

Analiza procesa deformiranja dijelova ispušnog kućišta plinske turbine

Obradović, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

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:235:019700>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-11**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ana Obradović**

Mat. br.: 0067433202

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza procesa deformiranja dijelova ispušnog kućišta plinske turbine**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of Deformation Processes of Gas Turbine Exhaust Housing Parts**

Opis zadatka:

Za dobiveni model geometrije konstrukcije, opterećenje, rubne uvjete i karakteristike materijala potrebno je provesti modeliranje i računalnu simulaciju procesa deformiranja dijelova konstrukcije ispušnog kućišta plinske turbine tvrtke Alstom. Proračun provesti numerički primjenom metode konačnih elemenata. Za proračunski model potrebno je odrediti optimalnu mrežu konačnih elemenata. Prikazati raspodjelu naprezanja i pomaka za različite slučajeve opterećenja te za odabrane slučajeve prikazati konvergenciju rješenja.

Potrebno je izvršiti verifikaciju primijenjenih konačnih elemenata i procedura na jednostavnijim problemima statičke analize. Rezultate tih analiza potrebno je usporediti s pripadnim analitičkim. Potrebni podaci i literatura mogu se dobiti od mentora.

Zadatak rada je zadan u okviru projekta pod nazivom *Gas Turbine Exhaust System Enhanced Design* koji se provodi u suradnji Fakulteta i tvrtke Alstom iz Karlovca. U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:
1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zdenko Tonković

Prof. dr. sc. Igor Balen

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ana Obradović

Zagreb, veljača 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdenko Tonković

Student:

Ana Obradović

Zagreb, veljača 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studiranja i uz pomoć navedene literature.

Završni rad napravljen je u okviru projekta Razvoj i poboljšanje ispušnog sustava plinskih turbina (eng. *Gas Turbine Exhaust System Enhanced Design*), koji se provodi u suradnji Fakulteta strojarstva i brodogradnje i tvrtke Alstom iz Karlovca.

Ovom prilikom bih se želila zahvaliti:

Voditelju rada prof. dr. sc. Zdenku Tonkoviću.

Mentoru rada dr. sc. Ivici Skozritu na stručnim savjetima i pomoći, a pogotovo na strpljivosti i podršci tijekom izrade ovoga rada.

Svojoj obitelji, majci Nadi i ocu Ivanu, sestrama Ivani i Martini, te prijateljima, hvala im što vjeruju u mene.

Najzaslužnijem, dragom Bogu na ovolikoj snazi i volji.

Hvala vam

Ana Obradović

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA.....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY.....	VII
1. UVOD	1
1.1 Plinska turbina	1
1.1.1 Materijali izrade plinskih turbina	2
1.2 Tvrтка Alstom.....	2
1.1.1 Plinska turbina GT26	3
1.1.2 Ispušno kućište plinske turbine	4
2. OPIS I VERIFIKACIJA PRIMJENJENIH KONAČNIH ELEMENATA	7
1.3 Numerički proračun.....	9
1.1.3 Numeričko rješenje pravokutnim 3D konačnim elementima.....	10
2.2.1.1 „Mreža 1“ – 1 konačan element	11
1.1.1.2 „Mreža 2“ – 16 konačnih elemenata	14
1.1.1.3 „Mreža 3“ – 400 konačnih elemenata	16
1.1.4 Ljuskasti elementi	21
3. NUMERIČKA ANALIZA DIJELA KONSTRUKCIJE ISPUŠNOG KUĆIŠTA PLINSKE TURBINE <i>GT26</i>	29
1.4 Numerička analiza modela opterećenog tlakom po pojedinim površinama.....	32
1.5 Numerička analiza modela opterećenog vlakom po pojasu ljuske.....	36
4. ZAKLJUČAK	42
5. LITERATURA.....	43

POPIS SLIKA

Slika 1.1 Plinska turbina GT26 [4].....	3
Slika 1.2 Liner [10]	5
Slika 1.3 Prikaz pukotine dijela kućišta turbine [10]	5
Slika 1.4 Poklopac [10]	6
Slika 1.5 Prikaz linera [10].....	6
Slika 2.1 Pravokutna ploča opterećena tlakom p [11].....	7
Slika 2.2 Numerički model pravokutne ploče [11]	8
Slika 2.3 C3D8 konačni element [8]	10
Slika 2.4 Rubni uvjeti simetrije i prikaz opterećenja 1/ 4 pravokutne ploče	11
Slika 2.5 Ploča diskretizirana jednim konačnim elementom	11
Slika 2.6 Von Mises naprezanja za jedan konačan element.....	12
Slika 2.7 Raspodjela pomaka u smjeru osi x za jedan konačan element.....	12
Slika 2.8 Raspodjela pomaka u smjeru osi y za jedan konačan element	13
Slika 2.9 Raspodjela pomaka u smjeru osi z za jedan konačan element	13
Slika 2.10 Numerički model ploče diskretiziran sa 16 konačnih elemenata.....	14
Slika 2.11 Von Mises naprezanja za mrežu od 16 konačnih elemenata.....	14
Slika 2.12 Raspodjela pomaka u smjeru osi x za mrežu od 16 konačnih elemenata.....	15
Slika 2.13 Raspodjela pomaka u smjeru osi y za mrežu od 16 konačnih elemenata.....	15
Slika 2.14 Raspodjela pomaka u smjeru osi z za mrežu od 16 konačnih elemenata.....	16
Slika 2.15 Numerički model ploče diskretiziran sa 400 C3D8 konačnih elemenata	16
Slika 2.16 Von Mises naprezanja za 400 konačnih elemenata.....	17
Slika 2.17 Raspodjela pomaka u smjeru osi x za mrežu od 400 C3D8 konačnih elemenata ...	17
Slika 2.18 Raspodjela pomaka u smjeru osi y za mrežu od 400 C3D8 konačnih elemenata ...	18
Slika 2.19 Raspodjela pomaka u smjeru osi z za mrežu od 400 C3D8 konačnih elemenata ...	18
Slika 2.20 Konvergencija Von Mises naprezanja	19
Slika 2.21 Konvergencija pomaka u smjeru osi x	19
Slika 2.22 Konvergencija pomaka u smjeru osi y	20
Slika 2.23 Konvergencija u smjeru osi z	20
Slika 2.24 Točke integracije za S4 konačni element [8]	21
Slika 2.25 Numerički model ploče diskretiziran sa jednim S4 konačnim elementom.....	21
Slika 2.26 Von Mises naprezanja za 1 konačan element	22
Slika 2.27 Raspodjela pomaka u smjeru osi x za 1 S4 konačan element	22
Slika 2.28 Raspodjela pomaka u smjeru osi y za 1 S4 konačan element	23
Slika 2.29 Numerički model ploče diskretiziran sa 16 S4 konačnih elemenata.....	23
Slika 2.30 Von Mises naprezanja za 16 konačnih elemenata.....	24
Slika 2.31 Raspodjela pomaka u smjeru osi x za 16 S4 konačnih elemenata	24
Slika 2.32 Raspodjela pomaka u smjeru osi y za 16 S4 konačnih elemenata	25
Slika 2.33 Numerički model ploče diskretiziran sa 400 S4 konačnih elemenata	25
Slika 2.34 Von Mises naprezanja za 400 konačnih elemenata.....	26
Slika 2.35 Raspodjela pomaka u smjeru osi x za 400 S4 konačnih elemenata	26

Slika 2.36 Raspodjela pomaka u smjeru osi y za 400 S4 konačnih elemenata	27
Slika 2.37 Konvergencija Von Mises naprezanja	28
Slika 2.38 Konvergencija pomaka u smjeru osi x	28
Slika 2.39 Konvergencija pomaka u smjeru osi y	28
Slika 3.1 Dio konstrukcije ispušnog kućišta plinske turbine <i>GT26</i> [10].....	29
Slika 3.2 Preddeformacija linera [10]	29
Slika 3.3 Proračunski model [10].....	30
Slika 3.4 Prikaz uvjeta simetrije za proračunski model	31
Slika 3.5 Mreža proračunskog modela ispušnog kućišta plinske turbine.....	32
Slika 3.6 Gornja ljuska sa zadanim tlakom po pojedinim površinama na mjestima pretpostavljenih pomaka	32
Slika 3.7 Proračunski model opterećen tlakovima $p= 1$ MPa i $p= 1$ MPa	33
Slika 3.8 Vrijednosti pomaka $U3$ za tlakove zadane po pojedinim površinama.....	34
Slika 3.9 Vrijednosti pomaka $U1$ za tlakove zadane po pojedinim površinama.....	34
Slika 3.10 Vrijednosti pomaka $U1$ za tlakove zadane po pojedinim površinama.....	35
Slika 3.11 Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema Von Misesu za proračunski model ...	35
Slika 3.12 Raspodjela tlaka duž pojasa ljuske zadanog preko jednadžbe pravca kroz jednu točku	36
Slika 3.13 Raspodjela pomaka $U3$ duž pojasa ljuske zadanog preko jednadžbe pravca kroz jednu točku	37
Slika 3.14 Raspodjela opterećenja duž pojasa ljuske	38
Slika 3.15 Raspodjela pomaka $U3$ za tlak zadan po pojasu ljuske	38
Slika 3.16 Raspodjela pomaka $U1$ za tlak zadan po pojasu ljuske	39
Slika 3.17 Raspodjela pomaka $U2$ za tlak zadan po pojasu ljuske	39
Slika 3.18 Raspodjela naprezanja po Von Misesu za proračunski model.....	40
Slika 3.19 Mreža dva.....	40
Slika 3.20 Konvergencija Von Mises naprezanja	41
Slika 3.21 Konvergencija pomaka $U1$	41

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehničke specifikacije plinske turbine *GT26*.....9

POPIS OZNAKA*Latinične oznake*

Oznaka	Jedinica	Opis
d	mm	debljina
E	MPa	Youngov modul elastičnosti
H	mm	visina
L	mm	duljina
p	MPa	tlak
u_x	mm	pomak u smjeru osi x
u_y	mm	pomak u smjeru osi y
U_1	mm	pomak u smjeru osi x
U_2	mm	pomak u smjeru osi y
U_3	mm	pomak u smjeru osi z

Grčke oznake

Oznaka	Jedinica	Opis
ε_x	–	deformacija u smjeru osi x
ε_y	–	deformacija u smjeru osi y
ν	–	Poissonov faktor
σ_x	MPa	naprezanje u smjeru osi x
σ_y	MPa	naprezanje u smjeru osi y

SAŽETAK

U ovome radu, u okviru projekta pod nazivom Razvoj i poboljšanje ispušnog sustava plinskih turbina (eng. *Gas Turbine Exhaust System Enhanced Design*), koji se provodi u suradnji Fakulteta strojarstva i brodogradnje i tvrtke Alstom iz Karlovca izrađen je proračun kućišta plinske turbine *GT26* čije su glavne karakteristike veći stupanj iskoristivosti pri manjem opterećenju okoliša ispušnim plinovima. Za dobiveni model provedeno je modeliranje i računalna simulacija procesa deformiranja dijelova konstrukcije ispušnog kućišta plinske turbine tvrtke Alstom.

Proračun je najprije vršen za jednostavniju konstrukciju (pravokutna ploča) analitički, te numerički u programskom paketu *Abaqus/Standard*. Izvršena je verifikacija konačnih elemenata pomoću pravokutnih 3D konačnih elemenata, te potom i ljuskastih konačnih elemenata.

Nakon toga je izvršena numerička analiza kućišta plinske turbine *GT26* također u *Abaqus/Standard* paketu. Zbog uvjeta simetrije analizirat će se jedna desetina linera. Da bi se postiglo bolje pozicioniranje linera prije zavarivanja i da bi se nakon zavarivanja dobila što bolja cilindričnost ljuske dolazi do deformiranja ljuske. To deformiranje uzrokuje nastanak zaostalih naprezanja zbog kojih dolazi do prednapinjanja ljuske, tj. preddeformacije prije zavarivanja. Izmjereni pomaci nastali nakon preddeformacije dobiveni su od tvrtke Alstom, na temelju kojih su u ovom radu zadana opterećenja na ljusci. Opterećenja su najprije pretpostavljena tlakom po pojedinim površinama, a zatim tlakom po pojasu ljuske, tj. po duljini ljuske u cirkularnom smjeru.

Ključne riječi: ispušno kućište, metoda konačnih elemenata, zaostala naprezanja, Abaqus

SUMMARY

In this paper work, within the project named *Gas Turbine Exhaust System Enchased Design*, which is carried out in cooperation Faculty of Mechanical Engineering and Naval Arhitecture and Alstom company from Karlovac, it is given a calculation of gas turbine *GT26* casing, whose main characteristics are a higher degree of efficiency at partial load enviroment with exhaust gases. For given model was carried out modeling and computer simulation of deformation processes of construction parts of gas turbine case made by Alstom company.

Calculation was first carried out for a simple construction (rectangular plate) analytical and then numerically in the softwer package *Abaqus/Standard*. There was made a verification of finite elements using 3D rectangular finite elements and then using shell finite elements.

Following numerical analysis of the gas turbine *GT26* casing was also carried out in softwer package *Abaqus/Standard*. Because of the symmetry conditions, there was analyzed only tenth liner. To achieve a better positioning of the liner before welding and to obtain the best possible cylindricity of shell after welding, shell comes to its deformation. This deformation causes the formation of residual stresses which occur due to prestressing shell, which means predeformation before welding. The measured displacements which occur after predeforming were obtained from Alstom company. On the basis of those displacements work load by shell were given. Loads were first given on the surfaces of a shell and then by her length in the circular direction.

Key words: exhaust housing, finite element method, residual stresses, Abaqus

1. UVOD

Turbine, čiji naziv potječe od latinske riječi *turbo* (vrtlog) su mehanički strojevi koji izdvajaju energiju toka fluida te je pretvaraju u kinetičku energiju, a potom kinetičku u mehanički rad uslijed rotacije rotora. Najjednostavnije turbine imaju jedan pomični dio; rotor sa lopaticama. Protok tekućine djeluje na lopatice tako da se okreću i daju energiju rotacije na rotor. Plinske, parne i vodene turbine obično imaju kućište oko lopatica koje sadrži i kontrolira radnu tvar. Rotor svojim okretanjem pokreće stroj, najčešće generator (iako može biti riječ o kompresoru ili pumpi), koji pretvara mehanički rad u električnu energiju. Za rad turbine potreban je također i toplinski izvor uslijed kojega se dobiva toplina iz kemijske energije goriva koja se predaje radnom mediju (vodi ili plinovima) te toplinski ponor, poput kondenzatora, kojemu se predaje toplina koja se nije pretvorila u mehanički rad. [1]

1.1 Plinska turbina

Plinska turbina je rotacijski stroj koji pretvara energiju radnog medija u koristan rad. Na ulazu plinske turbine nalaze se kompresor, koji povećava tlak ulaznih plinova te im smanjuje obujam i komore za izgaranje i turbine, gdje se vrući plin usmjerava preko statorskih lopatica na turbinske lopatice te ih okreće. Radni medij u plinskim turbinama je smjesa plinova dobivenih kompresijom pri visokom tlaku i izgaranjem goriva u komori za izgaranje ili samostalni plin poput zraka, vodika, helija ili drugih. Radni princip plinskih turbina veoma je sličan poput onih u parnim turbinama. Radni medij ekspandira duž puta strujanja, tako da se toplina pretvara u kinetičku energiju plina, a ona se nakon toga u rotoru pretvara u mehanički rad. Iako je radni princip ovih turbina sličan, zbog različitih svojstava njihovih medija, sheme plinsko turbinskih postrojenja značajno se razlikuju od onih za parna postrojenja. Postrojenja plinskih turbina imaju određene prednosti u usporedbi s parnim turbinama, primjerice:

- plinske turbine su mnogo kompaktnije, obzirom da gorivo izgara u komori za izgaranje, a ne u generatoru pare te plinska turbina nema kondenzatora što u konačnici znači da su mnogo lakše i manje (manji utrošak materijala),
- plinske turbine možemo vrlo brzo startati i opteretiti u roku od 30 s do 30 minuta,
- manja cijena,
- nema potrebe za rashladnom vodom,
- jednostavnija konstrukcija i lakše održavanje.

Iako imaju dosta prednosti, plinske turbine imaju i nedostatke u usporedbi s parnim turbinama:

- manja specifična snaga,
- česta potreba za servisiranjem i održavanjem,
- manji stupanj djelovanja,
- velika osjetljivost na kvalitetu goriva.

Plinske turbine nalaze sve širu primjenu u energetici. Zbog njihovih povoljnih karakteristika, plinske turbine koriste se kao bazne jedinice u malim elektranama, s time da se otpadna toplina ispušnih plinova koristi za potrebe napajanja toplinom. Također, obzirom na svoju malu masu, male dimenzije, visoku mobilnost i lako održavanje, plinske turbine se koriste u izvedbi pokretnih elektrana koje prevoze teretna vozila ili željeznica [2].

