

UNIVERZITET U BEOGRADU

MAŠINSKI FAKULTET

Nenad R. Mitrović

**NAPONI I DEFORMACIJE STRUKTURA
KOMPLEKSNE GEOMETRIJE
CEVOVODNE ARMATURE**

doktorska disertacija

Beograd, 2013

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Nenad R. Mitrovic

**STRESSES AND STRAINS OF
GEOMETRICALLY COMPLEX
STRUCTURES OF PIPELINE FITTINGS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013

Mentor doktorske disertacije

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

Članovi komisije za odbranu doktorske disertacije:

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

Dr Srbislav Genić, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

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

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

Datum odbrane:

10.05.2013.

PREDGOVOR

Ovaj rad je nastao nakon višegodišnjeg istraživanja na projektima finansiranim od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Republike Srbije, a pre svega tokom rada na projektima “Razvoj savremenih metoda dijagnostike i ispitivanja mašinskih struktura”, pod evidencionim brojem TR 35040 i „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 nesebičnom zalaganju, podršci, brojnim korisnim savetima i primedbama koji su vešto usmeravali moj naučni rad i uticali na kvalitet ove disertacije. Zahvaljujem se prof. dr Tašku Maneskom na veoma korisnim savetima i podršci koja je u ovoj disertaciji bila od presudnog značaja. Takođe, zahvaljujem se prof. dr Aleksandru Sedmaku, prof. dr Srbislavu Geniću i prof. dr Miloradu Zriliću, koji su doprineli da ova disertacija bude sadržajnije i preglednija.

Zahvalnost za stručnu i kolegijalnu pomoć dugujem kolegama Milošu Miloševiću, as. Nikoli Momčiloviću i as. Žarku Miškoviću.

Zahvaljujem se svojim roditeljima, Snežani i Radivoju, i svom bratu Nemanji koji su bezrezervno bili tu za mene, na pravi način i u pravo vreme dali vetra u leđa, kada god je trebalo bodrili i podržavali da istrajem do kraja.

Mojoj Aleksandri, hvala na ljubavi, strpljenju i pomoći koju je pružala za vreme izrade ove disertacije, njen osmeh i zagrljaj uklanjao je sve poteškoće na ovom putu.

Autor

**NAPONI I DEFORMACIJE STRUKTURA KOMPLEKSNE GEOMETRIJE
CEVOVODNE ARMATURE**

Rezime:

Dosadašnja istraživanja u oblasti opreme pod pritiskom, odnosno merenja i određivanja napona i deformacija struktura kompleksne geometrije su se oslanjala na analitičke proračune najčešće bazirane na teoriji ljuski, numeričke proračune upotrebom računarskih softvera i konvencionalne eksperimentalne metode. Kao jedan od najčešćih zaključaka u svojim radovima, istraživači su naveli nepostojanje adekvatnih eksperimentalnih rezultata u postojećoj literaturi, odnosno iskazali potrebu za detaljnom eksperimentalnom analizom kritičnih mesta za koje nije moguće precizno odrediti veličine pomeranja, deformacija ili napona upotrebom analitičkih obrazaca ili numeričkih modela.

Ograničenja korišćenih eksperimentalnih metoda su se ogledala u više aspekata. Prvo, za analizu geometrijskih diskontinuiteta, najčešće su korišćene standardizovane epruvete sa pripremljenim diskontinuitetima i ispitivane na zatezanje. Na osnovu dobijenih rezultata su pravljene dijagrami sa faktorima koncentracije napona, koji su kasnije primenjivani na probleme geometrijski kompleksnih struktura. Ovakav pristup je davao samo okvirna rešenja, koja nisu bila dovoljno precizna i tačna. Drugo, eksperimenti su sprovedeni konvencionalnim metodama. Ograničenje konvencionalnih metoda je lokalno merenje, odnosno dobijanje vrednosti merenih veličina samo u jednoj tački. Treće, merenja su vršena samo u blizini geometrijskih diskontinuiteta, a ne na samim spojevima geometrijskih oblika, tako da nije bilo moguće merenje najvećih vrednosti deformacija.

Jedan od ciljeva ove teze je upravo taj da prevaziđe navedene eksperimentalne probleme, odnosno da pokaže da je moguće primeniti relativno novu metodu digitalne korelacije slika na slučajeve ispitivanja struktura kompleksne geometrije u oblasti cevovodne armature. Metoda korelacije digitalnih slika, prevazilazi ograničenja metode mernih traka, kao najčešće korišćene konvencionalne metode i omogućava merenje

celih polja pomeranja i deformacija. Jednim eksperimentalnim merenjem se dobija veliki broj podataka koja zamenjuje više desetina/stotina mernih traka i značajno smanjuje vreme pripreme eksperimenta, a samim tim i troškove. S druge strane, kako se metodom konačnih elemenata dobija kompletno polje pomeranja i deformacija, sama verifikacija numeričkog modela mnogo jednostavnije sprovodi poređenjem sa rezultatima koji su predstavljeni na isti način. Eksperimentalno merenje celih polja deformacija omogućuje precizno određivanje mesta kritičnih, odnosno najvećih deformacija, kao i pravce glavnih deformacija koje omogućava bolju teorijsku analizu kompleksnih struktura.

Numerički proračunski model je izrađen spajanjem karakterističnih poprečnih preseka ispitivanih kućišta ventila. Numerički proračuni urađeni su u softverskom paketu za proračun metodom konačnih elemenata – ABAQUS. Metoda konačnih elemenata je odabrana kao metod u ovom istraživanju zato što je pomoću MKE moguće opisati šta se dešava u određenoj zoni geometrijskih diskontinuiteta koja nije dostupna za snimanje, tj. analizirani su naponi koji se javljaju kako na definisanim mernim mestima, tako i na mestima koja nisu obuhvaćena eksperimentalnom analizom.

Struktura kompleksne geometrije na kojoj je izvršeno ispitivanje u okviru doktorske disertacije je kućište ravnog zapornog ventila. Eksperimentalno istraživanje je sprovedeno na tri ravna zaporna ventila DN32, PN6 i to za dva slučaja opterećenja: opterećenje unutrašnjim pritiskom do 30 bar i aksijalnom silom od 30 kN koja deluje u pravcu ose ventila (sabijanje). Eksperiment je izvršen na četiri merna mesta koja se nalaze na karakterističnim pozicijama na kućištu ventila. Za sva četiri merna mesta su prikazane eksperimentalne vrednosti polja pomeranja i deformacija. Za određivanje polja deformacija i pomeranja korišćena je oprema za trodimenzionalno merenje deformacija i softverski sistem Aramis, proizvođača GOM. Sistem za 3D optičko merenje pomeranja i deformacija je baziran na metodi digitalne korelacije slika. Sistem omogućava 3D grafičko predstavljanje izmerenih rezultata. Za primenu sistema za optičko merenje deformacija na problemima kompleksnih struktura, definisane su i razvijene odgovarajuće procedure ispitivanja (operacije pre ispitivanja, u toku ispitivanja i posle ispitivanja i obrada rezultata). Podaci dobijeni eksperimentalnim

putem su, korišćenjem regresione analize, opisani odgovarajućim analitičkim obrascima koji prikazuju zavisnosti pomeranja/deformacija i dužine karakterističnih preseka za definisane preseke na kućištu ravnog zapornog ventila. Dokazano da je ponašanje kućišta ventila u toku izlaganja aksijalnom silom linearno.

Ključne reči:

Geometrijski diskontinuitet, spoj sfere/cilindra, ravni zaporni ventil, metoda korelacije digitalnih slika, 3D optička analiza, deformacije, pomeranje, metoda konačnih elemenata, naponi.

Naučna oblast: oblast tehničkih nauka, mašinstvo

Uža naučna oblast: Procesna tehnika

UDK broj: 66.026.2:620.1(043.3)

**STRESSES AND STRAINS OF GEOMETRICALLY COMPLEX
STRUCTURES OF PIPELINE FITTINGS**

Abstract:

Previous studies in the field of pressure equipment, i.e. measuring and determining stress and strain of geometrically complex structures, have relied on analytical calculations based on shell theory, numerical calculations using computer software and conventional experimental methods. As one of the most often conclusions in their work, the researchers indicated the lack of adequate experimental data in the available literature, i.e. expressed the need for detailed experimental analysis of critical areas where is not possible to precisely determine displacement, strain and stress values using analytical or numerical models.

Limitations of used experimental methods were recognized in several aspects. First, standardized specimens with discontinuities were used for analysis of geometrical discontinuities and tensile testing. Based on the results of tensile testing, stress concentration factors were plotted on diagrams and later used to solve problems on geometrically complex structures. This approach gave only approximate solutions that are not sufficiently precise and accurate. Second, experiments were conducted using conventional methods. Limitation of conventional methods is local measurement, i.e. experimental values are measured only in a single point. Third, measurements were carried out close to the geometrical discontinuity, rather than on the actual intersection of geometrical shapes, so it was not possible to measure highest strain values.

One of the goals of the thesis is exactly that to overcome abovementioned experimental problems, i.e. to show that is possible to implement relatively new digital image correlation method on testing geometrically complex structures in the field of pipeline fittings. Digital image correlation method overcomes limitations of strain gauge, as the strain gauge is most commonly used conventional method that enables full-field displacement and strain measurement. One experimental measurement enables acquisition of large datasets that replaces dozens/hundreds of strain gauges and

significantly reduces experiment preparation time and therefore the costs. On the other hand, as finite element method calculates full displacement and strain fields, numerical model verification is easily carried out by comparing to experimental results presented in the same manner. Full strain field experimental measurement allows accurate determination of critical areas, i.e. areas with highest strain values, as well as principle stress directions that enables better theoretical analysis of complex structures.

Numerical model was created by connecting characteristic cross-sections of the tested valve housings. Numerical calculations were performed using software for Finite Element Analysis – ABAQUS. Using Finite Element Method (FEM), it is possible to better understand behavior of structures with geometrical discontinuities that cannot be experimentally tested, i.e. it is possible to analyze stresses on predefined measuring areas, as well as on areas that cannot be experimentally tested.

Geometrically complex structure tested in the dissertation is globe valve housing. Experimental analysis was performed on three globe valve housings DN32, PN6 for two loading types: internal pressure up to 30 bar and axial force of 30 kN acting in the direction of valve symmetry axis (compression). Experiment is conducted on four measuring areas that are located on the characteristic positions on the valve housing. Displacement and strain fields were measured using system for three-dimensional optical strain measurement and software Aramis, by GOM manufacturer. System for three-dimensional optical displacement and strain measurement is based on Digital Image Correlation method. System enables 3D graphical presentation of measured results. For application of system for 3D optical strain measurement on complex structure problems, appropriate procedures are defined and developed (operations before testing, during testing and after testing and result processing). Experimental data are described with analytical equations that represent dependence of displacement/strain and section length for defined sections on globe valve housing. It is proven that valve housing behavior during axial loading is linear.

Keywords:

Geometrical discontinuity, sphere/cylinder junction, globe valve, digital image correlation method, 3D optical analysis, strain, displacement, finite element method, stress.

Scientific field: Technical sciences – Mechanical engineering

Narrow scientific field: Processing technique

UDC number: 66.026.2:620.1(043.3)

SADRŽAJ

POGLAVLJE 1	1
PREGLED LITERATURE	1
1.1. Analitički i numerički pristup sa izvodima iz teorije	2
1.1.1. Osnovni oblici delova kućišta	3
1.1.2. Kompleksni oblici kućišta.....	4
1.1.3. Koncentracija napona u zidovima kućišta.....	6
1.2. Pregled literature eksperimentalnih istraživanja	14
1.2.1. Metoda korelacije digitalnih slika.....	15
1.2.2. Primeri primene eksperimentalnih metoda, prednosti i nedostaci	18
1.2.3. Konvencionalne eksperimentalne metode.....	20
1.3. Zaključak	24
POGLAVLJE 2	26
ANALITIČKI PRORAČUN GEOMETRIJE KUĆIŠTA VENTILA	26
POGLAVLJE 3	33
TRODIMENZIONALNO OPTIČKO MERENJE DEFORMACIJA	33
3.1. Osnovni načini rada sistema za optičko merenje pomeranja i deformacija	34
3.1.1. Osnove merenja pomeranja.....	35
3.1.2. Proračun deformacija „malih površina”	37
3.2. Procedura merenja	40
3.2.1. Odabir odgovarajuće merne zapremine.....	40
3.2.2. Priprema uzorka.....	41
3.2.3. Hardverska podešavanja sistema.....	42
3.2.4. Kalibracija	44
3.2.5. Definisane parametara projekta - parametri „male površine”	46
3.2.6. Definisane veličine „malih površina”	46
3.2.7. Proračunska maska.....	48
3.2.8. Određivanje početne tačke.....	51

3.3. Proračun deformacije.....	53
3.3.1. Metoda linearne deformacije.....	54
3.3.2. Parametarska metoda za proračun deformacije.....	55
POGLAVLJE 4.....	57
METODA KONAČNIH ELEMENATA.....	57
4.1. Pregled razvoja metoda konačnih elemenata.....	60
4.2. Osnovni principi metode konačnih elemenata.....	62
4.3. Osnovni koraci u MKE.....	63
4.4. Tačnost i konvergencija rešenja po MKE.....	68
POGLAVLJE 5.....	69
EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA I POSTUPAK ISPITIVANJA.....	69
5.1. Eksperimentalne metode.....	71
5.1.1. Sistem za 3D optičko merenje pomeranja i deformacija.....	71
5.2. Priprema ventila i sistema za 3D optičko merenje pomeranja i deformacija.....	73
5.3. Vrste opterećenja.....	75
5.3.1. Opterećenje unutrašnjim pritiskom.....	75
5.3.2. Opterećenje aksijalnom silom (sabijanje).....	80
POGLAVLJE 6.....	86
EKSPERIMENTALNI REZULTATI.....	86
6.1. Opterećenje aksijalnom silom.....	87
6.1.1. Rezultati merenja za merno mesto MM1.....	87
6.1.2. Rezultati merenja za merno mesto MM2.....	110
6.1.3. Rezultati merenja za merno mesto MM3.....	116
6.1.4. Rezultati merenja za merno mesto MM4.....	124
6.2. Opterećenje unutrašnjim pritiskom.....	128
6.2.1. Rezultati merenja za merno mesto MM1.....	128
6.2.2. Rezultati merenja za merno mesto MM3.....	137
POGLAVLJE 7.....	140
REZULTATI NUMERIČKE ANALIZE.....	140
7.1. Opterećenje aksijalnom silom.....	143
7.2. Opterećenje unutrašnjim pritiskom.....	148

<i>7.3. Poređenje eksperimentalnih, numeričkih i analitičkih rezultata</i>	151
7.3.1. <i>Pomeranje u Y pravcu usled kombinovanog opterećenja</i>	153
7.3.2. <i>Faktori koncentracije napona</i>	153
7.3.3. <i>Faktori koncentracije deformacija</i>	155
7.3.4. <i>Poređenje numeričkih i eksperimentalnih rezultata</i>	156
7.3.5. <i>Poređenje numeričkih i analitičkih rezultata</i>	157
POGLAVLJE 8	158
DISKUSIJA REZULTATA	158
POGLAVLJE 9	172
ZAKLJUČAK	172
LITERATURA	177

INDEKS SKRAĆENICA I OZNAKA

3D	Trodimenzionalna
σ_c	Cirkularni napon – normalni napon u pravcu tangente na cilindar, <i>MPa</i>
σ_r	Radijalni napon – napon u pravcu radijusa, <i>MPa</i>
σ_z	Naponu u pravcu ose cilindra, <i>MPa</i>
φ i θ	Uglovi u sfernim koordinatama
p	Pritisak u kućištu, <i>bar</i>
σ_I i σ_{II}	Naponi u presecima I i II, <i>MPa</i>
σ_{III}	Napon upravan na unutrašnju površinu kućišta, <i>MPa</i>
A_f i A_p	Noseća površina zidova i odgovarajuća reaktivna površina, respektivno, <i>mm²</i>
l_0 , l_1 i l_2	Karakteristične dimenzije kućišta ventila, <i>mm</i>
MKE	Metoda konačnih elemenata
DIC	Digital Image Correlation, korelacija digitalnih slika
$R_{p0.1}$	Konvencionalni napon tečenja, <i>MPa</i>
R_m	Zatezna čvrstoća, <i>MPa</i>
E	Jungov modul elastičnosti, <i>GPa</i>
A	Izduženje u trenutku loma, %
e	Debljina zida kućišta ventila, <i>mm</i>
MM	Merno mesto
MPE	Srednja procentualna greška
RMSE	Koren srednje kvadratne greške
χ^2	Hi kvadrat
y(x)	Vrednost Mizesove deformacije, % ili pomeranja u Y pravcu, <i>mm</i>
x	Koordinata tačke na preseku, <i>mm</i> ili korak opterećivanja
a, b, c, d	Koeficijenti
R^2	Srednje kvadratno odstupanje

SPISAK KORIŠĆENIH SLIKA

Slika 1.1. Preseci za proračun čvrstoće kućišta armature sa ogrankom za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom [4]

Slika 1.2. Oblici cilindričnih kućišta, prava, kosa i ugaona, sa označenim proračunskim površinama. [4]

Slika 1.3. Faktori koncentracije napona na sferi za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom [10]

Slika 1.4. Faktori koncentracije napona na priključku za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom [11]

Slika 1.5. Faktor koncentracije napona za maksimalne napone na sferi za priključke na sfernom omotaču opterećenom unutrašnjim pritiskom [6]

Slika 1.6. Faktor koncentracije napona za maksimalne napone na sferi za priključke na sfernom omotaču opterećenom aksijalnom silom [6]

Slika 1.7. Faktor koncentracije napona za sferu (a) i priključak (b) za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom [7]

Slika 1.8. Faktor koncentracije napona za spoj sferu i priključak za odnos spoljašnjeg i unutrašnjeg prečnika sfere od 1,2 [8]

Slika 1.9. Širenje zona ekvivalentne plastične deformaciji u iznosu od 30 % kroz debljinu zida kućišta za različite vrednosti pritiska [5]

Slika 1.10. Šema sistema za dvodimenzionalnu korelaciju digitalnih slika (2D-DIC) [40]

Slika 1.11. Šema sistema za trodimenzionalnu korelaciju digitalnih slika (3D-DIC) [40]

Slika 1.12. Pozicija i orijentacija mernih traka [17]

Slika 1.13. Poređenje numeričkih i eksperimentalnih rezultata: (A) merna traka na poziciji 1 i (B) merna traka na poziciji 2 [17]

Slika 1.14. Raspodela deformacija za posudu bez ojačanja: (a) raspodela deformacija po uzdužnom pravcu i (b) raspodela deformacija po obodnom pravcu [16]

Slika 2.1. Položaj karakterističnih poprečnih preseka i dimenzije kućišta ventila

Slika 2.2. Oblici karakterističnih poprečnih preseka [4]

Slika 2.3. Oblik i dimenzije poprečnih preseka

Slika 2.4. Proračunska i stvarno izvedena debljina zida kućišta ventila

Slika 3.1. Aramis sistem [82]

- Slika 3.2. "Male površine" veličine 15x15 piksela sa preklapanjem od 2 piksela
- Slika 3.3. Promena malih površina kroz korake deformacije
- Slika 3.4. Primer odvijanja proračuna malih površina kroz korake
- Slika 3.5. Senzorska jedinica i zapremina merenja [82]
- Slika 3.6. Primeri kalibracionih tela [82]
- Slika 3.7. Raspored pravougaonih „malih površina” oblika u nedeformisanom stanju (levo) i deformisanom stanju [82]
- Slika 3.8. Raspored kvadratnih malih površina u nedeformisanom stanju (levo) i izgled pojedinačne kvadratne male površine [82]
- Slika 3.9. "Male površine" na kućištu ventila
- Slika 3.10. Proračunska maska: a) prilikom definisanja i b) završena proračunska maska (zelena oblast). [82]
- Slika 3.11. Uzorak za ispitivanje zatezanjem. Snimak a) leve i b) desne kamere. [82]
- Slika 3.12. Uzorak za ispitivanje zatezanjem proračunat bez definisanog proračunskog okvira (maske). Snimak a) leve i b) desne kamere. [82]
- Slika 3.13. Uzorak za ispitivanje zatezanjem: a) proračunska maska; b) rezultat proračuna za levu kameru sa proračunskom maskom; c) rezultat proračuna za desnu kameru sa proračunskom maskom; [82]
- Slika 3.14. Proračunska maska za kućište ventila
- Slika 3.15. Primer loše definisane početne tačke. Loša stohastična šara [82]
- Slika 3.16. Primer dobro definisane početne tačke. Dobra stohastična šara [82]
- Slika 3.17. Grafički prikaz principa linearne metode proračuna deformacije [82]
- Slika 3.18. Grafički prikaz principa parametarske metode proračuna deformacije [82]
- Slika 4.1. Metode proračuna nosećih konstrukcija [80]
- Slika 4.2. Primeri tipova konačnih elemenata: a) linijski konačni elementi; b) dvodimenzionalni (ravni) konačni elementi; v) osnosimetrični konačni elementi; g) trodimenzionalni (prostorni) konačni elementi; d) krivolinijski konačni elementi; [80]
- Slika 4.3. Tačnost rešenja po MKE [80]
- Slika 5.1. Dimenzije kućišta ventila [21]
- Slika 5.2. Sistem za optičko merenje pomeranja i deformacija [82]
- Slika 5.3. Izgled odgovarajuće stohastičke šare
- Slika 5.4. Ravni zaporni ventili sa odgovarajućom stohastičkom šarom
- Slika 5.5. Šema ispitne instalacije za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom

Slika 5.6. Eksperimentalna instalacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom. 1 – Stereo kamere; 2 – Ventil; 3 – Stega; 4 – Manometar; 5 – Osvetljenje.

Slika 5.7. Rezultati kalibracije za slučaj opterećenja (a) unutrašnjim pritiskom i (b) aksijalnom silom

Slika 5.8. Eksperimentalna instalacija za slučaj opterećenja aksijalnom silom: 1 – Stereo kamere; 2 – Ravni zaporni ventil; 3 – Čeljusti pulzatora; 4 – Osvetljenje.

Slika 5.9. Položaj mernih mesta 1 i 3 na ventilu

Slika 5.10. Položaj mernih mesta 2 i 4 na ventilu

Slika 5.11. Priraštaj sile na pulzatoru

Slika 6.1. Položaj globalnog koordinatnog sistema za merno mesto 1

Slika 6.2. Polje pomeranja u Y pravcu za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM1

Slika 6.3. Dijagram pomeranja u Y pravcu za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM1

Slika 6.4. Dijagram pomeranja u Y pravcu tačke 1 za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM1

Slika 6.5. Polje Mizesovih deformacija za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM1

Slika 6.6. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM1

Slika 6.7. Dijagram Mizesovih deformacija tačke 1 za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM1

Slika 6.8. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za celu dužinu preseka 1 za aksijalnu silu od 30 kN

Slika 6.9. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka 1, za dužinu preseka od 20 mm sa jedne i druge strane spoja za aksijalnu silu od 30 kN

Slika 6.10. Promena Mizesovih deformacija po dužini preseka za različite vrednosti sila

Slika 6.11. Promena Mizesovih deformacija po dužini preseka 1 za tri ispitivana ventila za MM1 opterećeno aksijalnom silom od 30 kN

Slika 6.12. Matematički modeli promene Mizesovih deformacija po dužini preseka 1 za tri ispitivana ventila za MM1 opterećeno aksijalnom silom od 30 kN

Slika 6.13. Uporedni prikaz eksperimentalnih rezultata i matematičkog modela promene Mizesovih deformacija po dužini preseka 1 za tri ispitivana ventila za MM1 opterećeno aksijalnom silom od 30 kN

Slika 6.14. Zavisnost pomeranja u Y pravcu od koraka opterećivanja za tačku 1 za MM1 opterećeno aksijalnom silom

Slika 6.15. Zavisnost Mizesovih deformacija od koraka opterećivanja za tačku 1 za MM1 opterećeno aksijalnom silom

Slika 6.16. Položaj ravni koje definišu ugaoni primitiv za merno mesto 2

Slika 6.17. Polje pomeranja prirubnica 1 i 3 u Y pravcu za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN

Slika 6.18. Dijagram ugaonog pomeranja u zavisnosti od koraka opterećivanja za MM2 opterećeno aksijalnom silom

Slika 6.19. Dijagram pomeranja u Y pravcu tačaka na prirubnicama u zavisnosti od koraka opterećivanja za MM2 opterećeno aksijalnom silom

Slika 6.20. Polje pomeranja u Y pravcu za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM3

Slika 6.21. Dijagram pomeranja u Y pravcu za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM3

Slika 6.22. Dijagram pomeranja u Y pravcu tačke 1 za slučaj aksijalnog opterećenja za MM3

Slika 6.23. Polje Mizesovih deformacija za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM3

Slika 6.24. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj aksijalnog opterećenja za MM3

Slika 6.25. Dijagram Mizesovih deformacija tačke 1 za slučaj aksijalnog opterećenja za MM3

Slika 6.26. Zavisnost pomeranja u Y pravcu od koraka opterećivanja za tačku 1 za MM3 opterećeno aksijalnom silom

Slika 6.27. Zavisnost Mizesovih deformacija od koraka opterećivanja za tačku 1 za MM3 opterećeno aksijalnom silom

Slika 6.28. Polje pomeranja u Y pravcu za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM4

Slika 6.29. Dijagram pomeranja u Y pravcu za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM4

Slika 6.30. Polje Mizesovih deformacija za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM4

Slika 6.31. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM4

Slika 6.32. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 30 bar za MM1

Slika 6.33. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za celu dužinu preseka 1 za unutrašnji pritisak od 30 bar

Slika 6.34. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka 1 za dužinu preseka od 20 mm sa jedne i druge strane spoja za unutrašnji pritisak od 30 bar

Slika 6.35. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 30 bar za MM3

Slika 6.36. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 30 bar za MM3

Slika 7.1. 3D model ventila

Slika 7.2. MKE model ventila sa označenim zonama povećane gustine mreže

Slika 7.3. Model kućišta ventila: a) pre diskretizacije i b) posle diskretizacije.

Slika 7.4. Polje deformacija kućišta ventila opterećenog aksijalnom silom od 30 kN

Slika 7.5. Naponsko polje kućišta ventila opterećenog aksijalnom silom od 30 kN

Slika 7.6. Polje pomeranja u Y pravcu kućišta ventila opterećenog aksijalnom silom od 30 kN

Slika 7.7. Vrednosti Mizesovih deformacija (a) i napona (b) za merno mesto 1

Slika 7.8. Polje pomeranja u Y pravcu mernog mesta 2 opterećenog aksijalnom silom od 30 kN

Slika 7.9. Vrednosti Mizesovih deformacija (a) i napona (b) za merno mesto 3

Slika 7.10. Vrednosti Mizesovih deformacija (a) i napona (b) za merno mesto 4

Slika 7.11. Polje deformacija kućišta ventila opterećenog unutrašnjim pritiskom od 30 bar

Slika 7.12. Naponsko polje kućišta ventila opterećenog unutrašnjim pritiskom od 30 bar

Slika 7.13. Vrednosti Mizesovih deformacija (a) i napona (b) za merno mesto 1

Slika 7.14. Vrednosti Mizesovih deformacija (a) i napona (b) za merno mesto 3

Slika 7.15. Položaj karakterističnih preseka kućišta ventila

Slika 7.16. Položaj mesta za određivanje faktora koncentracije napona za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom

Slika 7.17. Položaj mesta za određivanje faktora koncentracije napona za slučaj opterećenja aksijalnom silom

Slika 8.1. Presek kućišta ventila po ravni simetrije

SPISAK KORIŠĆENIH TABELA

Tabela 2.1. Karakteristike materijala kućišta ventila

Tabela 2.2. Izračunate debljine zida po presecima za karakteristična mesta

Tabela 5.1. Mehaničke karakteristike materijala kućišta ventila na 20°C

Tabela 6.1. Vrednosti pomeranja u Y pravcu i Mizesovih deformacija za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM1 za ventil 1

Tabela 6.2. Polinomna funkcija za celu dužinu preseka za aksijalnu silu od 30 kN

Tabela 6.3. Polinomna funkcija za dužinu preseka od 20 mm sa jedne i druge strane spoja za aksijalnu silu od 30 kN

Tabela 6.4. Vertikalno pomeranje tačaka na prirubnicama i ugao pomeranja između prirubnica

Tabela 6.5. Vrednosti Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom za MM1 za ventil 1

Tabela 6.6. Polinomna funkcija za celu dužinu preseka za unutrašnji pritisak od 30 bar

Tabela 6.7. Polinomna funkcija za dužinu preseka od 20 mm sa jedne i druge strane spoja za unutrašnji pritisak od 30 bar

Tabela 7.1. Rezultati numeričke analize kućišta opterećenog unutrašnjim pritiskom od 30 bar

Tabela 7.2. Uporedni prikaz rezultata numeričke i eksperimentalne analize

POGLAVLJE 1

PREGLED LITERATURE

Oprema pod pritiskom ima veoma široku primenu u skoro svim granama industrije. Upravo zbog svoje široke primene, oprema pod pritiskom može biti raznih oblika i funkcija, napravljena od različitih vrsta materijala.

Geometrijski oblici opreme pod pritiskom se kreću od veoma prostih (npr.: cev) do veoma složenih (npr.: cevovodna armatura), gde usled složenosti geometrije na samoj opremi postoje mesta velikih geometrijskih diskontinuiteta, što kao posledicu ima pojavu koncentracije napona. Jedan od geometrijskih diskontinuiteta koji se često javlja u praksi je i veza sfera/cilindar, koji se najčešće analizira na primeru sferne posude pod pritiskom i cilindričnog priključka.

Analiza promene deformacionih i naponskih 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 komplikovana i složena. Inženjerski pristup određivanju naponskih stanja koristi približne metode koje su rezultat teorijskih ili eksperimentalnih istraživanja.

Ovo poglavlje predstavlja pregled radova koji su urađeni na temu uticaja geometrijskih diskontinuiteta na deformaciona i naponska polja kompleksnih struktura, na primeru spoja sfera/cilindar. Dat je osvrt i na radove koji se bave analitičkim pristupom rešavanja problema čvrstoće, kao i radove koji se bave eksperimentalnom i numeričkom analizom vezanom za navedenu problematiku. Posebna pažnja je posvećena eksperimentalnoj metodi za 3D optičko merenje deformacija i pomeranja.

Kao primer spoja sfere i cilindra na kojem će se izvršiti analitički proračun i numerička i eksperimentalna analiza, izabrano je kućište industrijskog ravnog zapornog ventila.

Zbog svoje složenosti, kućište ventila nije bilo predmet istraživanja velikog broja autora. U okviru ovoga poglavlja su dati i izvodi iz teorije za analitički pristup proračuna kućišta ventila, a koji su primenjeni kao osnova u daljoj analizi u okviru ove disertacije.

1.1. Analitički i numerički pristup sa izvodima iz teorije

Kućište, u opštem smislu, predstavlja sastavni deo energetske mašinske sistema u kojima se vrši transformacija energije fluida u mehanički rad i obrnuto. U kućištu opreme pod pritiskom se u neposrednu interakciju dovode fluidi i čvrste površine radnih organa: lopatica, upravljačkih organa i dr. Funkcija kućišta je višestruka. Omogućuje obezbeđenje prostora za razmenu (transformaciju) energije. U kućište se uvode fluidi pod pritiskom, vrši se strujanje i/ili ekspanzija fluida, upravljanje strujom fluida, prenošenje kinetičke energije ili energije pritiska na čvrste površine. Osim prethodno navedenih glavnih funkcija vezanih za strujanje fluida, kućišta ostvaruju više sporednih funkcija. Neke od njih su prihvat sila od radnih i upravljačkih organa, oslanjanje sistema i prenošenje opterećenja na podlogu, spajanje sa drugim delovima sistema i dr. Kao posledica funkcija koje obavlja, kućište je u toku eksploatacije izloženo različitim vrstama dinamičkih i statičkih opterećenja – unutrašnji i spoljašnji pritisak, istezanje, sabijanje, savijanje, hidraulički udar i dr., pri čemu se u zidovima ostvaruju veoma nepovoljna naponska stanja. Između oblika, dimenzija i naponskih stanja postoji izrazita korelacija.

Teorijska istraživanja čvrstoće kućišta se sprovode analitičkim i numeričkim metodama. Složena konfiguracija kućišta omogućuje egzaktnu primenu relacija iz teorije elastičnosti. Teorija elastičnosti tankih ljuski (odnos debljine i prečnika krivine ljuske manji od $1/20$ [2]) je nastala kao specijalan slučaj teorije elastičnosti, gde su još krajem 19. veka postavljene osnovne jednačine koje su predstavljale polaznu tačku za mnoge istraživače zainteresovane za ljuske [9]. Jednačine su bile kompleksne i nisu mogle lako da se reše, sem za neke specijalne slučajeve koji koriste razna uprošćenja. Tako su razvijeni proračuni koji se zasnivaju na približnom prilagođavanju obrazaca teorije ljuski i na korekcijama koje obuhvataju oslabljenja i koncentracije napona. Naravno,

korišćene su i mnoge druge analize bazirane na eksperimentalnom ili teorijskom pristupu (teorija plastičnosti, metod maksimalnih opterećenja, mehanika loma i dr.).

Analitičke metode se sprovode uz niz različitih uprošćenja i aproksimacija. Usled različitih vrsta opterećenja i složenog oblika, naponsko stanje u zidovima kućišta opreme pod pritiskom je veoma nepovoljno. U inženjerskoj praksi se proračun kućišta industrijskog ventila sprovodi konvencionalnim postupcima opisanim u međunarodnim standardima (EN 12516, DIN 3840 i dr.), pri čemu se izračunava debljina zida kućišta u različitim karakterističnim poprečnim presecima i to samo za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom. Složena trodimenzionalna geometrija kućišta se pri tome zamenjuje dvodimenzionalnom, ne uzimajući u obzir postojanje greški u materijalu, kao ni uticaj drugih vrsta opterećenja, zaostalih napona i zamora materijala na čvrstoću kućišta. Detaljniji prikaz standarda EN 12516 je dat u narednom poglavlju.

Zidovi kućišta kompleksnih oblika, što je i slučaj sa kućištem ravnog zapornog ventila, su izloženi prostorno usmerenim naponima. Debljinu zida kompleksnog kućišta nije moguće eksplicitno izračunati nego se primenjuje iteracioni pristup postepenog približavanja pravoj vrednosti debljine zida. Početna iteraciona veličina za debljinu zida može biti izračunata prema nekom od obrazaca za cilindrične, konusne, ovalne i druge elementarne oblike delova kućišta.

1.1.1. Osnovni oblici delova kućišta

Model cilindra debelih zidova opterećenog unutrašnjim pritiskom je razrađen u teoriji elastičnosti. Prema ovom modelu je elementarni delić materijala u zidu kućišta izložen:

- Normalnim naponima u pravcu tangente na cilindar – cirkularnom naponu σ_c ,
- Naponu u pravcu radijusa – radijalnom naponu σ_r ,
- Naponu u pravcu ose cilindra σ_z .

Dejstvom unutrašnjeg pritiska na čeine strane posude, zidovi su izloženi zatezanju. Napon σ_z po debljini zida je ravnomerno raspoređen i kod posuda tankih i debelih

zidova. Kod posuda tankih zidova (ljuski), efekti ovog napreznja su značajniji, jer su zbog smanjene debljine zida naponi većeg intenziteta.

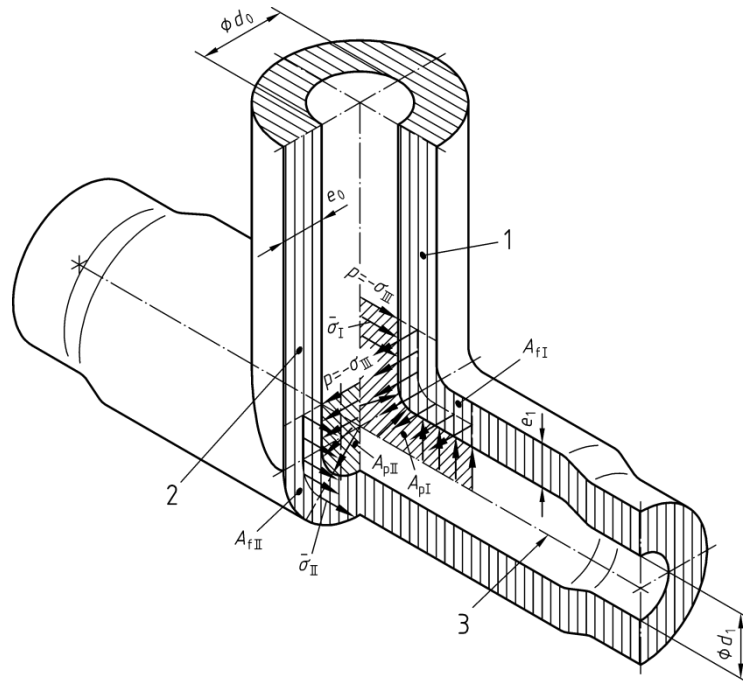
Upoređivanjem obrazaca za napone u cilindričnim posudama tankih i debelih zidova mogu se navesti sledeći zaključci. Izrazi za napon kod posuda debelih zidova su opštijeg karaktera i pomoću tih obrazaca mogu se izračunavati i naponi u tankim zidovima. Vrednosti napona na unutrašnjoj površini su ekstremno visoke. Ako nastupe lokalne plastične deformacije raspodela će postati ravnomernija i bliža onoj kod tankih zidova. Kod posuda pod pritiskom lokalne plastične deformacije po debljini zida ne ometaju uvek funkciju, te se mogu dopustiti. Ova činjenica omogućuje da se obrasci za posude tankih zidova, uz male korekcije primene i za proračun napona u zidovima povećane debljine.

Zidovi sferičnih delova kućišta opterećenih unutrašnjim pritiskom su izloženi zatezanju u dva pravca koji se mogu definisati u sfernim koordinatama pomoću uglova φ i θ . Naponsko stanje u sferičnim zidovima je znatno povoljnije u poređenju sa cilindričnim. Zidovi sferičnih delova posuda su manje debljine.

1.1.2. Kompleksni oblici kućišta

Proračun čvrstoće kućišta armature kompleksne geometrije se vrši na osnovu ravnoteže između spoljnjih i unutrašnjih sila za najviše napregnute zone, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom. Najviše napregnute zone se smatraju prelazima između cilindričnih, sfernih ili nekružnih osnovnih delova kućišta.

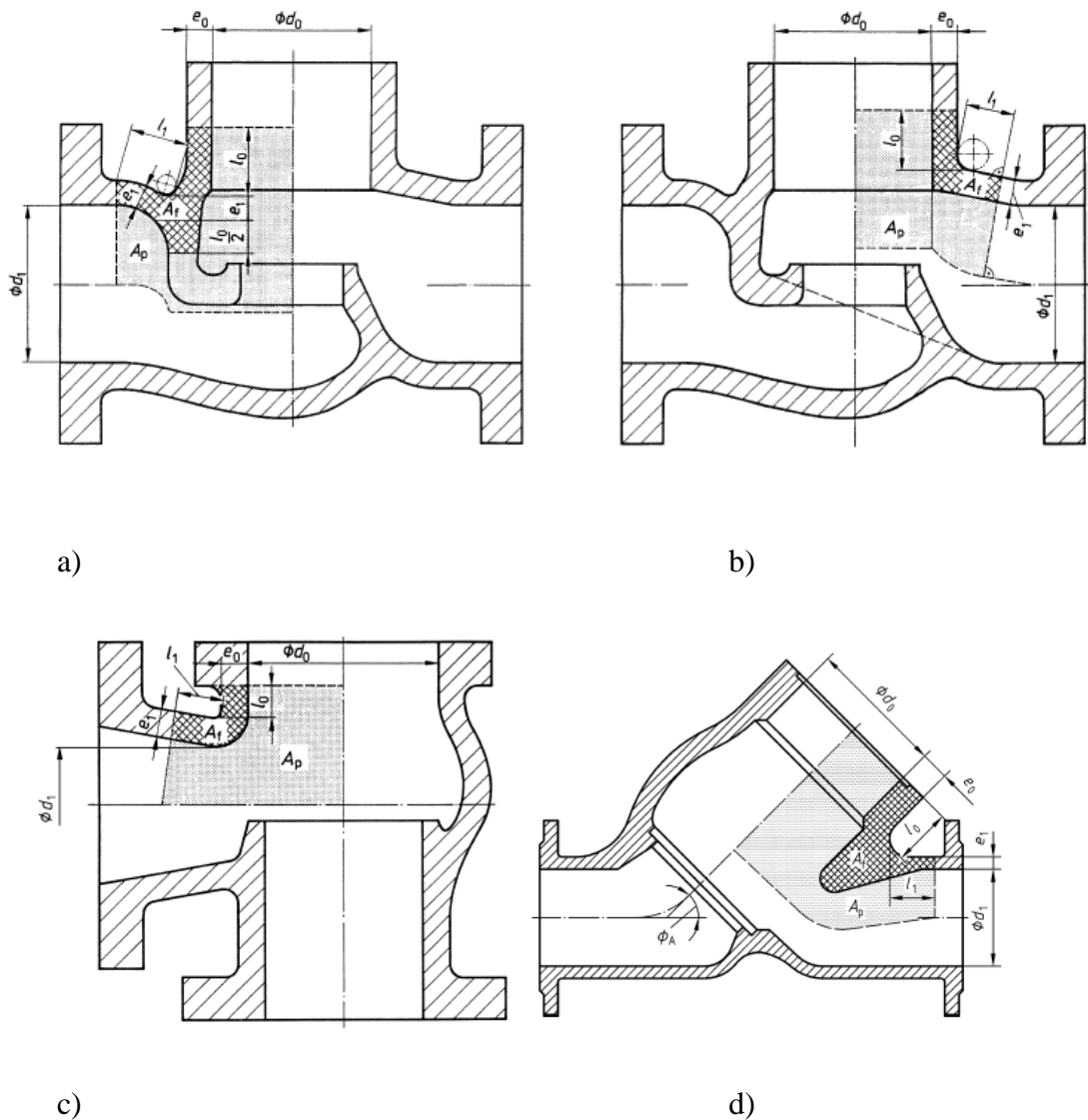
Na slici 1.1 su prikazani preseki I i II u spoju ogranaka, u kojima deluju naponi σ_I i σ_{II} , dok je napon $\sigma_{III} = -p$ upravan na unutrašnju površinu kućišta. Na spoljašnjoj površini kućišta $\sigma_{III} = 0$ te je u sredini $\sigma_{III} = -p/2$. Veličine napona σ_I i σ_{II} mogu se odrediti na osnovu ravnoteže sila. Pritisak u kućištu p , delujući na površinu A_{pI} stvara aktivnu silu kojoj se suprotstavlja reaktivna sila u zidu kućišta od napona σ_I na površini A_{fI} .



