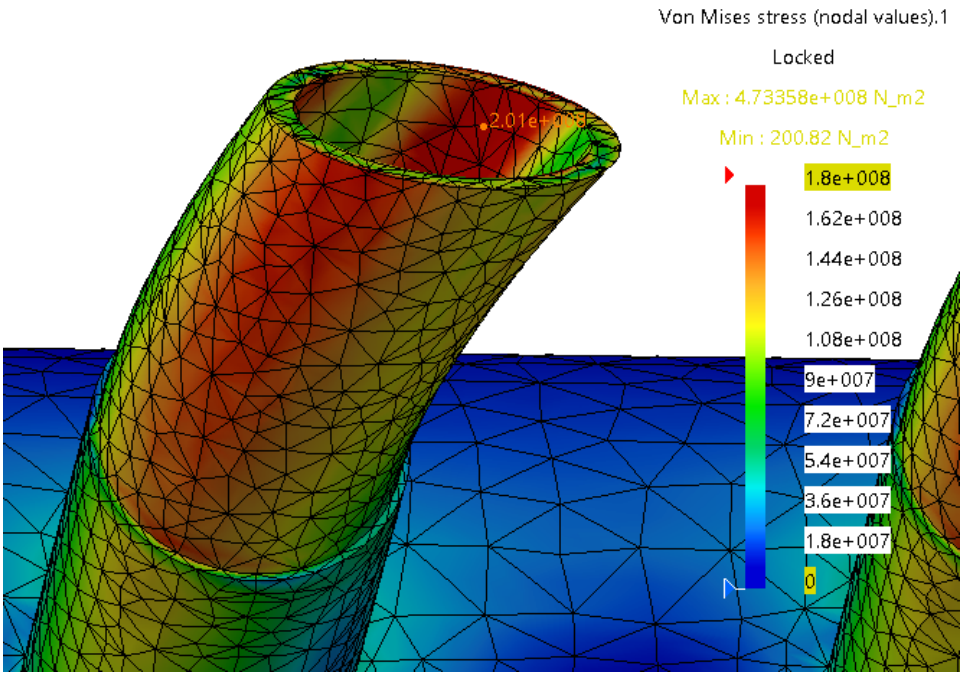


b) gornji dio B

Slika 4.11: Raspodjela naprezanja na detaljima konstrukcije za pomak prema dolje



a) presjek donji dio A

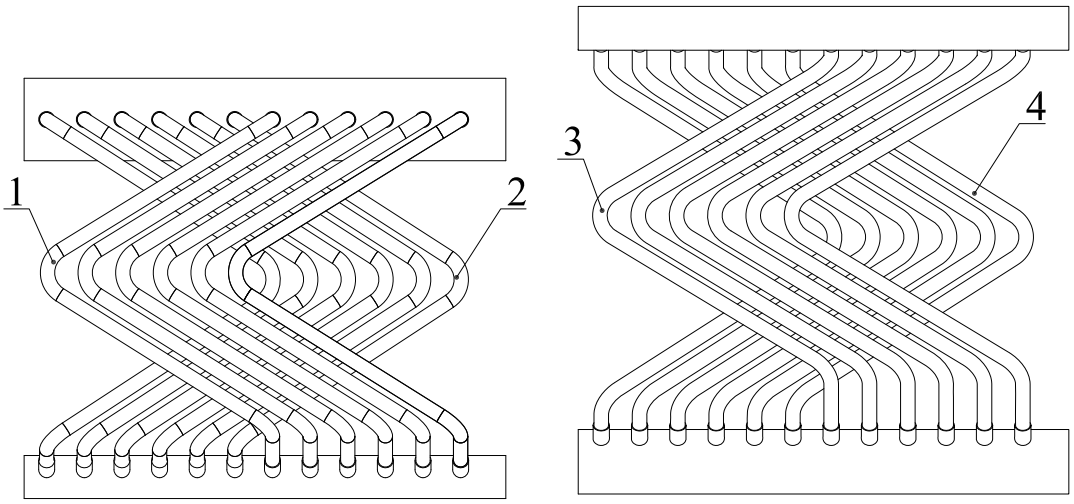


b) presjek gornji dio A

Slika 4.12: Raspodjela naprezanja na unutarnjim dijelovima cijevi za pomak prema dolje

4.3. Analiza tlaka i pomaka

Daljnja analiza napravljena je na cijevima koje se nalaze na gornjem i donjem dijelu konstrukcije. Ukupno se nalazi 4 različito savijene cijevi tako da će biti napravljena 4 odvojena modela. Radi lakšega snalaženja cijevima će biti dodijeljene pozicije od 1 do 4 kako je prikazano na slici 4.13.



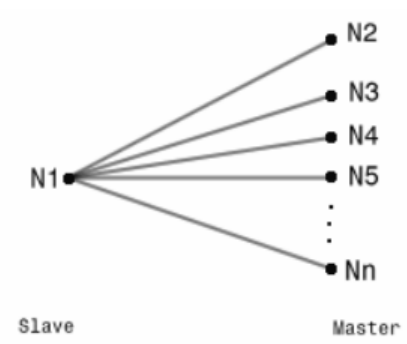
a) gornji dio b) donji dio

Slika 4.13: Pozicije na kojima će se vršiti simulacija

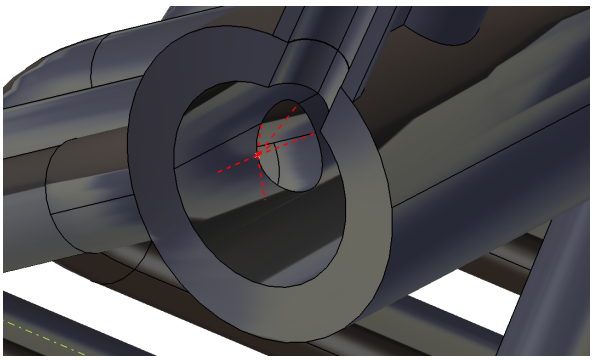
U analizi pomaka nije uzet u obzir testni tlak od 9 MPa (90bara) jer zbog kompliciranе geometrije i složenih površina zadavanje tlačne sile postaje jako zahtjevno. Podmodeli su izvedeni na način da se postavi referentna točka na kraj i početak svake od četiri cijevi te se poji sa njezinim rubom sa *Smooth Virtual Part* vezom, te se u toj točki doda senzor koji mjeri pomake u sve tri osi. Na slici 4.15. prikazan je senzor u gornjoj referentnoj točki spojen s rubom pozicije 4.

Točka bez mase ponaša se kao kruto tijelo koje postepeno prenosi reakcije zadane u toj točki na površinu bez povećanja krutosti konstrukcije odnosno te površine. Veza uzima u obzir elastičnu deformabilnost površina s kojima je spojena. Svi čvorovi površine spojeni su kinematičkim *spider* elementom s točkom. Kreira se skup od n kinematičkih veza između stupnjeva slobode točke i čvorova elemenata. *Smooth spider* element radi na način da se izračunata težišta glavnih čvorova s površine koriste za sve čvorove na površini. Prosječni pomaci i rotacije težišta glavnih čvorova računaju se teorijom srednjih

kvadrata. Podređeni čvor povezan je s težištem $n-1$ glavnih čvorova jednadžbama krutog tijela (slika 4.14).



Slika 4.14: *smooth spider* element



Slika 4.15: senzor na GFT pozicije 4

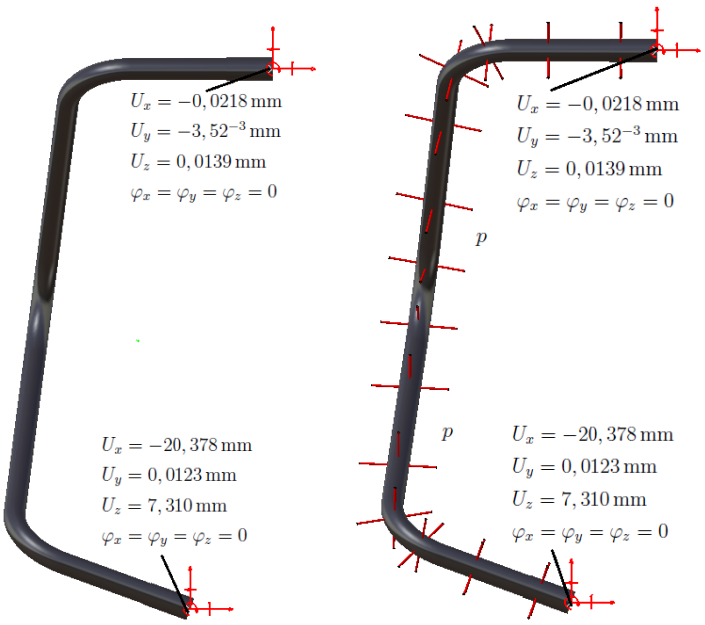
Nakon postavljanja senzora na gornju referentnu točku (GRT) i donju referentnu točku (DRT) potrebno je ponovno izvršiti simulaciju te očitati rezultate svakoga senzora koji se nalaze u tekstualnoj datoteci. U tablici 4.1 prikazani su pomaci u mm GRT i DRT za svaku od četiri pozicije.