1.1.1 *Materijali izrade plinskih turbina*

Dijelovi plinskih turbina izloženi su temperaturama od 20 do 750°C ili više, pod utjecajem visokih mehaničkih naprezanja, korozije te erozijom lopatica i drugih dijelova. Glavni dijelovi turbine su izrađeni od čelika, sivog lijeva te legura neželjeznih materijala. Dijelovi turbine izrađeni iz sivoga lijeva mogu raditi na temperaturama do 250-300°C. Kvalitetni ugljični čelici pogodni su za rad na temperaturama do 400-450°C. Kućišta turbina i kućišta ležaja su lijevani iz ugljičnih čelika. Legirani čelici se koriste za izradu lopatica turbina, rotora, diskova i drugih dijelova koji rade na povišenim temperaturama. Za visoke temperature (550-600°C), uobičajena je primjena modificiranih nehrđajućih čelika s martenzitnom strukturom s visokim sadržajem kroma (do 12%) i dodacima molibdena, volframa, vanadija, niobija ili titana. Oni imaju višu vatrootpornost i otpornost na stvaranje naslaga u usporedbi s perlitnim čelicima. Materijali koji se koriste za rad na temperaturama 650-700°C obuhvaćaju austenitne čelike koji imaju visoku otpornost na stvaranje naslaga i na puzanje te visoku otpornost na toplinu [3].

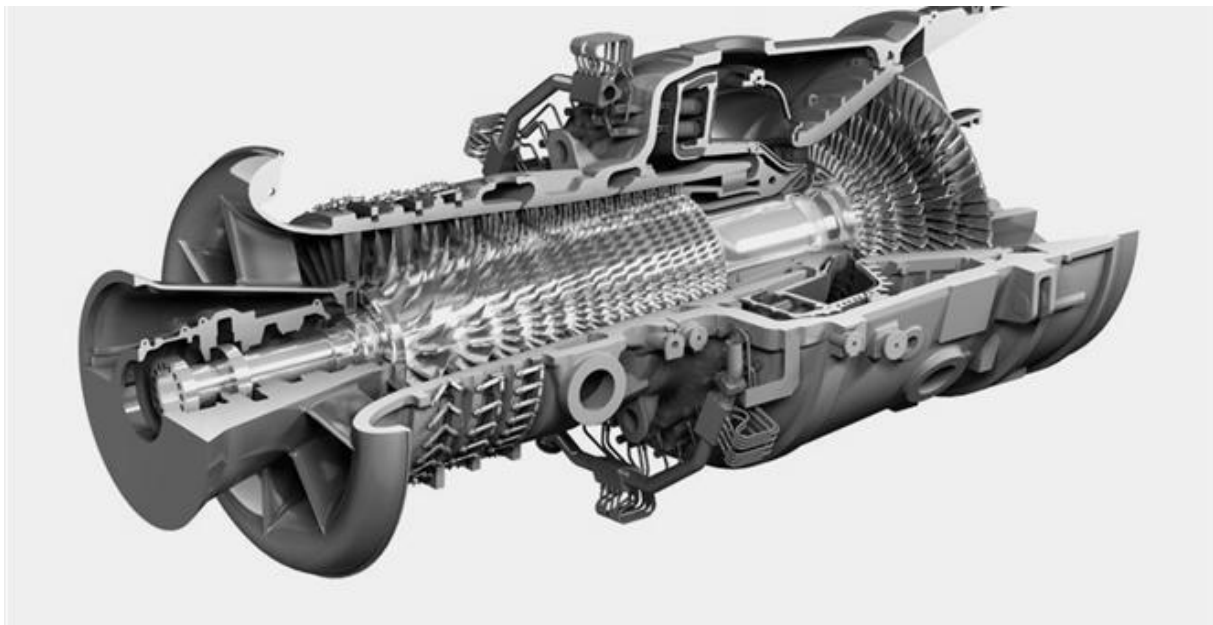
1.2 **Tvrtka Alstom**

Tvrtka Alstom vodeća je svjetska organizacija u području proizvodnje električne energije, prijenosu energije i željezničke infrastrukture. Njihov naglasak temelji se na inovativnim i ekološki prihvatljivim tehnologijama za proizvodnju električne energije iz raznih izvora energije, poput vode, plina, ugljena, vjetra. Njihovo zastupništvo u Republici Hrvatskoj datira još od 1949. godine kada su započeli sa proizvodnjom parnih turbina u Karlovcu.

Neki od trenutnih projekata Alstoma u Hrvatskoj su razvoj novih strukturnih komponenti plinskih turbina, razvoj cjevovoda i zračnih sustava plinskih turbina elektrana, modeliranje i simulacija procesa i sustava parnih turbina, standardizacija tehničke dokumentacije plinskih turbina, razvoj instrumenata i kontrole sustava toplinskih blokova plinskih turbina, izmjene na željezničkoj infrastrukturi te brojni drugi. Među istaknutim partnerima tvrtke Alstom, nalazi se i Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. Suradnjom ovih dviju strana izmjenjuje se iskustvo i znanje u rješavanju inženjerskih problema, tako se i ovaj rad temelji na tekućem projektu Razvoj i poboljšanje ispušnog sustava plinskih turbina (eng. *Gas Turbine Exhaust System Enhanced Design*).

1.1.1 Plinska turbina GT26

Plinska turbina GT26 (Slika 1.1) tvrtke Alstom sjedinjuje inovativnu konstrukciju unutarnjeg izgaranja u dvije komore za izgaranje i zavareni rotor.



Slika 1.1 Plinska turbina GT26 [4]

GT26 temelji se na povećanju efikasnosti izgaranja bez povećanja emisije ispušnih plinova u okoliš. Ubrizgavanjem goriva u dvije komore za izgaranje u nizu moguće je povećati proizvodnju i učinkovitost ciklusa bez značajnog povećanja emisije plinova, obzirom da se temperature u prvoj komori mogu držati relativno nisko, dok druga komora ne doprinosi značajnoj emisiji, i to pri punim i djelomičnim opterećenjima. Ovakva izvedba s dvije komore osigurava konstantni protok vrućeg plina pri jednolikim temperaturama što doprinosi smanjenju emisije plinova. GT26 također karakterizira jednostavnija, kvalitetnija konstrukcija te lakše održavanje. Zavareni rotor plinske turbine GT26 smanjuje mogućnost pucanja istog

pri naprezanjima te eliminira izmjene diska tijekom radnog vijeka rotora. Ovakav način izgaranja u dvije komore omogućava izuzetno veliku snagu uz istovremeno smanjivanje dimenzija lopatica plinske turbine [4]. U tablici 1. prikazane su tehničke specifikacije plinske turbine *GT26*.

Tablica 1. Tehničke specifikacije plinske turbine *GT26* [5]

Plinska turbina <i>GT26</i>	
Radna tvar	Prirodni plin
Frekvencija	50 Hz
Okretna brzina	3000 o/min
Izlazna snaga el. Energije	345,0 MW
Učinkovitost	41%
Količina topline	8780 kJ/kWh
Emisija ispušnih plinova	715 kg/s
Temperatura ispušnih plinova	616°C
Težina	406 t
Dimenzije (DxŠxV)	12,0x4,9x5 m

1.1.2 *Ispušno kućište plinske turbine*

Ispušno kućište plinske turbine je sastavljeno od nosive konstrukcije, izolacije i tzv. *linera*. Liner se sastoji od unutarnje i vanjske cilindrične ljuske unutar kojih se zavaruju rebra. Između rebra, temperaturom 616°C, te protokom 715 kg/s, struje ispušni plinovi, što je prikazano u tablici tehničkih specifikacija plinske turbine *GT26* (Tablica 1.). Liner je prikazan na Slika 1.2.



Slika 1.2 Liner [10]

Zbog uvođenja isprekidanog ciklusa rada turbine, koje se uvodi, najčešće zbog zamjene solarnom energijom preko dana, na kućištu turbine su se počele pojavljivati pukotine (Slika 1.3).

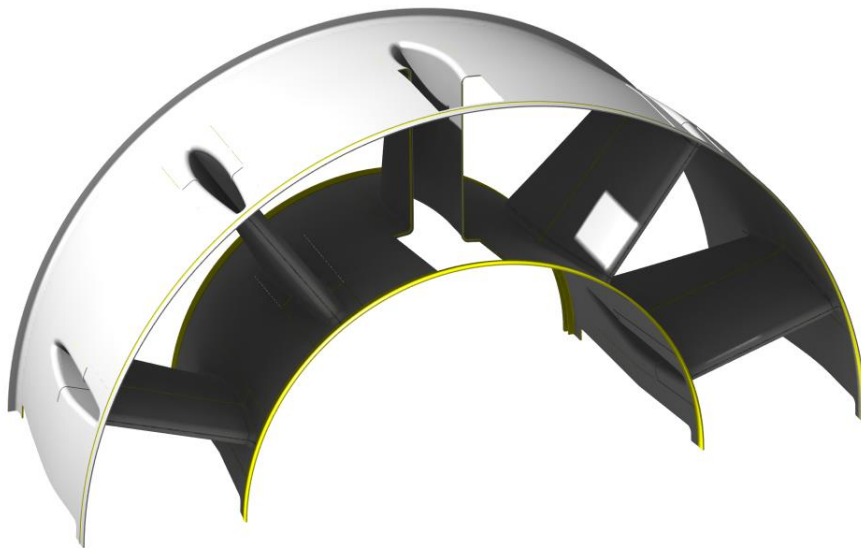


Slika 1.3 Prikaz pukotine dijela kućišta turbine [10]

Postupak izrade linera se izvodi tako da se dio rebra zavari za unutarnju i vanjsku ljusku, te se provede toplinska obrada za smanjenje zaostalih napreznja. Potom se taj dio linera montira na nosivu konstrukciju, uz deformiranje da se postigne cilindričnost unutarnje i vanjske ljuske i što bolje poklapanje tj. lakše zavarivanje. Nakon montaže linera dolazi zavarivanje poklopaca, te je konstrukcija završena. Na slici 1.4 i 1.5 su prikazani poklopac i liner.



Slika 1.4 Poklopac [10]

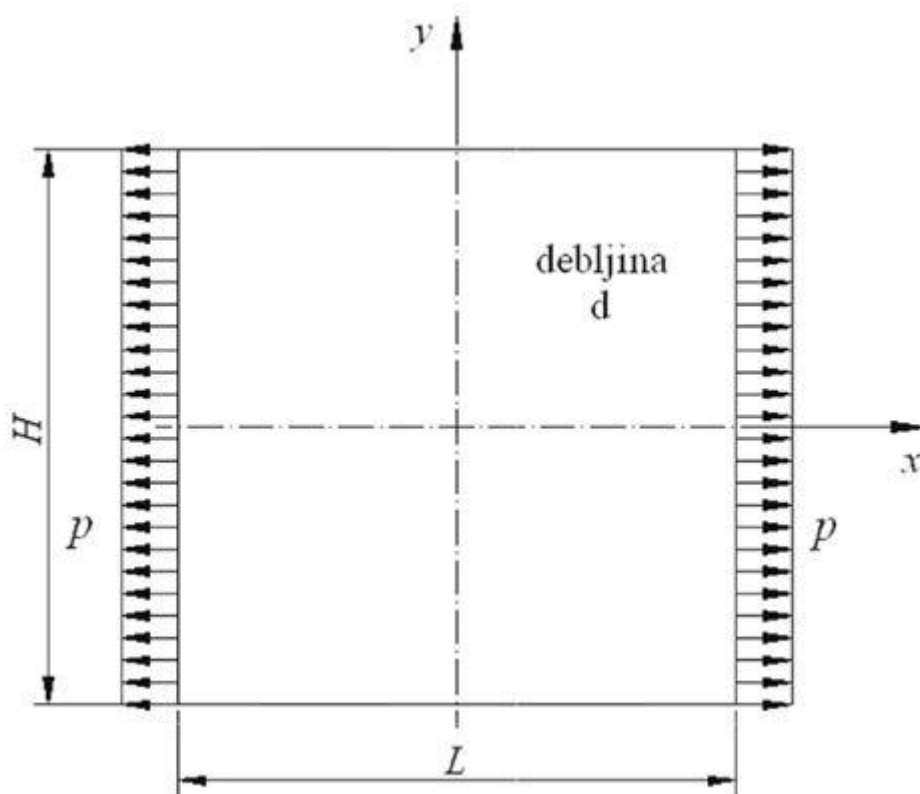


Slika 1.5 Prikaz linera [10]

Zbog spomenutog načina montiranja i deformiranja koje se izvodi prije zavarivanja, pretpostavlja se da se javljaju zaostala napreznja koja uzrokuju pukotine.

2. OPIS I VERIFIKACIJA PRIMJENJENIH KONAČNIH ELEMENATA

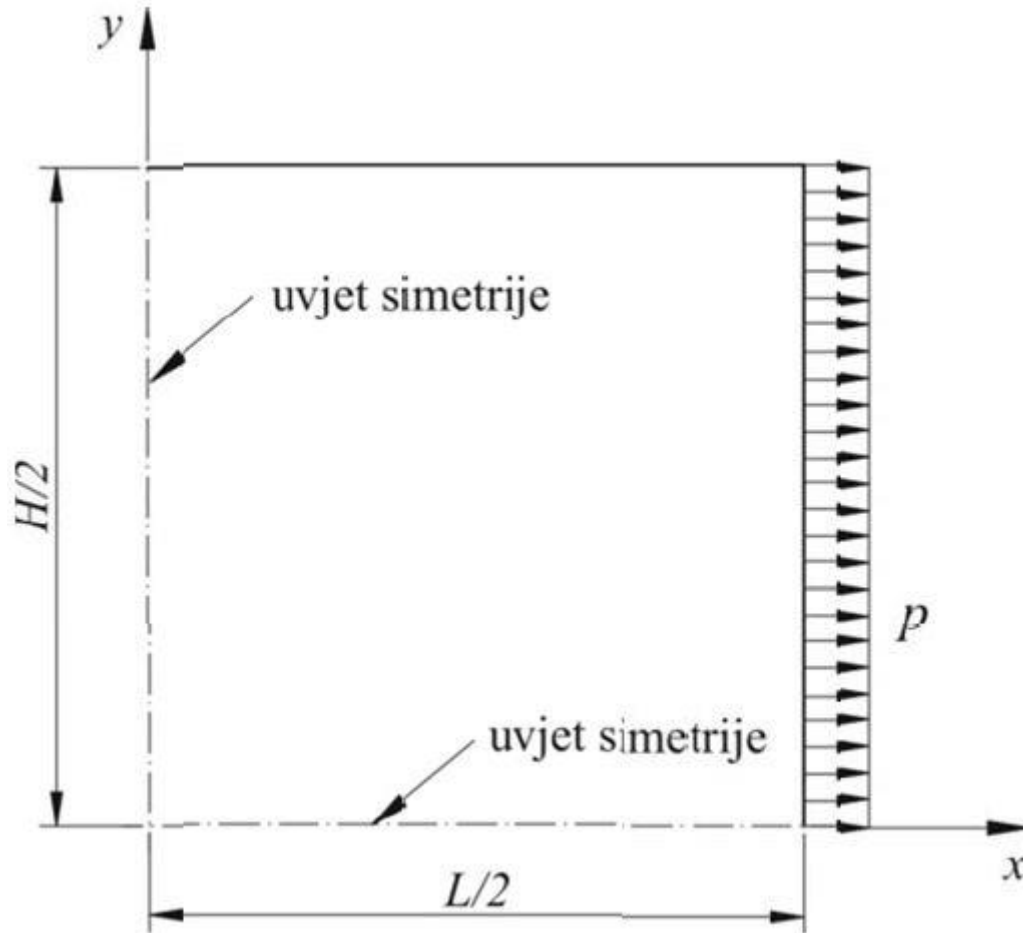
Modeliranju i računalnoj simulaciji procesa deformiranja dijela konstrukcije plinske turbine GT26 prethodi analiza jednostavnijeg modela – pravokutne ploče, kako bi smo usporedili analitičko rješenje s numeričkim te verificirali daje li numerička analiza, izrađena u programskom paketu *ABAQUS/Standard*, s odabranim elementima (pravokutni 3D i ljuskasti konačni elementi) zadovoljavajuće rezultate.



Slika 2.1 Pravokutna ploča opterećena tlakom p [11]

2.1 Analitički proračun

Za ploču zadanu i opterećenu prema Slika 2.1 potrebno je odrediti pomake u_x i u_y . Zadani su podaci: $p = 150$ MPa, $L = 200$ mm, $H = 200$ mm, $d = 1$ mm, $E = 200$ GPa, $\nu = 0,3$. Zbog dvostrukog uvjeta simetrije problem se može svesti na proračunavanje jedne četvrtine ploče. Na Slika 2.2 prikazan je numerički model na kojem se vrši daljnja analiza.



Slika 2.2 Numerički model pravokutne ploče [11]

Problem se rješava analitički prema *Nauci o čvrstoći* [7].