- 1 poprečni presek I
- 2 poprečni presek II
- 3 glavna osa

Slika 1.1. Preseci za proračun čvrstoće kućišta armature sa ogrankom za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom [4]

Noseće površine zidova A_f i odgovarajuće površine A_p se određuju planimetrisanjem segmenata poprečnih preseka kućišta. Na slici 1.2 su prikazani izabrani oblici kućišta na kojima su označene navedene površine.



Slika 1.2. Oblici cilindričnih kućišta, prava, kosa i ugaona, sa označenim proračunskim površinama. [4]

1.1.3. Koncentracija napona u zidovima kućišta

U neposrednoj blizini otvora u zidovima, u zavarenim šavovima ili na mestima nagle promene pravca zida, prisutna je tzv. koncentracija napona. Na ovim mestima je napon znatno veći u poređenju sa naponima u neposrednoj okolini. Uvećani napon može

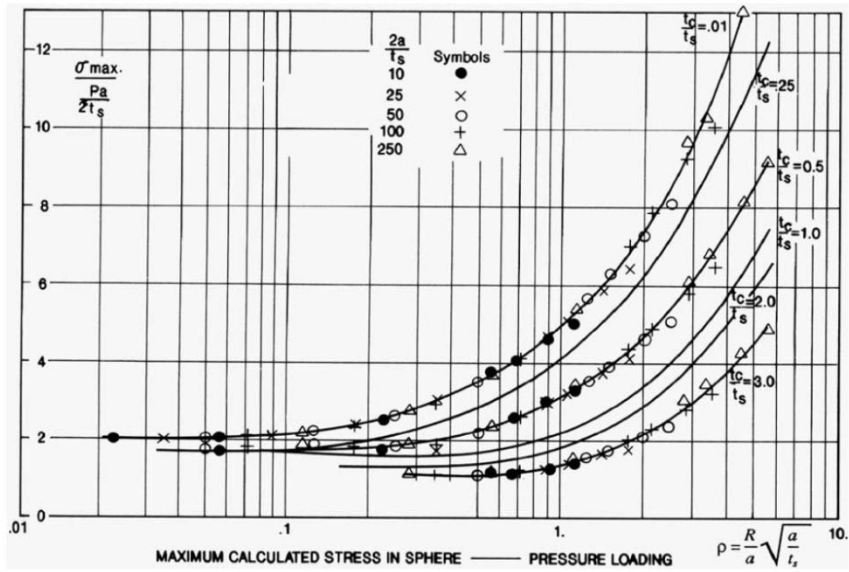
izazvati prslinu i dovesti do loma kućišta, koje može prouzrokovati posledice po ljude, okolinu i opremu.

Po kontinualnim konturama ljuski, daleko od mesta spoja, kao što su sferične, cilindrične i torusne, naponi $\sigma_c, \sigma_z, \sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_\theta$ se ne menjaju. Kod ljuski kombinovanih od navedenih oblika, na prelazima se javlja diskontinuitet napona.

Metod konačnih elemenata (MKE) je najčešće korišćen numerički metod određivanja deformacionih i naponskih polja u spoju dve ljuske. Osim gotovih programskih paketa, razvijaju se i specijalizovani programski paketi čija je prvenstvena namena u oblasti posuda pod pritiskom, odnosno ljuski. Sa razvojem novih softverskih paketa za MKE je moguće rešiti većinu problema vezanih za opremu pod pritiskom.

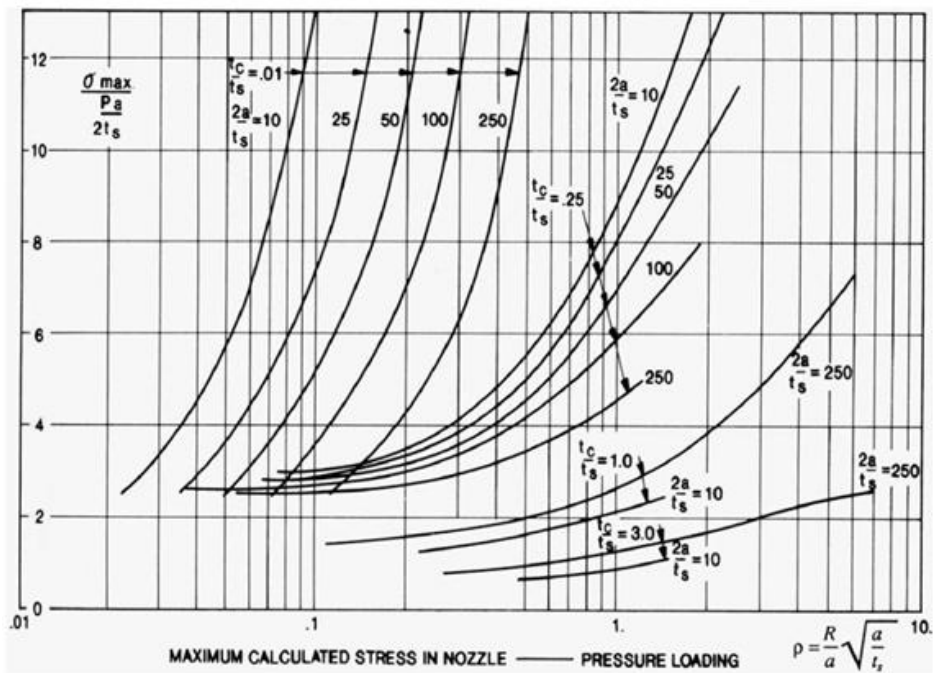
Sa početkom razvoja nuklearne energije 50-ih i 60-ih godina dvadesetog veka raslo je i interesovanje za rešavanje problema teorije ljuske [9]. Pored analitičkih postupaka i definisanih formula, jedan od najčešće korišćenih pristupa je i korišćenje faktora koncentracije napona. Jedna od prekretnica u toj oblasti je i rad Leckie-a i Penny-a [10] o priključcima na sfernim omotačima iz 1963. godine, koji je koristio faktore koncentracije napona za prikaz rezultata analize. Tipični rezultati za najjednostavniji slučaj su prikazani na slici 1.3 i uključeni su u standard BS 5500. Međutim, pristup Leckie-a i Penny-a ima i nedostatke. Zanemarili su napone na priključku iako su bili veći nego naponi na sferi, prikazujući samo rezultate za sferu. Detaljne informacije za napone na priključku (slika 1.4) su prezentovane kasnije [11], ali razjašnjenje ovih geometrijskih diskontinuiteta traje i danas.

I pored velikog napretka u numeričkim simulacijama, hardverski i softverski, koriste se relevantni faktori koncentracije napona, kada su dostupni. Faktor koncentracije napona predstavlja odnos najvećeg stvarnog napona i nominalnog napona (napon u zoni u kojoj nema uticaj geometrijskih diskontinuiteta). Faktor koncentracije napona se koristi čak i u slučajevima kada ne pruža dovoljno potrebnih informacija, već samo grubu "konzervativnu" procenu, npr. maksimalne ekvivalentne napone umesto glavnih napona [8].



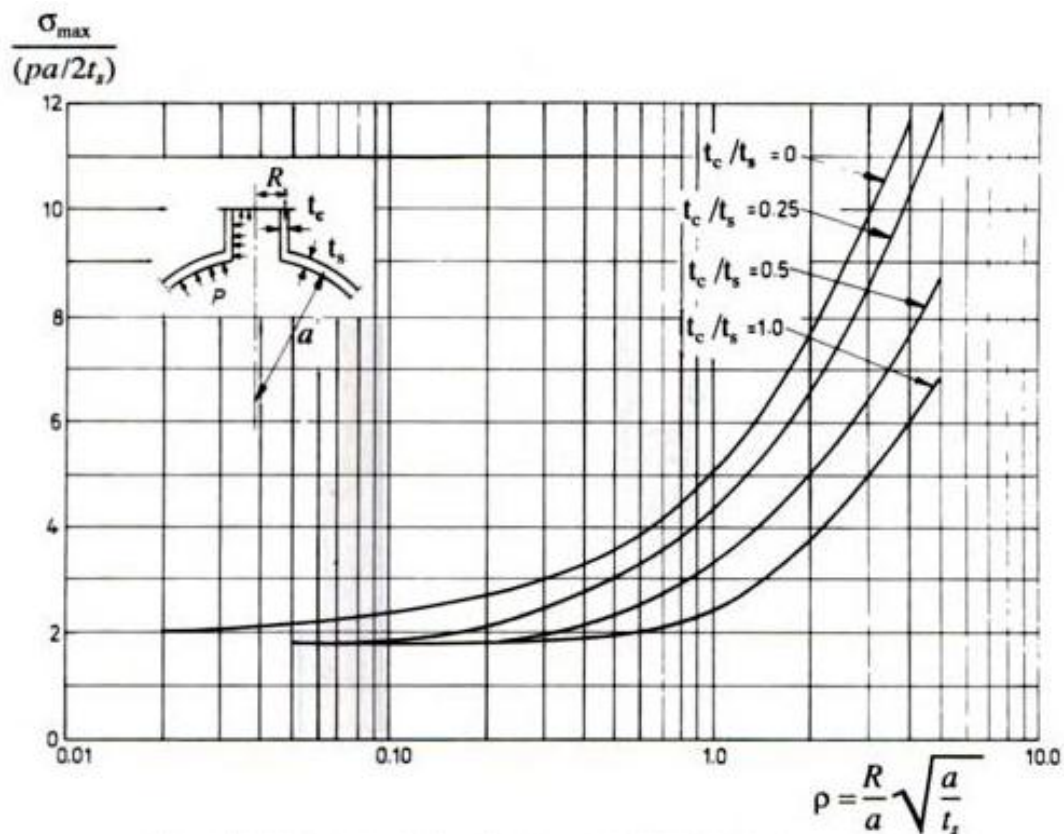
Leckie–Penny nozzle/sphere results. R = nozzle radius a = sphere radius t_c = nozzle thickness t_s = sphere thickness

Slika 1.3. Faktori koncentracije napona na sferi za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom [10]

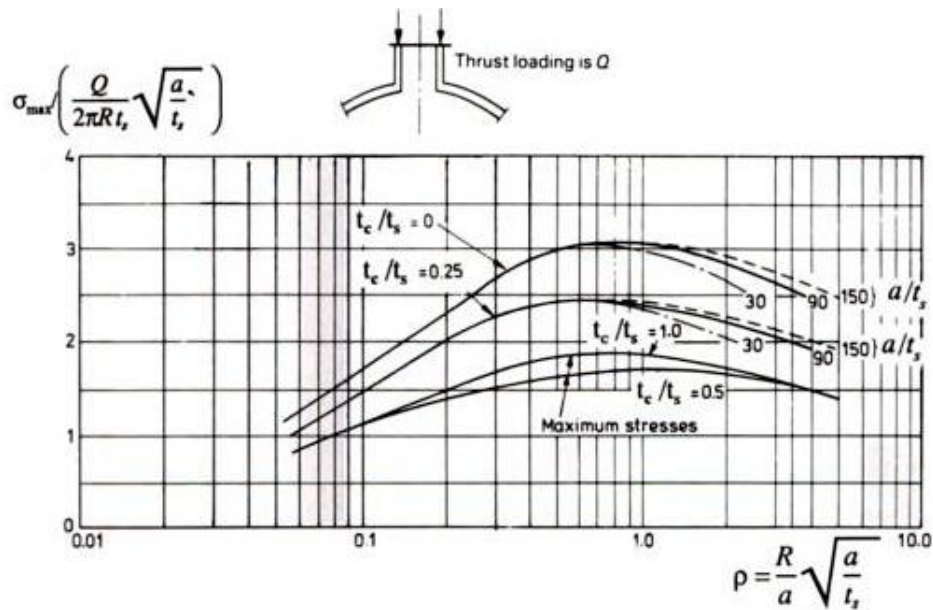


Slika 1.4. Faktori koncentracije napona na priključku za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom [11]

Spence je u svojoj knjizi [6] predstavio metod proračuna spoja više tipova omotača baziranom na teoriji ljuske. Knjiga se poziva na standard BS 5500, koji je u međuvremenu zamenjen evropskim standardom EN 13445. Jedan od analiziranih slučajeva je cilindrični priključak koji se nalazi na sfernom omotaču, opterećen unutrašnjim pritiskom, aksijalnom silom u pravcu ose priključka i smičućom silom. U okviru knjige su predstavljeni dijagrami sa vrednostima faktora koncentracije napona za maksimalne napone zavisno od odnosa debljina zida priključka i omotača i bezdimenzionog faktora. Na slici 1.5 je prikazan dijagram faktora koncentracije napona za spoj sfernog omotača i cilindričnog priključka opterećenog unutrašnjim pritiskom. Na slici 1.6 je prikazan dijagram faktora koncentracije napona za spoj sfernog omotača i cilindričnog priključka opterećenog aksijalnom silom.

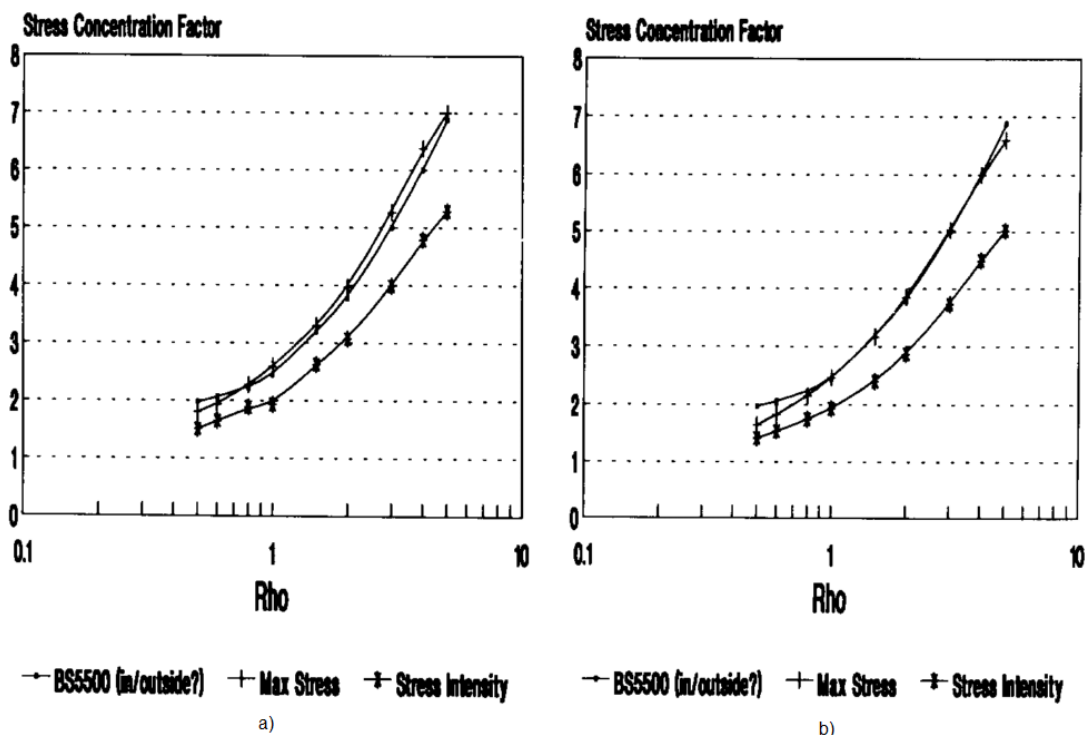


Slika 1.5. Faktor koncentracije napona za maksimalne napone na sferi za priključke na sfernom omotaču opterećenom unutrašnjim pritiskom [6]



Slika 1.6. Faktor koncentracije napona za maksimalne napone na sferi za priključke na sfernom omotaču opterećenom aksijalnom silom [6]

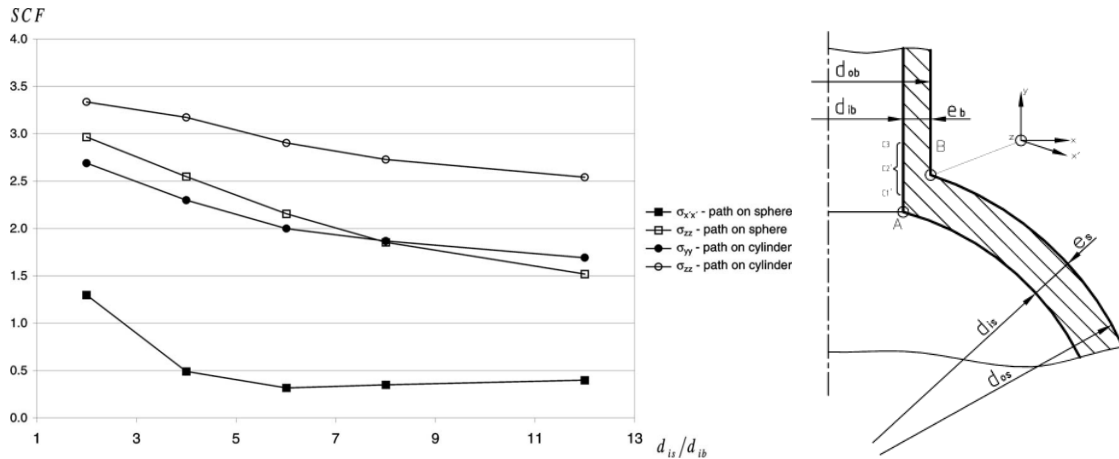
U svom radu, Attwater [7] je metodom konačnih elemenata analizirao sfernu posudu pod pritiskom sa radijalno postavljenim cilindričnim priključkom, opterećenu unutrašnjim pritiskom. Analizirao je više slučajeva sa promenljivim debljinama zidova i poluprečnika sferne posude i priključka. Rad dijagramski prikazuje vrednosti faktora koncentracije napona za navedene slučajeve i poređenja sa standardom BS 5500, koji se odnosi na problem lokalnih opterećenja na spoju sfernog omotača i priključka. Standard je samo primenljiv za sferu, dok su u radu [7] predstavljeni dijagrami sa faktorima koncentracije napona i za cilindrični priključak. Na slici 1.7 su predstavljeni dijagrami za faktore koncentracije napona za sferu (a) i priključak (b). Pokazano je da je, za slučaj različitih debljina zidova, vrednost napona u skladu sa standardom, dok su, za slučaj priključaka većih prečnika, najveći glavni naponi nešto većih vrednosti. Ono što je potrebno dodatno istaći je i poklapanje rezultata sa rezultatima prikazanim u [6].



Slika 1.7. Faktor koncentracije napona za sferu (a) i priključak (b) za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom [7]

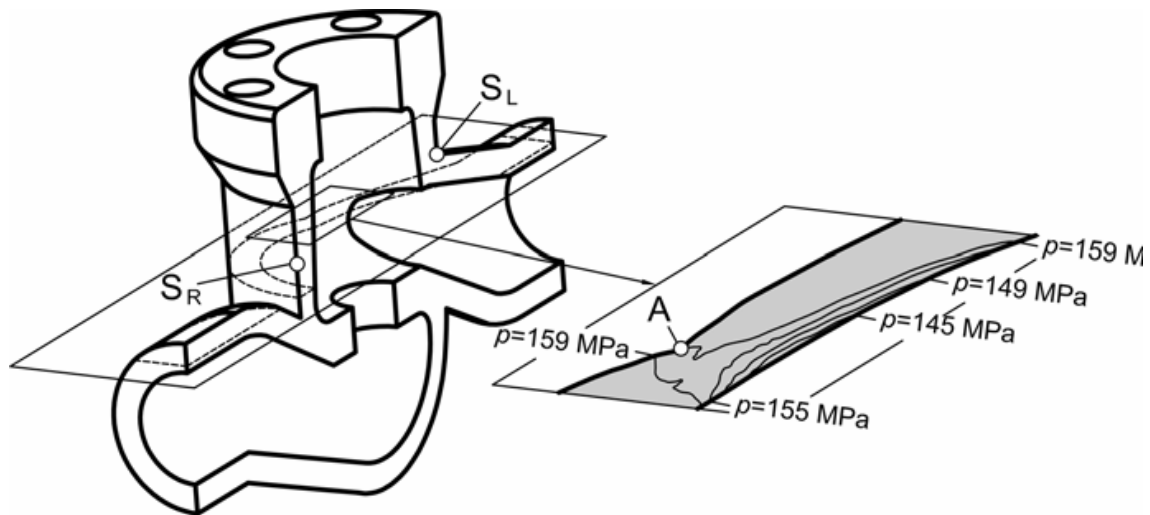
Schindler je u svom radu [8] takođe analizirao faktore koncentracije napona date standardom i poredio sa rezultatima simulacije metodom konačnih elemenata. Schindler je analizirao faktore koncentracije napona za slučaj opterećenja sfernog omotača unutrašnjim pritiskom sa i bez uticaja pritiska na priključak za slučajeve različitih odnosa debljina zidova priključka i sfernog omotača. Na slici 1.8 je prikazan dijagram sa vrednostima faktora koncentracije napona za različite vrednosti odnosa unutrašnjeg prečnika sfere i priključka. Slika prikazuje strukturne komponente napona izračunate kvadratnom ekstrapolacijom za tačku B sa središnjim tačkama na površini na različitim razdaljinama od tačke B. Rezultati su prikazani za sferu (pravci x' i z) i cilindrični priključak (pravci y i z). Faktori koncentracije napona pokazuju dobro slaganje, ali zahtevaju interpolaciju između raštrkanih središnjih tačaka. Kao i svi drugi objavljeni rezultati, prikazuju ekvivalentne napone, a ne komponente napona. Za dalju analizu spoja sfera/cilindar, potrebno je detaljnije poznavanje raspodele napona – glavnih napona, orijentacija osa glavnih napona, tačan položaj ekstremnih vrednosti. Ove detalje je nemoguće dobiti iz postojeće literature, imajući na umu sve obuhvaćene parametre,

pri čemu je jedno od rešenja izračunavanje metodom konačnih elemenata od slučaja do slučaja.



Slika 1.8. Faktor koncentracije napona za spoj sferu i priključak za odnos spoljašnjeg i unutrašnjeg prečnika sfere od 1,2 [8]

Rad Galića [5] analizira kućište ventila DN50, PN160 opterećenog unutrašnjim pritiskom. U okviru rada je sprovedena analiza primenom metode konačnih elemenata (MKE) i međunarodnog standarda EN 12516-2, kako bi se odredio pritisak plastičnog tečenja, loma i nestabilnosti. U okviru rezultata dobijenih metodom konačnih elemenata je pokazano da ne dolazi do plastičnih deformacija na nominalnom pritisku, već da je model kućišta sve vreme u oblasti elastičnosti. Kroz analizu za različite vrednosti pritiska, na zidu kućišta ventila je prikazano širenje zona sa maksimalnim ekvivalentnim plastičnim deformacijama (slika 1.9). Evidentno je da se položaj kritičnih mesta dobijenih MKE predstavljen tačkom A na slici 1.9 razlikuje od tačaka S_L i S_R koje standard EN 12516 definiše kao kritične.



Slika 1.9. Širenje zona ekvivalentne plastične deformaciji u iznosu od 30 % kroz debljinu zida kućišta za različite vrednosti pritiska [5]

U okviru rada [5] je takođe prikazan tok proračuna maksimalno dozvoljenog pritiska prema standardu EN 12516-2. Na osnovu dimenzija ventila i odgovarajućih proračunatih karakterističnih poprečnih preseka koje definiše standard, autori su odredili vrednost pritiska od 34,3 MPa. Koristeći numeričku analizu, određena je vrednost maksimalnog pritiska od 47,5 MPa. Primećuje se da je vrednost pritiska prema standardu daleko niža. Autori su pokazali da je vrednost dozvoljenog pritiska određenog primenom standarda EN 12516-2 jako konzervativna u poređenju sa rezultatima za pritisak plastičnog loma, u skladu sa metodom graničnog konstruisanja. Sa ekonomskog aspekta, konzervativne vrednosti utiču na povećanu debljinu zida što ima značajan uticaj na krajnju cenu proizvoda.

Kao što je prikazano u radu [5], debljina zida kućišta ventila u području račvanja (geometrijskih diskontinuiteta) prema standardu EN 12516-2 se računa samo u ravni simetrije. Iako se kritična mesta dobijena pomoću MKE nalaze u području račvanja, ona se ne nalaze na očekivanom mestu kućišta ventila, odnosno pomerene su u odnosu na položaj kritičnih tačaka koje definiše standard EN 12516-2. Prema tome, zaključak je da standard nije dovoljno precizan za konstruisanje delova kućišta ravnog zapornog ventila i da je neophodno sprovesti eksperimentalna istraživanja, kako bi se potkrepile tvrdnje dobijene MKE.

I drugi autori su se bavili problematikom veze sfernog i cilindričnog omotača i analizirali kroz različite primere u svojim radovima [12-21].

1.2. Pregled literature eksperimentalnih istraživanja

Eksperimentalna istraživanja se baziraju na izradi fizičkog modela i odgovarajuće instalacije i upotrebi merne opreme kojom se mere pomeranja, deformacije i naponi na karakterističnim mestima. Problem koji se najčešće javlja u praksi je problem preciznog eksperimentalnog merenja prostornog polja pomeranja i deformacija na mestima geometrijskih diskontinuiteta struktura, odnosno na mestima spoja dve ljuske.

Ekstenzometrijski metod, zajedno sa naponsko-optičkim metodama i nekim posebnim metodama, jesu metode eksperimentalne analize u konstruisanju. Najčešće korišćene ekstenzometrijske metode su merne trake i mehanički ekstenzometri. To su metode gde se pomoću mehaničkih ili električnih uređaja dobijaju lokalne veličine deformacija ispitivane konstrukcije.

Metod mernih traka se koristi za merenje lokalnih deformacija na realnim konstrukcijama i fizičkim modelima. Glavna mana ove metode u primeni na strukturama kompleksne geometrije je upravo lokalno merenje, odnosno nemogućnost prikazivanja kompletnog polja deformacija po celoj površini konstrukcije ili modela. Mehanički ekstenzometri služe za merenje lokalne deformacije mehaničkim putem. Ova metoda je brza i efikasna, ali je poput metode mernih traka ograničena na merenje lokalnih veličina.

Koristeći prethodno navedene konvencionalne eksperimentalne metode, moguće je samo lokalno merenje deformacija, i to na mestima gde nema uticaja geometrijskih diskontinuiteta. Dugi niz godina, konvencionalni pristup se zasnivao na rezultatima dobijenim ispitivanjima glatkih uzoraka sa faktorima koncentracije napona koji su primenjeni za geometrijske diskontinuitete. Kako bi se unapredili numerički modeli i omogućila preciznija i kompletnija analiza struktura kompleksnih geometrija, potrebno je izvršiti eksperimentalna merenja primenom metoda koje omogućavaju merenje polja

pomeranja i deformacija i na mestima velikih geometrijskih diskontinuiteta. Jedna od savremenih metoda koja pomeranja može da izmeri i za vrednosti do 1 μm i omogućava da se bolje karakteriše ponašanje, kako standardizovanih epruveta, tako i kompleksnih struktura podvrgnutih opterećenju je **metoda korelacije digitalnih slika**. Generalno gledano, merenja kompletnih polja pruža mogućnost da se premosti razlika između eksperimenta i simulacija omogućavajući direktna poređenja pomeranja i deformacija [22].

1.2.1. Metoda korelacije digitalnih slika

Metoda korelacije digitalnih slika (engl. Digital Image Correlation - **DIC**) je nastala početkom osamdesetih godina dvadesetog veka [22] u mehanici krutog tela, a mnoge procedure, koje su dostupne danas, su zasnovane na metodi korelacije slika, ranije razvijenoj i u mehanici fluida. U daljem tekstu će biti prikazan kratak pregled razvoja dvodimenzionalne i trodimenzionalne metode korelacije digitalnih slika (2D-DIC i 3D-DIC) [40].

Jedan od najranijih radova koji predlaže upotrebu tehnike digitalnih slika za merenje deformacija su napisali Peters i Ranson [41]. Zanimljivo je da je originalna primena predviđena za analizu slika unutrašnje strukture dobijenih korišćenjem ultrazvučnih talasa. Njihov rad opisuje kako digitalne ultrazvučne slike čvrstog tela, podvrgnutog dvodimenzionalnom opterećenju, mogu biti analizirane za određivanje prosečne vrednosti pomeranja u ravni i gradijenta pomeranja objekta. Oni su predložili dobijanje celih polja izmerenih vrednosti poređenjem položaja malih oblasti na digitalnim slikama pre i posle izlaganja opterećenju. U svom radu [41] su tvrdili da su fundamentalni koncepti mehanike kontinuuma, koji se odnose na deformacije malih oblasti, savršeni za razvoj numeričkih algoritama.

Među ranim radovima, tri su od posebnog značaja [40]. Prvo, u radu Chu-a i grupe autora [42] su istaknute teorijske osnove i prezentovani eksperimentalni rezultati koji pouzdano pokazuju da metoda može biti iskorišćena za precizno merenje deformacija čvrstog tela. Drugo, radovi Sutton-a i grupe autora [43] su prikazali nov pristup za

određivanje površinskih deformacija upotrebom Newton-Raphson metode za optimizaciju. Newton-Raphson metoda, koja i do danas predstavlja osnovu dvodimenzionalne DIC metode, je dovela do višestrukog povećanja brzine bez gubitaka u preciznosti. Treće, modelovanje koje su sprovedi Sutton i grupa autora [44] je pokazalo da su osnovni parametri koji utiču na preciznost merenja površinskih deformacija dobijeni 2D DIC Newton-Raphson metodom (a) broj nivoa kvantizacije u procesu pretvaranja u digitalni oblik (npr.: broj bita u A/D konvertoru za konvertovanje intenziteta svetlosti u digitalnu vrednost), (b) odnos frekvencije uzorkovanja i frekvencije intenziteta signala (npr.: broj senzora u kameri korišćenih za snimanje datog uzorka) i (c) korišćenje funkcija interpolacije za rekonstrukciju šeme intenziteta na pod-piksel lokacijama.

Prva trodimenzionalna merenja pomeranja je sproveo McNeill 1988. godine [40]. Koristeći poznato horizontalno pomeranje jedne kamere da bi dobio dva snimka objekta, McNeill je kalibrisao jednostavan sistem stereovizije i pokazao da oblik nagnutog ravnog objekta može biti precizno izmeren. Godine 1991, Luo i grupa autora [55] su uspešno razvili stereovizijski sistem sa dve kamere za merenje deformacija i primenili ih na probleme mehanike loma [56, 57]. Da bi prevazišli ključna ograničenja metode (neusklađenost prilikom triangulacije odgovarajućih tačaka, proces kalibracije koji je naporan i dugotrajan), Helm i grupa autora [58,59] su uspešno razvili stereovizijski sistem sa dve kamere koji (a) uključuje uticaje perspektive na oblik malih posmatranih površina, (b) ograničava analizu na epipolarne linije i (c) pojednostavljuje proces kalibracije sistema. Merni sistem za trodimenzionalnu korelaciju digitalnih slika (DIC-3D) ima širok spektar primene, kako na male, tako i na velike strukture.

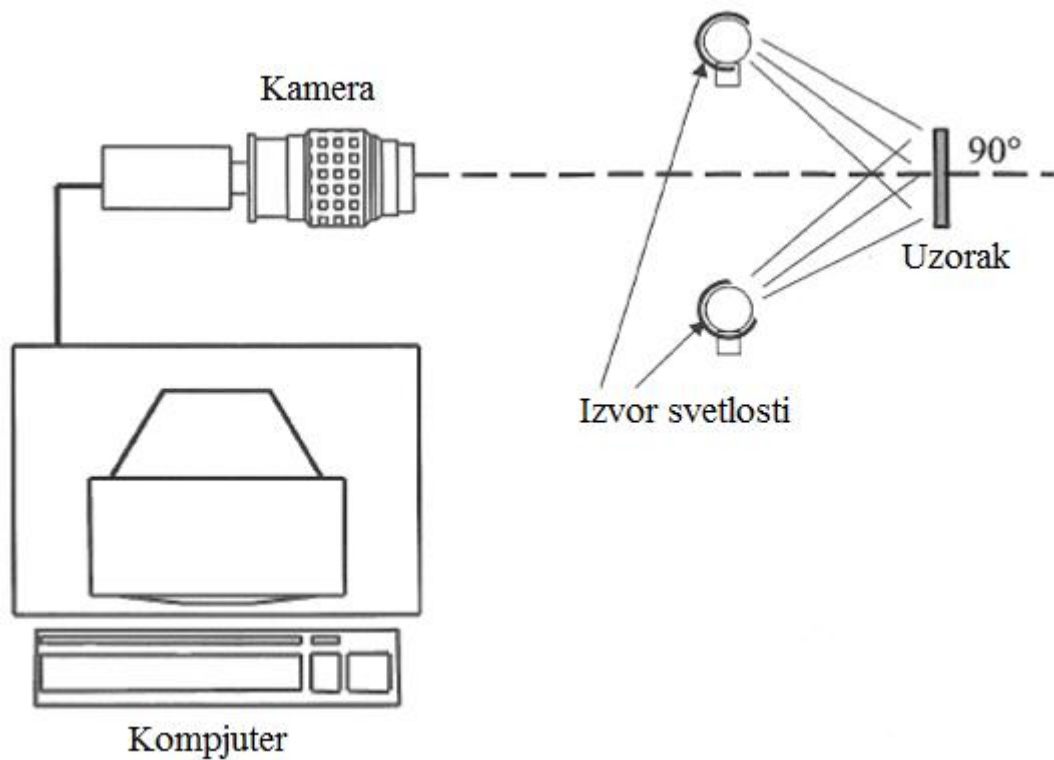
1.2.1.1. Osnovni principi rada

Osnova za dvodimenzionalnu korelaciju slika za merenje površinskih pomeranja je uparivanje jedne tačke na slici objekta pre izlaganja opterećenju (nedeformisano stanje) sa tom tačkom na slici objekta posle opterećivanja (deformisano stanje) [40]. Pretpostavljajući podudaranje deformacija na slici snimljenoj kamerom i deformacijama na površini objekta, precizno mapiranje svih tačaka od nedeformisane slike do

deformisane slike omogućava merenje pomeranja na površini objekta. Dva glavna uslova moraju biti ispunjena za uspešnu primenu 2D-DIC.

Prvo, 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.

Drugo, kamera mora biti pozicionirana tako da površina senzora bude paralelna sa površinom ravnog objekta, kao što je prikazano na slici 1.10.

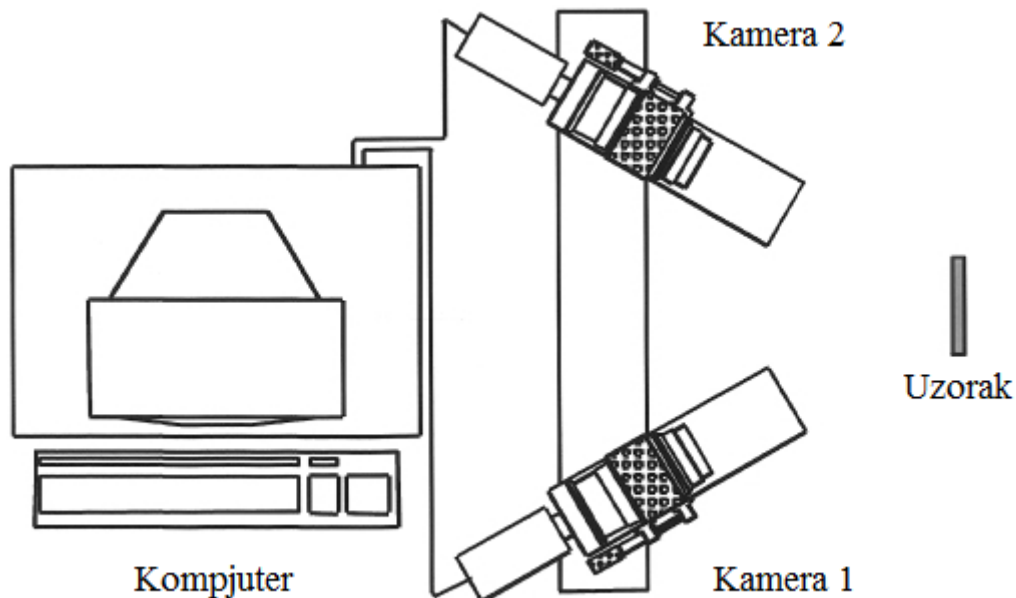


Slika 1.10. Šema sistema za dvodimenzionalnu korelaciju digitalnih slika (2D-DIC)

[40]

DIC sistemi sa jednom kamerom su ograničeni na primenu na ravne uzorke koji se malo ili nimalo pomeraju. Ovo ograničenje može biti prevaziđeno korišćenjem druge kamere koja snima površinu iz drugog ugla. Trodimenzionalna korelacija digitalnih slika (3D-DIC) je zasnovana na jednostavnom modelu binokularnog gledanja. U principu, model

binokularnog gledanja je sličan ljudskoj percepciji dubine. Poređenjem položaja odgovarajućih malih oblasti na slikama površine objekta snimljenim sa dve kamere, mogu se dobiti informacije o obliku objekta. Zatim, poređenjem promena između slika pre i posle izlaganja opterećenju, celo polje trodimenzionalnih pomeranja može biti izmereno. Za merenje samog oblika objekta, kao i za merenje pomeranja su neophodni precizni podaci o položaju i radnim karakteristikama korišćenih kamera. Za dobijanje tih podataka, za kamere se mora razviti i koristiti kalibracioni proces koji precizno definiše potrebne parametre. Šema sistema za trodimenzionalnu korelaciju digitalnih slika (3D-DIC) je prikazana na slici 1.11.



Slika 1.11. Šema sistema za trodimenzionalnu korelaciju digitalnih slika (3D-DIC) [40]

1.2.2. Primeri primene eksperimentalnih metoda, prednosti i nedostaci

Merne tehnike koje mere cela polja pomeranja i deformacija se mogu iskoristiti na različite načine [22, 45, 59]:

- Za kontrolu i praćenje eksperimenta korišćenjem optičkih metoda nasuprot konvencionalnim mernim trakama i ekstenzometrim [30-33, 36, 37, 66, 76, 77].

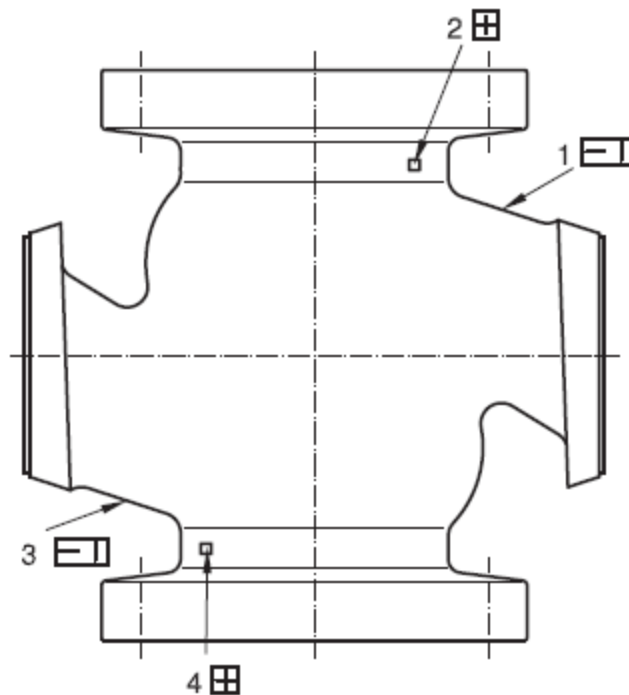
- Za verifikaciju metode konačnih elemenata (MKE) [50, 51, 61, 63, 64, 69, 70, 74] ili teorijskih analiza [52] i da premoste prazninu između eksperimenta, simulacije i teorije.
- Za ispitivanje heterogenih materijala ili struktura [30-32, 36, 37, 70, 71] za koje pojedinačno merenje (npr.: korišćenje mernih traka, ekstenzometara) nije dovoljno da se u potpunosti prati eksperiment, kao i kada nije prethodno poznata prostorna heterogenost (npr.: lokalizacija deformacija [84, 85], lokalizacija oštećenja [23] ili inicijacija i propagacija prsline [24, 64]).
- Za proučavanje eksperimenata korišćenjem bezkontaktnih tehnika. Ovo pruža korisna rešenja za agresivne i korozivne sredine, ili za tela na koje nije moguće primeniti merne trake. DIC se može neposredno koristiti za kvantitativno određivanje deformacionog polja i definisanje mehanizama deformacije različitih materijala [25, 28, 29, 33-35, 38, 53-58, 62-65, 67, 68, 72, 74, 77] (npr.: metali, polimeri, kompoziti, biomaterijali, drvo i papir, mineralna vuna, beton, kosti, tkivo).
- Za određivanje karakteristika materijala (Jungov moduo elastičnosti [46-48, 76, 77], Poasonov koeficijent [46-48, 77], faktor koncentracije napona [49]) ili validaciju konstitutivnih modela [26-28, 30-33]. Detaljan opis elastičnih karakteristika materijala se može naći u preglednim radovima [22, 50].
- Za merenje na mikro i makro nivou (male i velike strukture) [24, 52, 60, 75, 76] zavisno od uvećanja CCD kamera, kao i za male i velike vrednosti deformacija (od stotih delova do nekoliko stotina procenata) [73].