Tablica 4.1: Pomaci GRT i DRT za pozicije 1-4 u mm

Pozicija		UT1	UT2	UT3
1	GRT	$-0,0218$	$-3,52^{-3}$	0,0139
	DRT	$-20,378$	$0,0123$	7,310
2	GRT	$-0,0291$	$3,2^{-3}$	0,0817
	DRT	$-20,452$	$0,0231$	7,297
3	GRT	$-19,189$	$2,1^{-4}$	7,213
	DRT	$-0,102$	$2,4^{-4}$	0,0747
4	GRT	$-19,035$	$3,52^{-4}$	7,101
	DRT	$-0,207$	$4,32^{-4}$	0,203

Za validaciju očitanih pomaka prvo će biti napravljena analiza samo pomaka cijevi te će se usporediti kritična mjesta na cijevima iz poglavlja 5.2. Model je izrađen na način da se na pojedinačnoj cijevi ponovno dodaju GRT i DRT te se na njih postavljaju rubni uvjeti pomaka prema tablici 4.1. Na taj način napravljen je podmodel svake cijevi od 1 do 4 i on se može usporediti sa rješenjima iz poglavlja 5.2. Na slici 4.16 a) prikazan

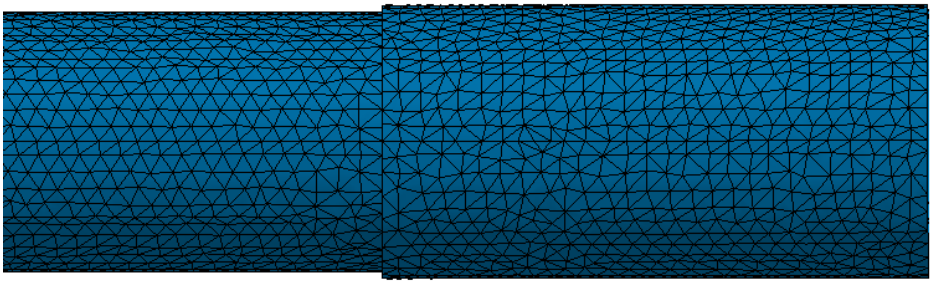
je model cijevi 1 sa rubnim uvjetima pomaka a na slici 4.16 b) sa istim tim rubnim uvjetima pomaka i unutarnjim tlakom p.



a) samo pomaci b) pomaci i tlak

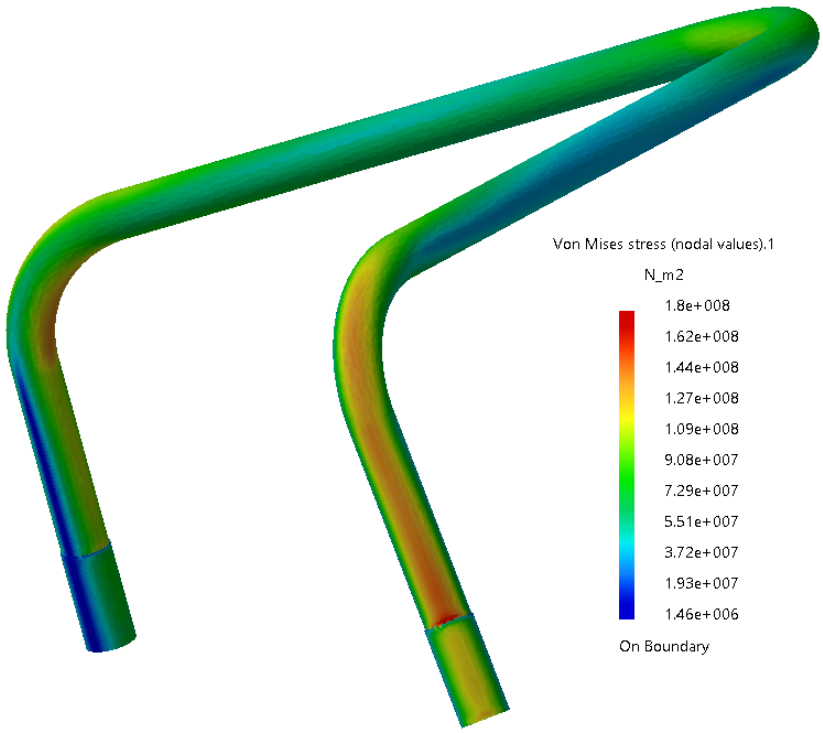
Slika 4.16: Pozicija 1 sa rubnim uvjetima i opterećenjem

Korišteni su TE10 KE drugog reda za diskretizaciju modela. Simulacija je izvedena na konvergiranom modelu. Zbog velikog modela i broja KE teško je prikazati cijelu mrežu pa je radi jednostavnosti prikazan je samo dio mreže i to u blizini GRT na slici 4.18.



Slika 4.17: Dio mreže pozicije 1 diskretiziranog s 176593 KE

Slika 2.15 prikazuje raspored Von Mises-ovih naprezanja po cijeloj konstrukciji za rubne uvijete sa slike 4.16 a).



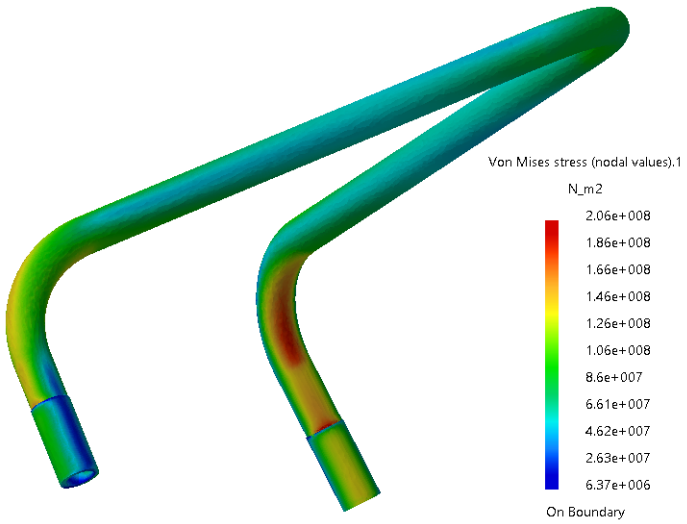
Slika 4.18: Raspored Von Mises-ovih naprezanja na poziciji 1 za RU pomaka

Maksimalno naprezanje iznosi 180Mpa i pojavljuje se na koljenima savijene cijevi te na prijelazu sa veće na manju cijev kao što je očekivano. Rezultati dobiveni numeričkom analizom sa slike 4.18 odgovaraju numeričkim rješenjima sa slike 4.7 b) što znači da je podmodel dobro definiran.

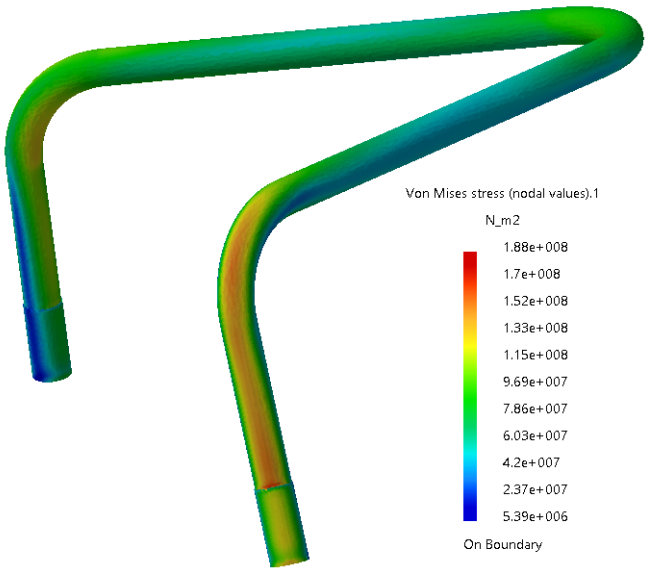
Na slikama 4.19 do 4.22 prikazani su rasporedi naprezanja na četiri cijevi odnosno pozicije 1-4. Modeli su izrađeni tako da su se očitani pomaci u referntnim točkama sa pola modela iz poglavlja 4.2 koristili kao rubni uvjeti pomaka u referentnim točkama svake od karakterističnih cijevi. Svaki model definiran je kao pozicija 1 prema slici 4.16 b) na način da je svakoj referentnoj točki spojenom sa rubom cijevi *Smooth Virtual Part* vezom dodan pripadajući pomak iz tablice 4.1.

