

UNIVERZITET U BEOGRADU  
MAŠINSKI FAKULTET

Martina M. Balać

**MEĐUSOBNI UTICAJ PRIKLJUČAKA NA  
STANJE NAPONA I DEFORMACIJA NA  
CILINDRIČNOM OMOTAČU  
POSUDE POD PRITISKOM**

doktorska disertacija

Beograd, 2014

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Martina M. Balac

**NOZZLES INTERACTION INFLUENCE ON  
STRESS STATE AND STRAINS ON  
CYLINDRICAL SHELL OF THE PRESSURE  
VESSEL**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2014

**Mentor doktorske disertacije**

Dr Aleksandar Petrović, redovni profesor,  
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

**Članovi komisije za odbranu doktorske disertacije:**

Dr Vojkan Lučanin, redovni profesor,  
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Dr Taško Maneski, redovni profesor,  
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Dr Dejan Radić, vanredni profesor,  
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Dr Milorad Zrilić, vanredni profesor,  
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-Metalurški fakultet

**Datum odbrane:**

. . 2014.

## PREDGOVOR

*Ovaj rad je nastao nakon višegodišnjeg profesionalnog bavljenja zavarivanjem i zavarenim konstrukcijama (Zavod za zavarivanje, Beograd), kao i nakon višegodišnjih istraživanja na projektima finansiranim od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Republike Srbije, a pre svega tokom rada na projektu „Razvoj i primena metoda i laboratorijske opreme za ocenjivanje usaglašenosti tehničkih proizvoda“ pod evidencionim brojem TR 35031.*

*Pre svega, zahvaljujem se prof. dr Aleksandru Petroviću, mentoru, na izuzetnom zalaganju, podršci, utrošenom vremenu u brojnim korisnim savetima i primedbama koji su usmeravali moj naučni rad i uticali na kvalitet ove disertacije.*

*Veliku zahvalnost izražavam prof. dr Vojkanu Lučaninu, kao članu komisije na korisnim savetima, kao i za svu podršku koja je bila neophodna u realizaciji ovog rada.*

*Da bi sprovela eksperimentalni deo ovog rada veliku pomoć su mi pružili prof. dr Taško Maneski, da u Laboratoriji Katedre za otpornost i konstrukcije, izvršim većinu eksperimenata, kao i prof. dr Milorad Zrilić, da u Laboratoriji za mehanička ispitivanja na Tehnološko - Metalurškom fakultetu, Beograd, obavim deo ispitivanja.*

*Takođe, zahvaljujem se prof. dr Dejanu Radiću koji je doprineo da ova disertacija bude sadržajnije i preglednije.*

*U kompletnom radu mi je veliku pomoć pružila koleginica Branka Marković, dipl.inž.maš. i firma TERMORAD iz Požege, oko izrade eksperimentalne posude i njenog opremanja.*

*Zahvalnost za stručnu i kolegijalnu pomoć dugujem kolegama doc. dr Aleksandru Grboviću, na savetima i smernicama oko stvaranja numeričkog modela, kao i kolegama doc. dr Nenadu Mitroviću, i dr Milošu Miloševiću na velikoj pomoći pri realizaciji eksperimentalnog dela ovog rada.*

*Zahvaljujem se svojim roditeljima i svojoj braći koji su bili uz mene, i davali mi podršku da istrajem do kraja.*

*Suprugu Petru, ćerki Kristini i sinu Stefanu, hvala na velikoj ljubavi, strpljenju i podršci koju su mi pružali u toku izrade ovog rada .*

---

**MEĐUSOBNI UTICAJ PRIKLJUČAKA NA STANJE NAPONA  
I DEFORMACIJA NA CILINDRIČNOM OMOTAČU  
POSUDE POD PRITISKOM**

**Rezime:**

Većina istraživača koja se bavi problematikom određivanja i merenja napona i deformacija na posudama pod pritiskom, fokusirala se na analizu uticaja jednog priključka na napone i deformacije na posudi. Dosadašnja istraživanja su se oslanjala na analitičke proračune bazirane na teoriji ljuske, numeričke proračune i konvencionalne eksperimentalne metode. Najčešće korišćena konvencionalna metoda je metoda mernih traka. Ograničenja ove metode se ogledaju u lokalnom merenju napona i deformacija, i dobijanju vrednosti izmerene veličine u samo jednoj tački.

U okviru ove disertacije sprovedena su eksperimentalna istraživanja, sa ciljem da se pokaže da je moguće primeniti relativno novu metodu digitalne korelacije slika na ispitivanje opreme pod pritiskom. Metoda digitalne korelacije slika omogućava merenja celih polja deformacija, pri čemu se jednim eksperimentalnim merenjem dobija veliki broj podataka koji zamenjuje više desetina mernih traka.

Trodimenzionalni optički sistem GOM i softver ARAMIS primenjeni su za izvođenje eksperimentalne analize međusobnog uticaja priključaka na cilindrični omotač posude pod pritiskom, izložene unutrašnjem pritisku. Eksperimentalna istraživanja su obavljena na jednoj posudi pod pritiskom, na čiji su cilindrični omotač sa jedne strane zavarena dva cilindrična priključka, dimenzija DN 50 i DN 32. Sa druge strane omotača pod uglom od 180°, zavarena su dva priključka dimenzija DN 50. Definisana su dva merna mesta. Merno mesto 1 predstavlja oblast između dva priključka različitih dimenzija, a merno mesto 2 predstavlja oblast između dva priključka istih dimenzija. U okviru mernih mesta definisana su i merna polja pomoću kojih se dobija bolja slika o deformacionom polju između priključaka. Eksperimentalno merenje celih polja deformacija omogućava precizno određivanje kritičnih mesta, odnosno mesta najvećih deformacija.

Metoda konačnih elemenata je odabrana kao metod proračuna u ovom istraživanju jer se dobija kompletno polje deformacija i napona. Numerički proračuni su urađeni u softverskom paketu za proračun metodom konačnih elemenata – ANSYS v14.5. Pomoću MKE moguće je opisati šta se dešava u određenoj zoni geometrijskih diskontinuiteta koja nije dostupna za snimanje, odnosno analizirani su naponi koji se javljaju na definisanim mernim mestima, kao i na mestima koja nisu obuhvaćena eksperimentalnom analizom.

Sama verifikacija numeričkog modela se jednostavnije sprovodi poređenjem dobijenih rezultata deformacija sa eksperimentalnim rezultatima na istim položajima.

Podaci dobijeni eksperimentalnim putem su opisani odgovarajućim analitičkim obrascima, koji prikazuju zavisnost deformacija i dužine definisanog karakterističnog preseka za svako merno mesto i definisano merno polje.

Analizom rezultata pokazano je da se maksimalne vrednosti deformacija i napona ne nalaze na najkraćem rastojanju između dva priključka, već su pomereni.

**Ključne reči:**

Posuda pod pritiskom, priključci, metoda korelacije digitalnih slika, 3D optička analiza, metoda konačnih elemenata, deformacije, naponi.

**Naučna oblast:** Tehničke nauke, mašinstvo

**Uža naučna oblast:** Procesna tehnika

**UDK:** 62-988:620.169.1 (043.3)

66-988:519.6 (043.3)

---

**NOZZLES INTERACTION INFLUENCE ON STRESS STATE  
AND STRAINS ON CYLINDRICAL SHELL OF THE  
PRESSURE VESSEL**

**Abstract:**

Most of the researchers which deal with the problematic of determining and measuring stress and strain on the pressure vessels, focus on the analyses of a nozzle influence on stresses and strains on the vessel cylindrical shell. Previous studies have relied on analytical calculations based on shell theory, numerical calculations and conventional experimental methods. The most commonly used conventional method is strain gauge method. The limitations of this method are reflected in local stress and strain measurement and obtaining values measured in a single point.

In the framework of this dissertation, experimental researches were conducted, with the goal to show that it is possible to apply a relatively new method of digital image correlation, in testing of pressure equipment. Digital image correlation method enables the measurement of the whole strain field, whereby one experimental measurement provides a lot of data which replace dozens of strain gauges.

Three-dimensional optical system GOM and ARAMIS software are applied to perform experimental analyses of nozzles interaction influence on cylindrical shell of the pressure vessel, subjected to internal pressure. Experimental studies were carried out on a pressure vessel, where two cylindrical nozzles were welded on one side of the cylindrical shell, with dimensions DN 50 and DN 32. On the other side of the shell, at the angle of 180°, two nozzles with dimensions DN 50, were welded. Two measuring areas were identified. Measuring area 1 represents the zone between two nozzles with different dimensions, and measuring area 2 represents the zone between two nozzles of the same dimensions. Within the measuring areas, measuring fields are defined to obtain a better picture of the strain field between nozzles. Experimental measurement of the whole strain field enables precise determination of critical points, i.e. point of highest strain.



FEM was selected for calculation in this research since it can provide complete stress and strain field. Numerical calculations were performed using a software package for finite element method ANSYS v14.5. By using FEM, it is possible to describe the behaviour of the specific zone of the geometrical discontinuities, which is difficult for measuring, i.e. in this study stresses that occur in measuring area were analyzed along with the areas which were not included in the experiment.

Verification of numerical model is performed by comparing the obtained strain results with experimental results at the same locations.

Experimental data were described using appropriate analytical expressions which show dependance of strain from length of the characteristic section for every measuring area and defined measuring field.

Analysis of the results has shown that maximum strain and stress values are not located at the shortest distance between two nozzles, but are dislocated.

**Keywords:**

Pressure vessel, nozzles, digital image correlation method, 3D optical analysis, finite element method, strain, stress.

**Scientific field:** Technical sciences – Mechanical engineering

**Narrow scientific field:** Processing technique

**UDK:** 62-988:620.169.1 (043.3)

66-988:519.6 (043.3)

---

**SADRŽAJ**

1. ISPITIVANJE POSUDA POD PRITISKOM.....	1
1.1. Uvod .....	1
1.2. Pregled literaturnih podataka .....	3
1.2.1. Konvencionalne eksperimentalne metode.....	16
1.2.2. Metoda korelacije digitalnih slika .....	20
1.3. Ciljevi istraživanja i primenjene naučne metode .....	23
2. ANALITIČKI PRORAČUN GEOMETRIJE POSUDE POD PRITISKOM .....	25
2.1. Standardizacija proračuna.....	25
2.2. Definisane uticajnih parametara osnovnog modela.....	26
2.3. Izbor materijala.....	27
2.4. Osnovni model.....	27
3. METOD KONAČNIH ELEMENATA .....	30
3.1. Osnovi metode konačnih elemenata .....	30
3.2. Definisane geometrije modela .....	35
3.3. Osobine materijala .....	36
3.4. Opterećenja .....	37
3.5. Oslonci – granični uslovi .....	38
4. REZULTATI NUMERIČKE ANALIZE .....	39
4.1. Rezultati numeričkih simulacija .....	39
4.2. Linearna analiza.....	41
4.2.1. Rezultati numeričkih proračuna za merno mesto 1 .....	41
4.2.2. Rezultati numeričkih proračuna za merno mesto 2.....	45
4.3. Nelinearna numerička analiza.....	49
4.3.1. Rezultati nelinearnih numeričkih proračuna za MM1.....	53
4.3.2. Rezultati nelinearnih numeričkih proračuna za MM2.....	54

---

5.	EKSPERIMENTALNE METODE .....	57
5.1.	Eksperimentalno određivanje deformacija i naponskog stanja na cilindričnom omotaču posude pod pritiskom .....	57
5.1.1.	Sistem za 3D optičko merenje deformacija.....	57
5.1.2.	Definisanje merne zapremine.....	59
5.1.3.	Priprema merne površine .....	60
5.1.4.	Kalibracija sistema .....	62
5.1.5.	Definisanje veličine „malih površina“ .....	64
5.1.6.	Proračun deformacija malih površina .....	66
5.1.7.	Proračunska maska.....	67
5.1.8.	Definisanje početne tačke.....	68
5.1.9.	Proračun deformacije .....	68
5.1.9.1.	Metoda linearne deformacije .....	68
5.1.9.2.	Parametarska metoda za proračun deformacije.....	70
5.1.10.	Rezultati sistema za optičko merenje deformacija.....	71
6.	EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA I POSTUPAK ISPITIVANJA.....	72
6.1.	Osnovni model.....	73
6.2.	Vrste opterećenja.....	76
6.3.	Priprema eksperimentalne instalacije .....	77
6.4.	Postupak merenja.....	77
7.	REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA.....	79
7.1.	Rezultati eksperimenta.....	79
7.2.	Rezultati eksperimentalnih merenja za merno mesto 1 .....	79
7.2.1.	Rezultati merenja za merno mesto 1, merno polje 1 .....	80
7.2.1.1.	Statistička analiza polinomnih funkcija .....	88
7.2.2.	Rezultati merenja za merno mesto 1, merno polje 2 .....	95
7.2.3.	Rezultati merenja za merno mesto 1, merno polje 3 .....	105
7.3.	Rezultati merenja deformacija za merno mesto 2.....	120
7.3.1.	Rezultati merenja deformacija za merno mesto 2, merno polje 1 .....	121
7.3.2.	Rezultati merenja deformacija za merno mesto 2, merno polje 2.....	129

---

7.4. Metoda mernih traka .....	136
8. ANALIZA REZULTATA .....	139
8.1. Diskusija ekperimentalnih rezultata .....	140
8.2. Diskusija numeričkih rezultata .....	143
8.3. Poređenje numeričkih i eksperimentalnih podataka .....	144
8.4. Faktori koncentracije napona .....	145
8.5. Diskusija osnovnih naučnih ciljeva disertacije .....	148
8.6. Pravci daljih istraživanja .....	149
9. ZAKLJUČAK .....	150
10. LITERATURA .....	154

**INDEKS SKRAĆENICA I OZNAKA**

$A$	Izduženje u trenutku loma, %;
$A, B1, B2, B3$ i $B4$	Koeficijenti polinomnih funkcija;
3D	Trodimenzionalna;
$d$	Prečnik posude pod pritiskom, mm;
$D_e$	Spoljašnji prečnik posude pod pritiskom, mm;
DIC	Digital Image Correlation, korelacija digitalnih slika;
$D_m$	Srednji prečnik posude pod pritiskom, mm;
$d_p$	Prečnik priključaka, mm;
$E$	Jangov modul elastičnosti, GPa;
$e_{a,c}$	Debljina zida cilindričnog omotača, mm;
$e_{a,p}$	Debljina zida priključaka, mm;
$f$	Nominalni proračunski napon, MPa;
MKE	Metoda konačnih elemenata;
MM	Merno mesto;
$P$	Pritisak, MPa;
$R^2$	Koeficijent determinacije;
$R_m$	Zatezna čvrstoća, MPa;
$R_{p0,1}$	Konvencionalni napon tečenja, MPa;
RSS	Suma srednjih kvadratnih odstupanja;
$x$	Koordinata tačke na preseku, mm;
$y(x)$	Vrednost Mizesove deformacije, %;
$z$	Koeficijent valjanosti zavarenog spoja;

$\alpha_k$	Faktor koncentracije napona;
$\sigma_{max}$	Maksimalni napon, MPa;
$\sigma_n$	Nominalni napon, MPa;
$\nu$	Poasonov koeficijent.

**SPISAK SLIKA**

- Slika 1.1. Presek dve cilindrične ljuske [9]*
- Slika 1.2. Koordinatni sistem za određivanje preseka priključak – cilindrični omotač [9]*
- Slika 1.3. Osnovni model preseka dva cilindra [10]*
- Slika 1.4. Uporedni prikaz vrednosti faktora koncentracije napona dobijenih eksperimentalnom, numeričkom i analitičkom metodom analize modela izloženog unutrašnjem pritisku [10]*
- Slika 1.5. Geometrija preseka dva cilindra [15]*
- Slika 1.6. MKE model sa ne radijalnim priključkom [15]*
- Slika 1.7. Rezultati za presek omotača pod opterećenjem za slučaj  $\alpha = 30^\circ$  [15]*
- Slika 1.8. Maksimalni ekvivalentni napon [16]*
- Slika 1.9. a) Napon po obimu posude, b) Podužni napon [23]*
- Slika 1.10. Ukupna deformacija za debljinu omotača 8 mm, [23]*
- Slika 1.11. Naponsko stanje posude [23]*
- Slika 1.12. Deformacija posude [23]*
- Slika 1.13. Ekvivalentni Von Mizesovi naponi [23]*
- Slika 1.14. Položaji priključaka prema cilindričnom omotaču [25]*
- Slika 1.15. Anvelopa napona za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom [25]*
- Slika 1.16. Položaj i raspored mernih traka [33]*
- Slika 1.17. Numerički rezultati pri opterećenju  $P = 1,5$  MPa, elastična oblast [33]*
- Slika 1.18. Numerički rezultati pri opterećenju  $P = 4,5$  MPa, plastična oblast [33]*
- Slika 1.19. Prikaz pukotine nastale na spoju dva cilindra [33]*
- Slika 1.20. Poređenje numeričkih i eksperimentalnih rezultata: a) merna traka 1, b) merna traka 7, [33]*
- Slika 1.21. Šema sistema za dvodimenzionalnu korelaciju digitalnih slika 2D – DIC [41]*
- Slika 1.22. Šema sistema za trodimenzionalnu korelaciju slika [41]*
- Slika 2.1. Geometrija posude na kojoj je izvršeno ispitivanje (mere su u mm)*
- Slika 3.1. Aproksimacija kontinuuma primenom metode konačnih elemenata*
- Slika 3.2. Mreža konačnih elemenata*

*Slika 3.3. Primeri solid elemenata za modeliranje trodimenzionalnih struktura*

*Slika 3.4. 3D model posude*

*Slika 3.5. Pravac opterećenja unutrašnjim pritiskom*

*Slika 4.1. Model posude korišćen u simulaciji*

*Slika 4.2. Vrednosti Mizesovih deformacija za MM1, za opterećenje unutrašnjim pritiskom 0,5 MPa*

*Slika 4.3. Naponsko polje za MM1, za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa*

*Slika 4.4. Vrednosti Mizesovih deformacija za MM1, za opterećenje unutrašnjim pritiskom 1 MPa*

*Slika 4.5. Naponsko polje za MM1, za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 1 MPa*

*Slika 4.6. Vrednosti Mizesovih deformacija za MM2, za opterećenje unutrašnjim pritiskom 0,5 MPa*

*Slika 4.7. Naponsko polje za MM2, za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa*

*Slika 4.8. Vrednosti Mizesovih deformacija za MM2, za opterećenje unutrašnjim pritiskom 1 MPa*

*Slika 4.9. Naponsko polje za MM2, za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 1 MPa*

*Slika 4.10. Epruveta za određivanje mehaničkih karakteristika materijala*

*Slika 4.11. Ispitivanje zatezanjem na kidalici*

*Slika 4.12. Dijagram  $\sigma - \epsilon$  za materijal X5 Cr Ni 18 10*

*Slika 4.13. Polje deformacija između priključaka, MM1, za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa*

*Slika 4.14. Naponsko polje za MM1, za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa*

*Slika 4.15. Polje deformacija između priključaka, MM2, za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa*

*Slika 4.16. Naponsko polje za MM2, za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa*

*Slika 5.1. Aramis sistem*

*Slika 5.2. Senzorska jedinica [77]*

*Slika 5.3. Primeri loših i dobrih stohastičkih šara*

*Slika 5.4. Izgled kalibracione ploče sa dve referentne dužine*

*Slika 5.5. Numeracija tačaka u toku kalibracije: a) leva kamera; b) desna kamera*



*Slika 5.6. Deformacija malih površina, a) korak 0, b) korak 1 [77]*

*Slika 5.7. "Male površine" na cilindričnom omotaču posude između priključaka*

*Slika 5.8. Proračunska maska za cilindrični omotač posude pod pritiskom između priključaka a) prilikom definisanja i b) definisana proračunska maska*

*Slika 5.9. Grafički prikaz principa linearne metode proračuna deformacije [77]*

*Slika 5.10. Grafički prikaz principa parametarske metode proračuna deformacija [77]*

*Slika 6.1. Eksperimentalna instalacija, merno mesto 1*

*1 – Stereo kamere; 2 – Posuda; 3 – Priključak 1 DN 50; 4 – Priključak 2 DN 32; 5 – Oslonac; ; 6 – Manometar; 7 – Osvetljenje; 8 – Ručna pumpa*

*Slika 6.2. Položaj mernog mesta 1*

*1 – Priključak 1, DN 50; 2 – Priključak 2, DN 32*

*Slika 6.3. Eksperimentalna instalacija, merno mesto 2*

*1 – Stereo kamere; 2 – Posuda; 3 – Priključci DN 50; 4 – Manometar; 5 – Osvetljenje*

*Slika 6.4. Položaj mernog mesta 2, 1 - Priključci DN 50*

*Slika 7.1. Položaj mernih polja i raspored mernih traka*

*Slika 7.2. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa za MM1, merno polje 1*

*Slika 7.3. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa za merno polje 1*

*Slika 7.4. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa za MM1, merno polje 1*

*Slika 7.5. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa za merno polje 1*

*Slika 7.6. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa za MM1, merno polje 1*

*Slika 7.7. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa, merno polje 1*

*Slika 7.8. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 0,5 MPa*

*Slika 7.9. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 1 MPa*

*Slika 7.10. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 1,5 MPa*

*Slika 7.11. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa za MM1, merno polje 2*

*Slika 7.12. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa za MM1, merno polje 2*

*Slika 7.13. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa za MM1, merno polje 2*

*Slika 7.14. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 0,5 MPa*

*Slika 7.15. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 1 MPa*

*Slika 7.16. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 1,5 MPa*

*Slika 7.17. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa za MM1, merno polje 3*

*Slika 7.18. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa, merno polje 3*

*Slika 7.19. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa za MM1, merno polje 3*

*Slika 7.20. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa, merno polje 3*

*Slika 7.21. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa za MM1, merno polje 3*

*Slika 7.22. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa, merno polje 3*

*Slika 7.23. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 0,5 MPa*

*Slika 7.24. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 1 MPa*

*Slika 7.25. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 1,5 MPa*

*Slika 7.26. Položaj mernih polja*

*Slika 7.27. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa za MM2, merno polje 1*

*Slika 7.28. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa, merno polje 1*

*Slika 7.29. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa za MM 2*

*Slika 7.30. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa, merno polje 1*

*Slika 7.31. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa za MM 2, merno polje 1*

*Slika 7.32. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa, merno polje 1*

*Slika 7.33. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa za MM2, merno polje 2*

*Slika 7.34. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa za MM2, merno polje 2*

*Slika 7.35. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa za MM2, merno polje 2*

*Slika 7.36. Eksperimentalna instalacija za ispitivanje mernim trakama*

*Slika 8.1. Slika 8.1. Položaj mesta za određivanje faktora koncentracije napona za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa, a) MM1, b) MM2*

*Slika 8.2. Model posude sa jednim priključkom DN 50*

*Slika 8.3. Rezultati numeričkog proračuna za jedan priključak: a) naponi; b) deformacija*

**SPISAK TABELA**

*Tabela 1.1. Rezultati dobijeni numeričkim proračunima za debljinu omotača od 8 mm i za različite položaje priključaka*

*Tabela 2.1. Karakteristike materijala posude pod pritiskom (SRPS EN 10088:2011)*

*Tabela 4.1. Rezultati određivanja zateznih karakteristika za X5 CrNi 18 10*

*Tabela 7.1. Vrednosti Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom za MM1 za merno polje 1*

*Tabela 7.2. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima*

*Tabela 7.3. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima*

*Tabela 7.4. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima*

*Tabela 7.5. Vrednosti Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom za MM1 za merno polje 2*

*Tabela 7.6. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima*

*Tabela 7.7. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima*

*Tabela 7.8. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima*

*Tabela 7.9. Vrednosti Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom za MM1 za merno polje 3*

*Tabela 7.10. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima*

*Tabela 7.11. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima*

*Tabela 7.12. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima*

*Tabela 7.13. Vrednosti Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom za MM2 za merno polje 2*

*Tabela 7.14. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima*

*Tabela 7.15. Vrednosti Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom za MM2 za merno polje 2*

*Tabela 7.16. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima*

*Tabela 7.17. Uporedni prikaz rezultata dobijenih numeričkim i eksperimentalnim ispitivanjem posude za vrednost unutrašnjeg pritiska od 1 MPa*

*Tabela 8.1. Rezultati numeričke analize*

*Tabela 8.2. Uporedni prikaz rezultata numeričke i 3D eksperimentalne analize*

## 1. ISPITIVANJE POSUDA POD PRITISKOM

### 1.1. Uvod

Većina konstrukcionih elemenata koji predstavljaju delove opreme i aparata u procesnoj industriji, podležu proračunima čvrstoće koji se svode na oblik ploče i ljuske.

Posude pod pritiskom su najrasprostranjeniji aparati u različitim industrijskim sektorima, kao što su nuklearni, petrohemijski i hemijski sektori. S obzirom na opterećenja kojima su posude pod pritiskom izložene, projektovanje, konstruisanje, ispitivanje i kontrolisanje opreme predstavlja oblast tehnike kojoj se poklanja dosta pažnje. Posude pod pritiskom i instalacije sa posudama su delovi postrojenja koja služe za transport, čuvanje, pretakanje, mešanje i odvijanje različitih hemijskih reakcija i drugih tehnoloških procesa koji se odvijaju na povišenim ili sniženim pritiscima i temperaturama, a pod različitim vrstama opterećenja.

Analiza promene naponskih stanja i deformacionih polja, kao posledica geometrijskih diskontinuiteta u okolini mesta spajanja dve ljuske različitih ili istih geometrijskih oblika je problem koji nije dovoljno istražen zbog toga što su njegova rešenja složena. Problem koji se najčešće javlja u praksi, je uticaj cevnih priključaka na naponsko stanje i deformacije cilindričnih ili sferičnih omotača posuda pod pritiskom. Cilindrične površine su česti geometrijski oblici i usled raznih tehničkih zahteva narušava se kontinuitet konture površine, što uzrokuje povećanje napona na tom mestu.

U okviru ovog poglavlja dat je pregled literature i radova koji su urađeni na temu uticaja priključaka malog ili velikog prečnika na naponsko stanje i deformacije na primeru spoja cilindar/cilindar. Priključci ili otvori na posudama pod pritiskom se koriste za različite namene (pražnjenje i punjenje posude, za postavljanje mernih instrumenata, za kontrolu i intervencije na posudama). Postavljaju se uglavnom na periferiju posude i tako remete simetriju posude, a s obzirom da i geometrijski parametri priključaka i omotača variraju, izazivaju geometrijske diskontinuitete na omotaču cilindrične posude.

Priključci na cilindričnim omotačima mogu biti pod uglom od  $90^\circ$  u odnosu na podužnu osu omotača ili pod uglom koji je veći ili manji. Što se ugao više razlikuje od pravog ugla dolazi do povećanja napona u prodoru dva cilindra. Naponi na cilindričnom omotaču između dva priključka su povećani upravo usled promena geometrijskog kontinuiteta i zavarenih spojeva na mestima spoja priključka i omotača, pa je taj deo omotača opterećeniji u odnosu na omotač gde nema priključaka i nema njihovog uticaja.

U ovom radu korišćene su teorijske, eksperimentalne i numeričke metode. Analitički postupak je zasnovan na bezmomentnoj teorije ljske. U velikom broju slučajeva kada analizirana struktura ima složenu geometriju, usled različitih vrsta opterećenja ili ako su strukture od različitih materijala, naponsko stanje posuda pod pritiskom je nepovoljno i nije moguće naći rešenje u analitičkom obliku. Za složenu geometriju se najčešće koriste numeričke metode.

Metod konačnih elemenata (MKE) je savremeni, najčešće korišćen numerički metod, koji se koristi za projektovanje i proračun konstrukcija i elemenata, rešavanjem problema mehanike kontinuuma. U zavisnosti od problema koji se rešava, kao rešenja se dobijaju odgovarajuće veličine. Numerički proračun je u ovom radu izvršen za celu posudu sa priključcima, a analiziran je deo ljske na kojoj se nalaze priključci. Korišćen je programski paket ANSYS v.14.5. U odnosu na druge komercijalne softvere za konačne elemente (kao što su ABAQUS ili NASTRAN), on nudi korisnicima veliki broj tipova analiza, kao i moćne alatke za 3D modeliranje. Time je omogućeno relativno lako kreiranje geometrije.

Eksperimentalna istraživanja baziraju se na izradi eksperimentalne instalacije (modela), a merenja su obavljena primenom relativno nove 3D optičke beskontaktno metode za merenje celih polja deformacija. Na osnovu analitičkog proračuna definisan je model, odabrana je geometrija posude i priključaka, kao i opterećenja. Eksperimentalna merenja deformacija i napona na odabranom modelu su izvršena u laboratorijskim uslovima. Dobijeni eksperimentalni rezultati su upoređeni sa rezultatima dobijenim numeričkim proračunom i na taj način izvršena je verifikacija numeričkog modela.

Predmet istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji je uticaj priključaka na naponsko stanje i polje deformacija cilindričnog omotača, i to u zoni između dva cevna priključka,

postavljena na minimalna, proračunom prema referentnom standardu, određena međusobna rastojanja. Posuda pod pritiskom je izložena unutrašnjem pritisku.

## 1.2. Pregled literaturnih podataka

Teorijska istraživanja čvrstoće posuda pod pritiskom se sprovode analitičkim i numeričkim metodama. Dat je prikaz radova koji se bave analitičkim pristupom određivanja naponskih stanja, određivanja faktora koncentracije napona, a koje se sprovode uz niz različitih uprošćenja i aproksimacija, kao i radovi koji se bave numeričkom i eksperimentalnom analizom.

Teorija elastičnosti tankih ljuski, podrazumeva da je odnos debljine ljuske i poluprečnika krivine ljuske manji od 1/20 [4], a nastala je kao specijalan slučaj teorije elastičnosti, gde su još u 19. veku postavljene osnovne jednačine koje su bile polazne tačke za istraživače zainteresovane za ljuske [5]. Jednačine su složene i nisu mogle lako da se reše, i tako su se razvili proračuni koji se zasnivaju na približnom prilagođavanju obrazaca teorije ljuski i na korekcijama koje obuhvataju koncentracije napona i oslabljenja.

U daljem tekstu biće predstavljen pregled radova koji su urađeni na temu uticaja cilindričnih priključaka manjeg ili većeg prečnika na naponsko stanje i deformacije cilindričnih omotača na kojima se nalaze.

U cilju određivanja lakšeg kriterijuma za projektovanje posuda pod pritiskom još 1960. godine počelo je da se traga za analitičkim rešenjem. Eringen [6], Lekerkerker [7] i Qian [8] su došli do analitičkog rešenja pomoću Donelijeve jednačine za omotače sledeće geometrije

$$\rho_o = \frac{r_o}{R} \leq 0,25 \text{ i } \rho_o \cdot \sqrt{\frac{R}{T}} < 1, \quad (1.1)$$

gde je:

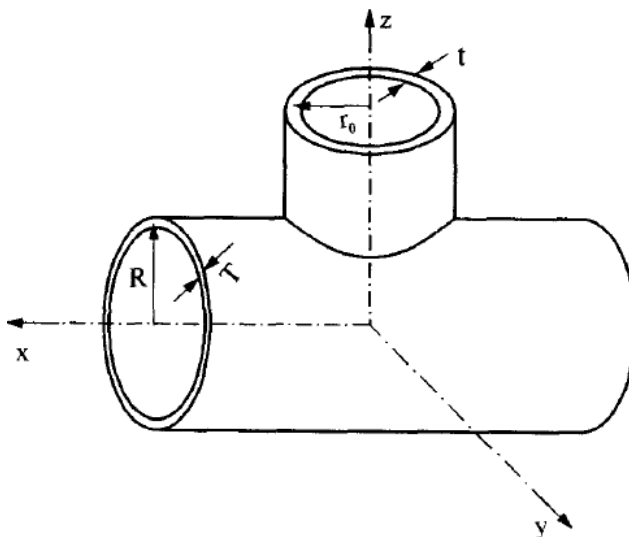
$\rho_o$  - odnos poluprečnika priključne cevi i omotača,

$r_o$  - poluprečnik priključne cevi,

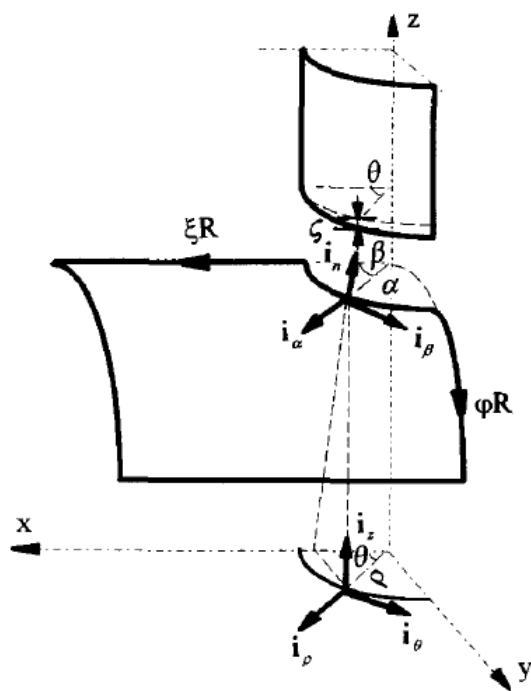
$R$  - poluprečnik omotača,



$T$  - debljina omotača.



Slika 1.1. Presek dve cilindrične ljuške [9]



Slika 1.2. Koordinatni sistem za određivanje preseka priključak – cilindrični omotač [9]

Jedan od osnovnih problema u analizi naponskog stanja cilindričnog omotača je određivanje geometrije preseka dva cilindra.

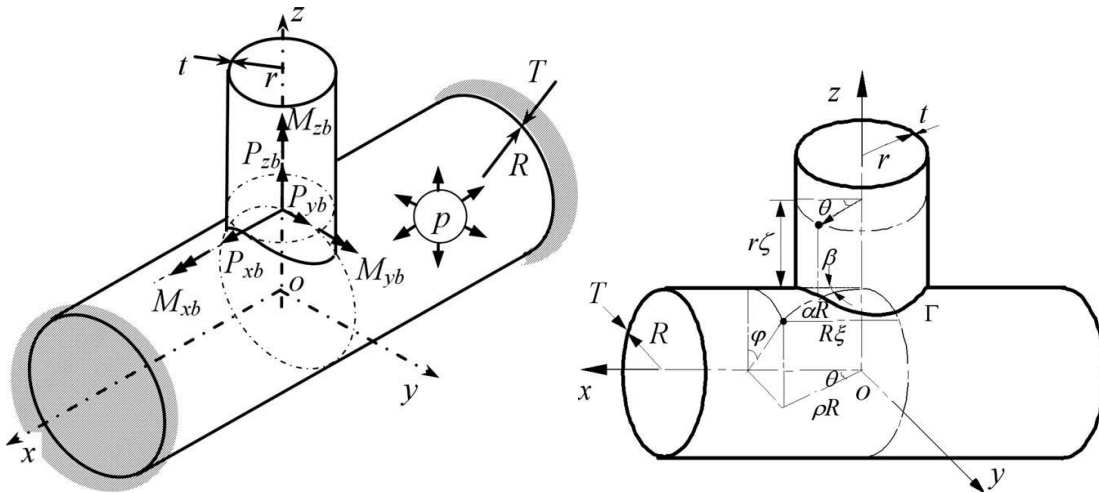
U radu Ksua (Xua) [9] je dato jedno analitičko rešenje pomeranja u cilindričnim omotačima sa velikim otvorima. Umesto Donelijeve jednačine korišćena je modifikovana Morlejeva jednačina

$$\left[ \nabla^4 + \nabla^2 - 4 \cdot \mu^2 \cdot i \cdot \frac{\partial^2}{\partial \cdot \xi^2} \right] \cdot \lambda = 0 - \text{Morlejeva (Morley) jednačina.} \quad (1.2.)$$

Teorijsko rešenje za tanke ljuske se dobija rešavanjem kompleksnih graničnih problema parcijalnim diferencijalnim jednačinama i za omotač i za priključak. Ksu je predstavio granične linije preseka dva cilindra, postavio granične uslove, a zatim sistem jednačina razvio u Furijeove (Fourier) redove. Rezultati dobijeni ovom metodom, i poređenje izračunatih faktora koncentracije napona prezentovani su u radu [9], i to za slučaj odnosa prečnika  $\frac{d}{D} \leq 0,8$ . U nastavku svojih istraživanja Ksu i autori [10 - 13] su

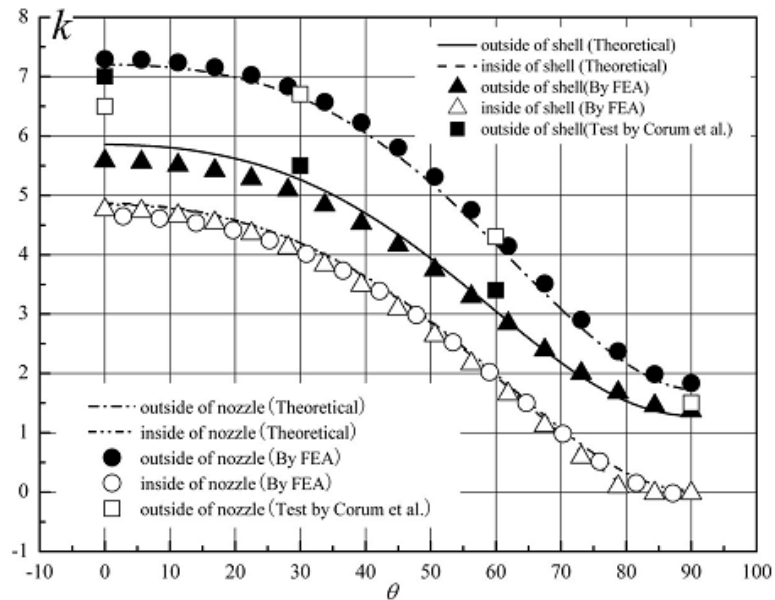
prezentovali svoje rezultate sa ciljem da razviju analitičko rešenje koje može da se primeni za cilindrične omotače sa priključcima koji su izloženi dejstvu unutrašnjeg pritiska i spoljnih opterećenja; da prošire opseg analitičkih rešenja; da obezbede seriju krivih za spoj omotač – priključak sa različitim geometrijskim parametrima za 7 različitih slučajeva opterećenja, a koje bi kasnije bile od koristi za projektante. Neka od njihovih analitičkih rešenja su prihvaćena u Chinese Pressure Vessel Design Code. Opseg primene teorijskih rešenja je proširen od  $\frac{d}{D} \leq 0,8$  i  $\lambda = \frac{d}{\sqrt{D \cdot T}} \leq 8$  do  $\frac{d}{D} \leq 0,9$  i  $\lambda = \frac{d}{\sqrt{D \cdot T}} \leq 12$ .

Na slici 1.3. je prikazan model preseka dva cilindrična omotača, izložena unutrašnjem pritisku, pod uticajem unutrašnjih sila i momenata na priključku.



Slika 1.3. Osnovni model preseka dva cilindra [10]

Rezultati dobijeni teorijskom, eksperimentalnom i numeričkom analizom za maksimalne napone oko linije preseka dva cilindra usled dejstva unutrašnjeg pritiska su prikazani na slici 1.4.



Slika 1.4. Uporedni prikaz vrednosti faktora koncentracije napona dobijenih eksperimentalnom, numeričkom i analitičkom metodom analize modela izloženog unutrašnjem pritisku [10]

U daljim istraživanjima autori [10 - 13] su dali grafičke prikaze rezultata dobijenih numeričkom metodom kao i teorijske rezultate za vrednosti napona u zoni linije preseka omotača i priključka, i to usled dejstva unutrašnjeg pritiska, kao i usled dejstva spoljašnje sile i momenata uvijanja i savijanja, za vrednosti geometrijskih parametara  $d/D = 0,93$ ,  $D/T = 166$  i  $t/T = 1$ . Ksu i autori su probali da zahtevanu debljinu materijala, i za cilindrični omotač i za priključak, odrede koristeći svoja teorijska rešenja. Sledeći korak je da se na spoju gde je priključak izložen spoljašnjem opterećenju, odrede apsolutne vrednosti napona na omotaču na spoju izloženom unutrašnjem pritisku i spoljašnjem opterećenju, pri čemu je za unutrašnje sile i momente na priključku urađen set linija (krivih) dobijenih prezentovanom teorijskom metodom.

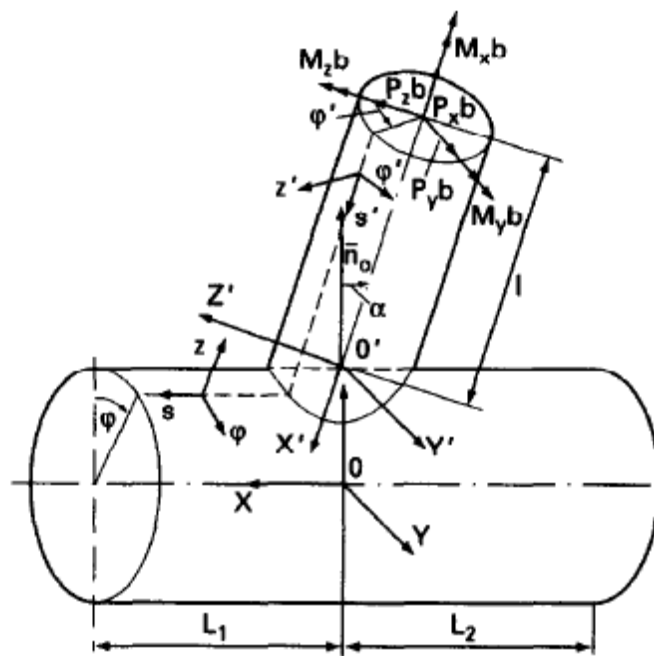
U svojim radovima Skopinski [14,15] je analizirao cilindrični omotač sa priključkom opterećen unutrašnjim pritiskom i spoljašnjim opterećenjem. Proučavao je više slučajeva položaja priključka u odnosu na podužnu osu cilindričnog omotača. U okviru rada [14] analizu je vršio na modelima koji su bili opterećeni unutrašnjim pritiskom. Na osnovu izvršenih proračuna pokazao je sledeće: da se maksimalna sila na cilindričnom omotaču nalazi na izvodnici cilindričnog omotača koja seče osu priključka; da naponi od savijanja preovlađuju u odnosu na aksijalne napone; da je parametar  $\frac{h}{H}$  glavni za određivanje aksijalnih i cirkularnih napona; aksijalni napon je dominantan za ljuske manje debljine, a cirkularni napon je dominantan za veće debljine.

Nastavljajući svoja istraživanja [15] naponskog stanja u okolini preseka dve cilindrične ljuske, primenom metode konačnih elemenata, Skopinski je prikazao svoje rezultate koji se odnose na neradijalni priključak. Priključak je opterećen spoljašnjim silama i momentima. Za numeričku analizu koristio je samo jednu polovinu modela.

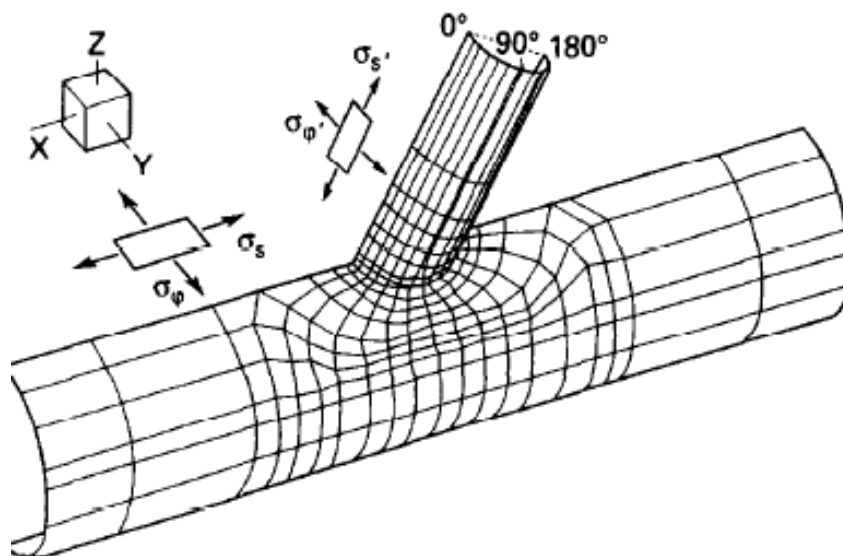
Geometrijski parametri na osnovu kojih je izvršena analiza su

$$\frac{r}{R}, \frac{h}{H}, \frac{R}{H}, \alpha.$$

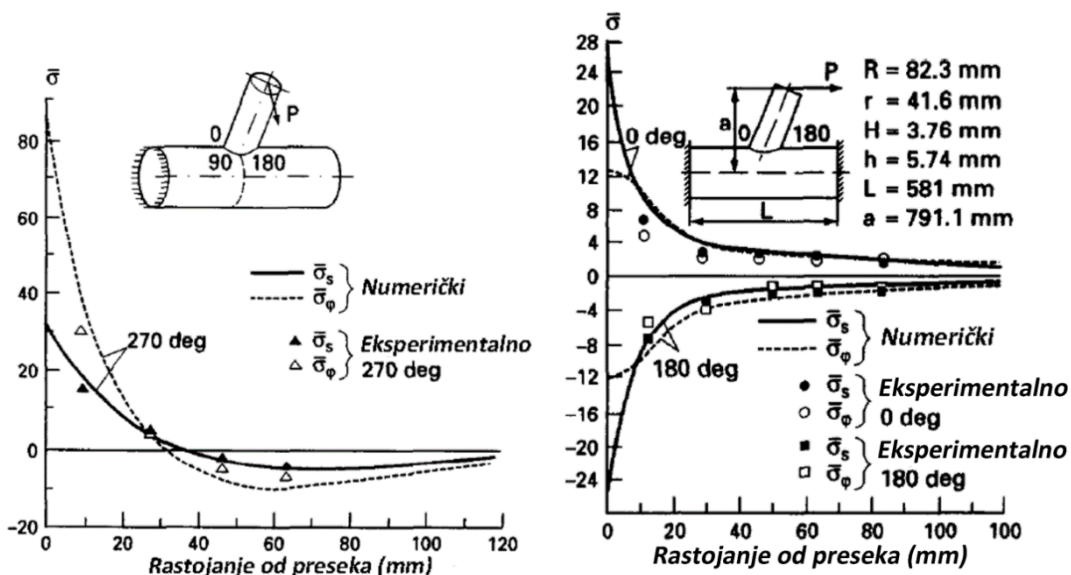
Na slici 1.5. je prikazana geometrija preseka dva cilindra korišćena u ovom proračunu.



Slika 1.5. Geometrija preseka dva cilindra [15]



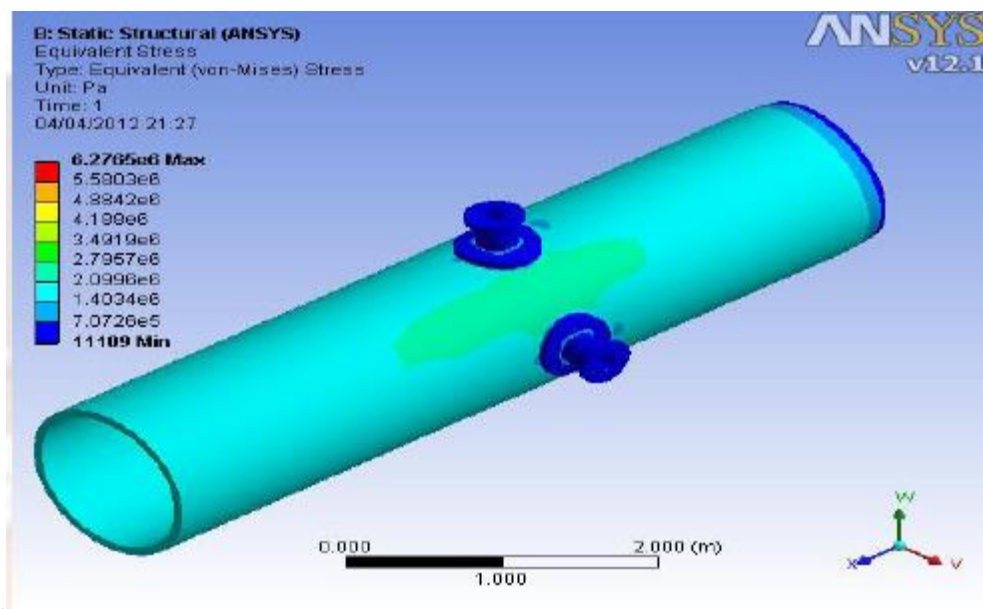
Slika 1.6. MKE model sa ne radijalnim priključkom [15]



Slika 1.7. Rezultati za presek omotača pod opterećenjem za slučaj  $\alpha = 30^\circ$  [15]

Na slici 1.7. je dat uporedni prikaz numeričkih i eksperimentalnih rezultata. Za određivanje koncentracije napona na preseku dva cilindrična omotača korišćen je kriterijum Tresce. Nakon proučavanja naponskog stanja u okolini preseka dve cilindrične ljuske Skopinski je došao do zaključka da se u svim slučajevima napon smanjuje sa povećanjem ugla  $\alpha$ , i da su naponi veći na priključku nego na samom omotaču [15].

Na primeru debelozidne posude pod pritiskom sa priključcima postavljenim na omotač posude pod različitim međusobnim uglovima Narale i Kachare su u svom radu [16] analizirali naponsko stanje na omotaču i u okolini priključaka primenom numeričkih proračuna. Dva priključka su postavljena na omotač posude izložene unutrašnjem pritisku od 0,23 MPa, a analiza izvršena za slučaj kada su priključci postavljeni pod međusobnim uglovima od  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  i  $180^\circ$ . Na slici 1.8. prikazan je model posude sa dva priključka, postavljena pod uglom od  $90^\circ$  na omotač posude.



Slika 1.8. Maksimalni ekvivalentni napon [16]

Maksimalne vrednosti napona se javljaju upravo na spoju omotača i priključka, što je i bilo očekivano. Ono što je potrebno istaći je da su došli do zaključka da se manji naponi javljaju kada su priključci simetrično postavljeni na omotač u odnosu na slučaj kada su nesimetrično postavljeni. U slučaju simetrije je i faktor koncentracije napona manji.

Pored analitičkih postupaka, često se za prezentaciju rezultata koristi faktor koncentracije napona. Među prvima je rad Lekija (Leckie) i Penija (Penny) [17] o priključcima na sfernim omotačima. Oni su za prikazivanje rezultata koristili faktore koncentracije napona.

Faktor koncentracije napona predstavlja odnos najvećeg stvarnog napona i nominalnog napona (napon u zoni u kojoj nema uticaja geometrijskih diskontinuiteta) [18 - 22].

Detaljnije informacije za napone na priključku na cilindričnom omotaču su kasnije prezentovali Deker (Dekker) i Stikvoort (Stikvoort) [18]. Radi lakšeg poređenja rezultata dobijenih različitim metodama proračuna, intenzitet napona usled opterećenja unutrašnjim pritiskom je transformisan u faktor koncentracije napona (SCF - eng. *Stress concentration factor*), koji je definisan kao

$$\sigma = SCF \cdot \frac{pR}{T}, \quad (1.3.)$$

kao funkcija specifične geometrije omotača i priključka, gde su karakteristični parametri:  $\frac{R}{T}$ ,  $\frac{t}{T}$ ,  $\frac{d}{D}$ . Različiti standardi i metode daju i različite procedure za izračunavanje faktora koncentracije napona.

Deker je numeričkom metodom [19] izračunao i prikazao ne samo napone na omotaču, već i napone na zidu priključka. Za  $\gamma$  parametar je za analizu uzeo odnos srednjeg radijusa cilindra i debljine zida. Na dijagramima u svom radu [19] je prikazao zavisnost faktora koncentracije napona od parametra kojim je određena veličina priključka. Faktor koncentracije napona SCF je u funkciji geometrije priključka i omotača, koja je definisana parametrima  $\beta$  (relativni odnos veličine priključka u odnosu na veličinu cilindra),  $\gamma$  i odnosom debljina  $\frac{t}{T}$ . Nakon numeričkih analiza došlo se do zaključka da je pri  $\frac{t}{T} = 1$  intenzitet napona na priključku isti, pri  $\frac{t}{T} < 1$  intenzitet napona na zidu priključka je veći nego odgovarajući napon na omotaču. U slučaju  $\frac{t}{T} > 1$  napon na priključku je manji nego napon na omotaču.