Prednosti 2D-DIC metode su (a) jednostavna kalibracija, (b) lakoća nanošenja šablona na površinu objekta za merenje pomeranja i deformacija, (c) softver i sistem koji su lako primenljivi za realne probleme, (d) dobro definisana greška merenja pomeranja i (e) mogućnost da se sistem koristi i za male i za velike površine. Glavni nedostaci 2D-DIC metode su (a) pomeranja uzorka u toku merenja moraju biti minimalna kako bi se obezbedila precizna merenja pomeranja i (b) površina merenog objekta treba da bude što je moguće više ravna pre i posle deformisanja. Što se tiče 3D-DIC metode, prednosti su (a) mogućnost merenja i ravnih i zakrivljenih površina, (b) mogućnost merenja celog polja trodimenzionalnih površinskih pomeranja, (c) dostupnost softvera koji

pojednostavljaju proces akvizicije i analize slika, (d) potencijal primene metode za merenje malih i velikih struktura i (e) potpuno digitalno snimanje, koje omogućuje i merenja u realnom vremenu. Trenutni nedostaci su (a) cena celokupnog sistema i (b) potreba za preciznim kalibracionim pločama za kalibraciju sistema za različite dimenzije objekata koji se mere.

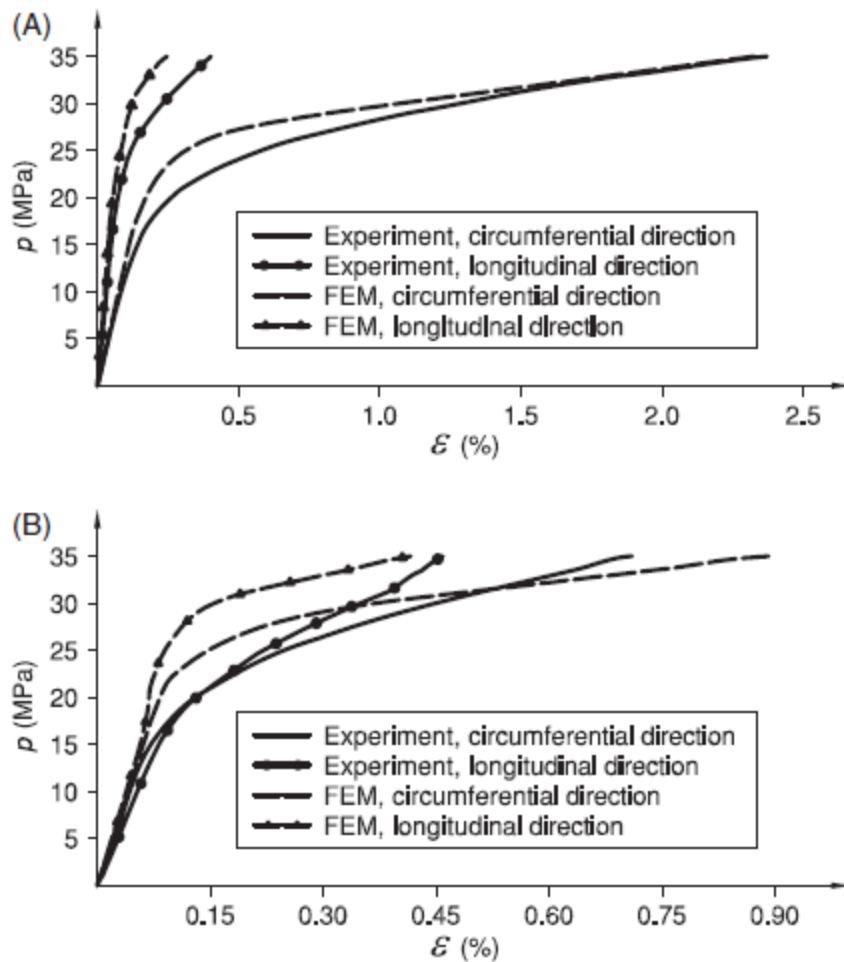
1.2.3. Konvencionalne eksperimentalne metode

Rad [17] analizira čvrstoću kućišta ventila DN100 i PN40 (slika 1.13), opterećenog hidrostatičkim pritiskom, odnosno određuje vrednosti dozvoljenih i kritičnih pritisaka. Analiza je sprovedena primenom metode konačnih elemenata uz eksperimentalna istraživanja, a dobijeni rezultati su poređeni sa analitičkim proračunom definisanim međunarodnim standardom EN 12516-2, koji se koristi za proračun debljine kućišta ventila. Merne trake su postavljene na četiri različite pozicije, kao što je prikazano na slici 1.12. Svaka merna traka ima normalno postavljenu mernu mrežu, koja je orijentisana u uzdužnom i obodnom pravcu u skladu sa lokalnom geometrijom kućišta. Radi lakšeg praćenja rezultata, merne trake na pozicijama 1 i 3 i pozicijama 2 i 4 su postavljene tako da daju iste rezultate. Rezultati u radu su prikazani za hidrostatički pritisak do 35 MPa, pošto za više vrednosti pritisaka dolazi do porasta deformacija koje merne trake ne mogu da izmere dovoljno precizno. Do pucanja kućišta ventila je došlo na pritisku od 69,5 MPa.



1.12. Pozicija i orijentacija mernih traka [17]

Na slici 1.13 A i B, uporedni prikaz eksperimentalnih i numeričkih rezultata je dat na dijagramu pritisak/deformacija. Na osnovu eksperimentalnih i numeričkih rezultata, pritisak plastičnog loma kućišta je posebno određen na pozicijama mernih traka 1 i 3 i za pozicije 2 i 4. Na dijagramu pritisak/deformacija je prikazana komponenta se većom vrednošću deformacije. Pokazano je da se rezultati pritiska plastičnog loma dobijeni numeričkim modelom dobro podudaraju sa eksperimentalnim rezultatima. Rezultatske razlike se javljaju na velikim geometrijskim diskontinuitetima zbog nedovoljno precizno postavljenih mernih traka na samom kućištu. Rezultati takođe pokazuju da je dozvoljeni pritisak, određen primenom standarda EN 12516-2, blizak vrednostima koje su dobijene eksperimentalnim putem i metodom konačnih elemenata.

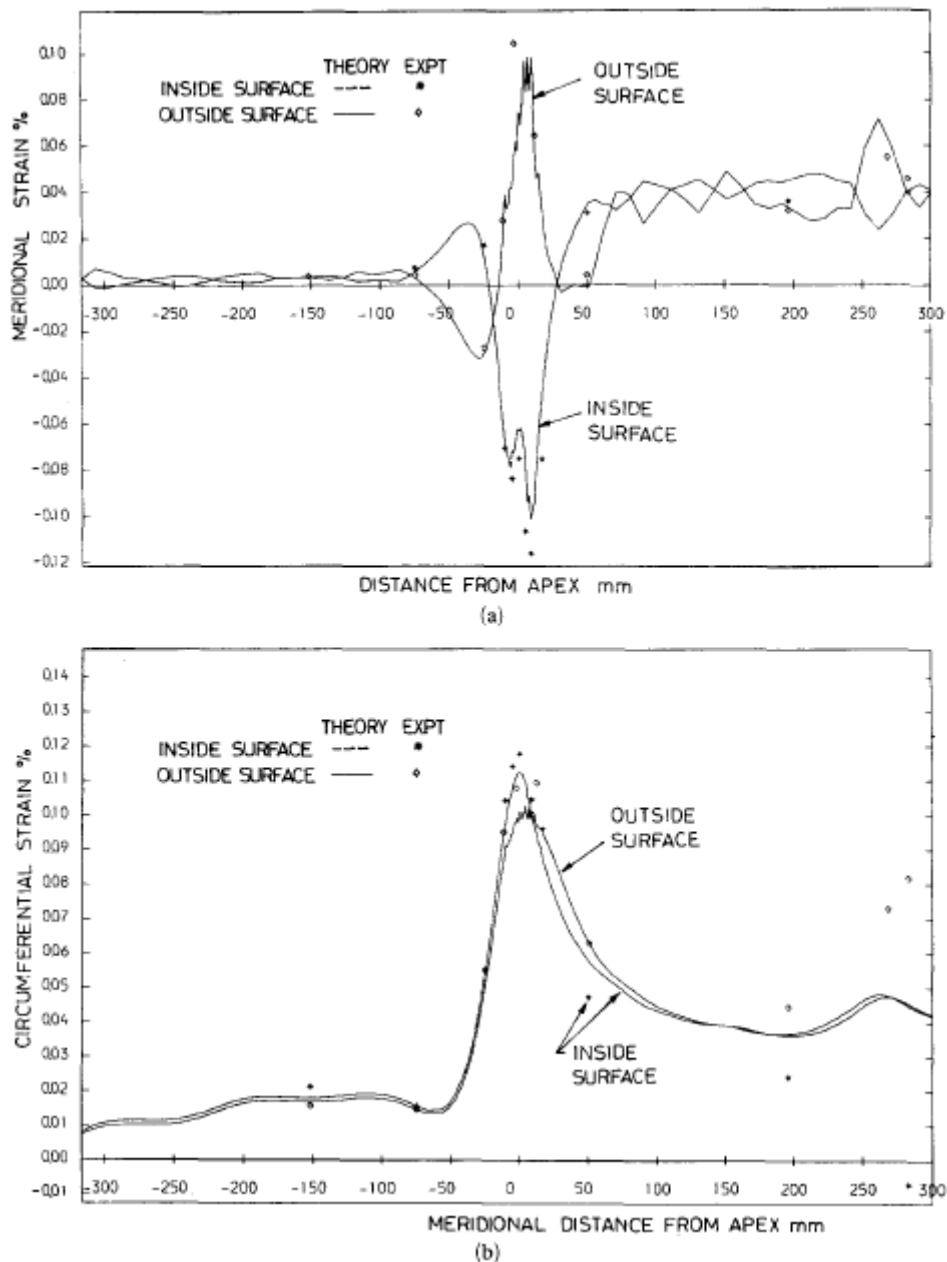


1.13. Poređenje numeričkih i eksperimentalnih rezultata: (A) merna traka na poziciji 1 i (B) merna traka na poziciji 2 [17]

Soden i grupa autora su u radu [16] eksperimentalno i teorijski analizirali raspodelu deformacija na dve sferne posude pod pritiskom od fiberglasa sa radijalno postavljenim priključcima, pri čemu je na jednoj od posuda ojačanje oko priključka. Merne trake su postavljene na spoljašnjoj i unutrašnjoj površini posude u uzdužnom i obodnom pravcu. Posude su opterećene unutrašnjim pritiskom. Pritisak u posudi je postepeno povećavan do maksimalno izmerene deformacije od 0,2%, a onda je posuda rasterećena. Teorijska analiza je sprovedena pod istim uslovima kao i eksperimentalna analiza, radi poređenja rezultata, pri čemu su vrednosti unutrašnjeg pritiska izabrane tako da materijal posude bude u zoni elastičnosti. Eksperimentalni rezultati, kao i rezultati dobijeni metodom konačnih elemenata su dati na slici 1.14, gde je prikazana raspodela uzdužnih i obodnih deformacija za posudu bez ojačanja opterećenu unutrašnjim pritiskom od 83 kPa. Kao

što se vidi sa slike 1.14, najveće vrednosti uzdužnih i obodnih komponenti deformacija se javljaju na spoju sfera/priključak. Raspodela deformacija dobijena analitičkim putem se dobro slaže sa eksperimentalnim rezultatima, osim za oblast spoja sfere i priključka.

Nakon sprovedenih eksperimentalnih merenja, posude su opterećivane do pucanja. Do pucanja je došlo na spoju sfere i priključka na pritisku od 962 kPa.



1.14. Raspodela deformacija za posudu bez ojačanja: (a) raspodela deformacija po uzdužnom pravcu i (b) raspodela deformacija po obodnom pravcu [16]

1.3. Zaključak

Dosadašnja istraživanja prikazana u prethodnim pasusima su se oslanjala na analitičke proračune i numeričke analize, pri čemu se verifikacija sprovodila eksperimentalnim metodama koja nisu pružala potpunu sliku o ponašanju kompleksnih struktura. Za eksperimente su najčešće korišćene merne trake, pri čemu je veliki uticaj na izbor položaja merne trake na posudi imalo prethodno iskustvo istraživača. Kao što je već rečeno, takva merenja su bila izrazito lokalnog karaktera, odnosno merne traku su merile deformaciju u samo jednoj tački. U takvoj situaciji je korišćena ograničena količina podataka koja se koristila za verifikaciju numeričkog modela. Ono što takođe predstavlja veliko ograničenje ove metode je i nemogućnost postavljanja mernih traka direktno na mesta geometrijskih diskontinuiteta, a samim tim i merenja vrednosti najvećih deformacija koje se javljaju na oštrim prelazima kompleksnih strukturama. Takođe, u toku same pripreme eksperimenta, odnosno postavljanja mernih traka na posudu, dolazi do malih odstupanja od uzdužnih i obodnih pravaca, što direktno utiče na preciznu verifikaciju numeričkog modela. Ono sa čim se svi istraživači čiji su radovi navedeni slažu je da se u postojećoj literaturi ne može naći dovoljno eksperimentalnih podataka za problematiku vezanu za kompleksnu geometriju koji bi se mogli upotrebiti za bolje shvatanje problema koji se javljaju na realnim strukturama.

Jedan od ciljeva ove teze je da pokuša da prevaziđe navedene probleme, odnosno da pokuša da pokaže da je moguće primeniti relativno novu metodu digitalne korelacije slika koja prevazilazi ograničenja metode mernih traka, na slučajevima struktura kompleksne geometrije u oblasti cevovodne armature. Metoda korelacije digitalnih slika omogućava merenje celih polja pomeranja i deformacija i jednim eksperimentalnim merenjem se dobija ogroman broj podataka koja zamenjuje više desetina mernih traka i značajno smanjuje vreme pripreme eksperimenta, a samim tim i troškove. S druge strane, kako se metodom konačnih elemenata dobija kompletno polje pomeranja i deformacija, sama verifikacija se mnogo jednostavnije sprovodi poređenjem sa rezultatima koji su predstavljeni na isti način. Eksperimentalno merenje celih polja deformacija omogućuje precizno određivanje mesta kritičnih, odnosno najvećih

deformacija, kao i pravce glavnih deformacija koje omogućava bolju teorijsku analizu kompleksnih struktura.

POGLAVLJE 2

ANALITIČKI PRORAČUN GEOMETRIJE KUĆIŠTA VENTILA

Analitički proračun čvrstoće ventila se sprovodi po proceduri i formulama definisanim u standardu SRPS EN 12516. Standard se odnosi na industrijsku armaturu, odnosno na čvrstoću kućišta industrijske armature. Standard se sastoji iz četiri dela:

- Deo 1: Tabela postupak za proračun tela čelične armature,
- Deo 2: Proračunski postupak za proračun tela čelične armature,
- Deo 3: Eksperimentalni postupak,
- Deo 4: Proračunski postupak za proračun tela armature proizvedenih od metalnih materijala različitih od čelika.

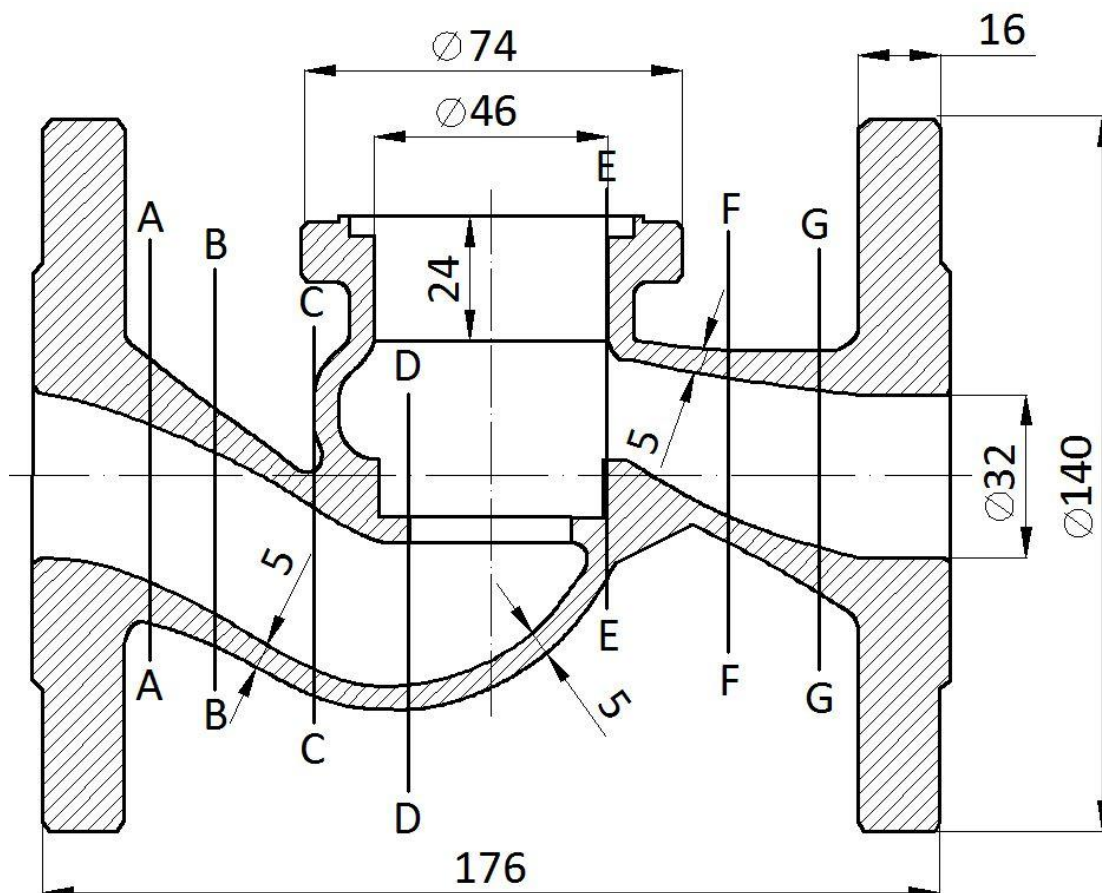
Delovi 1 i 2 utvrđuju postupke za određivanje debljine tela čeličnih armatura tabelarnim, odnosno proračunskim postupkom. Deo 3 utvrđuje eksperimentalni postupak za ocenu čvrstoće tela armatura napravljenih od čelika, livenog gvožđa, kao i ispitivanje tipa primenom povećanog hidrostatičkog pritiska na temperaturi okoline. Deo 4 utvrđuje postupak za proračun debljine delova tela metalnih armatura različitih od čelika.

Za potrebe izrade ove disertacije je korišćen proračunski postupak definisan u standardu SRPS EN 12516-2:2010, koji je zasnovan na standardu DIN 3840, gde se od inženjera zahteva da izračuna debljinu zida za svaku tačku na krivoj pritisak-temperatura, koristeći dozvoljeni napon pri toj temperaturi za odabrani materijal. Dozvoljeni napon se proračunava iz svojstava materijala korišćenjem stepena sigurnosti koji su definisani u Delu 2. U jednačinama dela 2 standarda SRPS EN 12516 armatura se smatra opremom pod pritiskom; korišćenjem tih jednačina obezbeđuje se da ne dođe do preteranih deformacija niti do plastične nestabilnosti.

Debljina zida kućišta armature koje se sastoji iz po geometriji različitih komponenti (geometrijski kompleksne strukture) se ne može direktno proračunati. Proračun se zbog toga izvodi u dva koraka:

- proračun debljine dela zida osnovnog kućišta i ogranka van preseka odnosno područja račvanja;
- proračun debljine dela zida u području račvanja (otvora).

Debljina zida kućišta cevne armature se proračunava za karakteristične poprečne preseke (od A-A do G-G) koji su prikazani na slici 2.1. Koja će formula biti korišćena, zavisi od oblika poprečnog preseka. Poprečni presek može biti cilindrični, ovalni i/ili četvorougaoni (pravougaoni), kao i kombinacija prethodno navedenih. Izgled oblika karakterističnih poprečnih preseka je dat na slici 2.2.

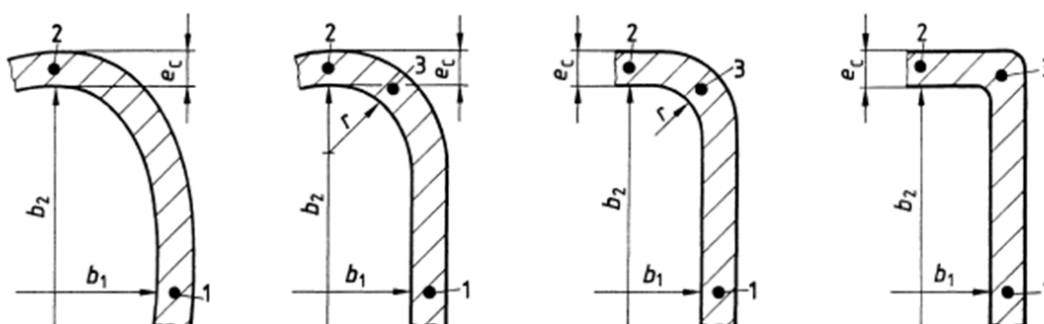


Slika 2.1. Položaj karakterističnih poprečnih preseka i dimenzije kućišta ventila

U slučaju poprečnih preseka ovalnog oblika (slika 2.2a) i pravougaonog oblika sa ili bez

zaobljenih uglova (slike od 2.2b do 2.2d), dodatni naponi savijanja koji se pojavljuju u zidovima ili u uglovima, moraju se uzeti u obzir. Naponi savijanja se uzimaju u obzir kroz proračunske koeficijente.

Za slučaj kada je poprečni presek ovalnog i/ili četvorougao oblika, proračun se mora izvršiti imajući u vidu mesta 1 i 2 (označene na slici 2.2a za poprečne preseke ovalnog oblika) i imajući u vidu mesta 1 i 3 (označene na slikama od 2.2b do 2.2d za poprečne preseke pravougaonog oblika), zbog toga što momenti savijanja imaju preovlađujući uticaj na čvrstoću i imaju najveće vrednosti na gore pomenutim mestima.



a) Ovalni presek

b) Pravougaoni,
zaobljen sa
jedne strane

c) Pravougaoni,
sa zaobljenim
uglom

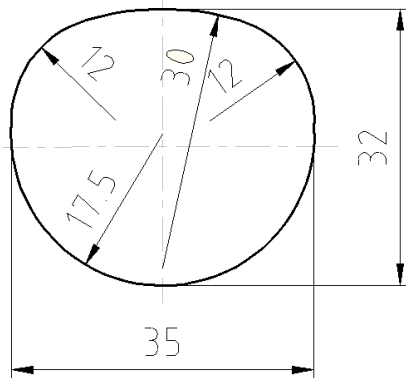
d) Pravougaoni,
bez zaobljenja
ugla

Slika 2.2. Oblici karakterističnih poprečnih preseka [4]

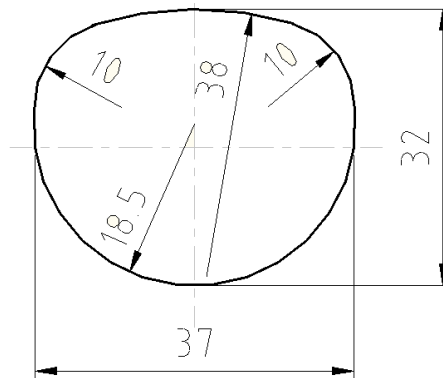
Direktan proračun debljine zida u oblasti račvanja nije moguć. Kao prvi korak, debljina zida u ovoj oblasti se mora pretpostaviti, i ova pretpostavka se takođe može izvesti iz proračuna za debljinu zida. Ova pretpostavljena debljina zida mora se proveriti razmatranjem ravnoteže sila. Prelazno područje je ovde ograničeno odstojanjima l , kao što je prikazano na slici 1.2.

Debljina zida kućišta ventila se proračunava za karakteristične poprečne preseke (od A-A do G-G). Tačan položaj poprečnih preseka je prikazan na slici 2.1. Dimenzije i oblik svakog od proračunavanih preseka (od A-A do G-G) je prikazan na slici 2.3.

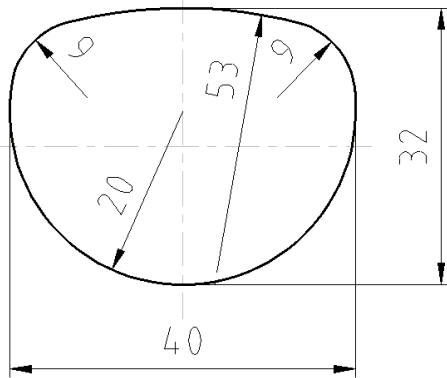
Presek A-A



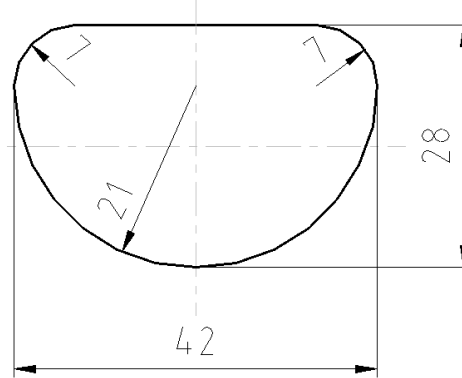
Presek B-B



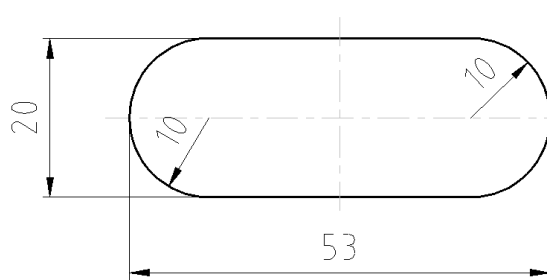
Presek C-C



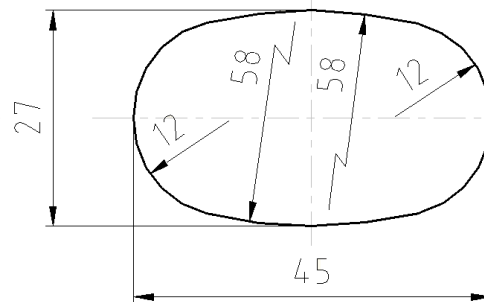
Presek D-D



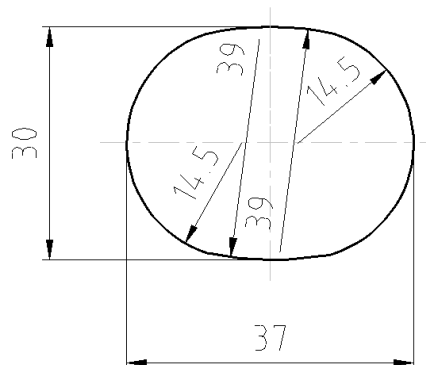
Presek E-E



Presek F-F



Presek G-G



Slika 2.3. Oblik i dimenzije poprečnih preseka

Proračun je sproveden za ventil DN 32 i PN 6 čije je kućište izrađeno od materijala GG25 (EN GJL-250). Karakteristike materijala GG25 su date u tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Karakteristike materijala kućišta ventila

GG25	$R_{p0.1}$	R_m	E	A
(EN GJL-250)	200 MPa	250 MPa	$(1,03-1,18) \times 10^{11}$ Pa	0,8-0,3 %

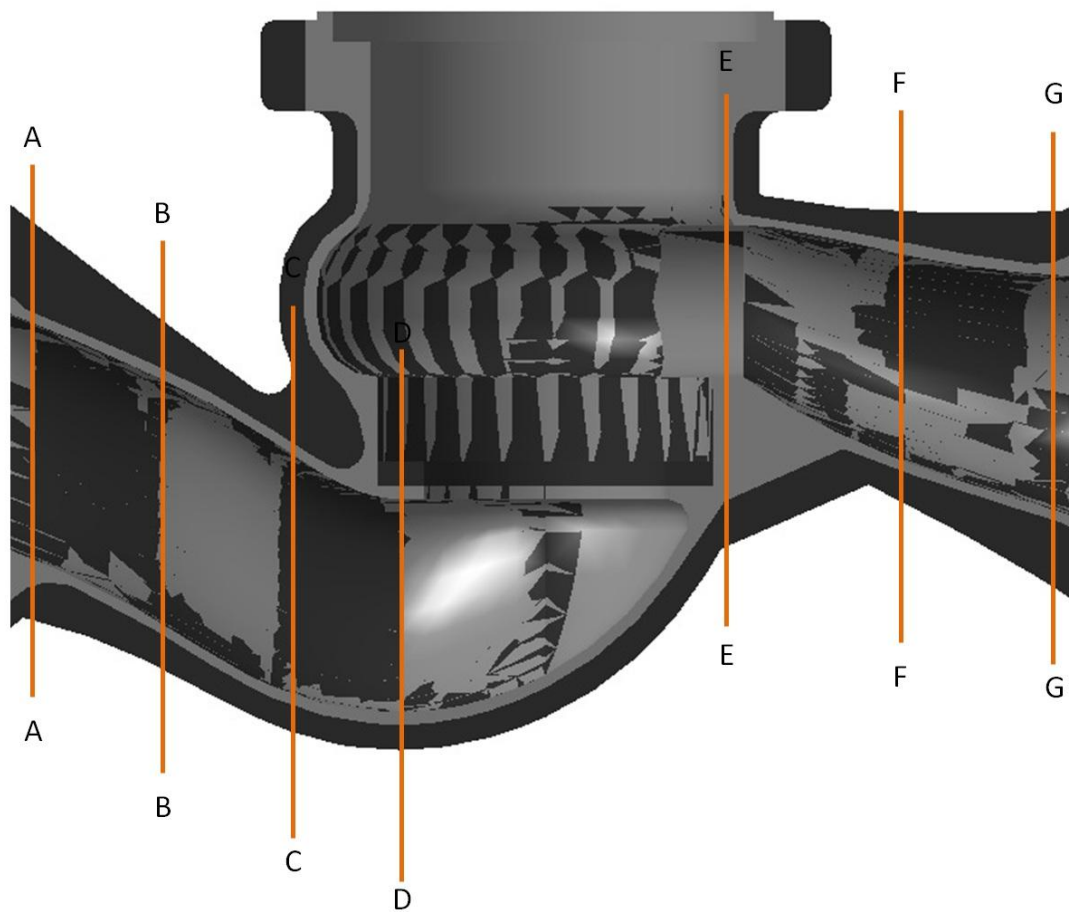
Pregled rezultata proračuna za svaki od poprečnih preseka za osnovne delove kućišta je dat u tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Izračunate debljine zida po presecima za karakteristična mesta

Deo	Cilindrični	Ovalni		Četvorougaoni		
Oznaka	e_c [mm]	e_{c0} [mm]		e_{c0} [mm]		
Presek A -A	1.11	1.45	1.61	/	/	/
Presek B -B	1.12	1.54	1.74	/	/	/
Presek C -C	1.13	1.62	1.85	/	/	/
Presek D -D	1.13	/	/	1.67	1.96	1.75
Presek E - E	/	/	/	1.8	2.21	1.87
Presek F -F	/	1.63	1.86	/	/	/
Presek G -G	/	1.38	1.52	/	/	/

Debljine zidova kućišta ravnog zapornog ventila, za svaki od poprečnih preseka su znatno manje od primenjenih debljina, koje iznose oko 5 mm (podatak dobijen od proizvođača armature). Razlika između debljine zida kućišta dobijene proračunom i stvarne je prikazana na slici 2.4. Svetlo sivom bojom je prikazana debljina dobijena proračunom, a tamno sivom razlika između izvedene i proračunate debljine zida.

Velika razlika u proračunatoj i izvedenoj debljini zida kućišta se javlja usled same tehnologije proizvodnje kućišta ventila. Naime, kako je kućište ventila odlivak, tako se zbog procesa livenja moraju uvesti odgovarajući dodaci.



Slika 2.4. Proračunska i stvarno izvedena debljina zida kućišta ventila

POGLAVLJE 3

TRODIMENZIONALNO OPTIČKO MERENJE DEFORMACIJA

U toku eksploatacije neke strukture, uvek je bilo važno odrediti veličinu njene deformacije i uticaj te deformacije na ponašanje u radu. U početku se pribegavalo izradi strukture i njenim praćenjem u radu, ali je takav način provere neekonomičan i brzo se napustio. Zatim se počelo sa ispitivanjem svojstava materijala na epruvetama standardom definisanog oblika i dobijeni rezultati su se primenjivali kroz određeni matematički model na realne strukture.

Razvojem kompjuterske tehnologije, omogućena je primena metode konačnih elemenata na složene strukture koje je bilo nezamislivo proračunavati bez računara zbog obimnosti i mogućnosti pojave greške u proračunima. Nedostatak metode konačnih elemenata je u tome što se pri modeliranju ne mogu prikazati nedostaci materijala od kojeg je izrađena konstrukcija. Model koji se koristi za proračun konačnih elemenata predstavlja idealni model strukture, koji nam daje samo približne rezultate o deformacijama koje se javljaju na stvarnoj strukturi. Primenom savremenih eksperimentalnih metoda na proces razvoja i verifikacije numeričkih modela, napreduje se ka dobijanju modela koji verno predstavljaju ponašanje strukture i pod radnim opterećenjem, što nam omogućava bolje razumevanje ponašanja realnih struktura.

Kao deo lanca složenih procesa, sistemi za optičko merenje su poslednjih godina postali važan deo industrijskih procesa. Zajedno sa numeričkom simulacijom, ovi sistemi su postali značajan potencijal za unapređenje i optimizaciju vremena razvoja proizvoda i proizvodnje. Njegovom primenom, simulacije konačnih elemenata mogu postati pouzdanije.

U okviru ovog poglavlja su prikazane osnovne karakteristike sistema za optičko merenje pomeranja i deformacija, opisan je njegov način rada, kao i osnovna procedura

ispitivanja koju je neophodno sprovesti kako bi se obezbedilo ispravno i precizno merenje.

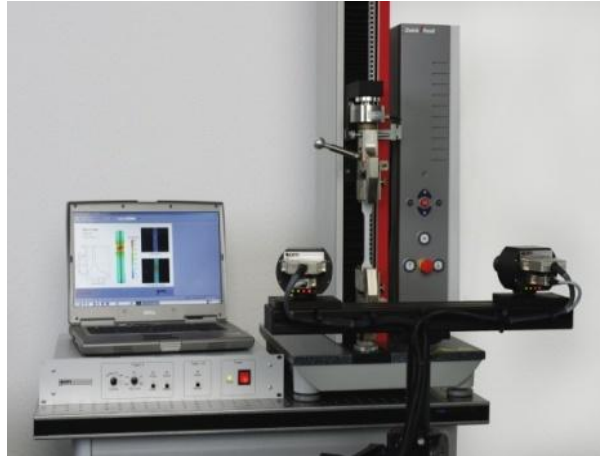
Programski paket *Aramis* zajedno sa opremom za optičko snimanje predstavlja sistem za analizu trodimenzionalnih pomeranja i deformacija, koji uspešno kombinuje preciznost laboratorijskog ispitivanja i praktičnost metode konačnih elemenata. Ovaj sistem služi za ispitivanje svih vrsta materijala (npr. čelici, kompoziti, polimeri i dr.) bez potrebe za postavljanjem dodatnih uređaja na konstrukciju, kao što su merne trake. Za statička i dinamička ispitivanja moguće je precizno odrediti trodimenzionalne koordinate površine, pomeranja i brzine pomeranja površine materijala, određivanja vrednosti površinskih deformacija.

3.1. Osnovni načini rada sistema za optičko merenje pomeranja i deformacija

Sistem za optičko merenje je bezkontaktni sistem za trodimenzionalno merenje pomeranja i deformacija. Grafičko predstavljanje izmerenih rezultata pomaže u razumevanju ponašanja merenih objekata pod opterećenjem.

Sistem za optičko merenje pomeranja i deformacija pamti strukturu površine merenog objekta u obliku digitalnih fotografija, a zatim dodeljuje koordinate svakom pikselu na slici. Prva slika objekta predstavlja nedeformisano stanje. Nakon ili tokom deformisanja objekta snimaju se dodatne slike, i zatim program upoređuje fotografije i računa pomeranja i deformacije karakterističnih delova objekta. Ako mereni objekat ima samo nekoliko karakteristika, kao što je slučaj sa homogenim površinama, onda je neophodna prethodna priprema takve površine odgovarajućom metodom, na primer na površinu je potrebno naneti stohastičnu šaru.

Sistem za optičko merenje pomeranja i deformacija se sastoji od posebnih setova stereo kamera i sočiva za svaki od softvera. Sistem još čine postolje koje omogućava sigurnost i stabilnost senzora, uređaj za kontrolu napajanja i snimanja slika, kao i PC sistem (slika 3.1).



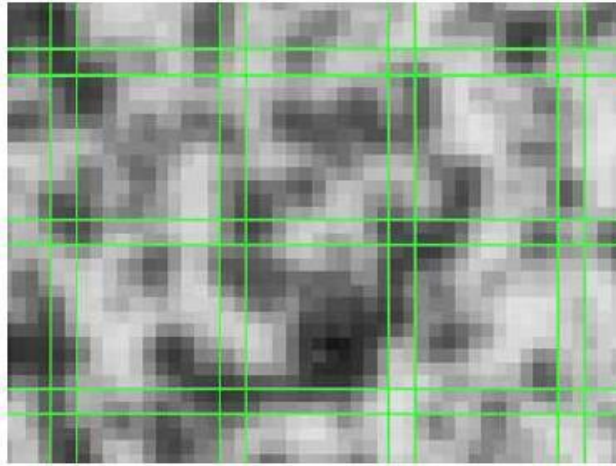
Slika 3.1. Aramis sistem [82]

Sistem za optičko merenje pomeranja i deformacija je naročito pogodan za merenje trodimenzionalnih pomeranja i deformacija nastalih statičkim ili dinamičkim opterećenjem i analizu deformacija realnih struktura.

3.1.1. Osnove merenja pomeranja

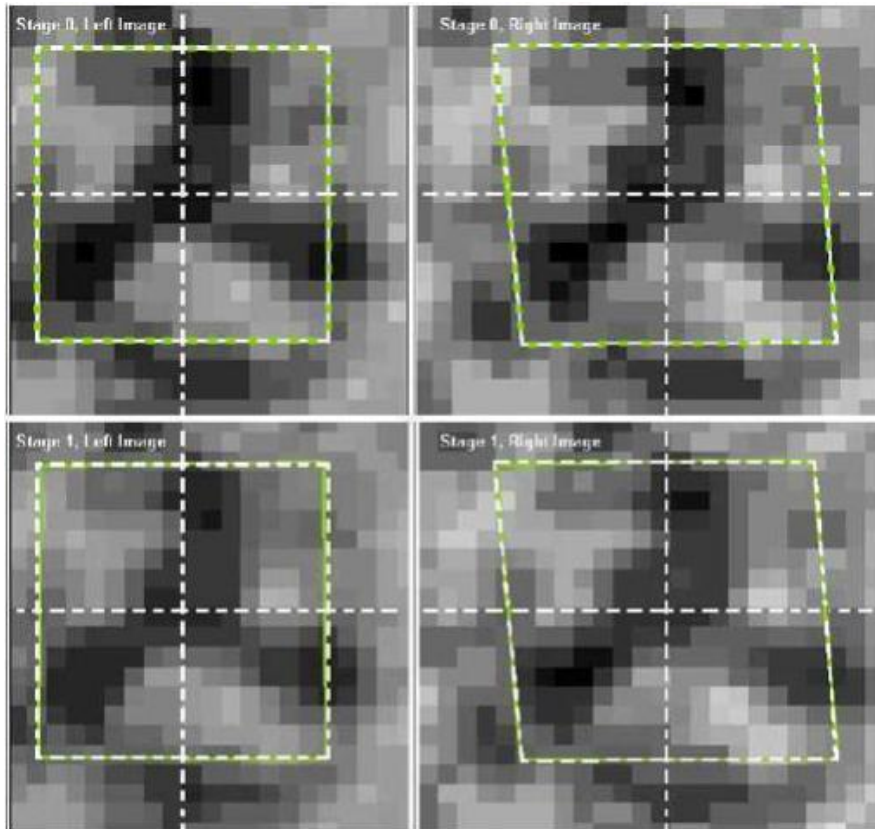
U opštem slučaju, senzor kamera se nalazi na postolju da bi se postigla optimalna pozicija u odnosu na uzorak. Za trodimenzionalno merenje koriste se dve kamere koje se podešavaju i pripremaju pre merenja. Uzorak se mora nalaziti unutar kalibrisane zapremine.