Nakon odrađene analize uslijed djelovanja rubnih uvjeta pomaka i unutarnjeg tlaka p naprezanja na sve četiri cijevi ne prelaze 210 MPa. Koncentracija naprezanja pojavljuje se na prijelazu sa deblje na tanju cijev, odnosno na mjestu na kojemu je predviđen čeoni

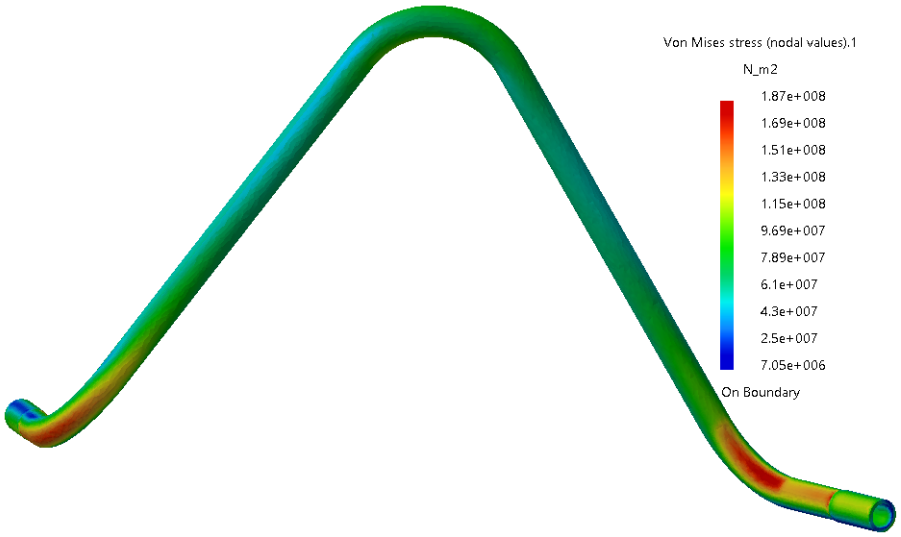
zavar dvije cijevi. To je za očekivati pošto je tu najveći diskontinuitet u geometriji a i rješenja analize iz poglavlja 2.3 pokazalo je da se neposredno iznad takve koncentracije naprezanja nalazi rješenje koje se puno bolje približava analitičkom. Osim koncentracije na prijelazi između dvije cijevi javljaju se i povećana naprezanja na koljenima cijevi, odnosno mjestima gdje se cijev savija.



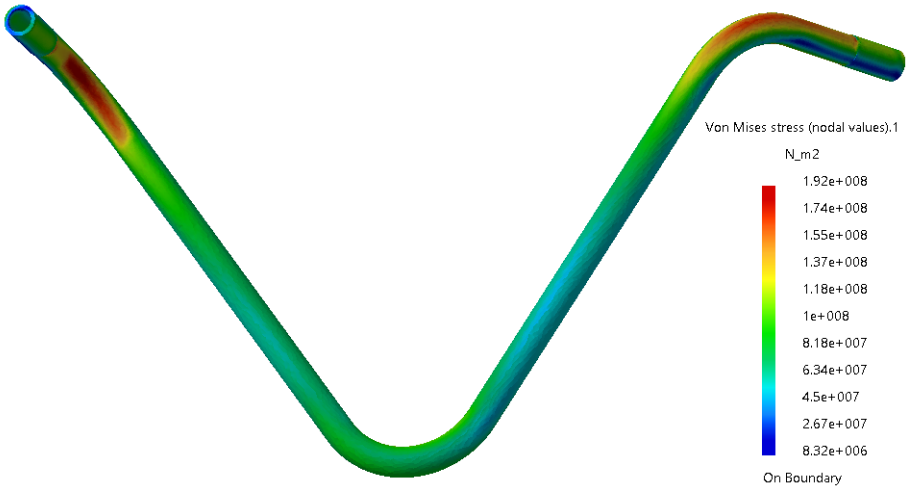
Slika 4.19: Raspodejela Von Mises-ovih naprezanja za poziciju 1



Slika 4.20: Raspodejela Von Mises-ovih naprezanja za poziciju 2



Slika 4.21: Raspodejela Von Mises-ovih naprezanja za poziciju 3



Slika 4.22: Raspodejela Von Mises-ovih naprezanja za poziciju 4

4.4. Numerička rješenja

U poglavlju 4.2 prikazana su numerička rješenja naprezanja dobivena programskim paketom *CATIA* za pomak konstrukcije. Rješenja dobivena za pomak konstrukcije prema gore nešto su manja od rješenja za isti taj pomak ali u suprotnom smjeru slika 4.8. i 4.12. Globalni maksimum se nalazi na istom mjestu u oba slučaja i to se smatra greškom modeliranja i numeričkog proračuna. U poglavlju 4.3 maksimalno naprezanje kreće se u granicama od 190 do 205 MPa u kritičnim dijelovima konstrukcije, što je upravo na koljenima i čeonom prijelazu sa deblje na tanju cijev u gornjim i donjim dijelovima karakterističnih cijevi. Prema tablici 4.2. samo dva čelika zadovoljavaju uvjete čvrstoće pri povišenoj temperaturi za zadani testni tlak od 9 MPa (90 bara). Naprezanja se mogu smanjiti manjim pomacima cijele konstrukcije a i pretpostavka temperature od 300 stupnjeva u na vodom hlađenim cijevima je u najgorem mogućem slučaju. Nikada temperatura vode neće doći do 300 °C jer to je na granici stvaranja prvih mjehurića pare. Za točan izračun temperature cijevi rešetke potreban je detaljan termodinamički proračun toplinskih tokova kroz cjevovod koji ovdje nije obrađen. Također produljenjem konstrukcije smanjila bi se naprezanja na krajevima cijevi ali to uvjetuje i veće postrojenje, veću ogrijevnu površinu itd.

Tablica 4.2: Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ u MPa pri različitim temperaturama prema DIN EN10028-2

Čelik	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C
P235H	198	182	167	147
P295GH	249	228	209	192
P355GH	299	275	252	232
18MnMo4-5	315	210	295	285

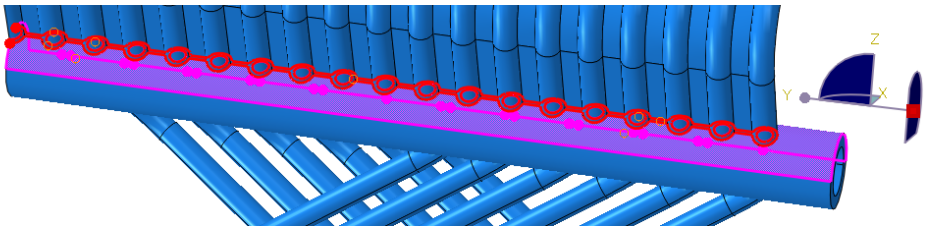
5 Analiza u programskom paketu Abaqus

Analiza primjenom metode konačnih elemenata napravljena je i programskom paketu *Abaqus* 6.14[11-12]. Ponovno je analiza provedena na pola modela radi uštede računalne memorije. Model nije napravljen u *Abaqus*-u nego je preuzet iz *CATIA*-e kao *part*. Napravljena je provjera dimenzija modela. Sve karakteristike materijala su identične u oba programska paketa.

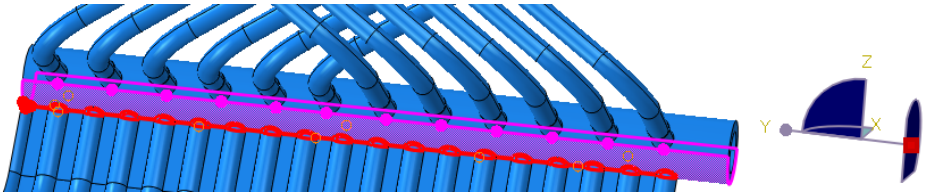
5.1. Rubni uvjeti i opterećenja

Model je preuzet kao tri odvojena dijela konstrukcije: donji dio sa zakrivljenim cijevima između dvije debele velike cijevi, srednji sa 37 zakrivljenih cijevi između kojih je lim debljine 3mm ispod kojih se nalaze C i HEA profili, gornji dio sa zakrivljenim cijevima između dvije debele cijevi. Ti dijelovi spojeni su u jedan dio krutom *Tie* vezom koja povezuje dvije površine za vrijeme trajanja simulacije. Preporuka *Abaqus Analysis User's Guide*-a[12] je da se za *Master* površinu (označena crvenom bojom na slici 5.1.) odabere ona površina koja ima manji broj konačnih elemenata zato što se zajednički čvorovi odnosno čvorovi koje dijele oba dijela brišu sa *Slave* površine (roza boja na slici 5.1).

Kako je problem simetričan duž osi simetrije na lijevom kraju su onemogućeni zakreti oko x i z osi te pomak u smjeru osi y. Na desnom rubu obje cijevi rubni uvjeti su zadani pomoću referentne točke koja se nalazi u središtu svake cijevi. Referentna točka je s desnom čeonom površinom cijevi spojena pomoću opcije *Continuum distributing coupling*, a svi pomaci i zakreti oko svih osi su izjednačeni s nulom. Pomak konstrukcije je zadan takav da bude 25 mm pod kutom upada HEA200 profila koji povezuju elektromotor i središnji dio konstrukcije isto kao i na prijašnjem modelu. Što bi u globalnom koordinatnom sustavu glasilo $U_x = -22,658$ mm i $U_z = 10,565$ mm odnosno $U_x = 22,658$ mm i $U_z = -10,565$ mm za pomak konstrukcije prema dolje. Svi rubni uvjeti i opterećenja prikazani su na slici 5.2.