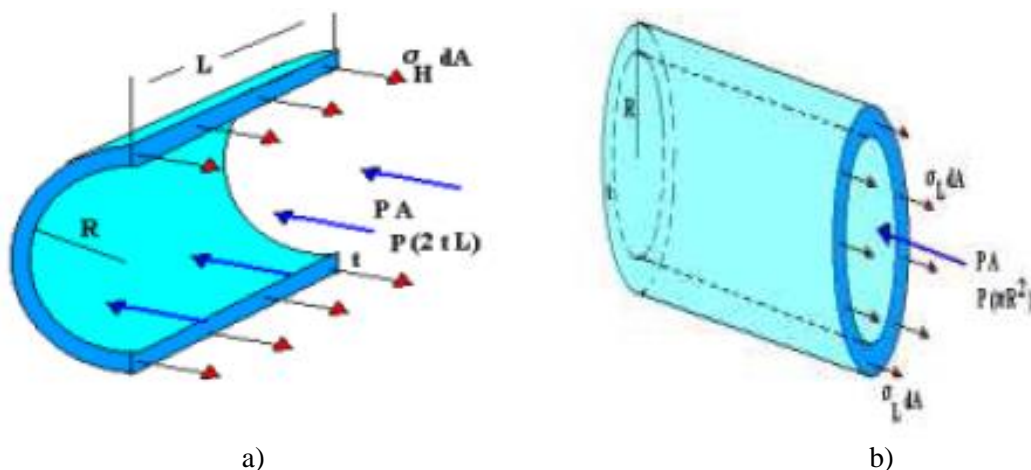
Dekker i Bos [20] su tabelarno prikazali geometrijske podatke dobijene numeričkom analizom, dobijene bezdimenzione parametre, intenzitete napona i to i na omotaču i na priključku, kao i SCF – faktor koncentracije napona. Za svaki odnos  $\gamma$  prikazan je dijagram vrednosti dobijenih numeričkom metodom, izračunati SCF za optrećenje unutrašnjim pritiskom kao funkcija  $\beta$  parametra i odnosa  $t/T$ .

Liu je u svom radu [21] prikazao jedan od načina određivanja faktora koncentracije napona za prodor dve cilindrične tanke ljuske izložene unutrašnjem pritisku. Faktor koncentracije napona je dobijen koristeći teoriju elastičnosti tanke ljuske. Korišćena je i numerička 3D metoda konačnih elemenata. Dobijeni rezultati su pokazali da se faktor koncentracije napona značajno smanjuje sa porastom odnosa  $t/T$ , a manje smanjenje je dobijeno kada je manji odnos  $d/\sqrt{D \cdot T}$ , u slučaju kada se odnos  $D/T$  ne menja.



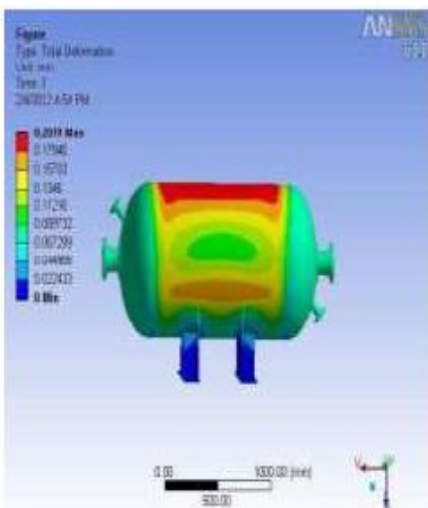
Među značajnim zapažanjima su i rezultati prezentovani u radu [22], gde je pokazano da faktor koncentracije raste sa porastom odnosa prečnika  $d/D$  za određeni odnos  $D/T$ . Takođe je prikazano da za određeni odnos  $d/D$ , faktor koncentracije napona raste kako se povećava i odnos  $D/T$ . U okviru ovog rada je pokazano i da oštećeni zavareni spoj na preseku dva cilindra uzrokuje stanjenje zida, tako da se faktor koncentracije napona povećava sa procentualnim povećavanjem stanjenja zida omotača.

Ono što je potrebno istaći to je da lokacija i veličina otvora i priključaka na posudi najviše utiče na pojavu lokalnih napona i deformacija. U radu [23] je pokazano da promena lokacije priključaka na posudi utiče na smanjenje napona, kao i da niže vrednosti stepena sigurnosti utiču na smanjenje debljine posude samim tim i na ekonomičnost pri projektovanju posude pod pritiskom. Raspodela napona je prikazana na slici 1.9.



Slika 1.9. a) napon po obimu posude, b) podužni napon, [23]

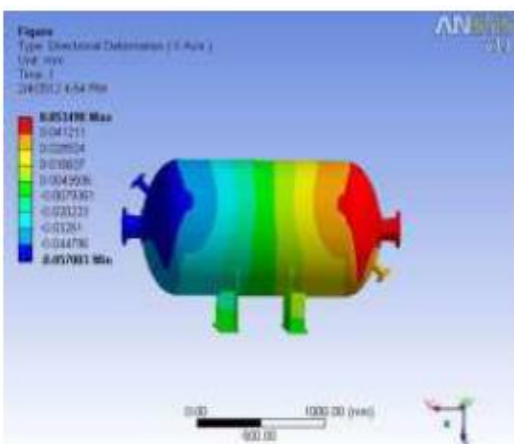
Numerička analiza naponskog stanja je izvršena kako bi se ispitala čvrstoća posude izložene unutrašnjem pritisku varirajući debljinu omotača i položaj priključaka. Proračun je izvršen za 4 različite debljine omotača i to 6, 8, 10 i 12 mm.



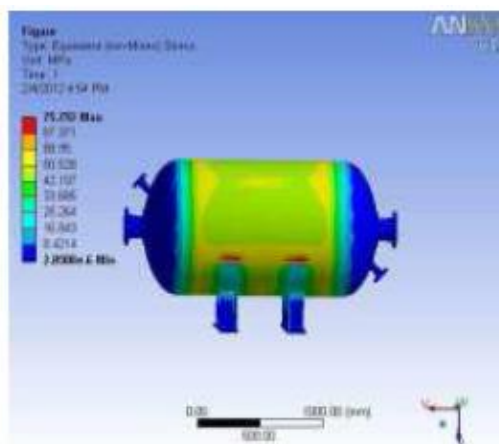
Slika 1.10. Ukupna deformacija za debljinu omotača 8 mm [23]



Slika 1.11. Naponsko stanje posude [23]



Slika 1.12. Deformacija posude [23]



Slika 1.13. Ekvivalentni Von Mizesovi naponi [23]

U tabeli 1.1. su prikazane vrednosti ukupne deformacije, Von Mizesovih napona, maksimalnih zateznih napona i faktora koncentracije napona dobijene metodom konačnih elemenata, za debljinu omotača 8 mm i za 5 različitih položaja priključaka na posudi pod pritiskom.

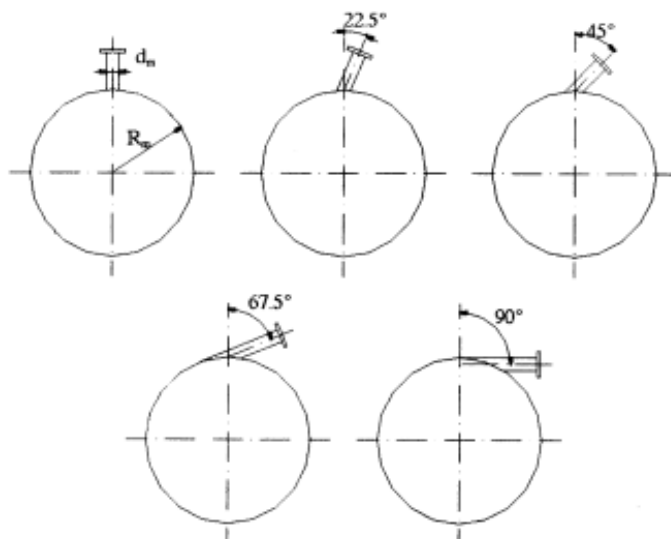
*Tabela 1.1. Rezultati dobijeni numeričkim proračunima za debljinu omotača od 8 mm i za različite položaje priključaka*

Položaj priključka	Ukupna deformacija mm	Von Misesov napon MPa	Maksimalni zatežući napon MPa	Napon MPa
na omotaču levi kraj	0,2787	135,8	129,54	154,82
na sredini omotača	0,2204	146,52	133,33	166,00
na omotaču desni kraj	0,2201	148,89	128,06	169,04
dance 1	0,2019	75,792	80,749	82,315
dance 2	0,2029	75,585	80,401	82,071

Proračunom je pokazano da je debljina omotača od 8 mm odgovarajuća za projektne uslove sa stanovišta sigurnosti i ekonomičnosti pri projektovanju i konstruisanju posuda pod pritiskom.

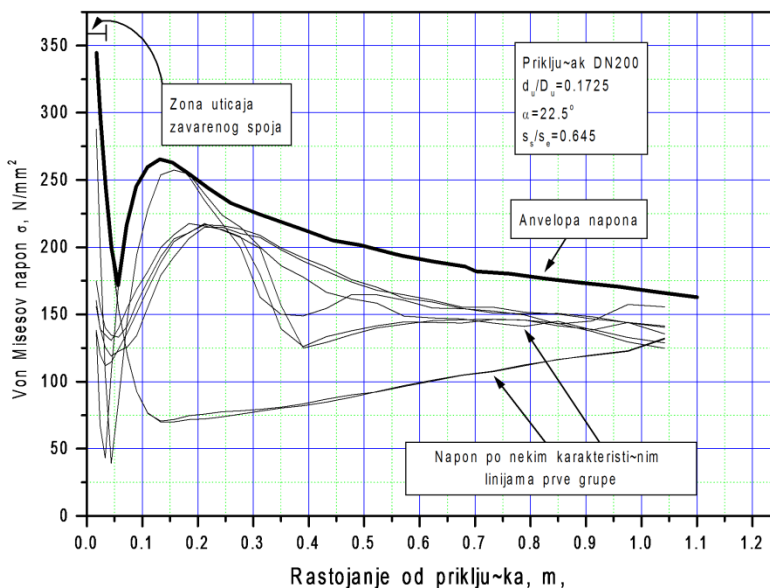
Nabhani je takođe u svom radu [24], koristeći numeričku metodu konačnih elemenata, pokazao da su položaj priključka, debljina omotača kao i zavareni spoj danca i omotača ključni za određivanje koncentracije napona.

Analiza naponskog stanja u okolini spoja cilindričnog omotača i priključka postavljenog pod različitim uglovima u odnosu na podužnu osu posude prezentovana je u radovima [25 - 28]. Priključci mogu biti postavljeni pod uglom od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  u odnosu na tangentu (izvodnicu) cilindričnog omotača koja prolazi kroz prodor ose priključka kroz cilindrični omotač. Na osnovu istraživanja došlo se do zaključka da se maksimalne vrednosti napona javljaju u okolini spoja kada priključak zaklapa oštar ugao tj. manji od  $90^\circ$  u odnosu na osu posude.



Slika 1.14. Položaji priključaka prema cilindričnom omotaču [25]

U svom radu [25] Petrović je izračunao vrednosti napona metodom konačnih elemenata za četiri slučaja opterećenja posude i to: za unutrašnji pritisak, za silu koja je paralelna sa podužnom osom priključka, za silu koja je normalna na podužnu osu priključka i za opterećenje momentom uvijanja. Razmatran je slučaj kada je priključak postavljen na omotač tako da osa priključka zaklapa ugao od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  sa tangentom na cilindrični omotač. Na bazi izvršenih analiza prezentovanih u radu, dobijene su formule za izračunavanje napona na cilindričnim omotačima. Rezultati su potvrđeni eksperimentalnim putem.



Slika 1.15. Anvelopa napona za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom [25]

Na slici 1.15. se može zapaziti da su naponi najveći na samom spoju priključka i cilindričnog omotača. Sa udaljavanjem od spoja naponi opadaju, a zatim naglo rastu do maksimalne vrednosti. Nakon toga lagano opadaju sve do vrednosti napona koji odgovaraju naponima u cilindričnim omotačima bez priključka.

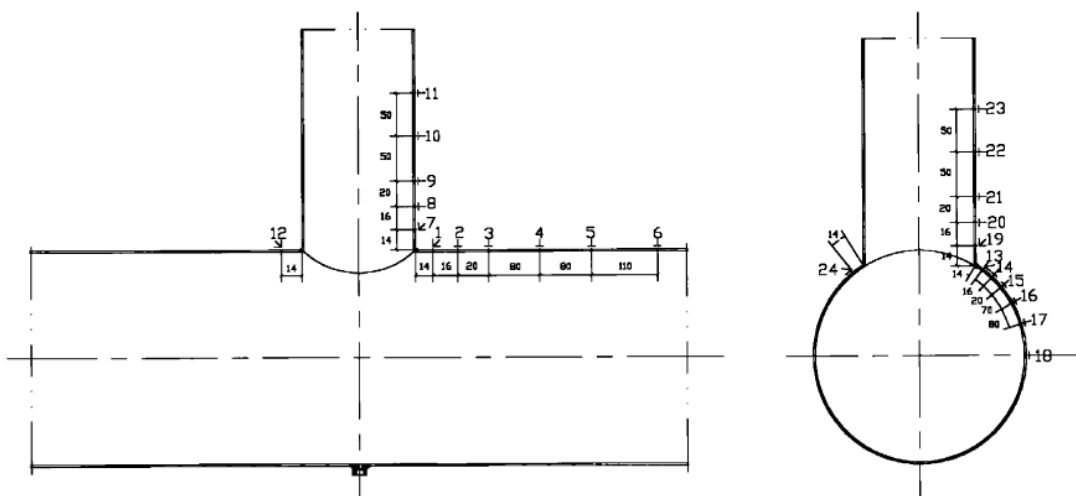
Na mestima prodora dve ljuške, odnosno mestima najvećeg diskontinuiteta geometrije radi smanjenja koncentracije napona često se omotači posuda ojačavaju i to: povećanjem debljine omotača, zavarivanjem ploče ili cevnog priključka, što je i objašnjeno u radovima [29 - 32].

### 1.2.1. Konvencionalne eksperimentalne metode

Za eksperimentalna istraživanja i merenja deformacija ranije je najčešće korišćena metoda bila metoda mernih traka, ali je veliki uticaj na izbor položaja merne trake na posudi imalo prethodno iskustvo istraživača. Metoda mernih traka se koristi za merenje

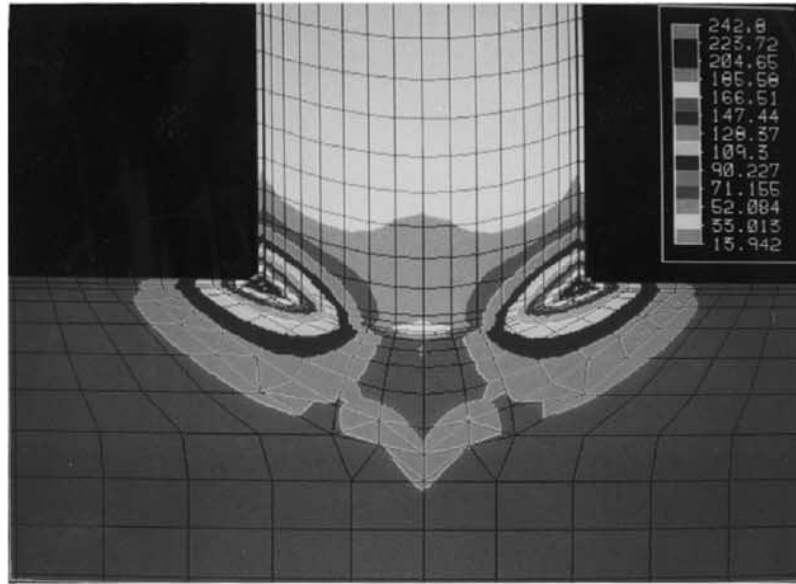
lokalnih deformacija na realnim konstrukcijama ili modelima. Ova metoda ima manu što su takva merenja izrazito lokalnog karaktera, odnosno dobijaju se vrednosti deformacije u samo jednoj tački. Rezultati merenja metodom mernih traka su uglavnom korišćeni za verifikaciju numeričkog modela [25, 27, 32, 33, 36]. Problemi koji se javljaju se ogledaju u nemogućnosti da se merna traka zalepi direktno na mesto geometrijskog diskontinuiteta, pa samim tim i nemogućnosti dobijanja maksimalnih vrednosti deformacija koje se javljaju na oštrim prelazima.

Sang i grupa autora u radu [33] su eksperimentalno i numerički analizirali raspodelu napona na cilindričnoj posudi sa priključkom za odnos prečnika  $d/D \geq 0,5$ . Merne trake u obliku rozeta su postavljene na spoljašnjoj strani posude, i to u uzdužnom i obodnom pravcu, što je bliže moguće zavarenom spoju između priključka i posude.

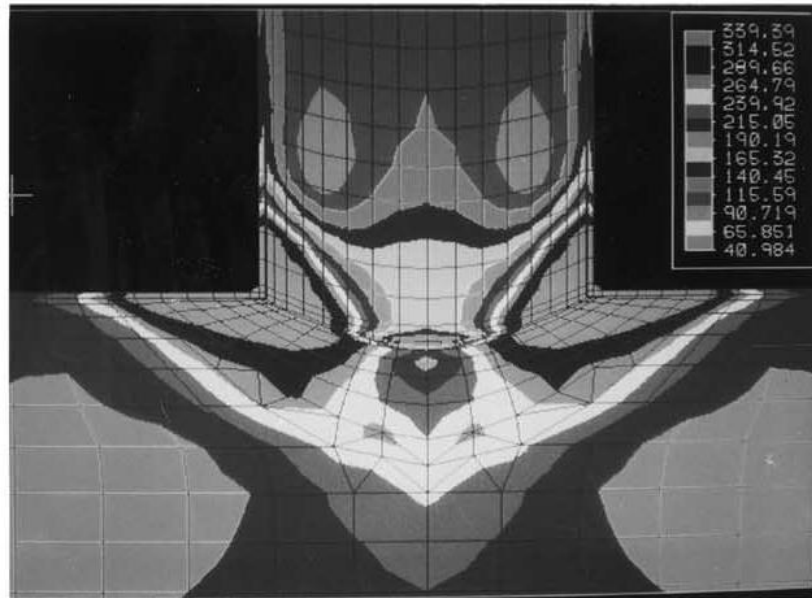


Slika 1.16. Položaj i raspored mernih traka [33]

Pritisak u posudi je postepeno povećavan, a pojava plastične deformacije je prvo primećena na uzdužnom spoju. Na pritisku od 1,5 MPa posuda je u elastičnoj oblasti (slika 1.15.), međutim na 2,25 MPa na spoju priključka i cilindrične posude, koji predstavlja mesto najveće koncentracije napona dolazi do pojave plastične deformacije, a na pritisku od 4,5 MPa plastična deformacija se širi oko celog spoja (slika 1.18.).



Slika 1.17. Numerički rezultati pri opterećenju  $P = 1,5$  MPa, elastična oblast [33]



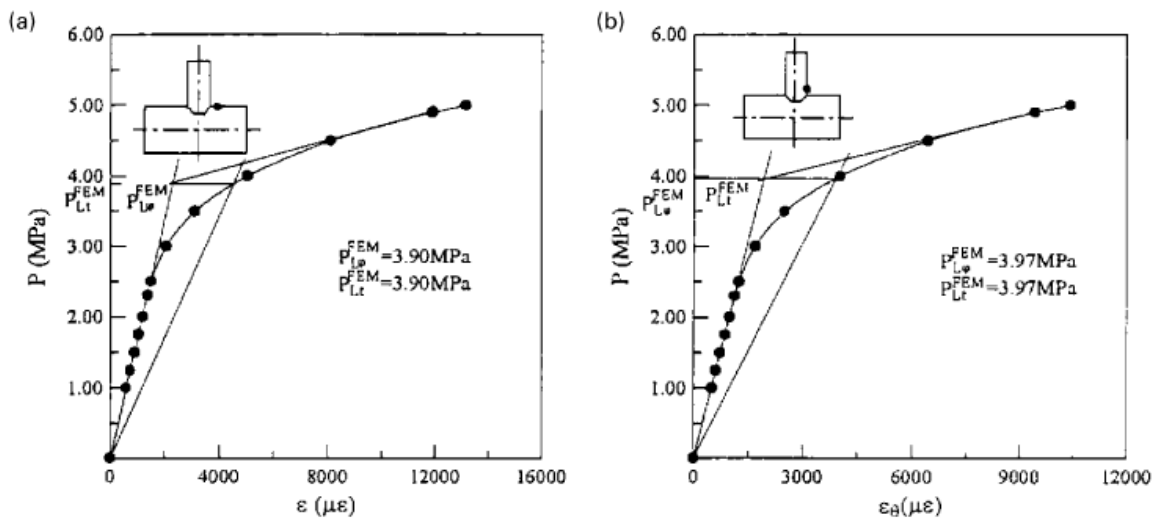
Slika 1.18. Numerički rezultati pri opterećenju  $P = 4,5$  MPa, plastična oblast [33]

Posuda je opterećivana do pritiska 7,4 MPa kada je došlo do pucanja posude. Na slici 1.19. je prikazana pukotina koja je nastala na samom spoju priključka i cilindrične posude.



Slika 1.19. Prikaz pukotine nastale na spoju dva cilindra [33]

Eksperimentalni rezultati kao i rezultati dobijeni numeričkom analizom su prikazani na slici 1.20.



Slika 1.20. Poređenje numeričkih i eksperimentalnih rezultata: a) merna traka 1, b) merna traka 7, [33]



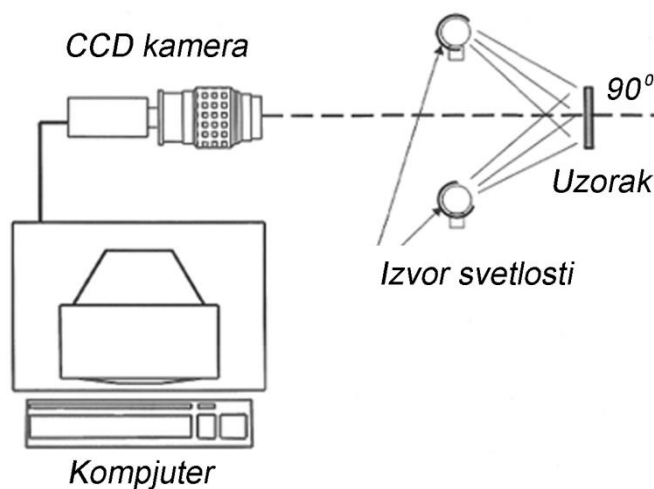
Problem koji se često javlja u praksi, jeste određivanje napona i deformacija koje dovode do pojave plastičnih deformacija u strukturi, a zatim i do otkaza ili loma posude. Mnogi autori se bave analizom naponskog stanja posuda pod pritiskom, izloženih različitim opterećenjima. Neki od rezultata su prikazani u radovima [34 - 37].

### *1.2.2. Metoda korelacije digitalnih slika*

Metoda korelacije digitalnih slika (engl. Digital Image Correlation – **DIC**) je metoda za trodimenzionalnu (3D) optičku analizu deformacija i pomeranja i nastala je početkom osamdesetih godina XX veka u mehanici za merenje deformacija malih vrednosti [38 - 41]. Od tada pa do današnjih dana, ova metoda se razvila i postala popularan sistem za analizu deformacija i pomeranja za merne objekte koji zahtevaju beskontaktna i visoko senzitivna merenja [42 - 58].

Među prvim radovima Peters i Ranson su [38] predložili upotrebu tehnike digitalnih slika za merenje deformacija, tj. predložili su dobijanje celih polja izmerenih vrednosti poređenjem položaja malih oblasti na digitalnim slikama, pre i posle opterećenja. Prvi eksperimentalni rezultati su objavljeni u radu grupe autora [39, 40] koji pokazuju da metoda može biti iskorišćena za precizno merenje deformacija čvrstog tela.

Razvoj dvodimenzionalne i trodimenzionalne metode korelacije digitalnih slika je prikazana u radu Satona (Sutton) [42]. Uparivanje jedne tačke na slici nekog objekta pre izlaganja opterećenju (početno, nedeformisano stanje) sa tom tačkom na slici objekta posle opterećivanja (deformisano stanje), predstavlja osnov za dvodimenzionalnu korelaciju slika za merenje površinskih pomeranja [42].

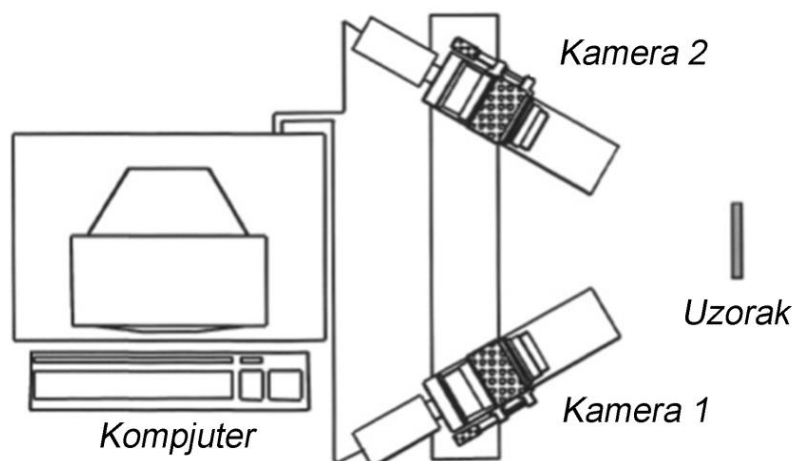


Slika 1.21. Šema sistema za dvodimenzionalnu korelaciju digitalnih slika 2D – DIC [42]

DIC sistemi sa jednom kamerom imaju ograničenja, mogu se primeniti za ravne uzorke koji se malo ili nimalo pomeraju. Za uspešnu primenu 2D – DIC sistema dva uslova moraju biti ispunjena:

- da bi se omogućio proces uparivanja tačaka na slikama, površina objekta mora imati šablon koji daje različite intenzitete difuzno reflektovanog svetla sa njegove površine. Ovaj šablon se nanosi na površinu ili se može javiti prirodno.
- kamera mora biti pozicionirana tako da površina senzora bude paralelna sa površinom ravnog objekta, kao što se može videti na slici.

Trodimenzionalna korelacija slika 3D DIC se zasniva na poređenju položaja odgovarajućih malih oblasti na slikama površine objekta snimljenim sa dve kamere. Na taj način se mogu dobiti informacije o obliku objekta, a zatim poređenjem promena između slika pre opterećenja i posle opterećenja, može da se izmeri celo polje trodimenzionalnih pomeranja. Na slici 1.22. je prikazana šema sistema za trodimenzionalnu korelaciju digitalnih slika.



Slika 1.22. Šema sistema za trodimenzionalnu korelaciju slika [42]

Prednosti 3D – DIC metode se ogledaju u sledećem:

- mogućnost merenja i ravnih i zakrivljenih površina,
- mogućnost merenja celih polja trodimenzionalnih površinskih pomeranja,
- dostupnost softvera koji pojednostavljuju proces akvizicije i analize slike,
- potencijal primene metode za merenje malih i velikih struktura,
- potpuno digitalno snimanje, koje omogućava i merenje u realnom vremenu.

Nedostaci ove metode su trenutno cena celokupnog sistema i potreba za preciznim kalibracionim pločama za kalibraciju sistema za različite dimenzije objekata koji se mere.

Eksperimentalna metoda digitalne korelacije slika za merenje deformacija se može primeniti na različite načine :

- za proučavanje eksperimenata korišćenjem beskontaktnih metoda. DIC se može primeniti kod zakrivljenih površina gde nije moguće koristiti merne trake, zatim za određivanje deformacionog polja i definisanje mehanizama deformacija različitih materijala [53, 55, 58 - 63, 65 ],
- za verifikaciju metode konačnih elemenata [49, 66, 67 ],
- za kontrolu i praćenje eksperimenata [51, 52, 63, 64, 68, 71],

- DIC se može primeniti za određivanje deformacionih polja u različitim poljima istraživanja kao što su biomaterijali, kompoziti, polimeri [46, 48, 49, 59, 60, 61, 62, 64, 67].
- za merenje deformacija i pomeranja na jednostavnim uzorcima [68, 69, 70].

### *1.3. Ciljevi istraživanja i primenjene naučne metode*

Priključci na posudama pod pritiskom imaju veliki uticaj na čvrstoću omotača. Uzevši u obzir veliki broj uticajnih faktora na naponsko stanje i deformacije u prodoru cilindričnih površina, u okviru ovog rada posmatra se ponašanje omotača na delu između dva priključka koji su postavljeni na cilindrični omotač posude izložene unutrašnjem pritisku. U prethodnim pasusima dat je osvrt na dosadašnja istraživanja koja su se oslanjala na analitičke proračune i numeričke analize koristeći različite programske pakete. Verifikacija numeričkog modela se sprovodila eksperimentalnim metodama koje nisu davale potpunu sliku o ponašanju strukture.

Jedan od ciljeva ove teze je da se pokaže da se primenom 3D optičke metode digitalne korelacije slika mogu odrediti cela polja deformacija na posudi pod pritiskom sa priključcima. Eksperimentalno merenje polja deformacija omogućava precizno određivanje kritičnih mesta u okolini spoja priključka i cilindričnog omotača. Takođe, potrebno je razviti i verifikovati numerički model posude sa priključcima postavljenim na cilindrični omotač, izložene unutrašnjem pritisku.

U ovoj doktorskoj disertaciji primenjen je veliki broj savremenih naučnih metoda. Kako bi se ostvarili ciljevi definisani disertacijom, istraživanja je potrebno realizovati na eksperimentalnoj laboratorijskoj instalaciji. Eksperimentalna merenja predstavljena u okviru ovih istraživanja obuhvatila su analizu uticaja dva priključka na cilindrični omotač posude pod pritiskom. Primenjena metodologija ispitivanja bazirana je na trodimenzionalnom optičkom mernom sistemu, koji je primenjen za analizu i određivanje deformacija na delu omotača između priključaka.

Dalje eksperimentalne analize u ovoj disertaciji obuhvataju ispitivanje zatezanjem, koje pruža sliku o mehaničkim svojstvima materijala. Za izvođenje ispitivanja uzet je

uzorak materijala od kojeg je posuda napravljena, od kojih se dalje obrađuju epruvete za ispitivanje. Podaci dobijeni ovim ispitivanjem su korišćeni za nelinearni numerički proračun.

Upotrebljena je i metoda mernih traka, kako bi se na još jedan način verifikovao numerički model i odredili ekvivalentni naponi na definisanim mernim mestima.

Numerička metoda korišćena u ovom radu zasniva se na metodi konačnih elemenata. Za istu geometriju posude sa priključcima, na kojoj je obavljeno eksperimentalno merenje deformacija, formiran je model posude za proračun metodom konačnih elemenata. Model treba da simulira ponašanje posude opterećene unutrašnjim pritiskom. Metoda konačnih elemenata je odabrana zato što je pomoću nje moguće odrediti vrednosti deformacija i napona, kako za definisana merna mesta tako i za celu posudu opterećenu unutrašnjim pritiskom.

## 2. ANALITIČKI PRORAČUN GEOMETRIJE POSUDE POD PRITISKOM

### 2.1. Standardizacija proračuna

Mehaničko opterećenje kod posuda pod pritiskom uglavnom potiče od pritiska (unutrašnjeg ili spoljašnjeg) kome je posuda izložena. Prilikom izrade posude neophodno je usvojiti konstrukcioni materijal u zavisnosti od radnih uslova (temperature, agresivnosti sredine, itd.).

Proučavajući radove drugih autora, problem koji još uvek nije dovoljno dobro rešen jeste problem uticaja lokalnih opterećenja na naponsko stanje i deformacije na omotaču posude pod pritiskom. Ovaj rad ima za cilj da odredi uticaj dva priključka na naponsko stanje i deformacije cilindričnog omotača posude pod pritiskom, opterećene unutrašnjim pritiskom.

U inženjerskoj praksi analitički proračun čvrstoće cilindrične posude pod pritiskom se obavlja po formulama definisanim u standardu SRPS EN 13445:2010, pri čemu se izračunava debljina zida cilindričnog omotača za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom. Serija standarda SRPS EN 13445 obuhvata izbor konstrukcionih materijala, dimenzionisanje, proračune čvrstoće, postupke izrade i kontrole posuda pod pritiskom koje nisu izložene plamenu. U našoj zemlji su objavljeni sledeći delovi:

- SRPS EN 13445 – 1: 2010. Deo 1: Opšte odredbe. Daje opšte informacije o svim delovima standarda koji se primenjuju za posude pod pritiskom koje nisu izložene plamenu, a izložene su najvećem dozvoljenom pritisku koji je veći od 0,5 bar, ali se može koristiti i za posude koje rade na manjim pritiscima.
- SRPS EN 13445 – 2: 2010. Deo 2: Materijali. U okviru ovog dela utvrđeni su zahtevi za izborom, kontrolisanjem i ispitivanjem materijala od kojih se izrađuju posude pod pritiskom.
- SRPS EN 13445 – 3: 2010. Deo 3: Projektovanje. Utvrđuju se zahtevi za projektovanje posuda kao i uslovi i način proračuna čvrstoće posuda pod pritiskom.
- SRPS EN 13445 – 4: 2010. Deo 4: Izrada. Ovaj deo standarda se odnosi na zahteve u vezi sa izradom posuda uključujući i njihove spojeve sa delovima koji nisu

izloženi pritisku. Utvrđeni su zahtevi u pogledu mogućnosti praćenja materijala, tolerancija izrade, zahtevi u pogledu zavarivanja, ispitivanja, proizvodnje, oblikovanja, termičke obrade, završnih postupaka i izrade.

- SRPS EN 13445 – 5: 2010. Deo 5: Kontrolisanje i ispitivanje. Ovaj deo standarda se odnosi na kontrolisanje i ispitivanje pojedinačnih i serijski proizvedenih posuda koje su napravljene od čelika u skladu sa SRPS EN 13445 – 2: 2010.
- SRPS EN 13445 – 6: 2010. Deo 6: Zahtevi za projektovanje i izradu posuda pod pritiskom i delova pod pritiskom izrađenih od livenog gvožđa sa kuglastim grafitom (nodularnog liva), koji utvrđuje zahteve za projektovanje, materijale, izradu i ispitivanje posuda pri upotrebi sa maksimalnim dozvoljenim pritiskom, PS, jednakim ili manjim od 100 bar i debljinom do 60 mm proizvedenih od livenog gvožđa.
- SRPS EN 13445 – 8: 2010. Deo 8: Dopunski zahtevi za posude pod pritiskom od aluminijuma i legura aluminijuma. Utvrđeni su zahtevi za posude pod pritiskom koje nisu izložene plamenu i njihovih delova izrađenih od Al i legura Al.

## *2.2. Definisane uticajnih parametara osnovnog modela*

U ovom radu analizirana je posuda pod pritiskom na čiji su omotač postavljena četiri priključka. Sa jedne strane cilindričnog omotača su postavljena dva priključka različite geometrije, a sa druge strane cilindričnog omotača pod uglom od  $180^\circ$  su postavljena dva priključka iste geometrije. Priključci i omotač posude su cilindričnog oblika. Analizom radova datih u poglavlju 1, ustanovljeno je da na naponsko stanje i deformacije cilindričnog omotača utiču sledeći faktori:

- $D$  – prečnik cilindričnog omotača,
- $d$  – prečnik priključaka,
- $e_{a,c}$  – debljina zida cilindričnog omotača,
- $e_{a,p}$  – debljina zida priključaka,
- $L_b$  – osno rastojanje između priključaka,
- $\nu$  - Puasonov (Poisson) koeficijent,

- $E$  – modul elastičnosti,
- $l$  – dužina priključaka,
- $P$  – vrsta opterećenja.

### 2.3. Izbor materijala

Izbor materijala za posude pod pritiskom zavisi od: namene, opterećenja i geometrije posude. Posude pod pritiskom se najčešće prave od čelika. Eksperimentalna posuda je izrađena od nerđajućeg čelika X5 CrNi 18 10 (W.N. 1.4301, Č 4580). Za čelike uopšte važi da je Puasonov koeficijent  $\nu = 0,3$ . Vrednost modula elastičnosti za najčešće korišćene čelike i za temperaturnu oblast od 20°C do 300°C se kreće u granicama od  $1,9 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$  do  $2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ .

Proračun je sproveden prema postupku definisanom u standardu SRPS EN 13445 – 3. Karakteristike materijala su date u tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Karakteristike materijala posude pod pritiskom (SRPS EN 10088: 2011).

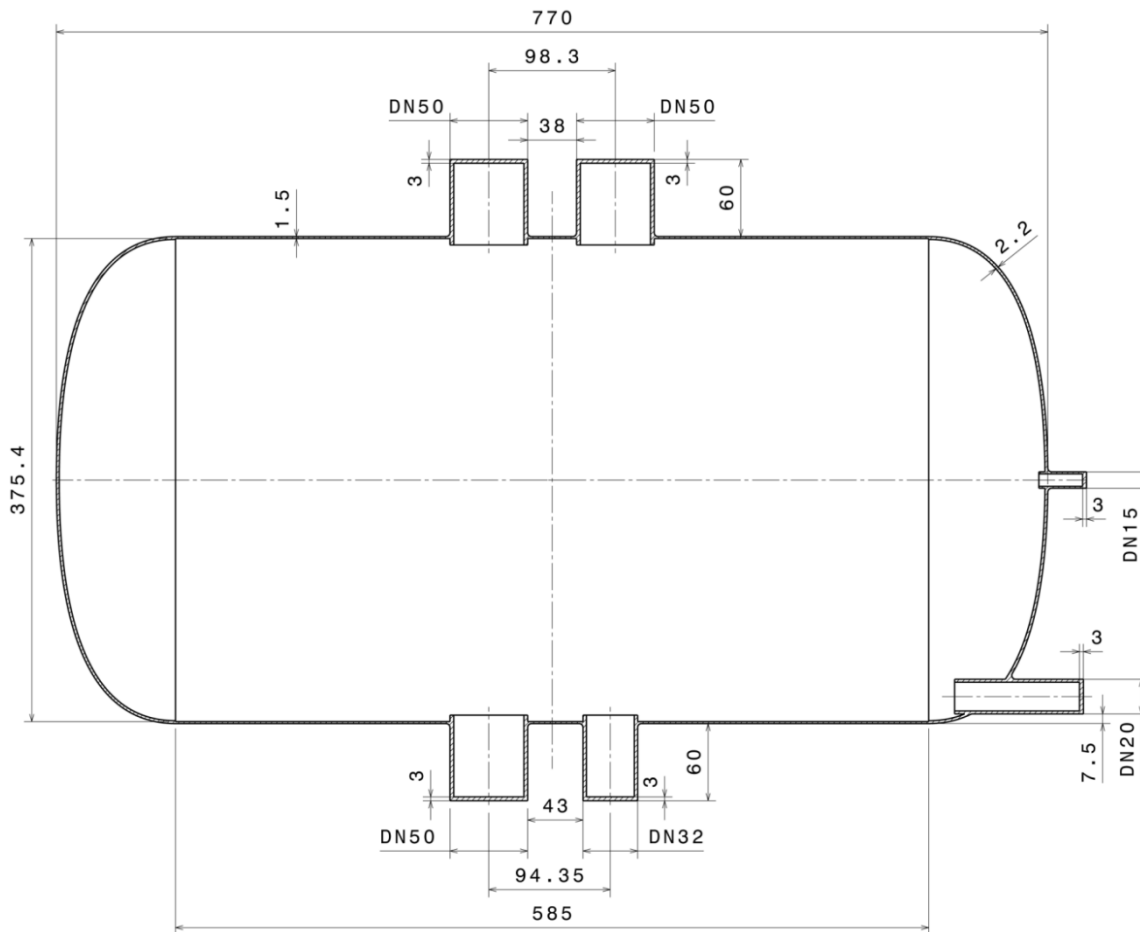
X5 CrNi 18 10	$R_{p0,1}$	$R_m$	$E$	$A$	$\nu$
	350 MPa	540-750 MPa	$2,1 \times 10^6$ MPa	45-59 %	0,3

### 2.4. Osnovni model

Predmet ovih istraživanja je cilindrična posuda, dimenzija  $\emptyset 378,4 \times 770$  mm, debljine 1,5 mm (slika 2.1.). Na omotač posude postavljena su 4 priključka. Tri priključka su dimenzija DN 50 ( $\emptyset 60,3 \times 2,9$ ), a jedan priključak je dimenzija DN 32 ( $\emptyset 42,4 \times 2,6$ ). Na cilindričnom omotaču posude na jednoj strani se nalaze dva priključka istih dimenzija (DN 50), a na drugoj strani omotača, pod uglom od 180° dva priključka različitih dimenzija (DN 50 i DN 32), slika 2.1. Svi priključci su zatvoreni tankom pločom, debljine 3 mm. Na istim pločama su u ploče zavareni cevni nastavci sa navojem 1/2". Na njima su uvrnuta



pocinkovana kolena 1/2" za priključenje slavina 1/2". Ove slavine služe za od vazdušenje i eventualno punjenje posude. Visina priključaka je odabrana tako da nema velikog uticaja na stanje napona i deformacija u zoni uticaja priključaka na cilindrični omotač. Na jednom dancu su zavarena dva cevna priključka, takođe od istog materijala, za priključenje manometra M20, a drugi za priključenje pocinkovane slavine 1/2", za priključenje creva za punjenje posude i za pumpu za postizanje nadpritiska u posudi.



Slika 2.1. Geometrija posude na kojoj je izvršeno ispitivanje (mere su u mm)

Debljina zida cilindričnog omotača posude pod pritiskom se izračunava prema sledećem izrazu (SRPS EN 13445 - 3, jednačina 7.4 - 2)

$$e = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot f \cdot z + P}, \text{ (mm)}. \quad (2.1)$$

Uslov koji mora biti zadovoljen prilikom proračuna debljine zida cilindričnog omotača izloženog unutrašnjem pritisku je

$$\frac{e}{D_e} \leq 0,16. \quad (2.2.)$$

Na posudi su definisana dva merna mesta. Merno mesto 1 obuhvata polje između dva priključka različitih dimenzija (priključak 1 je DN50, a priključak 2 je DN32, slika 6.2.). Merno mesto 2 obuhvata polje između dva priključka istih dimenzija DN50 (slika 6.4.)

Ukoliko je geometrija poznata neophodno je proveriti i maksimalni dozvoljeni pritisak kojem može biti izložen cilindrični omotač posude (SRPS EN 13445-3, jednačina 7.4 - 6):

$$P_{\max} = \frac{2 \cdot f \cdot z \cdot e_a}{D_m} \quad (2.3.)$$

Maksimalna dozvoljena vrednost proračunskog napona za dati materijal posude određuje se prema sledećem izrazu (SRPS EN 13445 – 3, tabela 6.1.)

$$f = \max \left[ \left( \frac{R_{p1,0/T}}{1,5} \right); \min \left( \frac{R_{p1,0/T}}{1,2} \right); \left( \frac{R_{m/T}}{3} \right) \right] \quad (2.4.)$$

Provera uticaja otvora na omotaču na debljinu omotača, vrši se iz geometrijskih relacija datih u standardu SRPS EN 13445 - 3 (slika 9.6 – 1), proverom najvećeg dozvoljenog pritiska formulom datom u SRPS EN 13445 – 3, jednačina 9.6 -4.

### 3. METOD KONAČNIH ELEMENATA

#### 3.1. Osnovi metode konačnih elemenata

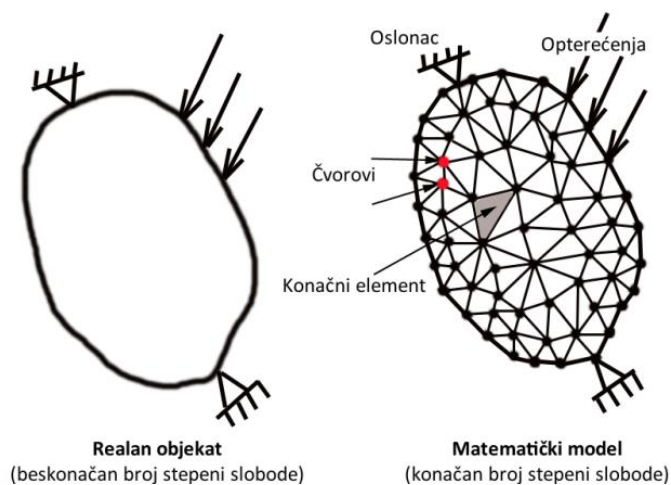
Kompleksnost geometrije, osobine materijala i specifičnost graničnih uslova koji se sreću u većini inženjerskih problema, najčešće znači da se egzaktno rešenje ne može dobiti. Mali broj praktičnih problema ima rešenje u zatvorenom obliku, pa je potrebno odrediti približno rešenje.

Metoda konačnih elemenata (MKE) predstavlja jednu od najrasprostranjenijih savremenih numeričkih metoda približnog rešavanja, kada je u pitanju rešavanje problema mehanike kontinuuma. Osnovna ideja metode konačnih elemenata je da se pronađe rešenje komplikovanog problema aproksimativnim (približnim) numeričkim metodama. Metoda konačnih elemenata spada u metode diskretne analize. Za razliku od ostalih numeričkih metoda, koje se zasnivaju na matematičkoj diskretizaciji jednačina graničnih problema, metod konačnih elemenata zasniva se na fizičkoj diskretizaciji razmatranog domena, gde osnovu za sva razmatranja predstavlja deo domena konačnih dimenzija, pod-domen, ili kratko, konačni element. Sa stanovišta fizičke interpretacije ovo znači da se razmatrani realni fizički domen (neka linija, neka površina, neka zapremina) kao realni kontinuum sa beskonačno mnogo stepeni slobode kretanja tačaka u njemu, zamenjuje diskretnim (fiktivnim-zamišljenim) geometrijskim modelom međusobno povezanih konačnih elemenata (linijski, površinski, zapreminski konačni elementi). Ovi elementi su međusobno povezani u konačnom broju tačaka, elemenata koji imaju konačne dimenzije, konačne fizičke karakteristike i konačne brojeve stepeni slobode kretanja (u svetu inženjerstva podrazumeva mogućnost pomeranja nekog tela u vidu: tri moguće translacije (duž osa:  $x$ ,  $y$  i  $z$ ) i tri rotacije (oko osa:  $x$ ,  $y$  i  $z$ ), a u prostoru koji je prikazan Dekartovim troosnim koordinatnim sistemom.

Kako je geometrija konačnih elemenata po pravilu jednostavna, to praktično znači da se realni kompleksni problem razbija na niz jednostavnih problema. Način diskretizacije, izbor oblika konačnog elementa, kao i izbor ukupnog broja konačnih elemenata, zavise od prirode problema koji se rešava i potrebne tačnosti željenog i traženog rešenja. Na ovaj

način se analizom pojedinačnih elemenata, a uz pretpostavku o načinu njihove međusobne povezanosti, analizira celina problema. Ovaj pristup u analizi, gde se od posebnog ide ka opštem, od individualnog ka univerzalnom, u kome se analizom delova zaključuje o celini, je poznati induktivni pristup, koji se primenjuje u mnogim oblastima nauke. Kod inženjerskih problema, kod kojih se opšta rešenja ne mogu dobiti u zatvorenom (direktnom, tačnom) obliku, induktivni pristup je od posebnog značaja.

Kao inženjerska metoda MKE je prvobitno razvijena u ranim 60-im godinama prošlog veka, a sa ciljem da reši strukturalne probleme u vazduhoplovnoj industriji, pre svega u domenu proizvodnje borbenih aviona, ali je od tada proširena na rešavanje brojnih problema u oblastima mašinstva, građevinarstva, elektrotehnike, medicine, stomatologije, itd. Termin konačni element je prvi upotrebio Klou (Clough) 1960. godine [71], a prve radove u kojima je prikazana osnova metode konačnih elemenata i mogućnosti za primenu su napisali Zjenkjević (Zienkiewicz) i Čang (Chung), 1967. godine, [72].



Slika 3.1. Aproksimacija kontinuuma primenom metode konačnih elemenata [73]

Na slici 3.1. prikazano je šta u praksi predstavlja diskretizacija domena [73]. Svaka tačka realnog deformabilnog objekta na levoj strani ima beskonačan **broj stepeni slobode** (tj. nezavisnih promenljivih koje opisuju stanje deformacije), dok svaka tačka (čvor)

diskretizovanog modela na desnoj strani ima **konačan** broj stepeni slobode. Deljenjem domena na konačan broj elemenata i čvorova kontinuum se svodi na rešiv matematički model, pa će se svakom čvoru nakon proračuna „dodeliti“ određene vrednosti pomeranja koje su u stvari „reakcija“ sistema na zadana opterećenja i granične uslove. Vrednosti pomeranja unutar samih konačnih elemenata (između čvorova) se određuju interpolacijom vrednosti u samim čvorovima.

Sama primena MKE podrazumeva pravljenje „virtuelnog“ računarskog modela, koji ima definisanu konačnu geometriju, kojoj su dodeljene odgovarajuće karakteristike materijala i odgovarajuća opterećenja, a koja ima precizno definisane granične uslove i oslonce. Bitno je naglasiti da geometrija, karakteristike materijala, opterećenja i granični uslovi suštinski definišu numerički model. Što su ova četiri parametra bliža realnom fizičkom modelu (problemu), to je numerički model bolji, a rešenja dobijena na osnovu njega tačnija. Odstupanje bilo kog od ova 4 parametara od stvarne tj. realne vrednosti dovodi nekada i do velikih grešaka.

Suština aproksimacije kontinuuma po metodi konačnih elemenata se sastoji u sledećem:

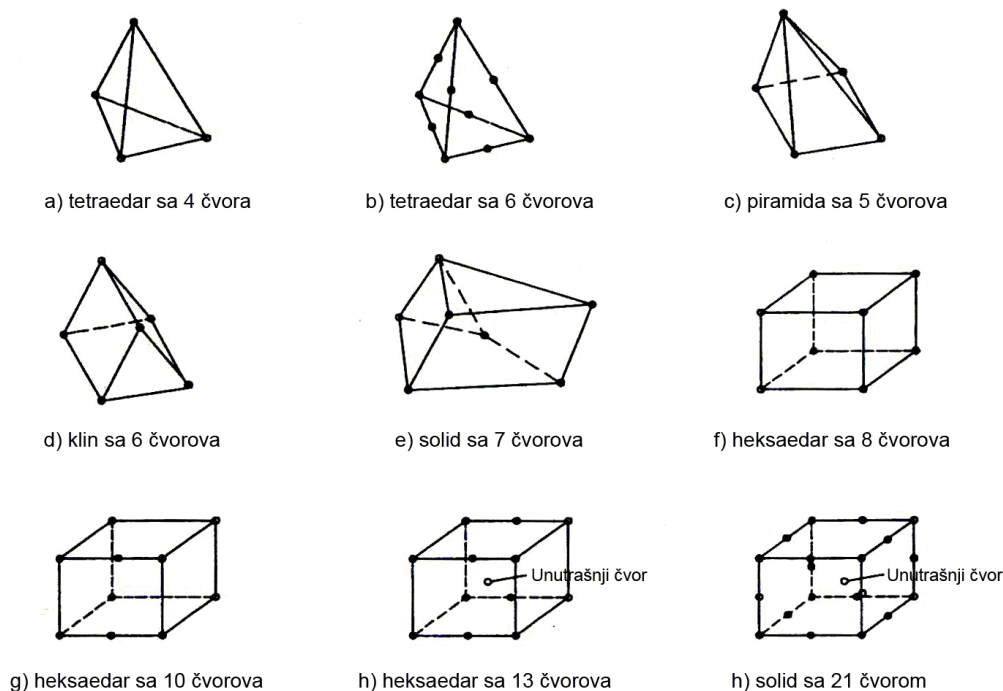
- razmatrani objekat se pomoću zamišljenih linija ili površi deli na određeni broj poddomena konačnih dimenzija. Pojedini poddomeni se nazivaju konačni elementi, a njihov skup za ceo domen se naziva sistem, ili, mreža konačnih elemenata, slika 3.2.
- pretpostavlja se da su konačni elementi međusobno povezani u konačnom broju tačaka, takozvanih čvornih tačaka, koje se usvajaju na konturi elementa. Dakle, te tačke se nazivaju čvorne tačke, ili kratko, čvorovi (engl. Node, Nodes -pl. ). Sile ne mogu delovati po površini konačnog elementa, ili po nekoj njegovoj ivici, već samo u čvoru.
- stanje u svakom konačnom elementu (na primer, polje pomeranja, deformacija, naprezanja, rasprostiranje temperature i slično) opisuje se pomoću interpolacionih funkcija i konačnog broja parametara u čvorovima koji predstavljaju osnovne nepoznate veličine u metodi konačnih elemenata. Ovaj postupak se naziva definisanje graničnih uslova konačnih elemenata.
- za analizu i proračun sistema konačnih elemenata važe svi principi i postupci koji važe i za klasične diskretne sisteme.



*Slika 3.2. Mreža konačnih elemenata*

Za modeliranje nekih trodimenzionalnih struktura nije moguće uvesti aproksimaciju zanemarivanjem jedne dimenzije, pa je potrebno koristiti solide ili trodimenzionalne

konačne elemente [74, 75]. Solid elementi se koriste za određivanje trodimenzionalnog stanja napona i deformacija. Na slici 3.3. prikazani su primeri solid elemenata.