Nakon uspešno obavljene pripreme merenja, snimaju se slike (monohromatske, levom i desnom kamerom) na različitim stepenima opterećenja uzorka. Zatim se definiše oblast za procesiranje (proračunska maska), određuje se početna tačka i vrši se proračun rezultata merenja. Tokom proračuna program prati deformaciju uzorka pomoću snimljenih slika koje su izdvojene na kvadratne i pravougaone “male površine”. Na slici su prikazane “male površine” veličine 15x15 piksela sa preklapanjem od 2 piksela na početnom koraku.



Slika 3.2. "Male površine" veličine 15x15 piksela sa preklapanjem od 2 piksela

Moguće je podešavati veličinu "malih površina" u programu. Na slici 3.3 su prikazane "male površine" (15x15 piksela) sa leve i desne kamere, čije su vrednosti nivoa sive praćene kroz dva koraka opterećenja (od 0 do 1). Korak predstavlja snimak opterećenog objekta u različitim fazama opterećivanja. Korak 0 (nula) je nedeformisani korak, a korak 1 je konačno stanje deformisanosti. Na ovim slikama belom isprekidanom linijom je prikazano nedeformisano stanje radi boljeg objašnjenja odnosa između malih površina i deformacije.





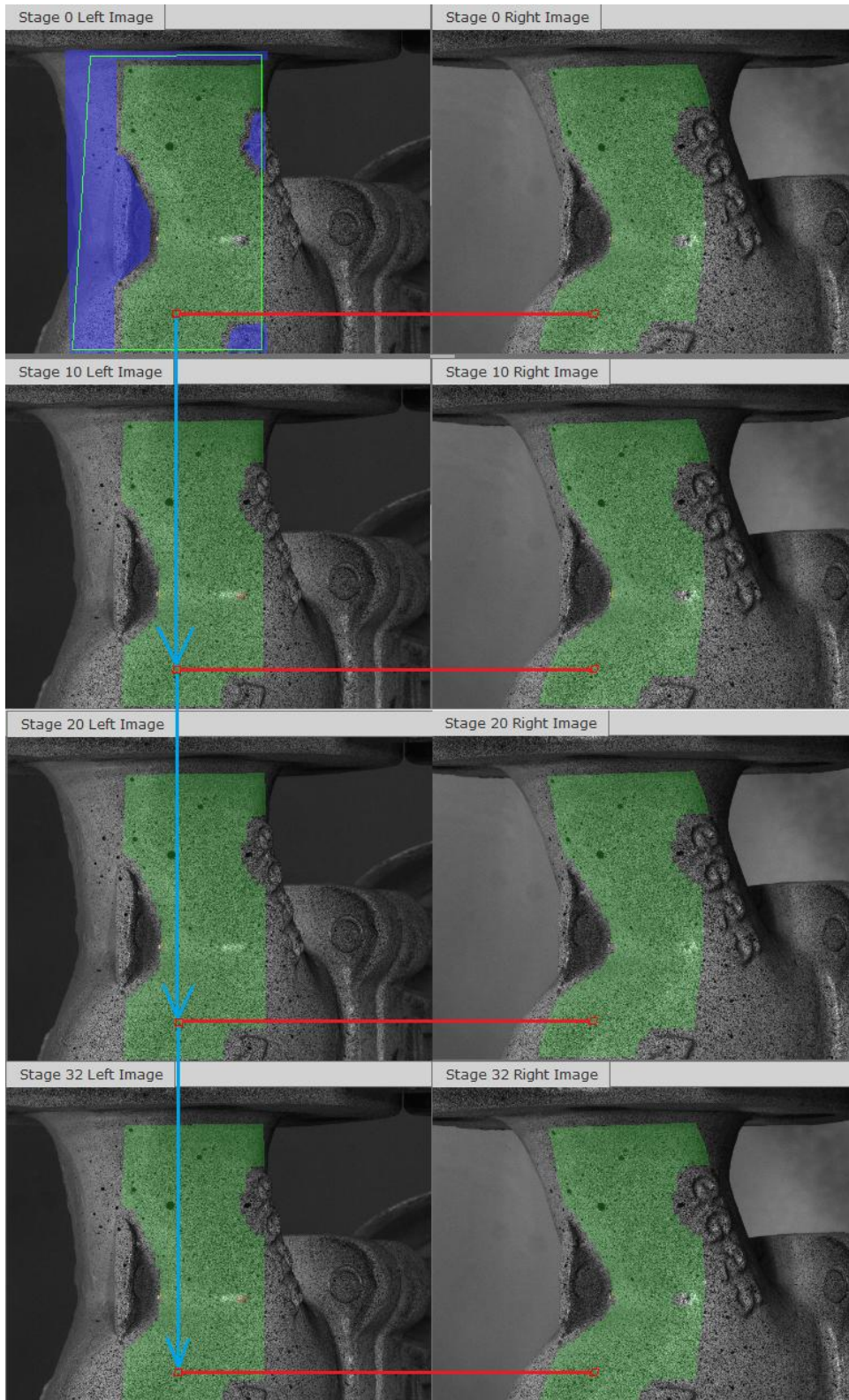
Slika 3.3. Promena malih površina kroz korake deformacije

Sistem određuje dvodimenzionalne koordinate „malih površina” na osnovu uglova zelene linije malih površina i rezultujućih centara. Korišćenjem postupka mernih slika, dvodimenzionalne koordinate „male površine” posmatrane kroz levu kameru i dvodimenzionalne koordinate iste „male površine” posmatrane kroz desnu kameru dovode do zajedničke trodimenzionalne koordinate. Nakon uspešnog proračuna, podaci mogu proći kroz proceduru naknadnog procesiranja, radi smanjenja šuma merenja ili radi otklanjanja lokalnih poremećaja. Izmereni rezultat je sada dostupan u trodimenzionalnom prikazu. Svi sledeći rezultati, kao što su statistika, sekcije, izveštaji i tako dalje, se dobijaju iz trodimenzionalnog modela.

3.1.2. Proračun deformacija „malih površina”

Koristeći jednu malu površinu, objašnjen je princip proračuna trodimenzionalnog modela kroz nekoliko koraka deformacija (slika 3.4):

- Proračun „malih površina” zahteva početne tačke u svim koracima. Definisanje tačke može biti manuelno ili automatski. Veličina „male površine” se određuje pri definisanju polja „male površine” za svako merenje. Za slučaj ispitivanja kućišta ravnog zapornog ventila u okviru disertacije je definisana „mala površina“ od 25x25 piksela i na slici 3.4 označena je crvenim pravougaonikom.
- Proračun počinje u nultom koraku.
-  Pri definisanju početne tačke, program u načelu prepoznaje poziciju „male površine” i njegovih susednih „malih površina” na dvodimenzionalnim slikama. Identifikacijom pojedinačnih šara „malih površina” na levoj i na desnoj slici sa kamera optimizuje se položaj pravougaone oblasti. Iz rezultujućih koordinata „malih površina” sa dvodimenzionalnih slika leve i desne kamere, program izračunava trodimenzionalnu poziciju male površine. Pozicija „male površine” se definiše u odnosu na globalni koordinatni sistem koji sistem definiše automatski.
-  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” počinje 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.



Slika 3.4. Primer toka proračuna malih površina kroz korake

3.2. Procedura merenja

Pre svakog merenja je neophodno podesiti odgovarajuće parametre da bi se izvelo samo merenje. Za pravilno izvođenje procedure merenja potrebno je izvršiti i sledeće:

1. Određivanje merne zapremine;
2. Pripremu uzorka, ukoliko nema odgovarajuću površinu potrebnu za snimanje;
3. Hardversko podešavanje sistema;
4. Kalibracija merne zapremine za slučaj merenja trodimenzionalnog modela;
5. Otvaranje novog projekta u programu i definisanje njegovih parametara (“male površine”, deformisanje, ključne reči, parametri koraka...);
6. Podešavanje načina snimanja slika, na primer jednostavno (*simple measurements*) ili brzo merenje (*fast measurements*);
7. Snimanje slika tokom merenja;
8. Definisanje veličine “malih površina”;
9. Definisanje proračunskog okvira (maske) u slikama za merenje tako da se samo bitne oblasti uzorka proračunavaju;
10. Definisanje početne tačke za postupak proračuna;
11. Proračun projekta;
12. Izbor načina prikazivanja rezultata;
13. Transformisanje projekta sa definisanim koordinatnim sistemom;
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 svim koracima;
16. Dokumentovanje rezultata (izveštaji, prikazivanje u drugim softverima...).

U daljem tekstu je dato detaljno objašnjenje najbitnijih koraka procedure ispitivanja.

3.2.1. Odabir odgovarajuće merne zapremine

Merna zapremina zavisi od veličine merenog tela ili od veličine oblasti koja se analizira. Potrebno je izabrati mernu zapreminu koju mereno telo ili oblast ispunjava što više. Takođe je bitno da mereno telo ostaje unutar merne zapremine u svim koracima

deformisanja. Ukoliko je potrebno prilagoditi mernu zapreminu, potrebno je i ponovo podesiti i kalibrisati senzor, kao što je opisano u daljem tekstu.

Dimenzije kućišta ventila (slika 2.1) su veće od dimenzija najveće merne zapremine (105 x 80 x 55 mm) sistema za 3D optičko merenje pomeranja i deformacija. Samim tim nije moguće izvršiti jednokratno merenje celog kućišta ventila, već je kućište ventila podeljeno na četiri merna mesta, koja su definisana u poglavlju 4 (slike 4.9 i 4.10).

3.2.2. Priprema uzorka

Struktura površine je veoma važna pri izvođenju merenja, pa površina uzorka mora da zadovolji sledeće zahteve:

- Površina merenog tela mora imati određenu šaru da bi se jasno izdefinisali pikseli na slikama sa kamera;
- Šara površine mora biti u mogućnosti da prati deformaciju uzorka i ne sme se slomiti ili izbrisati pre kraja eksperimenta;
- Optimalna površina je glatka. Izrazito hrapave površine mogu napraviti problem pri određivanju „malih površina” i proračuna trodimenzionalnih tačaka;
- Šara na uzorku mora da ima dobar kontrast jer u suprotnom dodeljivanje piksela neće biti uspešno;
- Šara na površini mora biti mat, odnosno bez sjaja. 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.

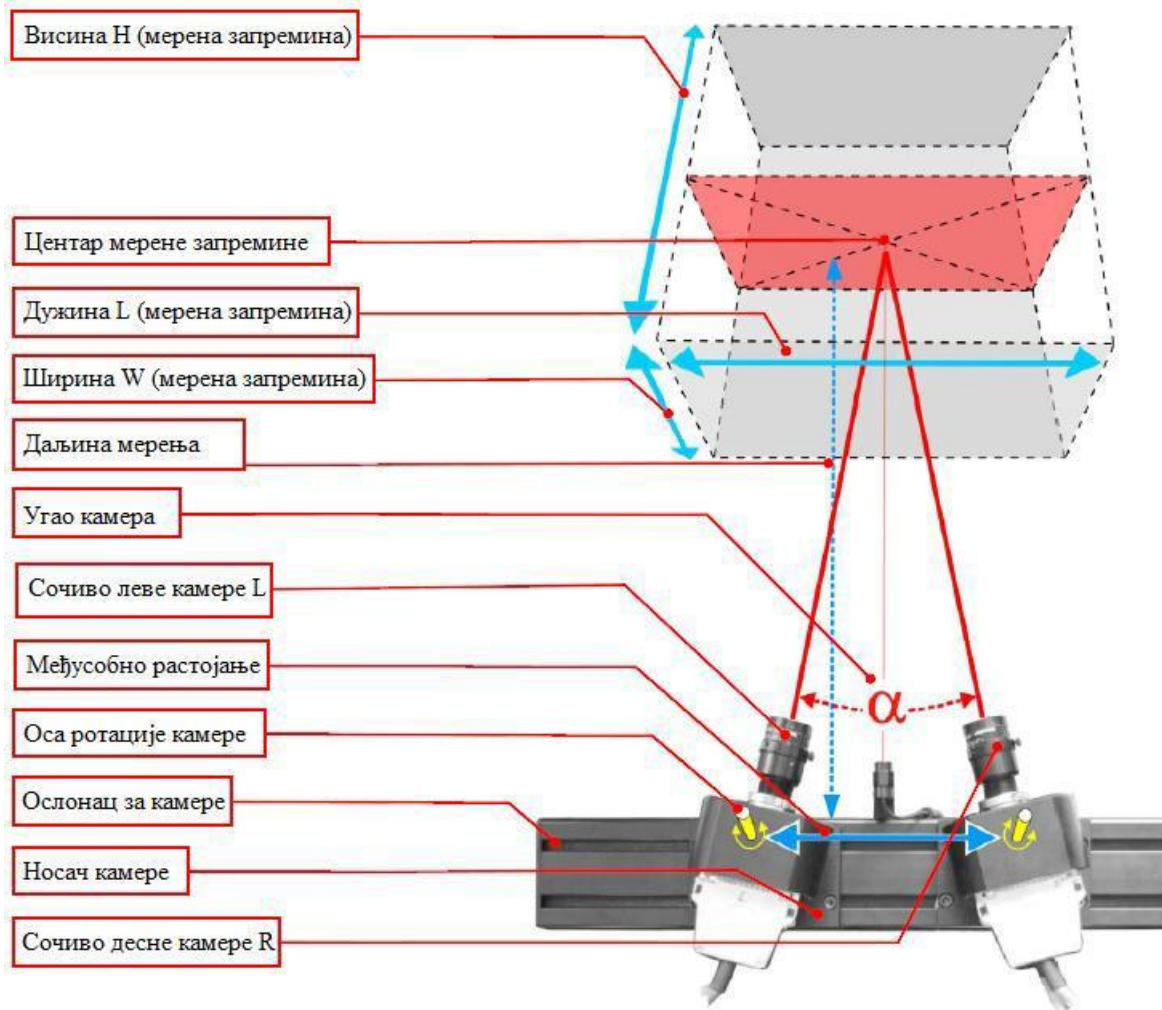
Sa jedne strane, veličina crnih tačaka na stohastičkoj šari mora biti dovoljno mala da omogući fini raspored „malih površina” tokom proračuna, a sa druge, šara mora biti dovoljno krupna da bi u potpunosti bila prepoznatljiva za kamere. Najviše odgovaraju stohastične šare koje su prilagođene kontrolnoj zapremini, rezoluciji kamere i veličini „malih površina”. Kao prednost, za proračun, pogodno je da šara nema velike oblasti istog nivoa osvetljenja. Površina sa promenljivom vrednosti sive boje je prihvatljivija,

jer nastaje pri nasumičnim šarama. Stohastička šara korišćena u okviru disertacije je prikazana je u poglavlju 4, na slici 4.3.

Pre početka nanošenja stohastičke šeme, neophodno je obezbediti čistu površinu (bez tragova ulja i masti). Koji lakovi i boje u spreju se mogu koristiti zavisi od zadatka merenja i uslova u kojem se odvija merenje. U prvom koraku, ukoliko je potrebno, naneti beli i mat sloj. Kao drugi korak, potrebno je naneti crnu stohastičnu šaru. Manje kontrolne zapremine zahtevaju finiju šaru od velikih kontrolnih zapremina. Da bi se proverilo da li je postignuta šara odgovarajuća za određenu kontrolnu zapreminu, vrši se upoređivanje sa referentnom šarom, definisanom od strane proizvođača opreme

3.2.3. Hardverska podešavanja sistema

Pre početka merenja, odgovarajuća zapremina merenja se mora izabrati u zavisnosti od veličine merenog objekta. U idealnom slučaju, mereni objekat se nalazi unutar kontrolne zapremine. U zavisnosti od veličine merenog objekta, odgovarajuća kontrolna zapremina se može izabrati na osnovu preporuka proizvođača. Zapremina merenja definiše rastojanje između senzorske jedinice i uzorka za merenje. Za različite objekte koji se mogu meriti, potrebno je nabaviti odgovarajuća sočiva za senzorsku jedinicu. Pre upotrebe sistema, neophodno je podešavanje senzorske jedinice, odnosno potrebno je izvršiti hardversku kalibraciju sistema. Potrebno je podesiti ugao između sočiva, fokus i blendu. Onda se ceo sistem softverski kalibriše uz pomoć kalibracionih ploča ili krstova. Kada se kalibracijom uspešno podesi zapremina merenja, može se početi sa eksperimentalnim merenjima.



Slika 3.5. Senzorska jedinica i zapremina merenja [82]

U praksi, u zavisnosti od zadatka merenja, potrebne su različite zapremine merenja. Potrebno je ponovo podesiti senzorsku jedinicu, samo ako se mora promeniti daljina merenja, ugao između kamera, ili podešavanje sočiva na kamerama zbog promene zapremine merenja. Dubina merne zapremine zavisi od podešavanja otvora blende.

Podešavanje senzorske jedinice

Da bi se uspešno definisala odgovarajuća zapremina, senzorska jedinica mora biti podešena prema uputstvima proizvođača. Opšti koraci za podešavanje senzorske jedinice su sledeći:

- Montiranje sočiva na kamere za odgovarajuću mernu zapreminu;

- Postavljanje laserskog pokazivača u centru postolja za kamere;
- Podešavanje rastojanja između kamera na postolju i laserskog pokazivača;
- Podešavanje merne daljine između mernog objekta i senzora;
- Podešavanje kamere uz pomoć aktivnih slika;
- Podešavanje fokusa sočiva na kamerama;
- Podešavanje otvora blende na sočivima kamera.

3.2.4. Kalibracija

Kalibracija je proces tokom kojeg se merni sistem pomoću kalibracionih tela podešava tako da se obezbedi dimenziona konzistencija sistema za merenje. Kalibraciono telo sadrži i podatke o razmeri. Razmera je određeno rastojanje između dve referentne tačke. Parametri kalibracije su prethodno definisani od strane proizvođača (rastojanje između kamera i njihova orijentacija, fokus, podaci o kalibracionim telima, i dr.). Na osnovu ovih podešavanja, program proračunava referentne tačke kalibracionog tela na dvodimenzionalnim slikama i određuje njihove trodimenzionalne koordinate.

Kalibraciona tela

Za proces kalibracije se koriste dva različita tipa kalibracionih tela (ploče i krstovi), koji postoje u različitim veličinama i verzijama [82]. Kalibracione ploče se koriste za male, a kalibracioni krstovi za velike merne zapremine. U zavisnosti od verzije, kalibraciona ploča ima jednu ili dve razmere na sebi. Kalibracioni krst ima 2 razmere na sebi (po jedna za svaki krak krsta). Za svaku standardnu zapreminu merenja, postoji odgovarajuće kalibraciono telo. Pri određivanju tipa kalibracionog objekta u softveru, potrebno je izabrati, osim tipa kalibracionog tela (ploča, krst) i verziju kalibracionog tela, koja može biti obična ili kodirana. Na slici 3.6 je prikazan izgled kalibracionih tela.

 Иконица у програму	 Иконица у програму	
		
Калибрациона плоча са обичним референтним тачкама и једном вредности размере. Карактеристика: правоугаони облик	Калибрациони крст са некодираним тачкама и две вредности размере Карактеристика: на оси ротације крста постоји референтна тачка	Калибрациони крст са кодираним тачкама и две вредности размере. Карактеристика: На оси ротације крста постоји референтна тачка

Slika 3.6. Primeri kalibracionih tela [82]

Kalibracija trodimenzionalnog sistema za optičko merenje

Pre prvog merenja potrebno je kalibrisati sistem. Isto tako, ukoliko se podešavanje sočiva ili pozicija kamera u odnosu jedna na drugu promeni, sistem zahteva ponovnu kalibraciju. Preduslov za uspešnu kalibraciju je ispravno podešen senzor. Telo koje se meri definiše zapreminu merenja i samim tim i komplet sočiva koji se koristi. Daljina merenja kalibracionog tela se podešava na osnovu korišćenog kompleta sočiva i korišćenog postolja za kamere.

U zavisnosti od kontrolne zapremine koja nam je potrebna, birmo odgovarajuće kalibracione objekte. Potrebno je kalibrisati sistem sa odgovarajućim kalibracionim objektom, kako bi se dobila odgovarajuća preciznost i tačnost sistema. U zavisnosti od veličine merne zapremine, koristi se kalibraciona ploča (manje zapremine) ili kalibracioni krst (veće zapremine) za podešavanje sistema.

Postupak kalibracije se sastoji iz 13 koraka, pri čemu za ispravnu kalibraciju softver mora u svakom koraku da prepozna i numerise referentne tačke na kalibracionoj ploči (slika 3.6).

Na kraju postupka kalibracije, program prikazuje rezultate kalibracije. Za tačnu kalibraciju, odstupanje mora biti između 0,01 i 0,04 piksela. U dodatku za kalibraciono telo (sa podacima o dve razmere) odstupanje podešene kalibracije ne sme biti preveliko (manje od 0,005% kalibracione razmere). Veliko odstupanje ukazuje na pogrešno, oštećeno kalibraciono telo ili netačne parametre razmere.

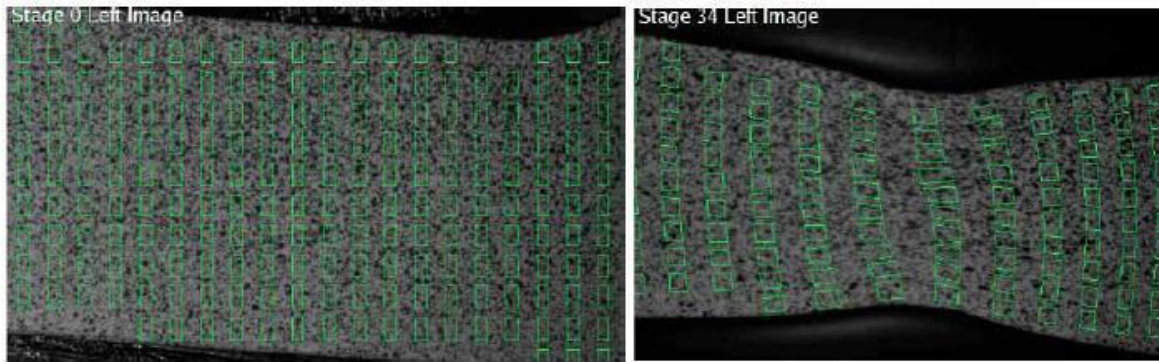
3.2.5. Definisanje parametara projekta - parametri „male površine”

Program primećuje deformaciju uzorka pomoću slika, preko različitih kvadratnih ili pravougaonih „malih površina”. Iz svake ispravne „male površine”, posle proračuna, nastaje tačka merenja. Za proračun deformacije, softver koristi dve metode: proračun linearne deformacije i parametarsku metodu za proračun deformacije (*spline deformation*). Najčešće korišćena metoda u *Aramis* programu je metoda linearne deformacije. Kao izuzetak, ukoliko je potrebno analizirati uzorak u oblastima malog radijusa krivine, koristi se parametarska metoda za proračun deformacije. Početna tačka je mala površina od koje počinje proračun i koja se definiše nakon što su sve slike snimljene.

3.2.6. Definisanje veličine „malih površina”

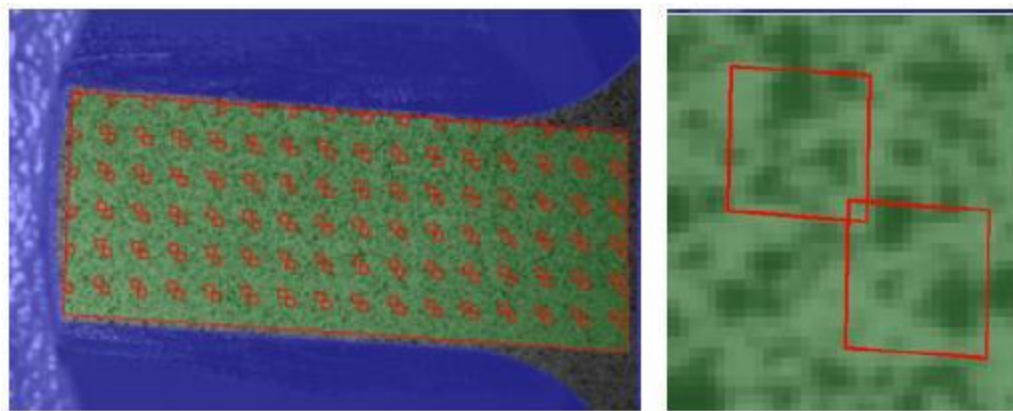
Uobičajenja „mala površina” (15x15 piksela) predstavlja kompromis između tačnosti i vremena proračuna. Moguće je odstupati od predloženih podešavanja ukoliko šara na površini uzorka i eksperimentalna merenja to zahtevaju.

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, kao što je prikazano na slici 3.7, radi dobijanja odovarajućih polja malih površina.



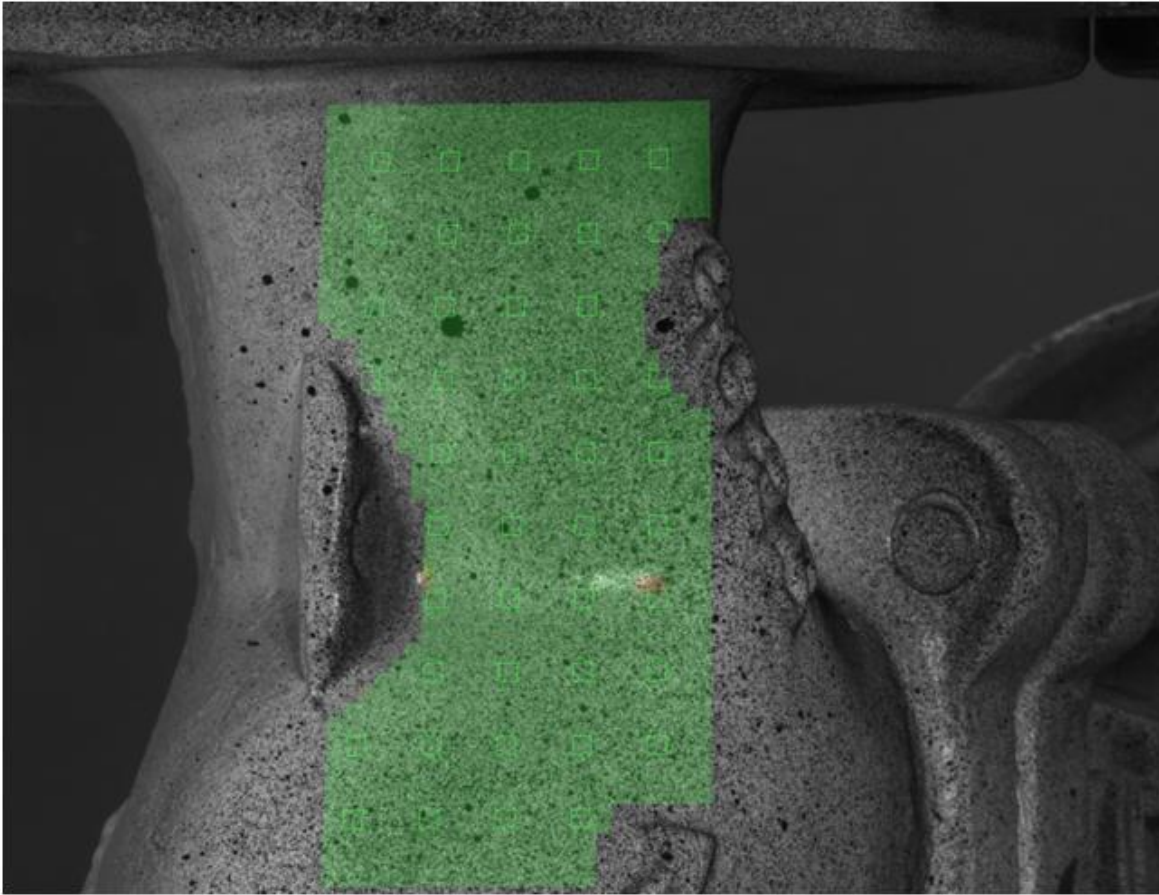
Slika 3.7. Raspored pravougaonih „malih površina” oblika u nedeformisanom stanju (levo) i deformisanom stanju [82]

Ako je, u slučaju četvorougao nih uzoraka, potrebno 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. Budući da se ovde proračun izvodi unutar polja „male površine”, nije neophodno odrediti proračunski okvir uzorka.



Slika 3.8. Raspored kvadratnih malih površina u nedeformisanom stanju (levo) i izgled pojedinačne kvadratne male površine [82]

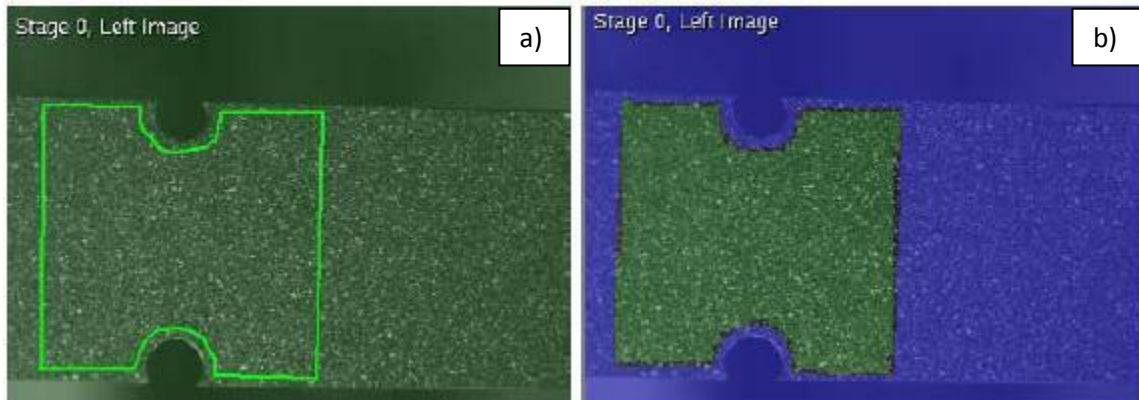
Za ispitivanje kućišta ventila je definisana „mala površina” dimenzija 25 x 25 piksela. Mala površina je oblika četvorougla. Izgled i raspored „malih površina” je prikazan na slici 3.9.



Slika 3.9. "Male površine" na kućištu ventila

3.2.7. Proračunska maska

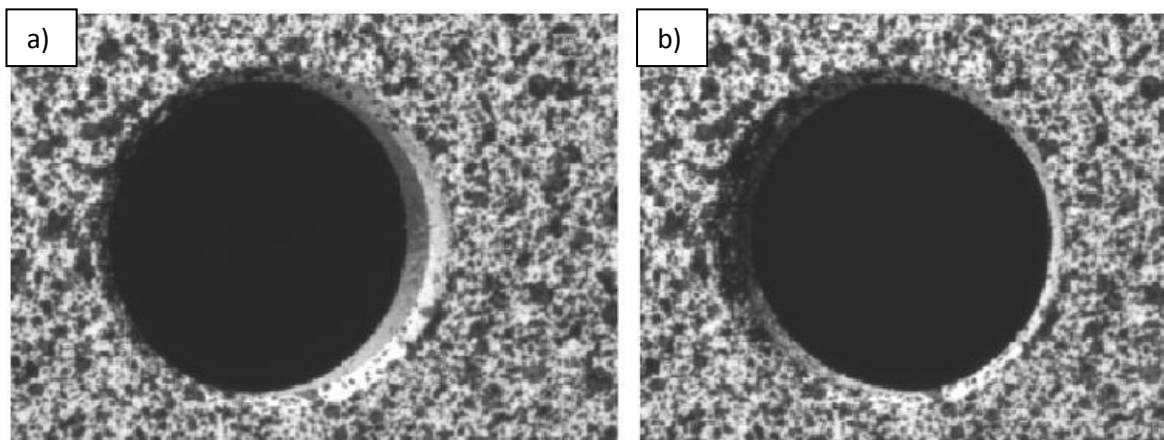
Proračunska maska omogućava programu da izvede proračun „malih površina” u definisanim oblastima slika sa dvodimenzionalnih kamera. U programu postoje razne alatke za definisanje proračunskih maski.



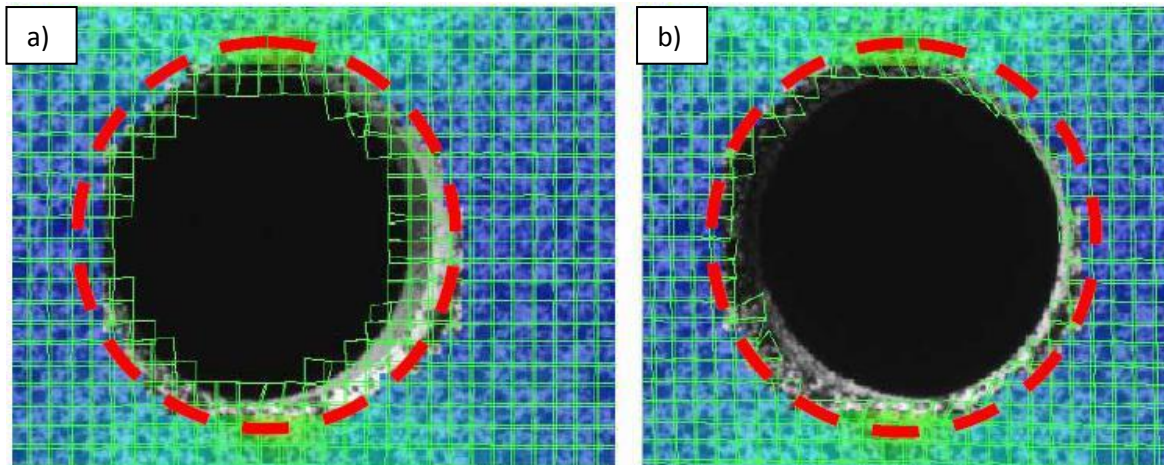
Slika 3.10. Proračunska maska: a) prilikom definisanja i b) završena proračunska maska (zelena oblast). [82]

Sa proračunskim maskama omogućavamo da samo oblasti, koje su relevantne za deformaciju, budu proračunate. S toga, na primer, nepokretni oslonac uzorka, pozadina, ivica uzorka, itd. neće biti uključeni u proračun. Na slici 3.10b je prikazana proračunska maska kojom je definisana oblast relevantna za proračun (samo zelena oblast ulazi u proračun).

Tačan trodimenzionalni proračun i određivanje deformacije nije moguće za ivice uzorka, jer se trodimenzionalni proračun mernih tačaka zasniva na “malim površinama” koje moraju da se vide i na levoj i na desnoj kameri sa svojim odgovarajućim šarama. Na slici 3.11 je prikazan prethodno navedeni razlog (ispitivanje uzorka sa kružnim otvorom na zatezanje). Zbog razlike u slikama nije moguće potpuno izmeriti pomeranja na uzorku.

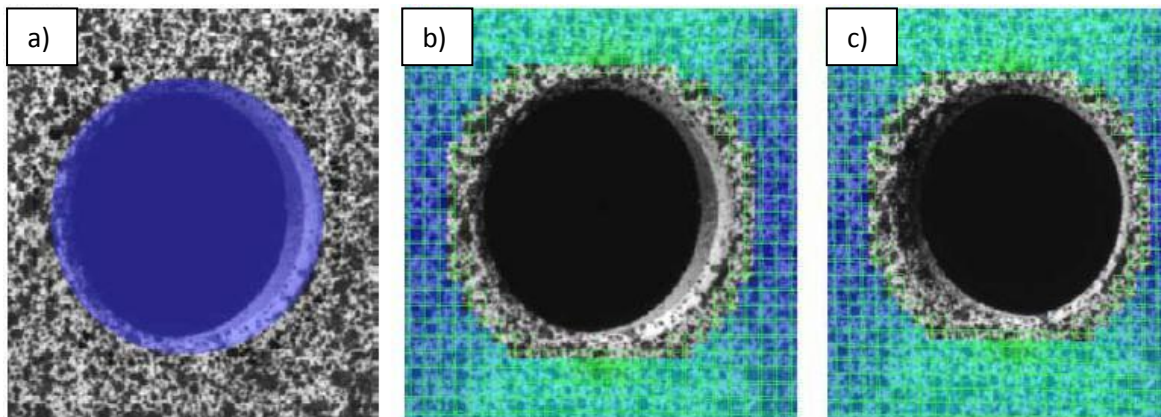


Slika 3.11. Uzorak za ispitivanje zatezanjem. Snimak a) leve i b) desne kamere. [82]



Slika 3.12. Uzorak za ispitivanje zatezanjem proračunat bez definisanog proračunskog okvira (maske). Snimak a) leve i b) desne kamere. [82]

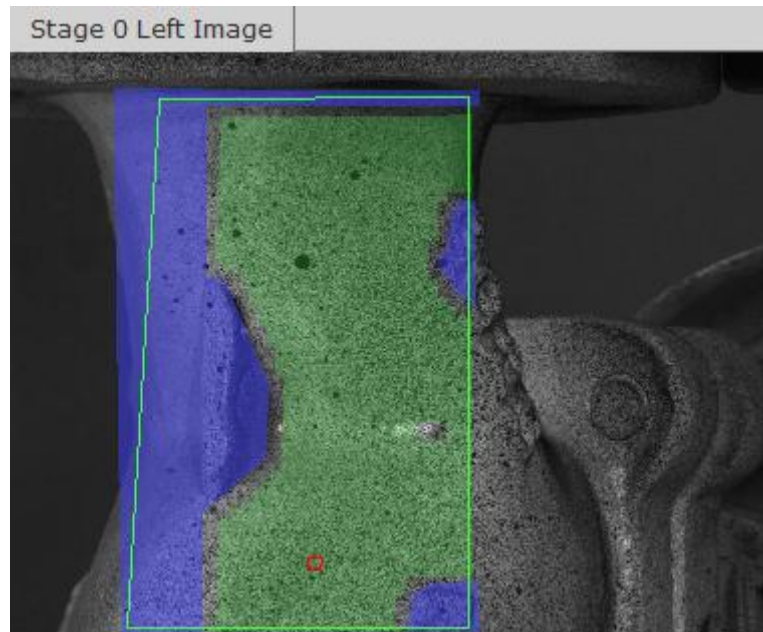
Na slici 3.12 je uzorak za ispitivanje (prikazan na slici 3.11) prikazan bez definisanog proračunskog okvira, odnosno maske. Oblast unutar crvenog kruga ne može biti tačno izračunata, usled problema sa vidljivošću delova slike, zbog razlika u položaju kamera.



Slika 3.13. Uzorak za ispitivanje zatezanjem: a) proračunska maska; b) rezultat proračuna za levu kameru sa proračunskom maskom; c) rezultat proračuna za desnu kameru sa proračunskom maskom; [82]

Na slici 3.13 (levo) je prikazana maska preko otvora, dok je na slikama u sredina i desno prikazan rezultat proračuna sa definisanom proračunskom maskom koja izuzima uticaj sporne oblasti iz proračuna.

Za kućište ventila je, pomoću proračunskih maski, definisana površina mernih mesta, koja su analizirana u okviru disertacije. Na slici 3.14 je prikazana proračunska maska za jedno merno mesto na kućištu ventila, gde je zelenom bojom označeno polje koje je merodavno za proračun.



Slika 3.14. Proračunska maska za kućište ventila

3.2.8. Određivanje početne tačke

Za proračun „malih površina”, svi koraci zahtevaju definisanje početne tačke. U opštem slučaju, početna tačka se odnosi na istu „malu površinu” u svim koracima. Moguće je koristiti i više početnih tačaka u jednom projektu merenja, ukoliko nakon proračuna za određene korake program ne uspe da proračuna „malu površinu”. Ukoliko se uzorak slomi pri ispitivanju i ako je potrebno snimiti deformacije u dobijenim delovima, neophodno je definisati po jednu tačku u oblastima polomljenih delova. Početna tačka je izračunata „mala površina”. Program omogućava tri različita načina za definisanje početnih tačaka.

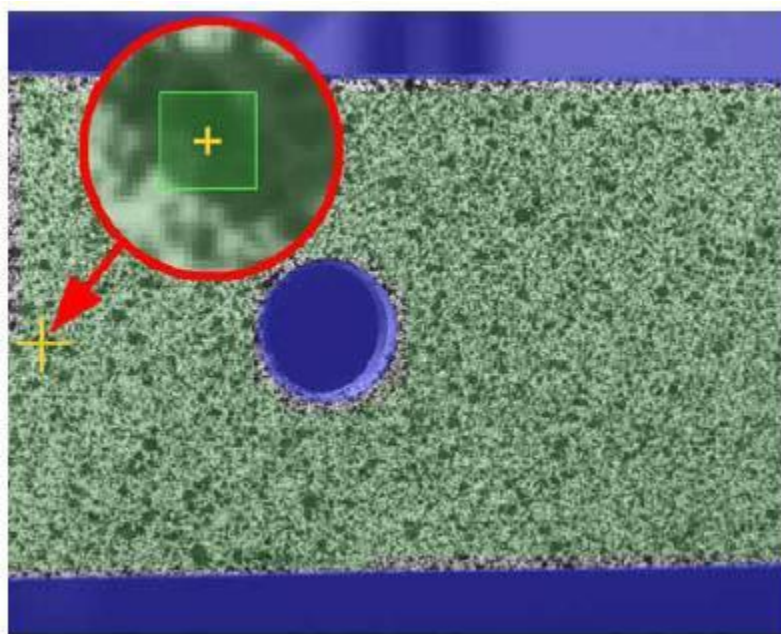
- *Ručno ili poluautomatsko definisanje početne tačke.* Koristeći ovaj način definisanja, prva tačka se uvek određuje ručno, dok se preostale početne tačke u ostalim koracima mogu definisati ručno ili poluautomatski. Početne tačke je potrebno definisati samo u onim oblastima koje imaju najmanje relativno

pomeranje unutar definisane kontrolne zapremine. Tako se osigurava uspeh poluautomatskog definisanja početnih tačaka u svim koracima.