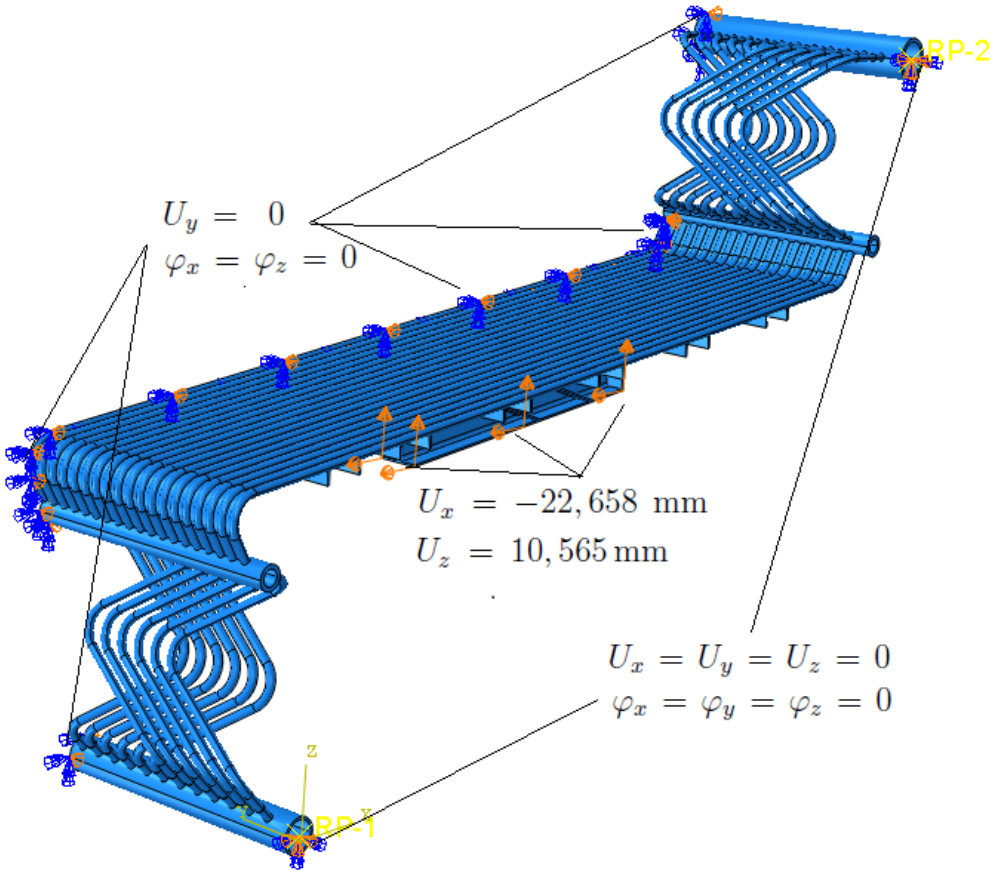


a) donji i srednji dio



b) srednji i gornji dio

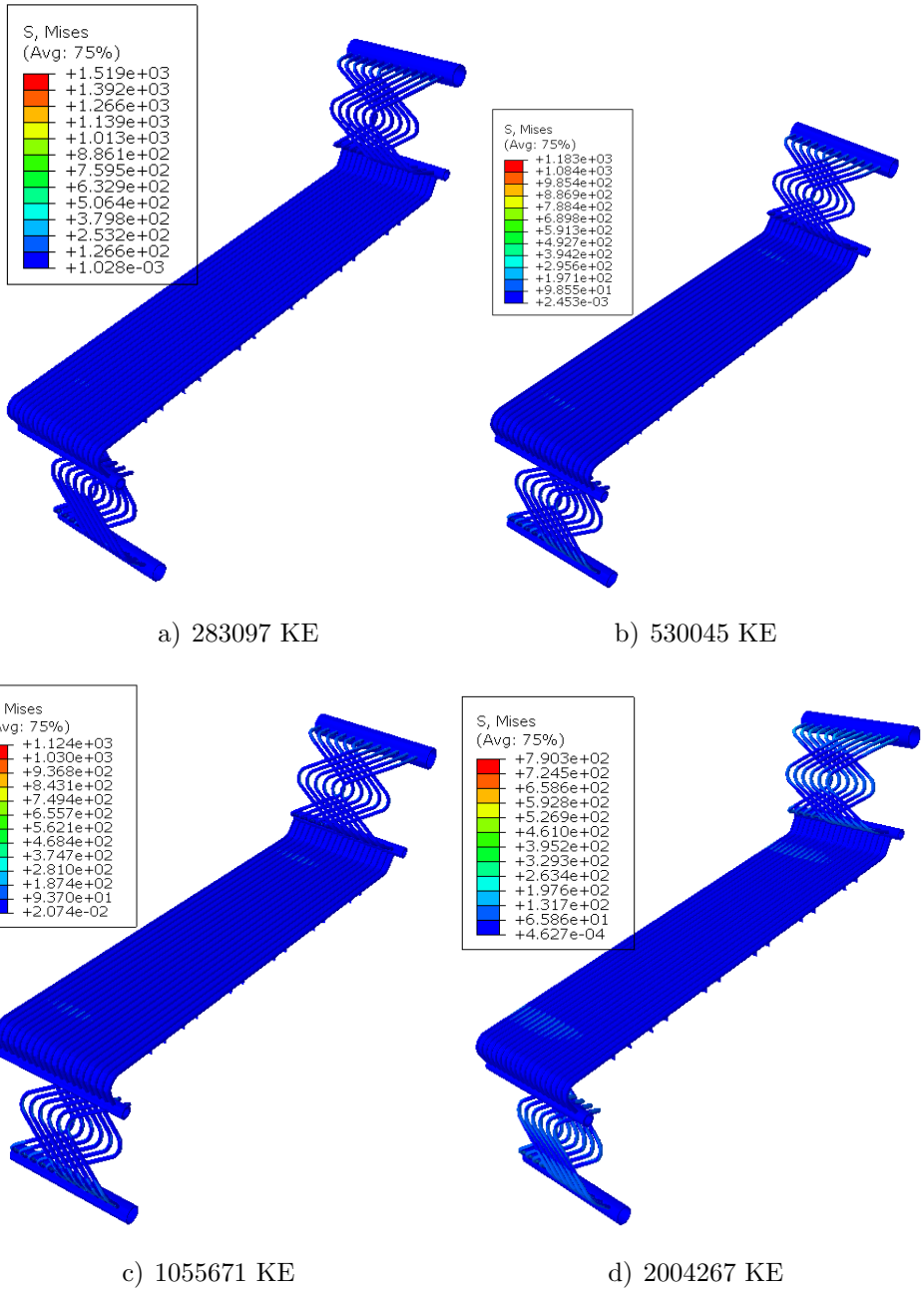
Slika 5.1: *Tie* veze



Slika 5.2: Prikaz rubnih uvjeta na pola modela u *Abaqus*-u

5.2. Analiza pomaka konstrukcije

Numerička simulacija izvršena je na konvergiranom modelu. Za mrežu konačnih elemenata korišteni su izoparametarski tetraedarski konačni elementi oznake C3D10. Konvergencija je prikazana na slikama 5.3.