Slika 3.3. Primeri solid elemenata za modeliranje trodimenzionalnih struktura

Najjednostavniji solid element, tj. tetraedarni element sa četiri čvora, može se generisati od ravanskog trouglastog elementa (slika 3.3a.). Solid elementi višeg reda, kao što su tetraedarski i heksaedarski, razvijaju se dodavanjem čvorova na ivice elementa ili unutar zapremine.

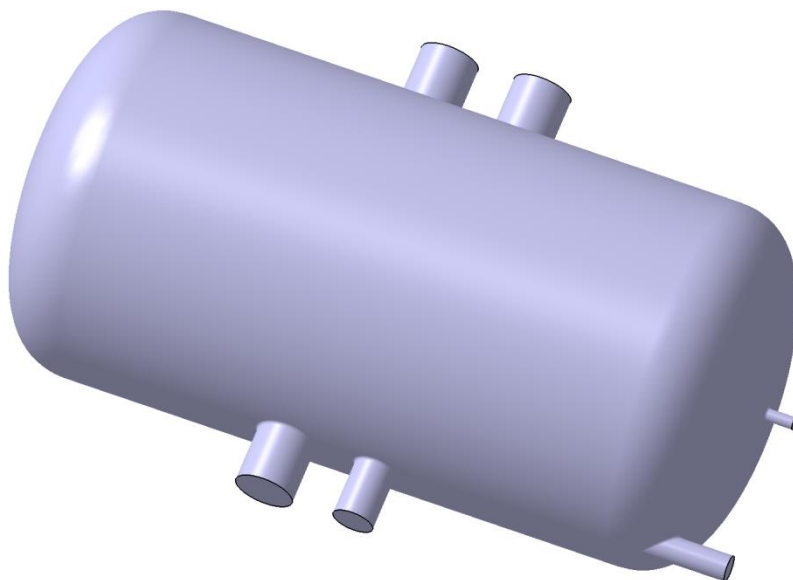
Programski paket ANSYS je softver potpuno prilagođen korisniku, pa je samim tim relativno jednostavan za korišćenje [76]. U odnosu na druge komercijalne programe koji su zasnovani na MKE (kao što su ABAQUS ili NASTRAN) on nudi veliki broj tipova analiza kao i moćne alatke za trodimenzionalno (3D) modeliranje. Time je omogućeno relativno lako kreiranje geometrije potrebne za proračun unutar samog ANSYS-a. Pored komandne linije u kojoj se zadaju osnovne instrukcije, ANSYS poseduje i tzv. grafički korisnički interfejs (Graphic User Interface - GUI). GUI je napravljen u obliku menija koji korisnike intuitivno vodi kroz faze neophodne za uspešno definisanje i analizu geometrije. Uz pomoć

tako struktuiranih menija, model sastavljen od konačnih elemenata može biti relativno brzo kreiran na osnovu podataka o geometriji, karakteristikama materijala, graničnim uslovima i opterećenjima koja će se primeniti.

### *3.2. Definisanje geometrije modela*

Jedan od inženjerskih problema je da se odredi pomeranje i naponi u celoj strukturi koja je izložena delovanju opterećenja. Primenom MKE je moguće, na osnovu poznatih vrednosti napona i deformacija u jednom čvoru i elementu, odrediti napone i deformacije za bilo koji drugi čvor i element strukture koja se razmatra i čije su karakteristike materijala i opterećenja već poznate. Ukupan broj jednačina opisuje ponašanje svih čvorova i predstavlja sistem algebarskih jednačina koje se rešavaju matricama.

Na osnovu geometrije posude, prikazane na slici 2.1., definisana je geometrija modela posude sa priključcima, i napravljen je 3D model posude u programskom paketu CatiaV5 (slika 3.4.).



*Slika 3.4. 3D model posude*

3



### 3.3. Osobine materijala

Svojstva materijala u velikoj meri utiču na deformacije u razmatranoj strukturi. Kada je numerički model definisan i generisana mreža konačnih elemenata, sledeći korak je definisanje karakteristika materijala za takav jedan model. Naime, svakom konačnom elementu treba dodeliti i karakteristiku materijala. Drugim rečima, numeričkom modelu treba „dodeliti“ iste one osobine materijala od koga je napravljen njegov realni fizički „par“.

Fizičke osobine materijala koje generalno treba poznavati kao neophodne u analizi izotropnih, linearno elastičnih problema, su: Jangov modul elastičnosti -  $E$  (*Young's modulus*), Poasonov koeficijent -  $\nu$  (*Poisson's ratio*) i modul smicanja -  $G$  (*shear modulus*). Ove tri karakteristike materijala povezane su jednačinom:  $G = E / 2(1+\nu)$  te zbog toga postoje samo dve nezavisne konstante materijala koje u tom slučaju treba uneti u model za proračun.

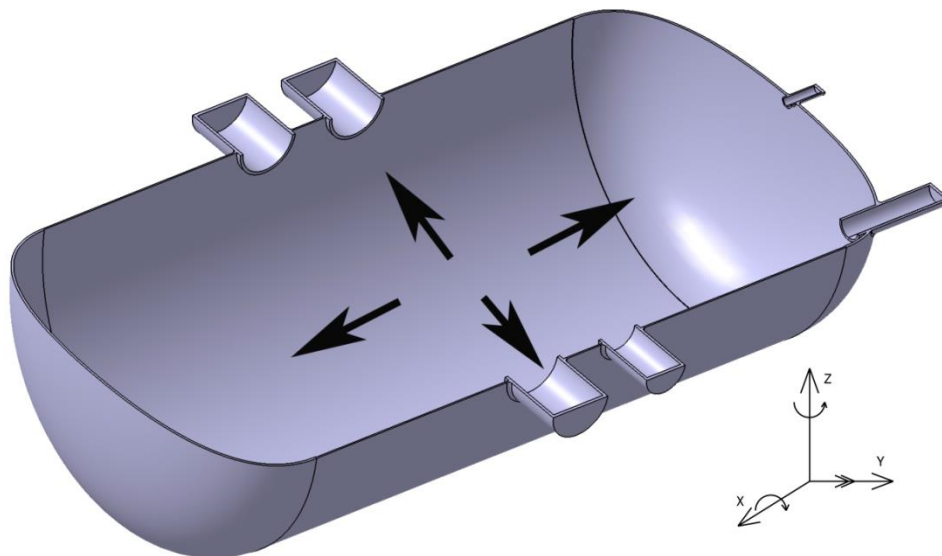
Po završetku definisanja osobina materijala i geometrije numeričkog modela, ona se dalje deli na konačan broj elemenata određenog tipa, pri čemu se dobija tzv. „Mreža konačnih elemenata“, slika 3.2. Sama procedura generisanja mreže se uglavnom odvija automatski u okviru programa (softvera) koji se koristi za proračun, mada postoji mogućnost i „ručnog“ definisanja geometrije mreže. Ukoliko se koristi mogućnost automatskog generisanja mreže, program će automatski generisati gušću mrežu na mestima nagle promene geometrije, spoja dva različita materijala i sl. Posebnu pažnju treba posvetiti tzv. „singularnim tačkama i linijama“. Ukoliko se na numeričkom modelu javljaju oštri vrhovi, odnosno ivice, njih nazivamo singularitetima, pa ako se još javljaju i na mestima koja su od većeg značaja za tačnost proračuna, onda ih treba prosto ukloniti, odnosno „zaobliti“, da ne bi bili generatori nerealno visokih vrednosti izračunatih napona.

Sama mreža konačnih elemenata veoma utiče na tačnost rezultata metode i to se neprestano mora imati na umu. Generalno se može reći da što je ona finija (veći broj čvorova i elemenata za dati model) to se može očekivati tačnije rešenje problema, jer je sam matematički model bliži realnom objektu. Pri određivanju potrebne gustine mreže treba

voditi računa da iza svakog elementa ili čvora stoji određeni broj matematičkih jednačina koje je potrebno rešiti.

### 3.4. Opterećenja

Opterećenja u MKE analizama mogu biti primenjena u obliku sila, momenata, ubrzanja, temperatura, pritiska, ili periodičnih pobuda. Odabrani tip opterećenja treba da najbolje predstavi stvarno, realno opterećenje. Sile se, kao najosnovnija opterećenja, definišu u odnosu na aktivne pravce osa koordinatnih sistema, a mogu se primeniti na bilo koji element ili geometrijski oblik. Svaka primena opterećenja u MKE se mora sastojati od četiri poznate komponente: **intezitet** (veličina), **orijentacija**, **raspodela** i **vremenska zavisnost**.



Slika 3.5. Pravac opterećenja unutrašnjim pritiskom

Eksperimentalna posuda pod pritiskom koja je predmet ove disertacije je opterećena unutrašnjim pritiskom. Numeričke simulacije opterećenja su izvršene za tri vrednosti pritiska: 0,5 MPa, 1 MPa i 1,5 MPa.

Opterećenje u vidu pritiska se definiše u pravcu normale na površinu elementa na koji deluje. Površinski kontaktni elementi imaju definisanu unutrašnju i spoljašnju normalu površine (slika 3.5.). Opterećenje kao pritisak je postavljeno po unapred zadatim vrednostima od unutrašnje ka spoljašnjoj površini. U slučaju dejstva pritisknog opterećenja na površinu solid elementa, orijentacija se automatski postavlja jer su vektori normala kod površina solid elemenata uvek usmereni u pravcu od centra površi, pa je pozitivni pritisak tada orijentisan suprotno od ovog vektora.

### 3.5. Oslonci – granični uslovi

Svaki numerički model koji se zasniva na principima korektne primene MKE, mora imati jasno definisane granične uslove, odnosno oslonce, tj. precizno definisane stepene slobode kretanja čvornih tačaka modela. U ovom smislu, osnovna podela oslonaca je na sledeće vrste:

- uklještenje (sprečena i pomeranja i rotacije);
- nepokretan oslonac (sprečena pomeranja, rotacije dozvoljene);
- pokretan oslonac (delimično sprečena pomeranja, rotacije dozvoljene) i
- oslonac koji ima definisano ograničeno pomeranje (elastični oslonac, tipa opruge).

Većina studija koje su primenjivale MKE, granične uslove (oslonce) je posmatrala kao fiksne uslove. Na definisanom 3D modelu posude pod pritiskom u prvom koraku oslonac na koji je posuda bila oslonjena je bio uklješten, tj. sprečena su i pomeranja i rotacija. U slučaju kada je rađena provera proračuna, bilo je potrebno napraviti jednostavniji model i da bi se smanjio broj čvorova analizirana je jedna polovina posude. Pri tome su postavljeni simetrični granični uslovi, koji podrazumevaju da u pravcu normale na poprečni presek translacija mora biti jednaka nuli, i momenti oko druge dve ose takođe moraju biti jednaki nuli (slika 3.5.).

## 4. REZULTATI NUMERIČKE ANALIZE

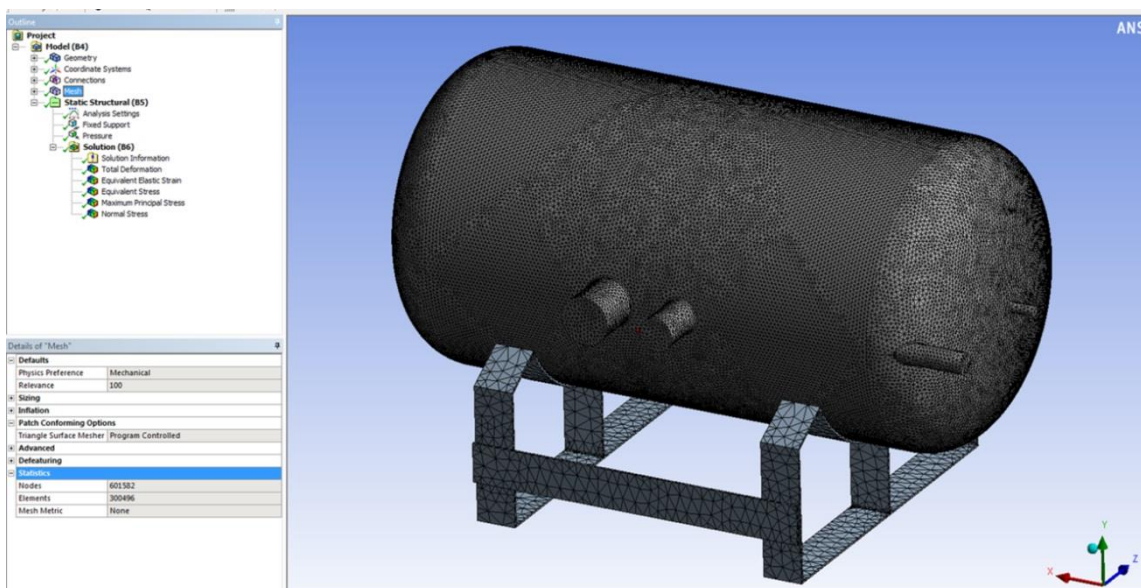
### 4.1. Rezultati numeričkih simulacija

Pri projektovanju konstrukcija, posebno pri proračunu čvrstoće elemenata i čitave strukture, neophodno je poznavanje osobina i mehaničkih karakteristika materijala. U današnje vreme se pored teorijskih i eksperimentalnih istraživanja u proračunima čvrstoće strukture redovno koriste softverski paketi na bazi metode konačnih elemenata (MKE), koji rešavaju kako linearne tako i kompletno nelinearne strukturalne probleme ponašanja materijala.

Sprovođenje jedne ovakve složene trodimenzionalne analize napona i deformacija primenom MKE je pretpostavljalo definisanje sledećih ulaznih podataka: geometrije modela za proračun, mreže konačnih elemenata, materijala i njihovih karakteristika, tipova oslonaca i, konačno, veličine, pravca i načina unošenja opterećenja. Koristeći softver Ansys korišćena su osnovna tri koraka za analizu naponskog stanja i deformacija:

- Generisanje modela (definisanje modela korišćenjem CAD softvera kao što su CATIA ili ANSYS, uprošćavanje, idealizacija, definisanje karakteristika materijala i kreiranje mreže konačnih elemenata).
- Vršenje proračuna (definisanje graničnih uslova, simulacija).
- Pregled rezultata (verifikacija).

Trodimenziionalni model posude je poslužio za pravljenje mreže konačnih elemenata. U simulaciji (slika 4.1.) u okviru ovog istraživanja je korišćen model koji ima 601582 čvorova i 300496 konačnih elemenata, koji su dobijeni postupkom konvergencije.



Slika 4.1. Model posude korišćen u simulaciji

Konvergencija se sastoji od postepenog usitnjavanja inicijalne mreže, sprovođenja proračuna sa svakom novom mrežom i memorisanja dobijenih vrednosti na mestima koja su od značaja za proračun. Nakon svih proračuna potrebno je uporediti dobijene rezultate i ako su oni slični (razlika ne veća od npr. 5 %) za različite gustine mreže onda je prva mreža dovoljno dobar izbor za određenu geometriju, opterećenja i granične uslove. Ako se rezultati razlikuju u većoj meri, neophodno je mrežu učiniti sve finijom i finijom (sa većom gustinom mreže) i sprovođiti proračune dok se u dve uzastopne iteracije<sup>1</sup> ne pojave rešenja koja se ne razlikuju više od 5 %. Kada se to desi kažemo da je model konvergirao odnosno da nema potrebe ići na još veću gustinu mreže: dobijene vrednosti napona i deformacija su zadovoljavajuće tačnosti. Treba imati na umu da finija mreža ima svoju cenu: drastično povećanje vremena potrebnog za proračun i povećana potreba za proračunskom memorijom. Zato se opisanim testom mora odrediti minimalni broj konačnih elemenata koji će dati prihvatljivo rešenje.

<sup>1</sup> **Iteracija** predstavlja ponavljanje nekog procesa (matematičkog proračuna, fizičke analize i sl.) sa ciljem približavanja unapred definisanom cilju ili dobijanja rezultata određene tačnosti. U svakoj novoj iteraciji se za početne vrednosti promenljivih uzimaju vrednosti dobijene na kraju prethodne iteracije.

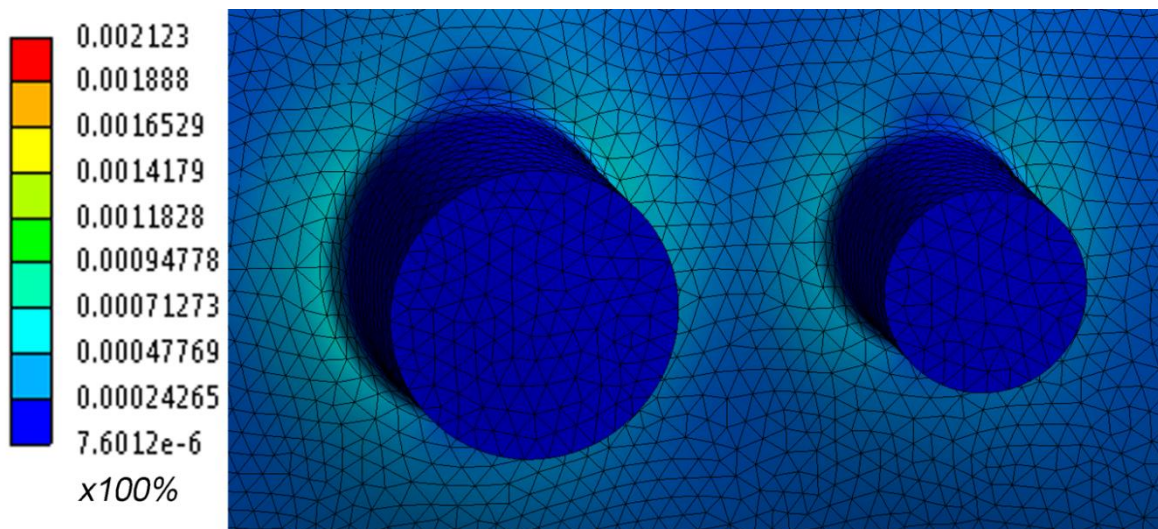
Numerička analiza je sprovedena za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom. S obzirom na geometriju posude pod pritiskom na koju su zavareni priključci, zbog čestih prelaza i krivina neophodno je precizno napraviti 3D model posude. Numerički proračun je izvršen za celu posudu sa priključcima, a detaljno je analiziran deo cilindričnog omotača na kome se nalaze priključci, što je i tema ove disertacije. U okviru numeričkih proračuna, u obzir nisu uzeti cevni nastavci sa kolenima (objašnjeno u poglavlju 2), jer nemaju velikog uticaja na deformacije i napone koji se javljaju u zoni uticaja priključaka na omotač.

#### *4.2. Linearna analiza*

Pod pretpostavkom da se materijal ponaša u granicama elastičnosti do vrednosti opterećenja od 1 MPa, u toku numeričkih proračuna za vrednosti pritiska 0.5 MPa i 1 MPa korišćena je linearno – statička analiza. Deformacije i naponi se linearno menjaju sa promenom opterećenja, tako da se rezultati mogu ekstrapolirati za druge vrste opterećenja.

##### *4.2.1. Rezultati numeričkih proračuna za merno mesto 1*

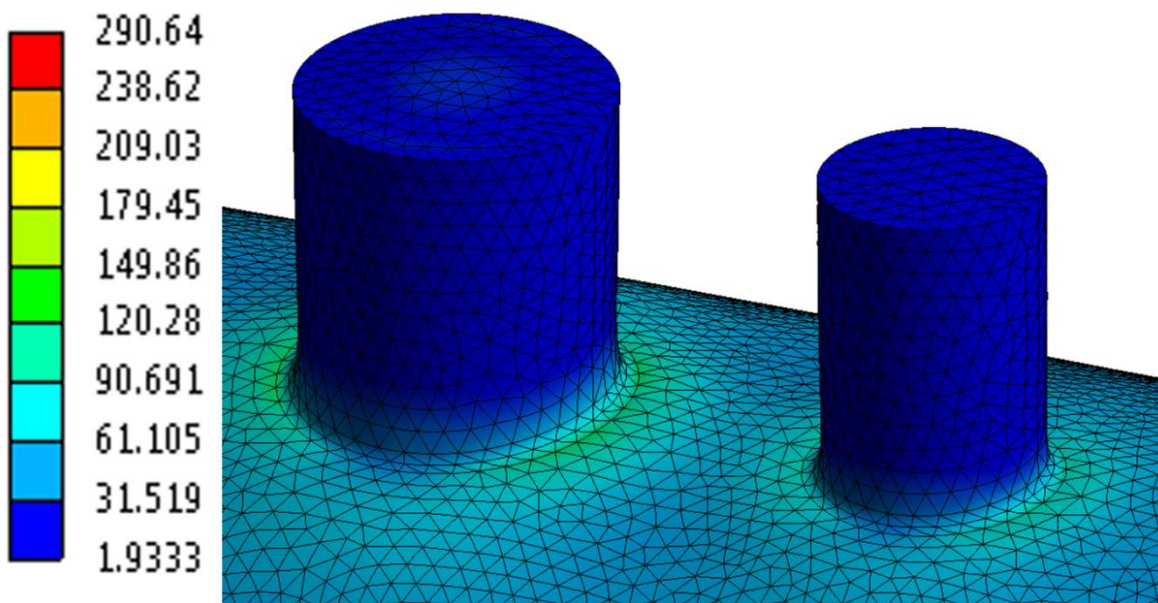
Polje Mizesovih deformacija za MM1, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa je prikazano na slici 4.2. Vrednosti prikazane na ordinati je potrebno pomnožiti sa 100, da bi se dobile procentualne vrednosti.



Slika 4.2. Vrednosti Mizesovih deformacija za *MM1*, za opterećenje unutrašnjim pritiskom 0,5 MPa

Najveće vrednosti Mizesovih deformacija pri opterećenju unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa se javljaju u okolini spoja priključka 1 i cilindričnog omotača, i iznose oko 0,062 %. Udaljavanjem od priključka 1 ka priključku 2 vrednosti deformacija se smanjuju, a u okolini priključka 2 rastu i iznose oko 0,048 %.

Polje Mizesovih napona između dva priključka i u njihovoj okolini, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa je prikazano na slici 4.3. Na ordinati je prikazana skala Mizesovih napona u MPa.

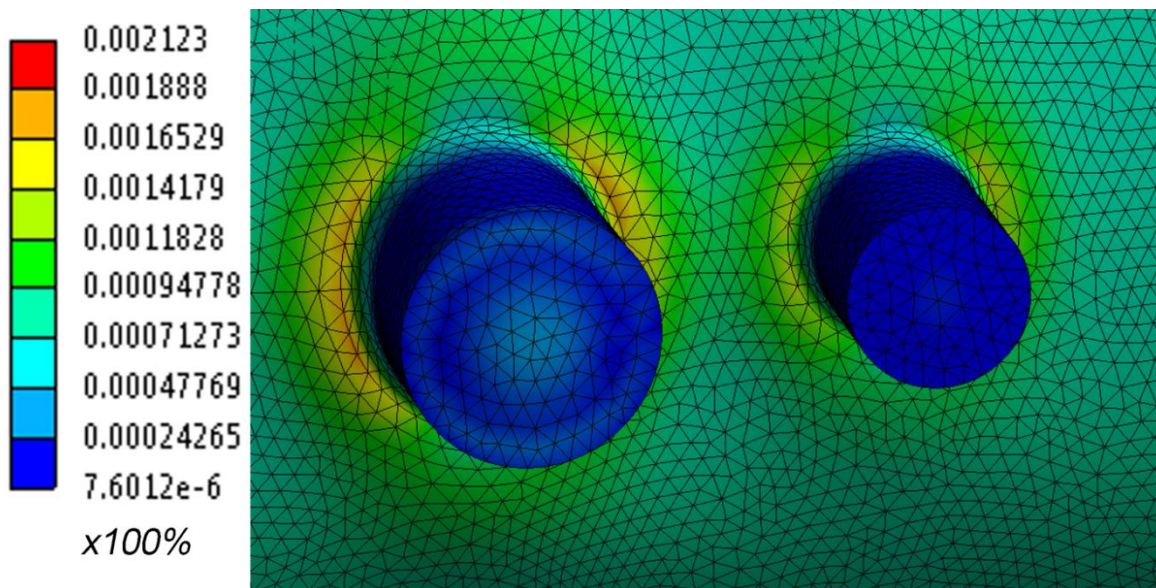


*Slika 4.3. Naponsko polje za MM1, za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa*

Najveće vrednosti Mizesovih napona se javljaju u zoni najvećih deformacija, u okolini spoja priključka 1 i cilindričnog omotača i iznose oko 120 MPa. Vrednosti napona na omotaču daleko od uticaja priključaka iznose oko 60 MPa.

Polje Mizesovih deformacija za MM1, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa je prikazano na slici 4.4. Vrednosti prikazane na ordinati je potrebno pomnožiti sa 100, da bi se dobile procentualne vrednosti.

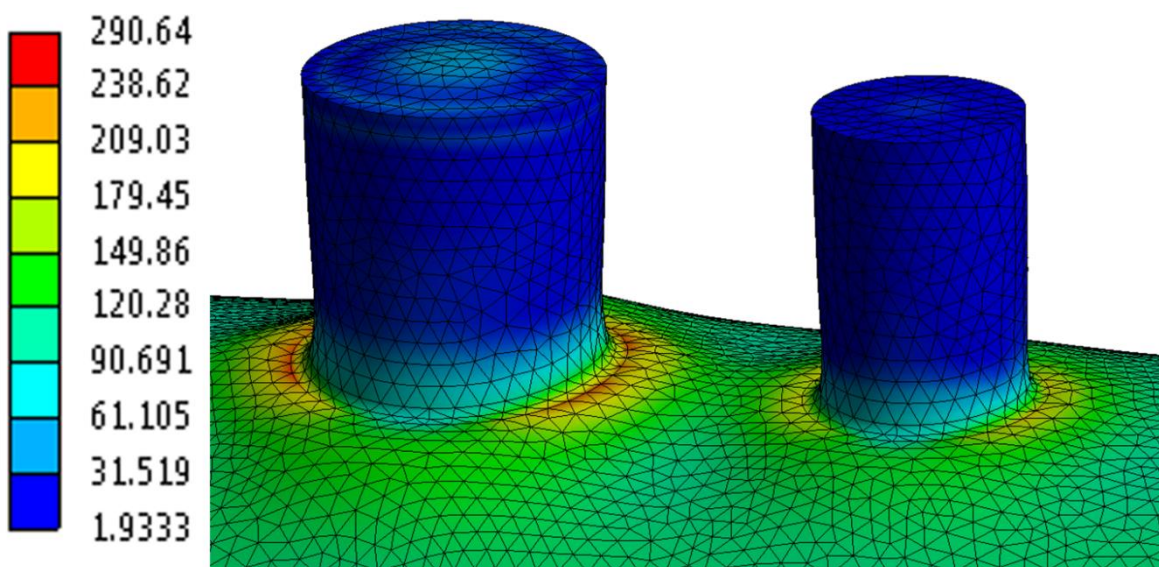




Slika 4.4. Vrednosti Mizesovih deformacija za MM1, za opterećenje unutrašnjim pritiskom 1 MPa

Najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju u okolini spoja priključka 1 i omotača, i iznose oko 0,13 %. Udaljavanjem od spoja vrednosti deformacija se smanjuju, a u okolini priključka 2 iznose oko 0,09 %.

Polje Mizesovih napona između dva priključka i u njihovoj okolini, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa je prikazano na slici 4.5. Na ordinati je prikazana skala Mizesovih napona u MPa.



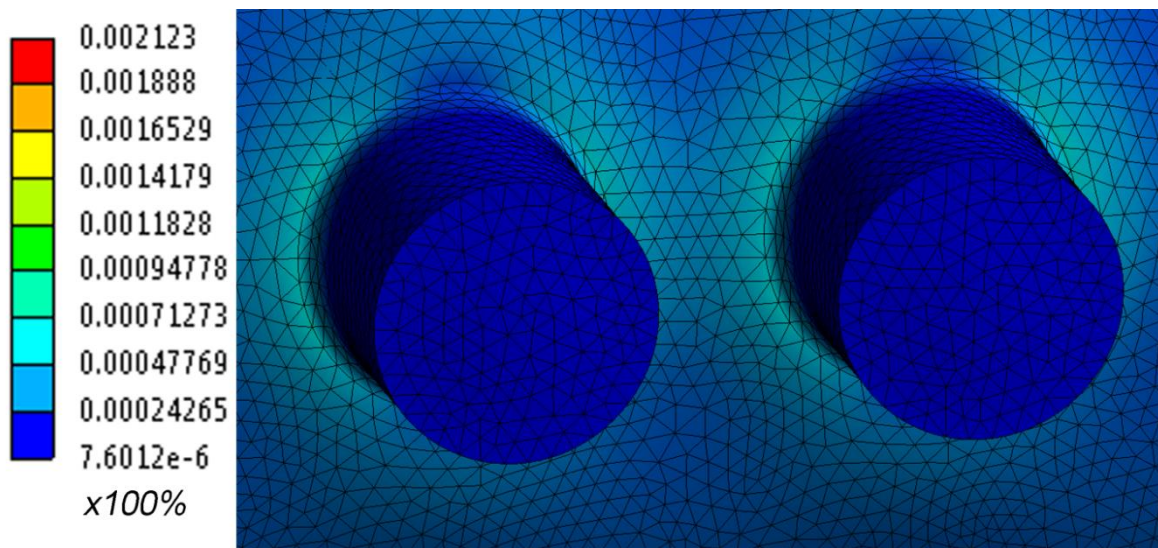
*Slika 4.5. Naponsko polje za MM1, za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 1 MPa*

Najveće vrednosti Mizesovih napona se javljaju u zoni najvećih deformacija, u okolini spoja priključka 1 i cilindričnog omotača i iznose oko 240 MPa.

#### *4.2.2. Rezultati numeričkih proračuna za merno mesto 2*

Na mernom mestu 2 su postavljena dva priključka istih dimenzija DN 50 ( $\text{Ø } 60,3 \times 2,9$ ), pa je očekivano da raspodela Mizesovih deformacija i napona bude simetrična uz oba priključka. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju u okolini spoja priključka i cilindričnog omotača.

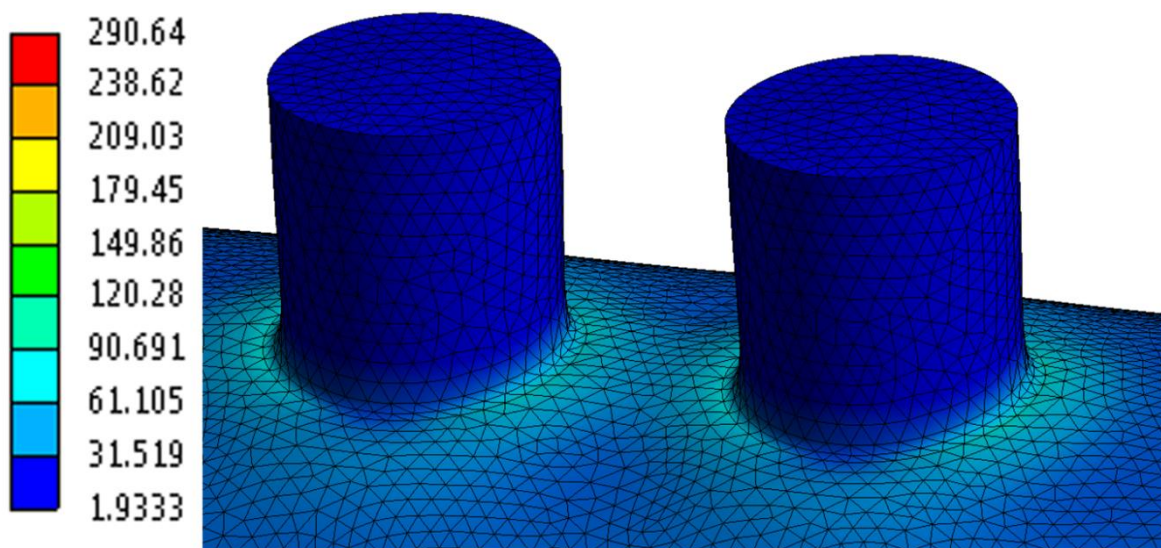
Polje Mizesovih deformacija za MM2, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa je prikazano na slici 4.6. Vrednosti prikazane na ordinati je potrebno pomnožiti sa 100, da bi se dobile procentualne vrednosti.



*Slika 4.6. Vrednosti Mizesovih deformacija za MM2, za opterećenje unutrašnjim pritiskom 0,5 MPa*

Najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju u okolini spoja priključaka i cilindričnog omotača, i iznose oko 0,062 %.

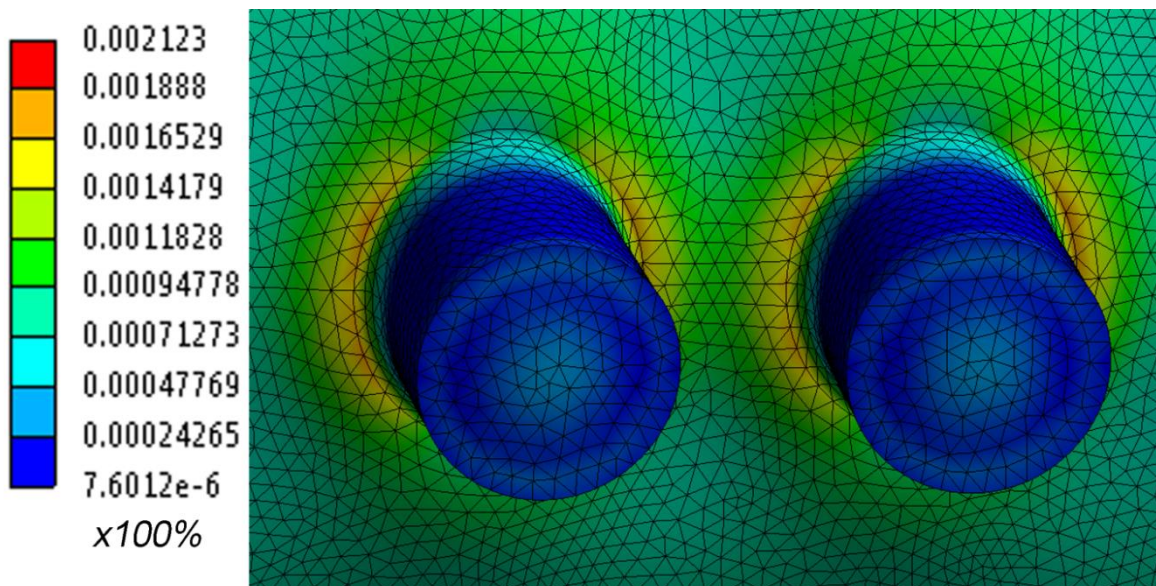
Polje Mizesovih napona između priključaka i u njihovoj okolini, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa je prikazano na slici 4.7. Na ordinati je prikazana skala Mizesovih napona u MPa.



*Slika 4.7. Naponsko polje za MM2, za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa*

Najveće vrednosti Mizesovih napona se javljaju u zoni najvećih deformacija, u okolini spoja priključaka i cilindričnog omotača i iznose oko 120 MPa.

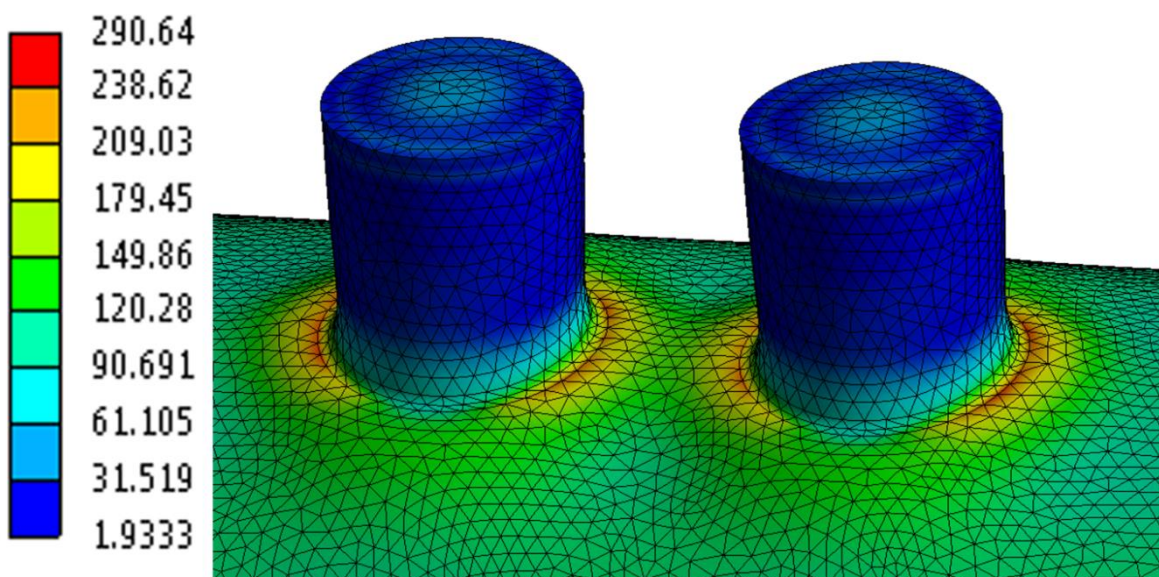
Polje Mizesovih deformacija za MM2, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa je prikazano na slici 4.8. Vrednosti prikazane na ordinati je potrebno pomnožiti sa 100, da bi se dobile procentualne vrednosti.



Slika 4.8. Vrednosti Mizesovih deformacija za MM2, za opterećenje unutrašnjim pritiskom 1 MPa

Najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju u okolini spoja priključka i omotača, i iznose oko 0,13 %.

Polje Mizesovih napona između priključaka i u njihovoj okolini, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa je prikazano na slici 4.9. Na ordinati je prikazana skala Mizesovih napona u MPa.



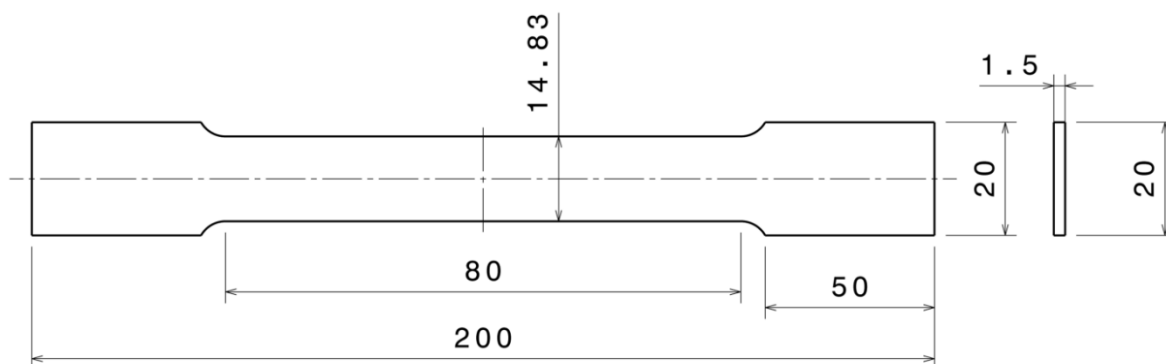
Slika 4.9. Naponsko polje za MM2, za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 1 MPa

Najveće vrednosti Mizesovih napona se javljaju u zoni najvećih deformacija, u okolini spoja priključaka i cilindričnog omotača i iznose oko 240 MPa.

#### 4.3. Nelinearna numerička analiza

Većina realnih objekata u stvarnosti pokazuje nelinearno ponašanje. Ukoliko se nakon rasterećenja materijal ne vrati u prvobitno stanje kaže se da je materijal ušao u plastičnost, a zaostale deformacije nazivamo plastične deformacije. Kada dođe do plastične deformacije modul elastičnosti više nije konstantan i potrebno je ispitati karakteristike materijala. Za nelinearnu analizu metodom konačnih elemenata potrebne su mehaničke karakteristike materijala od kojeg je posuda napravljena. Ispitivanje svojstava materijala se obavlja ispitivanjem na zatezanje.

Za određivanje mehaničkih karakteristika neophodno je imati određeni broj epruveta, tako što se iz materijala iseca uzorak za ispitivanje od kojeg se obrađuju epruvete na određenu meru i oblik. Dimenzije epruvete su date na slici 4.10.



*Slika 4.10. Epruveta za određivanje mehaničkih karakteristika materijala*

Na srednjem delu smanjenog preseka se vrše sva merenja i posmatranja pri ispitivanju, i taj deo se naziva merni deo. Epruveta ne sme imati nikakva mehanička oštećenja, jer bi se na tim mestima pojavila koncentracija napona pa dobijeni rezultati ne bi bili tačni. Kada se uzorak optereti u mašini za zatezanje, uzorak se prvo deformiše elastično, a zatim plastično.

Ispitivanje je obavljeno u Laboratoriji za mehanička ispitivanja na Tehnološko - Metalurškom fakultetu u Beogradu.

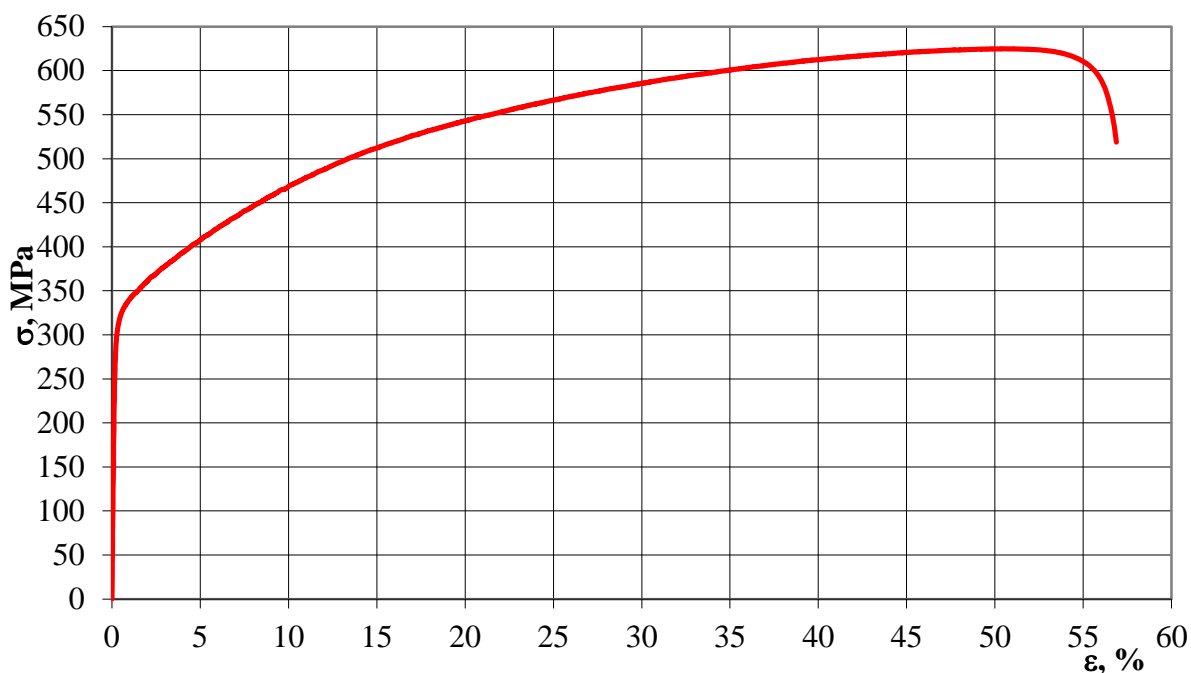
Ispitivanje je obavljeno na posebnom uređaju, kidalici „INSTRON - 1332” (slika 4.11.), a sam postupak ispitivanja je definisan standardom SRPS EN ISO 6892 - 1:2012. Metalni materijali. – Ispitivanje zatezanjem. Deo 1. Ispitivanje na sobnoj temperaturi.



*Slika 4.11. Ispitivanje zatezanjem na kidalici*

Na slici 4.11. je prikazan postupak ispitivanja zatezanjem, nakon čega se dobija kriva napon – izduženje koja opisuje ponašanje materijala pri zadanom opterećenju. Dijagram napon – izduženje za materijal X5 CrNi 18 10 od kojeg je posuda napravljena, prikazan je na slici 4.12.





Slika 4.12. Dijagram  $\sigma - \epsilon$  za materijal X5 CrNi 18 10

Treba napomenuti da upravo kod definisanja karakteristika materijala može doći do značajnih odstupanja u odnosu na stvarne vrednosti. Takođe, uslovi ispitivanja (temperatura, vlažnost) mogu uticati i na izmerene vrednosti svojstava materijala. Rezultati određivanja mehaničkih svojstava za materijal X5 CrNi 18 10, dati su u tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Rezultati određivanja zateznih karakteristika za X5 CrNi 18 10

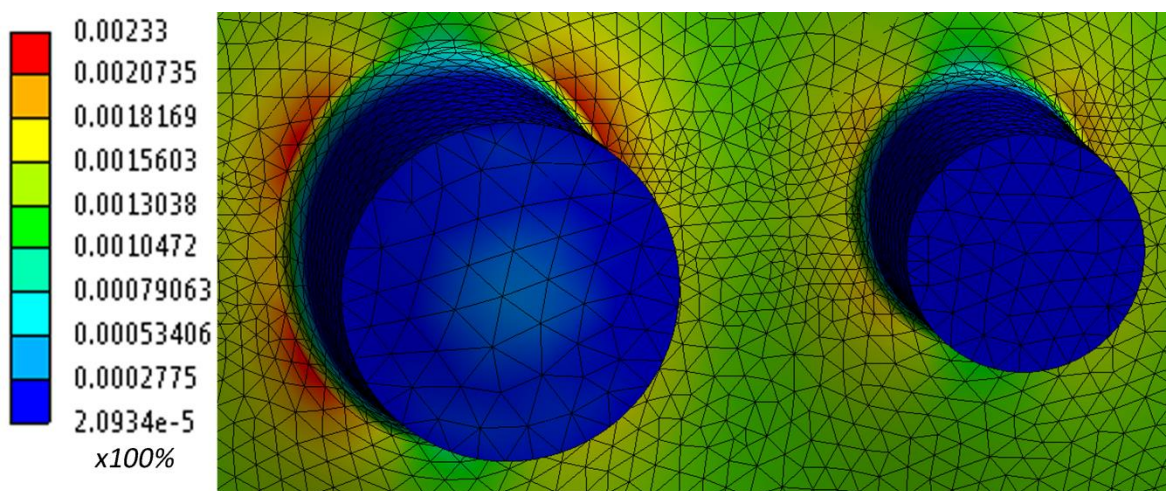
Materijal	Napon tečenja (MPa)	Zatezna čvrstoća (MPa)	Izduženje (%)
X5 CrNi 18 10			
Sertifikat BS EN 10204/3.1	308	635	59
Izmerene vrednosti	313	625	56,88

Na osnovu dijagrama dobijenog ispitivanjem uzorka, za nelinearni proračun, korišćen je postupak koji definiše očvršćavanje materijala (opcija u softveru Ansys „Multilinear Isotropic Hardening“). Podaci dobijeni ispitivanjem mehaničkih svojstava, su korišćeni kako bi se opisalo ponašanje cilindričnog omotača nakon dostizanja napona

tečenja. U okviru ovog proračuna je korišćena multilinearna izotropna kriva. Izotropno očvršćavanje kaže da se plastična deformacija širi ravnomerno u svim pravcima.

#### 4.3.1. Rezultati nelinearnih numeričkih proračuna za MM1

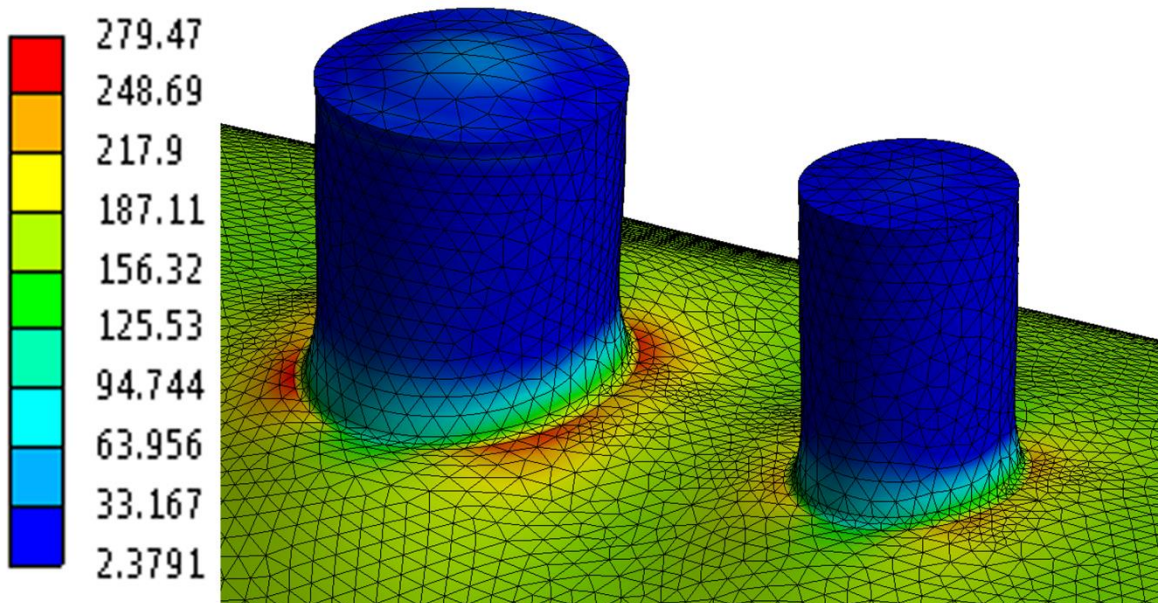
Raspodela Mizesovih deformacija za MM1, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa, dobijena nelinearnom numeričkom analizom je prikazana na slici 4.13. Vrednosti prikazane na ordinati je potrebno pomnožiti sa 100, da bi se dobile procentualne vrednosti.



Slika 4.13. Polje deformacija između priključaka, MM1 za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa

Najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju u okolini spoja priključka 1 i omotača, i iznose oko 0,23 %. Vrednosti Mizesovih deformacija u okolini priključka 2 iznose oko 0,19 %.

Polje Mizesovih napona između priključaka i u njihovoj okolini, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa je prikazano na slici 4.14. Na ordinati je prikazana skala Mizesovih napona u MPa.

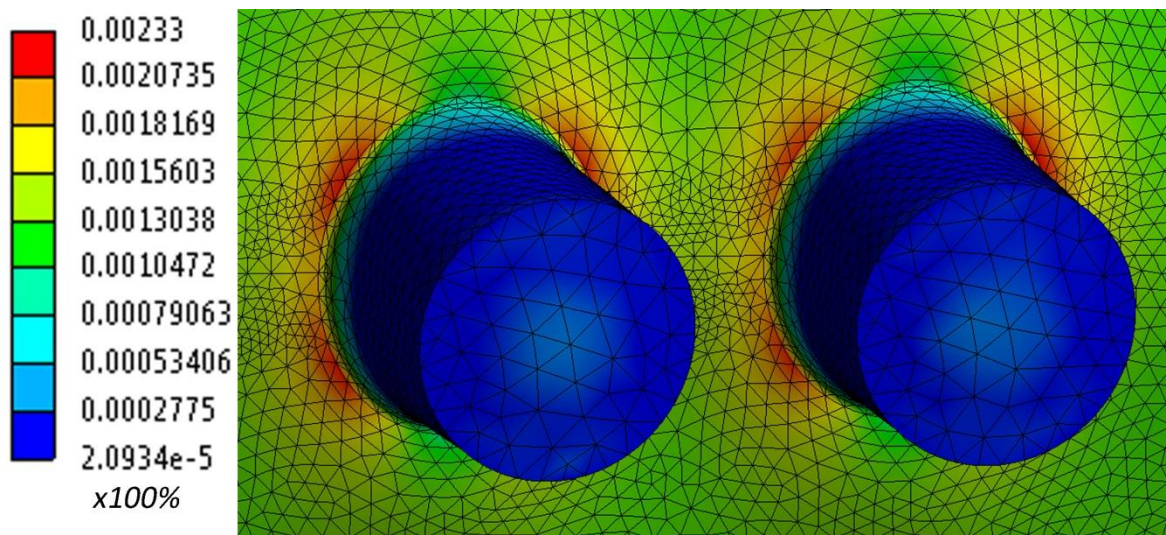


Slika 4.14. Naponsko polje za MM1, za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa

Najveće vrednosti Mizesovih napona se javljaju u okolini spoja priključka 1 i cilindričnog omotača, i iznose oko 280 MPa. Vrednost Mizesovih napona u okolini priključka 2 iznose oko 250 MPa.