- *Automatsko definisanje početnih tačaka.* Pri ovom načinu definisanja program traži početnu tačku u sredini definisanog polja za proračun. Najčešće se koristi u automatizovanim postupcima merenja za veći broj merenja sličnih uzoraka.
- *Definisanje složenih početnih tačaka.* U ovom slučaju potrebno je ručno definisati početne tačke u svim koracima. Za rotirajuće uzorke ovo je jedini mogući način definisanja početnih tačaka.

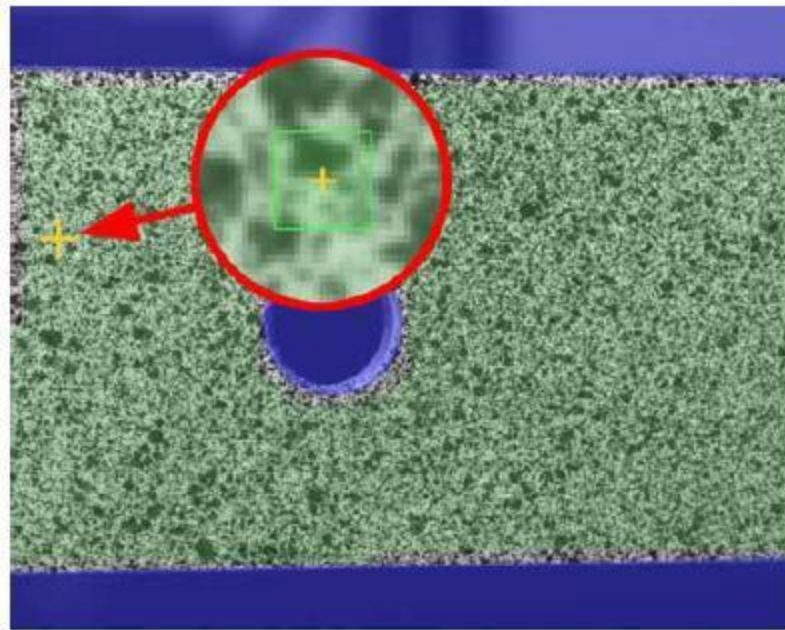
Nezavisno od metode definisanja, potrebno je proveriti početne tačke na slikama.

Za proveru početnih tačaka potrebno je selektovati ih na dvodimenzionalnim slikama. Prvo selektovati početnu tačku na levoj slici, a zatim i na desnoj. Primeri na slikama 3.15 i 3.16 su iz ispitivanja na zatezanje. U ovoj konfiguraciji ispitivanja najmanje relativno pomeranje je u levom delu slike.



Slika 3.15. Primer loše definisane početne tačke. Loša stohastična šara [82]

Poluautomatsko određivanje početnih tačaka možda ne bude odgovarajuće u narednim koracima, zato što unutar male površine ne postoji odgovarajuća stohastična šara.



Slika 3.16. Primer dobro definisane početne tačke. Dobra stohastična šara [82]

U narednim koracima, poluautomatsko definisanje početnih tačaka ima dobre rezultate zbog dobro urađene stohastične šare na površini uzorka.

Pri odabiru početnih tačaka posebna pažnja je posvećena tome da unutar male površine bude ogovarajuća šara. Takođe, da pozicija početnih tačaka ne ulazi u polje najvećih pomeranja, kako one ne bi napustile vidno polje jedne od kamera u svim koracima snimanja.

Početne tačke za merna mesta kućište ventila su postavljana poluautomatski. Primer jedne početne tačke na kućištu ventila je prikazan na slici 3.14 (crveni četvorougao).

3.3. Proračun deformacije

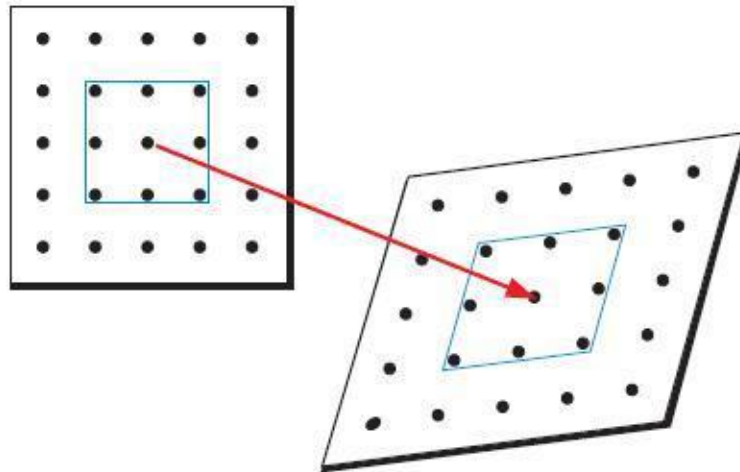
Za proračun deformacije, sistem za optičko merenje pomeranja i deformacija koristi dve metode: proračun linearne deformacije i proračun parametarskom metodom deformacije. Najčešće se koristi proračun metodom linearne deformacije za većinu merenja koja se izvode ovim sistemom. Izuzetak predstavlja potreba za određivanjem

deformacija u oblastima malih radijusa na uzorcima, kada se koristi druga spomenuta metoda.

3.3.1. Metoda linearne deformacije

Na slici 3.17 su prikazani delovi uzorka u deformisanom i nedeformisanom stanju. Merne tačke prikazane na slici 3.17 predstavljaju „male površine”. U ovom primeru se uzima u obzir deformacija centralno postavljene 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 se ogledaju u tome što nije moguće odrediti deformaciju za krivine malih radijusa, koje su manje ili jednake veličini male površine. Važno je da plavi četvorougao nema veliko zakrivljenje, jer se u suprotnom slučaju primenjuje druga metoda proračuna. Proračunski parametri za metodu linearne deformacije uključuju i proračunsku veličinu polja, koja podrazumeva broj susednih mernih tačaka koje se uzimaju u obzir prilikom proračuna deformacije. Najčešće korišćena vrednost za veličinu ovog polja je i najmanja moguća, a to je tri. Ovo znači da se trodimenzionalno polje mernih tačaka („malih površina”) veličine 3x3 koristi da bi se izračunala vrednost deformacije središnje merne tačke. Ova veličina polja je naročito podesna za procenu lokalnih deformacija. Sa povećanjem veličine polja, dolazi do smanjenja šuma pri snimanju, a u graničnim oblastima se mogu odrediti i manje deformacije. Polje “mernih tačaka” za analizu deformacija kućišta ventila je 5x5.

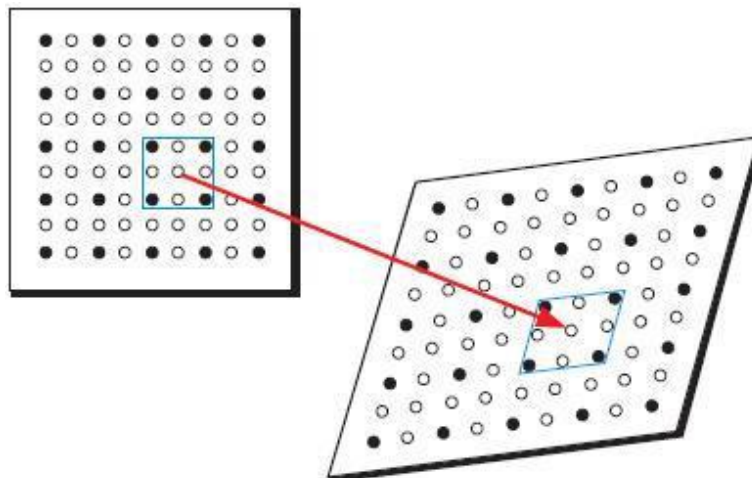
Ukoliko ne postoje sve susedne merne tačke oko središnje merne tačke, proračun deformacije središnje merne tačke se opet može izračunati. Broj neophodnih susednih mernih tačaka koje moraju da postoje da bi se izveo proračun se određuje softverski. Najčešće se postavlja uslov da mora postojati minimum 55 % susednih tačaka.



Slika 3.17. Grafički prikaz principa linearne metode proračuna deformacije [82]

3.3.2. Parametarska metoda za proračun deformacije.

Na slici 3.18 je prikazan 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. 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. Takođe, dolazi do većeg nivoa šuma pri merenju, kao i to što interpolirane tačke predstavljaju referentnu lokaciju za deformaciju. Zbog ograničenja sistema, proračun trodimenzionalnih tačaka se uvek izvodi na površini uzoraka.



Slika 3.18. Grafički prikaz principa parametarske metode proračuna deformacije [82]

Rezultati sistema za optičko merenje deformacija

Posle proračuna, dobijeni podaci su dostupni u 2D i 3D 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.

Sistem za optičko merenje pomeranja i deformacija omogućava dobijanje velikog broja različitih vrsta rezultata. Kako sistem snima trodimenzionalnu površinu mernog objekta, tako je moguće prikazati polje pomeranja mernih tačaka u sva tri pravca, kao i odgovarajuće vektore pomeranja. Koristeći prethodno definisane metode proračuna, sistem za optičko merenje preračunava polja pomeranja i koordinate tačaka u polje deformacija. Tako je moguće prikazati Mizesove deformacije, deformacije u pravcima glavnih osa, Treska deformacije i dr. U okviru disertacije su prikazani rezultati pomeranja u Y pravcu, Mizesove deformacije i ugaona pomeranja.

Mizesova deformacija je jedan od tipova proračuna ekvivalentnih deformacija koji je našao široku primenu u inženjerskoj praksi. Veliki broj softvera pri analizi metodom konačnih elemenata i korelacijom digitalnih slika koristi proračun deformacija po Mizesovom kriterijumu. On uključuje u obzir dilatacije i uglove klizanja u trodimenzionalnom koordinatnom sistemu [29].

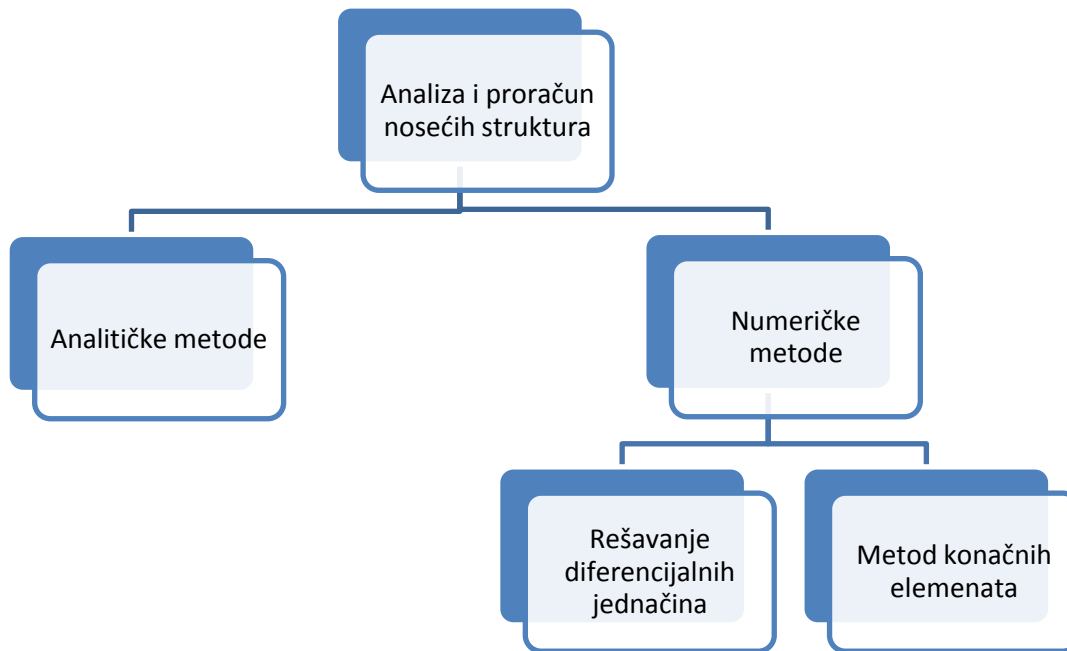
POGLAVLJE 4

METODA KONAČNIH ELEMENATA

Osnovna ideja metode konačnih elemenata je nalaženje rešenja komplikovanog problema aproksimativnim (približnim) numeričkim metodama. Kontinualna (neprekidna) struktura se idealizuje podelom (diskretizacijom) na male elemente pravilnog geometrijskog oblika koje nazivamo konačnim elementima.

U najvećem broju slučajeva, kada analizirana struktura ima kompleksnu geometriju, podvrgnuta je složenom naprezanju i kada su strukture od različitih materijala, nije moguće naći rešenje u analitičkom obliku. Analitičko rešenje podrazumeva dobijanje analitičkih izraza za računanje traženih karakteristika na različitim mestima strukture (pomeranja, naponi, temperature i sl.). Za dobijanje takvih podataka treba rešavati diferencijalne ili parcijalne diferencijalne jednačine. To je moguće uraditi samo za vrlo jednostavne probleme. Za složenu geometriju i složeno opterećenje nije moguće naći rešenja u analitičkom obliku. Zbog toga se koriste numerički metodi, a jedan od njih, najčešće korišćen je metod konačnih elemenata (MKE). Rešavanje problema metodom konačnih elemenata svodi se na rešavanje sistema algebarskih jednačina.

Na slici 4.1 je data šema osnovne podele metoda za analizu i proračun elemenata i nosećih struktura, kao sistema. Analitičke metode proračuna baziraju se na otpornosti materijala i teoriji elastičnosti. Moguće ih je primeniti na relativno mali broj slučajeva, jedino za proračun mašinskih elemenata ili elemenata jednostavnog geometrijskog oblika.



Slika 4.1. Metode proračuna nosećih konstrukcija [80]

Za proračun i analizu složenijih struktura koriste se numeričke metode. U ovom slučaju postoje dva metodološki različita pristupa. U prvom, za postavljanje diferencijalne jednačine ponašanja nekog elementa u uslovima eksploatacije – statičko ili dinamičko opterećenje – rezultat se dobija rešavanjem ovih jednačina metodom konačnih razlika ili metodom numeričkog integraljenja. Drugi pristup, koji je i korišćen u okviru ove disertacije, pretpostavlja prethodnu idealizaciju strukture na elemente pravilnog geometrijskog oblika – konačne elemente – da bi se uz korišćenje matičnih metoda: preko metoda sila ili metoda pomeraja, krajnji rezultat dobio rešavanjem sistema algebarskih jednačina.

Postoje dva osnovna pristupa u MKE. Prvi je metod sila ili metod fleksibilnosti. U metodu sile, osnovne nepoznate veličine u problemu koji se analizira jesu sile. Da bi se dobile jednačine strukture, prvo se postavljaju jednačine ravnoteže. Rezultat je sistem algebarskih jednačina u kojima su nepoznate veličine sile koje se iz jednačina određuju. Drugi pristup je metod pomeranja ili metod krutosti u kome su osnovne nepoznate pomeranja u čvorovima. Za postizanje uslova kompatibilnosti, kod rešavanja konkretnih problema, traži se da su elementi povezani u čvorovima, duž stranica ili odgovarajućih površina, pre i posle delovanja opterećenja. Osnovne jednačine strukture sadrže

pomeranja čvorova, a koriste se jednačine ravnoteže i veza između sila i pomeranja. Od dva pomenuta pristupa, veću primenu je našao drugi metod pomeranja i njegova formulacija je slična za mnoge strukturalne probleme. Većina programa je napravljena na osnovu metode pomeraja.

Međutim, kompleksnost geometrije, osobina materijala i specifičnost graničnih uslova, koji se sreću u većini realnih problema, najčešće znači da se egzaktno rešenje ne može dobiti, ili da se ne može dobiti u razumnim vremenskim granicama. Mali broj praktičnih problema ima rešenja u zatvorenom obliku, pa je potrebno odrediti približno rešenje. Najčešće je dovoljno dobiti aproksimativno rešenje uz razumnu količinu uloženog rada u razumnom vremenskom okviru.

Metod konačnih elemenata spada u metode diskretne analize. Za razliku od ostalih numeričkih metoda, ne vrši se diskretizacija jednačina problema, već se fizički diskretizuje razmatrani domen. To znači da se, umesto elementa diferencijalno malih dimenzija, za aproksimaciju koristi deo domena konačnih dimenzija – poddomen, odnosno konačni element. Tada se i diferencijalne ili integralne jednačine sistema svode na obične algebarske. Sa stanovišta fizikalnosti, ovo znači da se razmatrani domen – kontinuum sa beskonačno mnogo stepeni slobode, svodi na sistem međusobno povezanih konačnih elemenata sa konačnim brojem stepeni slobode. Pri proračunu konstrukcija primenom MKE kao nepoznate veličine sistema, mogu se usvojiti kinematičke veličine (pomeranja, njihovi izvodi, komponente deformacija), statičke veličine (unutrašnje sile, komponente napona), ili se uzeti njihova kombinacija – mešovita (hibridna) metoda.

Ne postoje egzaktni kriterijumi kvaliteta za izbor najboljeg diskretnog modela, ali se uz kvalitativno poznavanje problema, ovaj problem lako rešava.

Suština aproksimacije, po metodu konačnih elemenata, je u sledećem:

1. Razmatrani kontinuum se pomoću fiktivnih linija ili površi deli na poddomene – konačne elemente.

2. Uvodi se pretpostavka o međusobnoj povezanosti konačnih elemenata u konačnom broju tačaka na konturi elementa. Ove tačke se nazivaju čvornim tačkama ili čvorovima.
3. Stanje u svakom pojedinačnom elementu (polje pomeranja, naprezanja, deformacija itd.) se opisuje interpolacionim funkcijama i konačnim brojem parametara u čvorovima, koje predstavljaju osnovne nepoznate veličine u metodu konačnih elemenata.
4. Za analizu se standardno koriste principi i postupci koji važe za ma koji diskretni sistem.

4.1. Pregled razvoja metoda konačnih elemenata

Prvi radovi iz područja metoda konačnih elemenata pojavili su se četrdesetih godina prošlog veka. Hrenikoff je 1941. godine rešavao probleme u oblasti strukturalne analize i naponske analize čvrstog tela. Zbog potrebe diskretizacije modela na konačne elemente, dalji razvoj se kretao u pravcu razvoja topologije i geometrijskih osobina. Zatim je počela primena metode konačnih elemenata u avionskoj industriji. Posebnu ulogu odigrale su matrice, kao vrlo pogodne za primenu u metodi sila i deformacija, pa tako ove dve metode za proračun konstrukcija postaju pogodne za primenu na računarima. Utemeljitelji metode su Clough, Martin, Topp i Turner koji su napravili osnovni koncept MKE.

Prethodne radove na matričnom konceptu objavili su Argyris i saradnici. Radovi su štampani 1960. godine u knjizi u kojoj je prvi put korišćen naziv konačni element. Sva poznata saznanja u području MKE su tada sumirana na konferenciji US Air Force. Tom prilikom je dogovoreno da se napravi i prvi softver NASTRAN (Nasa Structural Analysis). Iz ovoga je razvijen SAP (Structural Analysis Program) na Berkli univerzitetu od strane saradnika prof. Clough-a. Prvi univerzitetski udžbenik u oblasti MKE napisao je Cook 1974. godine u vreme kada je metod već bio prihvaćen.

Poseban značaj u razvoju MKE imali su varijacioni principi mehanike kontinuuma koji si primenjeni na formulaciju MKE, pa je MKE dobio opšti pristup. Dalji razvoj MKE odvija se u pravcu ravanskih elemenata. Tako je Caurant, rešavajući granične probleme

torzije, predložio i koristio trougaone elemente, a rešenje dobio pomoću varijacione metode Ritz-a. Tek 1960. godine je postavljen direktni, tj. statički pristup MKE.

Polovinom šezdesetih White i Fridrich rešavaju parcijalne diferencijalne jednačine koristeći mrežu trougaonih konačnih elemenata i varijacione principe. Nakon toga, uvodi se pojam donje i gornje granice aproksimacije po MKE. Hellinger i Reissner postavljaju mešoviti model konačnih elemenata u kome se kombinovano javljaju sile i deformacije kao nepoznate veličine.

Da bi našao širu primenu, razvoj MKE ide u pravcu tačnosti aproksimacije i konvergencije rešenja. U tom periodu se javljaju radovi i monografija Zienkiewicz-a i Cheng-a u kojoj su prikazane osnove metoda i mogućnosti za primenu.

U metodi konačnih elemenata se mora postaviti kontinuitet između elemenata i poddomena u mreži elemenata. To je postignuto uvođenjem interpolacionih funkcija koje su se razvile na osnovu razvoja matematičke teorije splajnova. Interpolacione funkcije se pretpostavljaju u obliku polinoma, čime se obezbeđuje kontinuitet između elemenata. Matematičari su sedamdesetih godina definitivno generalizovali teoriju, pa je Oden uveo niz generalizacija i proširio primenu na višedimenzionalno područje, euklidske prostore i područje nelinearne analize. Od tada se MKE razvija sa razvojem računara. Oni su omogućili rešavanje velikih problema složene geometrije i opterećenja. Do devedesetih godina prošlog veka nema vizualizacije problema. Sa današnjim mogućnostima računara moguće je dobiti potpunu predstavu naponskog, deformacionog, termičkog polja ili nekog drugog problema.

Diskretizacija domena na veći broj konačnih elemenata je bila limitirajući faktor sve do pojave automatskih generatora mreže. Pre toga se diskretizacija vršila ručno, što je bilo zamorno, često netačno i iznad svega sporo. Metode automatskog generiranja mreže je 1988. godine predložio i klasifikovao K. Ho-Le. Na problemima diskretizacije domena je 1992. godine radio Shimada i predložio novi metod diskretizacije, a ne treba zaboraviti ni radove Cavendish-a na istom problemu.

4.2. Osnovni principi metode konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata, odnosno analiza problema primenom konačnih elemenata, kao što je već napomenuto, predstavlja numeričku metodu koja se koristi za rešavanje komplikovanih geometrijskih problema, kod kojih je veoma teško doći do analitičkog rešenja. Osnovna ideja metode konačnih elemenata je rešavanje komplikovanog problema njegovom zamenom sa jednostavnijim problemom, pa iz tog razloga nije moguće dobiti tačno, već samo aproksimativno rešenje. MKE je metoda koja se zasniva na podeli kompleksnih geometrijskih oblasti na mnogo manje i jednostavnije domene kod kojih promenljive polja mogu da se interpolišu uz pomoć funkcija oblika. Ovakvi domeni se nazivaju konačni elementi, a region rešenja je sastavljen od velikog broja malih, međusobno povezanih podregiona – konačnih elemenata. Polje promenljivih, unutar konačnog elementa, opisuje se aproksimativnim funkcijama, a članovi ove funkcije definisani su na osnovu vrednosti promenljivih u čvorovima.

Pretpostavlja se da su elementi međusobno povezani u određenim tačkama, nazvanim čvorovi, ili čvrne tačke. Čvorovi se obično nalaze na granicama elementa na kojima se smatra da se nalazi veza sa drugim elementima, pa svaki čvor ima osobinu da je pomeranje svih susednih elemenata u tom čvoru isto. Na taj način, ponašanje dela strukture može da se opiše preko zajedničkog čvora, odnosno, ponašanje cele strukture može da se opiše uz pomoć čvornih tačaka modela. Pošto unutar kontinuuma nije poznata stvarna varijacija promenljive polja (npr. pomeranja, napona, temperature, pritiska ili brzine), pretpostavlja se da se varijacija promenljive polja može aproksimirati jednostavnom funkcijom. Ove aproksimativne funkcije, nazvane interpolacioni modeli, se definišu pomoću vrednosti promenljivih polja na čvorovima. Kada se napišu jednačine polja (recimo, jednačine ravnoteže) za ceo kontinuum, nove nepoznate će biti vrednosti promenljivih polja na čvorovima. Rešavanjem jednačine polja, koje su obično u obliku matičnih jednačina, dobiće se vrednosti promenljivih polja. Polje pomeranja čvorova se dobija iz matične jednačine ravnoteže, a potom se na osnovu njega određuju napon i deformacija konačnih elemenata. Nakon toga je moguće aproksimativnim funkcijama odrediti promenljivu polja tokom sastavljanja elemenata. Dakle, na osnovu polja pomeranja čvora moguće je odrediti deformaciju i napon

konačnih elemenata, a samim tim i deformaciju i napon cele strukture, odnosno moguće je odrediti da li će komponenta izdržati zadato opterećenje. Prema tome, ako su poznate geometrijske karakteristike i svojstva materijala, primenom MKE moguća je simulacija mehaničkog ponašanja i delova koplikovanih geometrija, koji su izloženi opterećenju.

4.3. Osnovni koraci u MKE

Inženjerski problemi mogu biti strukturalni ili nestrukturni (prenos toplote i tok fluida). U strukturalnoj analizi, cilj dizajnera je da odredi pomeranja i napone u celoj strukturi koja je izložena delovanju opterećenja. Za mnoge probleme je nemoguće naći raspodelu deformacija, korišćenjem klasičnih analitičkih metoda, pa se koristi MKE.

U MKE se koriste modeli struktura u kojima su međusobno povezani elementi koji se zovu konačni elementi. Svakom elementu se pridružuje funkcija pomeranja. Svi elementi su povezani direktno ili indirektno, uključujući čvorove i/ili zajedničke granične linije elemenata i/ili zajedničke površine.

Na osnovu poznatih vrednosti napona i deformacija u jednom čvoru i elementu, mogu se odrediti naponi 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 strukture opisuje ponašanje svih čvorova i predstavlja sistem algebarskih jednačina koje je najbolje predstaviti u matičnom obliku.

Da bi se izložila procedura proračuna po MKE nekog problema, najbolje je specificirati redosled koraka u proceduri.

Pre opisa neophodnih koraka treba naglasiti da se modeliranje problema po MKE vrši: diskretizacijom strukture na odgovarajući broj konačnih elemenata, izborom vrste (tipa) elementa koji će se koristiti u analizi, definisanjem vrste opterećenja, graničnih uslova ili oslonaca.

Prvi korak u proceduri se odnosi na modeliranje dok su sledeći, koji će biti opisani, sastavni deo korišćenog softvera i obavljaju se automatski.

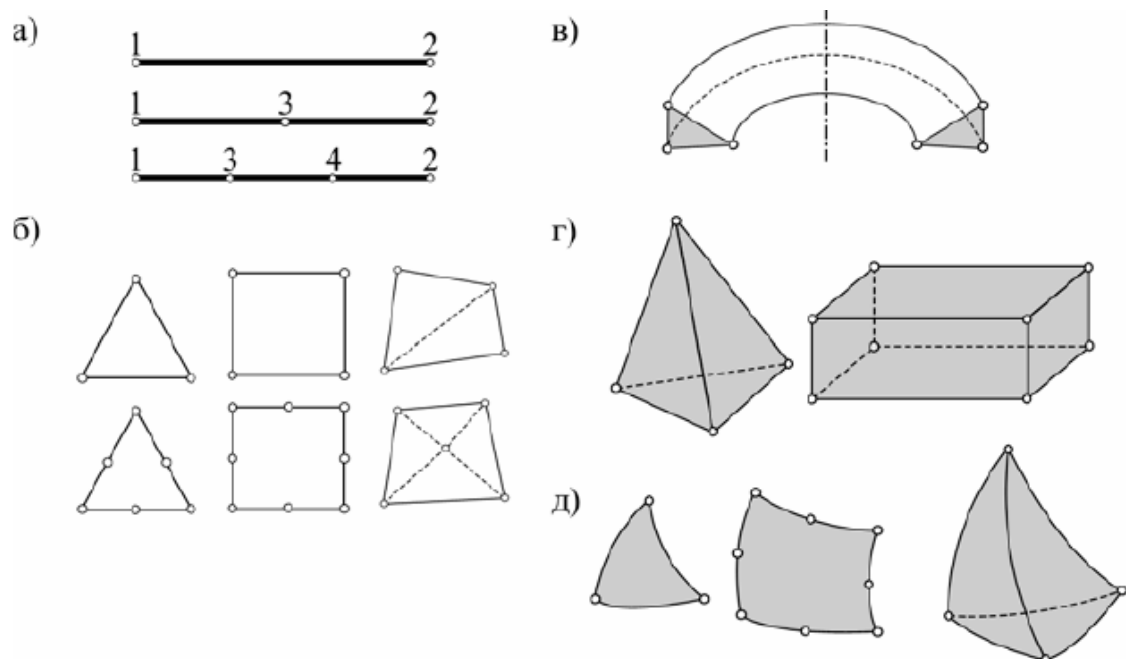
Korak 1. Diskretizacija domena i izbor vrste elementa

Metod konačnih elemenata zasniva se na fizičkoj diskretizaciji posmatranog domena.

Osnovu za analizu konstrukcije predstavlja poddomen, deo domena (strukture) koji se zove konačni element. Pomoću algebarskih jednačina se definiše stanje u pojedinim konačnim elementima, kao i domena u celini. To znači da se razmatrani domen, koji ima beskonačno mnogo stepeni slobode, može podeliti na konačan broj elemenata sa konačnim brojem stepeni slobode. Pošto je broj konačnih elemenata za jedan problem neograničeno veliki, postavlja se zadatak da se kreira model koji najbolje aproksimira odgovarajući granični problem. Za ovu aktivnost nema pravila. Izbor najboljeg diskretnog modela zavisi od intuicije, inženjerske prakse i poznavanja suštine razmatranog problema. Kreator modela sam ocenjuje željenu tačnost rezultata proračuna, pa se prema tome i odlučuje za određene korake. Prvi korak u strukturalnoj analizi, odnosno traženju napona i deformacija, je diskretizacija domena. Ona se vrši linijama na poddomene ili konačne elemente.

Ukupan broj konačnih elemenata u razmatranom modelu, tip i veličina elementa zavise od same procene onog ko vrši taj posao. Elementi moraju biti dovoljno male veličine da daju upotrebljive rezultate, ali i dovoljno veliki da se izbegnu problemi koji se mogu javiti kod modela sa velikim brojem elemenata, koji se rešavaju na neadekvatnim računarima. Mali element ili element višeg reda su u opštem slučaju poželjni tamo gde se rezultati brzo menjaju, tj. u području geometrijskih promena (radijusi, otvori, mesta koncentracije napona i sl.). Veliki elementi se u principu koriste tamo gde su geometrijske promene male ili gde ih uopšte nema. Diskretizacija domena se nekada vršila manuelno. Danas svi softveri za MKE imaju automatsko generiranje mreže u predprocesorskom delu programa.

Izbor elementa koji se koristi u MKE analizi zavisi od problema koji se rešava i od željene tačnosti rezultata. Prvo o čemu treba voditi računa se odnosi na činjenicu da li je problem jedno, dvo ili trodimenzionalan. Ako se radi o prostornim ili ravanskim rešetkama, onda se koriste linijski ili jednodimenzionalni elementi. Ako je problem ravanski, koriste se dvodimenzionalni ravanski elementi, a ako je problem prostorni, koriste se trodimenzionalni. Neki elementi su prikazani na slici 4.2.



Slika 4.2. Primeri tipova konačnih elemenata:

a) linijski konačni elementi;

b) dvodimenzionalni (ravni) konačni elementi;

v) osnosimetrični konačni elementi;

g) trodimenzionalni (prostorni) konačni elementi;

d) krivolinijski konačni elementi; [80]

Najčešći trodimenzionalni elementi su tetraedar i heksaedar. Koriste se u problemima gde je potrebno analizirati prostorno naponsko stanje. Osnovni trodimenzionalni elementi imaju čvorove u uglovima i ravne stranice. Postoje i elementi višeg reda sa čvorovima na sredinama stranica i/ili krivim površinama.

Korak 2. Izbor funkcije pomeranja

Izbor funkcije pomeranja se vrši za svaki element. Funkcija je definisana unutar elementa i koristi vrednosti izračunate u čvorovima. Kao funkcije pomeranja se biraju linearni, kvadratni ili kubni polinomi.

Polinomi se koriste kao funkcije, zato što su jednostavne za rad i primenu u MKE. Za dvodimenzionalni element funkcija pomeranja je funkcija koordinata u xy ravni. Funkcije su nepoznate veličine u čvorovima. Za dvodimenzionalne probleme, nepoznate veličine su funkcije koordinata x i y . Ista funkcija pomeranja može se izabrati za svaki element u modelu konačnih elemenata diskretizovane strukture. Funkcije su tako odabrane da se pomoću MKE mora ostvariti kontinuitet pomeranja unutar tela, tj. između svih elemenata u čvorovima, duž stranica i površina. Nakon izbora funkcije pomeranja, uspostavi se veza između deformacija i pomeranja, kao i veza između napona i deformacija.

Korak 3. Definisanje relacije deformacija-pomeranje i napon-deformacija

Za svaki konačni element treba postaviti jednačine. Između napona i deformacija takođe postoje relacije koje se zovu konstitutivne relacije. Jedna od najjednostavnijih je Hukov zakon.

Korak 4. Matrica krutosti i jednačine

U početku su se matrice krutosti elemenata i jednačine elemenata određivale na osnovu uticajnih koeficijenata krutosti, što je u direktnoj vezi sa strukturalnom analizom. Nakon toga je razvijeno više metoda za određivanje matrice krutosti:

- Direktni ravnotežni metod (Direct Finite Element Model),
- Varijacioni metod (Variational Finite Element Model),
- Metodi težinskog reziduala (Methods of Weighted Residuals),
- Metoda energetskog balansa (Energy Balance Direct Finite Element Model).

Korak 5. Formiranje globalne matrice krutosti

Matrica krutosti i jednačine pojedinih konačnih elemenata dobijaju se primenom neke od metoda navedenih u koraku 4. Primenom direktnog metoda i superpozicije, matrice pojedinih elemenata mogu se sabrati. Na taj način se dobija globalna ili ukupna matrica krutosti strukture. Ovde mora biti ispoštovan koncept kontinuiteta ili kompatibilnosti koji zahteva da struktura sadrži celovitost (neprekidnost), tj. da nema prekida strukture.

Korak 6. Određivanje pomeranja cele strukture

Matrična jednačina strukture u koju su uneseni granični uslovi predstavlja spregnuti sistem algebarskih jednačina. Jednačine se mogu rešiti Gausovom metodom eliminacije ili primenom nekog iterativnog metoda. Osnovne nepoznate su pomeranja u čvorovima. To su prve veličine koje se određuju primenom MKE.

Korak 7. Računanje deformacija i napona

Naponi i deformacije su nepoznate veličine koje se određuju u strukturalnoj analizi. Nakon računanja pomeranja (korak 6), korišćenjem veza između deformacija i pomeranja, kao i napona i deformacija se računaju deformacije i naponi.

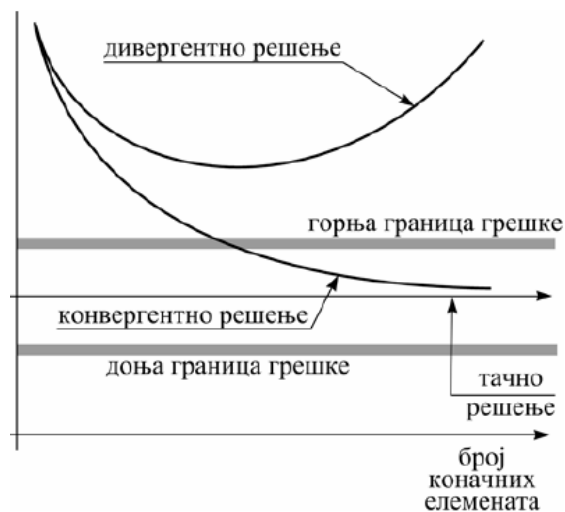
Korak 8. Interpretacija rezultata

Dobijeni rezultati primenom MKE se analiziraju i interpretiraju. Zaključak svake analize se svodi na određivanje tačnog mesta delovanja najvećih napona i deformacija. Na osnovu poznavanja naponsko-deformacionog stanja, kao jednog od važnih faktora, dizajner će donositi odluke. Postprocesorski kompjuterski programi pomažu korisniku da interpretira rezultate prikazujući ih u grafičkoj formi.

4.4. Tačnost i konvergencija rešenja po MKE

Rešenja dobijena po MKE su približna (aproksimativna). Potrebno je odrediti njihovu tačnost, stabilnost i konvergenciju. Sa praktičnog stanovišta, važno je, takođe, znati sa koje strane tačnog rešenja se nalaze dobijena rešenja, odnosno da li su dobijena rešenja na strani sigurnosti.

Pod pojmom tačnosti, podrazumeva se bliskost dobijenog rešenja analitičkom (tačnom), ili njegovo odstupanje. Stabilnost rešenja podrazumeva stabilnost numeričkog (proračunskog) postupka pri dobijanju rešenja. Konvergencija rešenja označava težnju rešenja iz pojedinačne iteracije ka nekoj konkretnoj vrednosti i analogan je pojmu konvergencije iz opšte matematičke teorije.



Slika 4.3. Tačnost rešenja po MKE [80]

POGLAVLJE 5

EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA I POSTUPAK ISPITIVANJA

Veliki broj istraživača se bavi problematikom čvrstoće struktura kompleksne geometrije. U okviru svojih istraživanja, istraživači su najčešće sprovodili analize struktura kompleksne geometrije metodom konačnih elemenata, uz verifikaciju numeričkog modela primenom mernih traka. Međutim, usled ograničenja primene mernih traka, u svojim analizama nisu uspevali eksperimentalno da analiziraju kritična mesta sa velikim geometrijskim diskontinuitetima. Kao zajednički zaključak većine navedenih istraživanja, istraživači su isticali da ne postoji dovoljan broj eksperimentalnih rezultata dostupnih široj javnosti, odnosno upotreba samo mernih traka nije mogla u potpunosti da opiše ponašanje neke kompleksne strukture pod opterećenjem. Zbog svega navedenog, cilj disertacije je bio da se pokaže da metoda korelacije digitalnih slika može da se primeni na strukture kompleksne geometrije, odnosno na kritična mesta najvećih geometrijskih diskontinuiteta.

Za potrebe dokazivanja postavljenog cilja, bila je potrebna struktura koja ima kompleksnu geometriju i koja se često koristi u praksi. Najčešći oblici kompleksnih geometrija, veze cilindar/cilindar, sfera/cilindar, konus/cilindar i dr., se javljaju na opremi pod pritiskom.

Kao najpogodnija struktura za potrebe disertacije je izabran ravni zaporni ventil. Kućište navedenog ventila je izrađeno livenjem, pa nema zavarenih spojeva koji bi na analiziranim geometrijskim diskontinuitetima predstavljali izvor dodatnih uticajnih faktora u ispitivanjima.

Na kućištu ravnog zapornog ventila postoje dva geometrijska diskontinuiteta koja predstavljaju spoj sfere i cilindra. Jedan spoj ima jako izražen geometrijski

diskontinuitet na koji je i postavljeno ojačanje, dok drugi spoj pokazuje znatno blaži geometrijski diskontinuitet.

Cilj eksperimentalnih ispitivanja izvršenih u okviru ovog rada je određivanje polja pomeranja i deformacija kućišta ravnog zapornog ventila na osnovu koje se vrši verifikacija numeričkog modela.

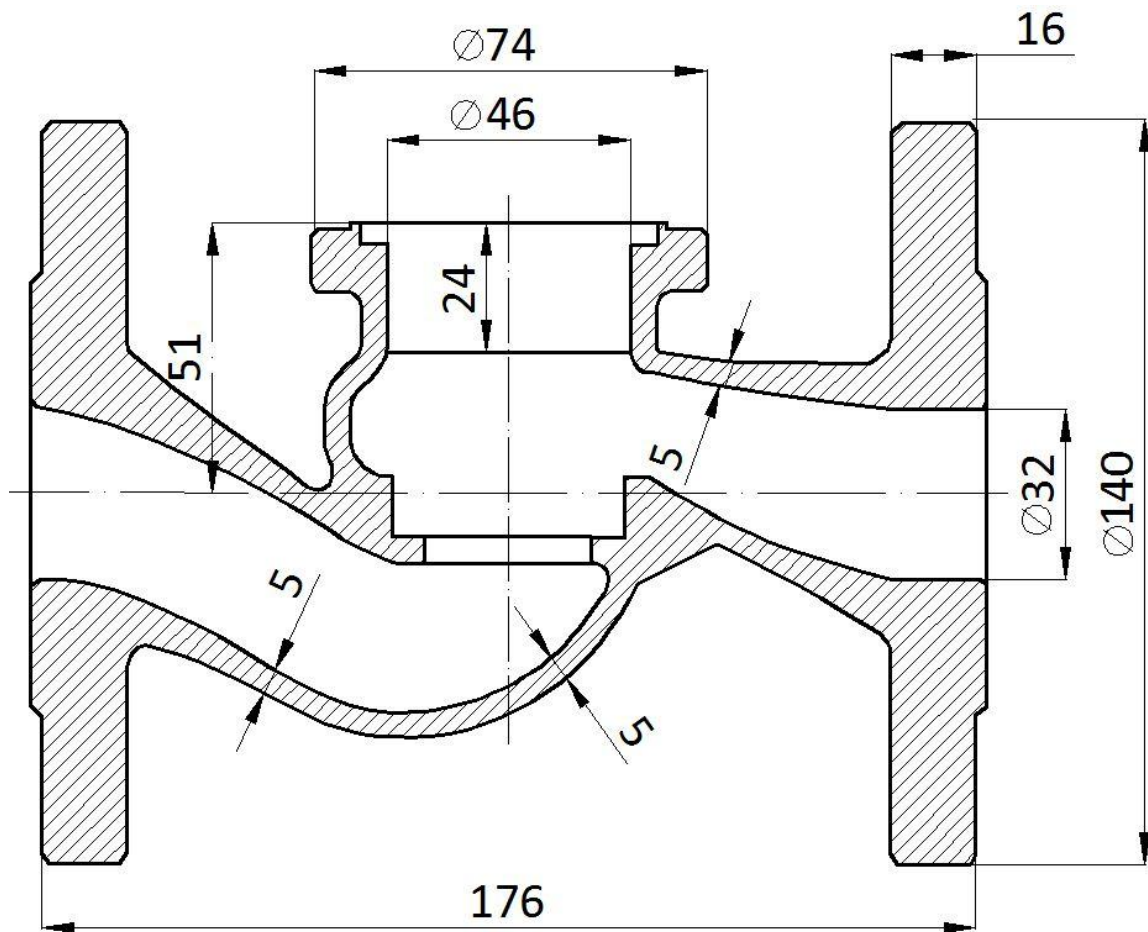
Verifikacija numeričkog modela je urađena pomoću kamera za 3D optičko, bezkontaktno merenje pomeranja i deformacija i softvera Aramis.