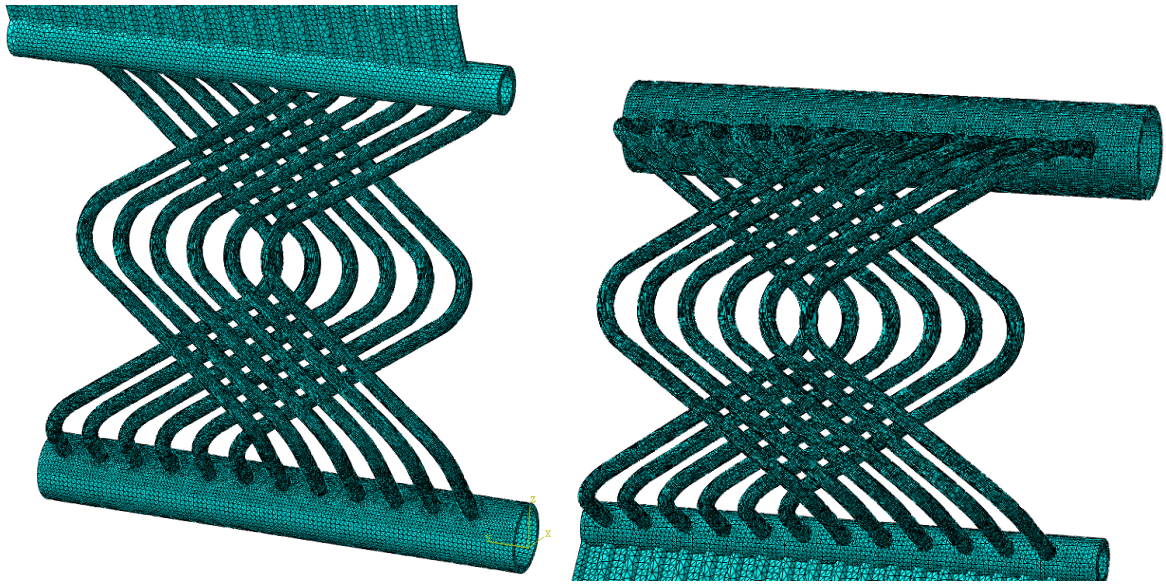


a) 283097 KE b) 530045 KE

c) 1055671 KE d) 2004267 KE

Slika 5.3: Prikaz naprezanja za različitu gustoću mreže

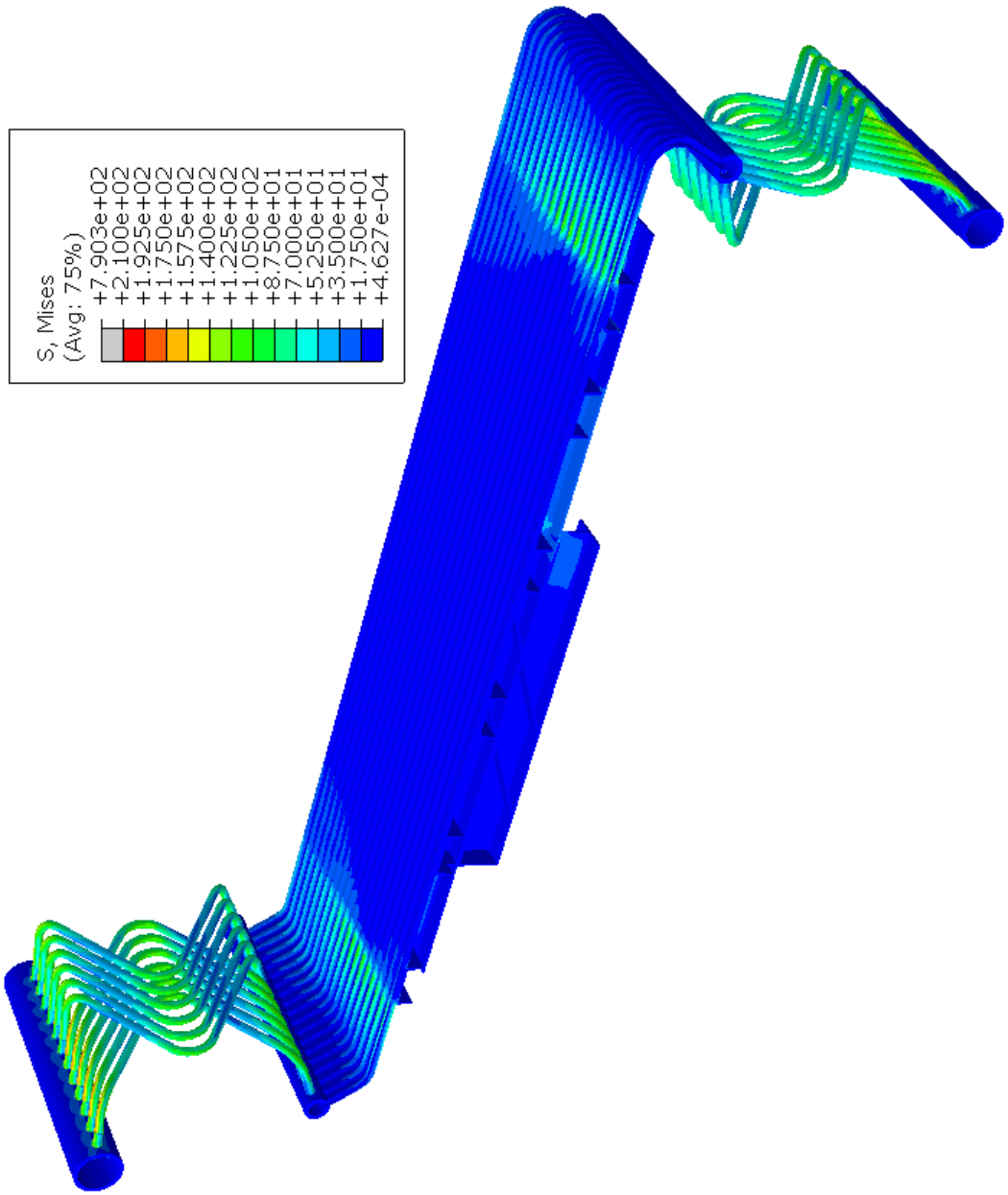
Na slici 5.3 nije prikaza mreža konačnih elemenata zbog estetike i razlučljivosti slika prikazana je samo zbog vidljivosti opadanja maksimalnog naprezanja povećavanjem broja stupnjeva slobode konstrukcije. Za veći broj stupnjeva slobode nije bilo dostupno više računalne memorije. Rad sa većim brojem stupnjeva slobode postaje sporiji i zahtjevniji za računalo. Osim uvjeta simetrije koji su korišteni za uštedu računalne memorije u *Field Output Request*-u su označeni samo naprezanja i pomaci, koji se jedini promatraju u ovom diplomskom zadatku, te je i na taj način napravljena određena ušteda u vremenu računanja. Smanjivanje vremena simulacije moguće je upotrebom strukturirane mreže ali kao što je to opisano u poglavlju 4.2 vrijedi i u *Abaqus*-u, kompliciranu i veliku geometriju izrazito je teško strukturirati. Vrijeme trajanja simulacije na konvergiranom modelu trajalo je 130 min. Na slici 5.4. prikazani su dijelovi konvergirane mreže. Mreža je progušćena na mjestima gdje se očekuju najveća naprezanja a to je na donjim i gornjim krajevima cijevi konstrukcije i na koljenima cijevi.



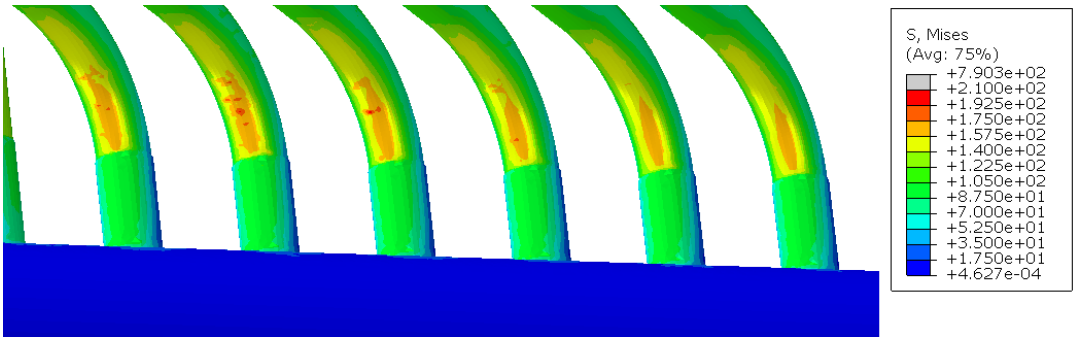
a) donji dio b) gornji dio

Slika 5.4: Dio mreže modela diskretizranog sa 2004267 konačnih elemenata

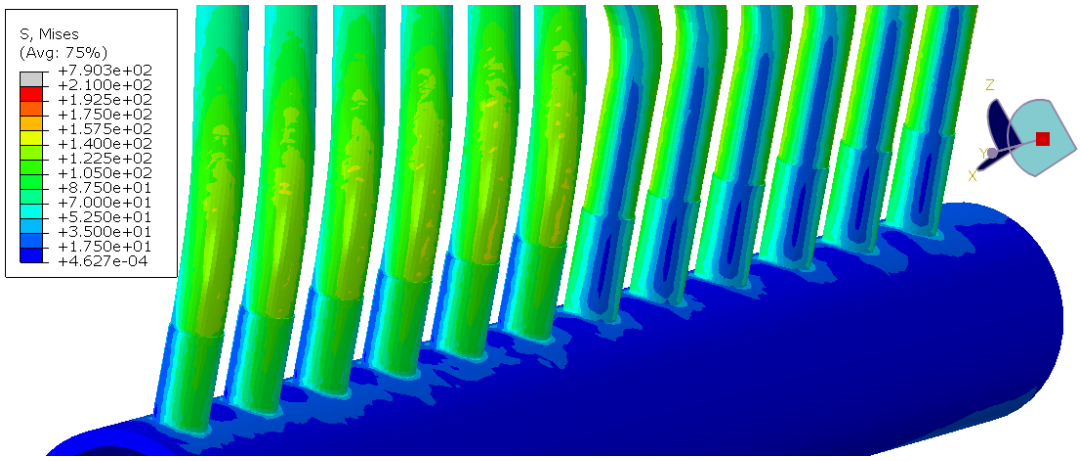
Na slici 5.5 prikazan je raspored naprezanja na cijeloj konstrukciji za pomak prema gore. Detalji te analize prikazani su bez mreže konačnih elemenata na slici 5.6. Nije prikazan cijeli model za rubne uvjete pomaka prema dolje ali su prikazani na slici 5.7 detalji te analize.