Vrijednosti naprezanja u smjeru osi x i y iznose:

$$\sigma_x = 150 \text{ MPa}, \quad (2.1)$$

$$\sigma_y = 0 \text{ MPa}. \quad (2.2)$$

Hookeov zakon za ravninsko stanje naprezanja ima oblik:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu \cdot \sigma_y), \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu \cdot \sigma_x). \quad (2.4)$$

Iz izraza (2.3) i (2.4) slijede vrijednosti deformacija u smjeru osi x i y :

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} = 0,00075, \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_y = -\frac{\nu \cdot \sigma_x}{E} = -0,000225. \quad (2.6)$$

Iz izraza za produljenje [7] dobivamo pomake u smjeru osi x :

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta L / 2}{L / 2} = \frac{u_x}{L / 2}. \quad (2.7)$$

Iz (2.7) slijedi vrijednost pomaka u smjeru osi x :

$$u_x = \varepsilon_x \cdot \frac{L}{2} = 0,075 \text{ mm}. \quad (2.8)$$

Iz izraza za produljenje [7] dobivamo pomake u smjeru osi y :

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta H / 2}{H / 2} = \frac{u_y}{H / 2} \quad (2.9)$$

Iz (2.9) slijedi vrijednost pomaka u smjeru osi x :

$$u_y = \varepsilon_y \cdot \frac{H}{2} = -0,0225 \text{ mm}. \quad (2.10)$$

1.3 Numerički proračun

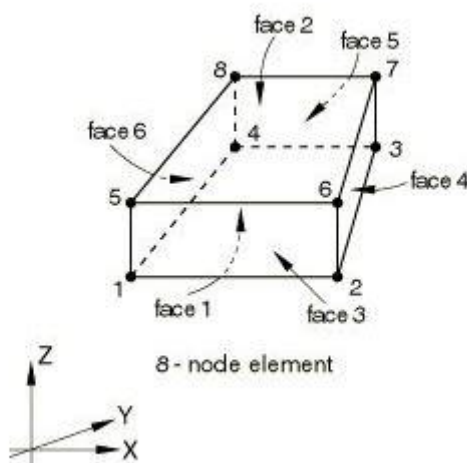
Programski paket *ABAQUS* [9] bazira se na metodi konačnih elemenata, a primjenjuje se pri numeričkom rješavanju inženjerskih problema poput toplinskih naprezanja, analize pomaka i deformacija te aerodinamičkih problema kod konstrukcija izrađenih od različitih materijala. *ABAQUS* se sastoji od dva osnovna proizvoda: *ABAQUS/Standard* i *ABAQUS/Explicit*. *ABAQUS/Standard* služi za analizu opće namjene linearnih i nelinearnih problema te je korišten za izradu ovog rada. *ABAQUS/Explicit* služi za analize posebne namjene s posebnom formulacijom konačnih elemenata, npr. za analizu kratkih tranzijentnih pojava. *ABAQUS/CAE* je interaktivno grafičko sučelje koje služi za kreiranje modela. Modeliranje započinje kreiranjem geometrije (ili importiranjem iste iz nekog drugog programskog paketa). Potom slijedi definiranje i pridruživanje materijalnih svojstava analizirane geometrije. Sljedeći je korak kreiranje geometrijskih rubnih uvjeta (ograničavanje slobode pomicanja modela i neželjenih pomaka), te zadavanje opterećenja pod kojima se konstrukcija nalazi. Nakon definiranja materijalnih svojstava, definiranja rubnih uvjeta i opterećenja, slijedi izrada mreže konačnih elemenata. Odabire se optimalni broj konačnih elemenata te tip elemenata te se potom vrši analiza iz koje se dobivaju potrebni podaci. U programskom paketu *ABAQUS*

nalaze se razni tipovi elemenata čija svojstva je potrebno poznavati kako bi se pravilno odabrala mreža konačnih elemenata koja će u što kraćem vremenu dati što točnija rješenja. U daljnjoj analizi izvest će se numerički proračun ploče opterećene tlakom iznosa 150 MPa, s istim opterećenjima, rubnim uvjetima i dimenzijama, ali će se pri tome mijenjati vrsta konačnih elemenata i njihova gustoća. Konačni elementi mogu se podijeliti prema:

- tipu elementa – štapni, gredni, pravokutni, ljuskasti, itd.,
- broju čvorova - prema obliku elementa, prema redu interpolacijske funkcije elementa (prvog i drugog reda),
- stupnjevima slobode – pomak, rotacija,
- vrsti integracije – potpuna ili reducirana.

1.1.3 Numeričko rješenje pravokutnim 3D konačnim elementima

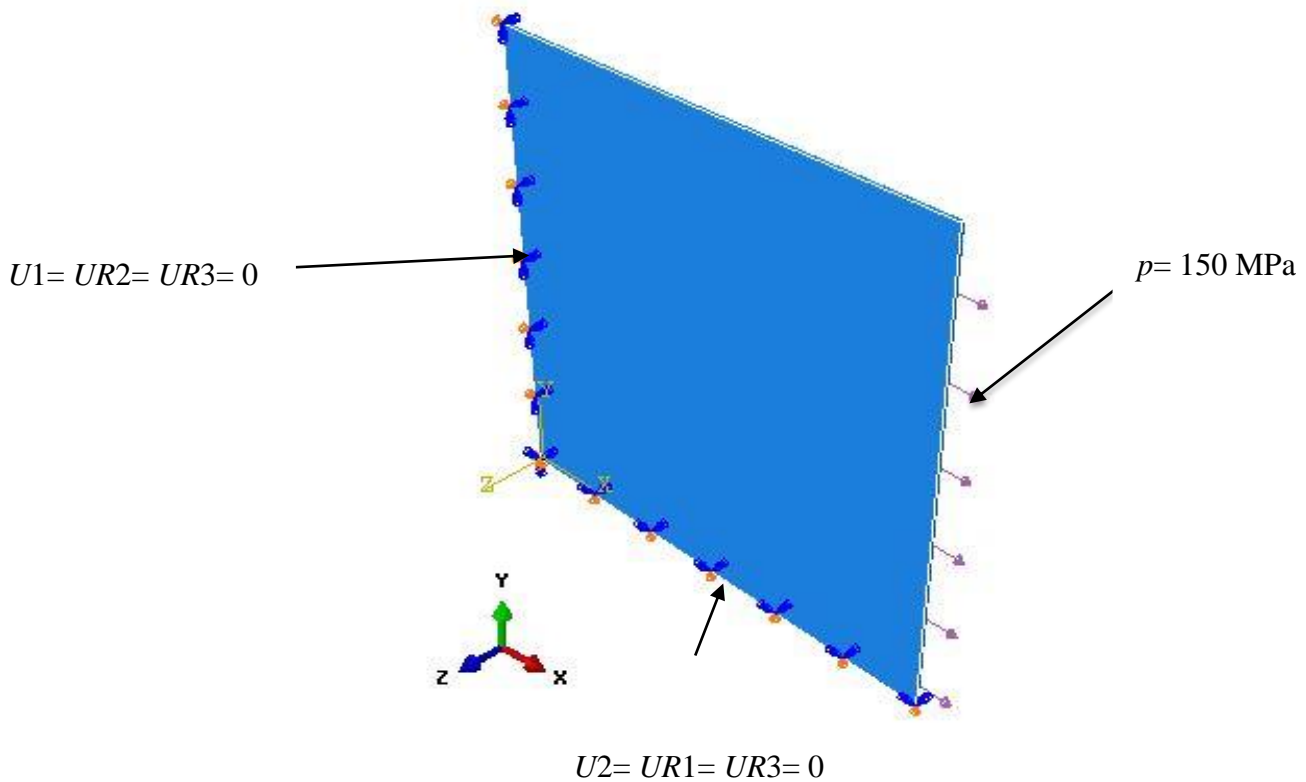
Za numeričku analizu prizmatičnim elementima odabrani su C3D8 konačni elementi. To su trodimenzijski prizmatični elementi s osam čvorova, koji opisuju linearnu raspodjelu deformacija i naprezanja, dok im je polje pomaka opisano polinomom trećeg stupnja. Element C3D8 ima dvadeset i četiri stupnja slobode; pomak u smjeru osi x , y i z u svakome čvoru. Na Sliku 2.2 je C3D8 konačni element koji je korišten u analizi koja slijedi.



Slika 2.3 C3D8 konačni element [8]

U analizi koja slijedi prikazani su rezultati naprezanja (*Von Mises*) i deformiranja dobiveni za mreže različitih gustoća; jednog konačnog elementa, šesnaest elemenata te četiristotine elemenata te njihova konvergencija.

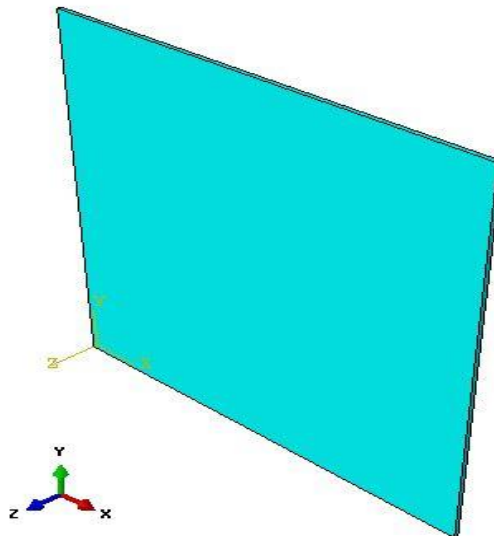
Postavljeni su rubni uvjeti simetrije oko x i oko y osi prema slici 2.4.



Slika 2.4 Rubni uvjeti simetrije i prikaz opterećenja 1/4 pravokutne ploče

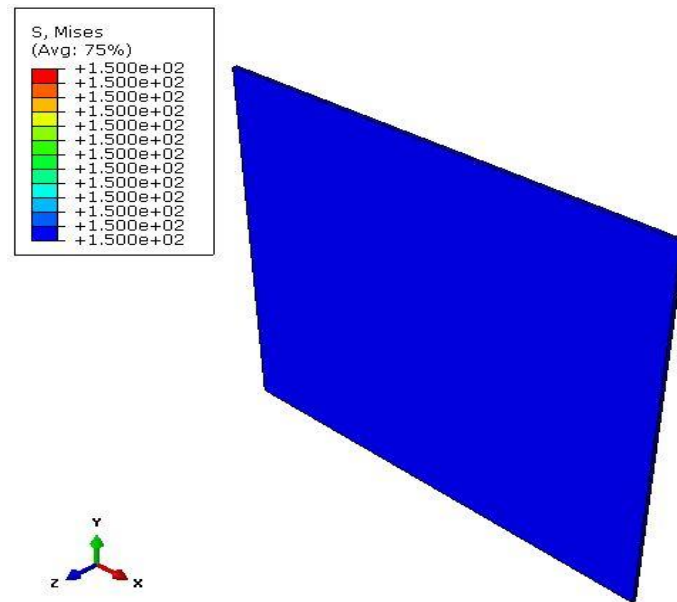
2.2.1.1 „Mreža 1“ – 1 konačan element

Slika 2.5 prikazuje numerički model ploče opterećene tlakom $p = 150 \text{ MPa}$ diskretiziranu jednim C3D8 konačnim elementom.



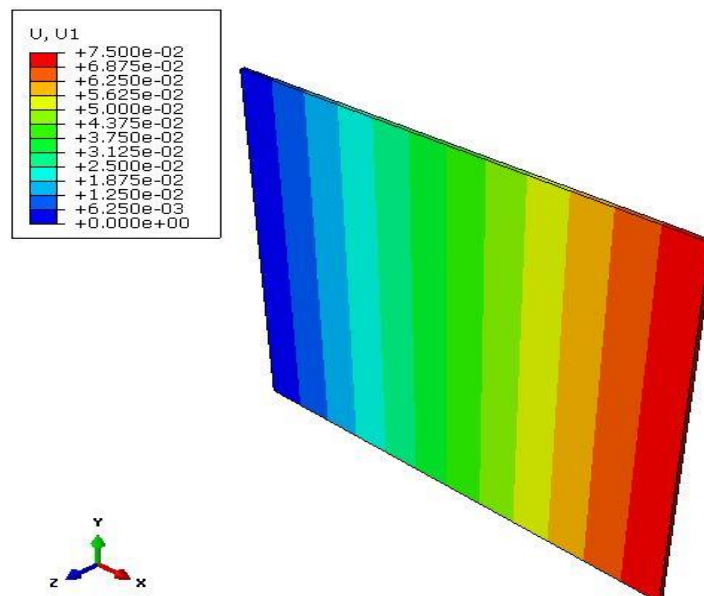
Slika 2.5 Ploča diskretizirana jednim konačnim elementom

Na Sliku 2.6 prikazana je raspodjela naprezanja po Von Misesu na deformiranom modelu diskretiziranom C3D8 konačnim elementima. Prikazana su naprezanja za gustoću mreže od jednog C3D8 elementa.



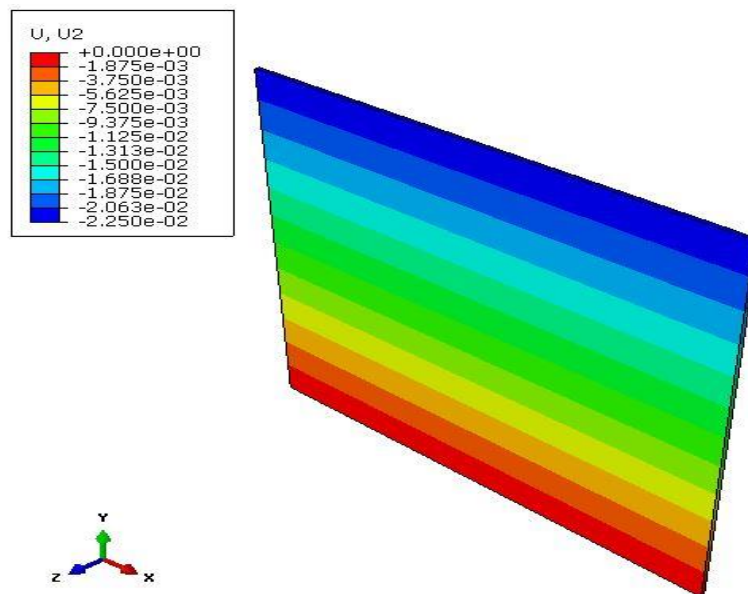
Slika 2.6 Von Mises naprezanja za jedan konačan element

Slika 2.7 prikazuje raspodjelu pomaka U_1 u smjeru osi x , koji su dobiveni diskretizacijom C3D8 konačnim elementima za jedan konačni element.



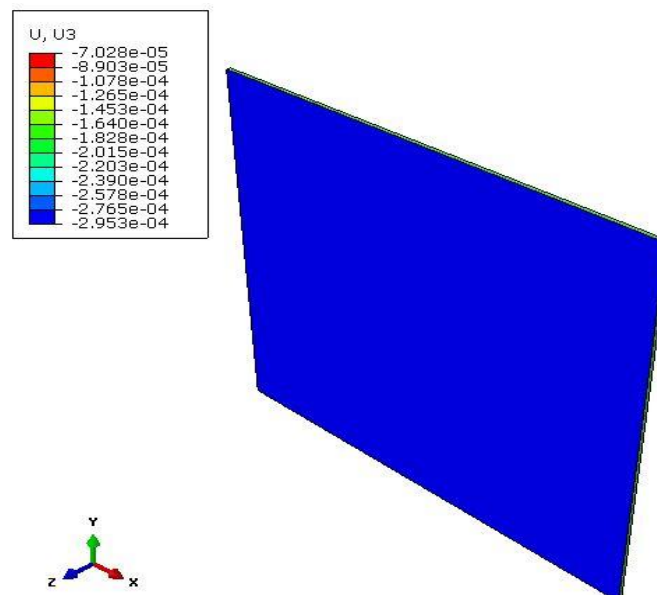
Slika 2.7 Raspodjela pomaka u smjeru osi x za jedan konačan element

Na Slika 2.8 prikazana je raspodjela pomaka numeričkog modela ploče u smjeru osi y diskretizirane jednim C3D8 konačnim elementom i opterećene tlakom $p=150$ MPa.



Slika 2.8 Raspodjela pomaka u smjeru osi y za jedan konačan element

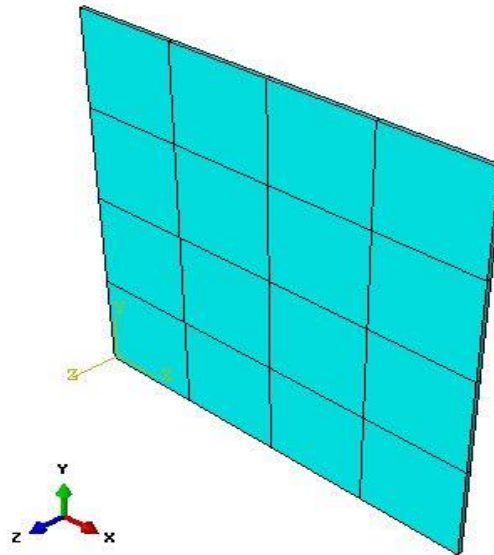
Raspodjelu pomaka na deformiranom modelu diskretiziranom sa C3D8 konačnim elementom u smjeru osi z prikazuje Slika 2.9. Prikazani su pomaci za gustoću mreže od jednog C3D8 elementa.