Eksperiment je izveden u laboratorijskim uslovima na tri ravna zaporna ventila izrađena od materijala komercijalne oznake GG25 (DIN EN 1561). Mehaničke karakteristike materijala kućišta ventila su date u Tabeli 5.1. Svi ventili su sledećih karakteristika: DN32 i PN 6. Dimenzije ventila su prikazane na slici 5.1.

Tabela 5.1. Mehaničke karakteristike materijala kućišta ventila na 20°C

Vrsta materijala	Konvencionalni napon tečenja $R_{p0.1}$	Zatezna čvrstoća R_m	Modulo elastičnosti E
GG25 (DIN EN 1561)	200 MPa	250 MPa	$(1,03-1,18) \times 10^{11}$ Pa

Eksperimenti su sprovedeni u Laboratoriji za procesnu tehniku, Laboratoriji za otpornost materijala i Laboratoriji za ispitivanje mašinskih elemenata i sistema na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu.



Slika 5.1. Dimenzije kućišta ventila [21]

U daljem tekstu su detaljno objašnjeni način rada i podešavanja sistema Aramis, kao i odgovarajuće pripreme uzoraka.

5.1. Eksperimentalne metode

5.1.1. Sistem za 3D optičko merenje pomeranja i deformacija

Sistem za 3D optičko merenje pomeranja i deformacija se sastoji od posebnih setova stereo kamera i sočiva za svaki od softvera. Sistem još čine postolje koje omogućava sigurnost i stabilnost senzora, uređaj za kontrolu napajanja i snimanja slika, kao i PC sistem (slika 5.2.).



Slika 5.2. Sistem za optičko merenje pomeranja i deformacija [82]

Sistem kamera u kombinaciji sa softverom Aramis predstavlja beskontaktni, optički, 3D sistem za merenje deformacija. Aramis analizira, proračunava i prikazuje izveštaj o deformaciji materijala. Takođe, grafičko predstavljanje izmerenih rezultata daje optimalno razumevanje ponašanje ispitivanog objekta, a posebno je pogodan za trodimenzionalna merenja deformacija pod statičkim i dinamičkim opterećenjima, kako bi se analizirale i deformacije realnih komponenti.

Sistem za 3D optičko merenje pomeranja i deformacija je baziran na metodi digitalne korelacije slika. Osnove ove metode su prikazane u pregledu literature, a osnovni princip rada je prikazan i objašnjen u poglavlju 3. Sistem za optičko merenje deformacija i pomeranja može da meri deformacije u opsegu od 0,01 do 2000 %, kao i pomeranja do 1 μm .

Područje primene sistema za 3D optičko merenje pomeranja i deformacija:

- Testiranje materijala,
- Ispitivanje nelinearnog ponašanja,
- Testovi opterećenja, ispitivanja na puzanje i uticaji starenja, i za kompleksne strukture i visoko-elastične elemente,

- Grafički prikaz izmerenih rezultata pomoću FLC dijagrama (Forming Limit Curves),
- Verifikacija metode konačnih elemenata,
- Analiza deformacije i ponašanja homogenih i nehomogenih materijala.

Najveća merna zapremina sistema za optičko merenje korišćenog u disertaciji je 105 x 80 x 55 mm. Kako dimenzije kućišta ventila prevazilaze dimenzije merne zapremine, nije bilo moguće izmeriti pomeranja i deformacije celog ventila u samo jednom merenju. Zbog razlika u dimenzijama najveće merne zapremine i ventila, pomeranja i deformacije su izmereni na četiri merna mesta na kućištu ventila. Tačan položaj mernih mesta je definisan u daljem tekstu.

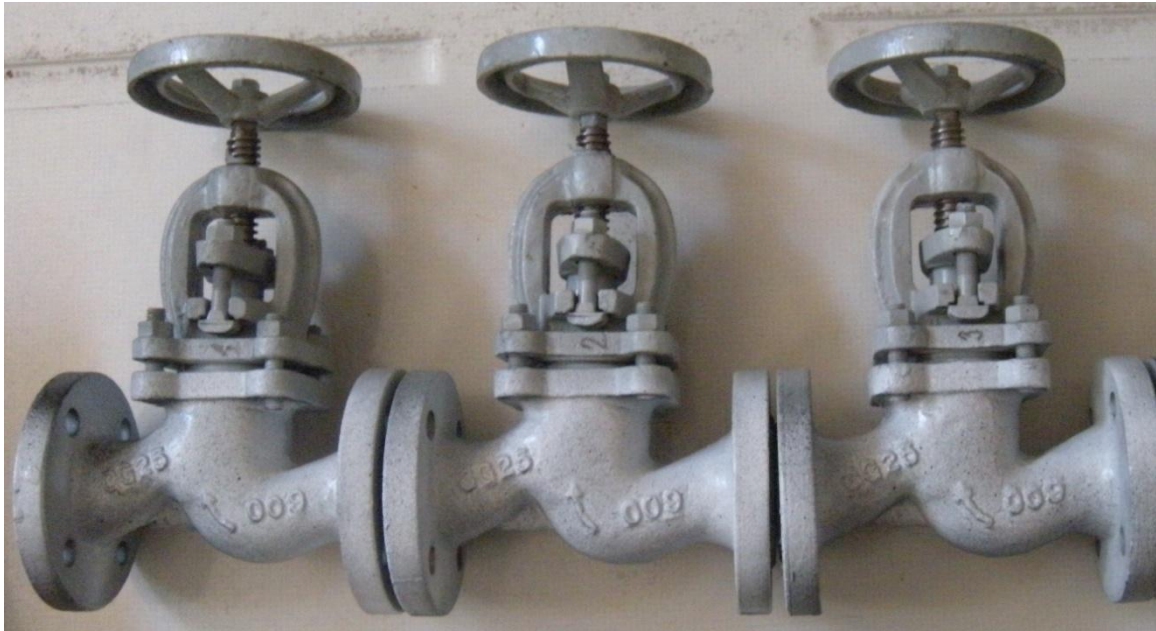
5.2. Priprema ventila i sistema za 3D optičko merenje pomeranja i deformacija

Pre početka snimanja, površina kućišta ventila je išmirglana i očišćena od nečistoća. Kao deo procedure pripreme ventila za snimanje kamerama, sprejom je nanesen sloj bele mat boje. Nakon sušenja, na belu površinu su nanete fino disperzovane crne tačke, radi dobijanja stohastičke šeme koja omogućava kamerama da prati njihovo pomeranje u toku opterećivanja (slika 5.3).



Slika 5.3. Izgled odgovarajuće stohastičke šare

Izgled svih ispitivanih ventila sa nanetom stohastičkom šarom je prikazan na slici 5.4.



Slika 5.4. Ravni zaporni ventili sa odgovarajućom stohastičkom šarom

Pre puštanja u rad mernog sistema, prvo su izabrane odgovarajuće kamere, odnosno senzori koji su korišćeni u toku ispitivanja. Izbor kamera, tj. senzora se vršio na osnovu merne zapremine koju kamera može da obuhvati. Objekat koji se meri definiše mernu zapreminu, a time i set sočiva koja se koriste. Za ispitivanje ventila su korišćena sočiva od 50 mm.

Pre početka prvog merenja, sistem je morao biti kalibrisan. Kalibracija je proces tokom kojeg se merni sistem pomoću objekata za kalibraciju prilagođava, odnosno podešava tako da je obezbeđena dimenziona konzistentnost mernog sistema. Preduslov za uspešnu kalibraciju je ispravno podešavanje senzora, koje je izvršeno na osnovu tabela datih u uputstvu za rukovanje. Kada su merna zapremina i položaj kamera uspešno prilagođeni kalibracijom, počelo se sa merenjem. Detaljni koraci procedure kalibracije su dati u poglavlju 3. Svi parametri procesa kalibracije su posebno prikazani u opisu eksperimenta.

5.3. Vrste opterećenja

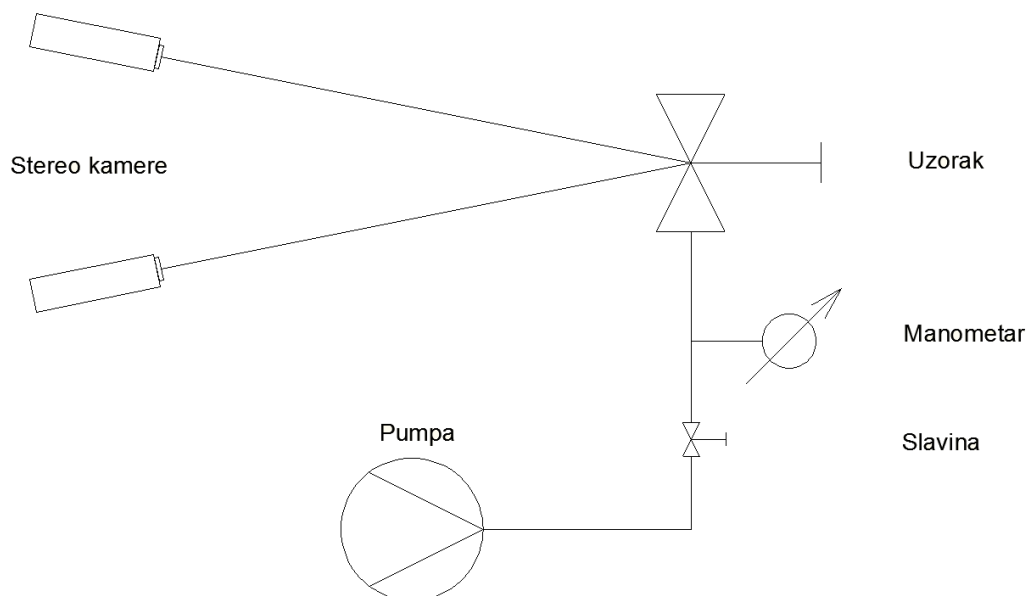
Eksperiment je izvršen za dva slučaja opterećenja, koja se mogu javiti u toku eksploatacije:

- Opterećenje unutrašnjim pritiskom i
- Opterećenje aksijalnom silom (sabijanje duž podužne ose ventila).

5.3.1. Opterećenje unutrašnjim pritiskom

Vrednost unutrašnjeg pritiska od 30 bar, na kome je izvršeno merenje, utvrđena je uzimanjem u obzir nekoliko ograničavajućih faktora. Prvo, na osnovu numeričkog modela je utvrđeno da će pritisak od 30 bar izazvati deformacije na kućištu ventila koje su merljive, a da pri tome neće ući u oblast plastičnih deformacija. Drugi faktor je ograničenje pumpe i laboratorijske instalacije kojoj je maksimalna vrednost pritiska 30 bar.

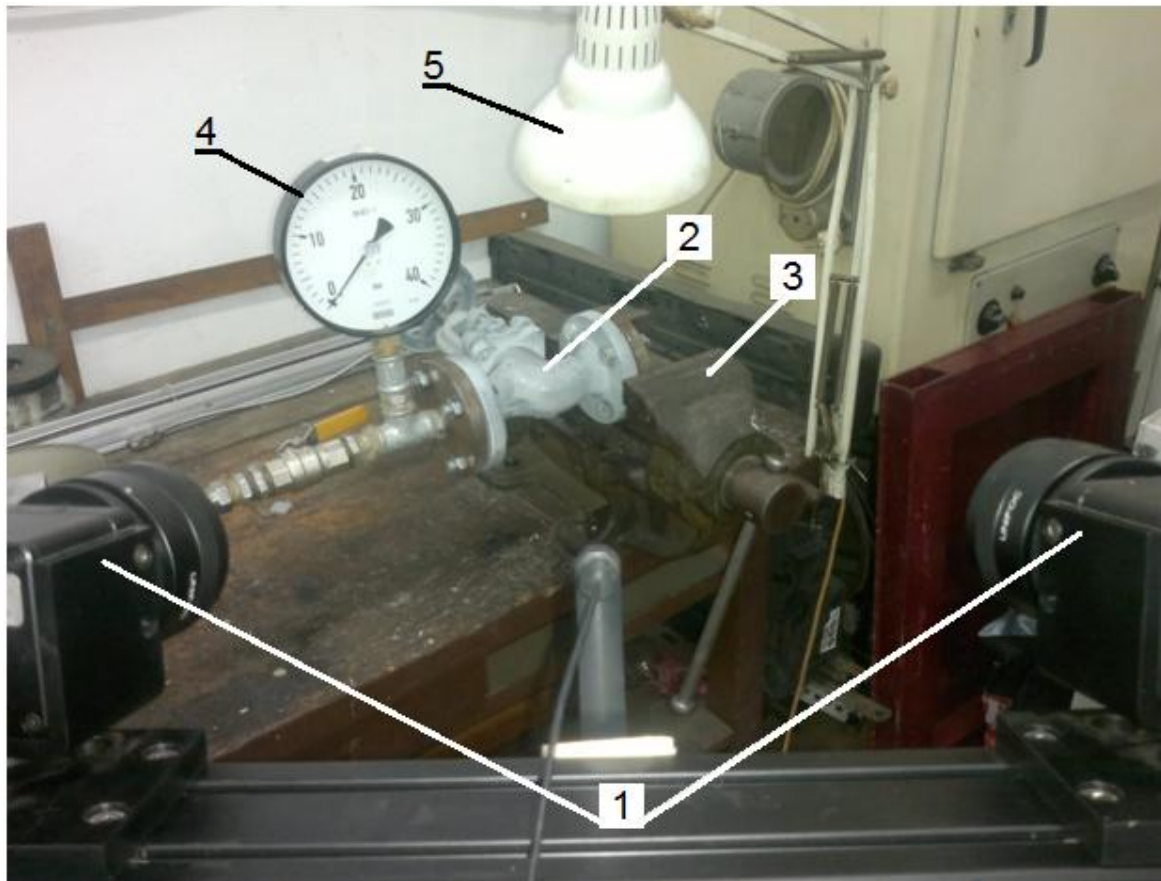
Ventil je povezan na instalaciju za ispitivanje cevovodne armature, na kojoj je sprovedeno standardno ispitivanje čvrstoće kućišta P10, prema standardu SRPS EN 12266-1:2005. Šema ispitne instalacije je prikazana na slici 5.5. Ispitni fluid koji se koristi je voda, temperature 20°C. Porast pritiska u toku opterećivanja je sproveden prema standardu.



Slika 5.5. Šema ispitne instalacije za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom

Eksperimentalna instalacija (slika 5.6.) na kojoj je izvršeno merenje se sastoji iz sledećih delova:

- Ravnog zapornog ventila za ispitivanje,
- Ručne pumpe,
- Manometra,
- Merne opreme,
- Osvetljenja,
- Ostale opreme (prirubnice, cevi, cevna armatura, slavine...).



*Slika 5.6. Eksperimentalna instalacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom.
1 – Stereo kamere; 2 – Ventil; 3 – Stega; 4 – Manometar; 5 – Osvetljenje.*

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

Prilikom ispitivanja je korišćen laboratorijski manometar proizvođača Wika. Očitavanje pritiska je u bar.

Pod ostalom opremom se podrazumevaju, kako je to navedeno: cevi, cevne priрубnice, kuglaste slavine, čiji je broj i dimenzije određen na osnovu potrebe za pravilnim odvijanjem eksperimenta. Sva navedena oprema je odgovarajućih standardnih dimenzija.

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

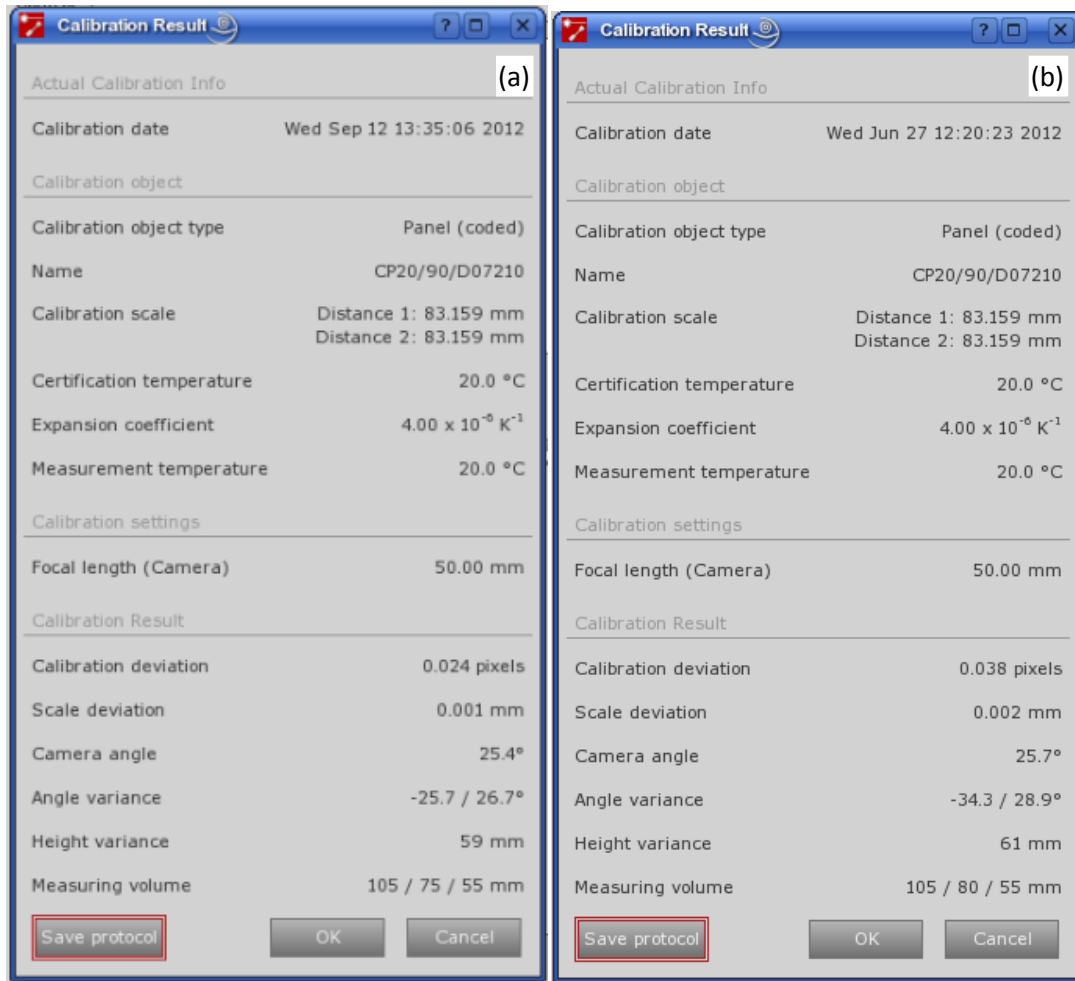
Pozicioniranje ventila

Ventil je slepim prirubnicama zatvoren sa obe strane. Na jednoj od slepih prirubnica je postavljena priključna veza za povezivanje ventila sa pumpom i odgovarajućim manometrom i slavinom. Jedna strana ventila je učvršćena na takav način da je onemogućeno translatorno i rotaciono kretanje ventila (kućišta). Drugi kraj ventila je slobodan. Pre merenja je sprovedeno od vazdušenja instalacije. Za potrebe sprovođenja merenja na različitim mernim mestima na kućištu ventila, koja su unapred definisana, ventil je pozicioniran u najoptimalniji položaj da se zadovolji neophodna vidljivost za pravilno funkcionisanje kamera. Svi ventili su pozicionirani na isti način, radi uporedivosti i ponovljivosti merenja.

Postupak merenja

Urađena su dva eksperimentalna merenja za svaki ventil, na mernim mestima 1 i 3 (slika 5.9). Za svaki eksperiment je prvo vršen optimalni izbor pozicije ventila na osnovu izabranog mernog mesta. Nakon toga su postavljene kamere na propisanoj udaljenosti od mernog objekta (80cm) za ovaj slučaj sistemskih parametara, kao i odgovarajuće osvetljenje.

U okviru priprema sistema za postupak merenja, izvršena su hardverska i softverska podešavanja, kalibracija, te podešavanje parametara za proces snimanja. Rezultati kalibracije su prikazani na slici 5.7a.



Slika 5.7. Rezultati kalibracije za slučaj opterećenja (a) unutrašnjim pritiskom i (b) aksijalnom silom

Parametri podešavanja na Aramisu, koji su korišćeni za merenje pomeranja i deformacija kućišta ventila opterećenog unutrašnjim pritiskom:

- Sočiva kamera: 50 mm,
- Udaljenost kamera od mernog objekta: 80 cm,
- Kalibraciona ploča: CP 20/90/D07210,
- Veličina merne zapremine: 105x75x55 mm,
- Facet size: 25x20,
- Ukupan broj slika (po jednom merenju): 3,
- Calibration deviation (odstupanje kalibracije): 0,024.

Nakon sprovedenih svih pripremnih radnji, prešlo se na sam eksperiment. Opterećivanje i snimanje je izvršeno manuelno. Potrebno je naglasiti da prva slika svakog eksperimenta prikazuje neopterećeno stanje ventila koje služi kao referentna slika za obradu podataka. Opterećivanje ventila je vršeno manuelno sa porastom pritiska definisanim standardom. Kada je pritisak dostigao željenu vrednost, zatvorena je slavina koja se nalazila između ventila i pumpe. Posle zatvaranja slavine, snimanje se vršilo nakon 30s, kako bi se izjednačio pritisak unutar instalacije. Posle snimanja, slavina je otvarana i nastavljano je povišenje pritiska u instalaciji do maksimalne vrednosti. Snimanje je izvršeno za vrednosti pritiska od 20 i 30 bar. Maksimalni pritisak kojim se vršilo opterećivanje je 30 bar. Nakon dostizanja maksimalnog pritiska, vršilo se snimanje i kontinualno rasterećivanje ventila. Ukupan broj napravljenih slika je 3.

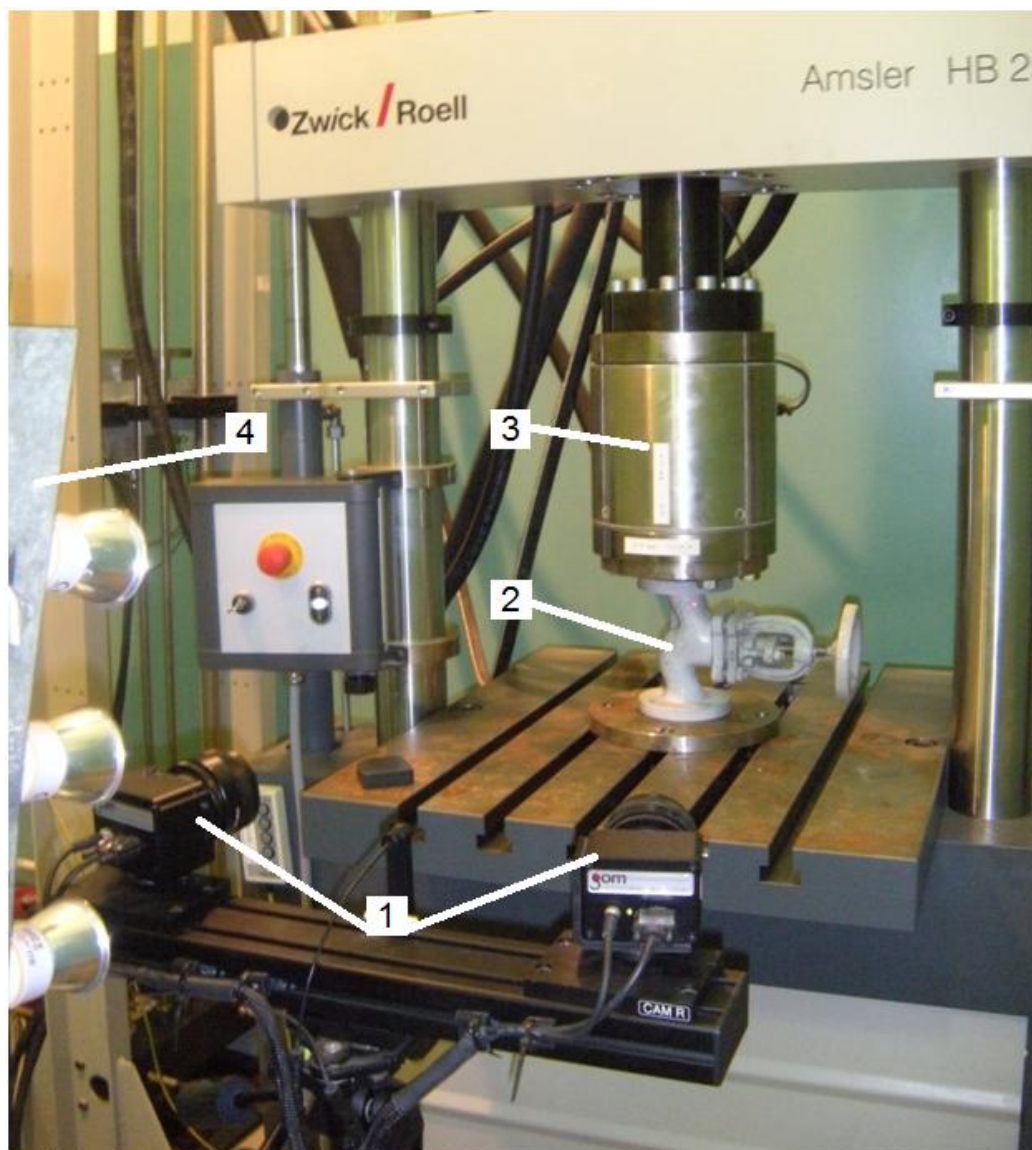
Nakon završenog procesa snimanja, izvršena je obrada slika i priprema za proces softverske obrade snimljenih rezultata. Na slikama su definisane referentne tačke preko kojih sistem povezuje podatke snimljene levom i desnom kamerom. Referentne tačke su definisane na nultoj slici, odnosno na slici neopterećenog ventila, nakon čega je sistem automatski postavljao referentne tačke na ostalim slikama. Broj referentnih tačaka je proizvoljan, a njihovo pozicioniranje je izvršeno na osnovu preporuka proizvođača opreme. Po završetku ovih podešavanja, softver je počeo obradu snimaka.

5.3.2. Opterećenje aksijalnom silom (sabijanje)

Merenje pomeranja i deformacija kućišta ventila je izvršeno za slučaj opterećenja aksijalnom silom (sabijanjem) od 30,1 kN. Računskim putem je određena vrednost sile za prosečno opterećenje od cevovoda. Vrednost aksijalne sile od 30,1 kN predstavlja uticaj cevovoda DN 32 na koji je ventil povezan u toku eksploatacije, za slučaj temperaturske razlike od 90°C. U praksi se koriste tehnička rešenja kojima se smanjuje uticaj temperaturskih dilatacija na cevovodima, ali se ta tehnička rešenja ne primenjuju uvek.

Eksperimentalna instalacija (slika 5.8) na kojoj je izvršeno merenje se sastoji iz sledećih delova:

- Ravnog zapornog ventila za ispitivanje,
- Dinamičke kidalice – pulzatora,
- Merne opreme,
- Osvetljenja.



*Slika 5.8. Eksperimentalna instalacija za slučaj opterećenja aksijalnom silom:
1 – Stereo kamere; 2 – Ravnog zaporni ventil; 3 – Čeljusti pulzatora; 4 – Osvetljenje.*

Simuliranje opterećenja aksijalnom silom je izvršeno na dinamičkoj kidalici – pulzatoru Zwick/Roell Amsler HB250, koja ima maksimalno opterećenje od 250 kN. Parametri podešavanja na pulzatoru:

- Maksimalno eksperimentalno opterećenje: 30,1 kN;
- Kontrola pomeranja je u funkciji sile;
- Brzina priraštaja sile je 0,2 kN/s;
- Ukupno vreme trajanja pojedinačnog opterećivanja je oko 150s;
- Akvizicija podataka: 10 000 podataka po pojedinačnom eksperimentu.

Parametri podešavanja na Aramisu, koji su korišćeni za merenje kućišta ventila opterećenog aksijalnom silom:

- Sočiva kamera: 50 mm,
- Udaljenost kamera od mernog objekta: 80 cm,
- Kalibraciona ploča: CP 20/90/D07210,
- Veličina merne zapremine (približno): 105 x 80 x 55 mm,
- Facet size: 25 x 20,
- Brzina snimanja: po jedna slika na svakih 5 sekundi,
- Ukupan broj slika: 30-33,
- Calibration deviation (odstupanje kalibracije): 0,038.

Kao dodatno osvetljenje je korišćena posebno dizajnirana lampa sa LED sijalicama, koje proizvode difuzno svetlo i omogućavaju podešavanje intenziteta svetlosti. Rezultati kalibracije su prikazani na slici 5.7.

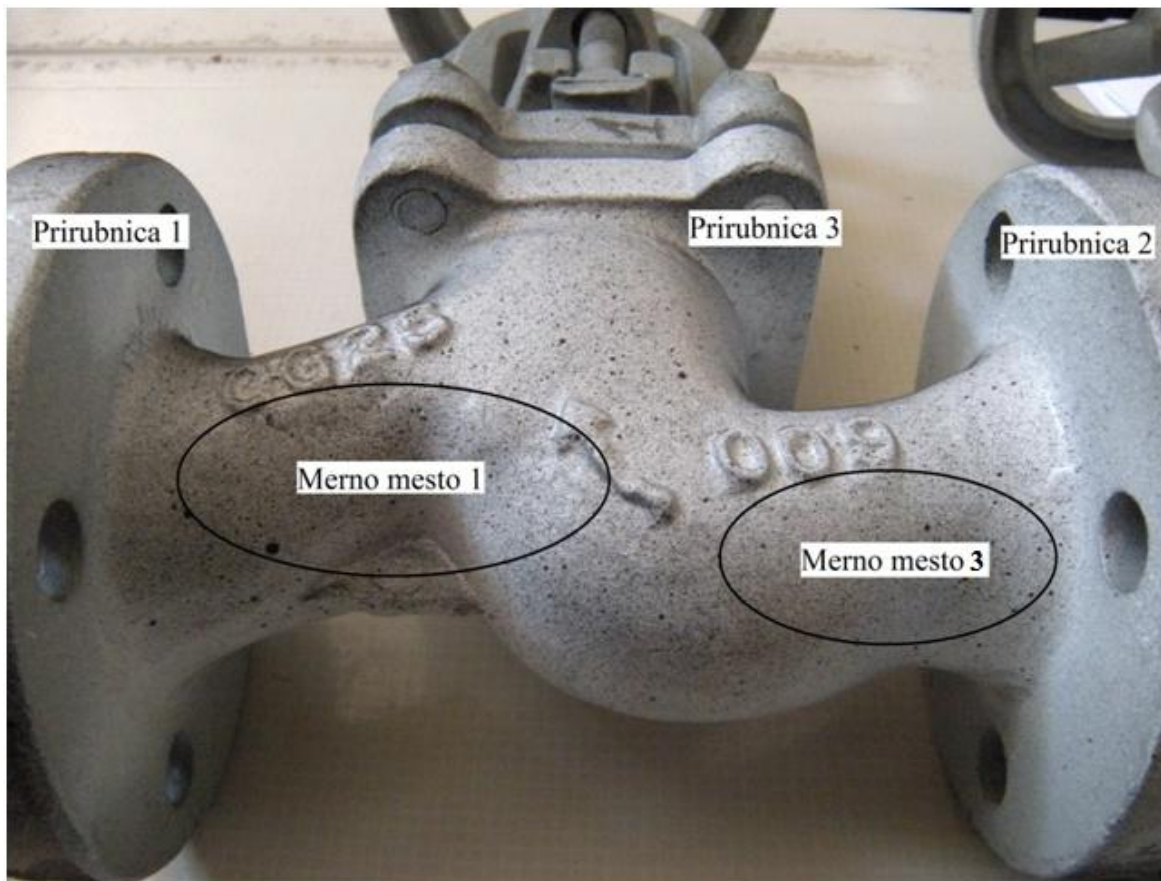
Pozicioniranje ventila

Ventil je pozicioniran vertikalno na pulzator, sa osom ventila postavljenom koaksijalno sa pravcem kretanja gornje čeljusti pulzatora. Pozicioniranje čeljusti u odnosu na ventil je vršeno putem računara, na takav način da dolazi do kontakta čeljusti i ventila, ali da je sila kontakta manja od 0,05 kN. Čeljust pulzatora je direktno oslanjana na prirubnicu ventila.

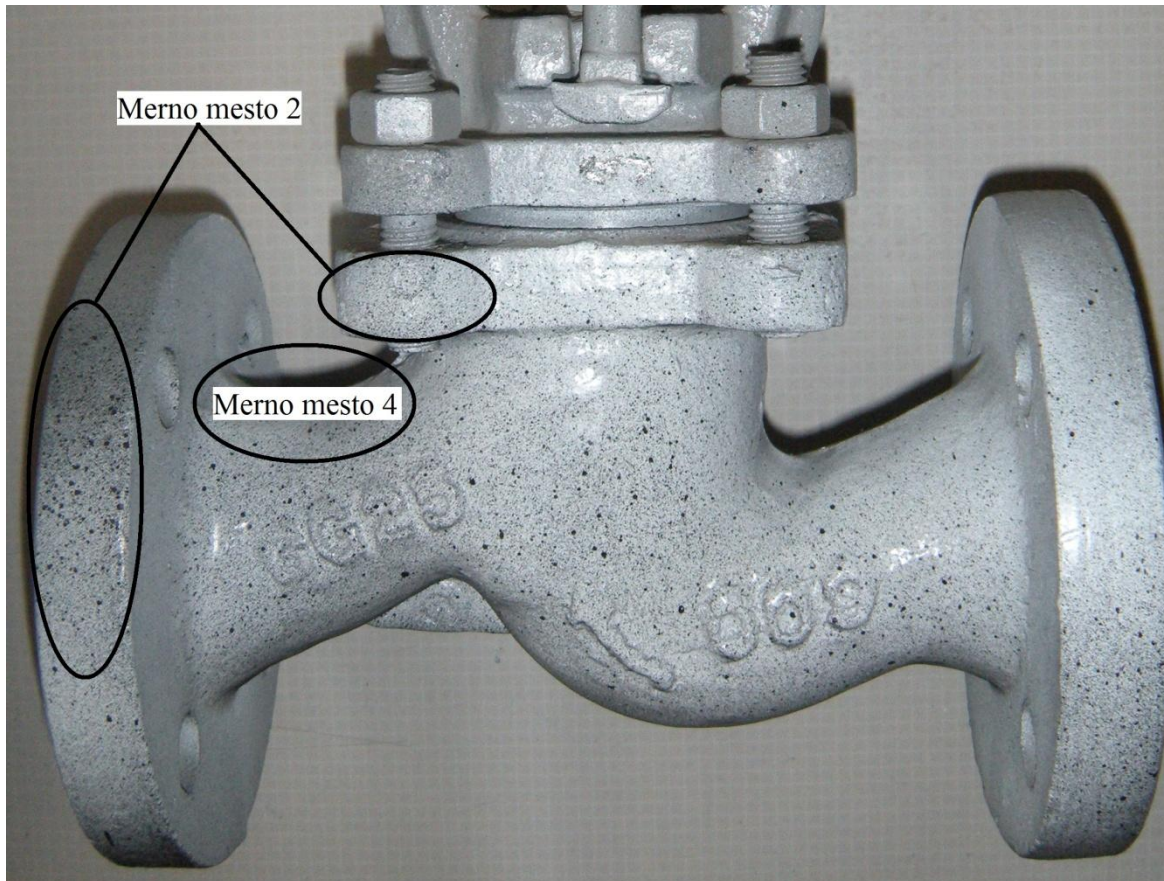
Postupak merenja

Urađena su ukupno četiri eksperimentalna merenja za svaki ventil, za četiri prethodno definisana merna mesta. Merna mesta su označena brojevima od 1 do 4, a njihov tačan položaj je prikazan na slikama 5.9 i 5.10.

Merna mesta 1 i 3 na kućištu ventila su definisana za dva geometrijska diskontinuiteta. Merno mesto 1 je spoj sfere i cilindra sa jako izraženim geometrijskim diskontinuitetom na koje je postavljeno ojačanje, dok je merno mesto 3 spoj sfere i cilindra sa znatno blažim geometrijskim diskontinuitetom. Merno mesto 2, koje se odnosi na prirubnice 1 i 3, je izabrano radi preciznijeg merenja pomeranja ventila u toku izlaganja aksijalnom opterećenju (sabijanju).



Slika 5.9. Položaj mernih mesta 1 i 3 na ventilu

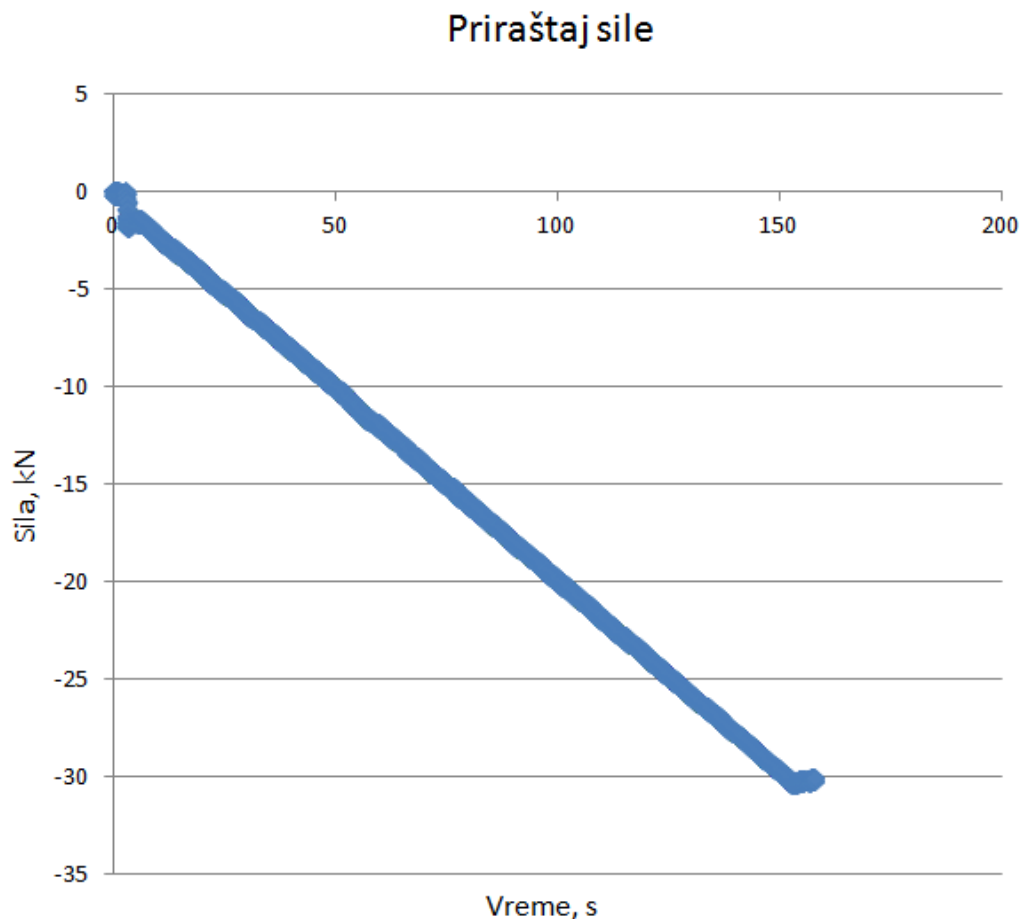


Slika 5.10. Položaj mernih mesta 2 i 4 na ventilu

Prvo eksperimentalno merenje je izvršeno za bočnu stranu ventila, i to polovinu ispod prirubnice 1 (slika 5.9) – merno mesto 1 (MM1), a drugo takođe za bočnu stranu kućišta ventila, ali za polovinu iznad prirubnice 2 - merno mesto 3 (MM3). Zatim je izvršeno ispitivanje na mernom mestu 2 (MM2), odnosno na prirubnicama 1 i 3 (slike 5.9 i 5.10). Nakon izvršena tri eksperimenta, ventil je zarotiran oko svoje ose i eksperimentalno merenje je urađeno za prelazni deo kućišta između prirubnica 1 i 3 – merno mesto 4 (MM4), kao što je prikazano na slici 5.10. Za sve ventile se birao isti položaj ventila i kamera za isto merno mesto, radi uporedivosti i ponovljivosti merenja.