#### 4.3.2. Rezultati nelinearnih numeričkih proračuna za MM2

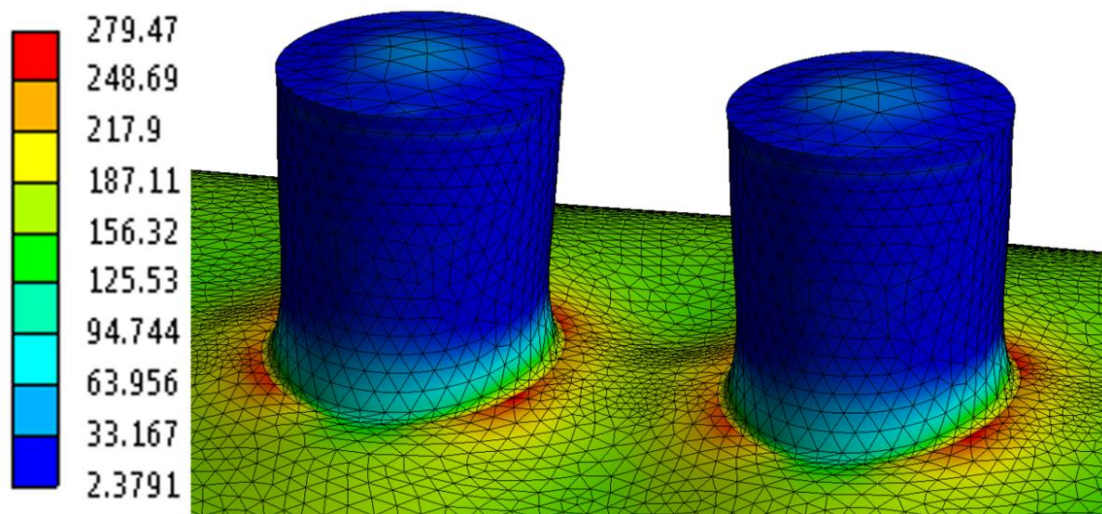
Raspodela Mizesovih deformacija za MM2, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa, dobijena nelinearnom numeričkom analizom je prikazana na slici 4.15. Vrednosti prikazane na ordinati je potrebno pomnožiti sa 100, da bi se dobile procentualne vrednosti.



*Slika 4.15. Polje deformacija između priključaka, MM2 za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa*

Najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju u okolini spoja priključka i omotača, i iznose oko 0,23 %. Za MM2 gde su priključci istih dimenzija raspodela Mizesovih deformacija je simetrična uz oba priključka.

Polje Mizesovih napona između priključaka i u njihovoj okolini, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa je prikazano na slici 4.16. Na ordinati je prikazana skala Mizesovih napona u MPa.



*Slika 4.16. Naponsko polje za MM2, za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa*

Najveće vrednosti Mizesovih napona se javljaju u okolini spoja priključka i omotača, i iznose oko 280 MPa.

## 5. EKSPERIMENTALNE METODE

### *5.1. Eksperimentalno određivanje deformacija i naponskog stanja na cilindričnom omotaču posude pod pritiskom*

#### *5.1.1. Sistem za 3D optičko merenje deformacija*

Metoda za trodimenzionalnu (3D) optičku analizu deformacija zasniva se na korelaciji digitalnih slika (DIC – Digital Image Correlation). Ova tehnika uključuje digitalizaciju pripremljene merne površine slikanog objekta pre i posle dejstva opterećenja tj. pomeranja ili deformisanja. Oprema za eksperimentalnu analizu se sastoji iz sistema za 3D optičku analizu deformacija/pomeranja, tj. posebnih setova stereo kamera i sočiva za svaki od softvera, programskog paketa Aramis, postolja koje omogućava sigurnost i stabilnost senzora, uređaja za kontrolu napajanja i snimanja slika, PC sistema i dodatnog osvetljenja (slika 5.1.).

Sve promene početnih tačaka ili malih površina na slikama porede se sa prethodnim slikama u nizu, korišćenjem korelacionih funkcija, do pronalaženja što približnije sličnosti. Svaki piksel na slici ima svoju numeričku vrednost i poređenjem slika porede se nizovi tih vrednosti. Rezolucija pomeranja u pod – pikselskom opsegu se kreće od 0,02 do 0,01 piksela, a maksimalna tačnost deformacije je reda veličine 0,02 %.



*Slika 5.1. Aramis sistem [77]*

Pre svakog merenja potrebni koraci za izvođenje procedure merenja su sledeći:

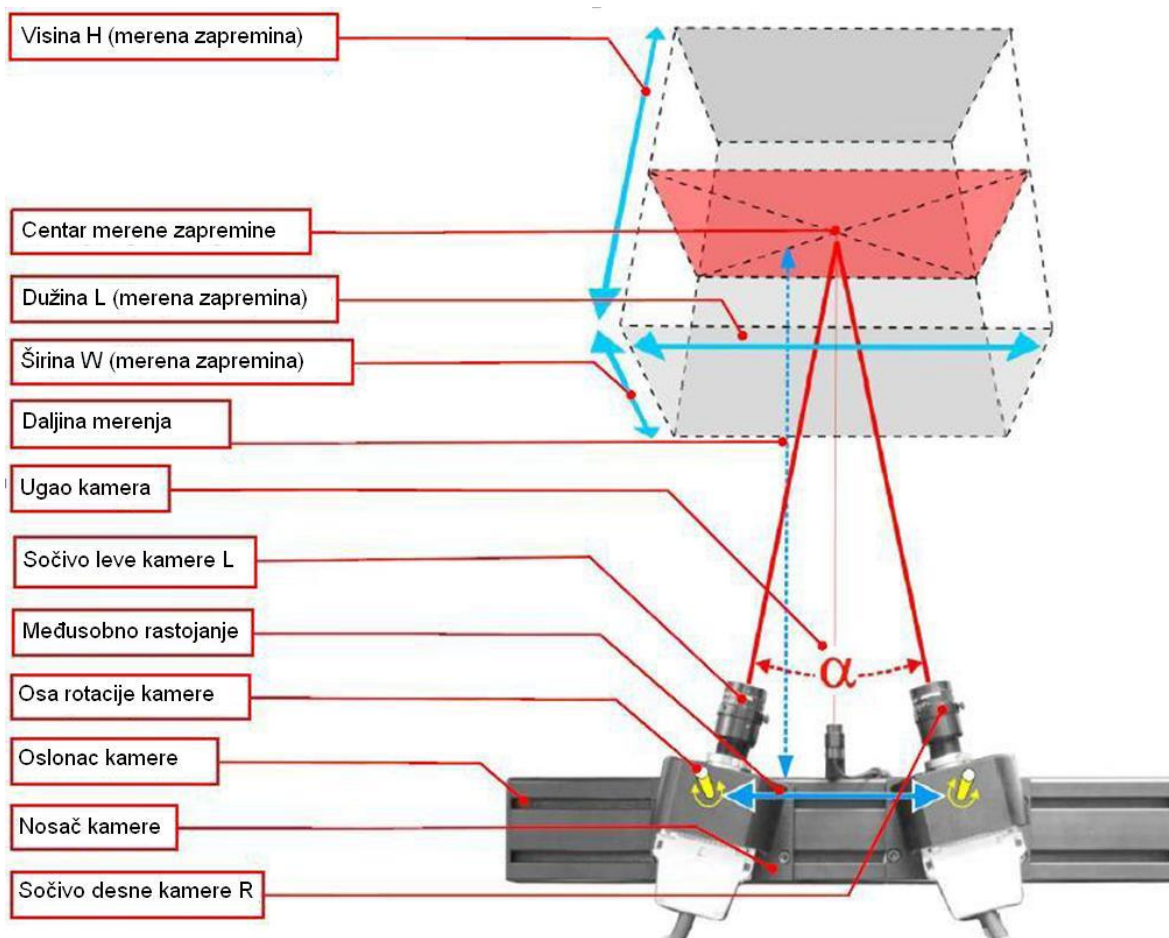
1. definisanje merne zapremine. Pre početka merenja potrebno je definisati dimenzije mernog objekta, tako da se merni objekt nalazi unutar definisane merne zapremine u svim koracima deformisanja;
2. priprema uzorka;
3. hardversko podešavanje sistema;
4. kalibracija merne zapremine;
5. otvaranje novog projekta u programu i definisanje njegovih parametara (male površine, opseg deformacija, ključne reči, parametri koraka);
6. podešavanje načina snimanja slika, na primer jednostavno (simple measurement) ili brzo merenje (fast measurement);
7. snimanje slika tokom merenja;
8. definisanje veličine „malih površina“;
9. definisanje proračunskog okvira u slikama za merenje, tako da se samo bitne oblasti uzorka proračunavaju;

10. definisanje početne tačke za postupak proračuna;
11. proračun;
12. izbor načina prikazivanja rezultata;
13. transformacija koordinatnog sistema;
14. procesuiranje podataka radi uklanjanja smetnji pri merenju, interpoliranje nedostajućih trodimenzionalnih tačaka, naglašavanje lokalnih uticaja itd.;
15. definisanje elemenata za analizu, preseka ili tačaka u koracima;
16. dokumentovanje rezultata.

### *5.1.2. Definisavanje merne zapremine*

Pre početka merenja potrebno je izabrati odgovarajuću zapreminu merenja koja zavisi od dimenzija mernog objekta, odnosno od dimenzija merne površine. Merna površina predstavlja analizirano polje deformacija i mora da se nalazi unutar merne zapremine u svakom trenutku snimanja. U zavisnosti od veličine merenog objekta i raspoloživih sočiva, odgovarajuća merna zapremina se može izabrati na osnovu preporuka proizvođača. Ukoliko je potrebno prilagoditi mernu zapreminu, potrebno je i ponovo podesiti i kalibrisati senzor. Izabranom mernom zapreminom određuje se rastojanje između senzorske jedinice i mernog uzorka (slika 5.2.).





Slika 5.2. Senzorska jedinica [77]

Pre upotrebe sistema, neophodno je podešavanje senzorske jedinice, odnosno potrebno je izvršiti hardversku kalibraciju sistema. Potrebno je podesiti ugao između sočiva, fokus i blendu. Potom se ceo sistem kalibriše uz pomoć kalibracionih ploča ili krstova. Kada se kalibracijom uspešno podesi zapremina merenja, može se početi sa eksperimentalnim merenjima.

### 5.1.3. Priprema merne površine

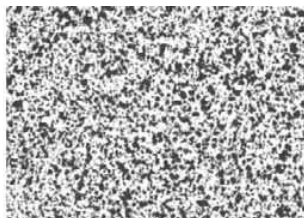
Struktura površine je veoma važna pri pripremi merne površine i realizacije merenja. Površina uzorka mora da zadovolji sledeće zahteve:

- površina mernog objekta mora imati nanetu fino dispergovanu boju, kako bi se jasno definisali pikseli na slikama snimljenim kamerama. Iz tog razloga, oblast piksela na referentnoj slici može biti dodeljena odgovarajućoj oblasti piksela na narednoj slici.
- naneta dispergovana boja mora pratiti konturu merne površine, ne sme se razlivati i lomiti.
- optimalna površina je relativno ravna. Izrazito hrapave površine mogu napraviti problem pri određivanju malih površina i proračuna 3D tačaka.
- naneta dispergovana boja na uzorku mora da ima dobar kontrast, jer u suprotnom dodeljivanje piksela neće biti uspešno.
- naneta dispergovana boja na površini mora biti mat, kako bi se eliminisala pojava refleksije. Reflektovana svetlost izaziva loš kontrast i razliku u osvetljenju između leve i desne kamere, koja nije poželjna i daje loše rezultate pri proračunu malih površina u oblastima gde se ona javlja.

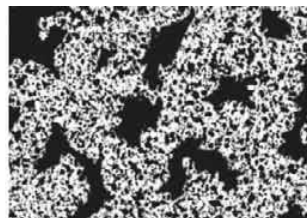
Sa jedne strane, veličina fino dispergovanih tačaka mora biti dovoljno mala da omogući fini raspored malih površina tokom proračuna, a sa druge strane mora biti dovoljno krupna da bi u potpunosti bila prepoznatljiva za kamere. Najbolje su stohastične šare koje su prilagođene kontrolnoj zapremini, rezoluciji kamere i veličini malih površina. U zavisnosti od zadatka merenja i uslova u kojima se odvija merenje koriste se različiti lakovi i boje u spreju. Merna površina se mora prvo očistiti od nečistoća (bez tragova masti, ulja) kako bi se nanela stohastička šara. U prvom koraku potrebno je naneti beli i mat sjaj. Kao drugi korak, potrebno je naneti crni stohastično dispergovani sloj i na taj način se dobija pogodna površina za merenje – šara. Manje merne zapremine zahtevaju finiju šaru od većih mernih zapremina. Da bi se proverilo da li je postignuta odgovarajuća šara za određenu mernu zapreminu, potrebno je dobijenu šaru uporediti sa referentnim šarama preporučenim od strane proizvođača.



a) Nepogodna stohastička šara niskog kontrasta



b) Nepogodna stohastička šara visokog kontrasta

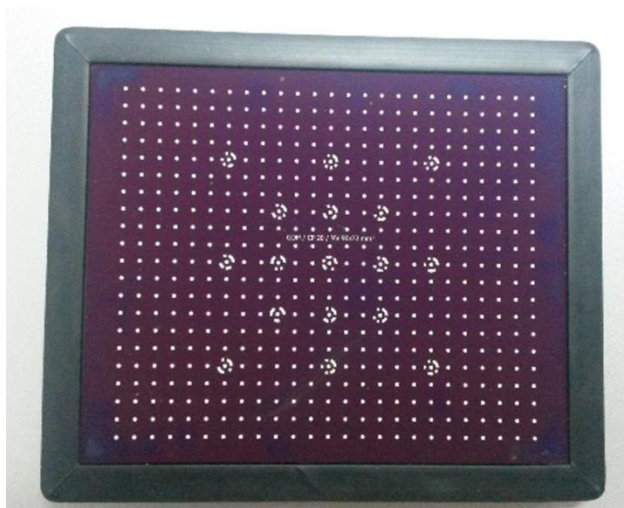


c) Dobra stohastička šara visokog kontrasta sa velikim tačkama

*Slika 5.3. Primeri loših i dobrih stohastičkih šara*

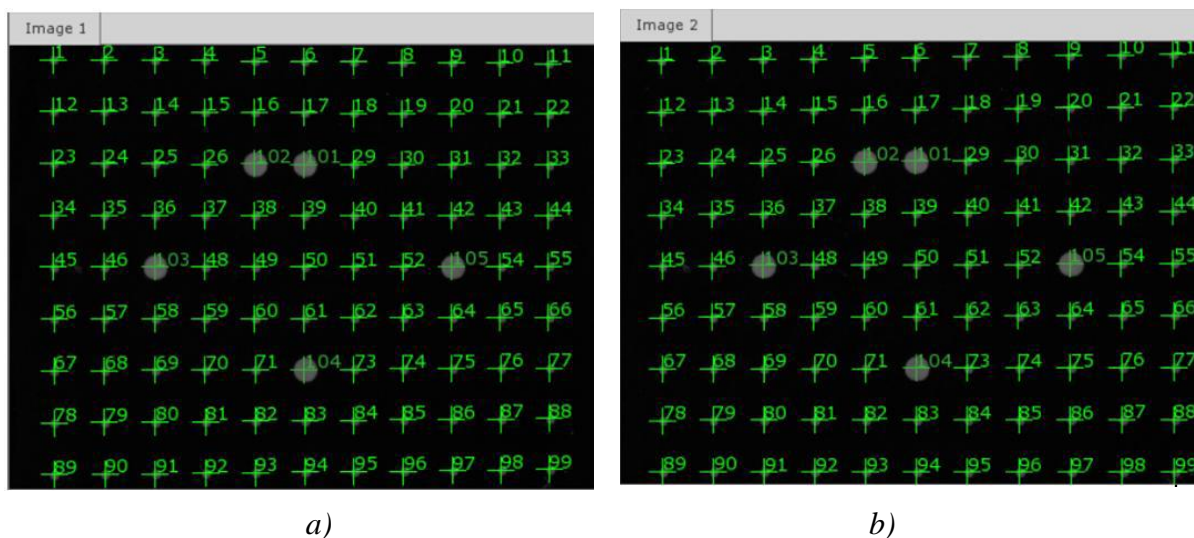
#### 5.1.4. Kalibracija sistema

Kalibracija je proces tokom kojeg se obezbeđuje dimenziona konzistencija sistema za merenje. Za svaku standardnu zapreminu merenja, postoji odgovarajuće kalibraciono telo koje može biti ploča ili krst, i koji postoje u različitim veličinama i verzijama [77]. Kalibracione ploče se koriste za male, a kalibracioni krstovi za velike merne zapremine. Parametri kalibracije (rastojanje između kamera i njihova orijentacija, fokus, podaci o kalibracionim telima i dr.) su definisani od strane proizvođača. Na slici 5.4. je prikazana kalibraciona ploča korišćena u okviru ovog rada.



Slika 5.4. Izgled kalibracione ploče sa dve referentne dužine

Postupak kalibracije se sastoji iz 13 koraka (definisano od strane proizvođača), pri čemu za ispravnu kalibraciju softver mora u svakom koraku da prepozna referentne tačke na kalibracionoj ploči. Jedan od parametara uspešne kalibracije je da sistem sa obe kamere prepozna i numeričke referentne tačke na kalibracionoj ploči u svakom koraku (slika 5.5.).



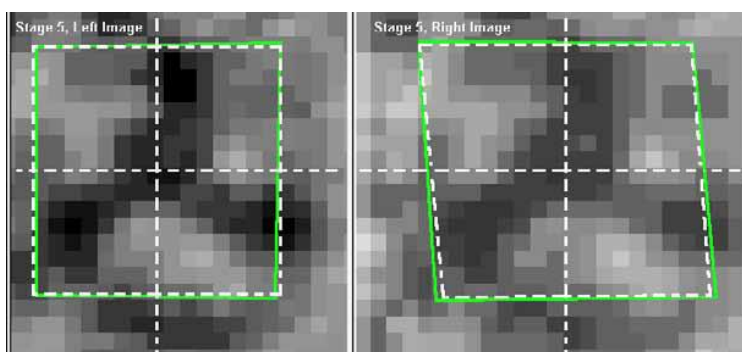
Slika 5.5. Numeracija tačaka u toku kalibracije: a) leva kamera; b) desna kamera

U radnim uslovima, senzor se ne sme izlagati nepotrebnim promenama temperature, dejstvu visoke temperature u slučaju jakog osvetljenja objekta [77]. Na kraju postupka kalibracije, program prikazuje rezultate kalibracije. Za tačnu kalibraciju, odstupanje mora biti između 0,01 i 0,04 piksela. Dobijeno odstupanje (calibration deviation) iznosi 0,028 piksela, što ulazi u okvire prihvatljivosti. Veliko odstupanje ukazuje na pogrešno, oštećeno kalibraciono telo ili netačne parametre razmere.

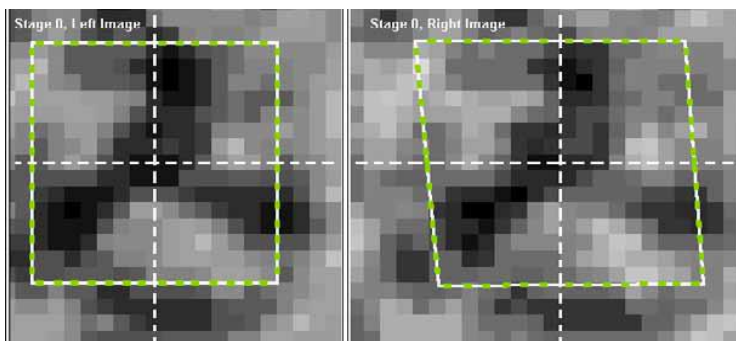
Na osnovu ovih podešavanja, program proračunava na osnovu referentnih tačaka kalibracionog tela na slikama njihove 3D koordinate. Izračunate 3D koordinate se zatim ponovo dodeljuju 2D slikama sa kamere. Ovakav pristup dovodi do odstupanja referentnih tačaka i prikazivanja greški preklapanja, odnosno pozicije referentnih tačaka. Ukupno odstupanje kalibracije se izračunava na osnovu prosečnog odstupanja svih referentnih tačaka koje su snimane tokom procesa kalibracije.

#### 5.1.5. Definisane veličine „malih površina“

Program tokom proračuna registruje deformaciju uzorka pomoću slika koje su podeljene na kvadratne i pravougaone „male površine“. Na slici 5.6. su prikazane „male površine“ sa leve i desne kamere, čije su vrednosti nivoa sive boje praćene kroz dva koraka deformisanja. U programu je moguće podešavanje veličine „malih površina“.



a)



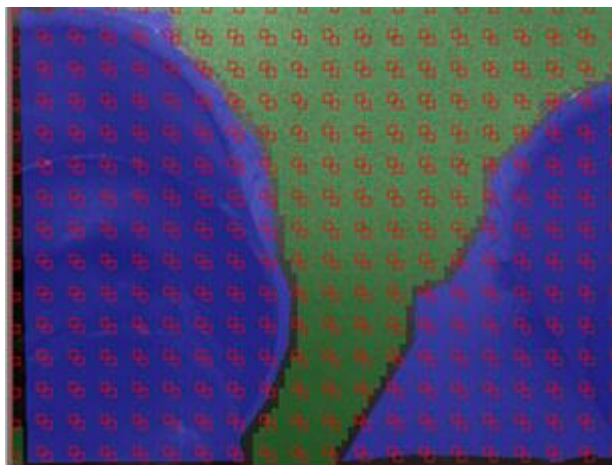
b)

Slika 5.6. Deformacija malih površina, a) korak 0, b) korak 1 [77]

Korak 0 je nedeformisani korak, a korak 1 je konačno stanje deformisanosti. Belom isprekidanom linijom je prikazano nedeformisano stanje, a na osnovu uglova zelene linije malih površina i rezultujućih centara sistem određuje dvodimenzionalne koordinate malih površina. Na osnovu koordinata „male površine“ posmatrane kroz levu kameru i „male površine“ posmatrane kroz desnu kameru dobijaju se zajedničke trodimenzionalne koordinate. Nakon uspešnog proračuna, podaci prolaze proceduru procesuiranja, a izmereni rezultat je dostupan u trodimenzionalnom prikazu.

Oblik „male površine“ (kvadrat, pravougaonik i četvorougao) utiče na mogućnost proračuna projekta merenja. Kvadratne i pravougaone male površine u nultom koraku su uvek složene tako da odgovaraju orijentaciji X-Y na dvodimenzionalnoj slici. Za merenje deformacija, gde je uzorak izložen velikim deformacijama, potrebno je koristiti pravougaoni oblik male površine radi dobijanja odgovarajućih polja malih površina.

U slučaju četvorouganih uzoraka potrebno je napraviti odgovarajuće male površine do ivice uzorka, neophodno je ručno formirati male površine koje prate geometriju uzorka. Pojedinačne male površine će oblikovati odgovarajuće polje. Koordinatni X-Y sistem je takođe zasnovan na ovom polju. Za ispitivanje cilindrične posude pod pritiskom sa priključcima definisana je mala površina dimenzija 21 x 17 piksela. Mala površina je oblika četvorougla. Izgled i raspored malih površina je prikazan na slici 5.7.



Slika 5.7. „Male površine“ na cilindričnom omotaču posude između priključaka

#### 5.1.6. Proračun deformacija malih površina

Koristeći dimenzije jedne male površine na eksperimentalnom uzorku prikazan je princip proračuna 3D modela kroz nekoliko koraka pri deformisanju .

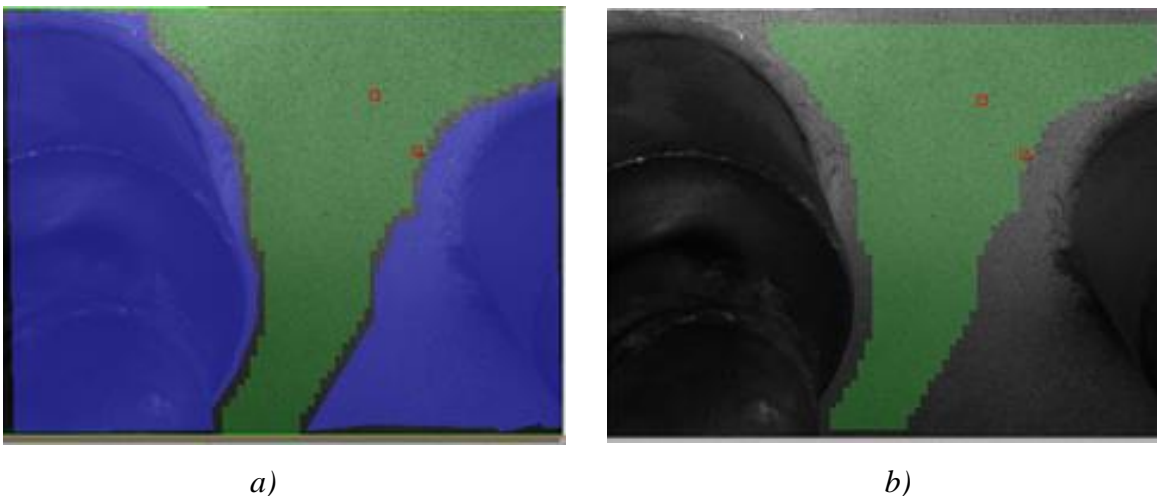
- Proračun malih površina zahteva koordinate početnih tačaka u svim koracima. Veličina male površine određena je pri definisanju polja malih površina pri započinjanju svakog novog projekta.
- Proračun počinje u nultom koraku.
- Pri definisanju početne tačke, program prepoznaje poziciju početne tačke i njenih susednih početnih tačaka na dvodimenzionalnim slikama. Identifikacijom pojedinačnih šara malih površina na levoj i desnoj slici sa kamera, četvorougona oblast je optimizovana. Iz rezultujućih koordinata početne tačke sa dvodimenzionalnih slika leve i desne kamere, izračunata je trodimenzionalna pozicija početne tačke.
- Posle proračuna trodimenzionalne pozicije jednog koraka, program automatski prelazi na drugi korak. Ovde je takođe poznata početna pozicija male površine zbog definisane početne tačke. Proračun trodimenzionalne pozicije male površine urađen je ponovo. Deformacije se kroz korake računaju u odnosu na nedeformisanu malu površinu koja se definiše u koraku 0.

- Rezultati proračuna deformacije proizilaze iz pomeranja trodimenzionalnih tačaka.

### 5.1.7. Proračunska maska

Da bi se izveo proračun „malih površina“ u definisanim oblastima slika sa dvodimenzionalnih kamera koristi se proračunska maska. Proračunske maske omogućavaju da se proračunaju samo oblasti koje su relevantne za deformaciju.

Za eksperimentalni model posude sa priključcima je, pomoću proračunskih maski definisana površina mernih polja, koja su analizirana u okviru ove disertacije. Na slici 5.8. je prikazana proračunska maska kojom je definisana oblast relevantna za dalji proračun za merno mesto 1, merno polje 1.



Slika 5.8. Proračunska maska za cilindrični omotač posude pod pritiskom između priključaka a) prilikom definisanja i b) definisana proračunska maska

Definisanjem proračunske maske, metalni oslonac na koji je posuda oslonjena kao ni krajevi posude, odnosno danca, nisu uključeni u proračun.



#### 5.1.8. Definisane početne tačke

Za proračun malih površina u svim koracima definisane su početne tačke. Moguće je koristiti i više različitih početnih tačaka u jednom projektu merenja, ali u opštem slučaju početna tačka se odnosi na istu malu površinu u svim koracima. Pri odabiru početnih tačaka posebna pažnja je posvećena tome da unutar male površine bude odgovarajuća šara, i da pozicija početnih tačaka ne ulazi u polje najvećih pomerenja, kako one ne bi napustile vidno polje jedne od kamera u svim koracima snimanja. Softver omogućava tri različita načina za definisanje početnih tačaka:

- *ručno ili poluautomatsko definisanje početne tačke,*
- *automatsko definisanje početnih tačaka,*
- *definisanje složenih tačaka.*

Početne tačke za merna mesta cilindrične posude sa priključcima su postavljene poluautomatski u zoni najmanjih deformacija.

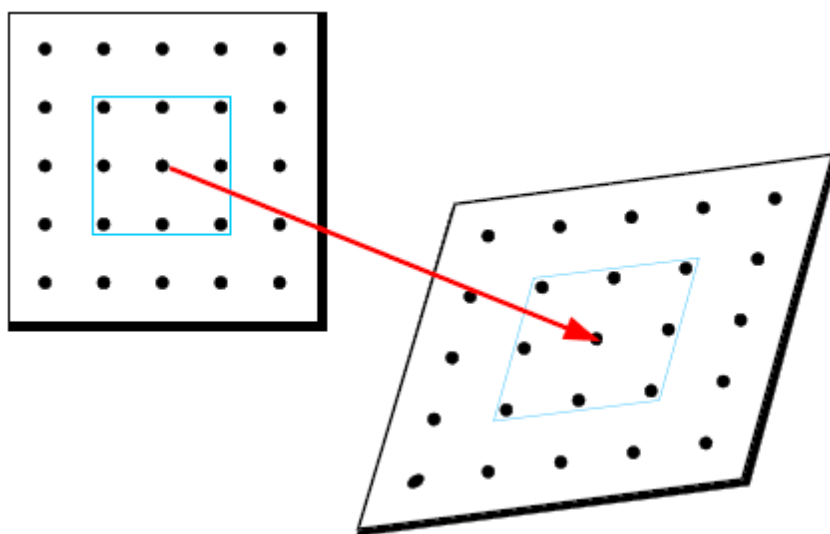
#### 5.1.9. Proračun deformacije

Za proračun deformacije *Aramis* koristi dve metode, proračun linearne deformacije i proračun parametarskom metodom deformacije. U ovoj disertaciji korišćen je proračun metodom linearne deformacije, koji se koristi kod većine merenja, koja se izvode primenom ovog sistema. Izuzetak predstavlja potreba za određivanjem deformacija u oblastima velikih geometrijskih diskontinuiteta na uzorcima, kada se koristi proračun parametarskom metodom deformacija.

##### 5.1.9.1. Metoda linearne deformacije

Na slici 5.9. su prikazani delovi uzorka u deformisanom i nedeformisanom stanju. U ovom primeru uzeta je u obzir deformacija merne tačke (crvena strelica) zajedno sa

okolnim tačkama (plavi četvorougao). Deformacija se određuje u vezi sa okolnim mernim tačkama koje direktno proističu iz malih površina. Prednosti ove metode su: brzi proračun deformacija, male smetnje pri merenju, stvarne tačke su referentne lokacije za deformaciju. Mane primene ove metode ogledaju se u tome što je teško odrediti deformaciju za krivine malih radijusa, koje su manje ili jednake veličini male površine. Važno je da plavi četvorougao nema veliko zakrivljenje, jer u suprotnom nastaje neodgovarajuća površina za proračun deformacije, što zahteva primenu druge metode proračuna.



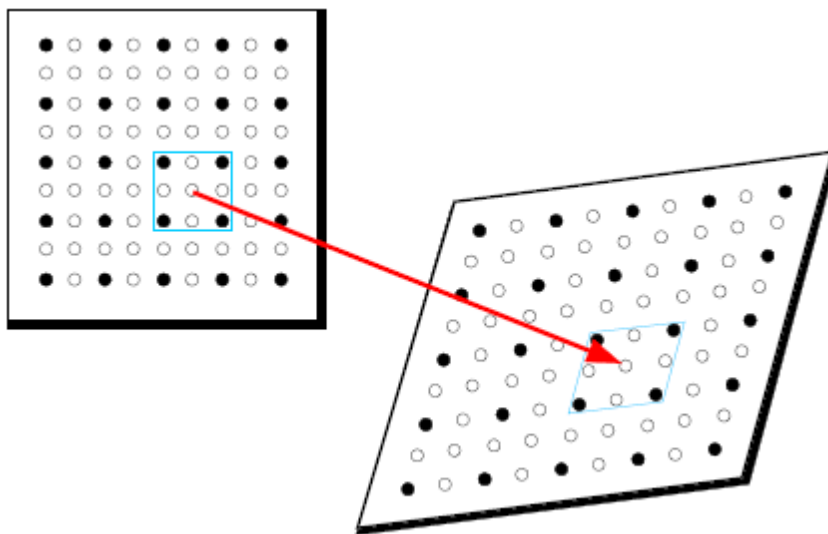
Slika 5.9. Grafički prikaz principa linearne metode proračuna deformacije [77]

Pri metodi linearne deformacije najznačajniji parametar je proračunska veličina polja, koja podrazumeva broj okolnih tačaka oko tačke proračuna deformacije. Najčešće korišćena vrednost za veličinu polja je i najmanja moguća, a to je tri. Ovo znači da se trodimenzionalno polje mernih tačaka veličine 3x3 koristi da bi se izračunala vrednost deformacije središnje tačke. Ova veličina polja je naročito korisna za određivanje lokalnih deformacija. Sa povećanjem veličine polja dolazi do smanjenja šuma pri snimanju, a u graničnim oblastima se mogu odrediti i manje deformacije. Ukoliko ne postoje sve susedne merne tačke oko središnje tačke, proračun deformacije središnje merne tačke se opet može izračunati. Broj neophodnih susednih mernih tačaka koje moraju da postoje da bi se izveo

proračun se određuje softverski. Najčešće se postavlja uslov da mora postojati minimum 55 % susednih tačaka.

#### 5.1.9.2. Parametarska metoda za proračun deformacije

Na slici 5.10. prikazan je izgled nedeformisanog i deformisanog stanja. Crne tačke na slici predstavljaju merne tačke koje proističu direktno iz malih površina, dok su bele tačke dobijene interpolacijom iz crnih tačaka koristeći parametarsku funkciju. U ovom slučaju, pri proračunu deformacija uzimaju se u obzir i vrednosti belih tačaka. Prednost ove metode je odgovarajuća vrednost dobijene deformacije u svim slučajevima oblika uzorka. Mane ove metode su duže vreme proračuna deformacija usled većeg broja tačaka, veći nivo šuma pri merenju i to što interpolirane tačke predstavljaju referentnu lokaciju za proračun deformacija. Zbog ograničenja sistema, proračun trodimenzionalnih tačaka u *Aramisu* se uvek izvodi na površini uzoraka.



Slika 5.10. Grafički prikaz principa parametarske metode proračuna deformacija [77]

#### *5.1.10. Rezultati sistema za optičko merenje deformacija*

Posle proračuna, dobijeni podaci su dostupni u dvodimenzionalnom i trodimenzionalnom obliku u svakom koraku. Pre sređivanja rezultata, potrebno je odabrati odgovarajući način predstavljanja 3D rezultata. Za prikazivanje rezultata, u dijagramima i 3D modelu mogu se napraviti tačke koraka, sekcije (sekcije ravni, kružne sekcije, parametarske sekcije) i primitivi. Program omogućava izdvajanje proračunatih 3D podataka.

S obzirom da sistem za optičko merenje deformacija snima trodimenzionalnu površinu mernog objekta, moguće je prikazati polje pomeranja mernih tačaka u sva tri pravca, kao i odgovarajuće vektore pomeranja. Koristeći prethodno definisane metode proračuna, sistem preračunava polja pomeranja i koordinate tačaka u polje deformacija. U okviru disertacije su prikazani rezultati Mizesove deformacije u pravcu Z ose.

Von Mizesova deformacija je jedan od tipova proračuna ekvivalentnih deformacija koji je našao široku primenu u inženjerskoj praksi.

## 6. EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA I POSTUPAK ISPITIVANJA

Na opremi pod pritiskom se najčešće javljaju sledeći oblici kompleksne geometrije:

- veza cilindar / cilindar,
- veza sfera / cilindar,
- veza konus / cilindar.

Kao najčešće korišćena eksperimentalna metoda, metoda mernih traka nije mogla u potpunosti da opiše ponašanje neke strukture pod opterećenjem. Usled ograničenja primene mernih traka, autori koji su se bavili problematikom čvrstoće realnih konstrukcija nisu uspevali eksperimentalno da analiziraju kritična mesta sa velikim geometrijskim diskontinuitetima.

Cilj ovih istraživanja je da se pokaže da 3D beskontaktna optička metoda može da se primeni, i da realno opiše zonu uticaja priključaka na cilindrični omotač posude izložene unutrašnjem pritisku. Ova metoda ne zavisi od vrste materijala i opterećenja. Za potrebe dokazivanja cilja disertacije izabrana je veza cilindrične posude i priključaka u obliku cilindričnih cevi. Posuda je izrađena zavarivanjem, priključci su zavareni za omotač posude, pa zavareni spojevi predstavljaju mesta najveće koncentracije napona. U okviru ovih eksperimentalnih istraživanja potrebno je odrediti polje deformacija u zoni između priključaka, tj. pokazati međusobni uticaj dva priključka postavljena na minimalno standardom dozvoljeno rastojanje. Na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata vrši se verifikacija numeričkog modela.

Eksperimentalna istraživanja su obavljena u Laboratoriji za procesnu tehniku i Laboratoriji za otpornost materijala na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

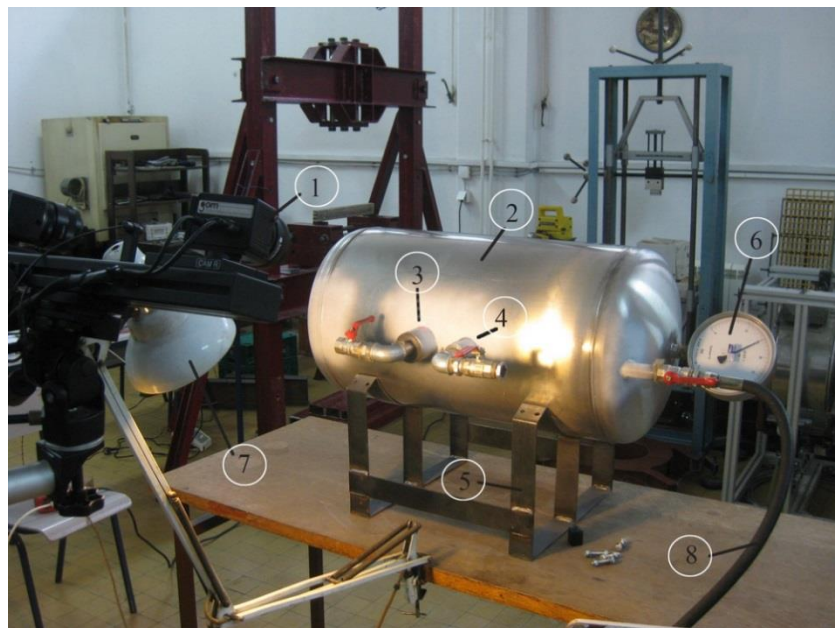
Oprema za eksperimentalnu analizu se sastoji iz sistema za 3D optičku analizu, tj. posebnih setova stereo kamera i sočiva za svaki od softvera, programskog paketa Aramis, postolja koje omogućava sigurnost i stabilnost senzora, uređaja za kontrolu napajanja i snimanja slika, PC sistema i dodatnog osvetljenja (slika 6.1.). Sistem za optičko merenje deformacija može da meri deformacije u opsegu od 0,01 % do 2000 %. Najveća merna zapremina sistema za optičko merenje koja je korišćena u okviru eksperimentalnih merenja je 105 x 80 x 55 mm.

### 6.1. Osnovni model

Posuda na kojoj je izvršeno merenje je prikazana na slici 2.1. (poglavlje 2), dimenzija  $\varnothing 378,4 \times 770$  mm, debljina omotača 1,5 mm. Posuda je horizontalno postavljena na dva oslonca. Krajevi cilindričnog omotača posude zatvoreni su standardnim torisferičnim dancima. Na jednom dancu nalazi se priključak od 3/4" koji služi za punjenje i pražnjenje posude, kao i priključna veza za povezivanje posude sa manometrom. Drugo dance je bez otvora i priključaka. Cilindrični omotač napravljen je od lima debljine 1,5 mm. Materijal od kojeg je napravljena posuda pod pritiskom je konstrukcioni čelik X5 CrNi 18 10 (SRPS EN 10088).

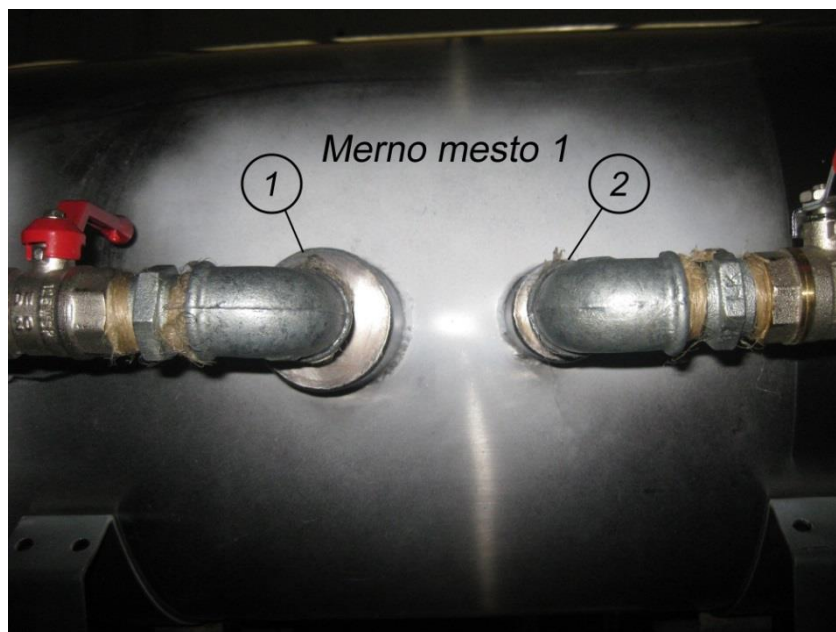
Na cilindričnom omotaču su postavljena četiri priključka u obliku cilindrične cevi, postavljena pod uglom od  $90^\circ$  u odnosu na izvodnicu omotača. Tri priključka su dimenzija DN 50 ( $\varnothing 60,3 \times 2,9$  mm) dužine 60 mm. Jedan priključak je dimenzija DN 32 ( $\varnothing 42,4 \times 2,6$  mm) dužine 60 mm. Priključci su za omotač spojeni zavarivanjem. Položaj priključaka je prikazan na slici 2.1.

Na jednoj strani cilindričnog omotača posude postavljena su dva priključka, dimenzija DN 50 i DN 32 na međuosnom rastojanju od 94,35 mm, (slika 2.1.). Na slici 6.1. je prikazana eksperimentalna instalacija, a polje između priključaka i u njihovoj okolini je definisano kao merno mesto 1 (MM1) i prikazano je na slici 6.2.



*Slika 6.1. Eksperimentalna instalacija, merno mesto 1*

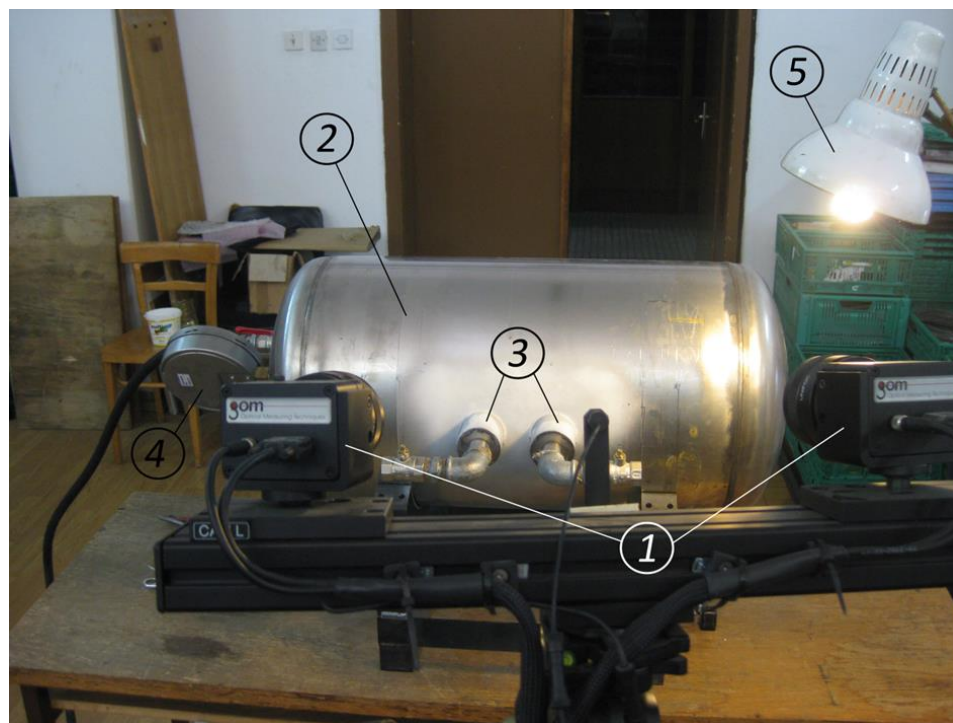
*1 – Stereo kamere; 2 – Posuda; 3 – Priključak 1 DN 50; 4 – Priključak 2 DN 32; 5 – Oslonac; ; 6 – Manometar; 7 – Osvetljenje; 8 – Ručna pumpa*



*Slika 6.2. Položaj mernog mesta 1*

*1 – Priključak 1, DN 50; 2 – Priključak 2, DN 32*

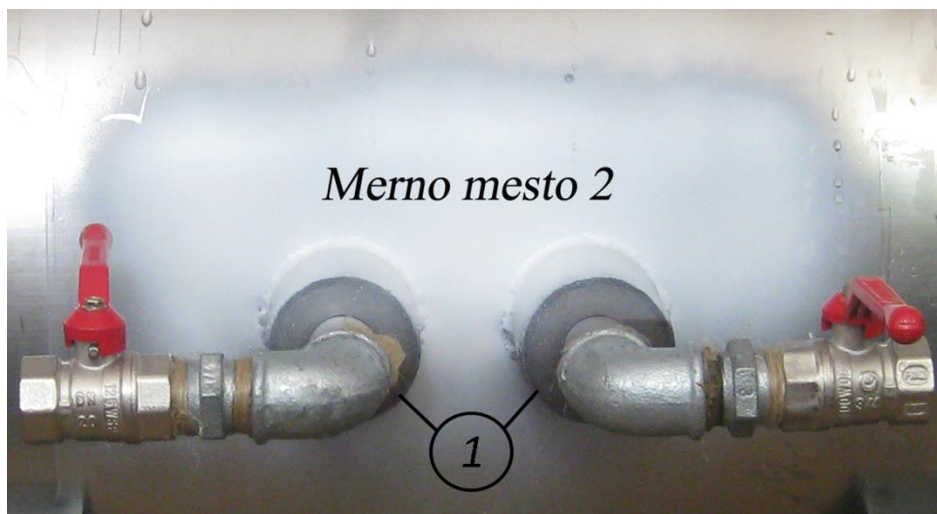
Sa druge strane omotača postavljena su dva priključka istih dimenzija DN 50, na minimalno dozvoljeno međuosno rastojanje od 98,3 mm, (slika 2.1.). Na slici 6.3. je prikazana eksperimentalna instalacija za definisano merno mesto 2. Na slici 6.4. je prikazan položaj mernog mesta 2.



*Slika 6.3. Eksperimentalna instalacija, merno mesto 2*

*1 – Stereo kamere; 2 – Posuda; 3 – Priključci DN 50; 4 – Manometar; 5 – Osvetljenje*





*Slika 6.4. Položaj mernog mesta 2*

*1 – Priključci DN 50*

Pumpa za povišenje pritiska je na ručni pogon, a u sklopu pumpe se nalazi i rezervoar za vodu. Pumpa je snabdevena ventilom za rasterećenje od pritiska.

Prilikom ispitivanja je korišćen manometar proizvođača Wika. Očitavanje pritiska je u bar, a opseg pokazivanja manometra je od 0 - 40 bar. Podela skale za očitavanje vrednosti pritiska je 0,2 bar.

Pod ostalom opremom se podrazumevaju kuglaste slavine, cevi odgovarajućih standardnih dimenzija, a njihov broj je određen na osnovu potrebe za pravilnim odvijanjem eksperimenta.

Kao dodatno osvetljenje u laboratoriji prilikom obavljanja ispitivanja, korišćena je lampa sa LED sijalicom, koja proizvodi difuzno svetlo i omogućava podešavanje intenziteta svetlosti.

## *6.2. Vrste opterećenja*

Eksperimentalna ispitivanja su izvršena za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom. Vrednosti opterećenja unutrašnjim pritiskom, utvrđene su na osnovu analitičkog proračuna primenom standarda, kao i numeričkom analizom. Utvrđeno je da će pritisak od 1 MPa

izazvati deformacije na cilindričnom omotaču koje su merljive digitalnim kamerama, a da pri tome neće ući u polje plastičnih deformacija. Ispitni fluid koji se koristi je voda, temperature 20°C.

### *6.3. Priprema eksperimentalne instalacije*

Posuda na kojoj se obavlja ispitivanje mora biti očišćena od nečistoća. Pre početka samog eksperimenta, a kao deo procedure za snimanje kamerama, sprejom je nanesen sloj bele mat boje. Zatim su nanete fino disperzovane crne tačke, kako bi dobili stohastičku šaru koja omogućava kamerama da prate njihovo pomeranje u toku opterećivanja.

Pre prvog merenja, sistem je kalibrisan po proceduri koja je opisana u poglavlju 5. Kada su merna zapremina i položaj kamera prilagođeni kalibracijom, počelo se sa merenjem.

### *6.4. Postupak merenja*

Pre samog početka merenja sprovedeno je od vazdušenja instalacije. Za ispravno sprovođenje merenja na različitim mernim mestima na cilindričnom omotaču, posuda je pozicionirana u optimalan položaj kako bi se zadovoljila neophodna vidljivost za pravilno funkcionisanje kamera. Nakon toga su postavljene kamere na propisanoj udaljenosti od mernog objekta (80 cm), kao i odgovarajuće dodatno osvetljenje.

U okviru priprema sistema za postupak merenja, obavljena su hardverska i softverska podešavanja, kalibracija, i podešavanje parametara za proces snimanja.

Za merenje deformacija posude pod pritiskom sa priključcima opterećene unutrašnjim pritiskom, parametri podešavanja na Aramisu su:

- sočiva kamera: 50 mm,
- udaljenost kamera od mernog objekta: 80 cm,
- kalibraciona ploča: dimenzije CP 20/90/DO7210,
- veličina merne zapremine: Facet size: 21x17,
- ukupan broj slika po jednom merenju: 5,

- odstupanje kalibracije: 0,028.

Opterećivanje unutrašnjim pritiskom i snimanje 3D sistemom je izvršeno manuelno. Prva slika koja se snimi za svaki eksperiment prikazuje nedeformisano stanje i ona služi kao referentna slika za obradu podataka. Opterećenje posude je obavljeno manuelno sa porastom pritiska prema postupku definisanom u standardu SRPS EN 13445 – 3. Za svaku dostignutu vrednost pritiska, slavina koja se nalazila između pumpe i posude je zatvarana, nakon čega se izvršilo snimanje kamerama. Posle snimanja, slavina je ponovo otvarana do sledeće vrednosti pritiska i isti postupak snimanja ponovljen. Posle dostizanja maksimalne vrednosti pritiska izvršeno je rasterećenje posude do pritiska okoline.

Po završetku procesa snimanja, pristupilo se obradi slika i pripremi za proces softverske obrade snimljenih rezultata. Referentne tačke preko kojih sistem povezuje podatke snimljene levom i desnom kamerom su definisane na početnoj nultoj slici (slici neopterećene posude), posle čega je sistem automatski postavljao referentne tačke na ostalim slikama. Nakon svih podešavanja, softver započinje obradu rezultata.

## 7. REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA

### 7.1. Rezultati eksperimenta

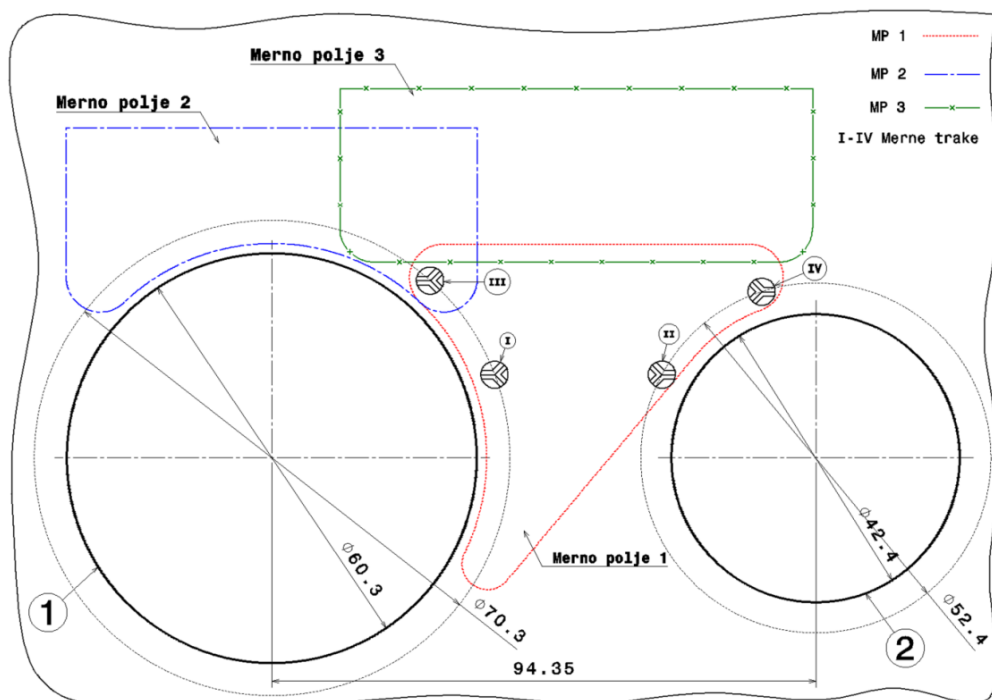
Eksperimentalna merenja polja deformacija između dva priključka prikazano je u ovom poglavlju pomoću slika, tabela i dijagrama. Za prikazivanje dobijenih rezultata za svako merno mesto i definisano merno polje pojedinačno, mogu se koristiti tačke, preseci ili primitivi. Način prikazivanja rezultata se bira prema karakteristikama mernih polja.