Slika 2.9 Raspodjela pomaka u smjeru osi z za jedan konačan element

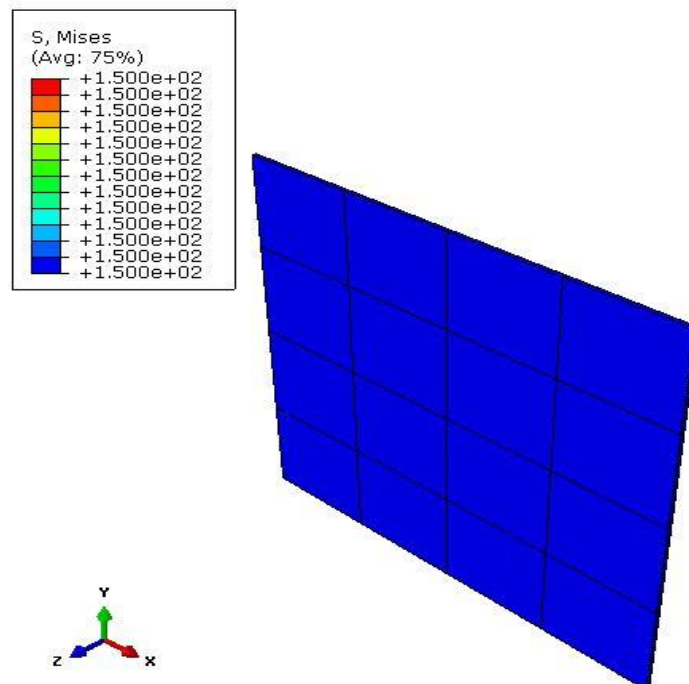
1.1.1.2 „Mreža 2“ – 16 konačnih elemenata

Sljedeći korak je pogustiti mrežu na šesnaest konačnih elemenata, te provjeriti dolazi li do promjene pomaka U_1 , U_2 , U_3 , te ekvivalentnih napreznja prema Von Misesu. Slika 2.10 prikazuje mrežu od 16 konačnih elemenata.



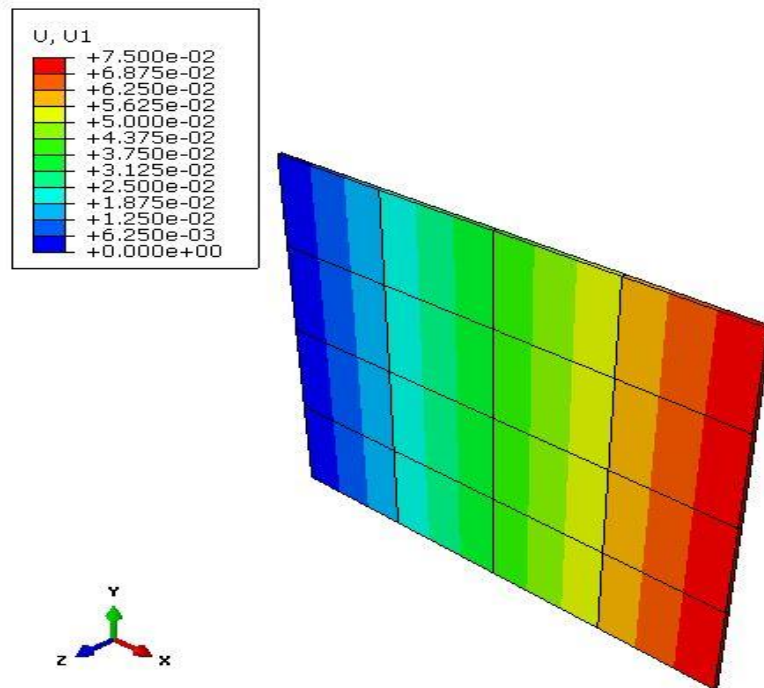
Slika 2.10 Numerički model ploče diskretiziran sa 16 konačnih elemenata

Raspodjela ekvivalentnih napreznja po Von Misesu na deformiranom modelu diskretiziranom C3D8 konačnim elementima je na Slika 2.11. Prikazana su napreznja za gustoću mreže od šesnaest C3D8 konačnih elemenata.



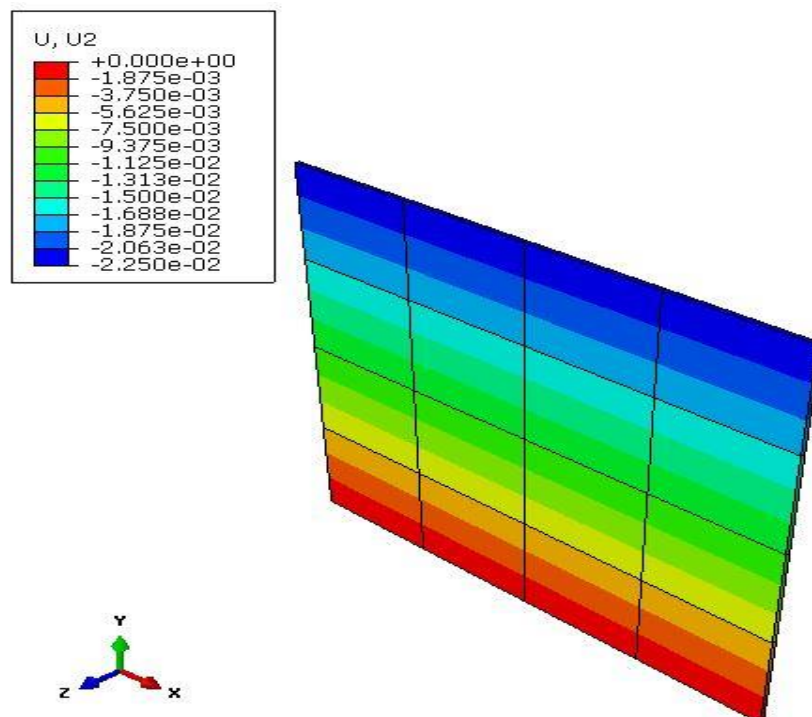
Slika 2.11 Von Mises napreznja za mrežu od 16 konačnih elemenata

Na Slika 2.12 prikazana je raspodjela pomaka numeričkog modela ploče u smjeru osi x diskretizirane sa šesnaest C3D8 konačnih elemenata, te opterećena tlakom $p=150$ MPa.



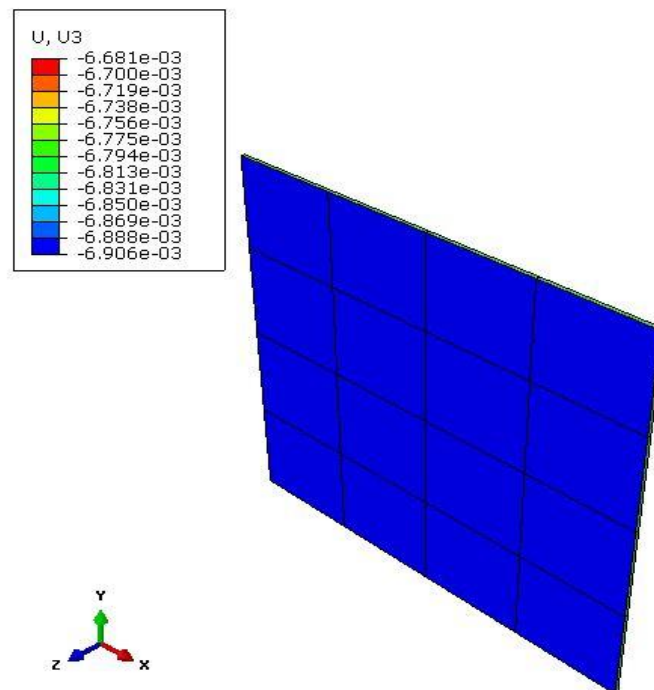
Slika 2.12 Raspodjela pomaka u smjeru osi x za mrežu od 16 konačnih elemenata

Raspodjelu pomaka na deformiranom modelu diskretiziranom sa 16 C3D8 konačnih elemenata u smjeru osi y prikazuje Slika 2.13.



Slika 2.13 Raspodjela pomaka u smjeru osi y za mrežu od 16 konačnih elemenata

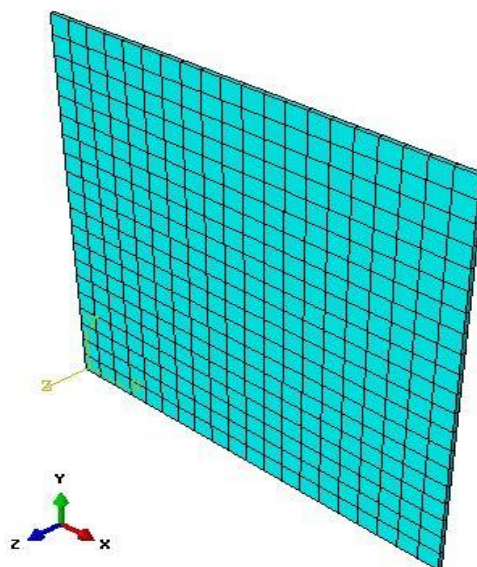
Diskretizacijom numeričkog modela ploče s C3D8 konačnim elementima za mrežu od 16 konačnih elemenata dobiveni su pomaci u smjeru osi z što je prikazano na Slika 2.14.



Slika 2.14 Raspodjela pomaka u smjeru osi z za mrežu od 16 konačnih elemenata

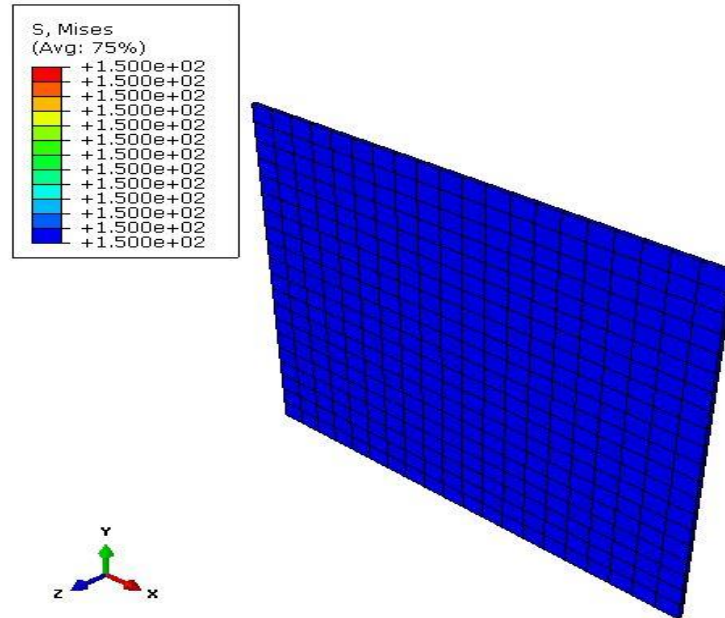
1.1.1.3 „Mreža 3“ – 400 konačnih elemenata

Poželjno je provjeriti eventualne promjene pomaka $U1$, $U2$, $U3$, te ekvivalentna naprezanja po Von Misesu za još gušću mrežu. Odabrana je mreža sa 400 konačnih elemenata, kao što prikazuje Slika 2.15.



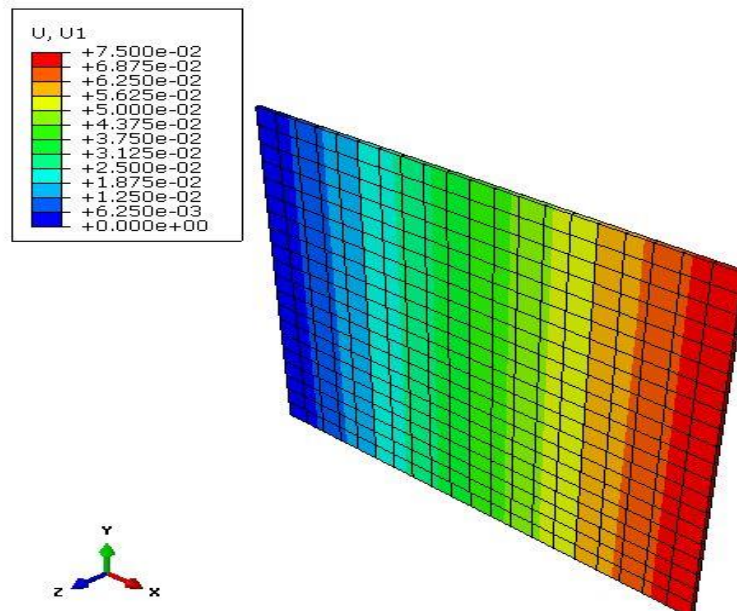
Slika 2.15 Numerički model ploče diskretiziran sa 400 C3D8 konačnih elemenata

Raspodjela naprezanja po Von Misesu na deformiranom modelu diskretiziranom s C3D8 konačnim elementima je na Slika 2.16. Prikazana su naprezanja za gustoću mreže od četiristotine C3D8 konačnih elemenata.



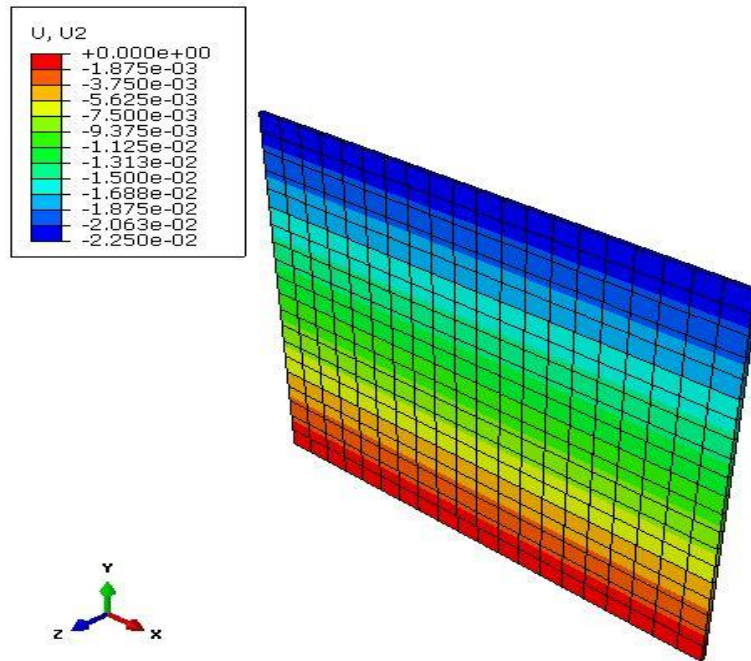
Slika 2.16 Von Mises naprezanja za 400 konačnih elemenata

Na Slika 2.17 prikazana je raspodjela pomaka numeričkog modela ploče u smjeru osi x diskretizirane sa četiristotine C3D8 konačnih elemenata, te opterećena tlakom $p=150$ MPa.



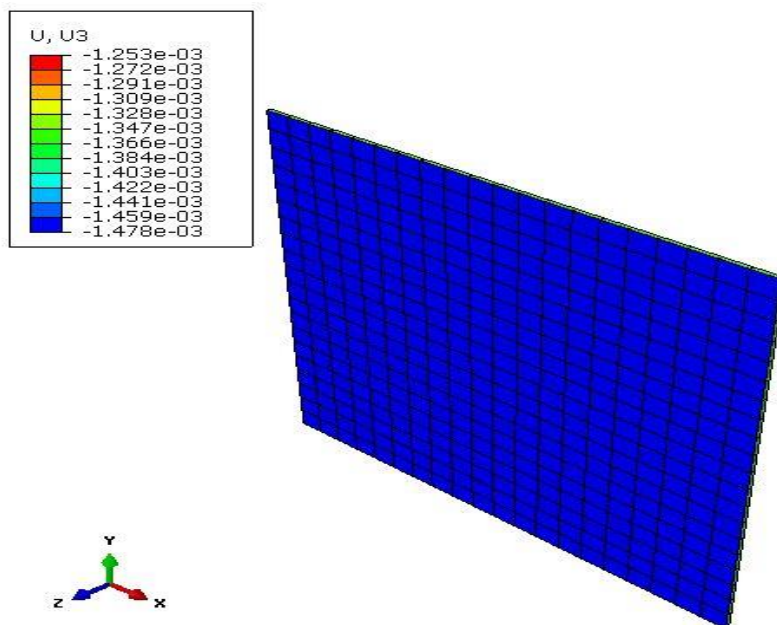
Slika 2.17 Raspodjela pomaka u smjeru osi x za mrežu od 400 C3D8 konačnih elemenata

Raspodjela pomaka u smjeru osi y na deformiranom modelu diskretiziranom C3D8 konačnim elementima je na Slika 2.18. Prikazana su naprezanja za gustoću mreže od četiristotine C3D8 konačnih elemenata.



Slika 2.18 Raspodjela pomaka u smjeru osi y za mrežu od 400 C3D8 konačnih elemenata

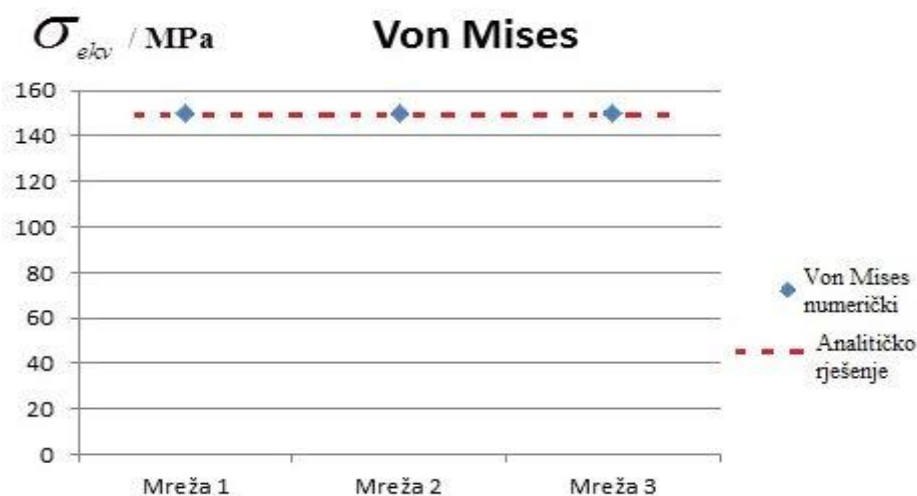
Diskretizacijom numeričkog modela ploče s C3D8 konačnim elementima za mrežu od 400 konačnih elemenata dobiveni su pomaci u smjeru osi z što je prikazano na Slika 2.19.