Za svaki eksperiment je prvo vršeno pozicioniranje ventila na pulzatoru na osnovu izabranog mernog mesta. Nakon toga su postavljene kamere na propisanoj udaljenosti od mernog objekta (80cm) za ovaj slučaj sistemskih parametara, kao i odgovarajuće osvetljenje.

Kada su sprovedene sve pripremne radnje, prešlo se na sam eksperiment. Opterećivanje i snimanje je vršeno automatski i kontinualno, s tim da prva slika svakog eksperimenta prikazuje neopterećeno stanje ventila koje služi kao referentna slika za obradu podataka. Opterećivanje ventila je vršeno kontinualno, sa brzinom priraštaja sile od 0,2kN/s. Maksimalna sila kojom se vršilo opterećivanje je 30,1kN. Nakon dostizanja maksimalne sile, zaustavljalo se snimanje kamerama. Pri maksimalnoj vrednosti sile, vršena je akvizicija podataka sa pulzatora, nakon čega je vršeno rasterećivanje ventila. Posle rasterećivanja, odnosno kada je vrednost sile dostigla početnu nultu vrednost, kamerama je napravljen još jedan snimak rasterećenog ventila. Ukupan broj napravljenih slika je 32. Na slici 5.11 je prikazan priraštaj sile u toku opterećivanja ventila aksijalnom silom.



Slika 5.11. Priraštaj sile na pulzatoru

POGLAVLJE 6

EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Rezultati dobijeni eksperimentalnim merenjima koja su objašnjena u poglavlju 5 su predstavljeni u ovom poglavlju pomoću slika, tabela i dijagrama. Prikazani su za svako od mernih mesta pojedinačno, od mernog mesta 1 (MM1) do mernog mesta 4 (MM4).

Nakon proračuna i obrade ulaznih podataka, dobijeni rezultati su dostupni za svaki od koraka opterećenja (dato u poglavlju 5). Pre sređivanja i analize rezultata, potrebno je za svako od karakterističnih mernih mesta odabrati odgovarajući način prikazivanja 3D rezultata. Za predstavljanje rezultata na trodimenzionalnom modelu i dijagramima se mogu koristiti tačke, preseki i primitivi. Način prikazivanja rezultata se bira prema karakteristikama mernih mesta, što će detaljno biti opisano u daljem tekstu.

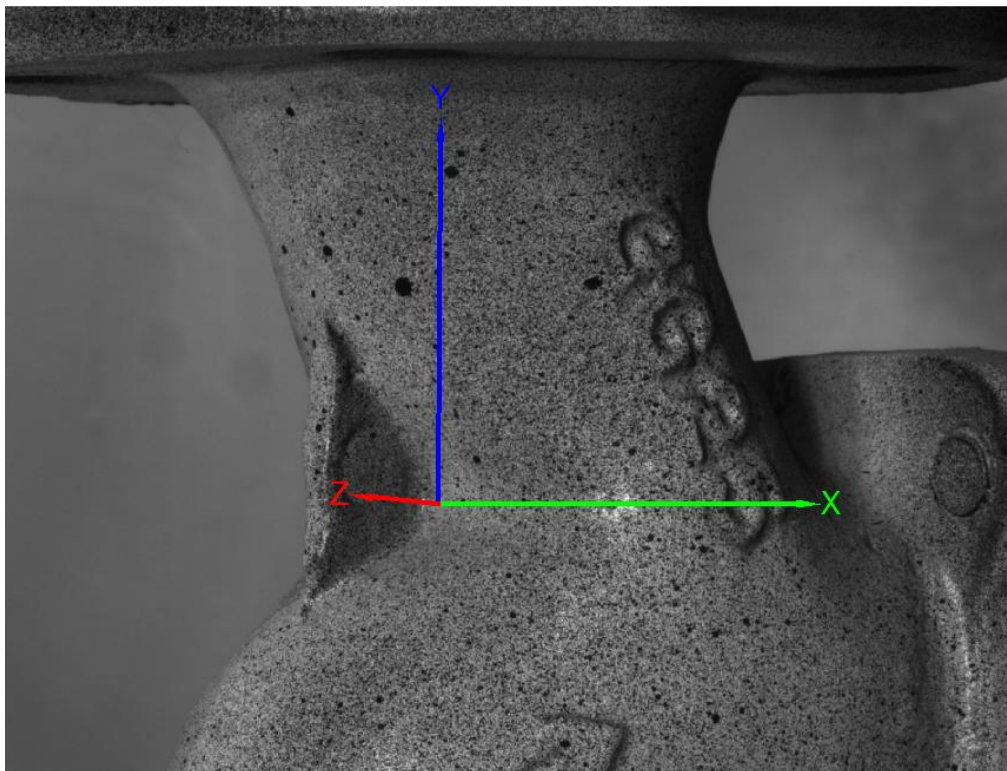
Program Aramis pored predefinisanih slika i dijagrama, koji omogućavaju bolju vizualizaciju i razumevanje eksperimentalnih rezultata, pruža i detaljan tabelaran prikaz svih veličina koje se dalje mogu analizirati u drugim adekvatnim programima. Tako je za merno mesto 1 urađena i statistička analiza i analitički definisana funkcionalna zavisnost Mizesovih deformacija i koordinate tačaka na odgovarajućim presecima. Analitička funkcionalna zavisnost je određena za slučaj opterećenja aksijalnom silom i unutrašnjim pritiskom. Takođe je definisana 3D površina, koja najbolje opisuje zavisnost sile opterećenja i Mizesove deformacije za bilo koju tačku na sekciji. Trodimenzionalna površina je definisana za slučaj opterećenja aksijalnom silom.

6.1. Opterećenje aksijalnom silom

6.1.1. Rezultati merenja za merno mesto MM1

Merno mesto 1 (MM1) se nalazi na mestu spoja sfere i cilindra. Za MM1 su prikazani rezultati pomeranja u Y pravcu (vertikalni pravac, paralelan pravcu sile opterećenja) i Mizesovih deformacija.

Prilikom eksperimentalnih merenja, sistem automatski definiše položaj globalnog koordinatnog sistema. Za potrebe analitičke analize i dalje obrade rezultata, definisan je novi položaj globalnog koordinatnog sistema. Koordinatni početak je postavljen na spoju sfere i cilindra, pri čemu je koordinata Y postavljena koaksijalno sa silom opterećenja. Tačan položaj koordinatnog sistema je prikazan na slici 6.1.



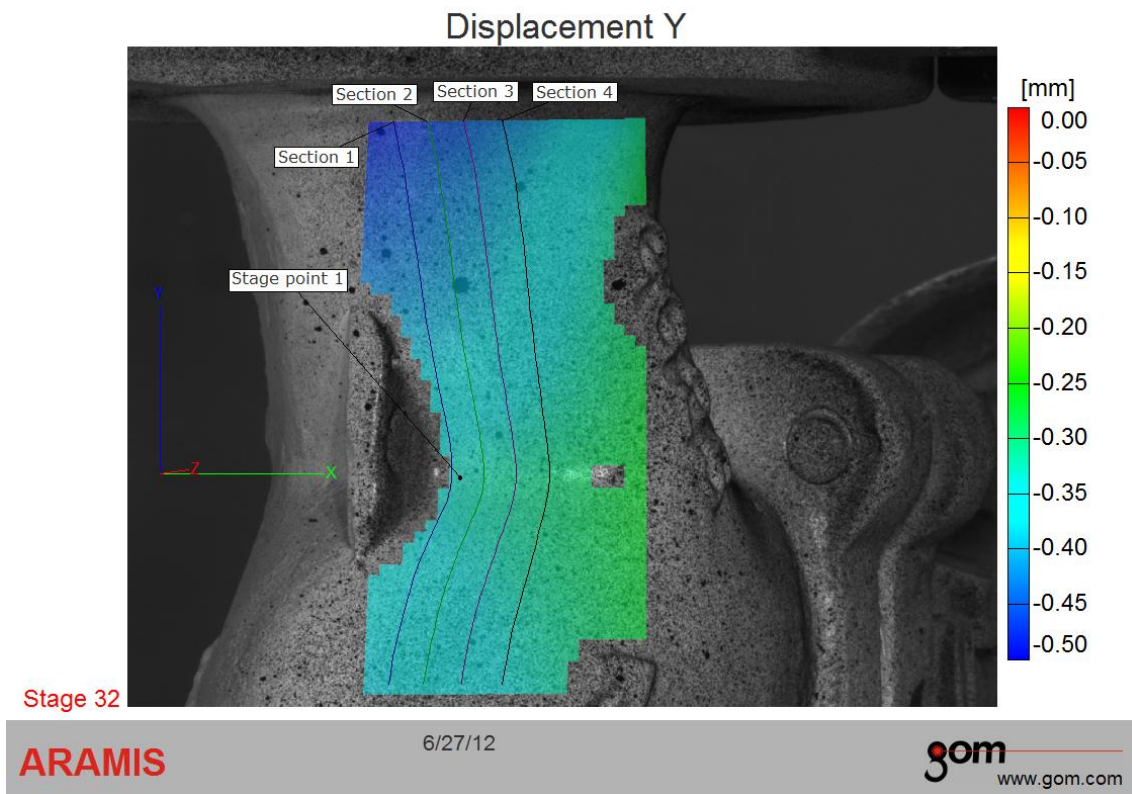
Slika 6.1. Položaj globalnog koordinatnog sistema za merno mesto 1

Svaki ventil je analiziran u 4 linijska preseka (sections) i jednom tačkom (stage point 1), kao što je prikazano na slici 6.2. Tačka 1 (stage point 1) je postavljena na spoju sfere i

cilindra. Dužina svakog od preseka odgovara vertikalnoj dimenziji mernog mesta, odnosno približno iznosi 80 mm. Preseci su određeni presekom ravne površine, koja je paralelna sa ojačanjem i površine samog ventila, odnosno 3D modela mernog mesta. Postavljeni su na međusobnoj udaljenosti od 4 mm. Svaki od preseka se u preseku sastoji od 65 tačaka. Za svaku tačku su izmerene koordinate u neopterećenom stanju, u toku opterećivanja i rasterećenom stanju. Tako je merno mesto 1, opterećeno aksijalnom silom, analizirano sa jednom, pojedinačno postavljenom tačkom i 12 preseka (sva tri ventila), odnosno sa oko 780 tačaka.

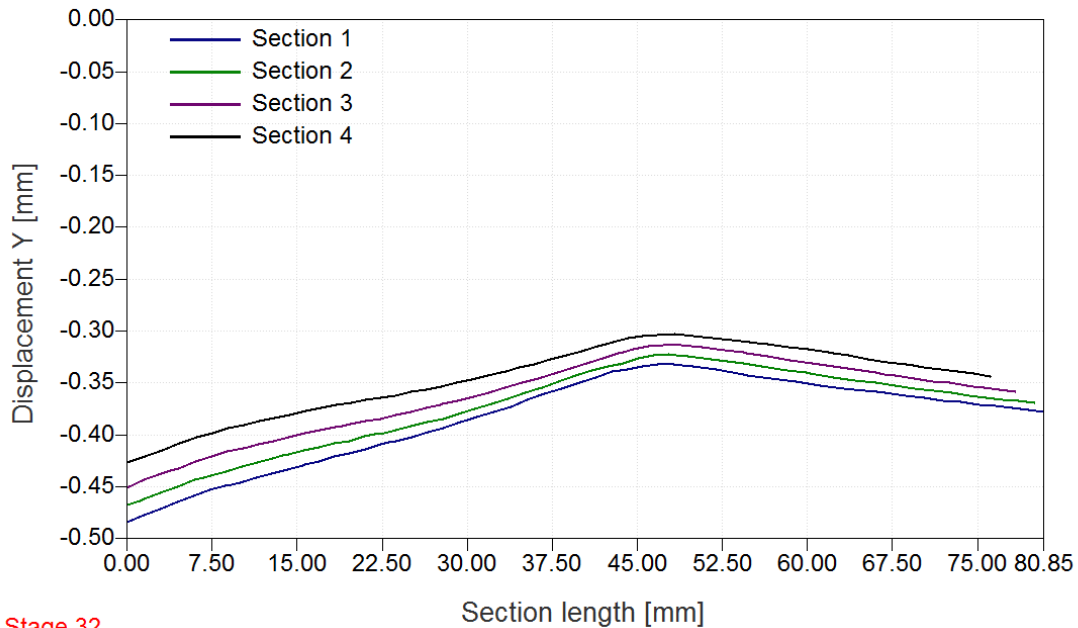
Podaci dobijeni eksperimentalnim putem, prikazani su i grafički, za svaki od karakterističnih preseka ventila, u cilju definisanja funkcionalnih zavisnosti deformacija i dužine preseka.

Polje pomeranja u Y pravcu mernog mesta 1 za ventil 1 je prikazano na slici 6.2 za slučaj opterećenja maksimalnom silom od 30 kN. Na ordinati na slici 6.2 je prikazana skala koja je data u mm, dok je na samoj slici prikazan koordinatni sistem i položaji poprečnih preseka. Negativne vrednosti prikazane na dijagramu su zbog smera koordinatnog sistema, odnosno smera Y ose. Kao što se može videti sa slike, polje sa najvećim vertikalnim pomeranjem (plava boja) se nalazi između prirubnice i ojačanja, odnosno u zoni ispod prirubnice. Pomeranje u Y pravcu u toj zoni iznosi oko 0,5 mm.



Slika 6.2. Polje pomeranja u Y pravcu za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM1

Vrednosti pomeranja u Y pravcu je moguće prikazati i pomoću dijagrama. Dijagram pomeranja u Y pravcu za svaki od poprečnih preseka ventila 1 je prikazan na slici 6.3. Vrednosti pomeranja (slika 6.3) su date u funkciji dužine poprečnog preseka. Kao što se vidi na dijagramu, vrednosti pomeranja u Y pravcu se smanjuju sa udaljenjem od ojačanja. Najveće vrednosti pomeranja (0,43 do 0,49 mm) se javljaju u zoni ispod prirubnice 1 (slika 5.9), odnosno na cilindričnom delu. Najmanje vrednosti pomeranja su na samom spoju sfere i cilindra i iznose od 0,30 do 0,34 mm. Na sfernom delu su vrednosti pomeranja u granicama od 0,32 do 0,39 mm.



Stage 32

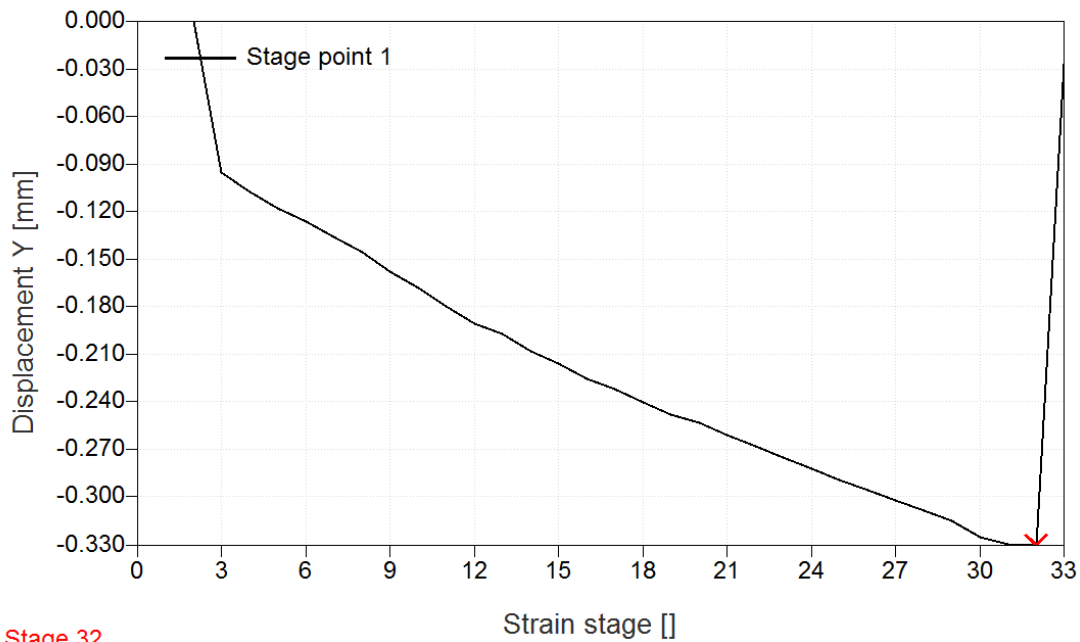
ARAMIS

6/27/12

gom
www.gom.com

Slika 6.3. Dijagram pomeranja u Y pravcu za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM1

Vrednosti pomeranja u Y pravcu za tačku 1 (stage point 1), koje su prikazane na slici 6.2., je moguće prikazati i u zavisnosti od vremena opterećivanja (strain stage). Tako je na slici 6.4. prikazana promena vrednosti pomeranja u Y pravcu od neopterećenog stanja (strain stage 0), preko maksimalno opterećenog stanja (strain stage 32) do rasterećenog stanja (strain stage 33). Porast vrednosti pomeranja u Y pravcu (slika 6.4.) je prikazana za ventil 1.



Stage 32

ARAMIS

6/27/12

gom
www.gom.com

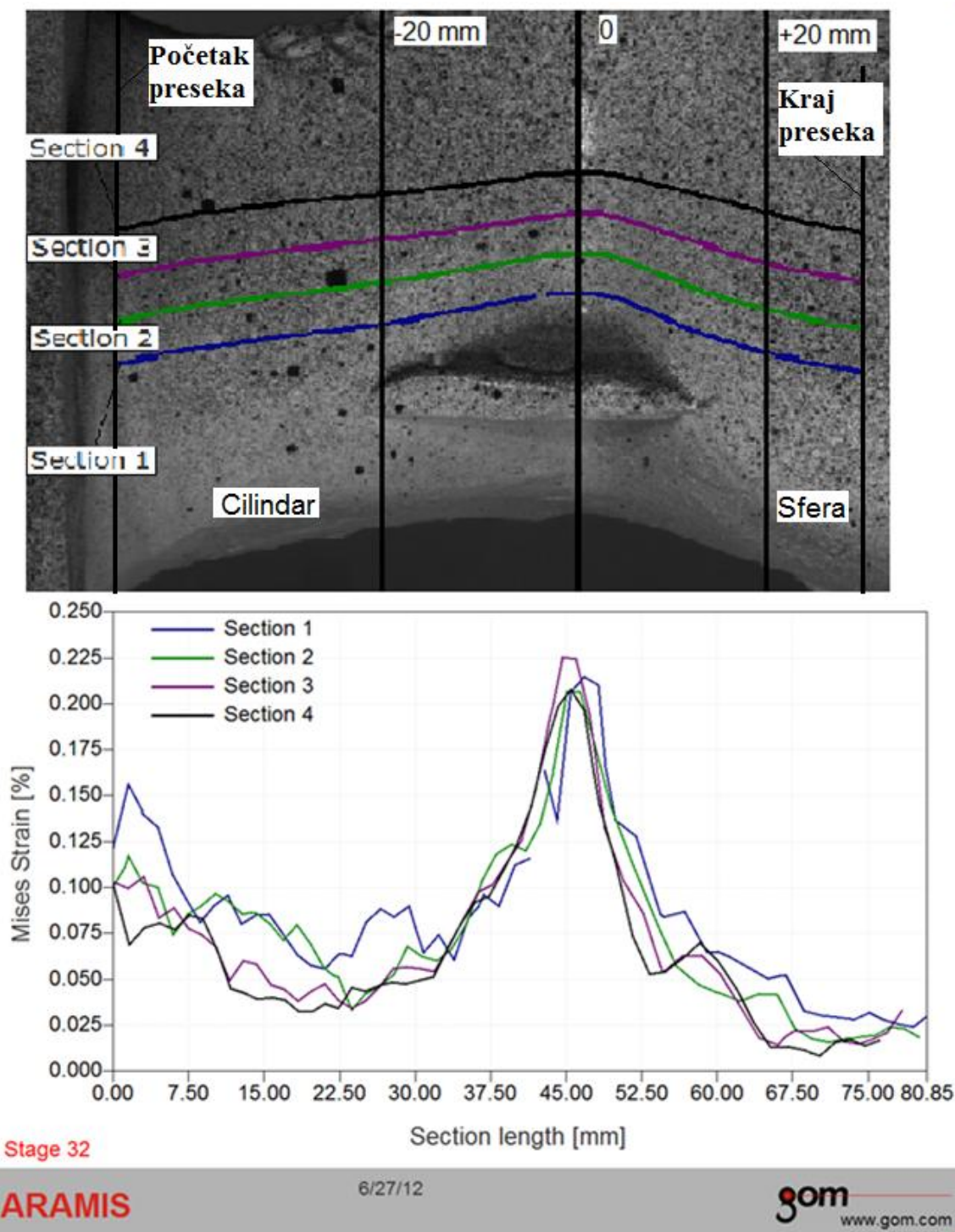
Slika 6.4. Dijagram pomicanja u Y pravcu tačke 1 za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MMI

Polje Mizesovih deformacija je prikazano za slučaj opterećenja maksimalnom silom od 30kN za ventil 1 (slika 6.5). Na slici 6.5 je na ordinati prikazana skala, koja je data u %, dok su na samoj slici prikazani koordinatni sistem i položaji poprečnih preseka. Procentualne vrednosti deformacija su date u odnosu na nulti, neopterećeni korak. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju u zoni najvećih geometrijskih diskontinuiteta, odnosno na spoju sfere i cilindra i iznose oko 0,22 %. Udaljavanjem od ojačanja (u x pravcu), smanjuje se i geometrijski diskontinuitet, pa samim tim i vrednost deformacija kontinualno opada.



Slika 6.5. Polje Mizesovih deformacija za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM1

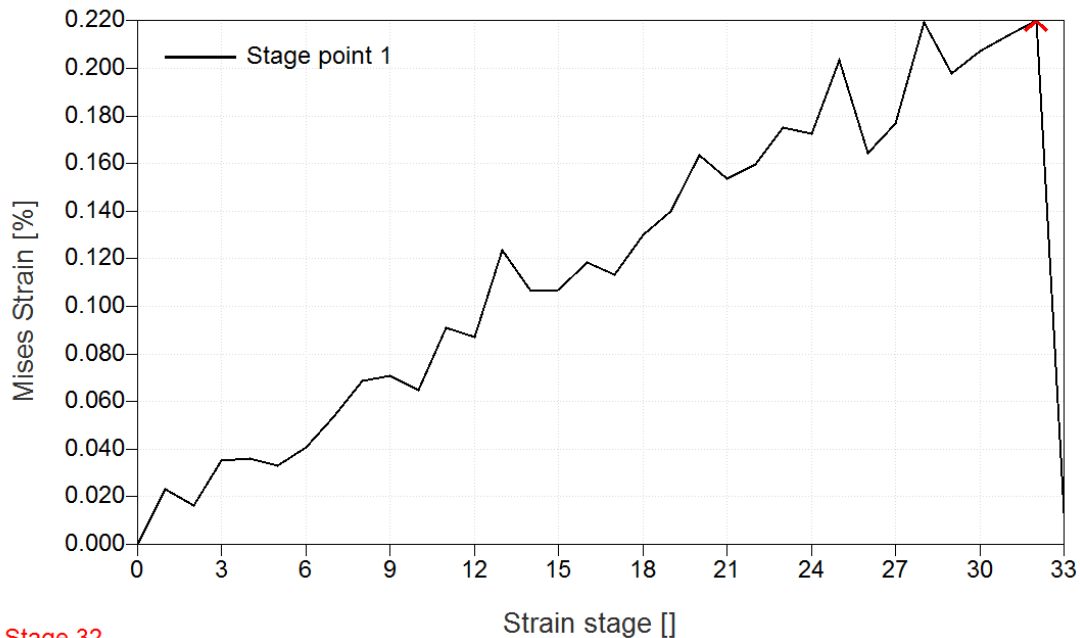
Vrednosti Mizesovih deformacija je moguće prikazati i pomoću dijagrama. Dijagram Mizesovih deformacija za svaki od preseka (od 1 do 4) na ventilu 1 je dat na slici 6.6. Vrednosti Mizesovih deformacija (slika 6.6) su date u funkciji dužine preseka. Kao što se vidi na dijagramu, vrednosti Mizesovih deformacija su najveće na spoju sfera/cilindar i iznose od 0,21 do 0,225 %. Na sfernom delu ventila, deformacije su u granicama od 0,01 do 0,03 %. Na cilindričnom delu ventila, deformacije su veće nego na sfernom delu i u granicama su od 0,03 do 0,09 %. Vrednosti deformacija na cilindričnom delu, ka zoni pored prirubnice, kontinualno rastu i u granicama su od 0,07 do 0,15 %.



Slika 6.6. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MMI

Mizesove deformacije, prikazane na slici 6.5, za tačku 1 (stage point 1) je moguće iskazati i u zavisnosti od vremena opterećivanja. Tako je na slici 6.7 prikazana promena

vrednosti Mizesovih deformacija od neopterećenog stanja (strain stage 0), preko maksimalno opterećenog stanja (strain stage 32) do rasterećenog stanja (strain stage 33). Porast vrednosti Mizesovih deformacija (slika 6.7) je prikazan za ventil 1.



Stage 32

ARAMIS

6/27/12

gom
www.gom.com

Slika 6.7. Dijagram Mizesovih deformacija tačke 1 za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MMI

Za svaki od preseka prikazanih na slikama 6.2 i 6.5 je moguće i tabelarno prikazati vrednosti pomeranja u Y pravcu i Mizesovih deformacija za svaku od tačaka koje se nalaze po dužini preseka. U tabeli 6.1 su vrednosti prikazane za ventil 1 pri opterećenju za aksijalnu silu od 30 kN.

Naponi i deformacije struktura kompleksne geometrije cevovodne armature

Tabela 6.1. Vrednosti pomeranja u Y pravcu i Mizesovih deformacija za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM1 za ventil 1

Ventil 1												
Redni broj tačke na preseku	Section 1			Section 2			Section 3			Section 4		
	Dužina sekcije [mm]	Pomeranje u Y pravcu [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina sekcije [mm]	Pomeranje u Y pravcu [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina sekcije [mm]	Pomeranje u Y pravcu [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina sekcije [mm]	Pomeranje u Y pravcu [mm]	Mizesova deformacija [%]
1	0	-0,4839	0,1213	0	-0,4679	0,1004	0	-0,4512	0,1028	0	-0,4263	0,102
2	1,279	-0,4776	0,1561	1,001	-0,4631	0,1109	1,282	-0,4433	0,0998	1,294	-0,4211	0,0689
3	2,52	-0,4716	0,1412	1,273	-0,4618	0,117	2,568	-0,4375	0,1058	2,587	-0,4146	0,0784
4	2,551	-0,4714	0,1401	2,557	-0,4559	0,1023	3,26	-0,4345	0,0941	3,878	-0,4081	0,0806
5	3,829	-0,4642	0,1326	3,843	-0,4495	0,1001	3,856	-0,432	0,0833	4,584	-0,4049	0,0784
6	5,104	-0,4582	0,1073	5,122	-0,443	0,0744	5,142	-0,4254	0,0887	5,168	-0,4023	0,0773
7	6,378	-0,4528	0,0933	5,855	-0,4408	0,0803	6,42	-0,4209	0,0776	6,451	-0,3984	0,085
8	7,648	-0,4491	0,0813	6,396	-0,4392	0,0856	7,688	-0,4157	0,0745	7,724	-0,3935	0,083
9	7,763	-0,4488	0,082	7,668	-0,435	0,09	8,957	-0,4128	0,0675	8,993	-0,3906	0,0658
10	8,916	-0,4458	0,0898	8,936	-0,4304	0,0967	9,094	-0,4124	0,0656	10,264	-0,387	0,0449
11	10,183	-0,4413	0,0955	10,205	-0,4267	0,0923	10,228	-0,4093	0,0494	11,506	-0,3841	0,0427
12	11,454	-0,4372	0,0803	11,478	-0,4228	0,0854	11,5	-0,4059	0,0603	11,537	-0,3841	0,0427
13	12,729	-0,4331	0,0849	12,261	-0,4201	0,0864	12,771	-0,4017	0,0582	12,811	-0,3803	0,0391
14	14,008	-0,4292	0,0852	12,752	-0,4184	0,086	14,045	-0,3983	0,0468	14,086	-0,3772	0,04
15	14,17	-0,4287	0,0838	14,025	-0,4153	0,0803	15,318	-0,3958	0,0443	15,361	-0,3742	0,0387
16	15,286	-0,4255	0,0741	15,299	-0,4121	0,0711	16,59	-0,3926	0,038	16,636	-0,3712	0,0325
17	16,564	-0,4209	0,0636	16,572	-0,4081	0,0797	16,865	-0,392	0,0392	17,911	-0,3686	0,0322
18	17,841	-0,4175	0,0577	17,845	-0,4059	0,0695	17,864	-0,3897	0,0436	19,185	-0,3663	0,0369
19	19,123	-0,4137	0,0559	19,121	-0,401	0,0565	19,137	-0,3868	0,0474	20,461	-0,3639	0,0344
20	20,401	-0,4092	0,0637	19,969	-0,3996	0,0521	20,415	-0,3844	0,0385	21,016	-0,3631	0,0393
21	21,075	-0,4073	0,0634	20,4	-0,3989	0,0513	21,694	-0,381	0,0342	21,739	-0,3619	0,0454
22	21,683	-0,4056	0,0626	21,681	-0,3954	0,0333	22,977	-0,3777	0,0382	23,018	-0,3587	0,0436
23	22,971	-0,4023	0,0811	22,965	-0,3916	0,0423	24,262	-0,3739	0,0453	24,299	-0,3561	0,0466
24	24,262	-0,3975	0,0882	24,254	-0,3879	0,046	25,394	-0,3707	0,0544	25,583	-0,3531	0,0486
25	25,56	-0,3931	0,0838	25,546	-0,3843	0,0528	25,548	-0,3702	0,0555	26,868	-0,3499	0,0475
26	26,863	-0,388	0,0899	26,844	-0,3799	0,068	26,836	-0,3669	0,0566	28,155	-0,3464	0,0494
27	27,414	-0,3858	0,0779	27,047	-0,3791	0,0669	28,129	-0,3635	0,0557	29,446	-0,3427	0,0512
28	28,174	-0,3827	0,0645	28,144	-0,3748	0,0627	29,426	-0,3589	0,0545	30,533	-0,3401	0,0639
29	29,489	-0,3782	0,0742	29,452	-0,3703	0,0603	30,728	-0,3546	0,0677	30,74	-0,3396	0,0663
30	30,811	-0,3728	0,0605	30,765	-0,3651	0,0665	32,034	-0,3498	0,0833	32,036	-0,3353	0,0807
31	32,132	-0,3665	0,0833	32,087	-0,3598	0,0807	32,744	-0,3476	0,0905	33,335	-0,3317	0,0919
32	33,002	-0,3626	0,0892	33,076	-0,3558	0,0971	33,342	-0,3457	0,0977	34,636	-0,3272	0,0951
33	33,459	-0,3606	0,0964	33,41	-0,3545	0,1034	34,653	-0,3412	0,1013	35,939	-0,3233	0,1092
34	34,794	-0,3556	0,0899	34,731	-0,3488	0,1179	35,966	-0,3362	0,1136	37,244	-0,319	0,1237
35	36,132	-0,3494	0,1124	36,048	-0,3432	0,1235	37,282	-0,3309	0,1254	38,543	-0,3146	0,144
36	37,46	-0,3445	0,1155	37,365	-0,3381	0,1198	38,593	-0,3259	0,1531	39,267	-0,3126	0,1607
37	/	-0,3393	/	38,678	-0,3343	0,1348	39,893	-0,3215	0,1902	39,84	-0,3109	0,1739
38	38,856	-0,3391	0,1632	39,929	-0,3308	0,1635	40,254	-0,3204	0,2003	41,131	-0,3071	0,1985
39	40,073	-0,3367	0,1368	39,981	-0,3307	0,1648	41,187	-0,3175	0,2254	42,424	-0,3044	0,2079
40	41,366	-0,3338	0,2062	41,275	-0,3263	0,2069	42,475	-0,314	0,2244	43,735	-0,3037	0,1965
41	42,663	-0,3325	0,2146	42,564	-0,3231	0,2061	43,79	-0,3136	0,1942	44,621	-0,3034	0,1621
42	44,005	-0,3323	0,2104	43,886	-0,3224	0,1788	44,169	-0,3137	0,1773	45,077	-0,3033	0,1447
43	44,662	-0,3329	0,1654	44,427	-0,3232	0,1661	45,167	-0,3138	0,1323	46,47	-0,3043	0,1136
44	45,431	-0,3337	0,1367	45,313	-0,3246	0,144	46,629	-0,3152	0,1033	47,911	-0,3063	0,0736
45	46,995	-0,3366	0,128	46,847	-0,3268	0,114	48,141	-0,3184	0,0858	49,321	-0,3087	0,053
46	48,663	-0,3416	0,0857	48,446	-0,3303	0,0853	49,475	-0,3206	0,0571	50,694	-0,3107	0,054

Naponi i deformacije struktura kompleksne geometrije cevovodne armature

Ventil 1												
Redni broj tačke na preseku	Section 1			Section 2			Section 3			Section 4		
	Dužina sekcije [mm]	Pomeranje u Y pravcu [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina sekcije [mm]	Pomeranje u Y pravcu [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina sekcije [mm]	Pomeranje u Y pravcu [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina sekcije [mm]	Pomeranje u Y pravcu [mm]	Mizesova deformacija [%]
47	48,929	-0,3423	0,084	48,942	-0,3314	0,0763	49,643	-0,3209	0,054	51,247	-0,3113	0,0572
48	50,338	-0,346	0,0867	50,082	-0,3341	0,0573	51,145	-0,3243	0,0625	52,095	-0,3122	0,0612
49	51,968	-0,349	0,0643	51,685	-0,338	0,047	52,642	-0,3281	0,0632	53,522	-0,315	0,0697
50	52,754	-0,3509	0,0648	52,949	-0,3403	0,0432	54,135	-0,3307	0,0523	54,959	-0,3173	0,0603
51	53,533	-0,3526	0,0626	53,232	-0,3408	0,0425	54,167	-0,3307	0,0518	56,397	-0,3202	0,0453
52	55,053	-0,3552	0,0563	54,738	-0,3443	0,0381	55,618	-0,3336	0,0352	56,773	-0,321	0,041
53	56,518	-0,3575	0,0502	56,21	-0,3473	0,042	57,08	-0,3371	0,0183	57,823	-0,3234	0,0264
54	57,39	-0,3587	0,0519	57,659	-0,3499	0,0415	58,521	-0,3399	0,0144	59,241	-0,3267	0,013
55	57,957	-0,3595	0,0522	57,712	-0,35	0,0409	59,143	-0,3413	0,0187	60,642	-0,3296	0,0132
56	59,373	-0,362	0,0329	59,082	-0,3524	0,0232	59,933	-0,343	0,0224	62,017	-0,3322	0,0115
57	60,774	-0,3645	0,0304	60,481	-0,3556	0,0177	61,321	-0,3457	0,0215	62,595	-0,3333	0,01
58	62,161	-0,3667	0,0292	61,863	-0,3577	0,0157	62,689	-0,3483	0,0242	63,371	-0,3348	0,0085
59	63,264	-0,3681	0,0284	63,224	-0,3593	0,0175	64,035	-0,35	0,0165	64,713	-0,337	0,0158
60	63,52	-0,3684	0,0281	63,735	-0,3603	0,0176	65,363	-0,3522	0,0147	66,042	-0,3393	0,0174
61	64,86	-0,3706	0,032	64,57	-0,3622	0,0188	65,846	-0,3531	0,0157	67,354	-0,3413	0,0136
62	66,184	-0,3724	0,0277	65,899	-0,3645	0,0199	66,677	-0,3546	0,0176	68,658	-0,3433	0,0168
63	67,495	-0,3738	0,0257	67,21	-0,3659	0,0241	67,978	-0,3561	0,0214	/	/	/
64	68,799	-0,3762	0,024	68,51	-0,3675	0,0229	69,271	-0,3582	0,0328	/	/	/
65	70,093	-0,3776	0,0299	69,802	-0,3694	0,0186	/	/	/	/	/	/

Matematički model

U cilju opisivanja prethodno prikazanih eksperimentalnih podataka odgovarajućom matematičkom funkcijom, tj. analitičkim obrascem, izvršena je dalja obrada rezultata ispitivanjem velikog broja regresionih modela za svaki od karakterističnih preseka. Tražena je što jednostavnija funkcija promene Mizesove deformacije po dužini istog preseka, na sva tri kućišta ventila. Eksperimentalni rezultati, za svaki od preseka, su aproksimirani analitičkim obrascima sa zadovoljavajućom tačnošću. Obrada eksperimentalnih rezultata je sprovedena metodama statističke analize, u cilju utvrđivanja relevantnih funkcionalnih zavisnosti posmatranih veličina. Funkcionalne zavisnosti su prikazane i na dijagramima.

Procena parametara modela je urađena za svaku funkcionalnu zavisnost linijskog preseka kućišta ventila. Procena parametara modela je urađena korišćenjem metode najmanjih kvadrata. Cilj metode najmanjih kvadrata je minimiziranje greške koja

predstavlja odstupanje posmatrane vrednosti od rezultata dobijenog matematičkim modelom. Funkcija minimizacije korišćena u analizi u okviru disertacije je Levenberg-Marquardt algoritam. Levenberg-Marquardt algoritam je unapređena i modifikovana Gauss-Newton – ova metoda.

Kako je položaj odgovarajućih preseka isti na sva tri ispitivana ventila, funkcionalna zavisnost Mizesovih deformacija od dužine preseka je definisana za svaki od četiri preseka prikazanih na slici 6.5. Funkcionalna zavisnost za isti (jedan) presek je urađena za sva tri ventila.

Funkcionalna zavisnost je urađena za dva slučaja. Prva funkcionalna zavisnost je definisana za celu dužinu preseka, odnosno za oblasti koje obuhvataju deformaciona polja za cilindar, spoj i sferu. Kako se najveće vrednosti deformacija javljaju na spoju sfere i cilindra, fokus je u daljoj analizi stavljen na sam spoj i usku oblast oko spoja. Tako je druga funkcionalna zavisnost definisana na dužinu preseka od 20 mm, sa jedne i druge strane spoja sfera/cilindar (slika 6.6).

Kvalitet izabrane polinomne funkcije je analiziran korišćenjem srednje procentualne greške (*MPE*), korena srednje kvadratne greške (*RMSE*), hi kvadrata (χ^2) i korelacionog odnosa (θ). Poželjno je da vrednosti srednje procentualne greške, korena srednje kvadratne greške i hi kvadrata teže nuli.

Srednja procentualna greška (*MPE*) je izračunata po formuli:

$$MPE = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|y_{\text{exp},i} - y_{\text{pre},i}|}{y_{\text{exp},i}}, \quad (1)$$

gde je:

- $y_{\text{exp},i}$ – eksperimentalno određena i -ta vrednosti,
- $y_{\text{pre},i}$ – i -ta vrednost matematičkog modela,
- N – broj tačaka merenja.

Koren srednje kvadratne greške (*RMSE*) odražava odstupanje i konzistentnost merenja i izračunata je po formuli:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{\text{exp},i} - y_{\text{pre},i})^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

gde je:

- $y_{\text{exp},i}$ – eksperimentalno određena vrednost,
- $y_{\text{pre},i}$ – i -ta vrednost matematičkog modela,
- N – broj tačaka merenja.

Hi kvadrat (χ^2) test je neparametarska metoda kojom se testira da nema značajnih razlika između eksperimentalno određenih vrednosti i vrednosti koje definiše model. Hi kvadrat (χ^2) se računa po formuli:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{\text{exp},i} - y_{\text{pre},i})^2}{N - n}, \quad (3)$$

gde je:

- $y_{\text{exp},i}$ – eksperimentalno određena vrednost,
- $y_{\text{pre},i}$ – i -ta vrednost matematičkog modela,
- N – broj tačaka merenja i
- n – broj koeficijenata u modelu.

Kao mera odstupanja korišćena je test statistika koja pod pretpostavkom ispravnosti formule ima Pirsonovu χ^2 raspodelu sa $N-n-1$ stepeni slobode. Kroz usvojeni prag značajnosti od 1 % određena je kritična oblast $[22.93, +\infty)$.

Korelacioni odnos se računa prema formuli:

$$\theta = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_{\text{exp},i} - y_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^N (y_{\text{exp},i} - y_{sr})^2}}, \quad (4)$$

gde je:

- $y_{exp,i}$ – eksperimentalno određena vrednost,
- $y_{pre,i}$ – i -ta vrednost matematičkog modela,
- y_{sr} – srednja vrednost eksperimentalno određenih vrednosti,
- N – broj tačaka merenja.

Prvu funkcionalnu zavisnost za celu dužinu preseka najbolje opisuje polinomna funkcija:

$$y(x) = \frac{a + b \cdot x}{1 + c \cdot x + d \cdot x^2}, \quad (5)$$

gde je:

- $y(x)$ – vrednost Mizesovih deformacija,
- x [mm] – koordinata tačke na preseku 1,
- a, b, c, d – koeficijenti.

Vrednosti koeficijenata u funkcionalnoj zavisnosti (5) su prikazani u tabeli 6.2.