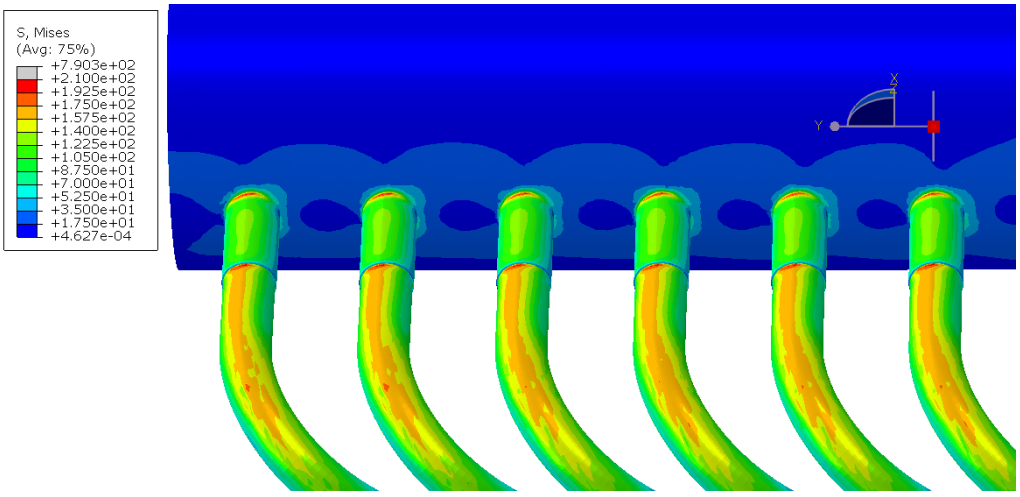
Slika 5.5: Raspodjela naprezanja po cijeloj konstrukciji za pomak prema gore



a) donji dio A

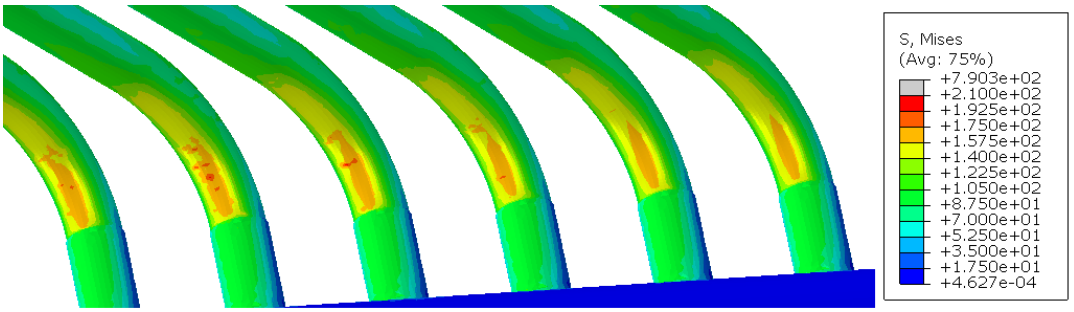


b) donji dio B

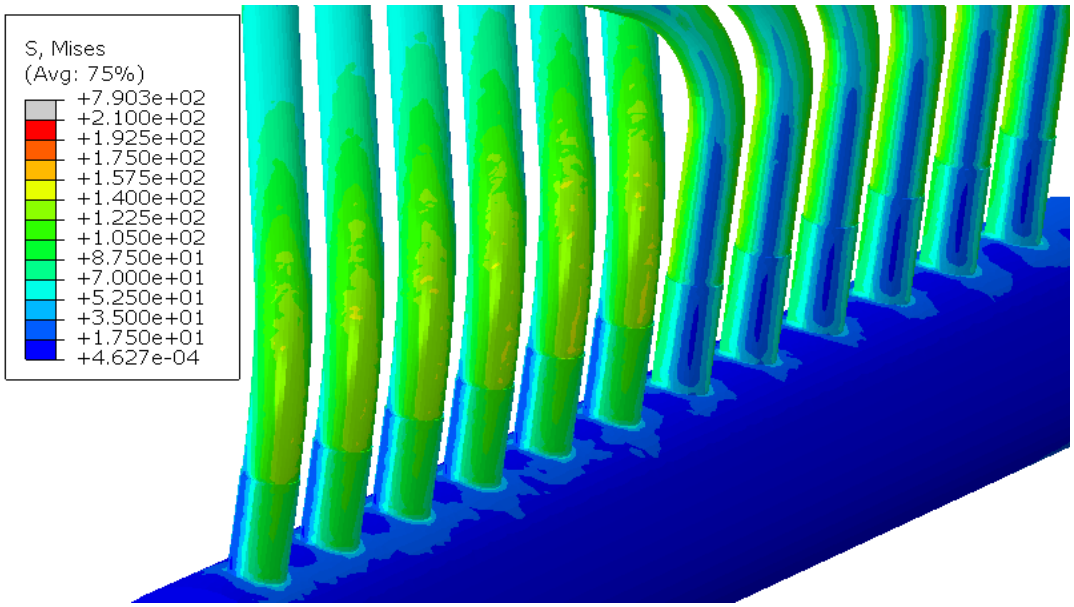


c) gornji dio A

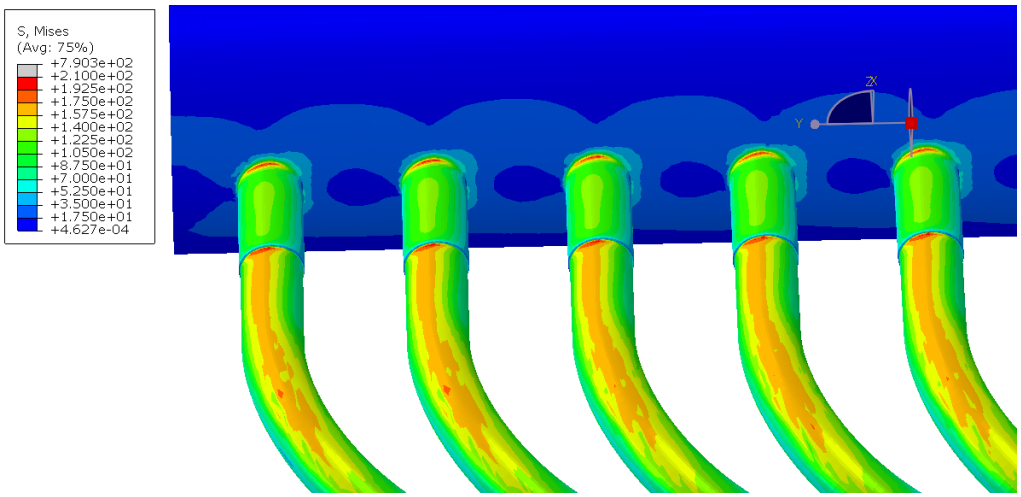
Slika 5.6: Raspodjela naprezanja na detaljima konstrukcije za pomak prema gore



a) donji dio A



b) donji dio B

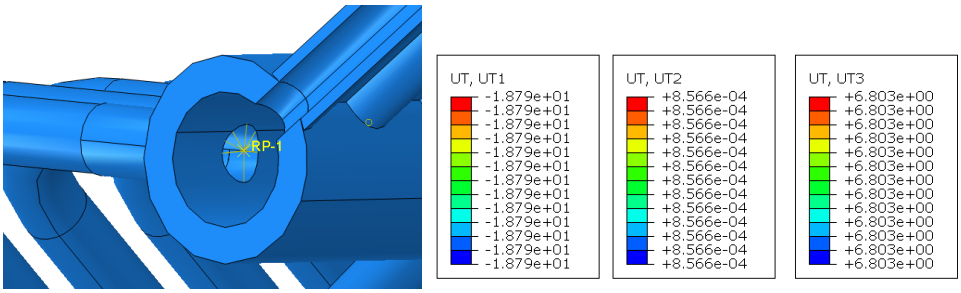


c) gornji dio A

Slika 5.7: Raspodjela naprezanja na detaljima konstrukcije za pomak prema dolje

5.3. Analiza tlaka i pomaka

Analiza pomaka pokazala se kao izrazito računalno zahtjevna. Da bi se u cijelosti analizirala konstrukcija potrebno je napraviti podmodeliranje. Ono je napravljeno na način da promatramo pomake referentnih točaka postavljenih u sredinu krajeva cijevi. Točke su spojene s vanjskim rubom cijevi opcijom *Continuum distributing coupling*. Kako su gornji i donji dio izrađeni od 4 različito savijene cijevi potrebno je ukupno 8 točaka kontrolirati. Na slici 5.9. prikazana je jedna referentna točka koja se nalazi na donjem dijelu konstrukcije i rezultati pomaka koji joj pripadaju . Radi lakšeg snalaženja biti cijevi će biti numerirane kao na slici 5.8.



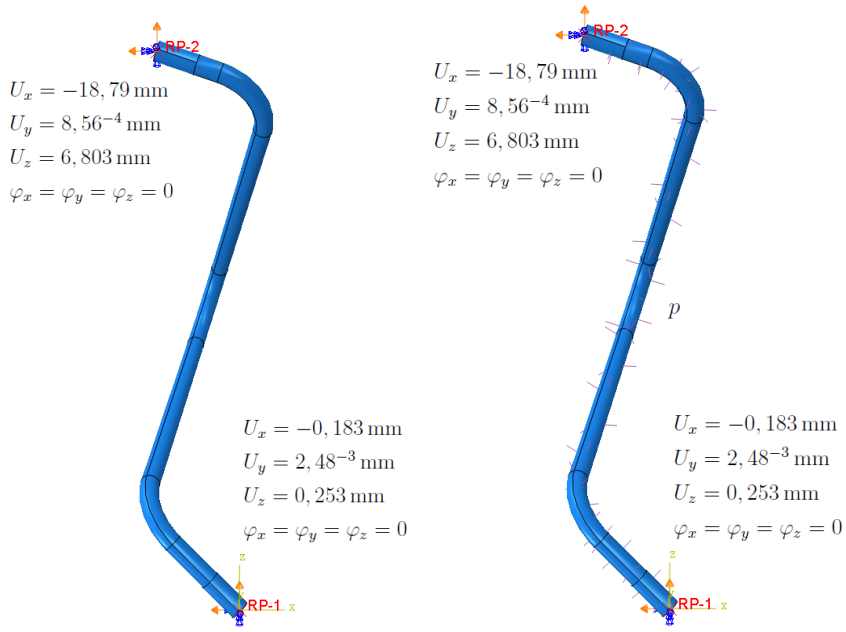
a) gornja referentna točka b) rezultati

Slika 5.8: Pozicija 4

Rješenja sa slike 5.9 ni ne mogu biti u nikakvom rasponu jer se radi o jednoj točki a njoj je jednožnačno određen pomak u sve tri glavne osi. U tablici 5.1 prikazano su pomaci gorenje referentne točke (GRT) i donje referentne točke (DRT).