Slika 2.19 Raspodjela pomaka u smjeru osi z za mrežu od 400 C3D8 konačnih elemenata

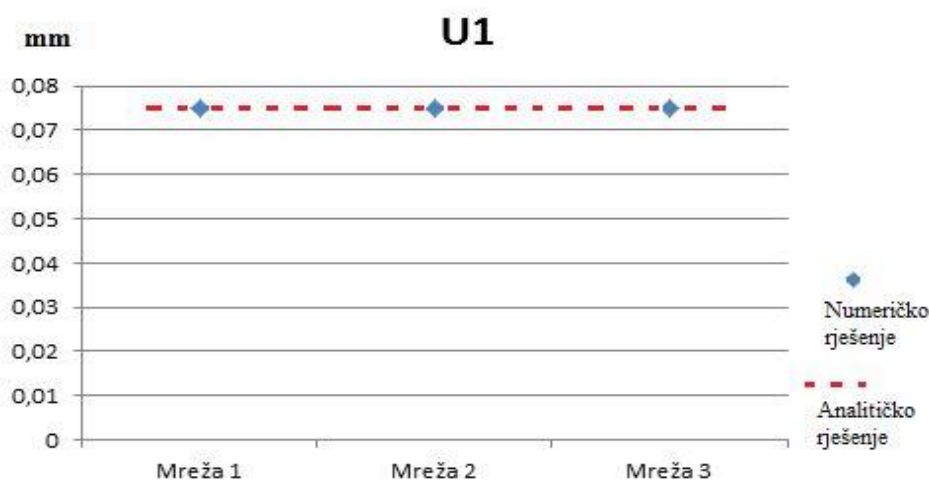
Iz dobivenih podataka vidljivo je kako su pomaci u smjeru osi x i y jednaki rezultatima dobivenim analitičkim rješenjem, te kako se ona podudaraju već i za jedan konačni element. Obzirom da se radi o vrlo jednostavnoj geometriji ovakvi rezultati su očekivani te povećanjem mreže možemo eventualno ispitati konvergenciju pomaka u smjeru osi z (promjene debljine ploče). U nastavku slijedi dijagramski prikaz dobivenih rezultata za sve tri mreže.

Prikazan je dijagram promjene ekvivalentnih naprezanja prema Von Misesu za mreže različitih gustoća; jednog konačnog elementa, šesnaest elemenata te četiristotine elemenata te njihova usporedba sa analitičkim rješenjem, koja se potpuno podudaraju kao što se vidi na Slika 2.20.



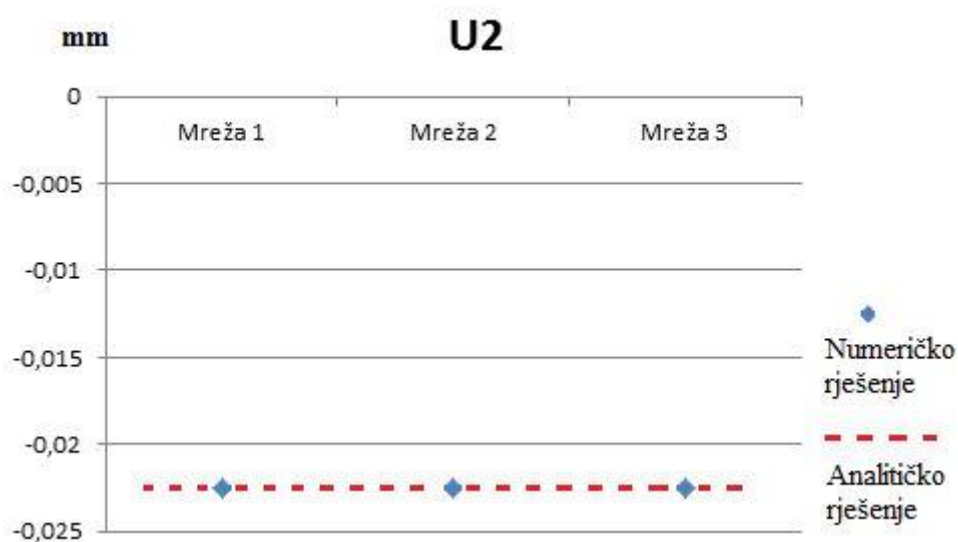
Slika 2.20 Konvergencija Von Mises naprezanja

Slika 2.21 prikazuje konvergenciju pomaka u smjeru osi x za primjenjene mreže konačnih elemenata, te njihovu usporedbu sa rezultatima dobivenih analitički.



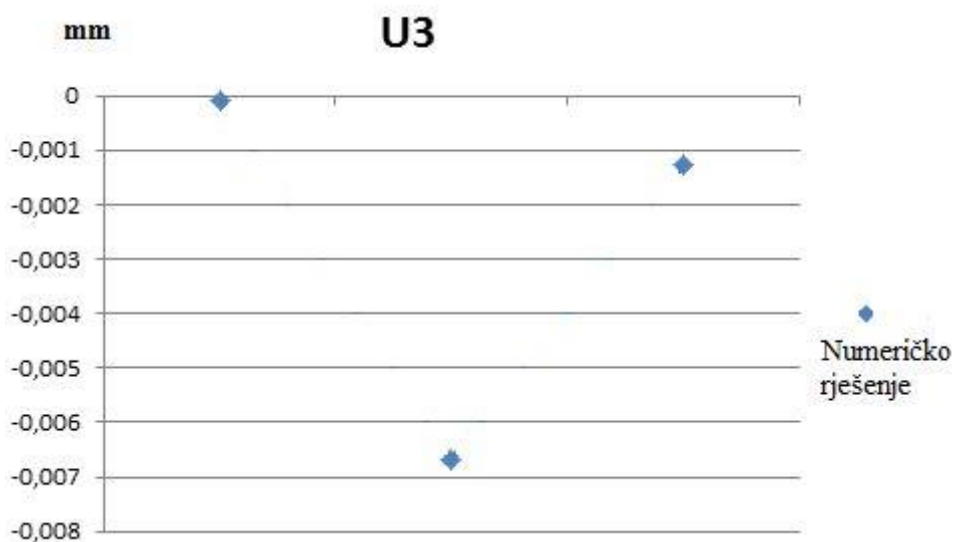
Slika 2.21 Konvergencija pomaka u smjeru osi x

Konvergencija pomaka u smjeru osi y , te usporedba sa analitičkim rješenjem je prikazana na Slika 2.22.



Slika 2.22 Konvergencija pomaka u smjeru osi y

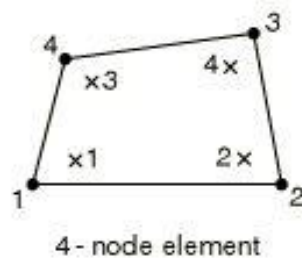
Slika 2.23 prikazuje nemonotonu konvergenciju pomaka $U3$.



Slika 2.23 Konvergencija u smjeru osi z

1.1.4 Ljuskasti elementi

Kod analize ljuskastim elementima, odabrani su ljuskati S4 (*Shell*) konačni elementi. Ovaj element karakterizira linearna raspodjela deformacija i naprezanja. To je dvodimenzijски element s četiri čvora, a ima dvadeset i četiri stupnjeva slobode; pomak u smjeru x , y , z , te zakret oko x , y , z osi u svakome čvoru. Polje pomaka ovog elementa opisano je polinomom drugog stupnja. Na Slika 2.24 je prikazana raspodjela točaka integracije kod razmatranih konačnih elemenata.

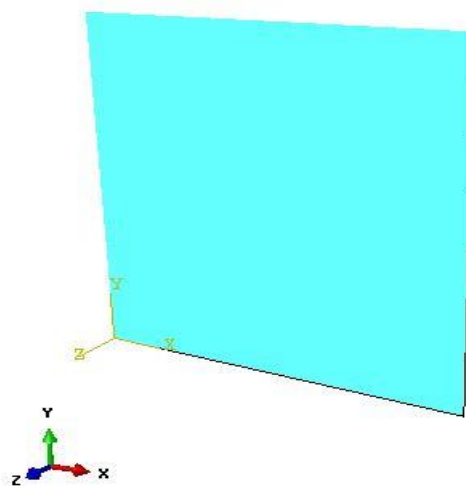


Slika 2.24 Točke integracije za S4 konačni element [8]

Daljnjom diskretizacijom numeričkog modela pravokutne ploče s S4 konačnim elementima dobiveni su rezultati raspodjele naprezanja (*Von Mises*) i raspodjele pomaka za mreže različitih gustoća; jednog konačnog elementa, šesnaest elemenata te četiristotine elemenata. Korišteni rubni uvjeti isti su kao kod diskretizacije numeričkog modela ploče s C3D8 konačnim elementima kao što je prikazano na Slika 2.4.

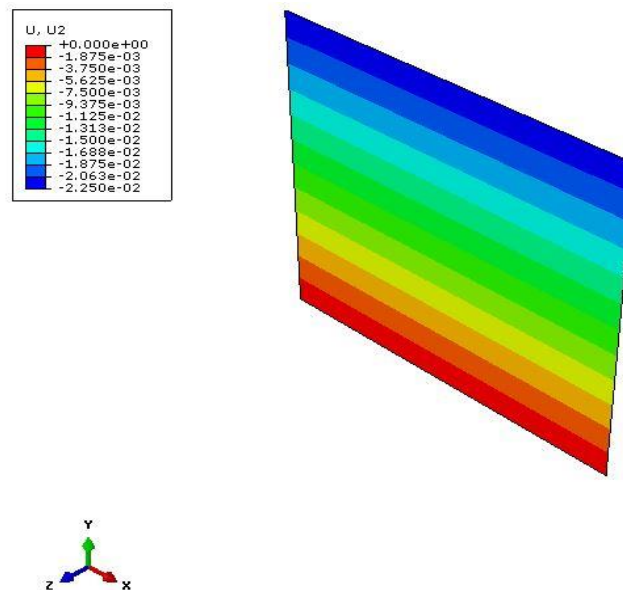
2.2.2.1 „Mreža 1“ – 1 konačan element

Slika 2.25 prikazuje numerički model ploče opterećene tlakom $p= 150$ MPa diskretiziranu jednim S4 konačnim elementom.



Slika 2.25 Numerički model ploče diskretiziran sa jednim S4 konačnim elementom

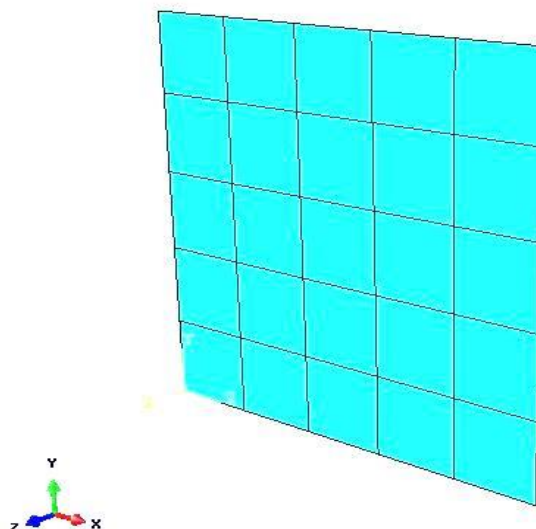
Na Slika 2.28 prikazana je raspodjela pomaka numeričkog modela ploče u smjeru osi y diskretizirane sa jednim S4 konačnim elementom, te opterećene tlakom $p=150$ MPa.



Slika 2.28 Raspodjela pomaka u smjeru osi y za 1 S4 konačan element

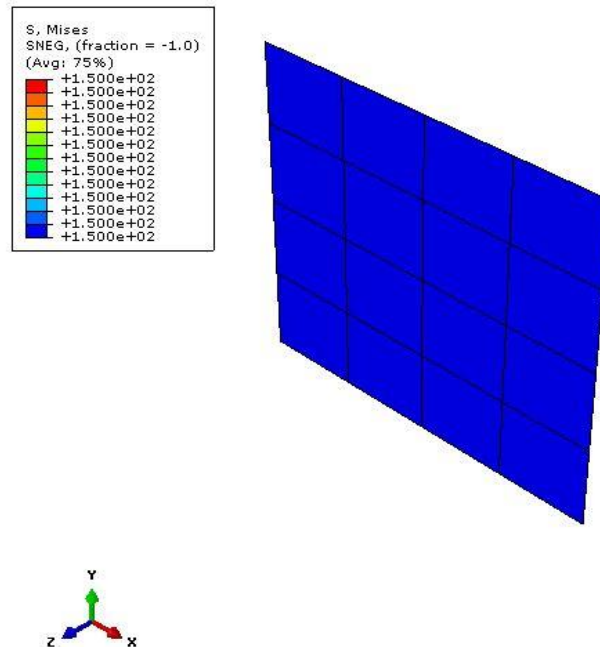
2.2.2.2 „Mreža 2“ – 16 konačnih elemenata

Nadalje, slijedi analiza raspodjele pomaka $U1$, $U2$, $U3$, te raspodjele naprezanja po Von Misesu za numerički model pravokutne ploče diskretizirane sa 16 ljuskastih konačnih elemenata kao što je prikazano na Slika 2.29.



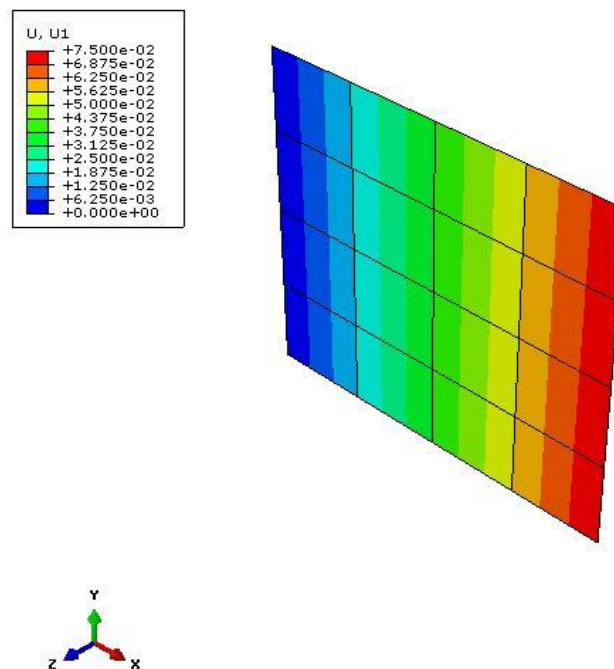
Slika 2.29 Numerički model ploče diskretiziran sa 16 S4 konačnih elemenata

Raspodjela ekvivalentnih napreznaja prema Von Misesu na deformiranom modelu diskretiziranom s S4 konačnim elementima je na Slika 2.30. Prikazana su napreznaja za gustoću mreže od šesnaest S4 konačnih elemenata.



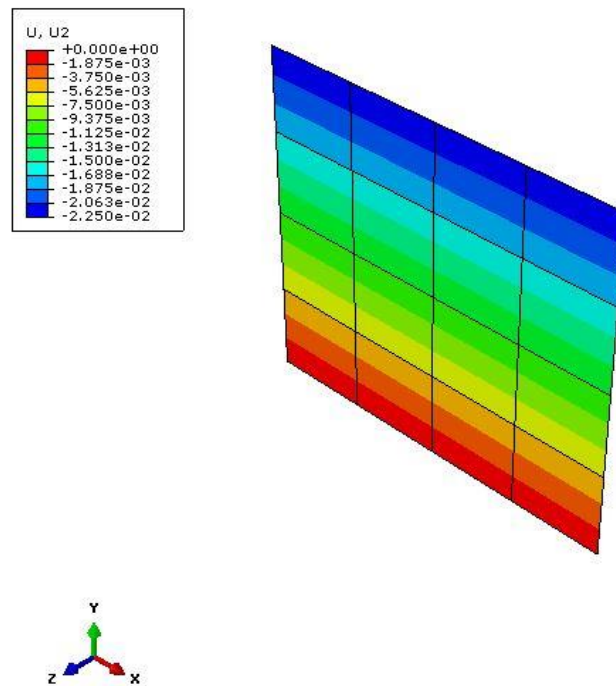
Slika 2.30 Von Mises napreznaja za 16 konačnih elemenata

Na Slika 2.31 prikazana je raspodjela pomaka numeričkog modela ploče u smjeru osi x diskretizirane sa šesnaest S4 konačnih elemenata, te opterećena tlakom $p=150$ MPa.