Program Aramis pored slika i dijagrama, pruža i detaljan tabelarni prikaz svih veličina koje se mogu analizirati i u drugim softverskim programima. Prilikom eksperimentalnih merenja sistem automatski definiše položaj koordinatnog sistema, ali za potrebe analize i dalje obrade rezultata, definisan je nov položaj koordinatnog sistema.

Eksperimentalna merenja su obavljena za vrednosti unutrašnjeg pritiska od 0,5 MPa, 1MPa i 1,5 MPa. Za prikazivanje dobijenih eksperimentalnih rezultata korišćeni su linijski preseci (sections). Merna polja, u okviru mernih mesta su izabrana tako da ne obuhvataju zonu uticaja zavarenog spoja, pa su linijski preseci postavljeni na dovoljnom rastojanju od ivice priključaka (minimalno rastojanje  $3e_a$ ).

### 7.2. Rezultati eksperimentalnih merenja za merno mesto 1

Merno mesto 1 se nalazi između priključaka DN 50 i DN 32. Kako bi dobili realnu sliku ponašanja omotača između dva priključka i u njihovoj okolini za MM1 definisana su tri merna polja, što je šematski prikazano na slici 7.1. Merno polje 1 obuhvata polje deformacija između priključaka, merno polje 2 je definisano tako da obuhvata zonu oko većeg priključka (DN 50), a merno polje 3 obuhvata zonu iznad priključaka. Ukupan broj napravljenih slika je 3 za svaki pritisak pojedinačno, što znači ukupno (uključujući slike neopterećenog i rasterećenog stanja) 15 snimaka.

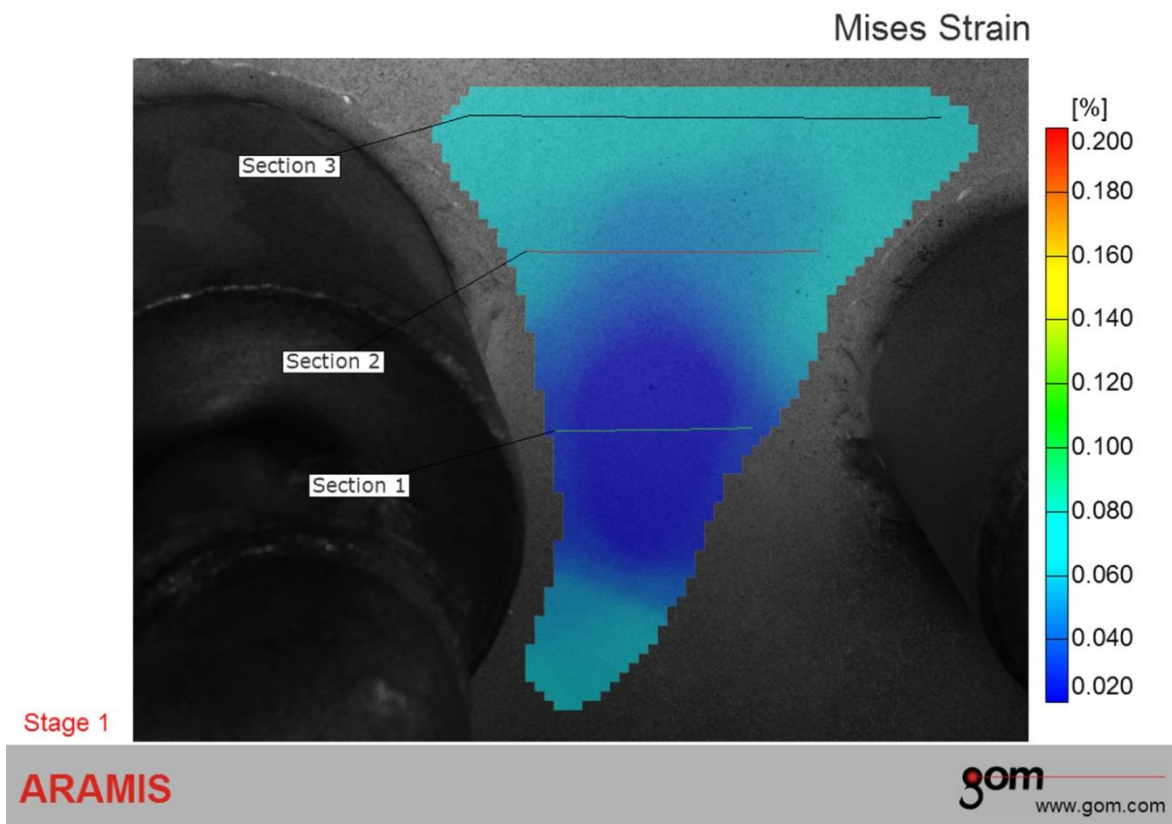


Slika 7.1. Položaj mernih polja i raspored mernih traka

### 7.2.1. Rezultati merenja za merno mesto 1, merno polje 1

Merno polje 1 se nalazi između dva priključka i analizirano je u tri linijska preseka (sections). Dužina svakog linjskog preseka odgovara horizontalnoj dimenziji mernog mesta. Presek 1 je postavljen na najkraćem rastojanju između priključaka, a preseci 2 i 3 su postavljeni na po 15 mm jedan od drugog (slika 7.2.).

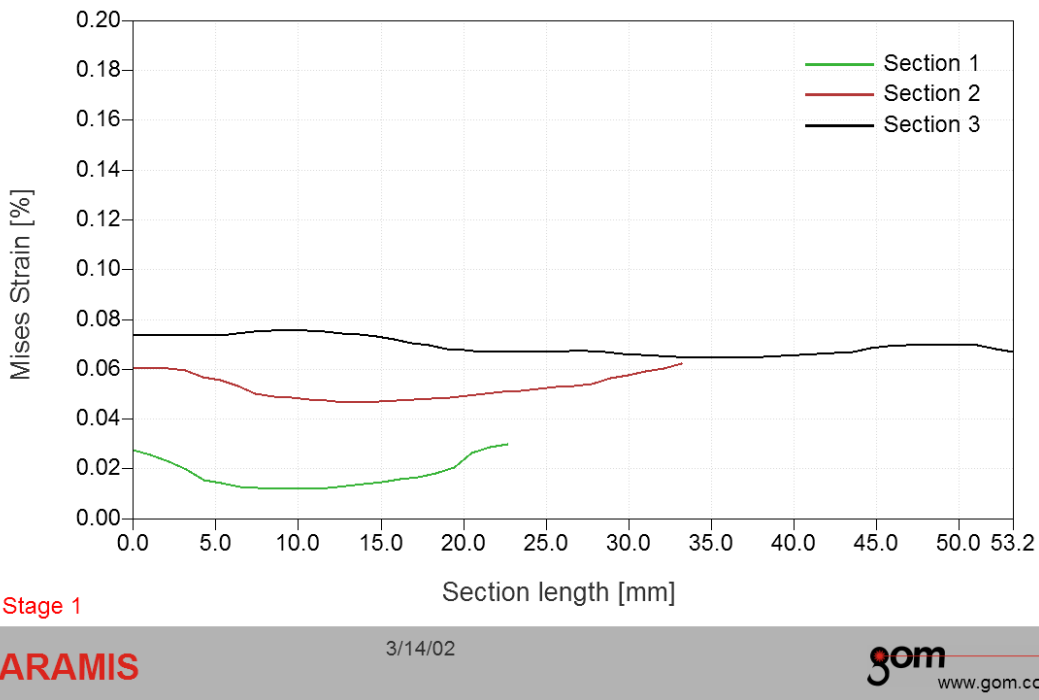
Polje deformacija za merno polje 1 je prikazano na slici 7.2. za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa. Na ordinati je prikazana skala koja je data u %, a na samoj slici je dat položaj linijskih preseka. Procentualne vrednosti su date u odnosu na nulti, neopterećeni korak.



*Slika 7.2. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa za MM1, merno polje 1*

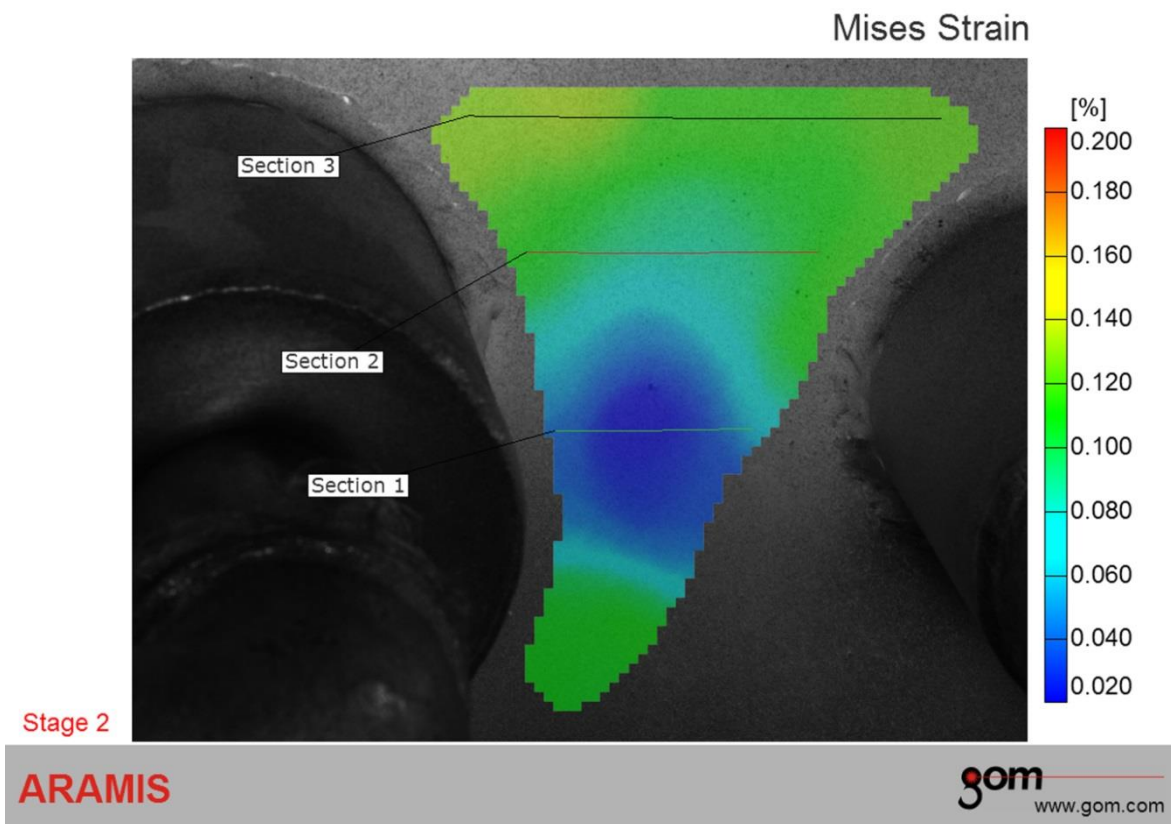
Vrednosti deformacija na preseku 1 koji se nalazi na najkraćem rastojanju između dva priključka iznose oko 0,014 %. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija su na početku preseka 3 i iznose oko 0,078 %. Sa udaljavanjem od spoja vrednosti deformacija se smanjuju, a u okolini priključka 2 se ponovo lagano povećavaju i iznose oko 0,065 %.

Vrednosti Mizesovih deformacija je moguće prikazati i grafički, pomoću dijagrama, slika 7.3., gde su vrednosti deformacija date u zavisnosti od dužine preseka.



*Slika 7.3. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa za merno polje 1*

Na slici 7.4 je prikazano polje deformacija za merno polje 1 za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa.

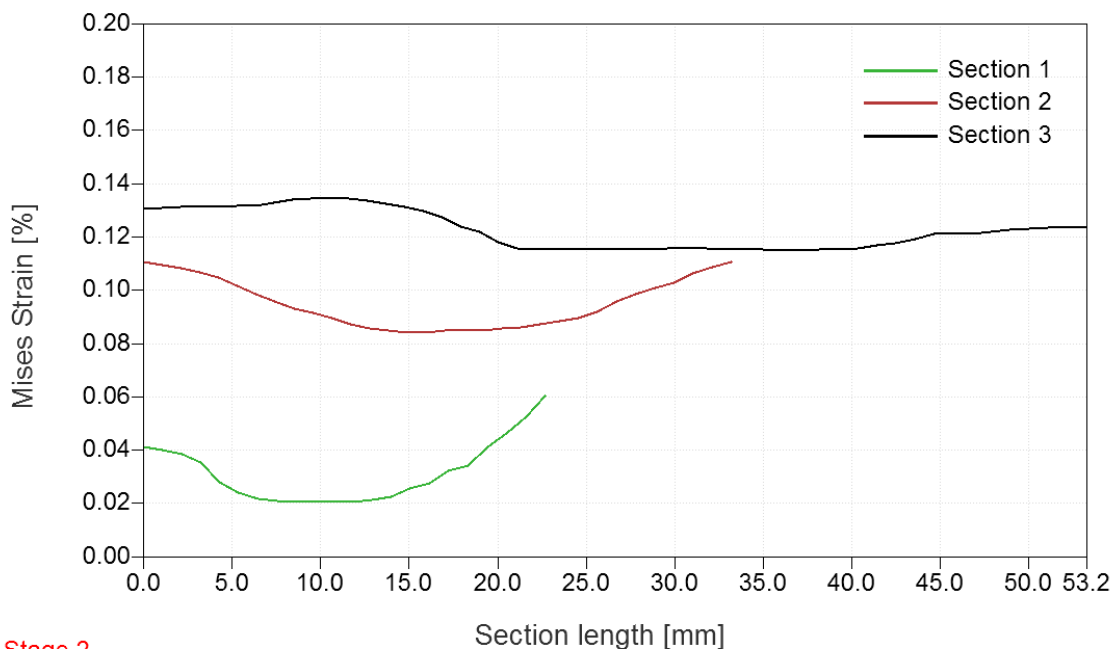


*Slika 7.4. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa za MM1, merno polje 1*

Vrednosti deformacija na preseku 1 koji se nalazi na najkraćem rastojanju između dva priključka iznose oko 0,02 %. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija su na početku preseka 3 i iznose oko 0,13 %. Sa udaljavanjem od spoja vrednosti deformacija se smanjuju, a u okolini priključka 2 ponovo se lagano povećavaju i iznose oko 0,12 %.



Dijagram Mizesovih deformacija za svaki od karakterističnih preseka je dat na slici 7.5.



Stage 2

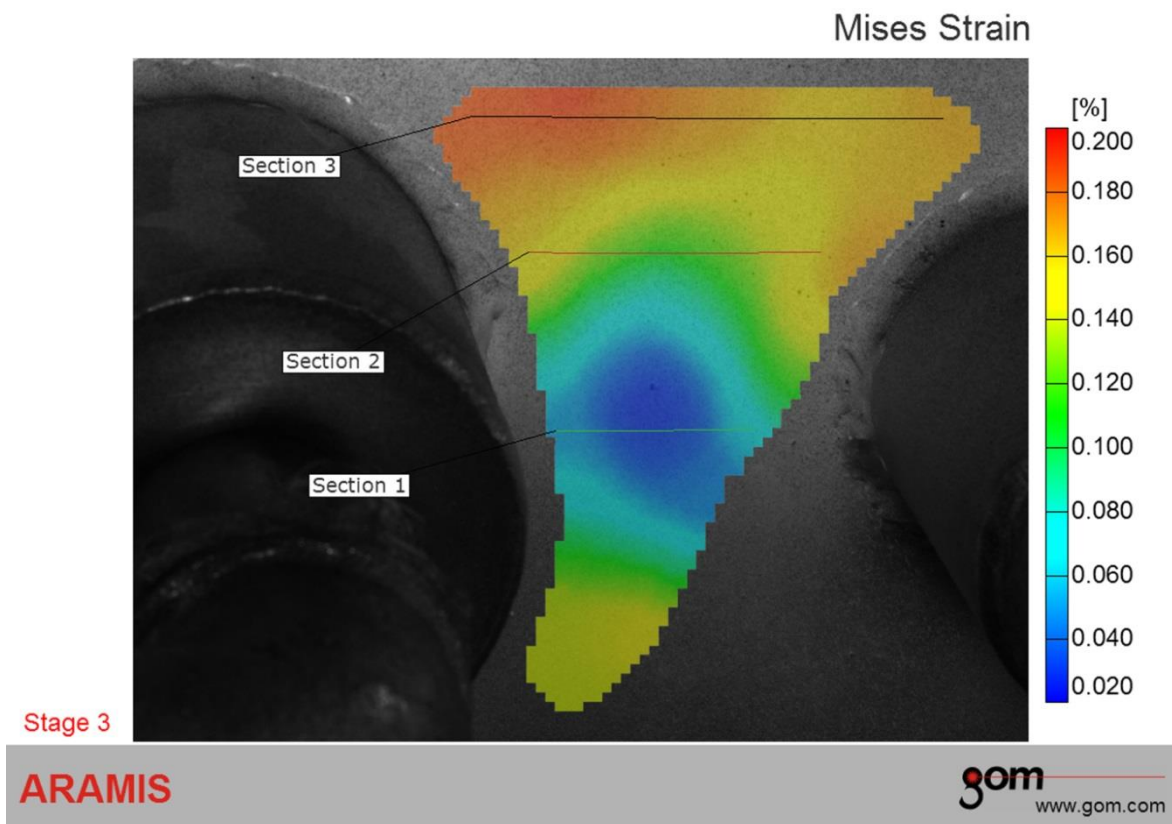
ARAMIS

3/14/02

gom  
www.gom.com

*Slika 7.5. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa za merno polje 1*

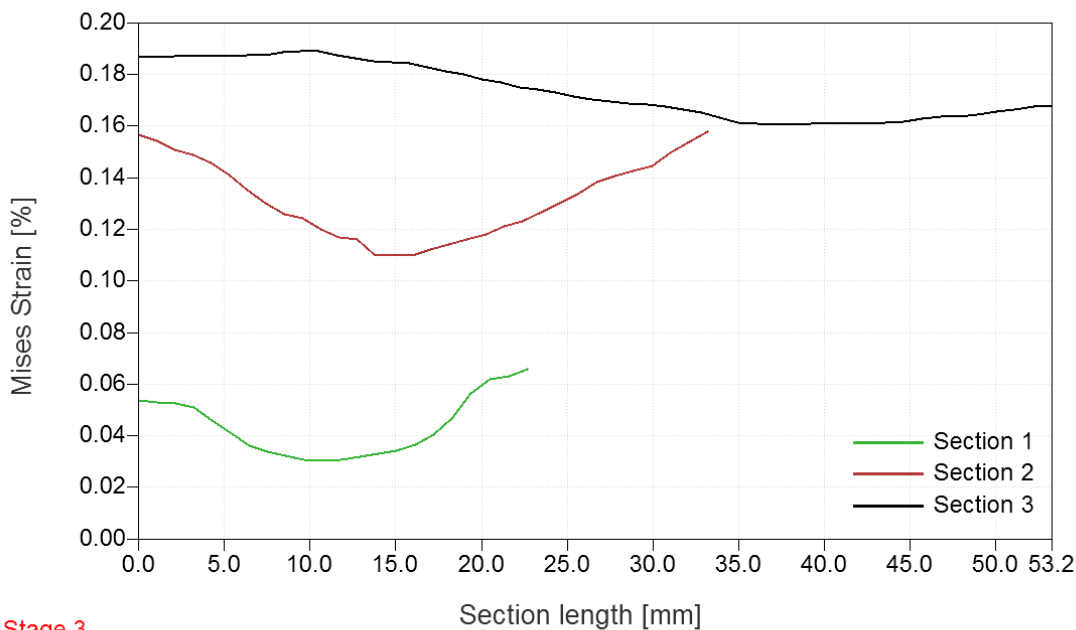
Polje deformacija za merno polje 1, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa je prikazano na slici 7.6.



*Slika 7.6. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa za MM1, merno polje 1*

Vrednosti deformacija na preseku 1 koji se nalazi na najkraćem rastojanju između dva priključka iznose iznose od 0,03 % do 0,05 %. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija su na početku preseka 3 i iznose oko 0,20 %. Sa udaljavanjem od spoja vrednosti deformacija se smanjuju, a u okolini priključka 2 se ponovo lagano povećavaju i iznose oko 0,175 %.

Dijagram Mizesovih deformacija za svaki od karakterističnih preseka je dat na slici 7.7.



Stage 3

ARAMIS

3/14/02

gom  
www.gom.com

Slika 7.7. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa, merno polje 1

Nakon prvih eksperimentalnih merenja došlo se do zaključka da su u zoni između priključaka (section 1) vrednosti Mizesovih deformacija minimalne, što ukazuje na to da je materijal u toj zoni praktično ukrućen.

Za dalju analizu rezultata, kao i statističku analizu posmatraće se presek 3, koji obuhvata maksimalne vrednosti Mizesovih deformacija koje se javljaju između priključaka. U tabeli 7.1. su prikazane vrednosti Mizesovih deformacija za svaku od tačaka koje se nalaze po dužini preseka, za sve tri vrste opterećenja posude.

Tabela 7.1. Vrednosti Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom za MMI za merno polje 1

Merno mesto 1, merno polje 1						
Redni broj tačke na preseku	Presek 3					
	Opterećenje pritiskom od 0,5 MPa		Opterećenje pritiskom od 1 MPa		Opterećenje pritiskom od 1,5 MPa	
	Dužina preseka [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina preseka [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina preseka [mm]	Mizesova deformacija [%]
1	0	0,0735	0	0,1306	0	0,1865
2	1,048	0,0735	1,049	0,131	1,049	0,1867
3	2,097	0,0735	2,098	0,1312	2,098	0,1868
4	3,148	0,0735	3,147	0,1312	3,149	0,1868
5	4,201	0,0735	4,201	0,1313	4,201	0,1868
6	5,25	0,0735	5,251	0,1315	5,251	0,187
7	6,3	0,0742	6,303	0,1316	6,302	0,1875
8	7,356	0,0751	7,358	0,1329	7,36	0,1875
9	8,41	0,0755	8,413	0,1338	8,413	0,1884
10	9,466	0,0756	9,467	0,1345	9,468	0,189
11	10,518	0,0755	10,519	0,1345	10,52	0,1889
12	11,575	0,0753	11,575	0,1344	11,577	0,1875
13	12,628	0,0745	12,631	0,1337	12,632	0,1862
14	13,684	0,0738	13,686	0,1323	13,689	0,1849
15	14,742	0,0732	14,744	0,1312	14,747	0,1847
16	15,801	0,0718	15,803	0,1297	15,804	0,1841
17	16,858	0,0706	16,86	0,1275	16,863	0,1826
18	17,918	0,0698	17,92	0,1237	17,923	0,1811
19	18,978	0,0681	18,98	0,1218	18,983	0,1799
20	20,04	0,0677	20,042	0,1179	20,045	0,178
21	21,097	0,0671	21,099	0,1155	21,105	0,1767
22	22,16	0,067	22,164	0,1154	22,168	0,1749
23	23,222	0,067	23,224	0,1154	23,23	0,174
24	24,285	0,067	24,288	0,1152	24,294	0,1731
25	25,35	0,067	25,353	0,1152	25,358	0,1713
26	26,414	0,0673	26,417	0,1152	26,422	0,1701
27	27,479	0,0672	27,481	0,1153	27,486	0,1696
28	28,547	0,067	28,55	0,1154	28,556	0,1687
29	29,613	0,0662	29,616	0,1157	29,622	0,1683
30	30,679	0,0659	30,683	0,1156	30,687	0,1675
31	31,747	0,0653	31,751	0,1155	31,756	0,1664
32	32,817	0,0649	32,819	0,1154	32,825	0,1651
33	33,886	0,0645	33,889	0,1153	33,894	0,1632
34	34,956	0,0645	34,959	0,1151	34,964	0,1614
35	36,027	0,0645	36,031	0,115	36,035	0,1607
36	37,098	0,0647	37,102	0,1149	37,107	0,1606
37	38,169	0,0649	38,173	0,1151	38,179	0,1606
38	39,243	0,0654	39,247	0,1153	39,252	0,1607
39	40,317	0,066	40,322	0,1156	40,326	0,1607
40	41,392	0,0662	41,396	0,1168	41,4	0,1608
41	42,467	0,0667	42,472	0,1177	42,477	0,161
42	43,544	0,0671	43,547	0,1191	43,553	0,1611
43	44,621	0,0684	44,626	0,121	44,631	0,1617
44	45,7	0,0693	45,705	0,121	45,711	0,1627
45	46,778	0,0696	46,783	0,1213	46,788	0,1635
46	47,857	0,0696	47,863	0,122	47,868	0,1638
47	48,939	0,0697	48,945	0,1226	48,95	0,1645
48	50,022	0,0697	50,028	0,123	50,033	0,1654
49	51,105	0,0696	51,111	0,1234	51,117	0,1663
50	52,189	0,0683	52,195	0,1234	52,2	0,1676
51	53,275	0,0669	53,281	0,1235	53,287	0,1677

### 7.2.1.1. Statistička analiza polinomnih funkcija

Za podatke dobijene eksperimentalnim merenjima odgovarajućom matematičkom funkcijom tj. analitičkim obrascem, izvršena je dalja obrada rezultata primenom regresione analize za svaki od karakterističnih preseka. Tražena je što jednostavnija funkcija promene posmatrane veličine po dužini istog preseka za sve vrednosti ispitnog pritiska za isto merno mesto. Eksperimentalni rezultati su za karakteristični presek, aproksimirani analitičkim obrascima sa zadovoljavajućom tačnošću. Obrada eksperimentalnih rezultata je sprovedena metodama statističke analize, u cilju utvrđivanja relevantnih funkcionalnih zavisnosti posmatrane veličine kao i prezentovanje dobijenih zavisnosti na dijagramima. Podaci eksperimentalnih merenja su obrađeni u a programskom paketu Origin, primenom metode najmanjih kvadrata.

U cilju opisivanja promene Mizesovih deformacija u zavisnosti od dužine posmatranog preseka korišćene su polinomne funkcije. Funkcionalna zavisnost Mizesovih deformacija u zavisnosti od dužine preseka je definisana za karakterističan presek, tj. presek koji obuhvata maksimalne vrednosti Mizesovih deformacija. Funkcionalna zavisnost za isti karakterističan presek je urađena za sva tri ispitna pritiska.

Za obradu rezultata ispitivanja korišćen je metod najmanjih kvadrata, postupak koji se često koristi za aproksimaciju tabelarno zadatih funkcija analitičkim izrazima u eksplicitnom obliku. Cilj metode najmanjih kvadrata je minimiziranje greške koja predstavlja odstupanje posmatrane vrednosti od rezultata dobijenog matematičkim modelom. Kvalitet funkcionalne zavisnosti dobijene metodom najmanjih kvadrata se izražava pomoću statističkih pokazatelja:

- koeficijent determinacije ( $R^2$  - R square)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{\text{exp},i} - y_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{\text{exp},i} - y_{\text{sr}})^2} \quad (7.1)$$

- suma srednjih kvadratnih odstupanja (RSS – Residual Sum of Squares)

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_{\text{exp},i} - y_{\text{pre},i})^2 \quad (7.2)$$

gde su:

- $y_{\text{exp},i}$  - eksperimentalno izmerene vrednosti.
- $y_{\text{pre},i}$  -  $i$ -ta vrednost matematičkog modela,
- $y_{\text{sr}}$  - srednja vrednost eksperimentalno izmerenih vrednosti,
- $n$  - broj tačaka merenja.

Funkcionalna zavisnost maksimalnih Mizesovih deformacija za MM1, merno polje 1, za sve tri vrste opterećenja, i dužine karakterističnog preseka najbolje opisuje polinomna funkcija oblika

$$y(x) = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 + B_4 \cdot x^4$$

gde su :

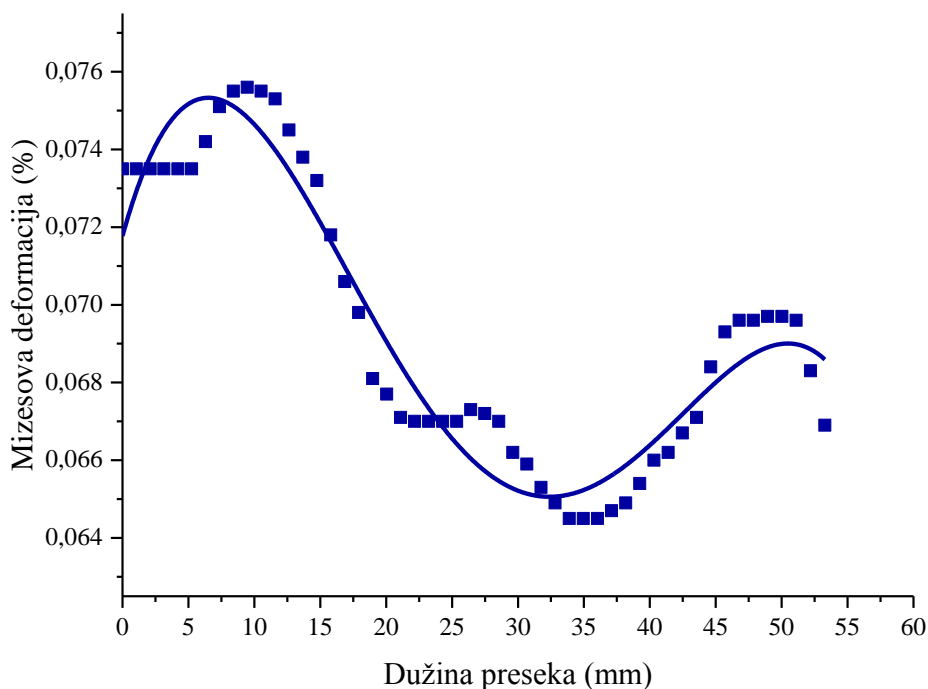
- $y(x)$  - vrednost Mizesovih deformacija,
- $x$  [mm] – koordinata tačke na preseku 1,
- $A, B_1, B_2, B_3$  i  $B_4$  – koeficijenti.

Koordinata  $x$  u jednačinama za funkcionalnu zavisnost, predstavlja rastojanje tačke na preseku u odnosu na početak preseka.

*Funkcionalna zavisnost Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka za slučaj opterećenja od 0,5 MPa*

Statističkom obradom podataka dobijenih eksperimentalnim merenjima za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa, utvrđena je funkcionalna veza Mizesovih

deformacija i dužine karakterističnog preseka (slika 7.8.). Polinomna funkcija kao i vrednosti koeficijenata  $A$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  i  $B_4$  uz promenljivu  $x$ , prikazani su u tabeli 7.2.



Slika 7.8. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 0,5 MPa

Tabela 7.2. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima

Presek	Funkcionalna zavisnost					$R^2$	RSS
	$y = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 + B_4 \cdot x^4$						
	Koeficijenti						
	A	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$		
3	0.07177	0.00122	-1.25E-04	3.42E-06	-2.87E-08	0.92381	4.57046E-5

Dobro slaganje pretpostavljene funkcije zavisnosti sa vrednostima Mizesovih deformacija su potvrđeni kroz vrednosti koeficijenta determinacije i srednjeg kvadratnog odstupanja, prikazanih u tabeli 7.2.

Na osnovu eksperimentalno dobijenih vrednosti Mizesovih deformacija, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa, za karakterističan presek 3, moguće je odrediti interval pouzdanosti koji predstavlja raspon mogućih vrednosti deformacija unutar kojeg se sa verovatnoćom od 95 % nalazi tačna (stvarna) vrednost deformacije. Za maksimalnu izmerenu vrednost Mizesove deformacije interval pouzdanosti jednak je

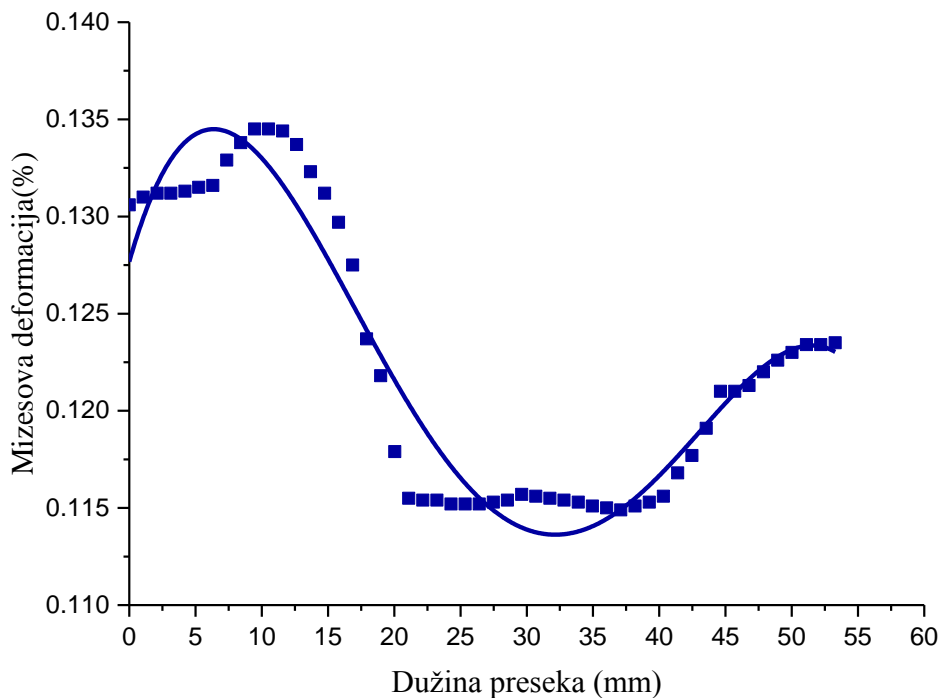
$$y(x) = 0,07479 \pm 0,001,$$

što znači da se stvarna (tačna) vrednost maksimalne Mizesove deformacije nalazi u intervalu od 0,07379 do 0,07579.

*Funkcionalna zavisnost Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka za slučaj opterećenja od 1 MPa*

Statističkom obradom podataka dobijenih eksperimentalnim merenjima za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa, utvrđena je funkcionalna veza Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka (slika 7.9.). Polinomna funkcija kao i vrednosti koeficijenata A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> i B<sub>4</sub> uz promenljivu x, prikazani su u tabeli 7.3.





Slika 7.9. Dijagram promene Misesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 1 MPa

Tabela 7.3. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima

Presek	Funkcionalna zavisnost					R <sup>2</sup>	RSS
	$y = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 + B_4 \cdot x^4$						
	Koeficijenti						
	A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>		
3	0.12768	0.00239	-2.47849E-4	6.79596E-6	-5.66075E-8	0.9267	1.78629E-4

Dobro slaganje pretpostavljene funkcije zavisnosti sa vrednostima Mizesovih deformacija su potvrđeni kroz vrednosti koeficijenta determinacije i srednjeg kvadratnog odstupanja, prikazanih u tabeli 7.3.

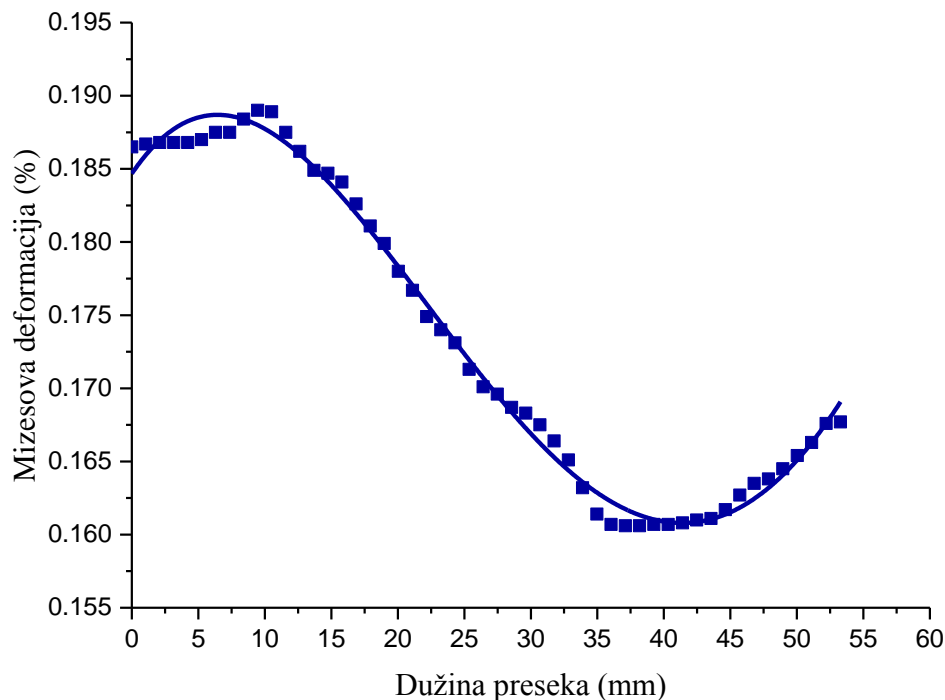
Na osnovu eksperimentalno dobijenih vrednosti Mizesovih deformacija, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa, za karakterističan presek 3, interval pouzdanosti za maksimalnu vrednost Mizesove deformacije je

$$y(x) = 0,1326 \pm 0,002017$$

što znači da se stvarna (tačna) vrednost maksimalne Mizesove deformacije nalazi u intervalu od 0,13058 do 0,13462.

*Funkcionalna zavisnost Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka za slučaj opterećenja od 1,5 MPa*

Statističkom obradom podataka dobijenih eksperimentalnim merenjima za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa, utvrđena je funkcionalna veza Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka (slika 7.10.). Polinomna funkcija kao i vrednosti koeficijenata A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> i B<sub>4</sub> uz promenljivu x, prikazani su u tabeli 7.4.



Slika 7.10. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 1,5 MPa

Tabela 7.4. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima

Presek	Funkcionalna zavisnost					R <sup>2</sup>	RSS
	$y = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 + B_4 \cdot x^4$						
	Koeficijenti						
A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>			
3	0.18467	0.00134	-1.2682E-4	2.42741E-6	-1.1704E-8	0.99312	3.54019E-5

Dobro slaganje pretpostavljene funkcije zavisnosti sa vrednostima Mizesovih deformacija su potvrđeni kroz vrednosti koeficijenta determinacije i srednjeg kvadratnog odstupanja, prikazanih u tabeli 7.4.

Na osnovu eksperimentalno dobijenih vrednosti Mizesovih deformacija, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa, za karakterističan presek 3, interval pouzdanosti za maksimalnu vrednost Mizesove deformacije je

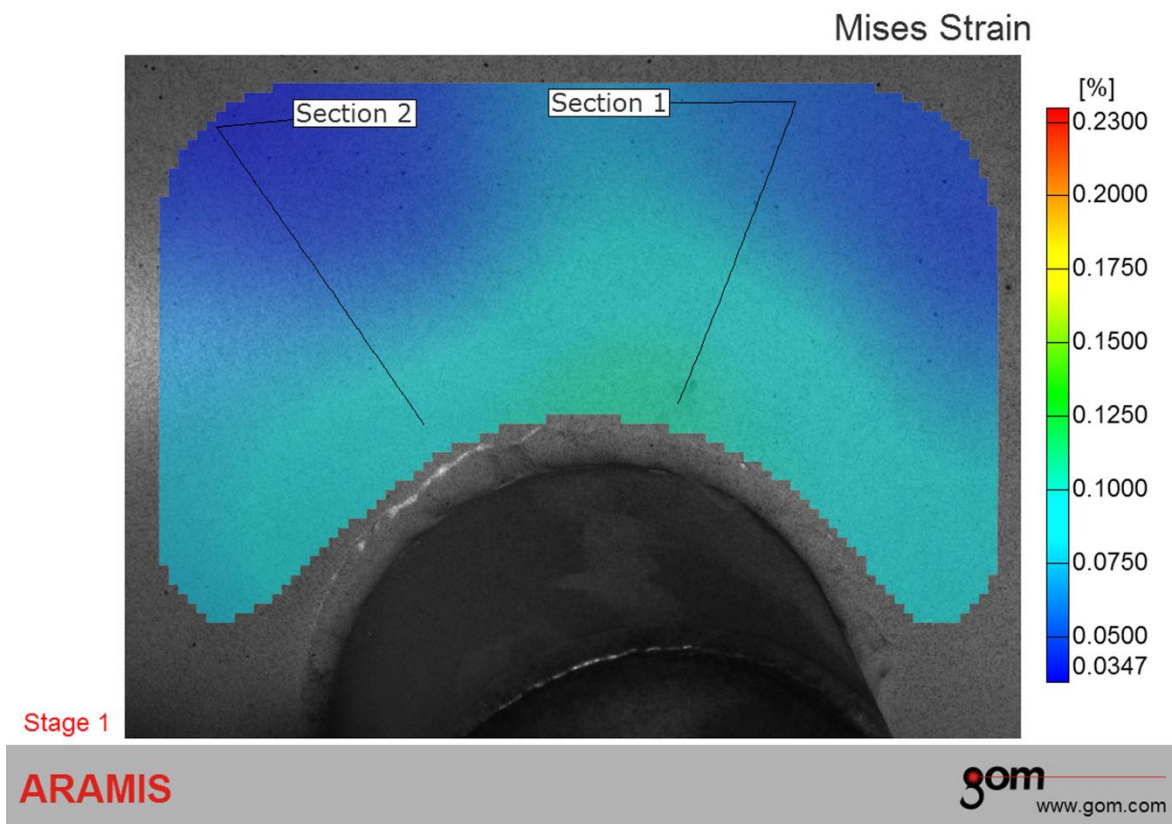
$$y(x) = 0,1326 \pm 0,002017$$

što znači da se stvarna (tačna) vrednost maksimalne Mizesove deformacije nalazi u intervalu od 0,13058 do 0,13462.

Na isti način moguće je odrediti interval pouzdanosti, sa verovatnoćom od 95 % za bilo koju izmerenu vrednost Mizesove deformacije.

### *7.2.2. Rezultati merenja za merno mesto 1, merno polje 2*

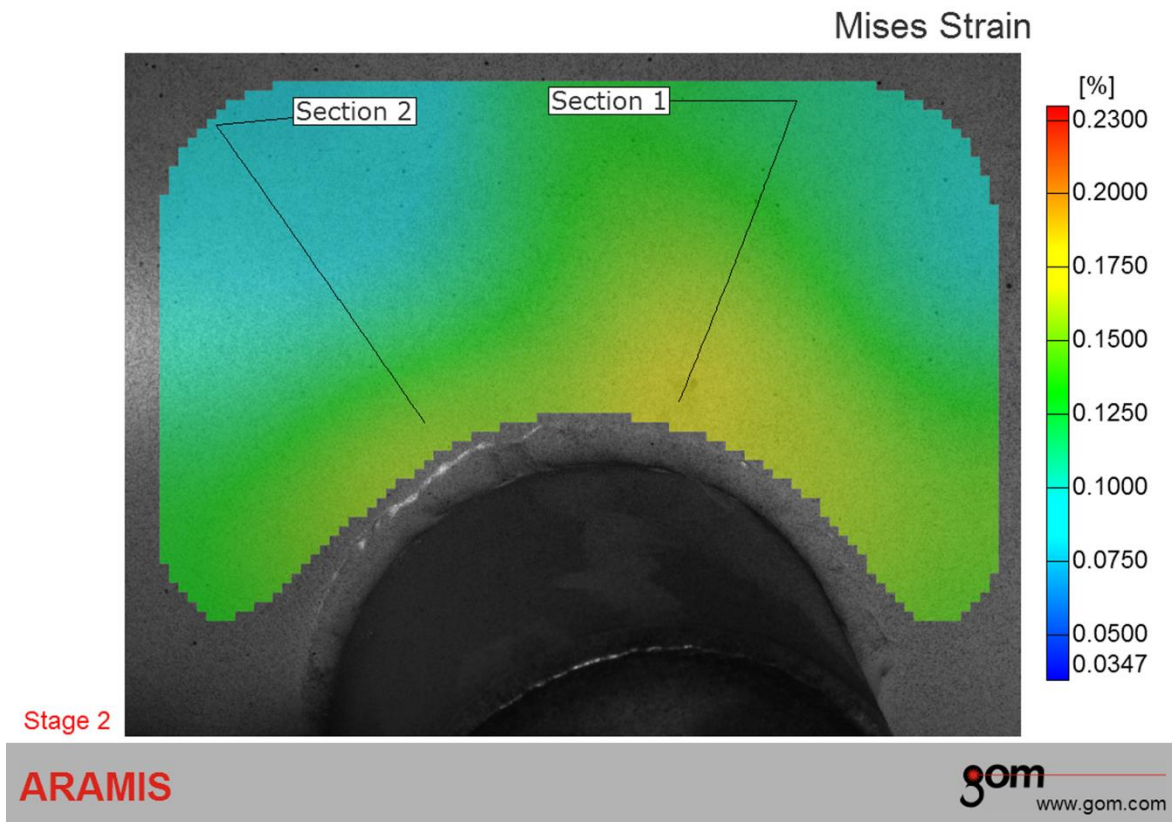
Merno polje 2 obuhvata zonu iznad priključka 1 (DN 50), a raspodela Mizesovih deformacija je prikazana na slici 7.11. Presek 1 je postavljen tako da prolazi kroz zonu najvećih vrednosti Mizesovih deformacija uz priključak 1, što odgovara i zoni maksimalnih deformacija na mernom polju 1, presek 3 (slika 7.2.). Na ordinati na slici je prikazana skala koja je data u %, a na samoj slici je dat položaj linijskih preseka. Procentualne vrednosti su date u odnosu na nulti, neopterećeni korak.



*Slika 7.11. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa za MMI, merno polje 2*

Najveće vrednosti Mizesovih deformacija koje se javljaju na spoju priključka 1 i omotača, na presku 1 za slučaj opterećenja od 0,5 MPa iznose oko 0,1 %, (slika 7.11.).

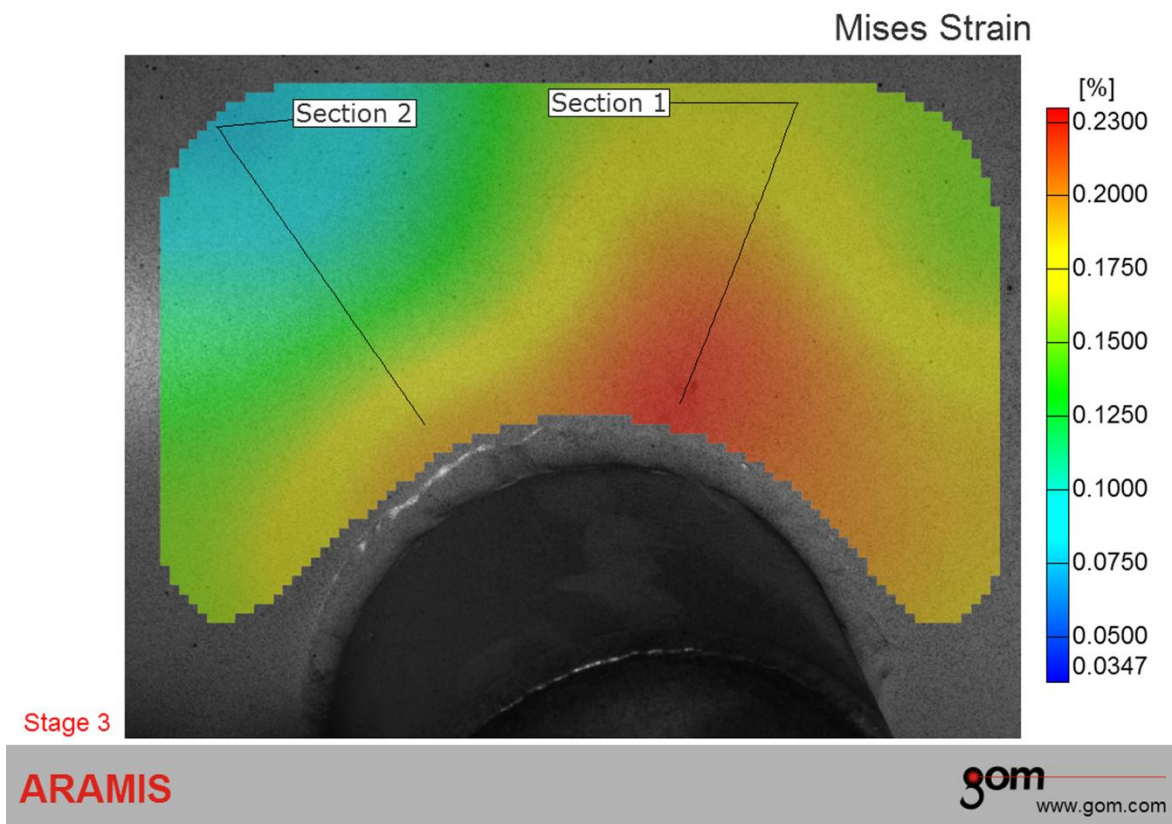
Polje deformacija za merno polje 2, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa je prikazano na slici 7.12.



*Slika 7.12. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa za MM1, merno polje 2*

Najveće vrednosti Mizesovih deformacija koje se javljaju na spoju priključka 1 i omotača, na presku 1 za slučaj opterećenja od 1 MPa iznose oko 0,165 %.

Na slici 7.13. je prikazano polje deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa.



*Slika 7.13. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa za MMI, merno polje 2*

Najveće vrednosti Mizesovih deformacija koje se javljaju na spoju priključka 1 i omotača, na preseku 1 za slučaj opterećenja od 1 MPa iznose oko 0,22 % .

Za dalju analizu rezultata, kao i statističku analizu posmatraće se eksperimentalno izmerene vrednosti na preseku 1. U tabeli 7.5. su prikazane vrednosti Mizesovih deformacija za svaku od tačaka koje se nalaze po dužini preseka, za sve tri vrste opterećenja posude.