Tablica 5.1: Pomaci GRT i DRT za pozicije 1-4 u mm

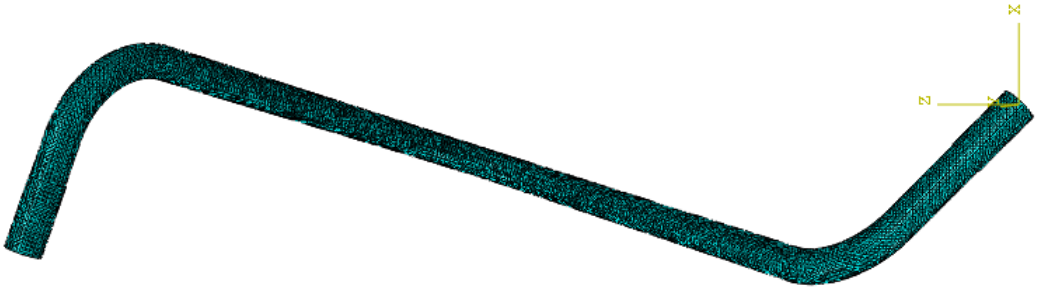
Pozicija		UT1	UT2	UT3
1	GRT	$-0,0193$	$-0,01648$	0,0244
	DRT	-20.063	$-5,61^{-4}$	6,912
2	GRT	$-0,05303$	$3,52^{-4}$	0,1273
	DRT	$-20,273$	$-0,001$	7,063
3	GRT	$-19,213$	$5,6^{-3}$	6,912
	DRT	$-0,0193$	$-0,01648$	0,0244
4	GRT	$-18,79$	$8,56^{-4}$	6,803
	DRT	$-0,183$	$2,48^{-3}$	0,253



a) samo pomaci b) pomaci i tlak

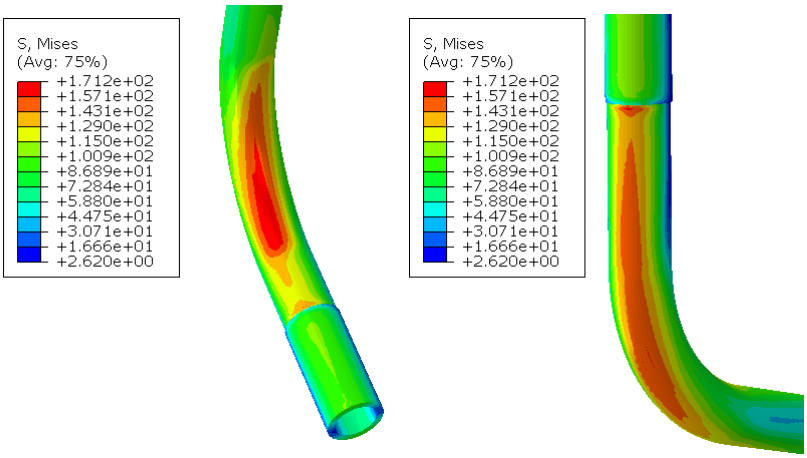
Slika 5.9: Pozicija 4 sa rubnim uvjetima i opterećenjem

Za validaciju očitanih pomaka prvo će biti napravljena analiza samo pomaka cijevi te će se usporediti kritična mjesta na cijevima iz poglavlja 5.2. Model cijevi 4 sa rubnim uvjetima prikazan je na slici 5.10.
Korišteni su tetraedarski konačni elementi drugog reda, na slici 5.11 prikazana je mreža konvergiranog modela.



Slika 5.10: Pozicija 4 diskretizirana s 153732 KE

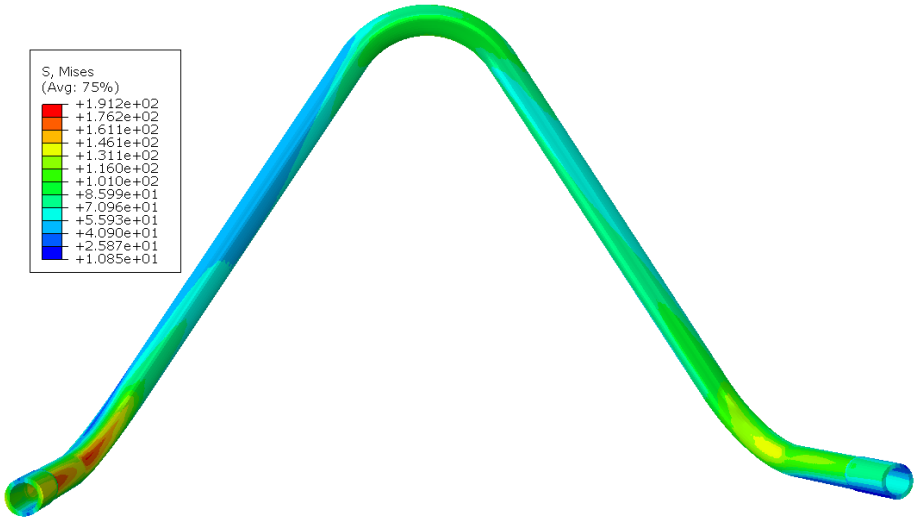
Slika 5.12 prikazuje detalje Von Mises-ovih naprezanja na poziciji 4 za rubne uvjete pomaka iz tablice 5.1 i slike 5.10.



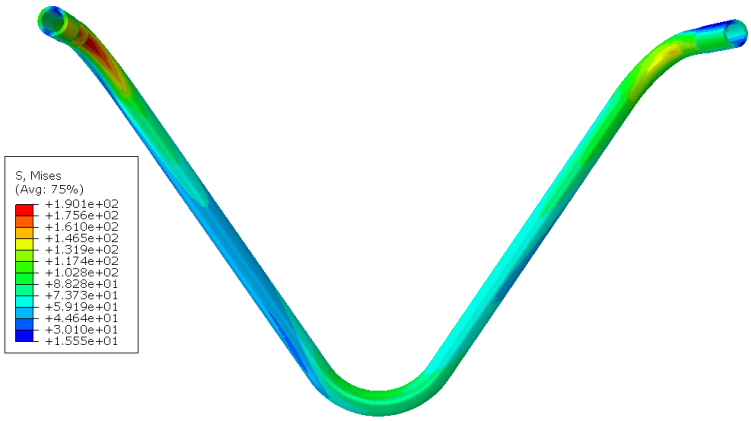
a) gornji dio poz. 4 b) donji dio poz. 4

Slika 5.11: Detalji raspodjele Von Mises-ovih naprezanja za rubne uvjete pomaka

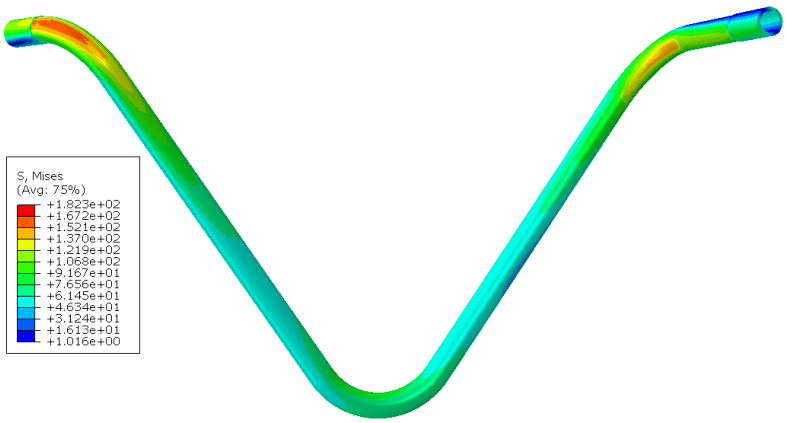
Rezultati sa slike 5.12 poklapaju se iznosom i rasporedom naprezanja po površini cijevi sa slikom 5.6 a), može se zaključiti da je podmodel odgovara modelu iz poglavlja 5.2 te se mogu primjeniti rubni uvjeti i opterećenja sa slike 5.10 b). Tlak p je ravnomjerno raspoređen po unutarnjim stjenkama cijevi tako da djeluje prema van i iznosi 9 MPa (90bara). Napravljena su ukupno 4 modela koja odgovaraju pozicijama od 1 do 4. Rubni uvjeti su preuzeti iz tablice 5.1 za svaku odgovarajuću poziciju dok je tlak jednak u sva četiri slučaja. Rasporedi Von Mises-ovih naprezanja po sve četiri cijevi dani su slikama 5.12-5.15.