Slika 2.31 Raspodjela pomaka u smjeru osi x za 16 S4 konačnih elemenata

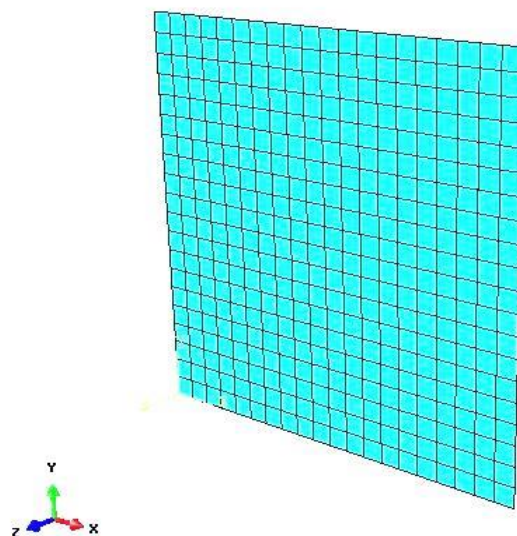
Diskretizacijom numeričkog modela ploče sa šesnaest S4 konačnih elemenata dobiveni su pomaci u smjeru osi y što je prikazano na Slika 2.32.



Slika 2.32 Raspodjela pomaka u smjeru osi y za 16 S4 konačnih elemenata

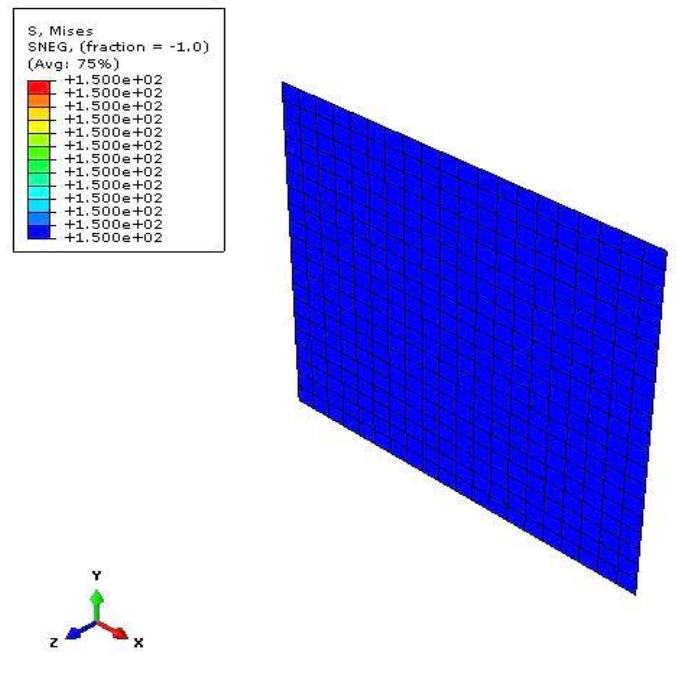
2.2.2.3 „Mreža 3“ – 400 konačnih elemenata

Poželjno je provjeriti eventualne promjene pomaka $U1$, $U2$, $U3$, te raspodjelu naprezanja po Von Missesu za numerički model pravokutne ploče opterećene tlakom $p= 150$ MPa. Odabrana je mreža sa 400 konačnih elemenata, kao što prikazuje Slika 2.33.



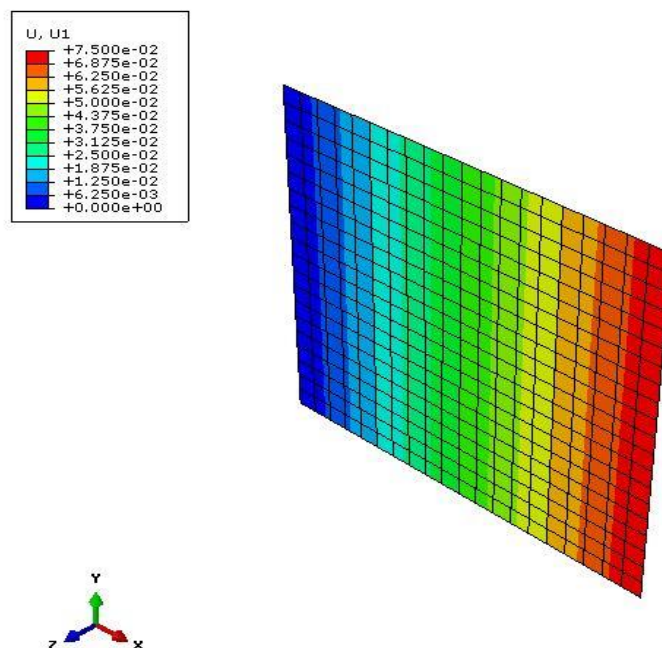
Slika 2.33 Numerički model ploče diskretiziran sa 400 S4 konačnih elemenata

Raspodjela naprezanja po Von Misesu na deformiranom modelu diskretiziranom s S4 konačnim elementima je na Slika 2.34. Prikazana su naprezanja za gustoću mreže od četiristotine S4 konačnih elemenata.



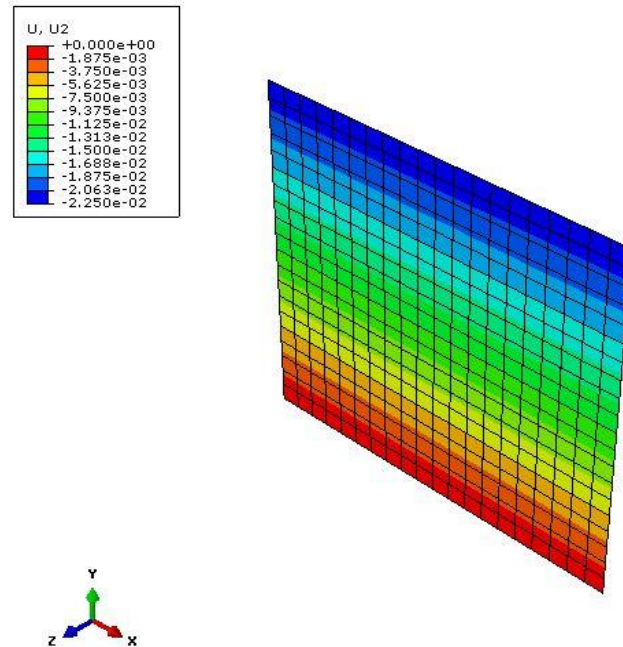
Slika 2.34 Von Mises naprezanja za 400 konačnih elemenata

Diskretizacijom numeričkog modela ploče sa četiristotine S4 konačnih elemenata dobiveni su pomaci u smjeru osi x što je prikazano na Slika 2.35.



Slika 2.35 Raspodjela pomaka u smjeru osi x za 400 S4 konačnih elemenata

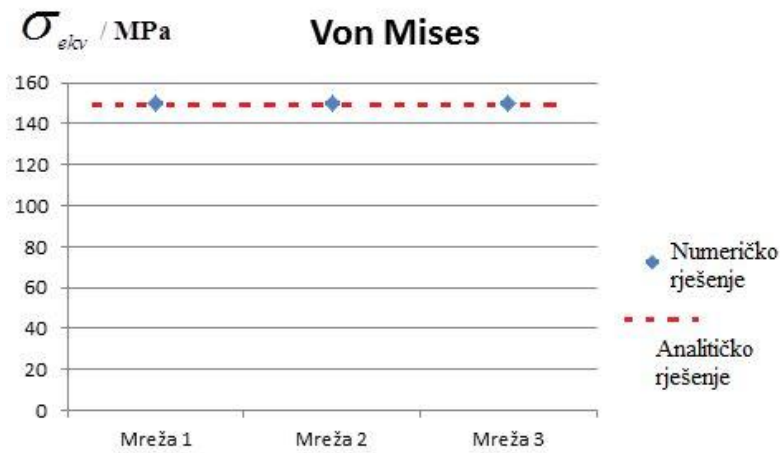
Na Slika 2.36 prikazana je raspodjela pomaka numeričkog modela ploče u smjeru osi y diskretizirane sa četiristotine S4 konačnih elemenata, te opterećene tlakom $p=150$ MPa.



Slika 2.36 Raspodjela pomaka u smjeru osi y za 400 S4 konačnih elemenata

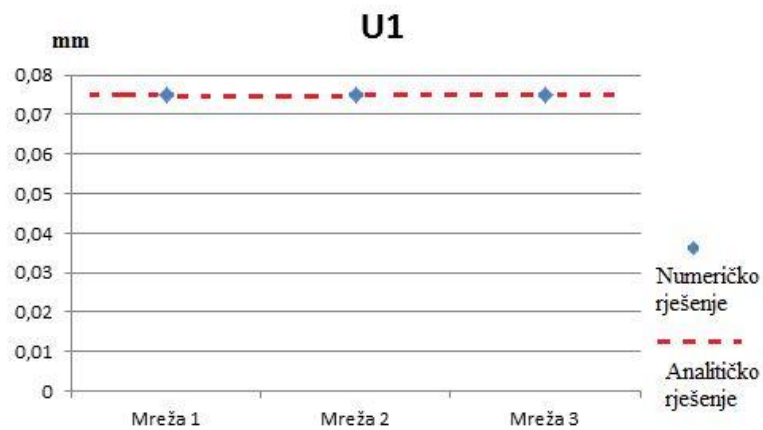
Kao i kod četverokutnih 3D elemenata, iz dobivenih podataka vidljivo je kako već diskretizacija numeričkog modela ploče sa samo jednim ljuskastim konačnim elementom daje rezultate o pomacima u smjeru osi x i y identične onima dobivenim analitičkim. U nastavku slijedi dijagramski prikaz dobivenih rezultata za sve tri mreže.

Prikazan je dijagram promjene raspodjele naprezanja po Von Misesu za mreže različitih gustoća; jednog konačnog elementa, šesnaest elemenata te četiristotine elemenata za S4 konačne elemente, te njihova usporedba sa analitičkim rješenjem, koja se potpuno podudaraju kao što se vidi na Slika 2.37.

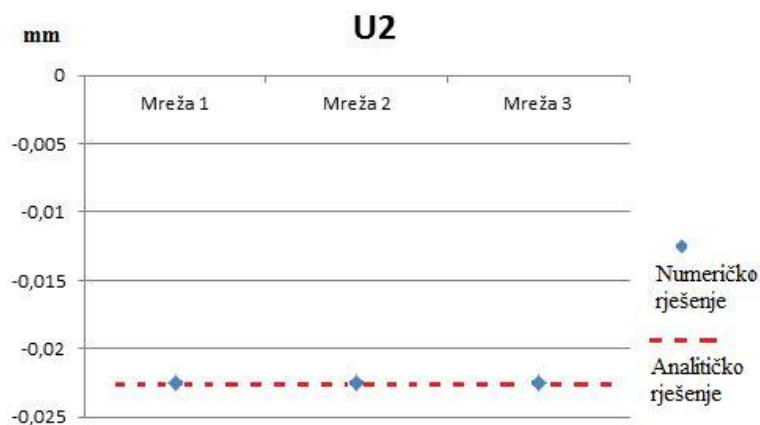


Slika 2.37 Konvergencija Von Mises naprezanja

Slika 2.38 prikazuje konvergenciju pomaka u smjeru osi x za primjenjene mreže konačnih elemenata, te njihovu usporedbu sa rezultatima dobivenih analitički.

Slika 2.38 Konvergencija pomaka u smjeru osi x

Konvergencija pomaka u smjeru osi y , te usporedba sa analitičkim rješenjem je prikazana na Slika 2.39.

Slika 2.39 Konvergencija pomaka u smjeru osi y

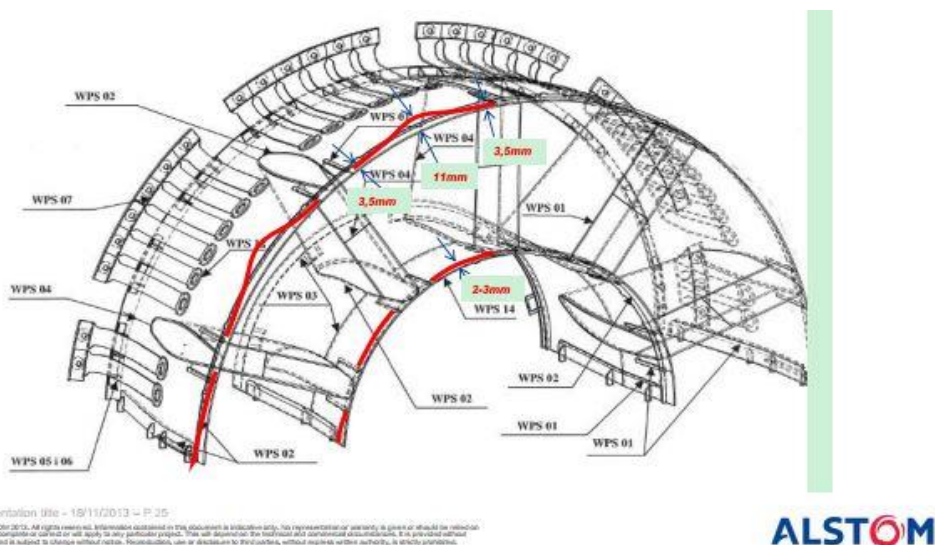
3. NUMERIČKA ANALIZA DIJELA KONSTRUKCIJE ISPUŠNOG KUĆIŠTA PLINSKE TURBINE *GT26*

Dio konstrukcije ispušnog kućišta plinske turbine *GT26* na kojem se javlja prednapinjanje ljuske nakon deformiranja radi postizanja što bolje cilindričnosti ljuske, te boljeg pozicioniranja linera prije zavarivanja dobiven je od strane Alstoma i prikazan je na Slika 3.1.



Slika 3.1 Dio konstrukcije ispušnog kućišta plinske turbine *GT26* [10]

Kako bi se moglo izvršiti zavarivanje rebara između dvije cilindrične ljuske i kako bi nakon zavarivanja oblik ljuske bio što više cilindričan od strane Alstoma smo dobili izmjerene pomake na rubovima linera kao što je prikazano na Slika 3.2.



Slika 3.2 Preddeformacija linera [10]

Za analizu procesa deformiranja dijelova ispušnog kućišta plinske turbine, uz postavljanje odgovarajućih uvjeta simetrije, dovoljno je proračun vršiti na jednoj desetini linera čime će se numerička analiza pojednostaviti i vrijeme analize će se znatno skratiti. Proračunski model na kojem se vrši spomenuta analiza je prikazan na Slika 3.3.

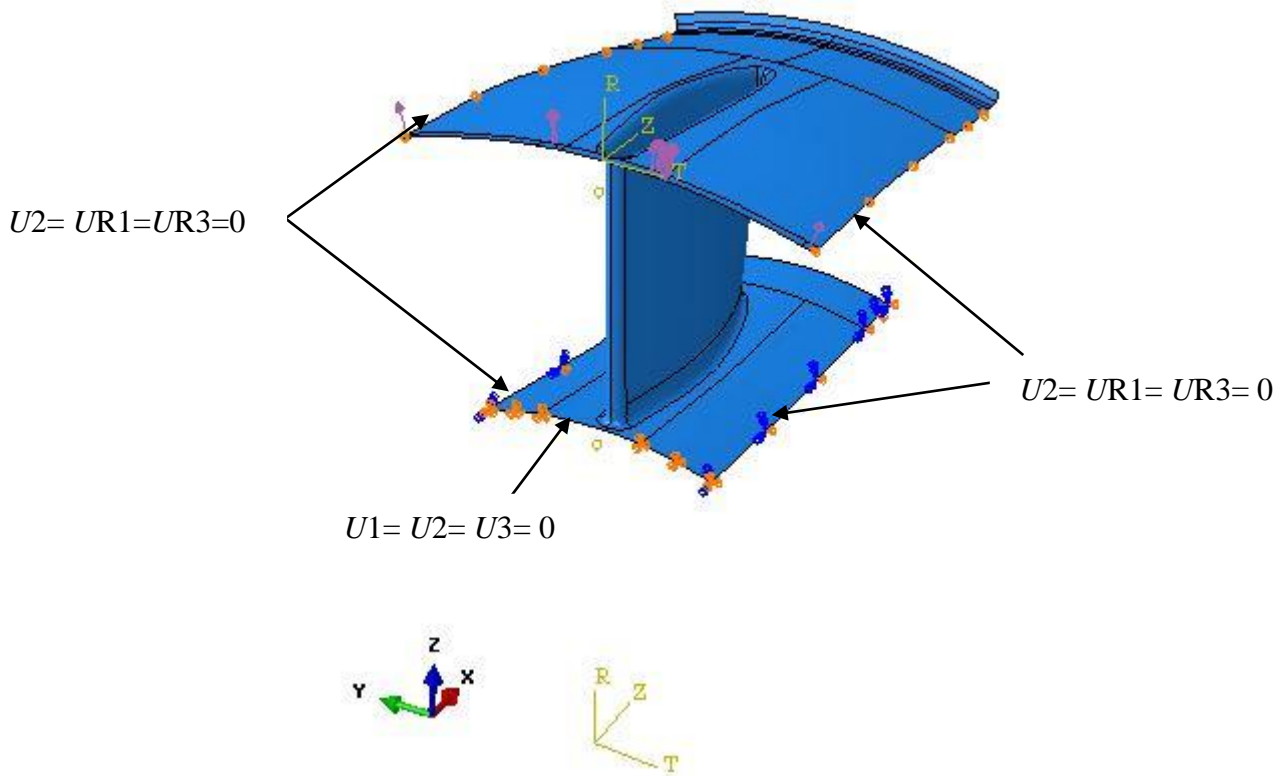


Slika 3.3 Proračunski model [10]

Najprije je definiran materijal proračunskog modela tako što je zadan modul elastičnosti $E=210$ GPa, te Poissonov koeficijent iznosa $\nu=0,3$. Također je zadana debljina ljuske i iznosi $t=4$ mm.