Tabela 7.5. Vrednosti Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom za MMI za merno polje 2

Merno mesto 1, merno polje 2						
Redni broj tačke na preseku	Presek 1					
	Opterećenje pritiskom od 0,5 MPa		Opterećenje pritiskom od 1 MPa		Opterećenje pritiskom od 1,5 MPa	
	Dužina preseka [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina preseka [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina preseka [mm]	Mizesova deformacija [%]
1	0	0,099	0	0,165	0	0,2121
2	0,202	0,099	0,202	0,1652	0,202	0,2125
3	1,516	0,099	1,516	0,1659	1,517	0,2137
4	1,92	0,099	1,92	0,1659	1,921	0,2137
5	2,829	0,0991	2,83	0,1668	2,83	0,2156
6	3,839	0,0992	3,839	0,1671	3,84	0,2163
7	4,143	0,0992	4,143	0,1676	4,144	0,2176
8	5,457	0,0992	5,457	0,1678	5,459	0,2188
9	5,747	0,0992	5,748	0,1678	5,749	0,2193
10	6,773	0,0988	6,773	0,1675	6,774	0,2204
11	7,653	0,0988	7,652	0,1674	7,653	0,2205
12	8,087	0,0981	8,086	0,1663	8,086	0,2208
13	9,404	0,0975	9,404	0,1654	9,406	0,2206
14	9,551	0,0969	9,55	0,1644	9,552	0,2203
15	10,72	0,0954	10,718	0,1621	10,721	0,2191
16	11,448	0,0952	11,448	0,1618	11,45	0,2189
17	12,035	0,093	12,035	0,1585	12,038	0,2166
18	13,335	0,0923	13,335	0,1574	13,338	0,2157
19	13,351	0,0904	13,351	0,1547	13,354	0,2134
20	14,666	0,0884	14,667	0,1519	14,67	0,2107
21	15,217	0,0874	15,218	0,1505	15,221	0,2094
22	15,983	0,084	15,984	0,1461	15,988	0,2049
23	17,098	0,0837	17,099	0,1458	17,103	0,2045
24	17,303	0,0803	17,304	0,1416	17,308	0,1999
25	18,622	0,0785	18,624	0,1393	18,626	0,1973
26	18,972	0,0765	18,974	0,1369	18,977	0,1946
27	19,942	0,073	19,944	0,1329	19,948	0,19
28	20,842	0,0726	20,845	0,1324	20,85	0,1894
29	21,259	0,0686	21,263	0,128	21,267	0,1844
30	22,577	0,0674	22,581	0,1267	22,585	0,1829
31	22,715	0,0647	22,719	0,1239	22,723	0,1797
32	23,902	0,062	23,905	0,1212	23,91	0,1766
33	24,574	0,061	24,577	0,1202	24,583	0,1755
34	25,221	0,0576	25,226	0,1169	25,232	0,1718
35	26,433	0,0571	26,437	0,1164	26,443	0,1713
36	26,544	0,0545	26,547	0,114	26,554	0,1687
37	27,866	0,053	27,87	0,1126	27,877	0,1671
38	28,288	0,0519	28,292	0,1116	28,299	0,1661
39	29,19	0,0498	29,194	0,1096	29,201	0,1638
40	30,135	0,0498	30,14	0,1096	30,148	0,1638
41	30,514	0,0482	30,519	0,108	30,527	0,1619
42	31,841	0,0477	31,846	0,1073	31,854	0,1611
43	31,982	0,0472	31,987	0,1066	31,995	0,1602
44	33,165	0,0467	33,172	0,1056	33,179	0,1587
45	33,828	0,0467	33,834	0,1055	33,843	0,1586
46	34,492	0,0466	34,498	0,1045	34,507	0,157
47	35,672	0,0467	35,679	0,1042	35,687	0,1556
48	35,819	0,0469	35,826	0,1036	35,834	0,1565
49	37,142	0,0473	37,15	0,1029	37,158	0,1546
50	37,512	0,0475	37,52	0,1028	37,528	0,1543
51	38,469	0,0482	38,478	0,1019	38,487	0,1532



52	39,352	0,0484	39,361	0,1017	39,37	0,153
53	39,797	0,0491	39,806	0,1012	39,815	0,1523
54	41,125	0,0497	41,134	0,1007	41,143	0,1519
55	41,188	0,0499	41,197	0,1005	41,206	0,1517
56	42,453	0,0506	42,462	0,1001	42,471	0,1513
57	43,02	0,0506	43,029	0,1	43,038	0,1513

Funkcionalna zavisnost maksimalnih Mizesovih deformacija za MM1, merno polje 2, nastalih opterećenjem posude pod pritiskom, i dužine karakterističnog preseka najbolje opisuje polinomna funkcija oblika

$$y(x) = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 + B_4 \cdot x^4$$

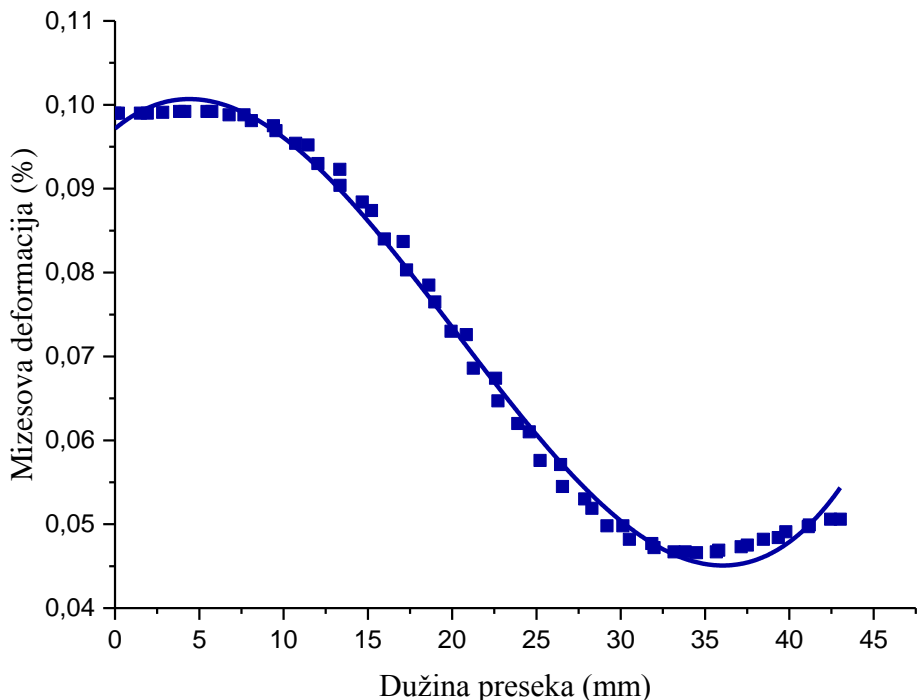
gde su :

- $y(x)$  - vrednost Mizesovih deformacija,
- $x$  [mm] – koordinata tačke na preseku 1,
- $A, B_1, B_2, B_3$  i  $B_4$  – koeficijenti.

Koordinata  $x$  u jednačinama za funkcionalnu zavisnost, predstavlja rastojanje tačke na preseku u odnosu na početak preseka.

*Funkcionalna zavisnost Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka za slučaj opterećenja od 0,5 MPa*

Statističkom obradom podataka dobijenih eksperimentalnim merenjima za merno polje 2, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa, utvrđena je funkcionalna veza Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka, slika 7.14. Polinomna funkcija kao i vrednosti koeficijenata  $A, B_1, B_2, B_3$  i  $B_4$  uz promenljivu  $x$ , prikazani su u tabeli 7.6.



Slika 7.14. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 0,5 MPa

Tabela 7.6. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima

Presek	Funkcionalna zavisnost					R <sup>2</sup>	RSS
	$y = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 + B_4 \cdot x^4$						
	Koeficijenti						
	A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>		
1	0,0964	0,00208	-2,57365E-4	5,13862E-6	-1,90339E-8	0,99534	1,11259E-4

Dobro slaganje pretpostavljene funkcije zavisnosti sa vrednostima Mizesovih deformacija su potvrđeni kroz vrednosti koeficijenta determinacije i srednjeg kvadratnog odstupanja, prikazanih u tabeli 7.6.

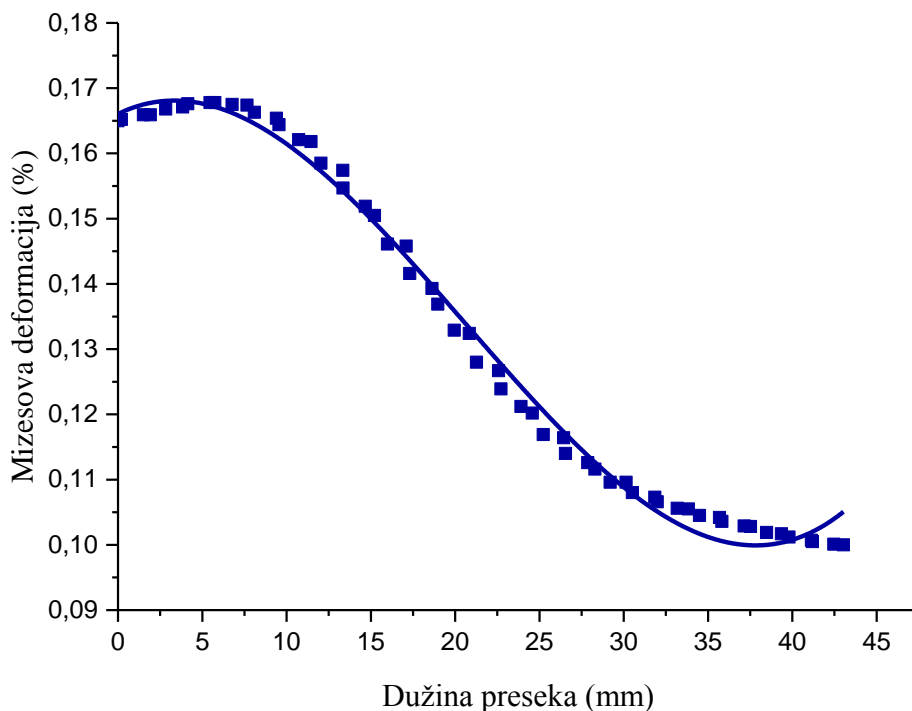
Na osnovu eksperimentalno dobijenih vrednosti Mizesovih deformacija, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa, za karakterističan presek 1, interval pouzdanosti za maksimalnu vrednost Mizesove deformacije je

$$y(x) = 0,101 \pm 0,005563,$$

što znači da se stvarna (tačna) vrednost maksimalne Mizesove deformacije nalazi u intervalu od 0,0954 do 0,1065.

*Funkcionalna zavisnost Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka za slučaj opterećenja od 1 MPa*

Statističkom obradom podataka dobijenih eksperimentalnim merenjima za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa, utvrđena je funkcionalna veza Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka, slika 7.15. Polinomna funkcija kao i vrednosti koeficijenata A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> i B<sub>4</sub> uz promenljivu  $x$ , prikazani su u tabeli 7.7.



*Slika 7.15. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 1 MPa*

Tabela 7.7. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima

Presek	Funkcionalna zavisnost					R <sup>2</sup>	RSS
	$y = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 + B_4 \cdot x^4$						
	Koeficijenti						
	A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>		
1	0,16206	0,00341	-4,38872E-4	1,18784E-5	-9,97271E-8	0,99738	9,38207E-5

Dobro slaganje pretpostavljene funkcije zavisnosti sa vrednostima Mizesovih deformacija su potvrđeni kroz vrednosti koeficijenta determinacije i srednjeg kvadratnog odstupanja, prikazanih u tabeli 7.7.

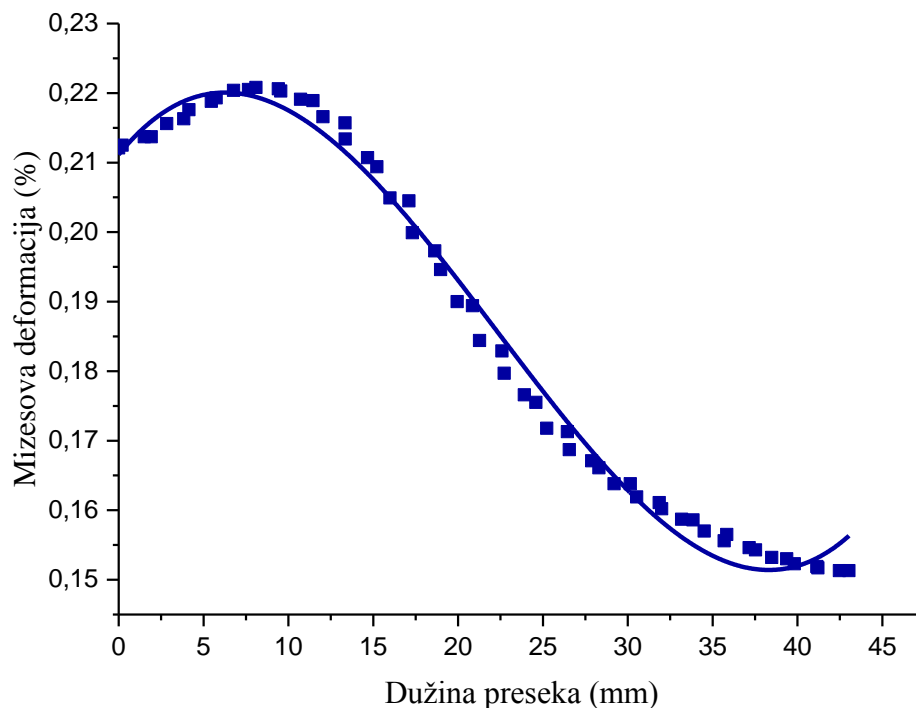
Na osnovu eksperimentalno dobijenih vrednosti Mizesovih deformacija, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa, za karakterističan presek 1, interval pouzdanosti za maksimalnu vrednost Mizesove deformacije je

$$y(x) = 0,1673 \pm 0,006811,$$

što znači da se stvarna (tačna) vrednost maksimalne Mizesove deformacije nalazi u intervalu od 0,1605 do 0,1741.

*Funkcionalna zavisnost Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka za slučaj opterećenja od 1,5 MPa*

Statističkom obradom podataka dobijenih eksperimentalnim merenjima za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa, utvrđena je funkcionalna veza Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka, slika 7.16. Polinomna funkcija kao i vrednosti koeficijenata A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> i B<sub>4</sub> uz promenljivu x, prikazani su u tabeli 7.8.



Slika 7.16. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 1,5 MPa

Tabela 7.8. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima

Presek	Funkcionalna zavisnost					R <sup>2</sup>	RSS
	$y = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 + B_4 \cdot x^4$						
	Koeficijenti						
	A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>		
1	0,20762	0,00491	-4,85511E-4	1,17285E-5	-8,80692E-8	0,99414	2,15468E-4

Dobro slaganje pretpostavljene funkcije zavisnosti sa vrednostima Mizesovih deformacija su potvrđeni kroz vrednosti koeficijenta determinacije i srednjeg kvadratnog odstupanja, prikazanih u tabeli 7.8.

Na osnovu eksperimentalno dobijenih vrednosti Mizesovih deformacija, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa, za karakterističan presek 1, interval pouzdanosti za maksimalnu vrednost Mizesove deformacije je

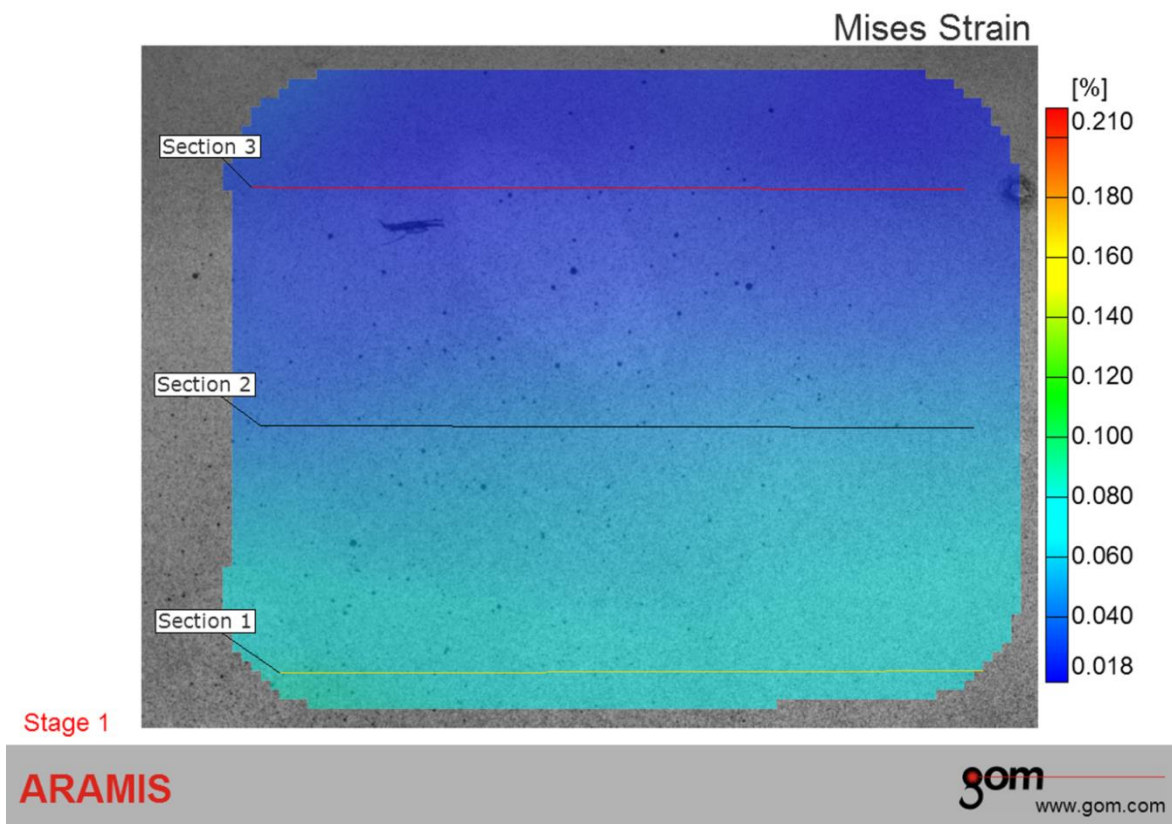
$$y(x) = 0,2183 \pm 0,006903,$$

što znači da se stvarna (tačna) vrednost maksimalne Mizesove deformacije nalazi u intervalu od 0,2114 do 0,2253.

### *7.2.3. Rezultati merenja za merno mesto 1, merno polje 3*

Merno polje 3 obuhvata oblast iznad priključaka, a raspodela Mizesovih deformacija je prikazana na slici 7.17. Presek 1 je postavljen tako da se nalazi neposredno iznad priključaka, (MM1, merno polje 1, presek 3) i jednim delom obuhvata zonu najvećih deformacija po granici mernog polja. Na ordinati na slici je prikazana skala koja je data u %, a na samoj slici je dat položaj linijskih preseka. Procentualne vrednosti su date u odnosu na nulti, neopterećeni korak.

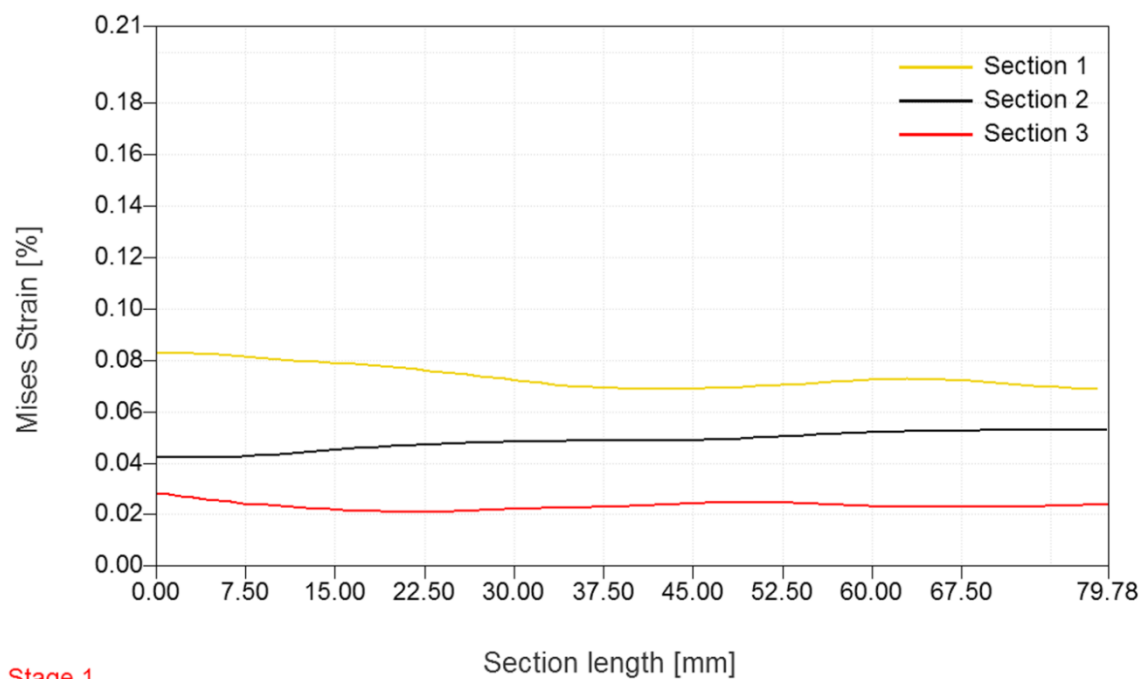
Polje deformacija za merno polje 3, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa je prikazano na slici 7.17.



*Slika 7.17. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa za MMI, merno polje 3*

Najveće vrednosti Mizesovih deformacija koje se javljaju pri opterećenju od 0,5 MPa se nalaze uz priključak 1, na preseku 1 i iznose oko 0,08 %. Udaljavanjem od priključaka ka slobodnom delu omotača posude vidi se da se vrednosti deformacija smanjuju i da se posle preseka 3 smanjuje uticaj priključaka na omotač. Deformacije na omotaču posude daleko od priključaka iznose manje od 0,02 %.

Dijagram Mizesovih deformacija za svaki od karakterističnih preseka je dat na slici 7.18.



Stage 1

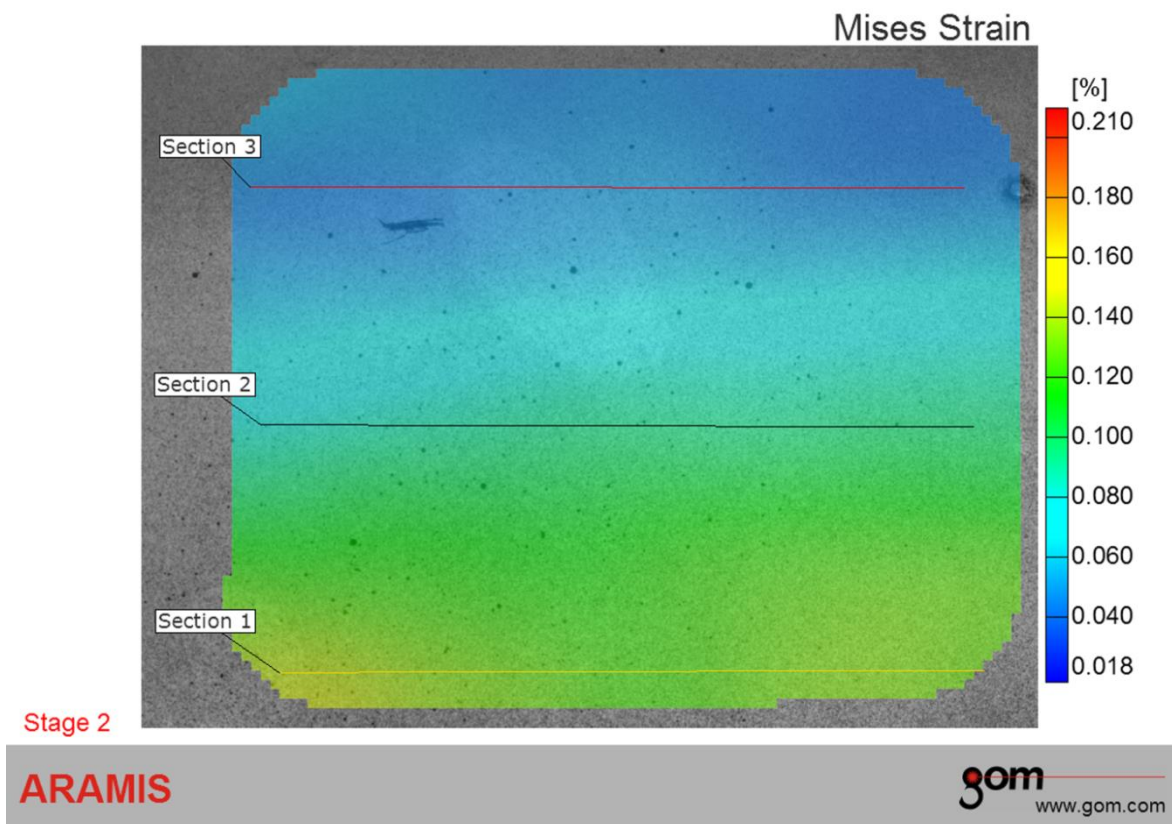
ARAMIS

gom  
www.gom.com

Slika 7.18. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa, merno polje 3

Na slici 7.19. je prikazano polje deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa.



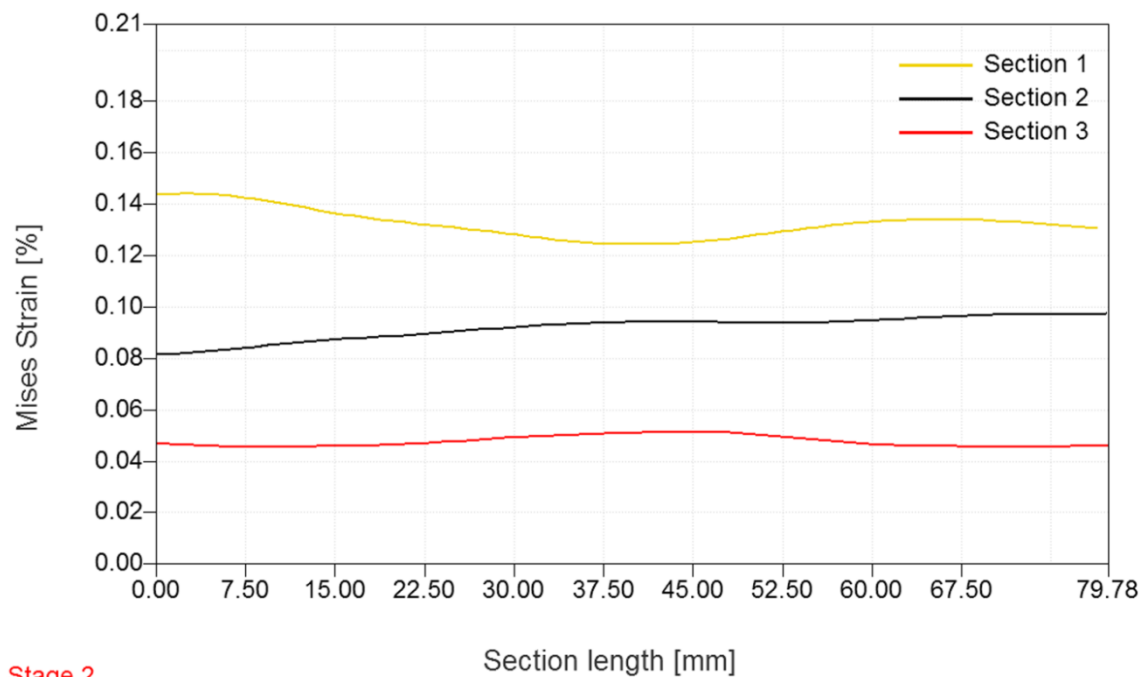


*Slika 7.19. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa za MMI, merno polje 3*

Maksimalne vrednosti Mizesovih deformacija javljaju se uz priključak 1, na preseku 1 i iznose oko 0,14 %, (slika 7.19.).

Udaljavanjem od preseka 1, od priključaka ka slobodnom delu cilindričnog omotača vrednosti deformacija se smanjuju, i posle preseka 3 uticaj priključaka na omotač se smanjuje. Deformacije na omotaču posude daleko od priključaka iznose oko 0,045 %.

Dijagram Mizesovih deformacija za svaki od karakterističnih preseka je dat na slici 7.20.



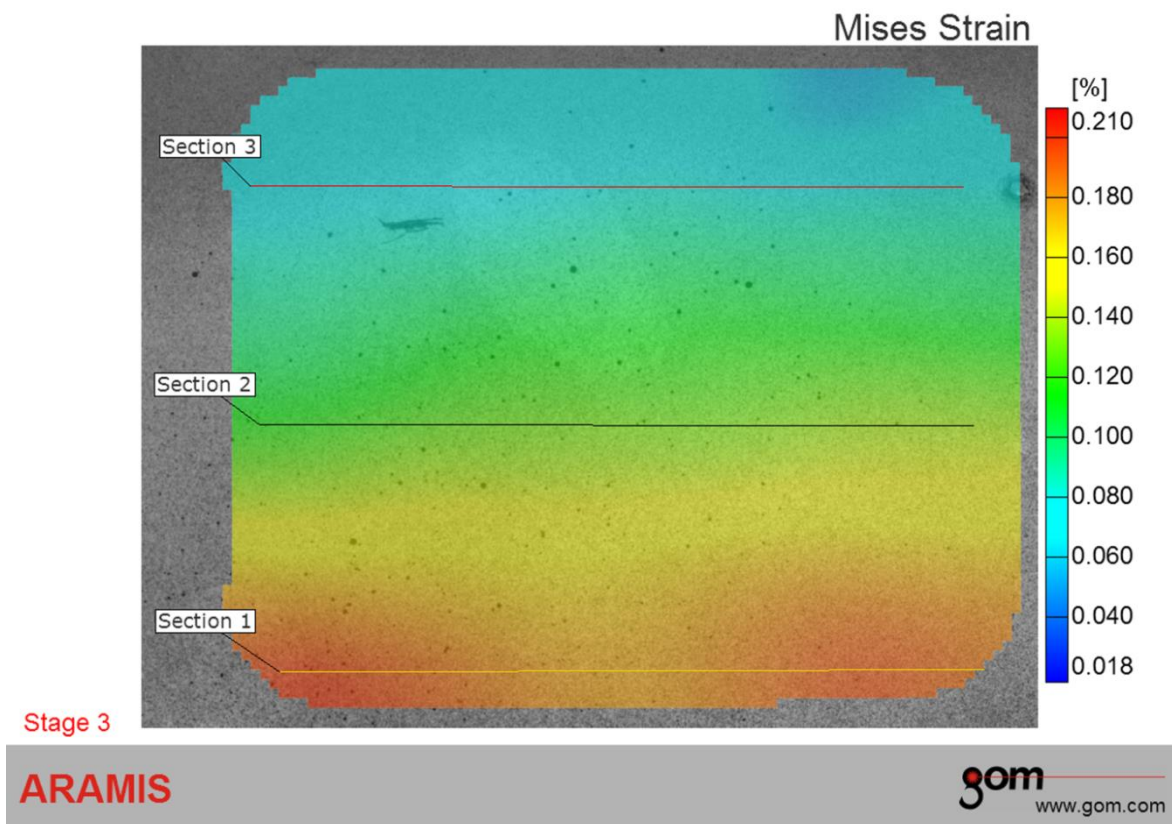
Stage 2

ARAMIS

gom  
www.gom.com

Slika 7.20. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa, merno polje 3

Na slici 7.21. je prikazano polje deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 Mpa.

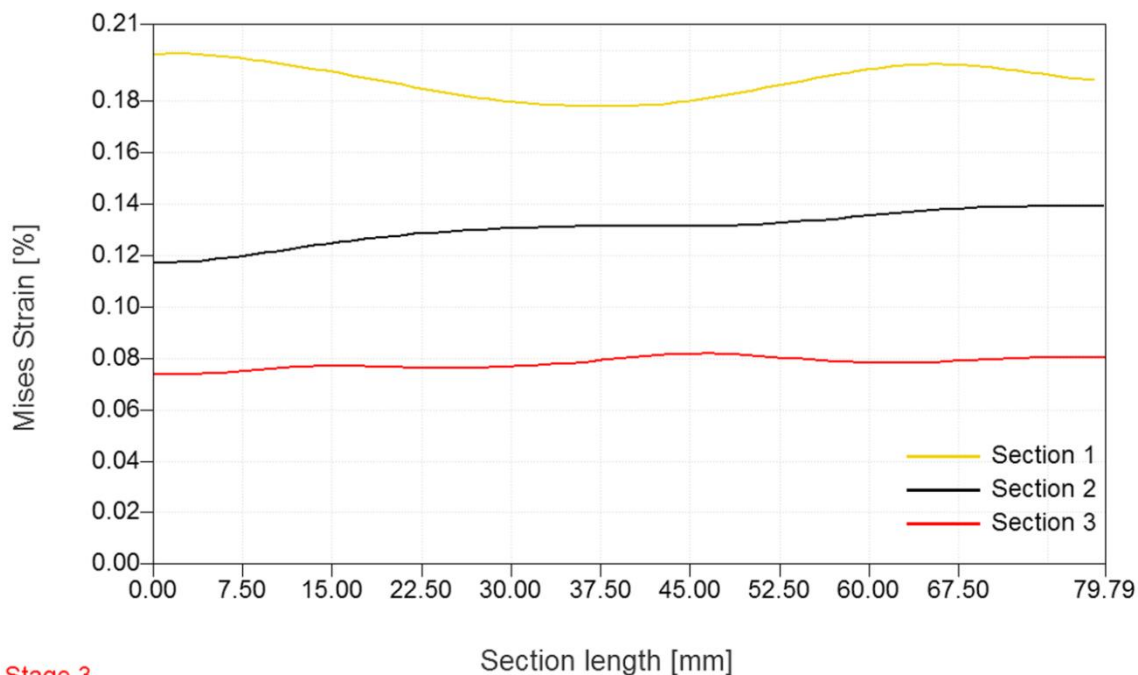


*Slika 7.21. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa za MMI, merno polje 3*

Najveće vrednosti Mizesovih deformacija javljaju se uz priključak 1, na preseku 1 i iznose oko 0,20 %.

Udaljavanjem od preseka 1, od priključaka ka slobodnom delu cilindričnog omotača vrednosti deformacija se smanjuju, i posle preseka 3 prestaje uticaj priključaka na omotač. Deformacije na omotaču posude daleko od priključaka iznose oko 0,075 %.

Dijagram Mizesovih deformacija za svaki od karakterističnih preseka je dat na slici 7.22.



Stage 3

ARAMIS

gom  
www.gom.com

Slika 7.22. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa, merno polje 3

Za dalju analizu rezultata, kao i statističku analizu posmatrača se eksperimentalno izmerene vrednosti za presek 1, gde se javljaju maksimalne vrednosti Mizesovih deformacija. U tabeli 7.9. su prikazane vrednosti Mizesovih deformacija za svaku od tačaka koje se nalaze po dužini preseka, za sva tri koraka opterećenja posude.

Tabela 7.9. Vrednosti Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom za MMI za merno polje 3

Merno mesto 1, merno polje 3						
Redni broj tačke na preseku	Presek 1					
	Opterećenje pritiskom od 0,5 MPa		Opterećenje pritiskom od 1 MPa		Opterećenje pritiskom od 1,5 MPa	
	Dužina preseka [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina preseka [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina preseka [mm]	Mizesova deformacija [%]
1	0	0,0827	0	0,1436	0	0,1981
2	1,037	0,0828	1,038	0,1439	1,039	0,1984
3	2,078	0,0828	2,077	0,144	2,079	0,1986
4	3,117	0,0827	3,118	0,144	3,119	0,1985
5	4,156	0,0825	4,157	0,1439	4,158	0,1983
6	5,196	0,0822	5,198	0,1436	5,199	0,198
7	6,235	0,0819	6,238	0,1432	6,239	0,1975
8	7,278	0,0814	7,278	0,1426	7,28	0,197
9	8,318	0,081	8,319	0,1419	8,322	0,1963
10	9,359	0,0807	9,361	0,1412	9,363	0,1956
11	10,399	0,0803	10,402	0,1404	10,404	0,1949
12	11,441	0,08	11,443	0,1395	11,445	0,1942
13	12,482	0,0797	12,485	0,1387	12,487	0,1934
14	13,524	0,0794	13,526	0,1378	13,528	0,1926
15	14,567	0,0791	14,57	0,137	14,573	0,1919
16	15,61	0,0788	15,613	0,1362	15,616	0,191
17	16,653	0,0785	16,655	0,1355	16,658	0,1902
18	17,695	0,0782	17,698	0,1348	17,701	0,1893
19	18,738	0,0778	18,741	0,1341	18,743	0,1884
20	19,781	0,0774	19,784	0,1335	19,786	0,1875
21	20,825	0,0769	20,828	0,1329	20,831	0,1865
22	21,869	0,0765	21,872	0,1324	21,875	0,1856
23	22,913	0,076	22,916	0,1319	22,919	0,1847
24	23,958	0,0755	23,961	0,1315	23,964	0,1838
25	25,004	0,075	25,006	0,131	25,011	0,183
26	26,049	0,0744	26,052	0,1304	26,057	0,1822
27	27,095	0,0739	27,097	0,1299	27,101	0,1815
28	28,139	0,0734	28,142	0,1293	28,145	0,1809
29	29,186	0,0728	29,19	0,1287	29,193	0,1803
30	30,232	0,0723	30,237	0,1281	30,239	0,1798
31	31,281	0,0717	31,284	0,1275	31,288	0,1794
32	32,328	0,0712	32,331	0,1269	32,335	0,179
33	33,376	0,0707	33,379	0,1263	33,384	0,1787
34	34,423	0,0702	34,427	0,1257	34,431	0,1784
35	35,473	0,0699	35,476	0,1253	35,481	0,1782
36	36,521	0,0696	36,526	0,1249	36,53	0,1781
37	37,571	0,0693	37,577	0,1247	37,58	0,1781
38	38,62	0,0691	38,624	0,1245	38,628	0,1781
39	39,671	0,069	39,676	0,1243	39,68	0,1782
40	40,723	0,0689	40,727	0,1243	40,73	0,1784
41	41,772	0,0689	41,776	0,1245	41,78	0,1787
42	42,826	0,0689	42,829	0,1247	42,833	0,1791
43	43,876	0,069	43,881	0,125	43,885	0,1796
44	44,929	0,0691	44,934	0,1253	44,938	0,1802
45	45,984	0,0692	45,988	0,1257	45,993	0,1809
46	47,036	0,0693	47,041	0,1262	47,046	0,1817
47	48,091	0,0694	48,095	0,1268	48,099	0,1825
48	49,143	0,0697	49,148	0,1274	49,152	0,1835
49	50,198	0,0699	50,204	0,1281	50,207	0,1844
50	51,254	0,0702	51,258	0,1287	51,264	0,1854
51	52,309	0,0704	52,313	0,1294	52,319	0,1863

52	53,365	0,0707	53,371	0,13	53,375	0,1872
53	54,42	0,0709	54,425	0,1306	54,431	0,1881
54	55,476	0,0713	55,483	0,1312	55,488	0,189
55	56,534	0,0716	56,54	0,1318	56,545	0,1899
56	57,591	0,0719	57,597	0,1323	57,602	0,1907
57	58,373	0,0721	58,379	0,1326	58,384	0,1913
58	58,648	0,0722	58,654	0,1327	58,659	0,1915
59	59,706	0,0724	59,712	0,1331	59,718	0,1923
60	60,764	0,0726	60,771	0,1334	60,776	0,1929
61	61,824	0,0727	61,83	0,1336	61,835	0,1935
62	62,881	0,0728	62,888	0,1338	62,893	0,194
63	63,94	0,0728	63,948	0,134	63,953	0,1943
64	65	0,0726	65,008	0,134	65,013	0,1944
65	66,059	0,0725	66,066	0,1341	66,073	0,1944
66	67,12	0,0722	67,128	0,134	67,134	0,1943
67	68,18	0,072	68,186	0,1339	68,193	0,194
68	69,239	0,0716	69,247	0,1338	69,254	0,1936
69	70,299	0,0713	70,306	0,1336	70,314	0,1931
70	71,359	0,0709	71,367	0,1333	71,373	0,1925
71	72,42	0,0705	72,428	0,133	72,435	0,1919
72	73,479	0,0702	73,487	0,1326	73,495	0,1913
73	74,539	0,0699	74,548	0,1322	74,555	0,1906
74	75,599	0,0696	75,607	0,1318	75,615	0,19
75	76,66	0,0693	76,669	0,1314	76,676	0,1894
76	77,718	0,069	77,727	0,1311	77,734	0,1888
77	78,779	0,0688	78,788	0,1308	78,795	0,1884

Funkcionalna zavisnost maksimalnih Mizesovih deformacija za MM1, merno polje 3, nastalih opterećenjem posude pod pritiskom, i dužine karakterističnog preseka najbolje opisuje polinomna funkcija oblika

$$y(x) = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 + B_4 \cdot x^4$$

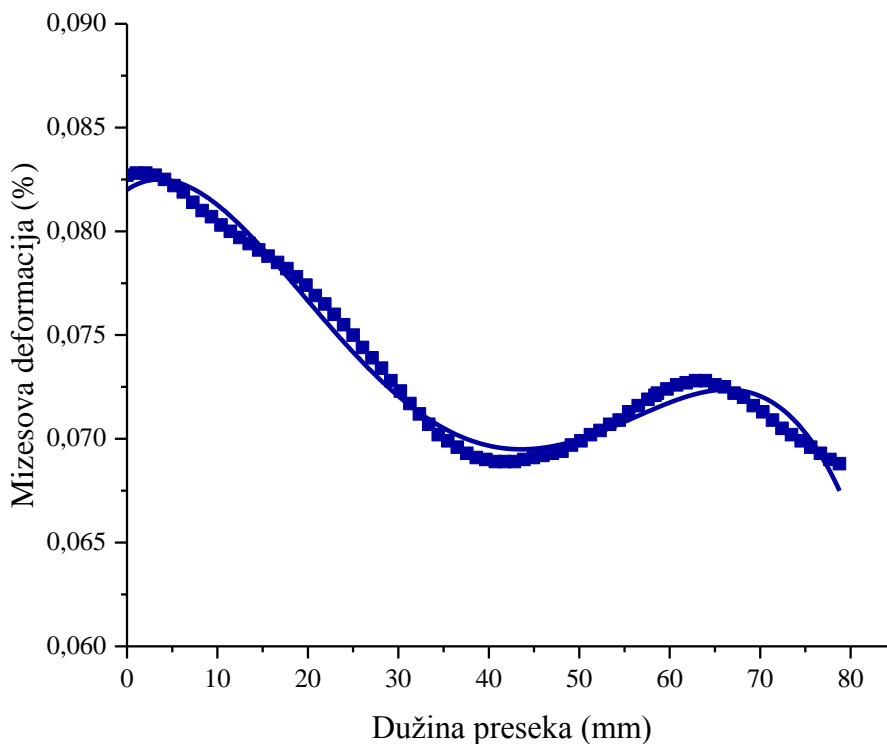
gde su :

- $y(x)$  - vrednost Mizesovih deformacija,
- $x$  [mm] – koordinata tačke na preseku 1,
- $A, B_1, B_2, B_3$  i  $B_4$  – koeficijenti.

Koordinata  $x$  u jednačinama za funkcionalnu zavisnost, predstavlja rastojanje tačke na preseku u odnosu na početak preseka.

*Funkcionalna zavisnost Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka za slučaj opterećenja od 0,5 MPa*

Statističkom obradom podataka dobijenih eksperimentalnim merenjima za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa, utvrđena je funkcionalna veza Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka, slika 7.23. Polinomna funkcija kao i vrednosti koeficijenata  $A$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  i  $B_4$  uz promenljivu  $x$ , prikazani su u tabeli 7.10.



*Slika 7.23. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 0,5 MPa*

Tabela 7.10. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima

Presek	Funkcionalna zavisnost					R <sup>2</sup>	RSS
	$y = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 + B_4 \cdot x^4$						
	Koeficijenti						
A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>			
1	0,082	2,93877E-4	-4,67472E-5	1,07706E-6	-7,11709E-9	0,98341	2,44105E-5

Dobro slaganje pretpostavljene funkcije zavisnosti sa vrednostima Mizesovih deformacija su potvrđeni kroz vrednosti koeficijenta determinacije i srednjeg kvadratnog odstupanja, prikazanih u tabeli 7.10.

Na osnovu eksperimentalno dobijenih vrednosti Mizesovih deformacija, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa, za karakterističan presek 1, interval pouzdanosti za maksimalnu vrednost Mizesove deformacije je

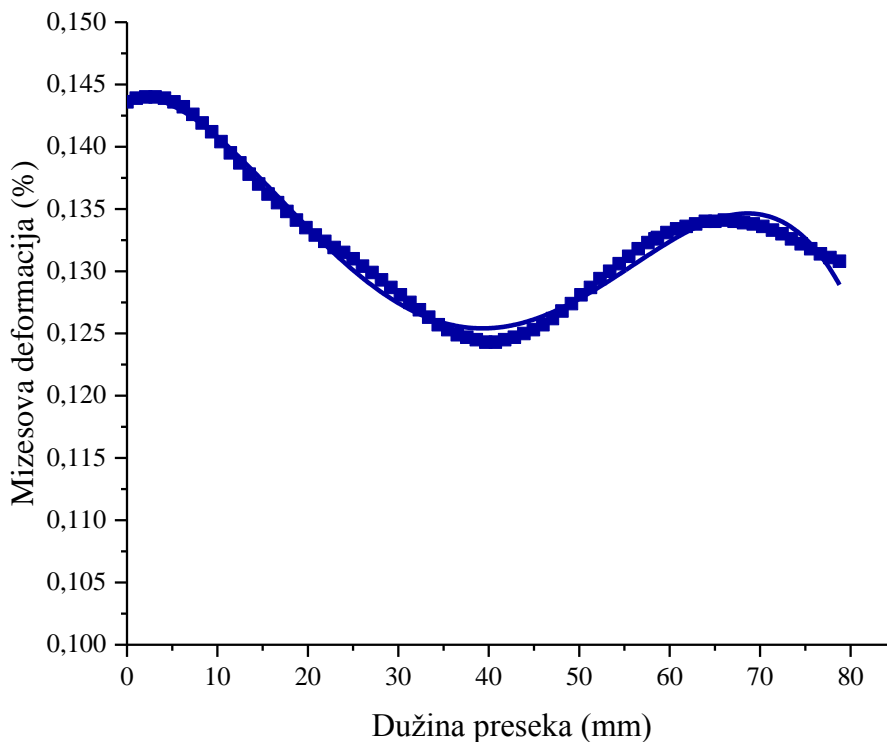
$$y(x) = 0,08341 \pm 0,00101,$$

što znači da se stvarna (tačna) vrednost maksimalne Mizesove deformacije nalazi u intervalu od 0,08139 do 0,08341.

*Funkcionalna zavisnost Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka za slučaj opterećenja od 1 MPa*

Statističkom obradom podataka dobijenih eksperimentalnim merenjima za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa, utvrđena je funkcionalna veza Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka, slika 7.24. Polinomna funkcija kao i vrednosti koeficijenata A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> i B<sub>4</sub> uz promenljivu x, prikazani su u tabeli 7.11.





Slika 7.24. Dijagram promene Misesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 1 MPa

Tabela 7.11. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima

Presek	Funkcionalna zavisnost					R <sup>2</sup>	RSS
	$y = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 + B_4 \cdot x^4$						
	Koeficijenti						
	A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>		
1	0,14395	1,27469E-4	-5,8515E-5	1,50851E-6	-1,0371E-8	0,98394	3,66548E-5

Dobro slaganje pretpostavljene funkcije zavisnosti sa vrednostima Misesovih deformacija su potvrđeni kroz vrednosti koeficijenta determinacije i srednjeg kvadratnog odstupanja, prikazanih u tabeli 7.11.

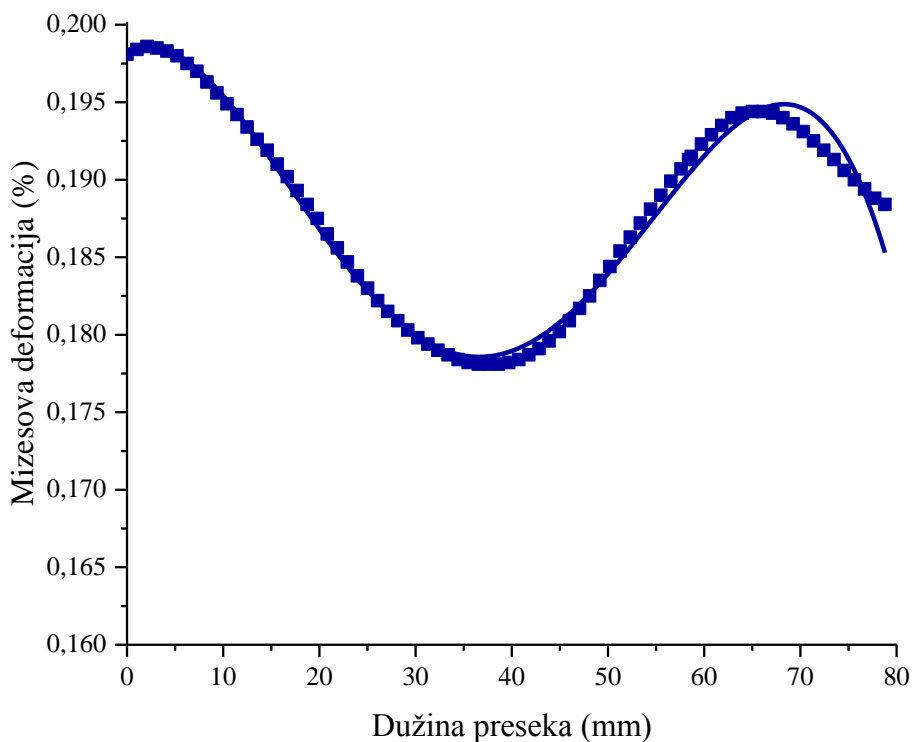
Na osnovu eksperimentalno dobijenih vrednosti Mizesovih deformacija, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa, za karakterističan presek 1, interval pouzdanosti za maksimalnu vrednost Mizesove deformacije je

$$y(x) = 0,1438 \pm 0,001258,$$

što znači da se stvarna (tačna) vrednost maksimalne Mizesove deformacije nalazi u intervalu od 0,1425 do 0,145.

*Funkcionalna zavisnost Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka za slučaj opterećenja od 1,5 MPa*

Statističkom obradom podataka dobijenih eksperimentalnim merenjima za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa, utvrđena je funkcionalna veza Mizesovih deformacija i dužine karakterističnog preseka, slika 7.25. Polinomna funkcija kao i vrednosti koeficijenata A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> i B<sub>4</sub> uz promenljivu x, prikazani su u tabeli 7.12.



Slika 7.25. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za unutrašnji pritisak od 1,5 MPa

Tabela 7.12. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima

Presek	Funkcionalna zavisnost					R <sup>2</sup>	RSS
	$y = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 + B_4 \cdot x^4$						
	Koeficijenti						
	A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>		
1	0,19814	3,66344E-4	-8,44134E-5	2,19559E-6	-1,53507E-8	0,98638	4,19111E-5

Dobro slaganje pretpostavljene funkcije zavisnosti sa vrednostima Misesovih deformacija su potvrđeni kroz vrednosti koeficijenta determinacije i srednjeg kvadratnog odstupanja, prikazanih u tabeli 7.12.

Na osnovu eksperimentalno dobijenih vrednosti Mizesovih deformacija, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa, za karakterističan presek 1, interval pouzdanosti za maksimalnu vrednost Mizesove deformacije je

$$y(x) = 0,1984 \pm 0,00146,$$

što znači da se stvarna (tačna) vrednost maksimalne Mizesove deformacije nalazi u intervalu od 0,197 do 0,199.

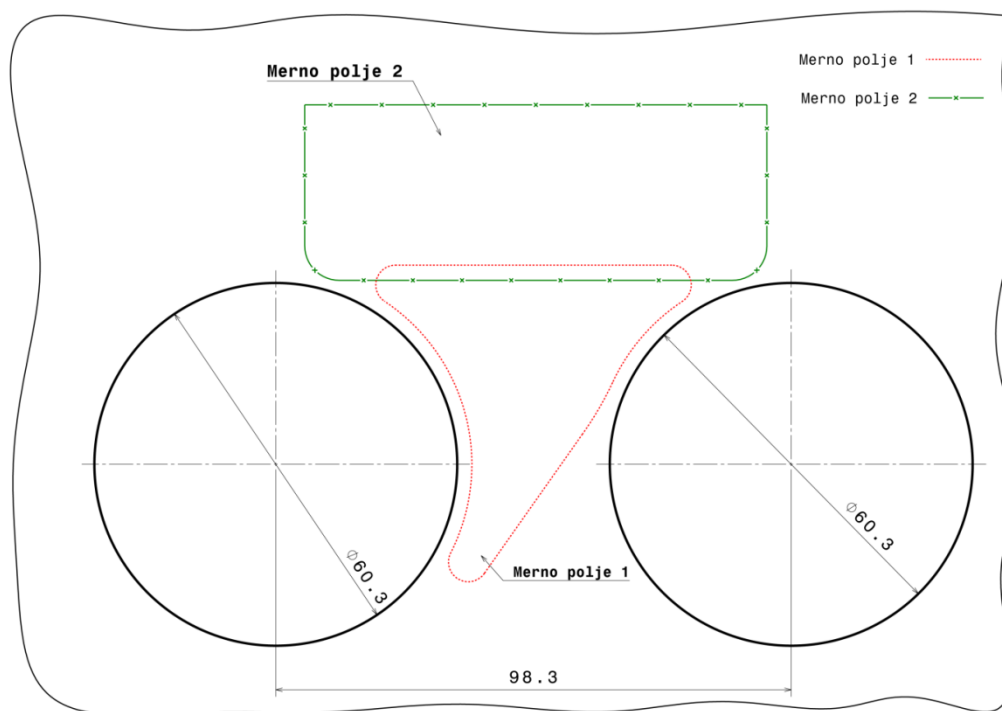
### 7.3. Rezultati merenja deformacija za merno mesto 2

Merno mesto 2 se nalazi između dva priključka istih dimenzija DN 50 (60,3 x 2,9 mm). Polje deformacija između dva priključka prikazano je u ovom poglavlju pomoću slika, tabela i dijagrama

Kako bi dobili realnu sliku ponašanja omotača između dva priključka i u njihovoj okolini za MM2 definisana su dva merna polja, što je šematski prikazano na slici 7.26. Merno polje 1 obuhvata polje između priključaka, a merno polje 2 je definisano tako da obuhvata zonu koja se nalazi iznad oba priključaka.