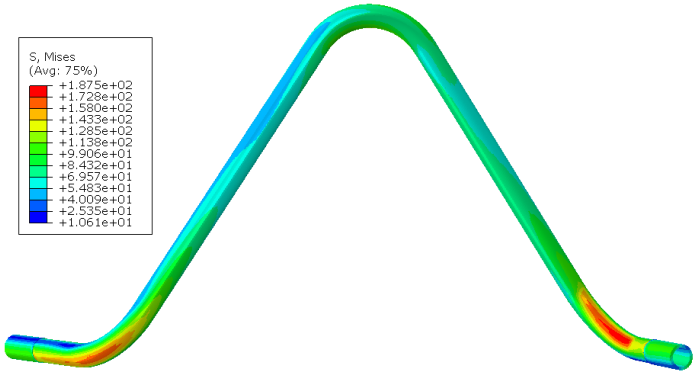
Slika 5.12: Raspodejela Von Mises-ovih naprezanja za poziciju 1



Slika 5.13: Raspodejela Von Mises-ovih naprezanja za poziciju 2



Slika 5.14: Raspodejela Von Mises-ovih naprezanja za poziciju 3



Slika 5.15: Raspodejela Von Mises-ovih naprezanja za poziciju 4

5.4. Numerička rješenja

U poglavlju 5.2 prikazana su rješenja numeričke analize u programskom paketu *Abaqus* za rubne uvjete pomaka konstrukcije prema gore i dolje bez djelovanja unutarnjeg tlaka p. Za razliku od modela u *CATIA*-i ovdje oba modela pokazuju identične rezultate. Globalni maksimum se nalazi na istom mjestu u oba slučaja i to se smatra greškom modeliranja i numeričkog proračuna. Maksimalno naprezanje kreće se u granicama od 190 do 205 MPa u kritičnim dijelovima konstrukcije. Kritični dijelovi su na prijelazu sa deblje na tanju cijev odnosno na mjestu zavara. Tako naprezanje je očekivano jer je pokazano u poglavlju 2.3. da uslijed geometrijskog diskontinuiteta dolazi do koncentracije naprezanja i ono raste povećavanjem broja KE. Zbog težeg očitavanja rezultata iz velikog modela napravljeni su podmodeli za svaku od 4 vrste cijevi koja spaja dvije komore. Nakon obavljene analize uz dodani tlak od 9 MPa (90 bara), naprezanja u spoju cijevi i komore nestaju te se jasnije vide naprezanja na koljenima. Prema rezultatima analize podmodela najveće naprezanje iznosi $191,1$ Mpa i nalazi se na poziciji 1. To rješenje će se smatrati relevantnim jer su druga naprezanja manja i prema tome u prema tablici 4.1. zadovoljavaju uvjet čvrstoće tri čelika na temperaturi od 300 °C.
Razlika između rješenja dobivenih *CATIA*-om od onih u *Abaqus*-u su relativno mala ali rješenje u *Abaqus*-u su na granici jer maksimalno dopušteno naprezanje čelika P295GH pri temperaturi od 300 °C je 192 MPa. Iz ovoga razloga a i iz razloga opisanih u poglavljima 2, 4 i 5 predlaže se korištenje čelika P355GH kojemu je granica razvlačenja 232 MPa na 300 °C.

6 Zaključak

U radu je ukratko opisan način rada vibracijskog ložišta termoenergetskog postrojenja na kruta goriva, opisana su kogeneracijska postrojenja na biomasu te korištene sirovine koje se koriste kao gorivo. Rad se bavi problematikom konstruiranja i formiranja numeričkog proračunskog modela ložišta u dva programska paketa, *CATIA* i *Abaqus*, koji se pomoću MKE pokušava približiti normiranim vrijednostima materijala korištenih u tlačnoj opremi pri povišenim temperaturama. Za oba programska paketa napravljena je analiza i verifikacija korištenih konačnih elemenata i veza na jednostavnim primjerima kojima su poznata analitička rješenja.

Prema dispoziciji ložišta napravljen je 3D model ložišta iz tri dijela u programskom paketu *CATIA* koji je kasnije korišten za analizu i u programskom paketu *Abaqus*. Uklonjeni su svi dijelovi geometrije koji ne utječu na stabilnost konstrukcije a uvelike otežavaju njezino modeliranje. Kako je riječ o izrazito velikom i kompleskom modelu, numerička analiza rađena je na pola modela. Korištenje pola modela onemogućuje frekvencijsku analizu ložišta tako da ona nije bila predmet ovoga rada.

Pri analizi korištene su tri različite kombinacije rubnih uvjeta. Prvi rubni uvjet bio je pomak konstrukcije ložišta prema gore, uzrokovan elektromotorom koji preko HEA profila djeluje u težištu ložišta. Rubni uvjet pomaka postavljen je na donju stranu HEA profila, rubni uvjeti simetrije na polovici modela i rubni uvjet uklješenja na krajevima ravnih debelih cijevi. *CATIA* pokazuje za 3% veće rezultate nego programksi paket *Abaqus* za pomak konstrukcije prema gore.

Za drugu analizu svi su rubni uvjeti, osim rubnog uvjeta pomaka koji sada djeluje u suprotnom smjeru, ostali nepromjenjeni. *Abaqus* pokazuje identična rješenja kao i za pomak prema gore dok se rješenja u *CATIA*-i razlikuju od pomaka konstrukcije prema gore.

Treća kombinacija rubnih uvjeta primijenjena je na podmodelima konstrukcije. S pola modela očitane su vrijednosti pomaka karakterističnih cijevi konstrukcije. Svaka cijev je modelirana na način da joj se centar koncentrirane kružnice na kraju cijevi pomiče za očitane vrijednosti. Uz rubne uvjete pomaka dodan je i unutarnji tlak na svaku ci-

jev. Iako postoje odstupanja u rješenjima između *Abaqusa* i *CATIA*-e oba numerička proračunska modela zadovoljavaju uvjet čvrstoće istih čelika prema normi.
Rješenja koja se dobivaju pomoću MKE metode su približna, iako su proračuni izvršeni na konvergiranim modelima te su oni stabilni, potrebno ih je usporediti s rezultatima mjerenja kad god je to moguće. Poznati toplinski tokovi kroz cijevi bi poboljšali proračun na način da se ne mora pretpostavljati temperatura na cijevima ložišta. Također korištenjem strukturirane mreže povećala bi se brzina izračuna i točnost modela no to zahtjeva puno vremena pripreme geometrije dok automatska nestrukturirana mreža maksimizira vrijeme trajanja simulacije.

Literatura

[1] Balatinec L.: Završni rad FSB Zagreb 2017.

[2] Termoenergetska postrojenja, Skripta s predavanja, FSB Zgagreb 2017.

[3] Kemal H.: Kogeneracijska postrojenja, Elektrotehnički odjel TVZ, Studeni 2010.

[4] Tomašević M.: Diplomski rad, FSB Zagreb 2017.

[5] `http://www.etwoenergy.com/stranice/obnovljiva_energija/biomasa/drvna_sjecka/img/sjecka.jpg`, 20.5.2019.

[6] `https://www.njuskalo.hr/image-bigger/grijanje-hladenje-ostalo/briketi-1.15kn-kg-a2-besplatna-dostava-slika-61312546.jpg`, 20.5.2019.

[7] `http://hamar-promet.hr/images/IMG_1773.JPG`, 20.5.2019.

[8] `http://www.ieegroup.net/images/kotlovnica/03.jpg`, 20.5.2019.

[9] `http://enerpedia.net/index.php?title=ENERGETSKE_TRANSFORMACIJE#Tehnologija_izgaranja_na_re.C5.A1etci`, 18.5.2019.

[10] Dragičević V.: Optimizacija ložišta za izgaranje biomase, Doktorska disertacija, Rijeka 2011.

[11] Programski paket *Abaqus* 6.13-4, Dassault Systemes

[12] Abaqus Analysis User's Guide, Dassault Systemes, 2016.

[13] Programski paket *CATIA-V5R20*, Dassault Systemes

[14] CATIA V5 Structural Analysis for the Designer, MSC.Software Corporation, March 2002.

[15] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.

[16] Tonković Z., Numerička analiza konstrukcija- Podloge za predavanja, FSB Zagreb 2018.

[17] Sorić, J., Metoda konačnih elemenata, Golden marketing-tehnička knjiga, Zagreb, 2004.

[18] Halasz B., Galović A., Boras I., Toplinske tablice, FSB Zagreb, 2017.

[19] Pustaić D., Tonković Z., Wolf H.: Mehanika deformabilnih tijela, Zagreb 2014.

[20] Alfirević, I.: Nauka o čvrstoći I, Tehnička knjiga, Zagreb 1989.

[21] Norma DIN EN 10028-2, 2012.

[22] Norma DIN EN 12952-3, 2012.

[23] Narodne novine 130/2009 3192: Strategija energetskog razvoja Republike Hrvatske, 30.10.2009.

Prilozi

[1] CD-R