Budući da je riječ o osnosimetričnom problemu koordinatni sustav u kojem se vrši analiza je cilindrični koordinatni sustav tako da se os z poklapa s glavnom osi rotacije- osi simetrije. Os r predstavlja radijalnu os, a os θ je cirkularna os.

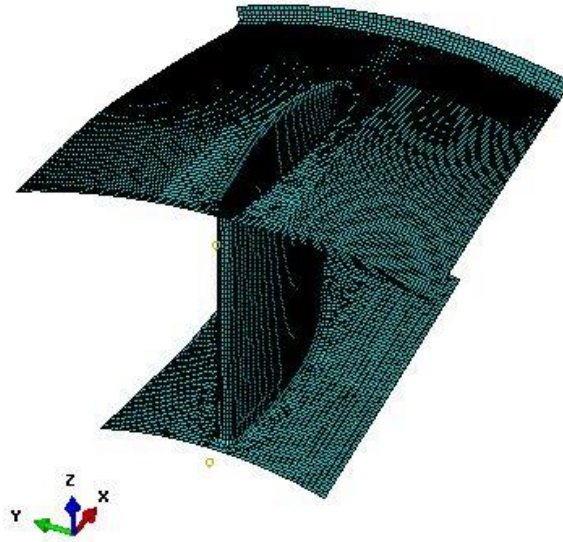
Za poklapanje pomaka u smjerovima koordinatnih osi zadanih u programskom paketu *Abaqus* sa pomacima u smjeru cilindričnih koordinatnih osi vrijedi jednakost $u_r \equiv U_1$, $u_\theta \equiv U_2$, $u_z \equiv U_3$. Pomoću tih preinaka možemo odabrati pogodnu simetriju, u ovom slučaju θ simetriju, tako da je $U_2 = U_{R1} = U_{R3} = 0$ za rubove gornje i donje ljuske, te uklještenje za donju ljusku na mjestu kao što je prikazano na Slika 3.4.



Slika 3.4 Prikaz uvjeta simetrije za proračunski model

Očekivani pomaci prilikom montaže iznose $U1=11$ mm na rubovima konstrukcije, te na području između ruba ljuske i rebra $U1 = 3,5$ mm. Za dobiveni model vršena je analiza pri kojim iznosu tlaka će se javljati očekivani pomaci. Tlakovi su zadani najprije po pojedinim površinama ljuske, a zatim po cijelom pojasu ljuske, tj. duljine ljuske u smjeru cirkularne osi.

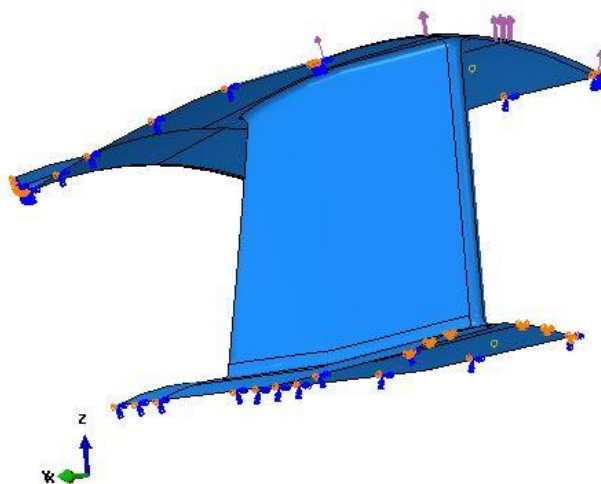
Mreža proračunskog modela ispušnog kućišta plinske turbine je prikazana na Slika 3.5. Ista mreža je korištena u obe analize, dakle i za tlakove zadane po pojedinim površinama i za tlak zadan po pojasu ljuske.



Slika 3.5 Mreža proračunskog modela ispušnog kućišta plinske turbine

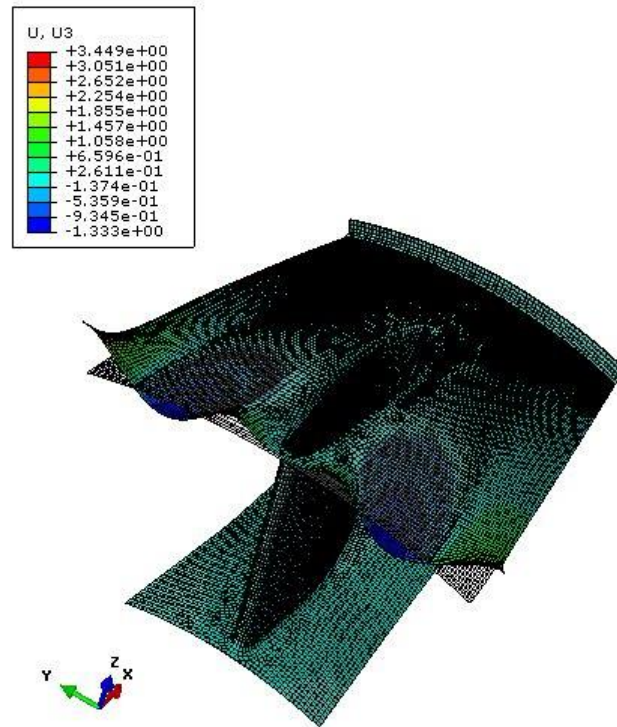
1.4 Numerička analiza modela opterećenog tlakom po pojedinim površinama

Numerička analiza se vrši tako što se gornja ljuska opteretila tlakom po pojedinim površinama što prikazuje Slika 3.6 uzimajući u obzir rubne uvjete simetrije prikazane na Slika 3.4. Slika 3.6 prikazuje tlak po površinama na mjestima pretpostavljenih pomaka od 11 mm i 3,5 mm.



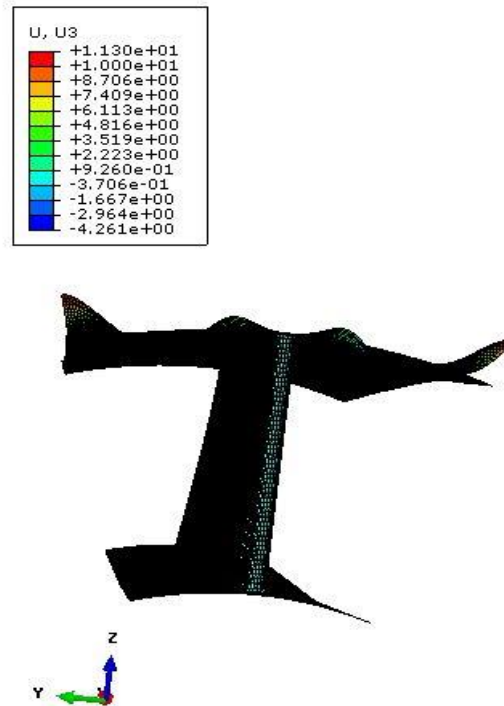
Slika 3.6 Prikaz proračunskog modela sa zadanim tlakom po pojedinim površinama na mjestima pretpostavljenih pomaka

U proračun se krenulo najprije pretpostavkom iznosa tlakova, i to tako da je za rub ljuske gdje pretpostavljeni pomak iznosi $U1 = 11\text{ mm}$ odabran tlak na dio površine od $p = 1\text{ MPa}$, a za dio ljuske gdje je pretpostavljeni pomak $U1 = 3,5\text{ mm}$ uzet je također tlak na dio površine iznosa $p = 1\text{ MPa}$. Dobiveni rezultati nisu odgovarali pretpostavljenim pomacima što pokazuje Slika 3.5. Za očekivani pomak $U1 = 11\text{ mm}$ prvom pretpostavkom na istom mjestu je dobiven pomak iznosa $U3 = 3,45\text{ mm}$, te za očekivani pomak $U1 = 3,5\text{ mm}$ ovom pretpostavkom je dobiven $U3 = 0,26\text{ mm}$.



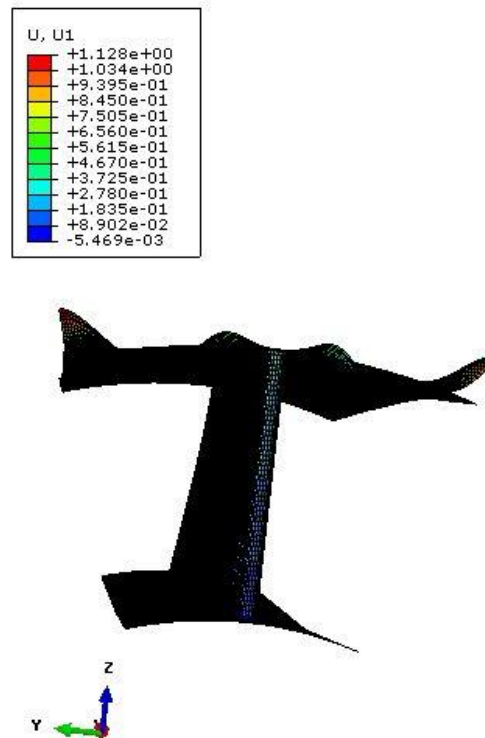
Slika 3.7 Proračunski model opterećen tlakovima $p= 1\text{ MPa}$ i $p= 1\text{ MPa}$

Daljnjom analizom te linearnom iteracijom došlo se do rezultata da tlakovi po pojedinim površinama prema očekivanim pomacima bi trebali imati sljedeće iznose: $p = 3,2\text{ MPa}$ na mjestu pretpostavljenog pomaka od $U1 = 11\text{ mm}$, te $p = 3,1\text{ MPa}$ na mjestu pretpostavljenog pomaka iznosa $U1 = 3,5\text{ mm}$. Pomaci $U3$ dobiveni za navedene tlakove prikazani su na Slika 3.8.



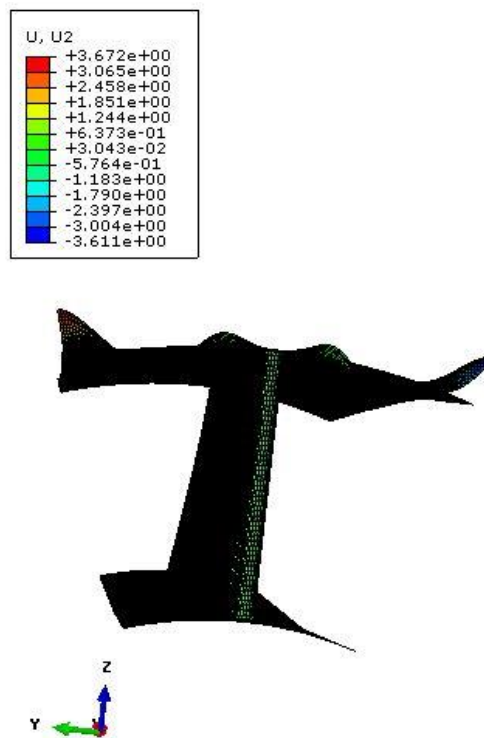
Slika 3.8 Vrijednosti pomaka U_3 za tlakove zadane po pojedinim površinama

Slika 3.9 prikazuje raspodjelu pomaka U_1 za tlakove zadane po pojedinim površinama, te deformirani i nedeformirani dio ljuske.



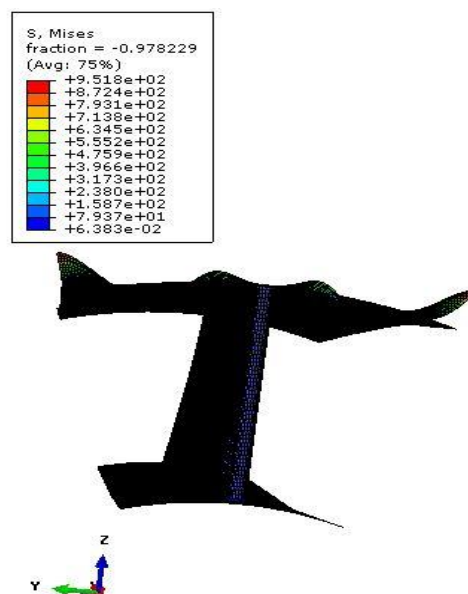
Slika 3.9 Vrijednosti pomaka U_1 za tlakove zadane po pojedinim površinama

Slika 3.10 prikazuje raspodjelu pomaka U_2 za tlakove zadane po pojedinim površinama, te deformirani i nedeformirani dio ljuske.



Slika 3.10 Vrijednosti pomaka U_1 za tlakove zadane po pojedinim površinama

Raspodjela ekvivalentnih napreznja prema Von Misesu za proračunski model ispušnog kućišta plinske turbine prikazana je na Slika 3.11. Prikazana su napreznja za gustoću mreže sa Slika 3.5.



Slika 3.11 Raspodjela ekvivalentnih napreznja prema Von Misesu za proračunski model

1.5 Numerička analiza modela opterećenog tlakom po pojasu ljsuske

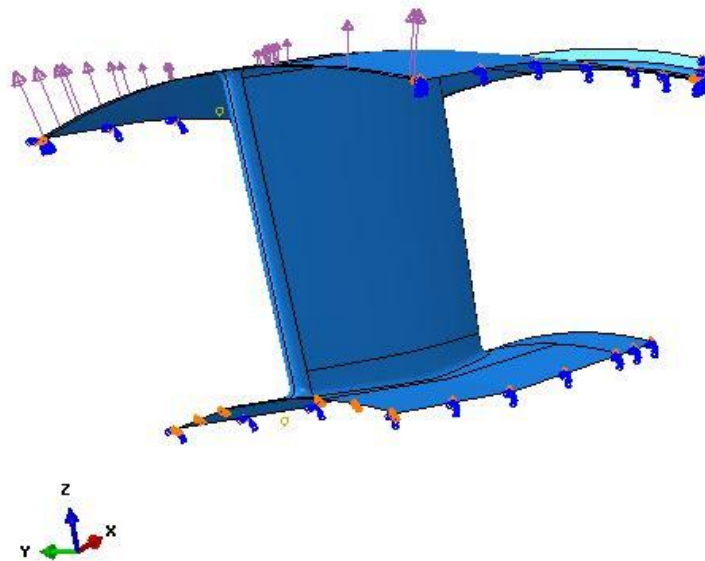
U analizi koja slijedi tlak je zadan po pojasu ljsuske, tj. po cijeloj duljini ljsuske, što je prikazano na Slika 3.12.

Rubni uvjeti za ovaj tip opterećenja je isti kao za prethodni model prikazan na Slika 3.4.

Kako bi se dobili pretpostavljeni pomaci iznosa $U1 = 11$ mm, te $U1 = 3, 5$ mm, najprije smo pokušali zadati tlakove duž pojasa ljsuske preko jednadžbe pravca kroz jednu točku. Prva pretpostavka s kojom smo krenuli jest da tlak na površinu na rubu ljsuske, tj. na mjestu $\vartheta = \pi / 10$ ima vrijednost $p = 1$ MPa, čija jednadžba pravca ima oblik:

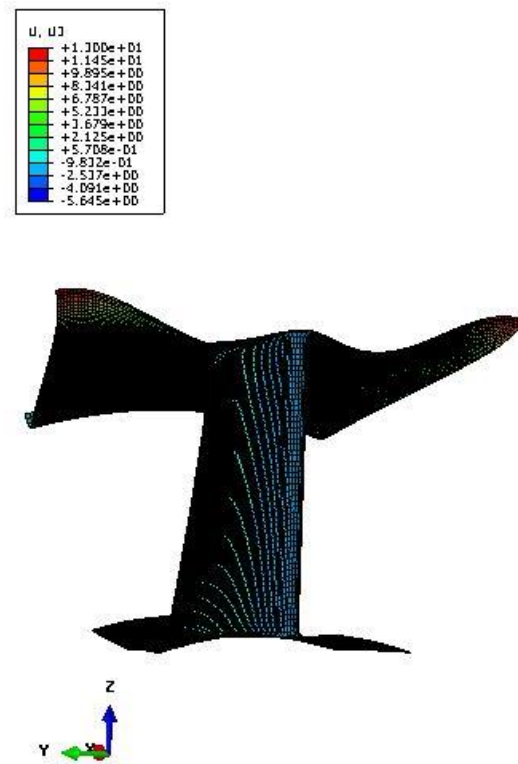
$$f_1(\vartheta) = 3,183 \cdot \vartheta \quad (3.1)$$

Raspodjela tlaka po površini prikazana je na Slika 3.12.



Slika 3.12 Raspodjela tlaka duž pojasa ljsuske zadanog preko jednadžbe pravca kroz jednu točku

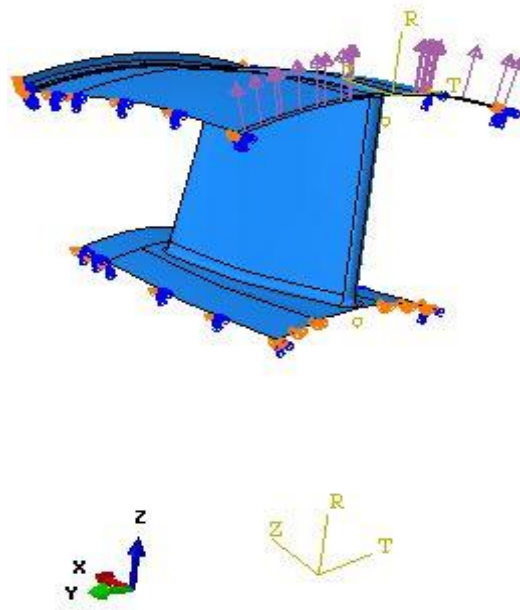
Pomoću spomenute jednadžbe pravca kroz jednu točku (3.1), dobiven je približan pomak na rubu ljsuske i to iznosa $U3 = 13$ mm kao što prikazuje Slika 3.13. Očekivani pomak od 3, 5 mm nije bilo moguće dobiti na ovaj način.