Ukupan broj napravljenih snimaka je 3 za svaki pritisak pojedinačno, što znači ukupno (uključujući slike neopterećenog i rasterećenog stanja) 10 snimaka.

Eksperimentalna merenja deformacija su obavljena za tri vrednosti unutrašnjeg pritiska od 0,5 MPa, 1MPa i 1,5 MPa.

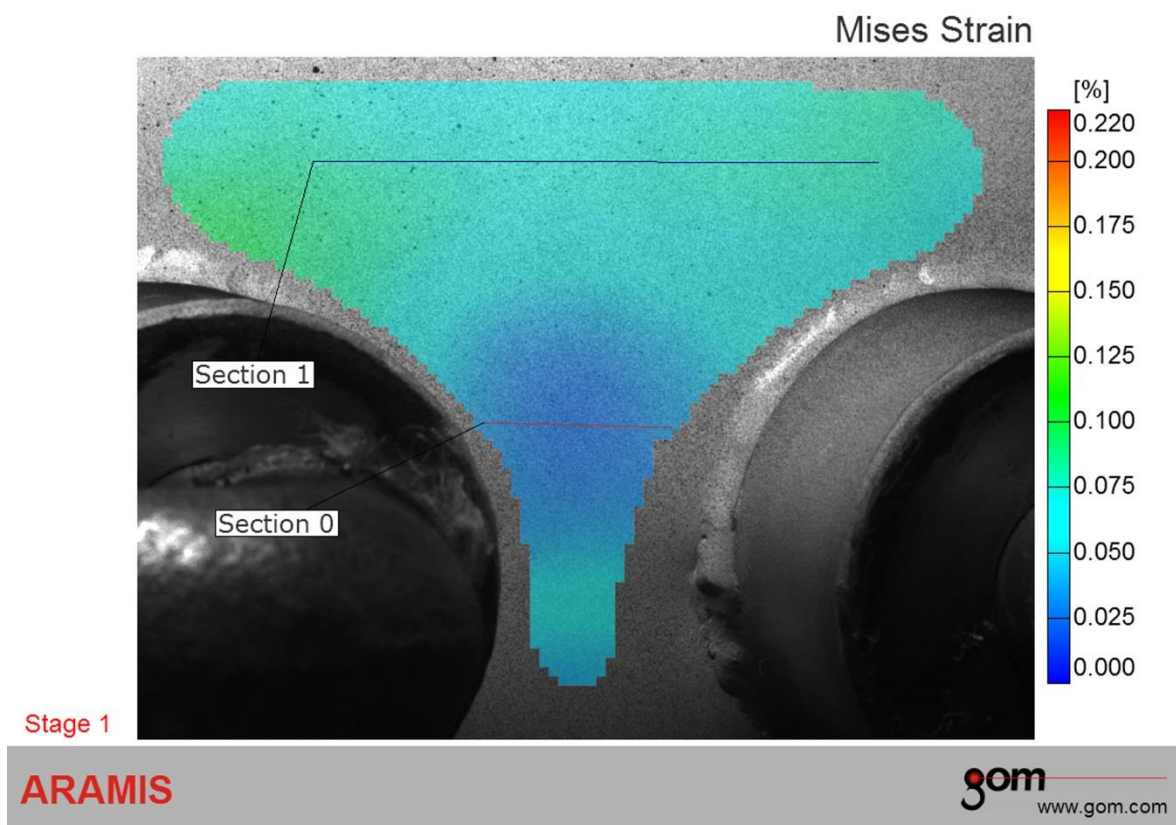


Slika 7.26. Položaj mernih polja

### 7.3.1. Rezultati merenja deformacija za merno mesto 2, merno polje 1

Merno polje 1 je analizirano sa dva linijska preseka. Presek 0 je postavljen između priključaka i obuhvata zonu najmanjih vrednosti Mizesovih deformacija, a presek 1 je postavljen tako da obuhvata maksimalne vrednosti Mizesovih deformacija.

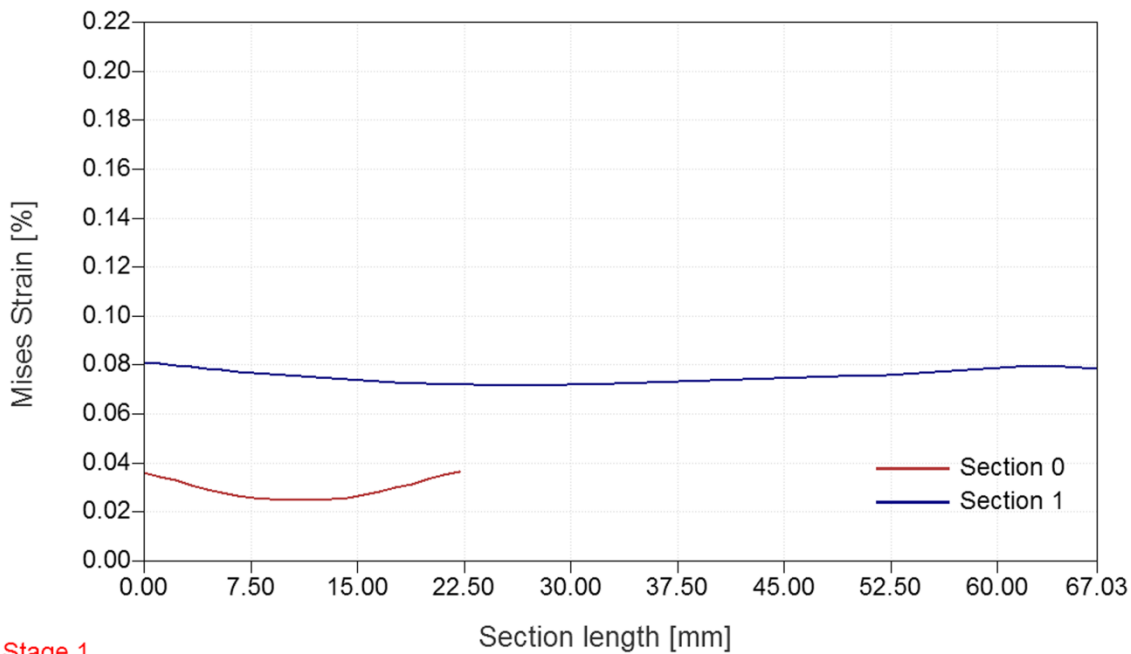
Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja od 0,5 MPa je prikazano na slici 7.27. Na ordinati na slici je prikazana skala koja je data u %, a na samoj slici je dat položaj linijskih preseka. Procentualne vrednosti su date u odnosu na nulti, neopterećeni korak.



Slika 7.27. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa za MM2, merno polje 1

Vrednosti Mizesovih deformacija na preseku 0 između dva priključka iznose oko 0,05 %. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija koje se javljaju pri opterećenju od 0,5 MPa se nalaze u okolini priključka na preseku 1 i iznose oko 0,082 %.

Vrednosti Mizesovih deformacija je moguće prikazati i grafički, pomoću dijagrama, slika 7.28, gde su vrednosti deformacija date u zavisnosti od dužine preseka.



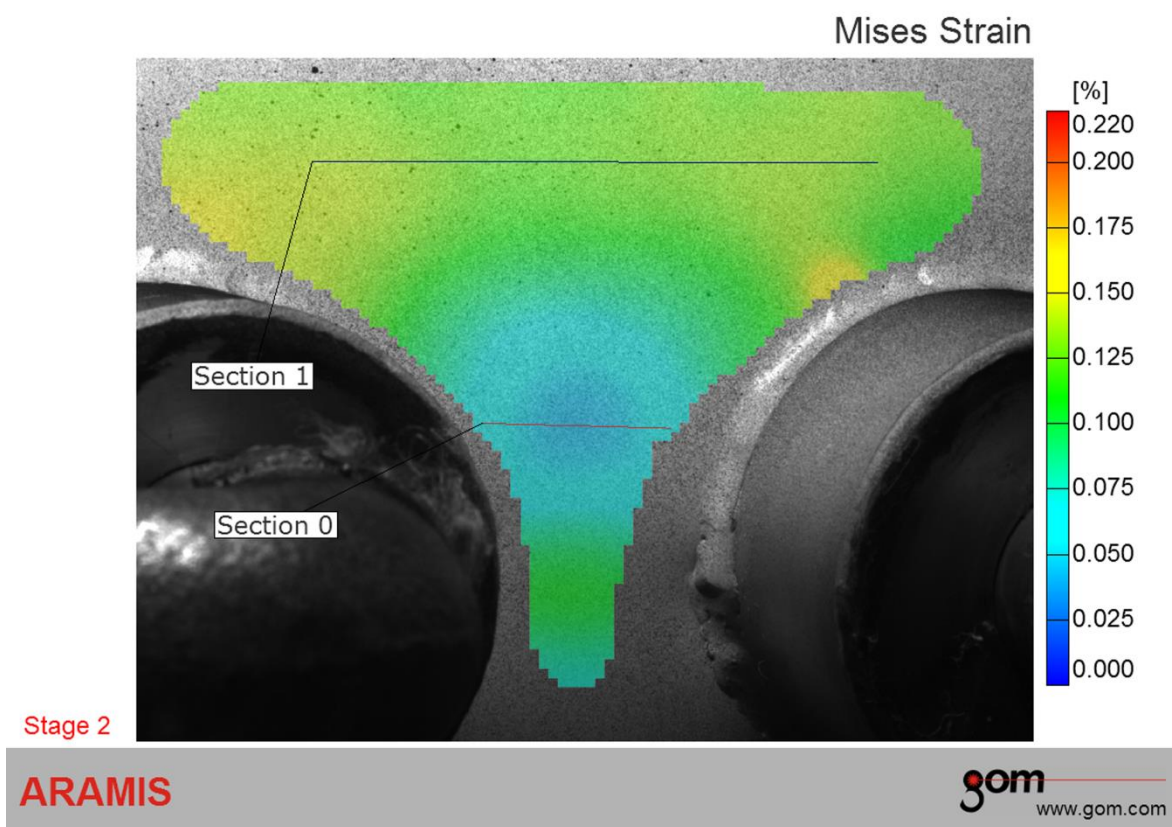
Stage 1

ARAMIS

gom  
www.gom.com

Slika 7.28. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa, merno polje 1

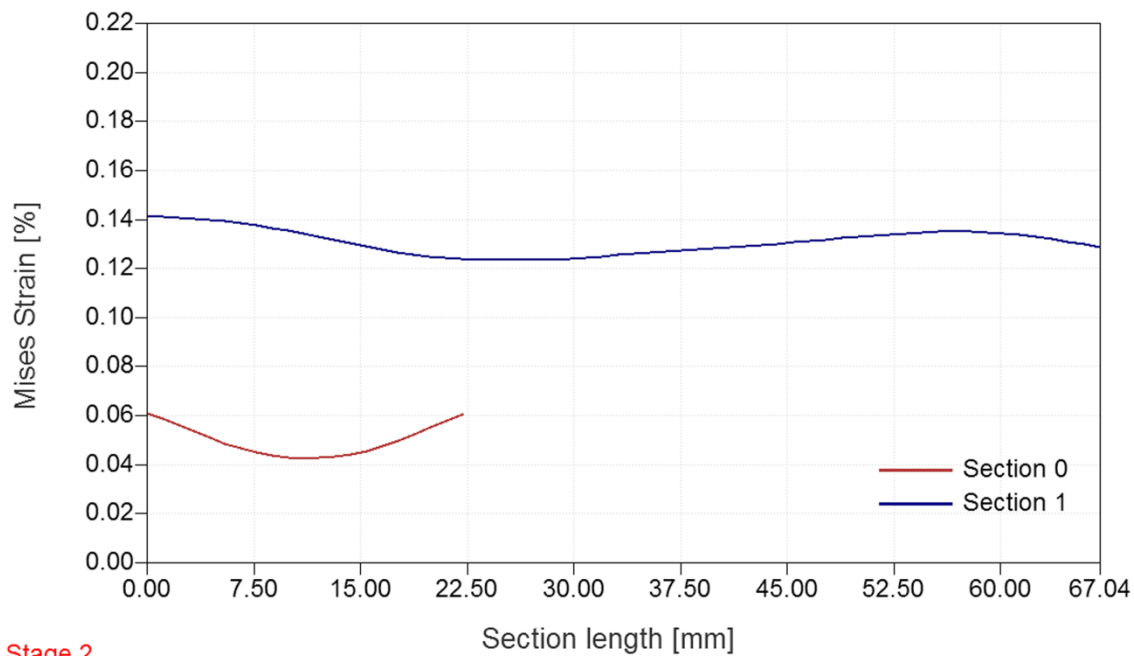
Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa je prikazano na slici 7.29. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju na preseku 1 u okolini spoja priključka i cilindričnog omotača i iznose oko 0,15 %.



Slika 7.29. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa za MM 2

Na preseku 0 izmerene su najmanje vrednosti Mizesovih deformacija i iznose oko 0,05 %. Dijagram Mizesovih deformacija za svaki od preseka je dat na slici 7.30.





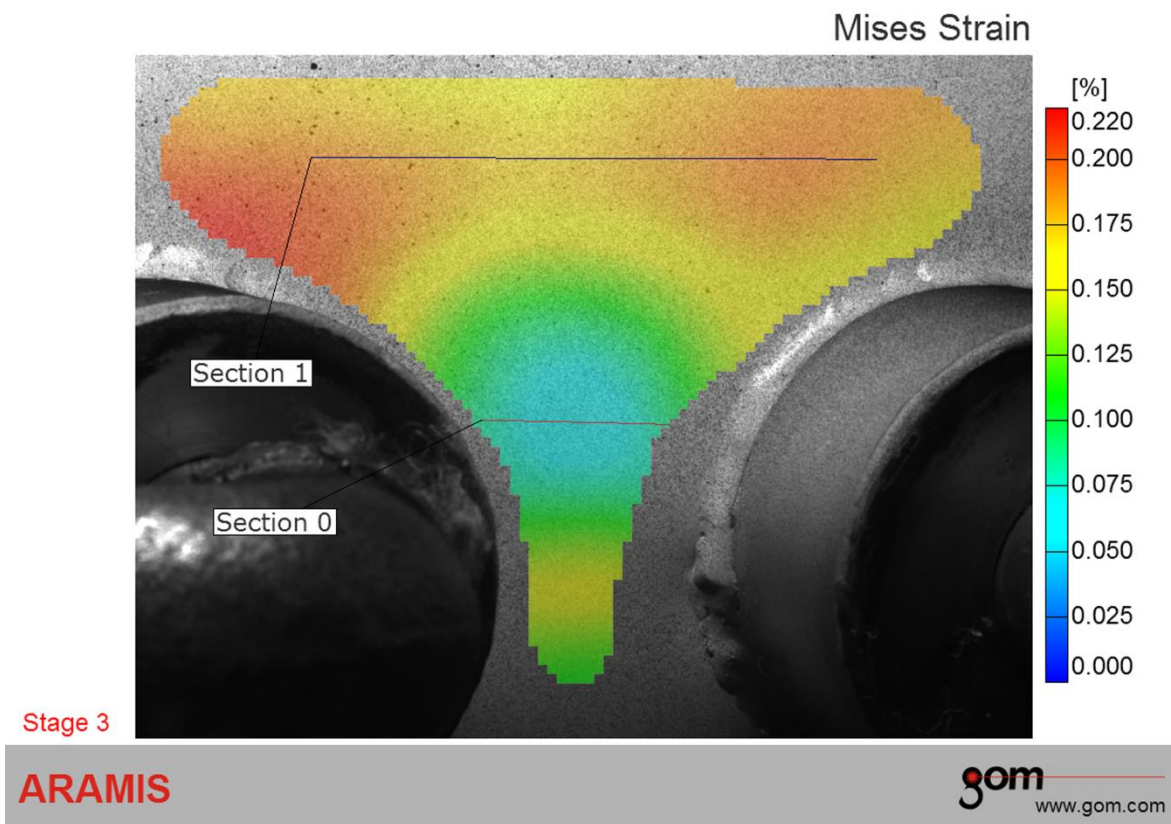
Stage 2

ARAMIS

gom  
www.gom.com

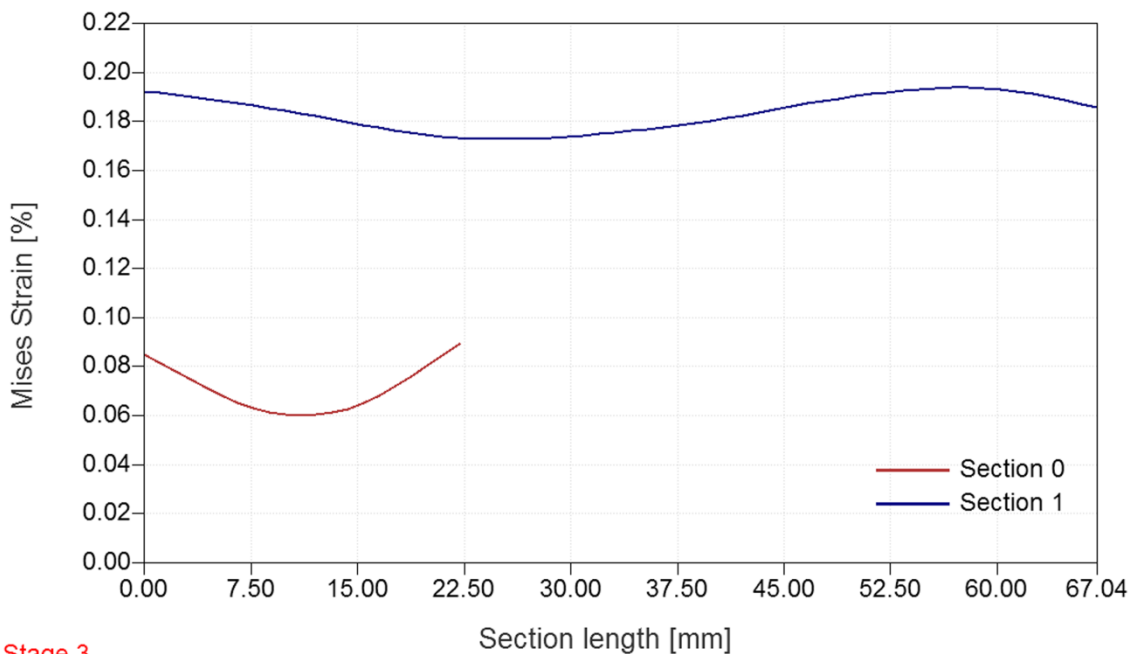
*Slika 7.30. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa, merno polje 1*

Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa je prikazano na slici 7.31.



Slika 7.31. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa za MM 2, merno polje 1

Najmanje vrednosti Mizesovih deformacija javljaju se na presku 0 i iznose oko 0,06 %, a najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju na preseku 1 i iznose oko 0,20 %. Dijagram Mizesovih deformacija za svaki od preseka je prikazan na slici 7.32.



Stage 3

ARAMIS

gom  
www.gom.com

Slika 7.32. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa, merno polje 1

U tabeli 7.13 su prikazane vrednosti najvećih Mizesovih deformacija za svaku od tačaka po dužini preseka, za sva tri koraka opterećenja posude.

Tabela 7.13. Vrednosti Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom za MM2 za merno polje 2

Merno mesto 2						
Redni broj tačke na preseku	Presek 1					
	Opterećenje 0,5 MPa		Opterećenje 1 MPa		Opterećenje 1,5 MPa	
	Dužina preseka [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina preseka [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina preseka [mm]	Mizesova deformacija [%]
1	0	0,0808	0	0,1404	0	0,1916
2	1,093	0,0802	1,094	0,1401	1,093	0,1909
3	2,187	0,0797	2,188	0,1398	2,188	0,1902
4	3,282	0,0791	3,283	0,1393	3,282	0,1895
5	4,377	0,0786	4,378	0,1388	4,378	0,1887
6	5,474	0,078	5,475	0,1381	5,475	0,1878

7	6,571	0,0774	6,572	0,1374	6,572	0,1868
8	7,668	0,0769	7,669	0,1365	7,669	0,1858
9	8,765	0,0763	8,768	0,1354	8,768	0,1847
10	9,865	0,0758	9,867	0,1343	9,867	0,1835
11	10,963	0,0752	10,966	0,1332	10,966	0,1824
12	12,063	0,0747	12,065	0,132	12,066	0,1812
13	13,165	0,0743	13,167	0,1308	13,167	0,18
14	14,266	0,0738	14,268	0,1296	14,269	0,1788
15	15,369	0,0734	15,371	0,1285	15,372	0,1777
16	16,471	0,073	16,474	0,1275	16,475	0,1766
17	17,576	0,0727	17,578	0,1265	17,579	0,1756
18	18,68	0,0724	18,683	0,1256	18,683	0,1747
19	19,786	0,0721	19,788	0,1249	19,789	0,174
20	20,892	0,0719	20,895	0,1242	20,895	0,1733
21	22	0,0717	22,003	0,1237	22,003	0,1728
22	23,108	0,0716	23,111	0,1234	23,111	0,1723
23	24,217	0,0714	24,22	0,1231	24,221	0,1721
24	25,327	0,0713	25,33	0,123	25,331	0,1719
25	26,438	0,0713	26,441	0,123	26,443	0,1719
26	27,55	0,0713	27,553	0,1231	27,554	0,1721
27	28,664	0,0713	28,666	0,1232	28,667	0,1723
28	29,778	0,0714	29,781	0,1235	29,782	0,1727
29	30,891	0,0715	30,895	0,1239	30,896	0,1732
30	32,008	0,0716	32,011	0,1243	32,013	0,1737
31	33,125	0,0718	33,128	0,1247	33,129	0,1743
32	34,243	0,072	34,246	0,1252	34,247	0,175
33	35,361	0,0722	35,365	0,1256	35,367	0,1758
34	36,482	0,0725	36,486	0,1261	36,487	0,1766
35	37,603	0,0727	37,606	0,1265	37,608	0,1775
36	38,724	0,0729	38,728	0,127	38,729	0,1784
37	39,847	0,0732	39,851	0,1274	39,852	0,1794
38	40,971	0,0734	40,975	0,1279	40,976	0,1805
39	42,095	0,0736	42,1	0,1284	42,101	0,1815
40	43,221	0,0739	43,224	0,1288	43,226	0,1827
41	44,347	0,0741	44,35	0,1293	44,352	0,1838
42	45,475	0,0743	45,478	0,1298	45,48	0,1849
43	46,603	0,0744	46,606	0,1304	46,608	0,186
44	47,731	0,0746	47,735	0,1309	47,737	0,1871
45	48,861	0,0748	48,865	0,1315	48,867	0,1881
46	49,992	0,075	49,996	0,132	49,998	0,189
47	51,122	0,0753	51,127	0,1326	51,129	0,1898
48	52,255	0,0755	52,259	0,1331	52,261	0,1905
49	53,388	0,0758	53,393	0,1335	53,395	0,1911
50	54,522	0,0762	54,527	0,1339	54,529	0,1916
51	55,656	0,0766	55,661	0,1341	55,664	0,1918
52	56,791	0,077	56,796	0,1342	56,799	0,1919
53	57,927	0,0774	57,931	0,1341	57,935	0,1919
54	59,063	0,0778	59,068	0,1338	59,071	0,1916
55	60,199	0,0781	60,205	0,1334	60,208	0,1911
56	61,337	0,0783	61,342	0,1328	61,346	0,1904
57	62,474	0,0785	62,481	0,1321	62,484	0,1896
58	63,612	0,0785	63,618	0,1312	63,622	0,1886
59	64,751	0,0784	64,757	0,1302	64,761	0,1874
60	65,89	0,0782	65,896	0,1291	65,9	0,1862
61	67,029	0,0778	67,035	0,1281	67,039	0,1849

Funkcionalna zavisnost maksimalnih Mizesovih deformacija za MM2, merno polje 1, nastalih opterećenjem posude pod pritiskom, i dužine karakterističnog preseka najbolje opisuje polinomna funkcija oblika

$$y(x) = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 + B_4 \cdot x^4$$

gde su :

- $y(x)$  - vrednost Mizesovih deformacija,
- $x$  [mm] – koordinata tačke na preseku 1,
- $A, B_1, B_2, B_3$  i  $B_4$  – koeficijenti.

Koordinata  $x$  u jednačinama za funkcionalnu zavisnost, predstavlja rastojanje tačke na preseku u odnosu na početak preseka.

Na osnovu postupka statističke obrade podataka za MM1, na isti način izračunati su svi koeficijenti uz promenljivu  $x$ , kao i koeficijent determinacije i srednje kvadratno odstupanje za MM2, merno polje 1. Rezultati su prikazani u tabeli 7.14. za sve tri vrste opterećenja.

*Tabela 7.14. Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima*

Opterećenje (MPa)	Funkcionalna zavisnost					R <sup>2</sup>	RSS
	$y = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 + B_4 \cdot x^4$						
	Koeficijenti						
	A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>		
0,5	0,08116	-6,68674E-4	9,17784E-6	1,41567E-7	-2,07696E-9	0,99103	3,75533E-6
1	0,14191	-7,32118E-4	-2,77067E-5	1,48641E-6	-1,43147E-8	0,98029	2,75745E-5
1,5	0,19236	-7,19809E-4	-4,45027E-5	2,19028E-6	-2,08372E-8	0,99399	1,66828E-5

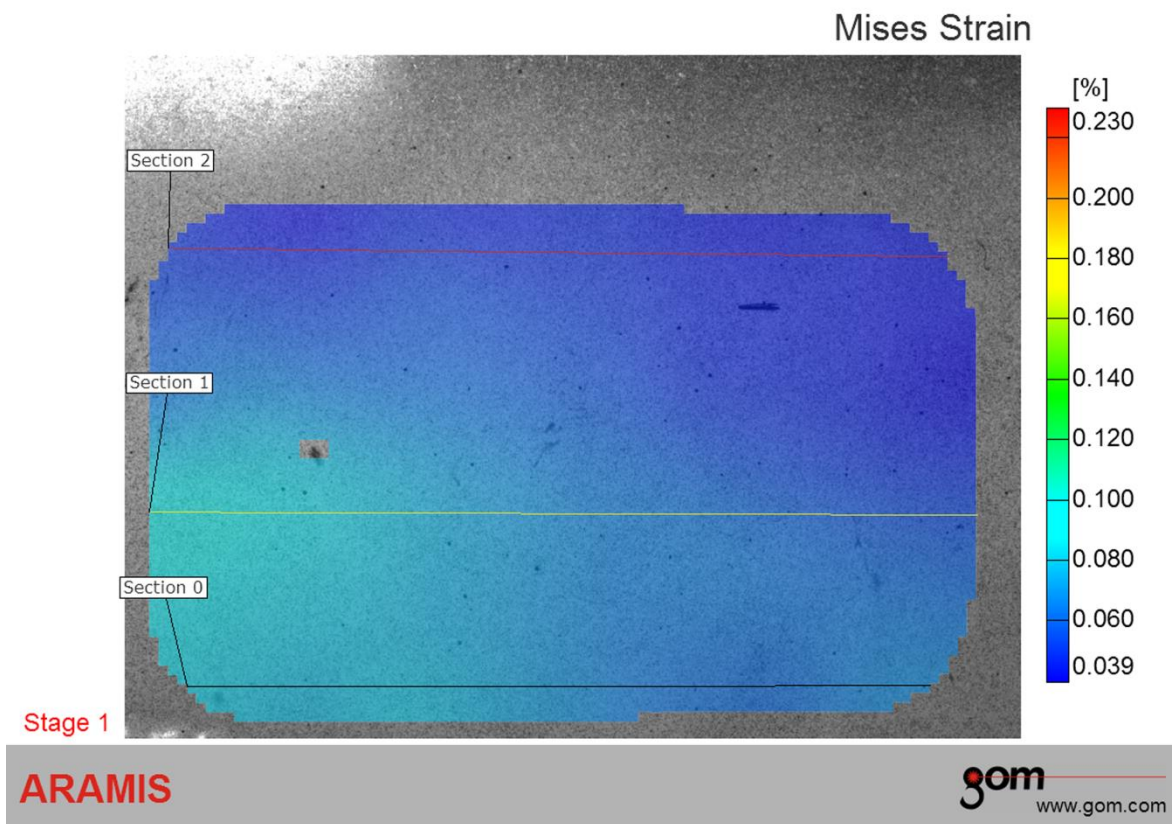
Dobro slaganje pretpostavljene funkcije zavisnosti sa vrednostima Mizesovih deformacija su potvrđeni kroz vrednosti koeficijenta determinacije i srednjeg kvadratnog odstupanja, prikazanih u tabeli 7.14.

Interval pouzdanosti je moguće odrediti za svaku vrednost deformacije, na isti način kao što je prikazano za merno mesto 1.

### *7.3.2. Rezultati merenja deformacija za merno mesto 2, merno polje 2*

Merno polje 2 obuhvata oblast iznad priključaka, i analizirano je u tri linijska preseka. Raspodela Mizesovih deformacija je prikazana na slici 7.33. Presek 0 je postavljen tako da se nalazi neposredno iznad priključaka, (MM2, merno polje 1, presek 1) i jednim delom obuhvata zonu najvećih deformacija po granici mernog polja. Na ordinati na slici je prikazana skala koja je data u %, a na samoj slici je dat položaj linijskih preseka. Procentualne vrednosti su date u odnosu na nulti, neopterećeni korak.

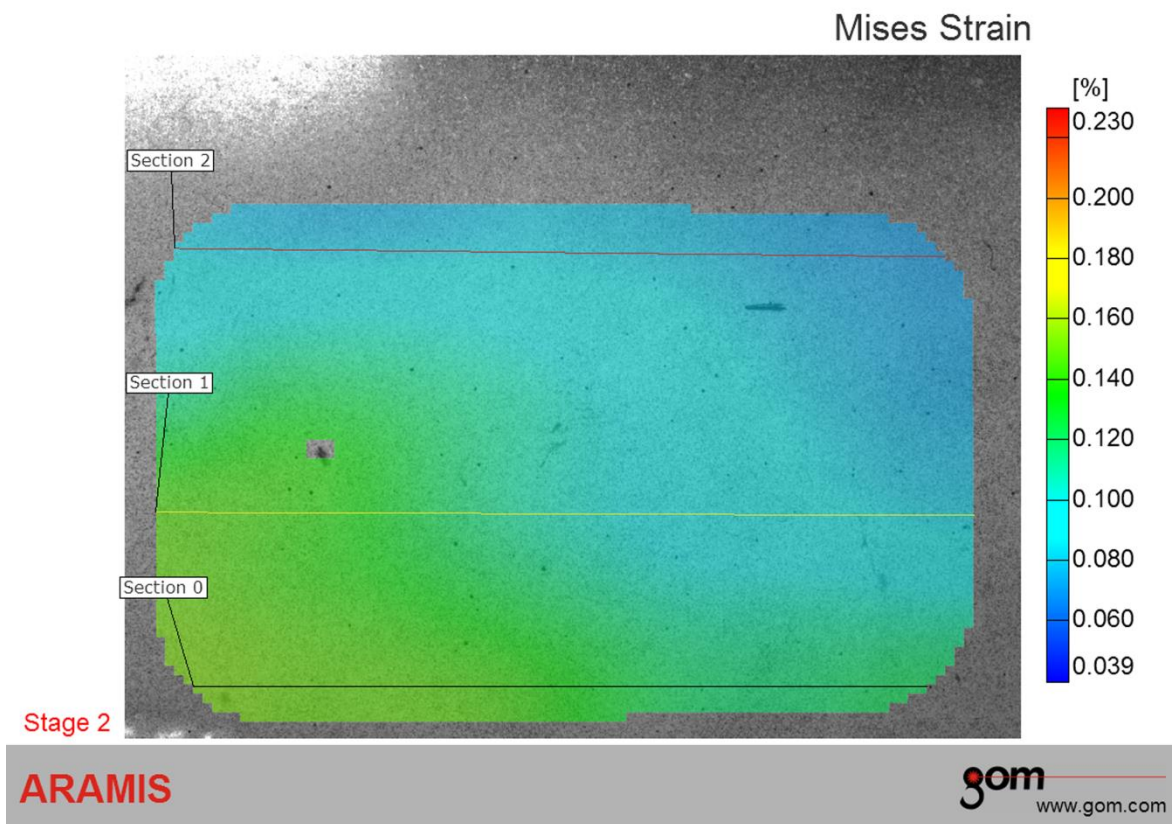
Polje deformacija za merno polje 2, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa je prikazano na slici 7.33.



*Slika 7.33. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa za MM2, merno polje 2*

Najveće vrednosti Mizesovih deformacija koje se javljaju pri opterećenju od 0,5 MPa se nalaze uz priključak 1, na preseku 0 i iznose oko 0,08 %. Udaljavanjem od priključaka ka slobodnom delu omotača posude vidi se da se vrednosti deformacija smanjuju i da se posle preseka 2 smanjuje uticaj priključaka na omotač. Deformacije na omotaču posude daleko od priključaka iznose oko 0,035 %.

Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa je prikazano na slici 7.34.

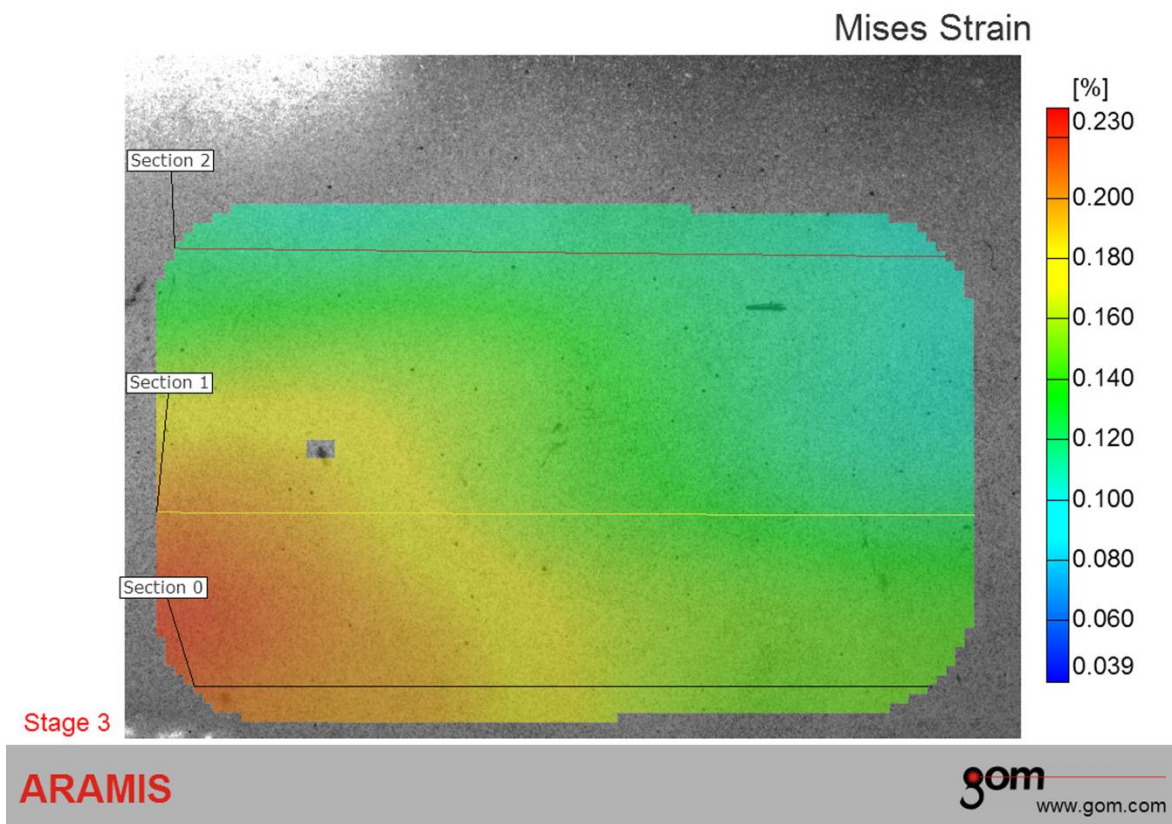


*Slika 7.34. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa za MM2, merno polje 2*

Najveće vrednosti Mizesovih deformacija koje se javljaju pri opterećenju od 1 MPa se nalaze uz priključak 1, na preseku 0 i iznose oko 0,14 %. Udaljavanjem od priključaka ka slobodnom delu omotača posude vrednosti deformacija se smanjuju. Deformacije na omotaču posude daleko od priključaka iznose oko 0,08 %.

Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa je prikazano na slici 7.35.





*Slika 7.35. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa za MM2, merno polje 2*

Najveće vrednosti Mizesovih deformacija koje se javljaju pri opterećenju od 1 MPa se nalaze uz priključak 1, na preseku 0 i iznose oko 0,21 %. Udaljavanjem od priključaka ka slobodnom delu omotača posude vrednosti deformacija se smanjuju. Deformacije na omotaču posude daleko od priključaka iznose oko 0,1 %.

U tabeli 7.15. su prikazane vrednosti najvećih Mizesovih deformacija za svaku od tačaka po dužini karakterističnog preseka, za sva tri koraka opterećenja posude.

Tabela 7.15. Vrednosti Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom za MM2 za merno polje 2

Merno mesto 2						
Redni broj tačke na preseku	Presek 0					
	Opterećenje 0,5 MPa		Opterećenje 1 MPa		Opterećenje 1,5 MPa	
	Dužina sekcije [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina sekcije [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina sekcije [mm]	Mizesova deformacija [%]
1	0	0,0845	0	0,1546	0	0,215
2	1,085	0,0842	1,084	0,1549	1,083	0,2145
3	2,167	0,0837	2,169	0,1552	2,167	0,2138
4	3,252	0,0834	3,252	0,1556	3,252	0,2129
5	4,337	0,0828	4,338	0,1556	4,337	0,2118
6	5,422	0,0821	5,422	0,1554	5,423	0,2104
7	6,505	0,0815	6,506	0,155	6,507	0,209
8	7,592	0,0808	7,594	0,1544	7,594	0,2077
9	8,678	0,0802	8,679	0,1535	8,679	0,2065
10	9,76	0,0798	9,762	0,1529	9,762	0,2058
11	10,848	0,0795	10,851	0,1523	10,852	0,2052
12	11,937	0,0792	11,94	0,1518	11,941	0,2044
13	13,022	0,0788	13,026	0,1514	13,027	0,2036
14	14,109	0,0784	14,113	0,1511	14,114	0,2026
15	15,197	0,0779	15,2	0,1507	15,202	0,2013
16	16,285	0,0776	16,288	0,1503	16,29	0,2
17	17,372	0,0775	17,375	0,15	17,377	0,1989
18	18,459	0,0778	18,464	0,1499	18,465	0,198
19	19,549	0,0784	19,554	0,15	19,556	0,1976
20	20,637	0,0792	20,642	0,1502	20,644	0,1975
21	21,728	0,08	21,731	0,1506	21,734	0,1978
22	22,816	0,0807	22,821	0,1509	22,823	0,1981
23	23,907	0,081	23,911	0,1509	23,914	0,1983
24	24,998	0,0811	25,003	0,1508	25,006	0,1984
25	26,089	0,081	26,094	0,1505	26,096	0,1982
26	27,181	0,0808	27,186	0,1499	27,189	0,1977
27	28,273	0,0804	28,277	0,1493	28,28	0,1971
28	29,365	0,08	29,37	0,1489	29,373	0,1964
29	30,459	0,0796	30,464	0,1485	30,467	0,1955
30	31,553	0,079	31,558	0,1481	31,561	0,1943
31	32,646	0,0783	32,652	0,148	32,655	0,1928
32	33,741	0,0776	33,746	0,1478	33,749	0,1912
33	34,838	0,077	34,842	0,1474	34,845	0,1893
34	35,933	0,0764	35,938	0,1469	35,941	0,1873
35	37,029	0,0758	37,034	0,1462	37,038	0,1854
36	38,126	0,0753	38,131	0,1452	38,134	0,1837
37	39,224	0,0747	39,229	0,1441	39,234	0,182
38	40,321	0,0741	40,326	0,143	40,331	0,1804
39	41,421	0,0734	41,427	0,1418	41,43	0,1787
40	42,52	0,0727	42,525	0,1406	42,529	0,177
41	43,619	0,0719	43,624	0,1394	43,629	0,1751
42	44,72	0,0711	44,726	0,1379	44,73	0,173
43	45,822	0,0704	45,829	0,1364	45,833	0,171
44	46,926	0,0698	46,931	0,1349	46,936	0,1689
45	48,027	0,069	48,033	0,1332	48,037	0,1668
46	49,13	0,0683	49,138	0,1317	49,142	0,1651
47	50,234	0,0677	50,24	0,1306	50,245	0,1638
48	51,34	0,0668	51,347	0,1295	51,352	0,1627
49	52,445	0,0659	52,452	0,1284	52,456	0,1618
50	53,551	0,0651	53,558	0,1272	53,562	0,161
51	54,657	0,0643	54,663	0,1256	54,668	0,1602
52	55,766	0,0635	55,773	0,1238	55,777	0,1591

53	56,874	0,0629	56,881	0,1221	56,886	0,1581
54	57,982	0,0626	57,99	0,1206	57,994	0,1571
55	59,095	0,0625	59,101	0,1195	59,106	0,156
56	60,204	0,0626	60,212	0,119	60,217	0,1552
57	61,315	0,0627	61,323	0,1189	61,328	0,1544
58	62,427	0,0628	62,435	0,119	62,44	0,1538
59	63,542	0,0628	63,549	0,1191	63,554	0,1532
60	64,654	0,0625	64,661	0,1191	64,666	0,1527
61	65,769	0,0621	65,775	0,1189	65,781	0,1522
62	66,884	0,0615	66,89	0,1185	66,896	0,1518
63	68	0,0608	68,007	0,1181	68,012	0,1513
64	69,116	0,0602	69,125	0,1177	69,13	0,1507
65	70,233	0,0599	70,24	0,1173	70,245	0,15
66	71,352	0,0599	71,36	0,1171	71,366	0,1494
67	72,471	0,0602	72,478	0,1172	72,484	0,1489
68	73,59	0,061	73,598	0,1176	73,604	0,1486
69	74,711	0,0622	74,72	0,1182	74,726	0,1489
70	75,833	0,0634	75,842	0,1192	75,848	0,1494
71	76,956	0,0648	76,965	0,1202	76,971	0,1502
72	78,079	0,0661	78,089	0,1212	78,095	0,151
73	79,205	0,0672	79,214	0,1218	79,219	0,1517
74	80,33	0,068	80,339	0,1224	80,345	0,1518
75	81,455	0,0685	81,465	0,1228	81,47	0,1517
76	82,583	0,0689	82,593	0,1232	82,599	0,1513
77	83,711	0,069	83,72	0,1237	83,727	0,1506
78	84,839	0,0691	84,849	0,1245	84,856	0,1499
79	85,968	0,0692	85,978	0,1254	85,984	0,1493
80	87,099	0,0691	87,109	0,1261	87,116	0,1489
81	88,228	0,0691	88,237	0,1266	88,244	0,1486
82	89,358	0,0691	89,367	0,1269	89,374	0,1485

Funkcionalna zavisnost maksimalnih Mizesovih deformacija za MM2, merno polje 2, nastalih opterećenjem posude pod pritiskom, i dužine karakterističnog preseka najbolje opisuje polinomna funkcija oblika

$$y(x) = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 + B_4 \cdot x^4$$

gde su :

- vrednost Mizesovih deformacija,
- $x$  [mm] – koordinata tačke na preseku 1,
- A, B1, B2, B3 i B4 – koeficijenti.

Koordinata  $x$  u jednačinama za funkcionalnu zavisnost, predstavlja rastojanje tačke na preseku u odnosu na početak preseka.

Na osnovu postupka statističke obrade podataka za MM1, na isti način izračunati su svi koeficijenti uz promenljivu  $x$ , kao i koeficijent determinacije i srednje kvadratno

odstupanje za MM2, merno polje 2. Rezultati su prikazani u tabeli 7.16. za sve tri vrste opterećenja.

Tabela 7.16. *Polinomna funkcija promene deformacije i dužine preseka sa koeficijentima*

Opterećenje (MPa)	Funkcionalna zavisnost					R <sup>2</sup>	RSS
	$y = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 + B_4 \cdot x^4$						
	Koeficijenti						
A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>			
0,5	0,08262	-1,90566E-4	9,22373E-6	-3,8565E-7	3,29794E-9	0,9398	2,71506E-4
1	0,15441	-1,12122E-4	8,42791E-6	-5,47909E-7	4,88468E-9	0,97898	3,24495E-4
1,5	0,212	-2,47667E-4	-1,62474E-5	-8,02157E-9	1,5558E-9	0,98631	5,69262E-4

Dobro slaganje pretpostavljene funkcije zavisnosti sa vrednostima Mizesovih deformacija su potvrđeni kroz vrednosti koeficijenta determinacije i srednjeg kvadratnog odstupanja, prikazanih u tabeli 7.16.

Interval pouzdanosti je moguće odrediti za svaku vrednost deformacije, na isti način kao što je prikazano za merno mesto 1.

#### 7.4. Metoda mernih traka

Metoda mernih traka spada u grupu ekstenzometrijskih metoda, gde se pomoću mehaničkih ili električnih uređaja dobijaju lokalne deformacijske veličine ispitivanog modela ili na realnim konstrukcijama.

U ovom radu merne trake su korišćene radi provere vrednosti deformacija i napona na karakterističnim mestima. Merna traka je davač, čiji se električni otpor menja u funkciji izduženja, pa se tako problem merenja mehaničkog izduženja svodi na merenje otpora trake.

Pre početka ispitivanja potrebno je da se merno mesto odmasti i očisti kako bi traka mogla da se zalepi. Traka se lepi odgovarajućim dvokomponentnim lepkom za metalnu površinu, i mora da ima svojstvo da dobro i verno prenese dilatacije sa materijala na mernu traku. Korišćene su merne trake tipa rozeta. Korišćene merne trake su proizvođača Tokyo Sokki Kenkyujo, tipa FRA – 3 – 11. Osnovne karakteristike mernih traka su:

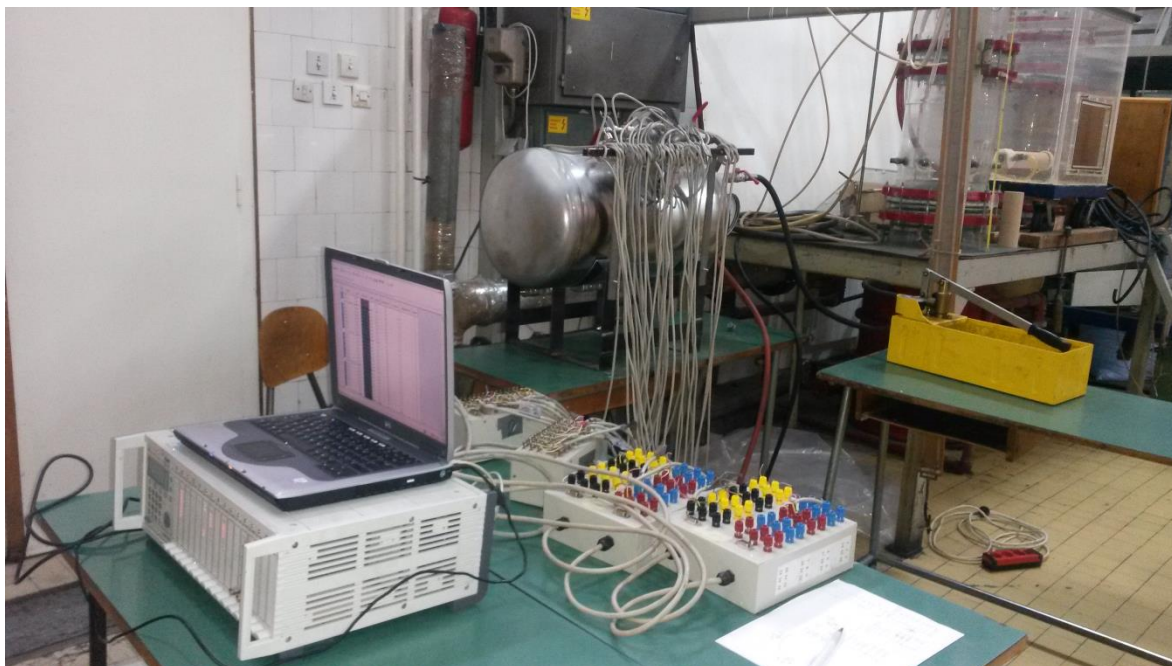
Otpornost trake  $R = 120 \pm 0,5 \Omega$ .

$K = 2,12 \pm 1\%$ .

Baza trake je 6 mm.

#### *Određivanje položaja mernih traka*

Položaj mernih traka je određen na osnovu rezultata proračuna metodom konačnih elemenata, kao i na osnovu rezultata dobijenih eksperimentalnom beskontaktnom optičkom metodom merenja deformacija, i prikazan je na slici 7.1. Za obavljanje eksperimentalnih merenja, na prethodno pripremljenu posudu, postavljeno je 4 mernih traka, tj. rozeta.



*Slika 7.36. Eksperimentalna instalacija za ispitivanje mernim trakama*

Analizirano je deformaciono - naponsko stanje na cilindričnom omotaču između dva priključka različitih dimenzija, odnosno merno mesto 1, merno polje 1, radi verifikacije rezultata dobijenih proračunom. Postavka eksperimentalne instalacije je prikazana na slici 7.36. Kako su za obradu rezultata dobijenih metodom digitalne korelacije slika korišćeni linijski preseki (sections), na osnovu toga su po dve rozete postavljene uz priključke, što odgovara početnoj i krajnjoj tački na presecima 2 i 3, koji su postavljeni za merno polje 1, (slika 7.1.).

Tačno rastojanje od spoljne ivice priključaka određeno je tako da se obuhvate kritična mesta, odnosno mesto maksimalnog napona dobijenog metodom konačnih elemenata, a da ne obuhvataju zonu uticaja zavarenog spoja.

#### *Postupak merenja*

Za eksperimentalna merenja metodom mernih traka korišćen je uređaj MGC plus za akviziciju podataka, proizvođača "Hottinger Baldwin Messtechnik".

Ispitivanje je obavljeno sa vodom iz gradske mreže na ambijentalnoj temperaturi. Nakon punjenja posude vodom, izvršeno je ispuštanje vazduha. Merenje lokalnih deformacija na ispitivanoj posudi je obavljeno za pritiske radnog fluida od: 0; 0,5; 1 i 1,5 MPa. Pre početka opterećenja posude zadatim pritiscima, obavljeno je postupno opterećivanje i rasterećivanje posude pritiskom od 2 do 3 bar, kako bi se smanjio uticaj eventualnih zaostalih napona koji se javljaju kao posledica neravnomernog zagrevanja i hlađenja pri izradi, pri spajanju zavarivanjem i pri savijanju limova. Lokalna, relativna deformacija se očitava pomoću navedenih uređaja.

Rezultati dobijeni metodom mernih traka za vrednost ispitnog pritiska od 1 MPa su upoređene sa rezultatima dobijenim numeričkim proračunima. Vrednosti su prikazane u tabeli 7.17.

*Tabela 7.17. Uporedni prikaz rezultata dobijenih numeričkim i eksperimentalnim ispitivanjem metodom mernih traka posude za vrednost unutrašnjeg pritiska od 1 MPa*

Merne trake	Mizesovi naponi dobijeni numeričkim proračunom [MPa]	Izmereni Mizesovi naponi [MPa]	Procentualna razlika [%]
I	188,16	193,3	2,73
II	178,3	183,31	2,81
III	238	230,62	3,1
IV	164,7	165,45	0,46

Poređenjem sa rezultatima dobijenim numeričkim proračunom potvrđene su vrednosti napona na karakterističnim mestima. Vrednosti izmerene mernim trakama pokazuju dobro poklapanje sa vrednostima dobijenim numeričkim proračunom.

## 8. ANALIZA REZULTATA

U okviru ove disertacije prikazana je analiza i postupak eksperimentalnog određivanja celih polja deformacija na posudi pod pritiskom sa priključcima opterećene unutrašnjim pritiskom, primenom nove optičke metode i njihov međusobni uticaj na naponsko stanje cilindričnog omotača. Dosadašnja istraživanja u oblasti opreme pod pritiskom su se uglavnom oslanjala na analitičke proračune bazirane na teoriji ljuske, numeričke proračune upotrebom različitih računarskih softvera i konvencionalne eksperimentalne metode. Najčešće korišćena konvencionalna metoda za merenja deformacija i napona na realnim konstrukcijama je metoda mernih traka čija je glavna mana lokalno merenje, odnosno dobijanje vrednosti merenih veličina samo u jednoj tački.

Metoda korelacije digitalnih slika je optička metoda koja omogućava trodimenzionalnu analizu površinskih deformacija i merenje celih polja deformacija, što nije moguće korišćenjem konvencionalne metode mernih traka. Eksperimentalni postupak koji je prikazan u ovom radu, tokom laboratorijskih merenja koja uključuju trodimenzionalnu eksperimentalnu optičku analizu ponašanja cilindričnog omotača posude opterećene unutrašnjim pritiskom i određivanja polja deformacija, primenjen je korišćenjem licenciranog GOM optičkog sistema merenja i softvera za obradu podataka ARAMIS. Pokazano je da se jednim eksperimentalnim merenjem dobija velika količina podataka koja zamenjuje više desetina mernih traka i značajno smanjuje vreme pripreme eksperimenta.

Primenom ove metode moguća je precizna verifikacija rezultata dobijenih numeričkim pristupom kojim se takođe dobija kompletno polje deformacija, pa je mnogo jednostavnije poređenje sa rezultatima koji su predstavljeni na isti način. Numerički proračuni su sprovedeni primenom MKE u softverskom paketu ANSYS v14.5.



### 8.1. Diskusija ekperimentalnih rezultata

Eksperimentalna istraživanja su izvršena na cilindričnoj posudi, spoljašnjeg prečnika  $D_e = 378,4$  mm, debljina omotača 1,5 mm, izrađenoj od konstrukcionog čelika X5 CrNi 18 10, na čiji su omotač zavarena 4 priključka. Geometrija posude kao i dimenzije priključaka je određena na osnovu analitičkog proračuna (poglavlje 2), kao i proračunom metodom konačnih elemenata.

Eksperimentalna merenja su obavljena na posudi koja je horizontalno postavljena na metalni oslonac, na dva merna mesta (MM1 i MM2), kao što je definisano u poglavlju 6. U okviru mernih mesta definisana su i merna polja, koja omogućavaju detaljnu analizu deformacionog polja između priključaka i u njihovoj okolini. Opterećenje posude je obavljeno sa tri vrednosti unutrašnjeg pritiska: 0,5 MPa, 1 MPa i 1,5 MPa.

MM1 se nalazi između dva priključka dimenzija DN 50 i DN 32, koji su postavljeni na međuosnom rastojanju od 94,35 mm. MM1 je analizirano kroz tri merna polja prikazana na slici 7.1. Merno polje 1 obuhvata polje između priključaka i analizirano je sa tri linijska preseka. Merno polje 2 obuhvata oblast iznad priključka 1, a merno polje 3 obuhvata oblast iznad priključaka. Maksimalne vrednosti Mizesovih deformacija, izmerene beskontaktnim uređajem, javile su se u okolini spoja priključka 1 (DN 50) i cilindričnog omotača.

Analizom rezultata dobijenih eksperimentalnim merenjima za sva tri merna polja na MM1, opisana je (prikazana) oblast uz veći priključak, u kojoj se javljaju maksimalne vrednosti Mizesovih deformacija.

Vrednosti maksimalnih Mizesovih deformacija za MM1, merno polje 1, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa iznose oko 0,078 %. Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa maksimalne vrednosti Mizesovih deformacija su oko 0,135 %. Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa maksimalne vrednosti Mizesovih deformacija su oko 0,19 %.

Za merno polje 2 postavljena su dva linijska preseka (slika 7.11.) koja obuhvataju zonu maksimalnih vrednosti deformacija koje se javljaju uz priključak 1. Presek 1 na mernom polju 2 i presek 3 na mernom polju 1, obuhvataju zonu uz priključak 1 gde se

javljaju maksimalne vrednosti Mizesovih deformacija. Vrednosti maksimalnih Mizesovih deformacija za merno polje 2 za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa su u granicama od 0,09 % do 0,1 %. Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa maksimalne vrednosti Mizesovih deformacija su u granicama od 0,13 % do 0,165 %. Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa vrednosti maksimalnih Mizesovih deformacija su u granicama od 0,19 % do 0,21 %.

Na slici 7.17. je prikazano merno polje 3, koje obuhvata zonu iznad priključaka i analizirano je kroz tri linijska preseka. Vrednosti maksimalnih deformacija se javljaju na preseku 1 koji je postavljen iznad priključaka i to u zoni oko spoja priključka 1 i cilindričnog omotača. Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa vrednosti maksimalnih Mizesovih deformacija su oko 0,085 %. Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa vrednosti maksimalnih Mizesovih deformacija su oko 0,143 %. Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa vrednosti maksimalnih Mizesovih deformacija su oko 0,20 %. Presek 3, na mernom polju 3 je postavljen tako da obuhvata deo omotača na kojem je uticaj priključaka zanemarljiv, odnosno vrednosti deformacija su dosta manje, pa se može reći da su jednake deformacijama koje se javljaju na omotaču kada nema priključaka.

MM2 se nalazi između dva priključka istih dimenzija DN 50, koji su postavljeni na međuosnom rastojanju od 98,3 mm. Merno mesto 2 je analizirano kroz dva merna polja prikazana na slici 7.26.

Radi detaljnije analize dobijenih rezultata za merno polje 1 postavljena su dva linijska preseka koja obuhvataju zonu najmanjih Mizesovih deformacija (presek 0) i zonu najvećih Mizesovih deformacija (presek 1). Vrednosti maksimalnih Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 0,5 MPa su oko 0,09 %. Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa vrednosti maksimalnih Mizesovih deformacija su oko 0,145 %. Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa vrednosti maksimalnih Mizesovih deformacija su oko 0,20 %.

Vrednosti Mizesovih deformacija su najmanje na preseku 0, što pokazuje da u toj zoni dolazi do minimalnih deformacija tj. da je materijal posude u toj zoni ukrućen.

Merno polje 2 je analizirano u tri linijska preseka. Maksimalne vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju na preseku 0, koji je postavljen tako da obuhvata oblast iznad priključaka. Udaljavanjem od priključaka ka slobodnom delu omotača, odnosno posle preseka 2, vrednosti deformacija su mnogo manje, i približno odgovaraju vrednostima deformacija koje se javljaju u slučaju kada nema uticaja priključaka na cilindrični omotač.

Nakon detaljne analize eksperimentalnih rezultata dobijenih beskontaktnom optičkom metodom, došlo se do zaključka da se maksimalne vrednosti Mizesovih deformacija ne nalaze između priključaka, na najkraćem rastojanju, već su pomerene i nalaze se približno pod uglom od  $45^\circ$  u odnosu na izvodnicu omotača koja se seče sa osama oba priključka.

Obrada podataka dobijenih eksperimentalnim putem za MM1 i MM2 je sprovedena metodama statističke analize, za svaki karakterističan presek, odnosno presek koji obuhvata maksimalne vrednosti Mizesovih deformacija. Matematički model promene Mizesovih deformacija za MM1 i MM2 najbolje opisuje polinomna funkcija četvrtog reda, definisana u poglavlju 7, pri čemu su vrednosti parametara funkcije prikazani u tabelama. Primenom metode najmanjih kvadrata određeni su parametri polinomne funkcije. Kvalitet izabrane funkcije je analiziran korišćenjem koeficijenta determinacije i srednjeg kvadratnog odstupanja. Za merno mesto 1 određen je interval pouzdanosti za maksimalne vrednosti Mizesovih deformacija, a na isti način moguće je odrediti interval pouzdanosti za bilo koju vrednost.

Za matematički model za MM1 i MM2, za sve tri vrste opterećenja, vrednost koeficijenta determinacije  $R^2$  se kreće u granicama od 0,98391 do 0,99738. Vrednosti koeficijenta determinacije su vrlo zadovoljavajuće za sve karakteristične preseke, što opravdava polinomnu funkciju 4 reda.

Eksperimentalna metoda mernih traka poslužila je za merenje lokalnih deformacija, pomoću kojih se izračunava ekvivalentni napon, odnosno sprovedena je s ciljem da se potvrde vrednosti Mizesovih napona dobijenih numeričkom metodom, u zoni između dva priključka. Merne trake su postavljene na mernom mestu 1, merno polje 1 što je i prikazano na slici 7.1. Rezultati dobijeni metodom mernih traka se vrlo dobro poklapaju sa

rezultatima numeričkog proračuna, što na još jedan način potvrđuje da je numerički model posude dobro postavljen.

## 8.2. *Diskusija numeričkih rezultata*

U okviru MKE analize izračunate su vrednosti Mizesovih deformacija i napona za celu posudu pod pritiskom, opterećenu unutrašnjim pritiskom, a detaljno su analizirana merna mesta definisana u poglavlju 6. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija i napona se javljaju na očekivanim mestima najvećih geometrijskih diskontinuiteta, na spoju priključaka i cilindričnog omotača. Dobijeni rezultati predstavljaju krajnji podatak u analizi uz prethodnu eksperimentalnu verifikaciju celokupne metode.

Rezultati numeričkih simulacija verifikovani su poređenjem dobijenih vrednosti Mizesovih deformacija sa eksperimentalnim rezultatima. Kroz eksperimentalnu analizu i numerički proračun, pokazano je da se materijal u toku opterećenja do 1 MPa nalazi u oblasti elastičnosti, odnosno naponi od radnih opterećenja su ispod napona tečenja u posmatranim zonama.

Kako je u okviru numeričkih proračuna, za opterećenje unutrašnjim pritiskom do 1 MPa korišćena linearno – statička analiza, deformacije i naponi se linearno menjaju sa promenom opterećenja, tako da se rezultati mogu ekstrapolirati za druge vrednosti opterećenja.

Na mernom mestu 1 najveće vrednosti Mizesovih deformacija i napona se javljaju uz priključak 1 (DN 50), a u okolini priključka 2 (DN 32) vrednosti Mizesovih deformacija i napona su manje. Na mernom mestu 2 postavljena su dva priključka istih dimenzija (DN 50), pa je u okolini spoja priključaka i omotača, raspodela deformacija i napona simetrična, što je i očekivano.

Za vrednost opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa izvršena je nelinearna numerička analiza 3D modela posude, primenom metode konačnih elemenata i pokazalo se da je pri ovom opterećenju vrednost Mizesovog napona bliska vrednosti napona tečenja.

Za nelinearni proračun neophodne su mehaničke karakteristike materijala od kojeg je posuda napravljena. Na osnovu uzorka materijala od kojeg je posuda napravljena,

obavljeno je ispitivanje na zatezanje, u cilju dobijanja mehaničkih karakteristika materijala posude. Nakon ispitivanja dobijen je dijagram napon – deformacija za materijal X5 CrNi 18 10 (slika 4.12.).

Najveće vrednosti Von Misesovih napona u slučaju opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1,5 MPa se javljaju u okolini spoja priključka i omotača, i iznose oko 280 MPa. Dobijeni napon predstavlja ekvivalentni Von Misesov napon i manji je od napona tečenja, međutim najveći zatežući napon koji se javlja iznosi oko 308 MPa. Na osnovu vrednosti ovog komponentnog napona može se pretpostaviti da će pri vrednosti unutrašnjeg pritiska od 1,5 MPa doći do pojave plastične deformacije.

Maksimalne vrednosti Misesovih napona i deformacija za MM1 i MM2, za sve tri vrste opterećenja unutrašnjim pritiskom prikazane su u tabeli 8.1.

*Tabela 8.1. Rezultati numeričke analize*

Opterećenje unutrašnjim pritiskom [MPa]	Von Misesov napon [MPa]	Von Misesova deformacija [%]
0,5	120,28	0,062
1	238	0,13
1,5	279,47	0,22

### *8.3. Poređenje numeričkih i eksperimentalnih podataka*

Radi verifikacije numeričkog modela, izvršeno je poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata. Uporedni prikaz rezultata dobijenih metodom konačnih elemenata i sistemom za optičko merenje deformacija, kao i procentualna odstupanja rezultata dat je u tabeli 8.2.

Vrednosti dobijene eksperimentalnim ispitivanjem prikazane u tabeli 8.2. predstavljaju maksimalne vrednosti Misesovih deformacija za MM1 i MM2, za merno polje između priključaka.

Vrednosti Mizesovih deformacija su prikazane za iste tačke na numeričkom i eksperimentalnom modelu.

*Tabela 8.2. Uporedni prikaz rezultata numeričke i 3D eksperimentalne analize*

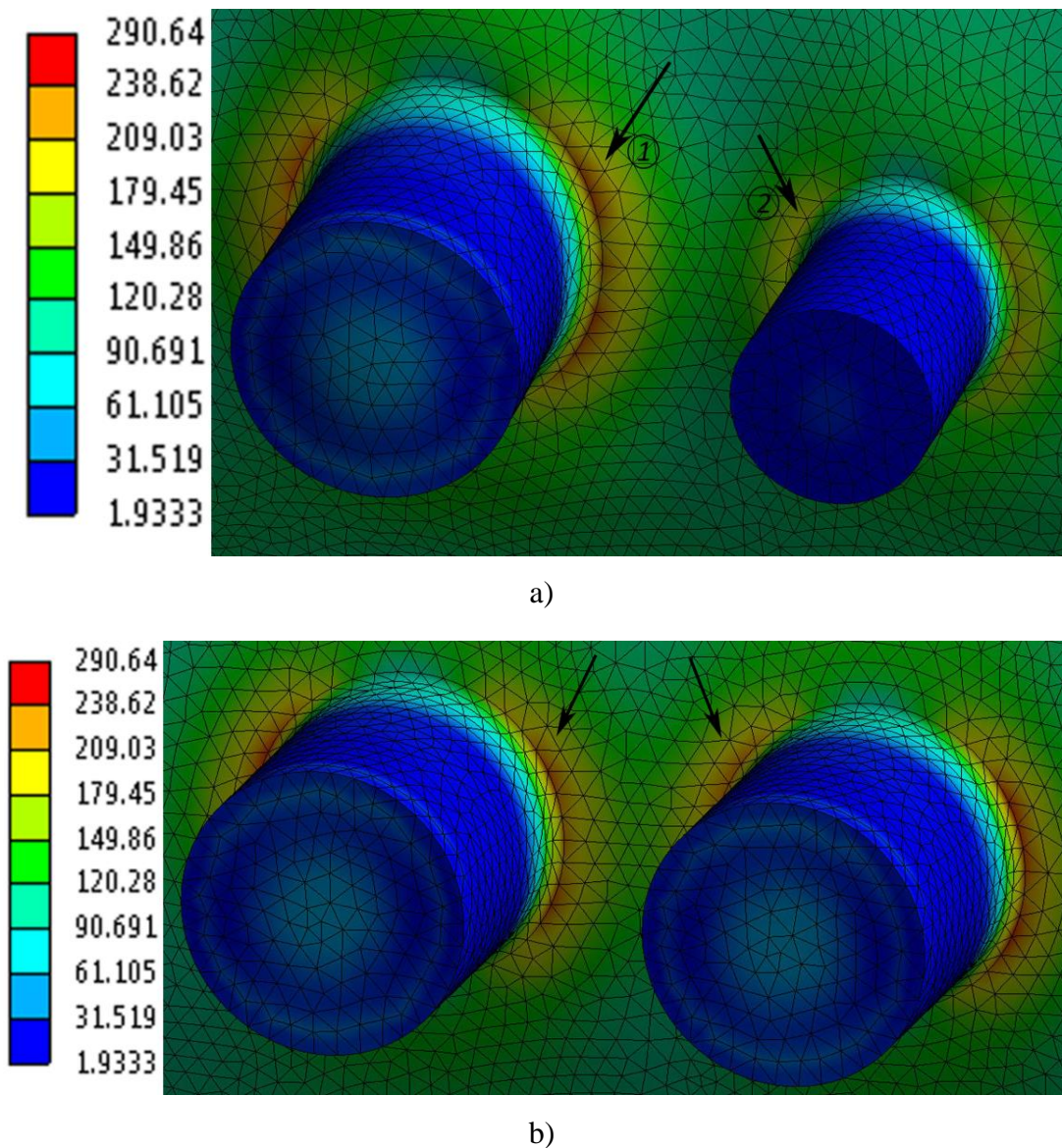
Opterećenje unutrašnjim pritiskom [MPa]	Metoda konačnih elemenata		Sistem za optičko merenje deformacija		Procentualna razlika	
	MM1, mp1 Mizesova deformacija [%]	MM2, mp1 Mizesova deformacija [MPa]	MM1, mp1 Mizesova deformacija [%]	MM2, mp1 Mizesova deformacija [%]	MM1 [%]	MM2 [%]
0,5	0,062	0,062	0,0755	0,0786	17,88	21,12
1	0,13	0,13	0,134	0,1401	2,98	7,21
1,5	0,22	0,22	0,19	0,1902	15,79	15,67

#### 8.4. Faktori koncentracije napona

Mesta sa najvećim diskontinuitetima geometrije posude opterećene unutrašnjim pritiskom, pri elastičnim deformacijama predstavljaju i izvor najjače koncentracije napona. Za ova mesta definišu se faktori koncentracije napona. Faktor koncentracije napona ( $\alpha_k$ ) predstavlja odnos maksimalnog napona  $\sigma_{\max}$  na odabranom mestu i vrednosti nominalnog napona  $\sigma_n$  koji vlada na mestu pravilne geometrije (daleko od izvora koncentracije napona)

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}$$

Faktor koncentracije napona je određen na pozicijama geometrijskih diskontinuiteta, odnosno na mestima najvećih napona, što je prikazano na slici 8.1. Na ordinati je prikazana skala Mizesovih napona u MPa.

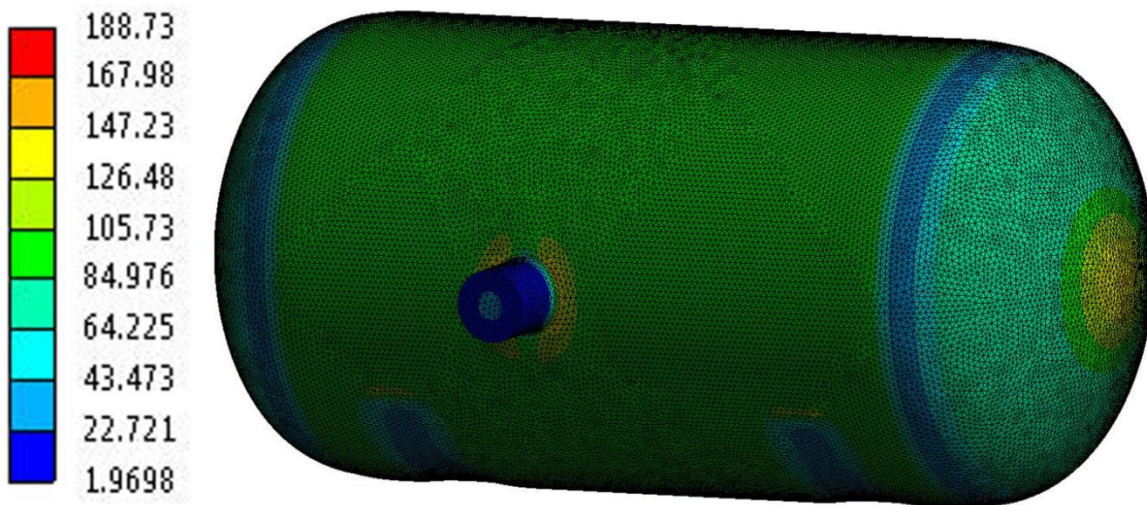


Slika 8.1. Položaj mesta za određivanje faktora koncentracije napona za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 1 MPa, a) MM1, b) MM2

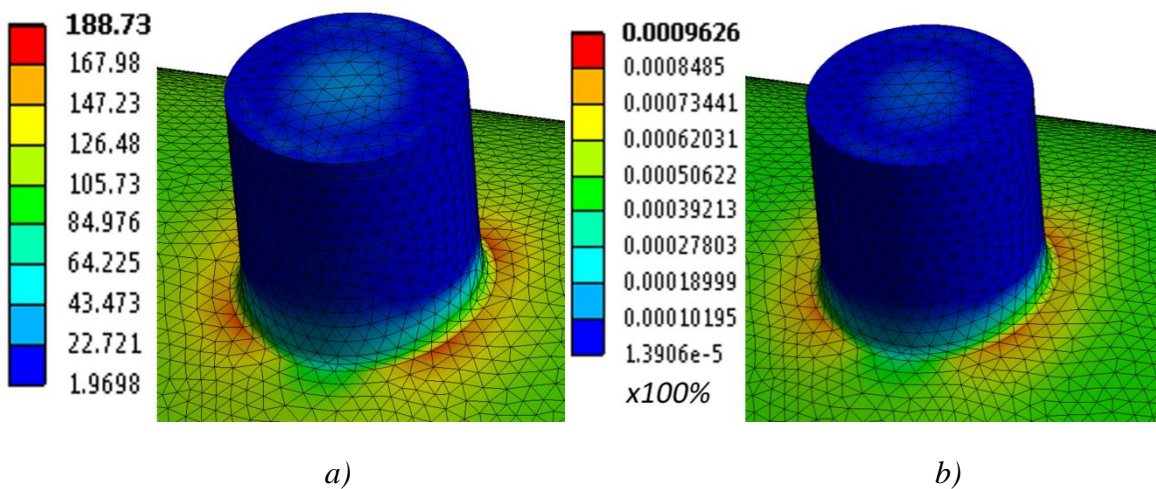
Faktor koncentracije napona na mestu spoja priključka 1 i cilindričnog omotača, (slika 8.1.a) na mestu geometrijskog diskontinuiteta iznosi 2,16, a na spoju priključka 2 i cilindričnog omotača iznosi 1,7.

Za merno mesto 2, s obzirom da su dimenzije priključaka iste, koncentracija napona je simetrična uz priključke pa faktor koncentracije iznosi 2,2, (slika 8.1.b).

Nakon verifikacije numeričkog modela posude, izvršen je proračun za istu cilindričnu posudu, iste geometrije, sa jednim priključkom dimenzija DN 50, (slika 8.2.). Vrednosti napona i deformacija u okolini priključka, za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 1 MPa, su prikazani na slici 8.3.



Slika 8.2. Model posude sa jednim priključkom DN 50



Slika 8.2. Rezultati numeričkog proračuna za posudu sa jednim priključkom: a) naponi; b) deformacije



Najveće vrednosti Mizesovih napona u okolini priključka iznose 180 MPa, a vrednost napona na omotaču gde nema uticaja priključka iznosi oko 105 MPa. Faktor koncentracije napona u ovom slučaju je manji i iznosi 1,7.

### *8.5. Diskusija osnovnih naučnih ciljeva disertacije*

Osnovni naučni cilj doktorske disertacije je bio da se izvrši analiza međusobnog uticaja dva priključka na naponsko - deformaciono polje cilindričnog omotača posude pod pritiskom, kao i da se pokaže da je moguće sistematsko ispitivanje polja deformacija na posudama pod pritiskom 3D optičkom beskontaktnom metodom. U poglavlju 7 su predstavljeni rezultati eksperimentalnih merenja deformacija za slučaj opterećenja posude unutrašnjim pritiskom, za prethodno definisana dva merna mesta.

Merno mesto 1 je definisano tako da obuhvata deo omotača između dva priključka različitih dimenzija, a merno mesto 2 obuhvata polje između dva priključka istih dimenzija. U dosadašnjim istraživanjima, većina autora se bavila analizom uticaja jednog priključka na omotač posude pod pritiskom. Eksperimentalni rezultati su se prikazivali lokalno, tj. dobijene su vrednosti u jednoj tački.

U okviru ove disertacije prikazane su eksperimentalno izmerene vrednosti deformacija, odnosno cela polja deformacija između priključaka, primenom 3D beskontaktno optičke metode.

Vrednosti deformacija i napona, cele posude pod pritiskom, kao i na omotaču između priključaka i u njihovoj okolini, za opterećenje unutrašnjim pritiskom, dobijene metodom konačnih elemenata prikazane su u poglavlju 4. Proračunom, kao i eksperimentalnim merenjem pokazano je da za vrednost unutrašnjeg pritiska od 1 MPa materijal posude se ponaša u granicama elastičnosti, a najveći naponi se javljaju u okolini spoja priključka i omotača. Kako je metodom konačnih elemenata izvršena analiza u oblasti elastičnosti, do vrednosti opterećenja od 1 MPa, ekstrapolacijom se mogu odrediti vrednosti napona za druge vrednosti unutrašnjeg pritiska.

Za opterećenje pritiskom od 1,5 MPa, a na osnovu dijagrama napon – deformacija, dobijenog nakon ispitivanja na zatezanje za materijal posude X5 CrNi 18 10, urađena je

nelinearna numerička analiza modela. Dobijeni rezultati su pokazali da su vrednosti ekvivalentnih napona od radnog opterećenja vrlo bliski vrednosti napona tečenja. Nakon detaljne analize komponentnih napona, došlo se do zaključka da je kod posuda pod pritiskom, jedan komponentni napon uvek veći od ekvivalentnog, pa je na još jedan način potvrđeno da je do vrednosti pritiska od 1 MPa, materijal posude u elastičnoj zoni.

Najveće Misesove deformacije se javljaju na mestima najvećih koncentracija napona, odnosno na spoju priključka i omotača. Dobijeni rezultati numeričkom metodom su poređeni sa rezultatima eksperimentalnih merenja i pokazali su vrlo dobro slaganje.

#### *8.6. Pravci daljih istraživanja*

Posude pod pritiskom su u toku eksploatacije izložene različitim vrstama opterećenja. U okviru ove disertacije sprovedena je analiza uticaja dva priključka na napone i deformacije cilindričnog omotača posude pod pritiskom, opterećene unutrašnjem pritisku. U nastavku istraživanja potrebno je analizirati ponašanje omotača posude pod pritiskom, izložene i drugim vrstama opterećenja (dinamičkim i statičkim).

Geometrijski diskontinuitet analiziran u ovom radu predstavlja spoj dva cilindra različitih debljina. Na cilindrični omotač jedne posude postavljeni su priključci u vidu cilindričnih cevi različitih dimenzija. Primere diskontinuiteta koje treba analizirati u daljim istraživanjima su spojevi cilindar/sfera, cilindar/konus i dr.

Zavareni spojevi, takođe predstavljaju izvor koncentracije napona, tako da je u daljim istraživanjima potrebno obratiti pažnju na promene koje se dešavaju u samom zavarenom spoju, kao i uticaj zavarenog spoja na naponsko polje.

## 9. ZAKLJUČAK

Ova doktorska disertacija je obuhvatila analizu uticaja dva priključka na napone i deformacije posude pod pritiskom izložene unutrašnjem pritisku. Na osnovu polazne hipoteze, koja se odnosi na mogućnost ispitivanja celih polja deformacija na cilindričnom omotaču posude 3D optičkom beskontaktnom metodom, obavljena su eksperimentalna istraživanja na jednoj posudi na koju su postavljena četiri priključka. Priključci su postavljeni na minimalno dozvoljena rastojanja određena prema referentnom standardu. Na jednoj strani omotača analiziran je uticaj dva priključka različitih dimenzija, na napone i deformacije na cilindričnom omotaču između priključaka i u njihovoj okolini. Sa druge strane omotača pod uglom od  $180^\circ$  analiziran je uticaj dva priključka istih dimenzija.

Analitički proračun čvrstoće je sproveden prema standardu SRPS EN 13445:2010. Objasnjen je tok proračuna i prikazano je karakteristično polje uticaja priključaka na cilindrični omotač.

Definisana je procedura merenja i način rada sistema za 3D optičko merenje deformacija. U okviru procedure su detaljno razvijeni koraci koji obuhvataju hardversku i softversku pripremu, kalibraciju sistema kao i način obrade rezultata. Takođe su prikazane i metode za proračun deformacija u okviru optičkog sistema.

Pokazana je i opisana eksperimentalna instalacija, radni parametri, opterećenja i postupak merenja. Definisana su dva merna mesta na kojima je sprovedena eksperimentalna analiza. Eksperimentalni rezultati merenja Mizesovih deformacija prikazani su korišćenjem slika i dijagrama za svako merno polje i definisane linijske preseke.

Obrada eksperimentalnih rezultata sprovedena je metodama statističke analize, u cilju utvrđivanja relevantnih funkcionalnih zavisnosti posmatranih veličina i dobijanja dijagrama. Dobijeni podaci eksperimentalnim putem opisani su odgovarajućim analitičkim obrascem, pri čemu je izvršena obrada rezultata na osnovu ispitivanja velikog broja regresionih modela.

MKE analiza je sprovedena u dva koraka. U prvom koraku je korišćena linearno statička analiza za vrednosti unutrašnjeg pritiska od 0,5 MPa i 1 MPa. Dobijene vrednosti

ekvivalentnih Mizesovih napona su manje od napona tečenja i pokazuju da se materijal posude ponaša u granicama elastičnosti. Na osnovu analitičkog proračuna, pretpostavljeno je da će pri opterećenju od 1,5 MPa vrednosti napona da budu bliske naponu tečenja, pa je izvršena nelinearna numerička analiza. Na osnovu podataka dobijenih ispitivanjem na zatezanje, uzorka materijala predmetne posude, izvršena je nelinearna analiza 3D modela posude pod pritiskom.

Za MKE analizu su postavljeni isti parametri i isti granični uslovi koji su korišćeni u toku eksperimentalnih merenja, radi poredivosti rezultata i verifikacije numeričkog modela.

Analizom dobijenih rezultata na verifikovanom numeričkom modelu potvrđeno je da je moguće odrediti karakteristične vrednosti faktora koncentracije napona numeričkim proračunima na trodimenzionalnom modelu.

Na osnovu urađenih teorijskih, numeričkih i eksperimentalnih istraživanja, moguće je izvesti sledeće zaključke:

- 3D beskontaktnu metodu za merenje deformacija, zasnovanu na metodi korelacije digitalnih slika je moguće primeniti na posude pod pritiskom sa priključcima. Korišćenjem eksperimentalne metode koja ne zavisi od vrste materijala i od geometrije, može se unaprediti znanje o ponašanju struktura izloženih različitim vrstama opterećenja.
- Primenom 3D metode za merenje celih polja deformacija između priključaka, pokazano je za oba merna mesta da se najveće vrednosti deformacija i napona ne javljaju između priključaka na najkraćem rastojanju, što bi bilo očekivano. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija i napona su pomerene i javljaju se u okolini spoja i priključka pod uglom približno od  $45^\circ$  u odnosu na izvodnicu cilindričnog omotača koja se seče sa osama oba priključka.
- Kombinovanim eksperimentalnim i numeričkim pristupom analize rezultata, verifikovan je numerički model posude, na kojem je moguće dalje izvršiti usloznavanja problema i simulacije.

- Kroz eksperimentalnu i numeričku analizu pokazano je da se minimalne deformacije i naponi javljaju u zoni između priključaka, odnosno pokazalo se da je tu materijal ukrućen uticajem dva priključka koji se nalaze na jednoj izvodnici cilindričnog omotača.
- U slučaju kada su na omotač postavljena dva priključka različitih dimenzija (MM1), pokazano je da se faktor koncentracije napona smanjuje, usled razlike u geometriji priključka.
- Zavisnost deformacija od dužine karakterističnog preseka za definisana merna mesta, opisana je polinomnom funkcijom četvrtog reda sa promenljivim koeficijentima. Na ovaj način je moguće odrediti vrednost Mizesove deformacije za bilo koju tačku na preseku.
- U okviru ove disertacije pokazano je da je postupak merenja primenom trodimenzionalne optičke analize, jednostavniji, brži i lakši od postupaka koji su do sada korišćeni.
- Pokazano je zadovoljavajuće slaganje rezultata eksperimentalnih istraživanja i numeričkih proračuna .

Ostvareni naučni doprinos doktorske disertacije:

- Detaljno su analizirana i objašnjena polja deformacija i napona na posudi pod pritiskom sa priključcima, izložene unutrašnjem pritisku. Posebno treba istaći da su eksperimentalno izmerene vrednosti deformacija na delu cilindričnog omotača koji se nalazi između priključaka, što je dosadašnjim eksperimentalnim metodama bilo teže, a i nema puno podataka u dostupnoj literaturi.
- Definisana je i utvrđena metodologija ispitivanja, odnosno sistem procedura koja uključuje primenu trodimenzionalne optičke analize za dobijanje celih polja deformacija na posudi pod pritiskom, u toku opterećivanja.
- Za karakteristične preseke koji obuhvataju maksimalne vrednosti Mizesovih deformacija regresionom analizom određena je funkcionalna zavisnost deformacije i dužine karakterističnog preseka.

- Definisan je postupak za izračunavanje deformacija i napona, izračunavanje maksimalnih vrednosti deformacija i napona, kao i položaja maksimalnih vrednosti na cilindričnim omotačima sa priključcima. Utvrđena su kritična mesta za koja su izračunate vrednosti faktora koncentracije napona.
- Razvijen je originalni trodimenzionalni numerički model posude pod pritiskom i upotrebom odgovarajućeg MKE softvera, dobijeni su i objašnjeni rezultati ponašanja omotača na koji su postavljeni priključci različite geometrije pod dejstvom opterećenja.
- Trodimenzionalni numerički model verifikovan je uporednom analizom sa eksperimentalnim rezultatima, primenom verifikovanih numeričkih modela izvršena je analiza napona.
- Razvijanje novih procedura ispitivanja i njihova primena na analizu deformacija, pomeranja, i napona opreme pod pritiskom, doprinose povećanju pouzdanosti opreme, uštedi materijala kao i energije utrošene na proizvodnju opreme pod pritiskom, što neposredno utiče i na nižu cenu, a samim tim i na povećanje konkurentnosti na tržištu.

## 10. LITERATURA

- [1] Mitrović, N.: Naponi i deformacije struktura kompleksne geometrije cevovodne armature, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, Beograd, 2013.
- [2] \*\*\*: SRPS EN 13445: 2009. Posude pod pritiskom koje nisu izložene plamenu,
- [3] Petrović, A.: Određivanje napona u cilindričnim omotačima posuda pod pritiskom izazvanih lokalnim opterećenjima, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, Beograd, 2000.
- [4] Živković, M., Maneski, T.: Termomehanički naponi cevovoda i posuda, SMEITS, Beograd, 2006.
- [5] Spence, J., Nash, D.H.: Milestones in pressure vessel technology, International Journal of Pressure Vessel and Piping, vol. 81, str. 89 – 118, 2004.
- [6] Eringen, A. C., Naghdi, A.K., Mahmood, S.S., Thiel, C.C., and Ariman, T.: Stress Concentrations in Two Normally Intersecting Cylindrical Shells Subject to Internal Pressure, Welding Research Council Bulletin, No. 139, 1969.
- [7] Lekkerkerker, J.G.: The Determination of Elastic Stresses Near Cylinder-to-Cylinder Intersection, Nuclear Engineering Design, vol. 20, str. 57 – 84, 1972.
- [8] Qian, L.X., Tang, X.J., Zhong, W.X., Chen, H.R.: General solution of cylindrical shells with a cut – out, J, Dalian Institut of Technology, vol. 3-4, str. 1- 23, 1965.
- [9] Xue, M.D., Chen, W., Hwang, K.C.: Stresses at the intersection of two cylindrical shells, Nuclear Engineering and Design, vol. 154, str. 231 – 238, 1995.
- [10] Xue, M.D., Du, Q.H., Hwang, K.C., Xiang, Z.H.: An analytical Method for Cylindrical Shells With Nozzles Due to Internal Pressure and External Loads – Part 1: Theoretical Foundation, Journal of Presser Vessel Technology, vol. 132, str. 031206-1-9, 2010.
- [11] Xue, M.D., Du, Q.H., Hwang, K.C., Xiang, Z.H.: An analytical Method for Cylindrical Shells With Nozzles Due to Internal Pressure and External Loads – Part 2: Design Method, Journal of Presser Vessel Technology, vol. 132, str. 031207-1-8, 2010.

- [12] Xue, M.D., Li, D.F., Hwang, K.C.: Analytical solution of two intersecting cylindrical shells subjected to transverse moment on nozzle, *International Journal of Solid and Structures*, vol. 41, str. 6949 – 6962, 2004.
- [13] Xue, M.D., Li, D.F., Hwang, K.C.: Theoretical stress analysis of intersecting cylindrical shells subjected to external loads transmitted through branch pipes, *International Journal of Solid and Structures*, vol. 42, str. 3299 – 3319, 2005.
- [14] Skopinsky, V.N.: Numerical Stress Analysis of Intersecting Cylindrical shells, *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 115, str. 275 – 282, 1993.
- [15] Skopinsky, V.N.: Stress analysis of nonradial cylindrical shell intersections subjected to external loading, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 67, str. 145 – 153, 1996.
- [16] Narale, P., Kachare, P.S.: Structural Analysis of Nozzle Attacment on Pressure Vessel Design, *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol.2, br. 4, str. 1353 – 1358, 2012.
- [17] Leckie, F.A., Penny, R.K.: Stress concentration factors for the stresses at nozzle intersection in pressure vessels, *Welding Research Council Bulletin*, no. 90, 1963,
- [18] Dekker, C.J., Stikvoort, W.J.: Pressure stress intensity at nozzles on cylindrical vessels: a comparison of calculation methods, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 74, str. 121 – 128, 1997.
- [19] Dekker, C.J.: Comparison of local load stress calculation methods for nozzles on cylinders, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 58, str. 203 – 213, 1994.
- [20] Dekker, C.J., Bos H.J.: Nozzles – on external loads and internal pressure, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 72, str. 1 – 18, 1997.
- [21] Liu, Y.H., Zhang, B.S., Xue, M.D., Liu, Y.Q.: Limit pressure and design criterion of cylindrical pressure vessels with nozzles, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 81, str. 619 – 624, 2004.
- [22] Qadir, M., Redekop, D.: SCF analysis of pressurized vessel – nozzle intersection with wall thinning damage, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 86, str. 541 – 549, 2009.



- [23] Lathuef, S.A., Sekhar, K.C.: Design and Structural Analysis of Pressure Vessel Due to Change of Nozzle Location and Shell Thickness, *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, vol. I, str. 218 – 221, 2012.
- [24] Nabhani, F., Ladokun, T., Askari, V.: Reduction of Stresses in Cylindrical Pressure Vessel Using Finite Element Analysis, *Finite Element Analysis – From Biomedical Applications to Industrial Developments*, 2012.
- [25] Petrovic, A.: Stress analysis in cylindrical pressure vessels with loads applied to the free end of a nozzle, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 78, str. 485 – 493, 2001.
- [26] Maghrabi, S.H., Mulkutkar, M.M., Shetty, K., Aquil, M.: Elastic Behavior of Cylindrical Vessels with Lateral Nozzle Under Internal Pressure, *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 2, str. 1029 – 1034, 2012.
- [27] Petrovic, A., Balac, M., Jovovic, A., Dedic, A.: Oblique nozzle loaded by the torque moment – stress state in the cylindrical shells on the pressure vessel, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 226, str. 567 – 575, 2012.
- [28] Patel, D.M., Kumar, B.: Limit load estimation of cylindrical vessel with oblique nozzle, *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 2, str. 2421 – 2427, 2013.
- [29] Skopinsky, V.N.: Comparative study of reinforced nozzle connections, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 180, str. 175 – 179, 1998.
- [30] Skopinsky, V.N., Smetakin, A.B.: Parametric study of reinforcement of pressure vessel head with offset nozzle, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 80, str. 333 – 343, 2003.
- [31] Kharat, A.R., Kadam, S.J., Bhosale, S.G.: Study of different type reinforcement in cylindrical pressure vessel, *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 2, str. 3178 – 3181, 2013.
- [32] Fang, J., Tang, Q.H., Sang, Z.F.: A comparative study of usefulness for pad reinforcement in cylindrical vessels under external load on nozzle, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 86, str. 273 – 279, 2009.

- [33] Sang, Z.F., Xue, L.P., Lin, Y.J., Widera, G.E.O.: Limit and burst pressures for a cylindrical shell intersection with intermediate diameter ratio, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 79, str. 341 – 349, 2002.
- [34] Kim, Y.J., Myeong, M.S., Yoon, K.B.: Effect of reinforcement on plastic limit loads of branch junctions, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 86, str. 508 – 516, 2009.
- [35] Sang, Z.F., Wang, Z.L., Xue, L.P., Widera, G.E.J.: Plastic limit loads of nozzles in cylindrical vessels under out of plane moment loading, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 82, 638 – 648, 2005.
- [36] Wu, B.H.: 3D Nonlinear Finite Element Plastic Analysis of Cylindrical Vessels Under In Plane Moment, *Finite Element Analysis – Applications in Mechanical Engineering*, Chapter 5, str. 115 – 130, 2012.
- [37] Liu, P.F., Zheng, J.Y., Ma, L., Miao, C.J., Wu, L.L.: Calculations of plastic collapse load of pressure vessel using FEA, *Journal of Zhang University SCIENCE A*, vol. 9, no. 7, str. 900 – 906, 2008.
- [38] Peters, W.H., Ranson, W.: *Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis*, vol. 21, str. 427 – 431, 1982.
- [39] Chu, T.C., Ranson, W.F., Sutton, M.A., Peters, W.H.: Applications of Digital Image Correlation Techniques to Experimental Mechanics, *Experimental Mechanics*, vol. 25, 232, 1985.
- [40] Sutton, M.A., Cheng, M., McNeill, S.R., Chao, Y.J., Peters, W.H.: Application of an Optimized Digital Correlation Method to Planar Deformation Analysis, *Image and Vision Computing*, vol. 4, str. 143 – 150, 1986.
- [41] Helm, D.J., McNeil, S.R., Sutton, M.A.: Improved three – dimensional image correlation for surface displacement measurement, *Optical Engineering*, vol. 35, no.7, str. 1911-1920, 1996.
- [42] Sutton, M.A., McNeill, S.R., Helm, J.D., Chao, Y.J.: Advances in Two – Dimensional and Three – Dimensional Computer Vision, *Photomechanics*, vol. 77, str. 323 – 372, 2000.

- [43] Pan, B., Qian, K., Xie, H., Asundi, A.: Two – dimensional digital image correlation for in – plane displacement and strain measurement: a review, *Measurement Science and Technology*, vol. 20, str. 062001 – 0620018, 2009.
- [44] Besnard, G., Leclerc, H., Hild, F., Roux, S., Swiergiel, N.: Analysis of Image Series Through Global Digital Image Correlation, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 47, str. 214 – 288, 2012.
- [45] Orteu, J.J.: 3 – D computer vision in experimental mechanics, *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 47, 282 – 291, 2009.
- [46] Reu, P.: Introduction to Digital Image Correlation: Best Practice and Applications, *Experimental Techniques*, vol. 36, str. 28 – 31, 2012.
- [47] Sedmak, A., Milosevic, M., Mitrovic, N., Petrovic, A., Maneski, T.: Digital image correlation in experimental mechanical analysis, *Structural Integrity and life*, vol. 12, str. 39 – 42, 2012.
- [48] Mitrovic, N., Milosevic, M., Momcilovic, N., Sedmak, A., Petrovic, A., Maneski, T.: Experimental - digital image correlation method and numerical simulation of standard globe valve housing, *DAS 2011 – 28th Danubia – Adria – Symposium on Advances in Experimental Mechanics*, str. 103 – 104, 2011.
- [49] Maneski, T., Milošević, M., Mitrović, N.: Mogućnosti primene optičkih merenja deformacija u procesnoj tehnici, *Procesing 2009 – 22 kongres o procesnoj industriji*, Beograd, 2009.
- [50] Mitrovic, N., Milosevic, M., Momcilovic, N., Petrovic, A., Sedmak, A., Maneski, T., Zrilic, M.: Experimental and numerical analysis of local mechanical properties of globe valve housing, *Chemicke Listy 106*, str. 491 – 494, 2012.
- [51] Milosevic, M., Mitrovic, N., Jovicic, R., Sedmak, A., Maneski, T., Petrovic, A., Aburuga, T.: Measurement of local tensile properties of welded joint using Digital Image Correlation Method, *Chemickie Listy 106*, str. 485 – 488, 2012.
- [52] Mitrovic, N., Milosevic, M., Colic, K., Hut, I., Tanasic, I., Petrovic, A., Sedmak, A.: Use of non – contact stereometric system to measure mechanical properties of biomaterials, *Yucomat 2010 – twelfth annual conference*, 95, 2010.

- [53] Manojlovic, D., Miletic, V., Milosevic, M., Mitrovic, N., Dzindo, E., Sedmak, A.: Non – contact optical 3D deformation measurement of polymerization shrinkage of resin – based composites using digital image correlation, Yucomat 2010 – twelfth annual conference, 2010.
- [54] Milosevic, M., Mitrovic, N., Sedmak, A.: Digital Image Correlation Analysis of Biomaterials, 15th IEEE International Conference on Intelligent Engineering System, str. 421 – 425, 2011.
- [55] Milosevic, M., Mitrovic, N., Tanasic, I., Ezdenci, A., Tihacek, Lj., Maneski, T., Colic, K.: 3D strain analysis of restored lower jaw with total denture using optical measuring system, DAS 2011 – 28th Danubia – Adria – Symposium on Advances in Experimental Mechanics, str. 101 – 102, 2011.
- [56] Miletic, V., Manojlovic, D., Savic, T., Milosevic, M., Mitrovic, N.: Digital image correlation study on polymerization shrinkage of resin – based composites, Journal of Dental Research, 2011.
- [57] Mitrovic, N., Milosevic, M., Sedmak, A., Petrovic, A., Prokic- Cvetkovic, R.: Application and Mode of Operation of Non – Contact Stereometric measuring System of Biomaterials, FME Transaction, vol. 39, str. 55 – 60, 2011,
- [58] Miletic, V., Manojlovic, D., Milosevic, M., Mitrovic, N., Stankovic, T.S., Maneski, T.: Analysis of local shrinkage patterns of self – adhering and flowable composites using 3D digital image correlation, Quintessence International, vol. 42, str. 797 – 804, 2011.
- [59] Tihacek, Lj., Lemic, A., I. Tanasic, N. Mitrovic, M. Milosevic, A. Petrovic.: Compressive strains and displacement in a partially dental lower jaw rehabilitated with two different treatment modalities. Gerodontology, **29** (2): str. 851-857, 2012.
- [60] Meng, L.B., Jin, G.C., Yao, X.F., Yeh, H.Y.: 3D full field deformation monitoring of fiber composite pressure vessel using 3D digital speckle correlation method, Polymer Testing, vol. 25, str. 42 – 48, 2006.
- [61] Li , J.Y., Lau, A., Fok, A.S.L.: Application of digital image correlation to full – field measurement of shrinkage strain of dental composites, Journal of Zhejiang University – Science A, vol. 14, no.1, str. 1 – 10, 2013.

- [62] Rayan, V.P., Rossol, M.N., Zok, F.W.: Optimization of Digital Image Correlation for High Resolution Strain Mapping of Ceramic Composites, *Experimental Mechanics*, vol. 52, str. 1407 – 1421, 2012.
- [63] Moser, R., Lightner III, J.G.: Using three – dimensional digital imaging techniques to validate tire finite element method, *Experimental Techniques*, vol. 31, str. 29 – 36, 2007.
- [64] Tung, S.H., Shih, M.H., Kuoc, J.C.: Application of digital image correlation for anisotropic plastic deformation during tensile testing, *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 48, str. 636 – 641, 2010.
- [65] Sutton, M.A.: Computer Vision Based, Noncontacting Deformation Measurements in Mechanics: A Generational Transformation, *Applied Mechanics Reviews*, vol. 65, str. 050000-1 – 23, 2013.
- [66] Revilock, D.M., Thesken, J.C., Schmidt, T.E., Forsythe, B.S.: 3D Digital Image Correlation of a Composite Overwrapped Pressure Vessel During Hydrostatic Pressure Tests, *Proceedings of the 2007 SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, Springfield, MA, 2007.
- [67] Tung, S.H., Sui, C.H.: Applicatin of digital – image correlation techniques in analysing cracked cyindrical pipes, *Sadhana*, vol. 35, str. 557 – 567, 2010.
- [68] Kawabayashi, H., Matsuda, H., Zhao, C., Konzuma, H., Yamashita, T.: Modeling cylindrical shell with initial imperfections by using optical method, *The fifth China – Japan Joint Seminar for the Graduate Students in China Engineering*, Shanghai, China, str. 181 – 186, 2008.
- [69] Lu, H., Vendroux, G., Knauss, W.G.: Surface Deformation Measurement of a Cylindrical Specimen by Digital Image Correlation, *Experimental Mechanics*, vol. 37, str. 433 – 439, 1997.
- [70] Zhao, C., Matsuda, H., Lou, S., Guan, Z.C., Tian, J.S.: Visualization of Buckling on Thin – Walled Cylindrical Shell by Digital Image Correlation Method, *Applied Mathematics & Information Sciences, An International Journal*, vol.7, no. 3, str. 999-1004, 2013.

- [71] Clough, R.W.: The Finite Element Method in Plane Stress Analysis, Proceedings of 2nd ASCE Conference on Electronic Computation, Pittsburgh, PA, 1960.
- [72] Zienkiewicz, O.C., Cheung, Y.K.: The Finite Element Method in Continuum and Structural Mechanics, McGraw Hill, 1967.
- [73] Balac, I., Grbovic, A.: Primeri primene MKE u stomatologiji, 16. Poglavlje u naučnoj monografiji Stomatološki materijali, knjiga 2, str. 351 – 370, Stomatološki fakultet Beograd, 2012.
- [74] Reddy, J. N.: An Introduction to the Finite Element Method, McGraw-Hill: New York, 2005.
- [75] Hutton, D. V.: Fundamentals of Finite Element Analysis, Mc Graw Hill, 2004.
- [76] \*\*\*,[;www.ansys.com](http://www.ansys.com)
- [77] \*\*\*,[; www.gom.com](http://www.gom.com)

**BIOGRAFSKI PODACI AUTORA**

Martina Balać, devojjačko prezime Bogner, rođena je 4. marta 1978. godine u Beogradu. Osnovnu školu Stevan Dukić i XIV beogradsku gimnaziju završila je u Beogradu, sa odličnim uspehom. Diplomirala je 2002. godine na Univerzitetu u Beogradu, na Mašinskom fakultetu, na Katedri za Hidroenergetiku, sa prosečnom ocenom 8,54 (osam i 54/100). Odbranila je diplomski rad sa ocenom 10 (deset) na temu "Sadržaj i izgled glavnog mašinskog projekta pumpne stanice". Nakon završenih studija zaposlila se u Zavodu za zavarivanje a.d. u Beogradu. U maju 2004. godine položila je stručni ispit iz oblasti investicione izgradnje, a 2006. godine dobila licencu Inženjerske komore Srbije. U februaru 2005. godine položila je ispit za međunarodnog inženjera za zavarivanje (IWE).

Doktorske studije upisala je na Univerzitetu u Beogradu, na Mašinskom fakultetu 2005. godine. Zaposlena je u zvanju istraživač – saradnik od 2010. godine na Katedri za procesnu tehniku. Angažovana je u izvođenju nastave iz predmeta Cevovodi i armatura i Konstruisanje procesne opreme, na Mašinskom fakultetu. Uspešno je završila nekoliko kurseva stručnog usavršavanja.

U dosadašnjem stručnom i istraživačkom radu učestvovala je u više nacionalnih projekata finansiranih od strane Ministarstva za nauku, kao i u međunarodnom FP6 projektu. Takođe, učestvovala je na više od 10 projekata izrade tehničke dokumentacije, izrade glavnih mašinskih projekata, studija opravdanosti i idejnih projekata, nostrifikaciji glavnih projekata kao i tehničkoj kontroli dokumentacije.

Tečno govori engleski jezik, a na osnovnom nivou vlada italijanskim i ruskim jezikom.

Autor je i koautor na više od 20 stručnih radova koji su saopšteni na naučnim skupovima ili objavljeni u časopisima različitih kategorija. Koautor je na četiri stručne knjige.

---

Прилог 1.

**Изјава о ауторству**

Потписана Мартина М. Балаћ

број индекса D38/05

**Изјављујем**

да је докторска дисертација под насловом

**МЕЂУСОБНИ УТИЦАЈ ПРИКЉУЧАКА НА СТАЊЕ НАПОНА И ДЕФОРМАЦИЈА  
НА ЦИЛИНДРИЧНОМ ОМОТАЧУ ПОСУДЕ ПОД ПРИТИСКОМ**

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршила ауторска права и користила интелектуалну својину других лица.

**Потпис докторанда**

У Београду, 11.06.2014.

M. Balic



---

Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада**

Име и презиме аутора Мартина М. Балаћ

Број индекса D38/05

Студијски програм

Наслов рада МЕЂУСОБНИ УТИЦАЈ ПРИКЉУЧАКА НА СТАЊЕ НАПОНА И ДЕФОРМАЦИЈА НА ЦИЛИНДРИЧНОМ ОМОТАЧУ ПОСУДЕ ПОД ПРИТИСКОМ

Ментор проф. др Александар Петровић

Потписана Мартина М. Балаћ

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предала за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис докторанда**

У Београду, 11.06.2014.



---

---

Прилог 3.

**Изјава о коришћењу**

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

МЕЂУСОБНИ УТИЦАЈ ПРИКЉУЧАКА НА СТАЊЕ НАПОНА И ДЕФОРМАЦИЈА НА ЦИЛИНДРИЧНОМ ОМОТАЧУ ПОСУДЕ ПОД ПРИТИСКОМ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предала сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучила.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

**Потпис докторанда**

У Београду, 11.06.2014.



---

---

1. Ауторство - Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.