Slika 3.13 Raspodjela pomaka U_3 duž pojasa ljuske zadanog preko jednadžbe pravca kroz jednu točku

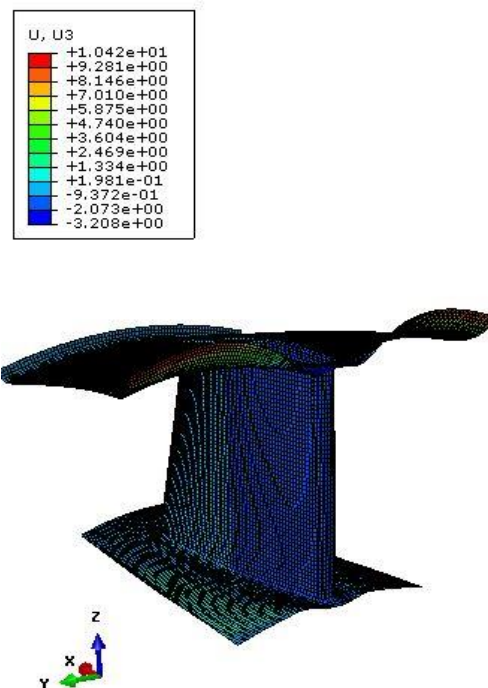
Dalje se u proračun išlo zadavajući konstantne tlakove po površinama. Najprije je zadan tlak $p = 1$ MPa duž cijelog pojasa ljuske. Budući da prva pretpostavka nije dala približna rješenja za očekivane pomake $U_1 = 11$ mm i $U_1 = 3,5$ mm dalje se analiziralo varirajući iznose tlakova duž pojasa ljuske.

Iznosi tlakova koji su dali približna rješenja su sljedeći: za rub ljuske gdje je očekivani pomak $U_1 = 11$ mm zadani tlak iznosi $p = 1,8$ MPa, nadalje za dio ljuske gdje je očekivani pomak $U_1 = 3,5$ mm zadani tlak je $p = 3,5$ MPa, te za dio ljuske između spomenuta dva područja zadani tlak je iznosa $p = 2$ MPa što bi se moglo reći da predstavlja linearnu raspodjelu tlakova duž pojasa, ali po pojedinim površinama. Prikaz spomenutog opterećenja je na Slika 3.14.

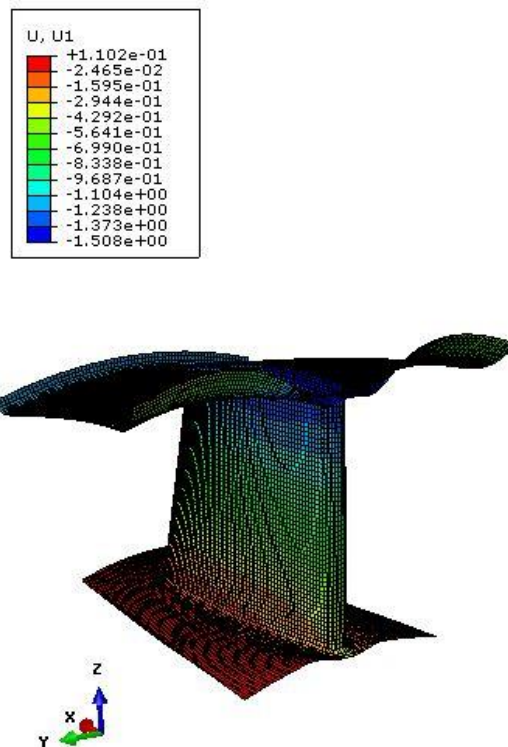


Slika 3.14 Raspodjela opterećenja duž pojasa ljske

Iznosi pomaka koji su dobiveni ovom analizom su: $U_3 = 10,13$ mm za područje očekivanog pomaka iznosa $U_1 = 11$ mm, te $U_3 = 3,6$ mm za područje očekivanog pomaka u iznosu $U_1 = 3,5$ mm. Poželjno je ponoviti da se pomaci U_1 odnose na cilindrični koordinatni sustav, a pomaci U_3 na Kartezijev koordinatni sustav, tako da vrijedi $U_1 \equiv U_3$. Raspodjela dobivenih pomaka U_3 za opterećenja zadana tlakom po pojasu ljske prikazani su na Slika 3.15.

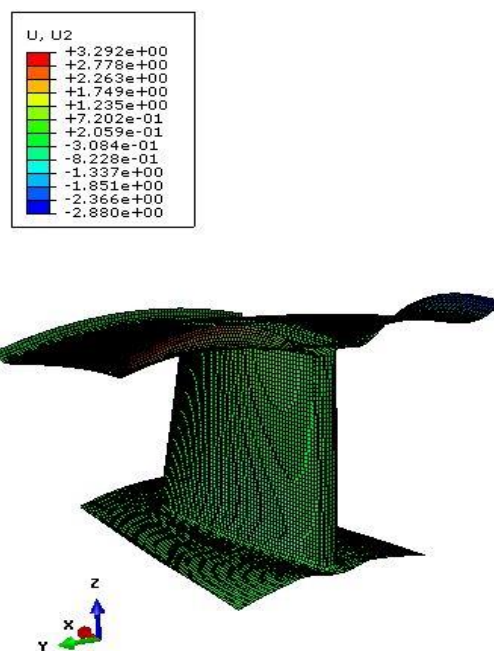
Slika 3.15 Raspodjela pomaka U_3 za tlak zadan po pojasu ljske

Raspodjela pomaka U_1 za opterećenje zadano tlakom po pojasu ljsuske za proračunski model ispušnog kućišta plinske turbine prikazan je na Slika 3.16.



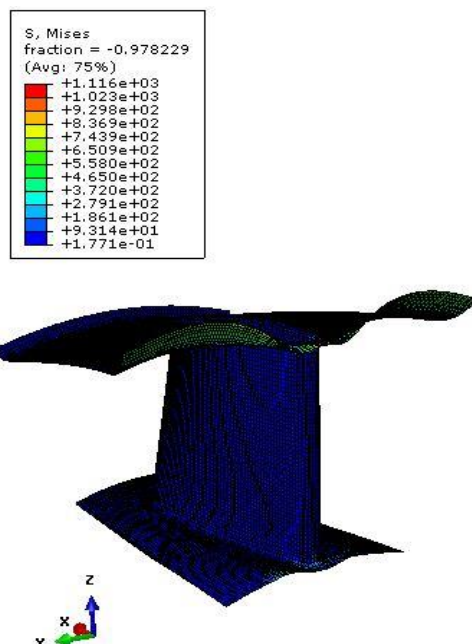
Slika 3.16 Raspodjela pomaka U_1 za tlak zadan po pojasu ljsuske

Slika 3.17 prikazuje raspodjelu pomaka U_2 proračunskog modela ispušnog kućišta plinske turbine za slučaj kada je opterećenje zadano tlakom po pojasu ljsuske.



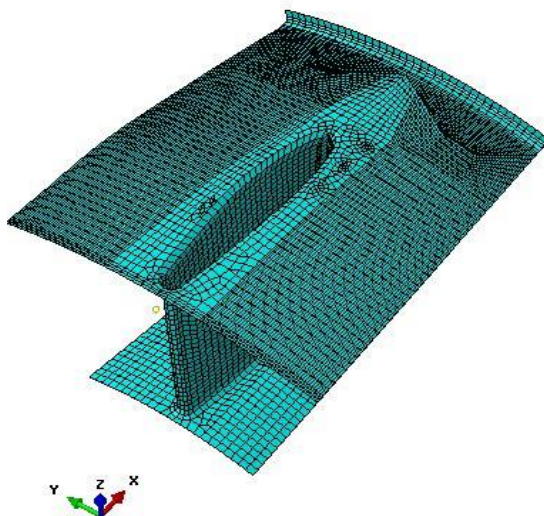
Slika 3.17 Raspodjela pomaka U_2 za tlak zadan po pojasu ljsuske

Raspodjela ekvivalentnih napreznja prema Von Misesu za proračunski model ispušnog kućišta plinske turbine prikazana je na Slika 3.18. Prikazana su napreznja za gustoću mreže sa Slika 3.5.



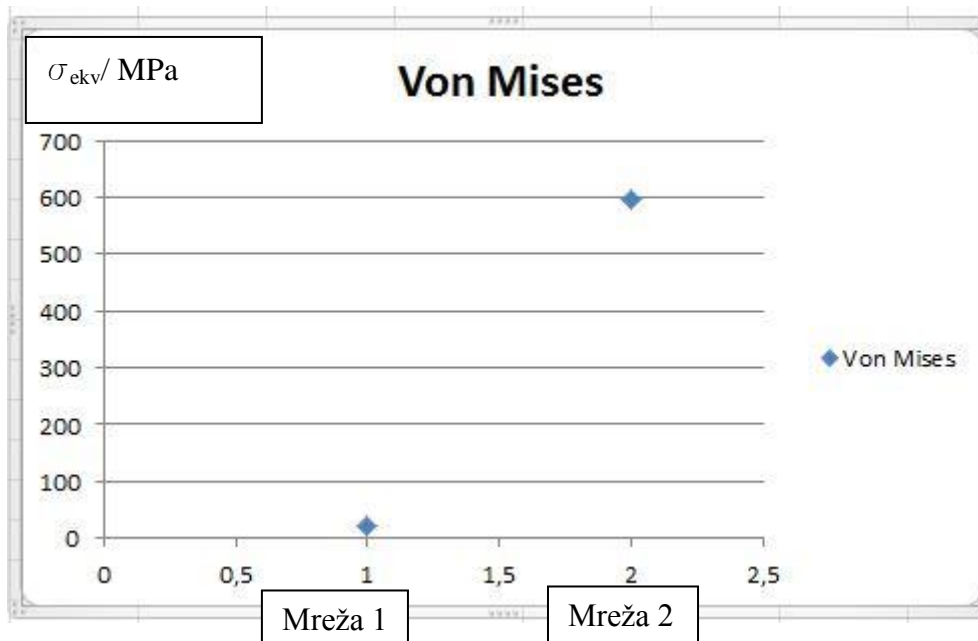
Slika 3.18 Raspodjela napreznja po Von Misesu za proračunski model

Poželjno je ispitati konvergenciju za slučaj kada je tlak zadan po pojasu ljuske i to se ispituje konvergencija za Von Mises napreznja prikazana na Slika 3.20, te konvergencija pomaka U_3 koja će biti prikazana na Slika 3.21. Prva mreža je gušća i ima 24131 element i prikazana je na Slika 3.5., dok druga mreža sa 9448 elemenata prikazana je na Slika 3.19.



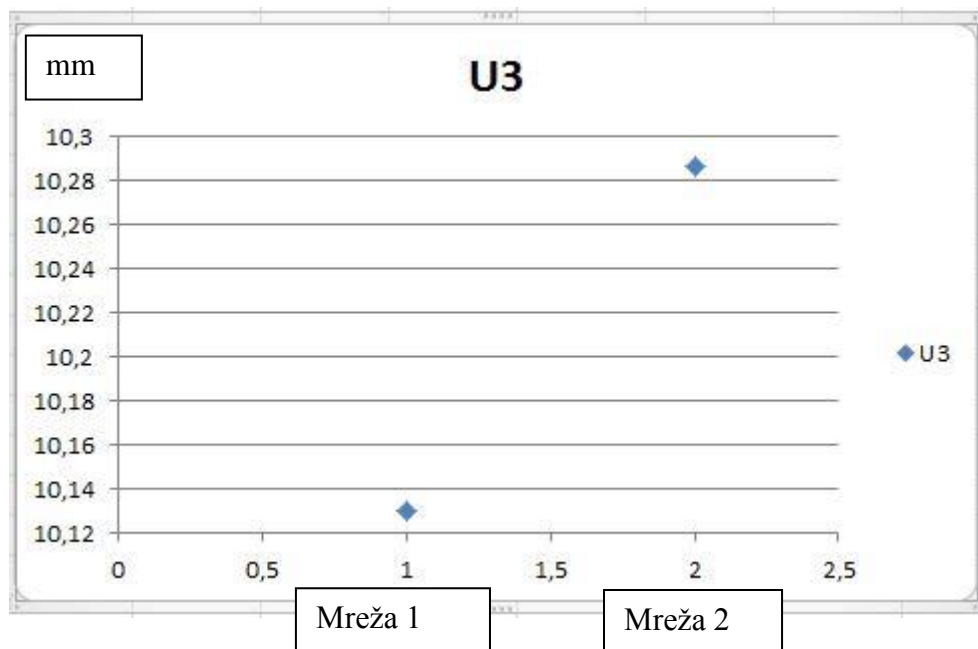
Slika 3.19 Mreža dva

Prikazan je dijagram promjene ekvivalentnih naprezanja prema Von Misesu za mreže različitih gustoća sa 24131 elementom te 9448 elemenata na Slika 3.20.



Slika 3.20 Konvergencija Von Mises naprezanja

Slika 3.21 prikazuje konvergenciju pomaka U_3 za primjenjene mreže konačnih elemenata na proračunskom modelu ispušnog kućišta plinske turbine.



Slika 3.21 Konvergencija pomaka U_1

4. ZAKLJUČAK

Ako najprije razmotrimo dobivene rezultate pravokutne ploče, vidimo da su analitička i numerička rješenja jednaka. Bilo da uspoređujemo analitičko rješenje sa numeričkim uz diskretizaciju pravokutne ploče sa 3D pravokutnim ili sa ljuskastim konačnim elementima. Budući da smo diskretizacijom sa jednim, šesnaest i četrinstotine konačnih elemenata dobili jednake rezultate, zaključak je da je za potpuno podudaranje sa analitičkim rješenjem bila dovoljna diskretizacija sa jednim konačnim elementom.

Za dio konstrukcije ispušnog kućišta plinske turbine *GT26* vršena je analiza pri kojim iznosima tlakova će se javiti očekivani pomaci nastali prilikom montaže u iznosu od $U1 = 11$ mm na rubovima konstrukcije, te pomaci između rebra i ruba ljuske u iznosu od $U1 = 3,5$ mm. Zaključeno je da ako se pretpostavljeni pomaci, čiji su iznosi dobiveni od strane Alstoma, zadaju preko tlaka na pojedinim površinama, taj tlak bi trebao iznositi 3,2 MPa i taj iznos vrijedi za rubove ljuske, te tlak u iznosu od 3,1 MPa za dio ljuske gdje su pretpostavljeni pomaci $U1 = 3,5$ mm.

Sljedeća analiza je bila zadavanje opterećenja po pojasi ljuske, tj. po duljini ljuske duž cirkularne osi. Kako bi se dobili pretpostavljeni pomaci iznosa $U1 = 11$ mm, te $U1 = 3, 5$ mm, najprije smo pokušali zadati tlakove duž pojasa ljuske preko jednadžbe pravca kroz jednu točku što nije ponudilo točno rješenje. Dalje se u proračun išlo zadavajući konstantne tlakove po površinama. Iznosi tlakova koji su dali približna rješenja su sljedeći: za rub ljuske gdje je očekivani pomak $U1 = 11$ mm zadani tlak iznosi $p = 1, 8$ MPa, nadalje za dio ljuske gdje je očekivani pomak $U1 = 3, 5$ mm zadani tlak je $p = 3, 5$ MPa, te za dio ljuske između spomenuta dva područja zadani tlak je iznosa $p = 2$ MPa.

5. LITERATURA

- [1] *Aeolipile*; <http://en.wikipedia.org/wiki/Aeolipile>
- [2] *Sheme i procesi postrojenja plinskih turbina*;
- [3] http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_teh_term_energ/katedra3/Nastava/toplinske_turbine_novo/12%20SteamGas.pdf
- [4] <http://www.alstom.com/group/about-us/>
- [5] <http://www.alstom.com/products-services/product-catalogue/power-generation/gas-power/gas-turbines/gt24-gt26-gas-turbines/>
- [6] <http://www.alstom.com/Global/Power/Resources/Documents/Brochures/gas-turbines-technical-performance.pdf?epslanguage=en-GB>
- [7] Alfirević I.; *Nauka o čvrstoći 1*, Zagreb 1995.
- [8] ABAQUS, *Abaqus Documentation: Version 6.14*. 2014, Dassault Systemes: 3DS Paris Campus, 10 rue Marcel Dassault, 78140 Vélizy-Villacoublay, FRANCE.
- [9] ABAQUS, *Abaqus Software: Version 6.14*. 2014, Dassault Systemes: 3DS Paris Campus, 10 rue Marcel Dassault, 78140 Vélizy-Villacoublay, FRANCE.
- [10] Podaci dobiveni od Alstoma
- [11] Podloge za vježbe iz kolegija „Metoda konačnih elemenata” za *ABAQUS/CAE*