Koordinata x u jednačinama za funkcionalnu zavisnost, predstavlja rastojanje tačke na preseku u odnosu na početak preseka. Kako bi se lakše definisao položaj tačaka, vrši se preračunavanje koordinata u odnosu na spoj sfere i cilindra. Na slici 6.6 je položaj spoja sfere i cilindra određen crnom vertikalnom linijom označenom nulom. Položaj spoja sfere i cilindra za presek 1 se nalazi na udaljenosti 42,663 mm od početka preseka. Kako se cilindar nalazi sa leve strane spoja (slika 6.6), za određivanje tačnog položaja tačke na cilindru za koju se želi izračunati deformacija, udaljenost od spoja se oduzima od vrednosti 42,663 mm. Kako se sfera nalazi sa desne strane spoja (slika 6.6), za određivanje tačnog položaja tačke na sferi za koju se želi da izračunati deformacija, udaljenost od spoja se dodaje na vrednost 42,663 mm. Ovako određena vrednost koordinate x se unosi u jednačinu i određuje se vrednost Mizesove deformacije.

Preračunavanje koordinata se sprovodi za sve preseke za oba slučaja funkcionalnih zavisnosti.

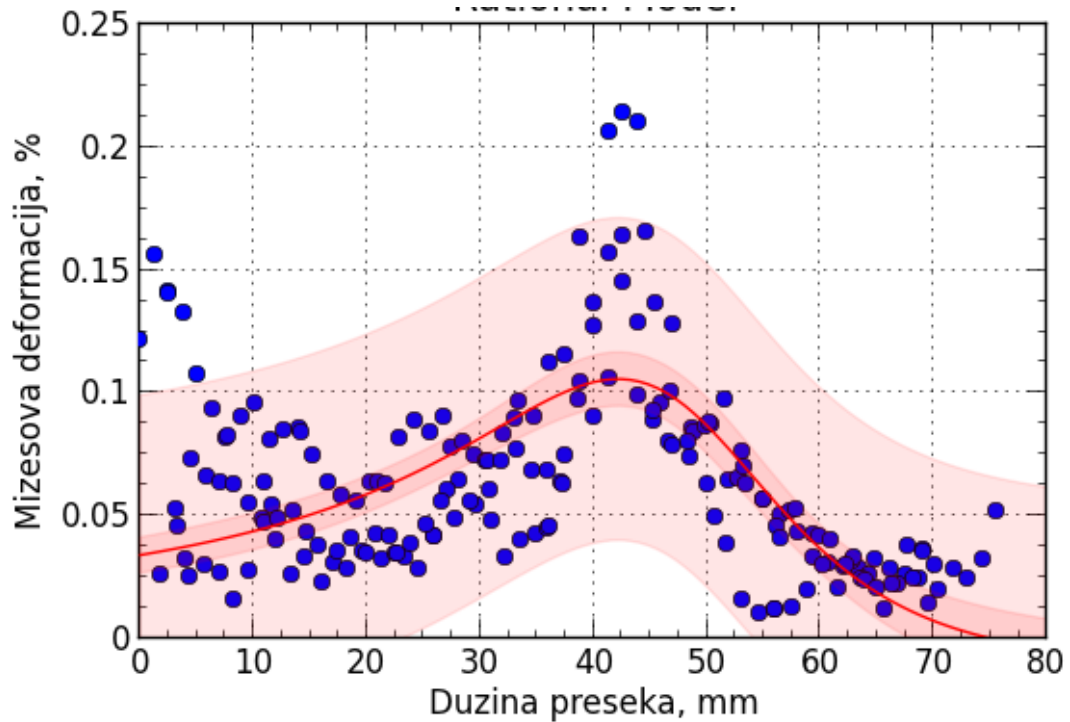
Tabela 6.2. Polinomna funkcija za celu dužinu preseka za aksijalnu silu od 30 kN

Preseci	Funkcionalna zavisnost				MPE*, %	RMSE*	χ^2 *	θ *
	$y = \frac{a + b \cdot x}{1 + c \cdot x + d \cdot x^2}$							
	Koeficijenti							
a	b	c	d					
1	0,033906	-0,000450	-0,036509	0,000382	2,884E-01	3,965E-02	1,080E-03	0,562
2	0,021601	-0,000308	-0,043220	0,000502	5,606E-01	7,667E-02	9,035E-04	0,695
3	0,014279	-0,000210	-0,045116	0,000529	7,329E-01	9,996E-02	8,388E-04	0,771
4	0,013145	-0,000189	-0,044910	0,000523	6,958E-01	9,335E-02	9,663E-04	0,715

*Napomena:
MPE – srednja procentualna greška (engl. Mean Percent Error),
RMSE – koren srednje kvadratne greške (engl. Root Mean Square Error),
 χ^2 – hi kvadrat (engl. reduced chi-square),
 θ – korelacioni odnos,
 $x = 42,663 \pm a, mm$ (a je rastojanje od preseka na spoju).

Dobro slaganje pretpostavljene funkcije zavisnosti sa vrednostima Mizesovih deformacija su potvrđeni kroz vrednosti srednje procentualne greške, korena srednje kvadratne greške, hi kvadrata i korelacionog odnosa prikazanih u tabeli 6.2.

Polinomna funkcija, koja opisuje promene Mizesove deformacije po celoj dužini preseka 1 za sva tri ventila pri maksimalnoj aksijalnoj sili, prikazana je na slici 6.8.



Slika 6.8. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za celu dužinu preseka 1 za sva tri ventila za aksijalnu silu od 30 kN

Drugu funkcionalnu zavisnost za dužinu preseka od 20 mm sa jedne i druge strane spoja sfera/cilindar najbolje opisuje polinomna funkcija:

$$y(x) = \frac{a + b \cdot x}{1 + c \cdot x + d \cdot x^2}, \quad (6)$$

gde je:

- $y(x)$ – vrednost Mizesovih deformacija,
- x [mm] – koordinata tačke na preseku 1 i
- a, b, c, d – koeficijenti.

Vrednosti koeficijenata u funkcionalnoj zavisnosti (6) su prikazani u tabeli 6.3.

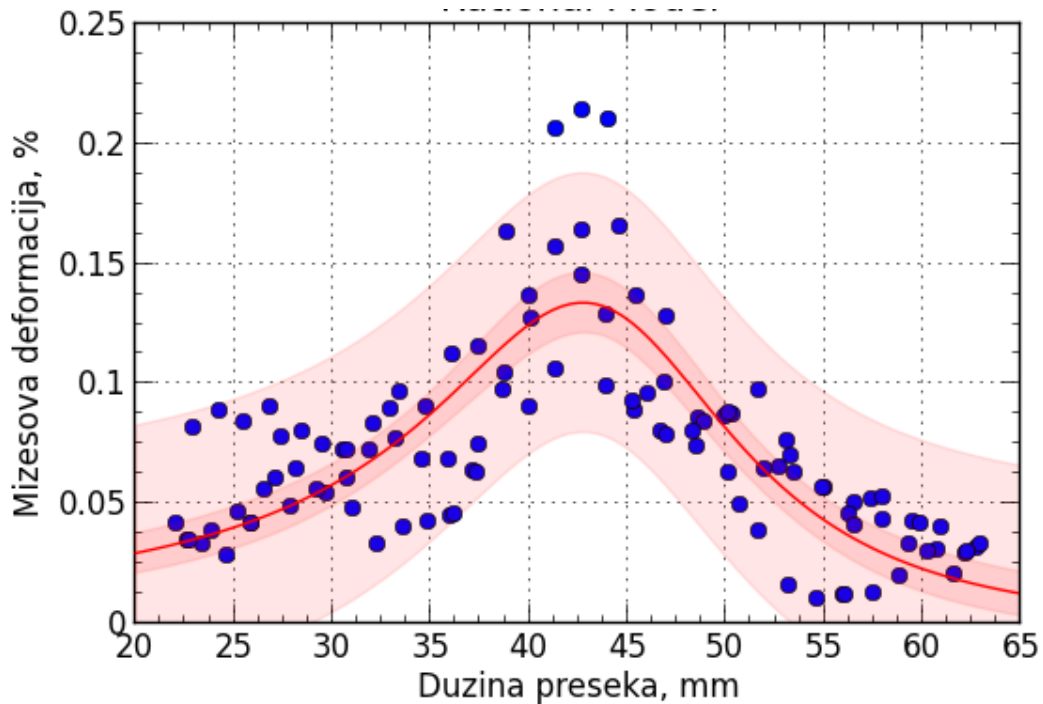
Tabela 6.3. Polinomna funkcija za dužinu preseka od 20 mm sa jedne i druge strane spoja za aksijalnu silu od 30 kN

Preseci	Funkcionalna zavisnost				MPE*, %	RMSE*	χ^2	θ^*
	$y = \frac{a + b \cdot x}{1 + c \cdot x + d \cdot x^2}$							
	Koeficijenti							
	a	b	c	d				
1	0,012411	-0,00014	-0,043523	0,000497	1,746E-01	1,823E-02	7,066E-04	0,780
2	0,009561	-0,000107	-0,046735	0,000566	1,722E-01	1,798E-02	5,370E-04	0,866
3	0,008086	-0,000099	-0,046687	0,000559	2,841E-01	2,966E-02	6,252E-04	0,873
4	0,006317	-0,000062	-0,046742	0,000560	3,203E-01	3,313E-02	7,690E-04	0,842

*Napomena:
MPE – srednja procentualna greška (engl. Mean Percent Error),
RMSE – koren srednje kvadratne greške (engl. Root Mean Square Error),
 χ^2 – hi kvadrat (engl. reduced chi-square),
 θ – korelacioni odnos,
 $x = 42,663 \pm a, mm$ (a je rastojanje od preseka na spoju).

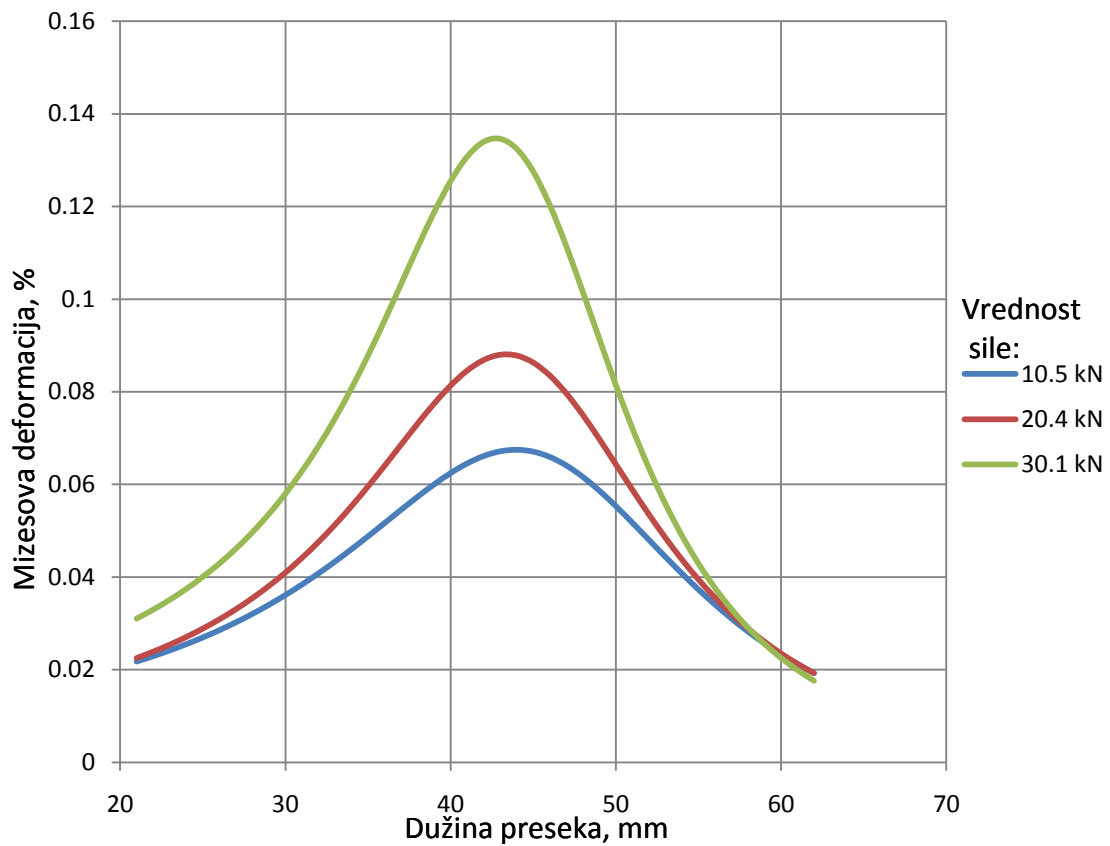
Dobro slaganje pretpostavljene funkcije zavisnosti sa vrednostima Mizesovih deformacija su potvrđeni kroz vrednosti srednje procentualne greške, korena srednje kvadratne greške, hi kvadrata i korelacionog odnosa prikazanih u tabeli 6.3. Poželjno je da vrednosti srednje procentualne greške, korena srednje kvadratne greške i hi kvadrata teže nuli.

Polinomna funkcija koja opisuje promene Mizesove deformacije za dužinu preseka od 20 mm sa jedne i druge strane spoja, za presek 1 za sva tri ventila pri maksimalnoj sili, prikazana je na slici 6.9.



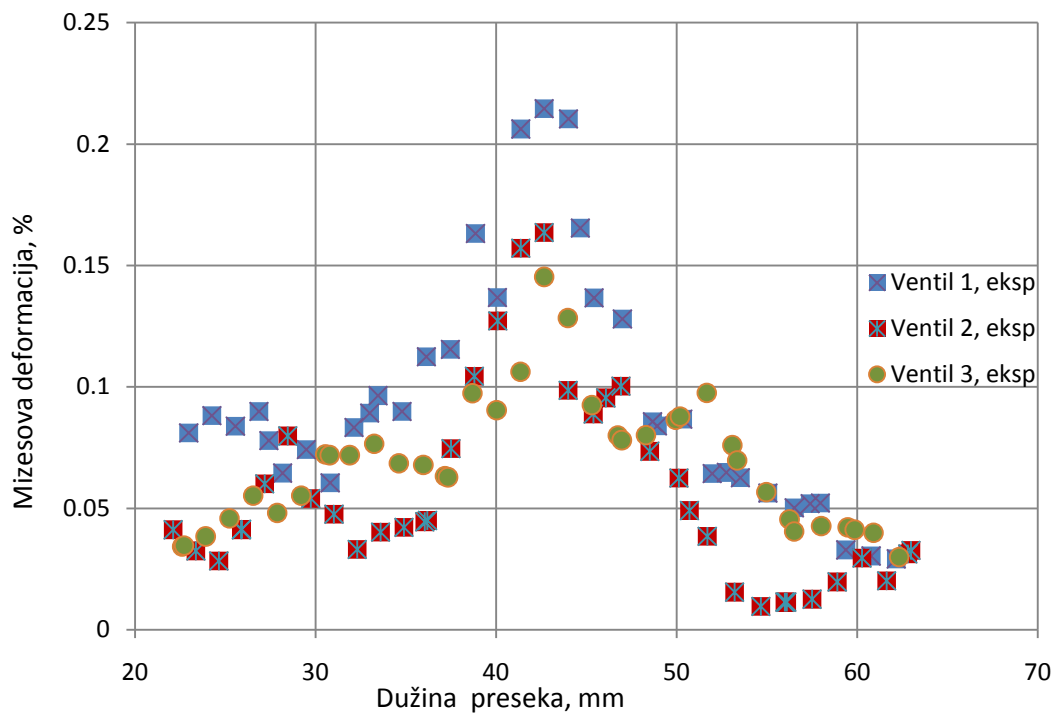
Slika 6.9. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka l , za dužinu preseka od 20 mm sa jedne i druge strane spoja za aksijalnu silu od 30 kN

Na slici 6.10 je prikazana promena Mizesovih deformacija po dužini preseka za različite vrednosti sila za ventil 1. Promena Mizesove deformacije je prikazana za vrednosti sila od 10,5 kN (plava linija), 20,4 kN (crvena linija) i 30,1 kN (zelena linija). Vrednosti prikazane na slici 6.10 su dobijene matematičkim modelom definisanim u prethodnom delu ovog poglavlja.



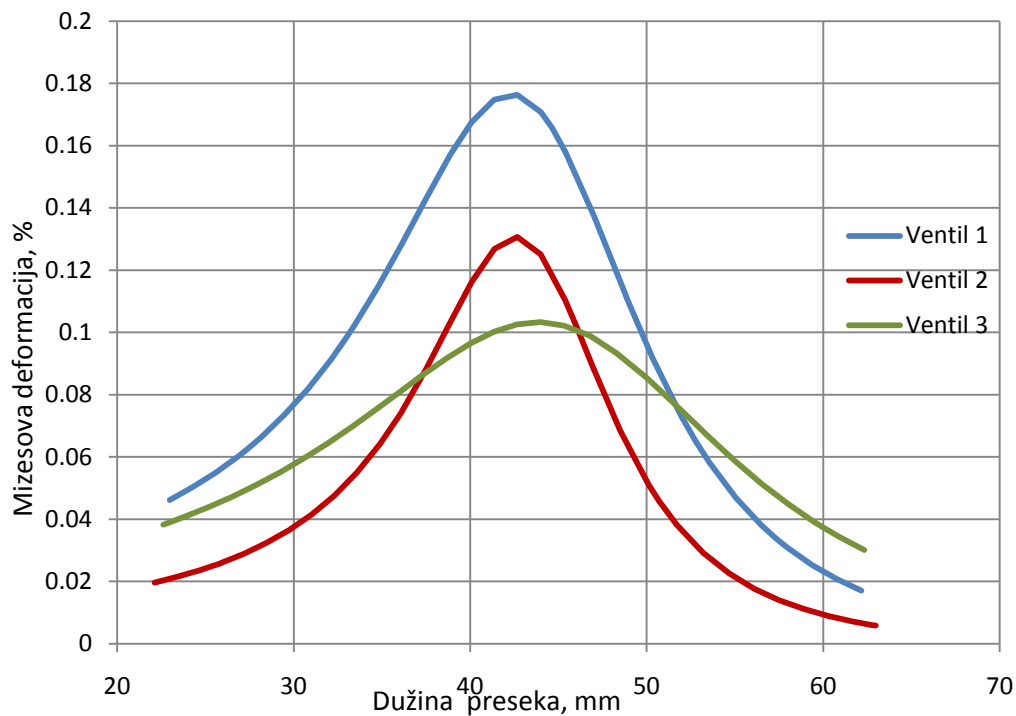
Slika 6.10. Promena Misesovih deformacija po dužini preseka za različite vrednosti sila

Na slici 6.11 je prikazana promena Misesovih deformacija po dužini preseka 1 za sva tri ispitivana ventila. Promena Misesove deformacije je prikazana za maksimalnu vrednost sile (30,1 kN). Vrednosti Misesovih deformacija na slici 6.11 su predstavljene pomoću tačaka – za ventil 1 (plave tačke), ventil 2 (crvene tačke) i ventil 3 (zelene tačke).



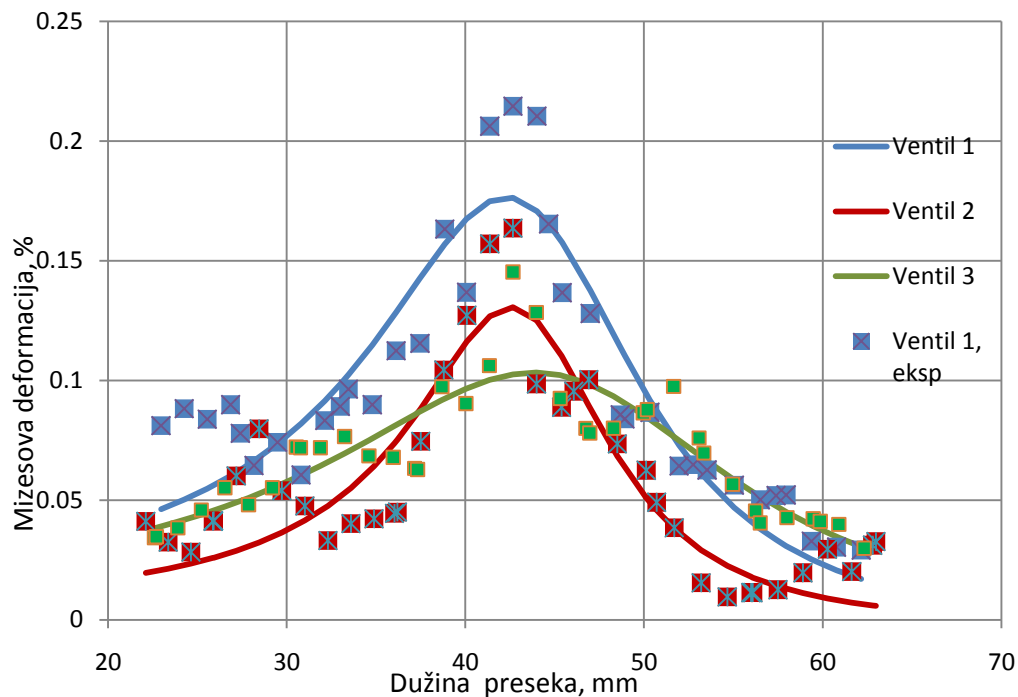
Slika 6.11. Promena Mizesovih deformacija po dužini preseka 1 za tri ispitivana ventila za MM1 opterećeno aksijalnom silom od 30 kN

Na slici 6.12 su prikazani matematički modeli promene Mizesovih deformacija po dužini preseka 1 za sva tri ispitivana ventila. Promena Mizesove deformacije je prikazana za maksimalnu vrednost sile (30,1 kN). Vrednosti Mizesovih deformacija na slici 6.12 su predstavljene pomoću linija – za ventil 1 (plava linija), ventil 2 (crvene linija) i ventil 3 (zelene linija).



Slika 6.12. Matematički modeli promene Mizesovih deformacija po dužini preseka 1 za tri ispitivana ventila za MM1 opterećeno aksijalnom silom od 30 kN

Na slici 6.13 su uporedno prikazani eksperimentalni rezultati i matematički modeli promene Mizesovih deformacija po dužini preseka 1 za sva tri ispitivana ventila koji su pojedinačno predstavljani na slikama 6.11 i 6.12. Vrednosti Mizesovih deformacija su prikazani za maksimalnu vrednost sile (30,1 kN), pri čemu su istom bojom predstavljani rezultati za jedan ventil (tačke i linija).



Slika 6.13. Uporedni prikaz eksperimentalnih rezultata i matematičkog modela promene Misesovih deformacija po dužini preseka 1 za tri ispitivana ventila za MM1 opterećeno aksijalnom silom od 30 kN

Za svaki korak opterećivanja za tačku 1 (stage point 1) prikazanu na slici 6.4 je moguće očitati vrednosti pomeranja u Y pravcu i očitane vrednosti grafički prikazati radi dalje analize. Na slici 6.14 su prikazane vrednosti pomeranja u tački 1 kroz korake opterećivanja od 3 do 32. Koraci od 0 do 3 su izostavljeni iz statističke analize, jer su u tim koracima vrednosti sila male i mogu se zanemariti. Korak 33 takođe nije uzet u obzir, jer predstavlja neopterećeno, odnosno rasterećeno stanje.

Kroz korake opterećivanja za tačku 1 prikazanu na slici 6.14 je provučena prava linija koja daje najbolja poklapanja sa porastom vrednosti pomeranja u Y pravcu. Jednačina koja najbolje opisuje porast vrednosti pomeranja u Y pravcu za ventil 1 je:

$$y = -0.0082 \cdot x - 0.2996, \quad (7)$$

gde je:

- y, mm – vrednost pomeranja u Y pravcu i
- x – korak opterećivanja.

Kvalitet izabrane regresione prave je analiziran korišćenjem koeficijenta determinacije. Koeficijent determinacije se određuje pomoću formule:

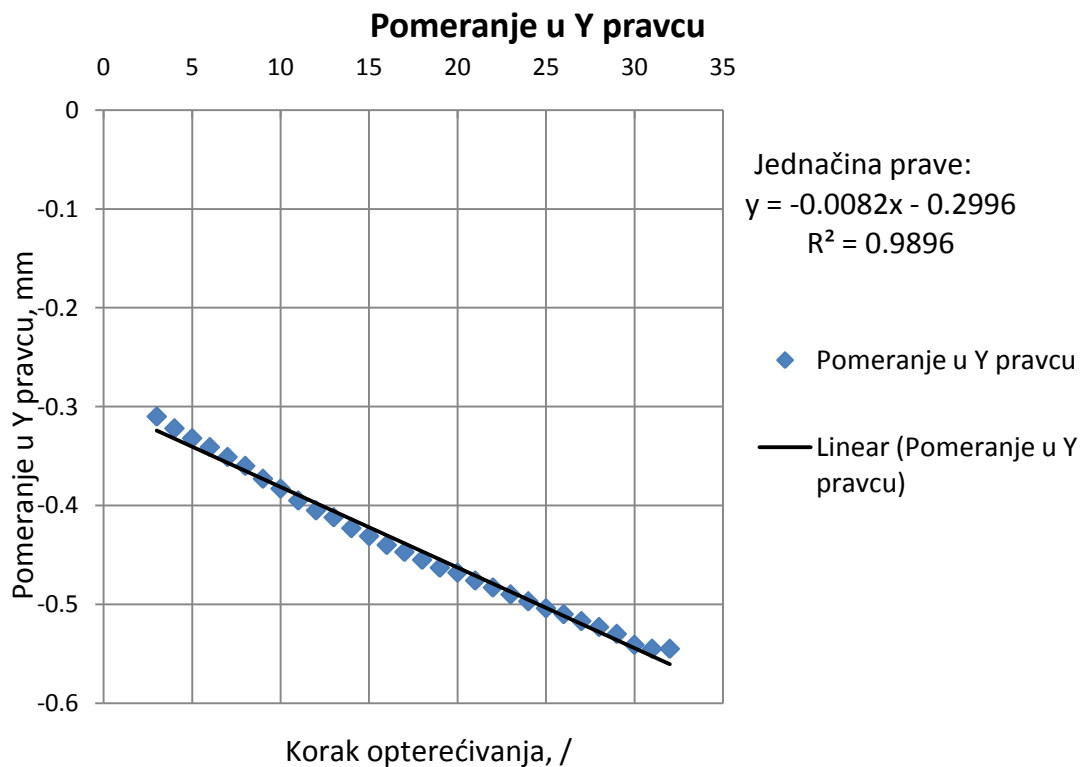
$$R^2 = \frac{\sum (y_r - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}, \quad (8)$$

gde je:

- y_r – vrednost procenjena pomoću prave regresije,
- y_i – originalna vrednost zavisne promenljive,
- \bar{y} – aritmetička sredina.

Vrednost koeficijenta determinacije je mera jačine linearne veze i za vrednosti u opsegu od 0,70 do 0,90 pokazuje tesnu vezu, dok za vrednosti preko 0,90 pokazuje vrlo tesnu vezu.

Koeficijent determinacije regresione prave (6) iznosi $R^2 = 0.9896$.



Slika 6.14. Zavisnost pomeranja u Y pravcu od koraka opterećivanja za tačku 1 za MMI opterećeno aksijalnom silom

Za svaki korak opterećivanja za tačku 1 (stage point 1) prikazanu na slici 6.7 je moguće očitati vrednosti Mizesovih deformacija i očitane vrednosti grafički prikazati, radi dalje analize. Na slici 6.15 su prikazane vrednosti Mizesovih deformacija u tački 1 kroz korake opterećivanja od 3 do 32. Koraci od 0 do 3 su izostavljeni iz statističke analize, jer u tim koracima vrednosti sila su male i mogu se zanemariti. Korak 33 takođe nije uzet u obzir, jer predstavlja neopterećeno, odnosno rasterećeno stanje.

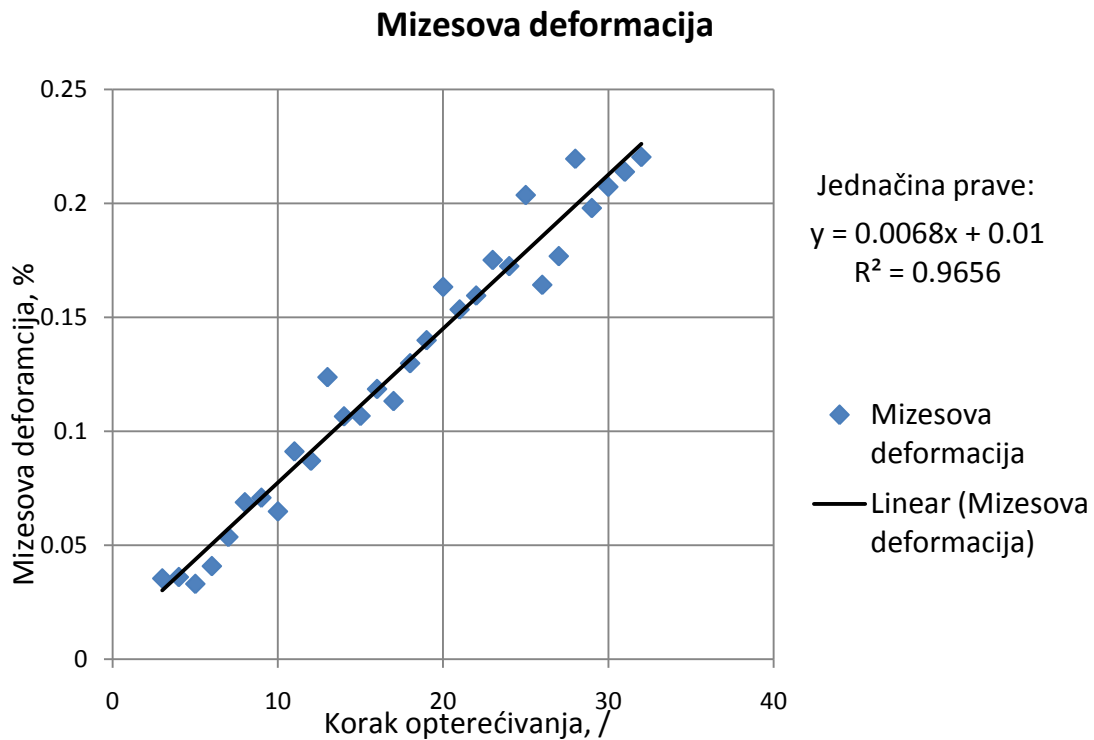
Kroz korake opterećivanja za tačku 1 prikazanu na slici 6.15 je provučena prava linija koja daje najbolja poklapanja sa porastom vrednosti Mizesovih deformacija. Jednačina koja najbolje opisuje porast vrednosti Mizesovih deformacija za ventil 1 je:

$$y = 0.0068 \cdot x + 0.01 \quad (9)$$

gde je:

- y, mm – vrednost Mizesovih deformacija i
- x – korak opterećivanja.

Koeficijent determinacije regresione prave (9) iznosi $R^2 = 0.9656$.



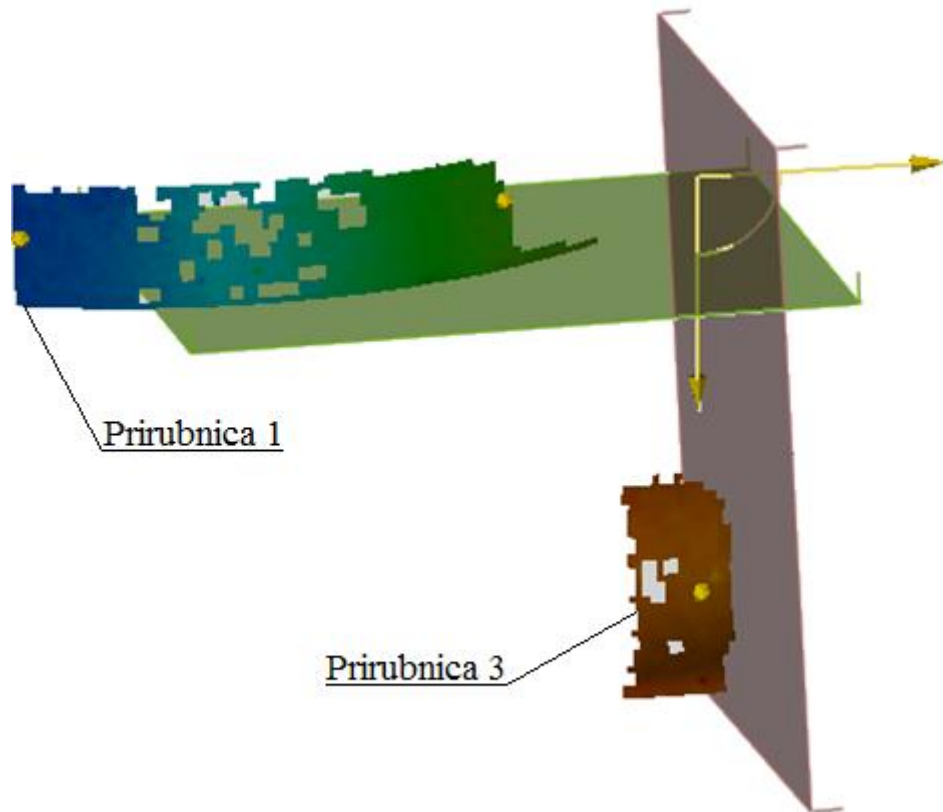
Slika 6.15. Zavisnost Mizesovih deformacija od koraka opterećivanja za tačku 1 za MM1 opterećeno aksijalnom silom

6.1.2. Rezultati merenja za merno mesto MM2

Merno mesto 2, koje se odnosi na prirubnice 1 i 3 (slika 5.9), je izabrano radi preciznijeg merenja pomeranja ventila u toku izlaganja aksijalnom opterećenju (sabijanju). Za merno mesto 2 su merene vrednosti pomeranja prirubnice 1 u pravcu Y ose (u pravcu ose ventila) i ugaonog pomeranja ravni prirubnica 1 i 3.

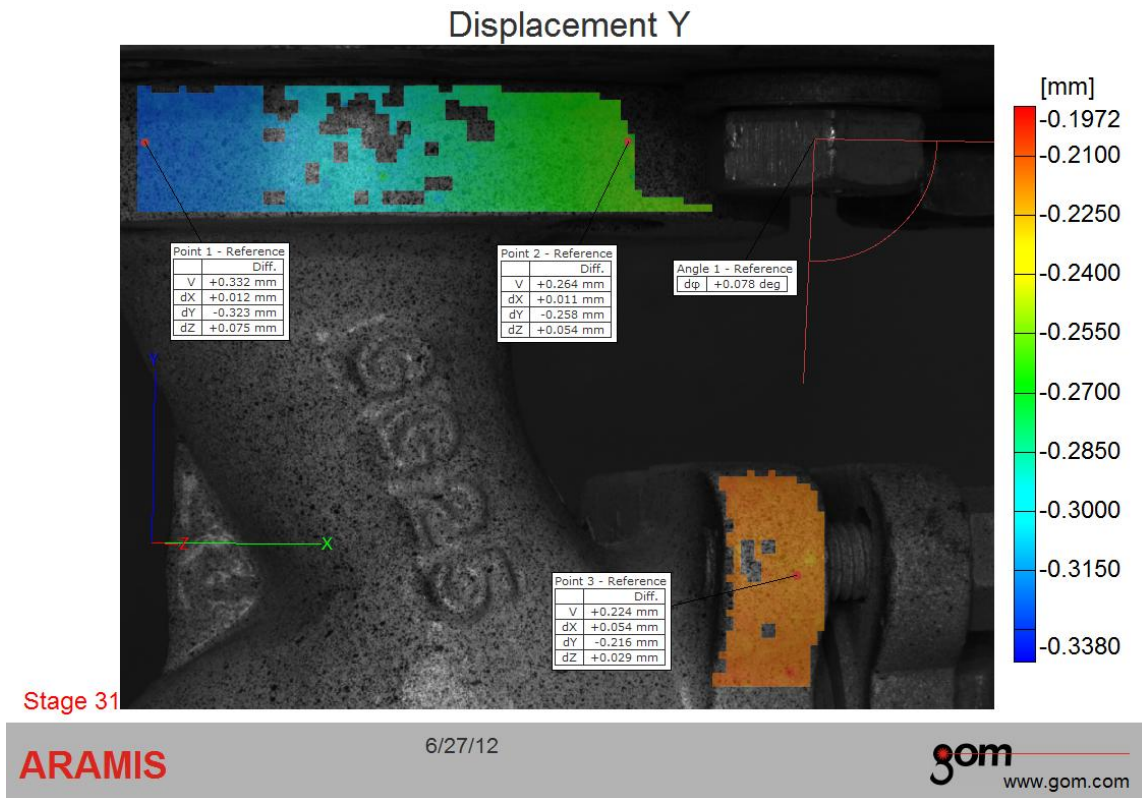
Svaki ventil je analiziran u tri tačke i jednim ugaonim primitivom. Dve tačke su postavljene na prirubnicu 1 (slika 5.9). Tačke 1 i 2 su na prirubnici 1 pozicionirane tako da se nalaze na sredini debljine prirubnice i na suprotnim krajevima izmerenog polja. Treća tačka je postavljena na prirubnicu 3 (slika 5.9). Tačka 3 je na bočnoj prirubnici postavljena u centar izmerenog polja. Ugaoni primitiv (slika 6.16) je definisan tako da pokazuje ugao koji zaklapaju dve ravni (Plane 1 i Plane 2), ravni koje su paralelne prirubnicama 1 i 3. Za sve tačku i ugaoni primitiv su izmerene koordinate u

neopterećenom stanju, u toku opterećivanja i rasterećenom stanju, kao i prouzrokovana pomeranja/deformacije.



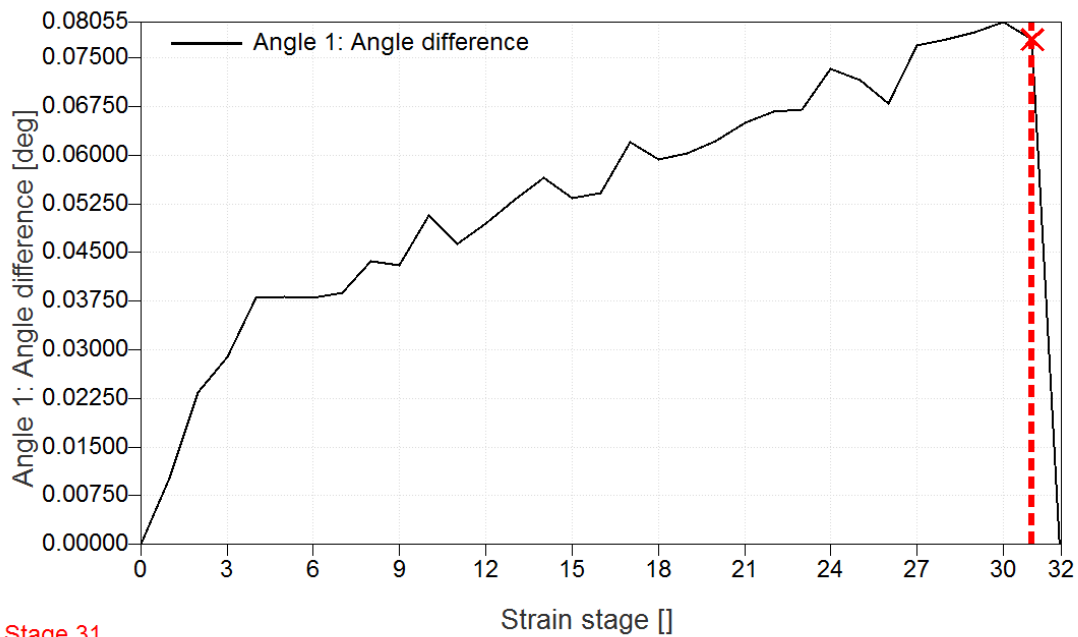
Slika 6.16. Položaj ravni koje definišu ugaoni primitiv za MM 2

Polje pomeranja prirubnica 1 i 3 u Y pravcu je prikazano na slici 6.17 za slučaj opterećenja maksimalnom silom od 30 kN. Na slici 6.17 je na ordinati prikazana skala koja je data u mm, dok su na samoj slici prikazani i koordinatni sistem i ugaoni primitiv (Angle 1). Takođe, za sve tri tačke na prirubnicama je prikazana i legenda sa vrednostima pomeranja u x , y i z pravcu. Kao što se može videti sa slike, polje sa najvećim pomeranjima u Y pravcu se nalazi sa leve strane prirubnice 1 i vrednosti pomeranja iznose oko 0,3 mm. Za istu vrednost aksijalne sile, vertikalna pomeranja na prirubnici 3 iznose oko 0,2 mm. Vrednost ugaonog pomeranja između prirubnica 1 i 3 iznosi $0,078^\circ$ za slučaj maksimalne vrednosti sile.



Slika 6.17. Polje pomeranja prirubnica 1 i 3 u Y pravcu za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN

Vrednosti ugaonih pomeranja je moguće prikazati i pomoću dijagrama. Dijagram ugaonih pomeranja za ugaoni primitiv (Angle 1) je prikazan na slici 6.18. Vrednosti ugaonih pomeranja (slika 6.18) su data u funkciji koraka opterećivanja, odnosno za sve korake od neopterećenog stanja do maksimalno opterećenog i rasterećenog stanja. Na dijagramu je primetan kontinualan porast ugaonih pomeranja sa porastom sile i najveće izmereno ugaono pomeranje iznosi $0,08^\circ$.



Stage 31

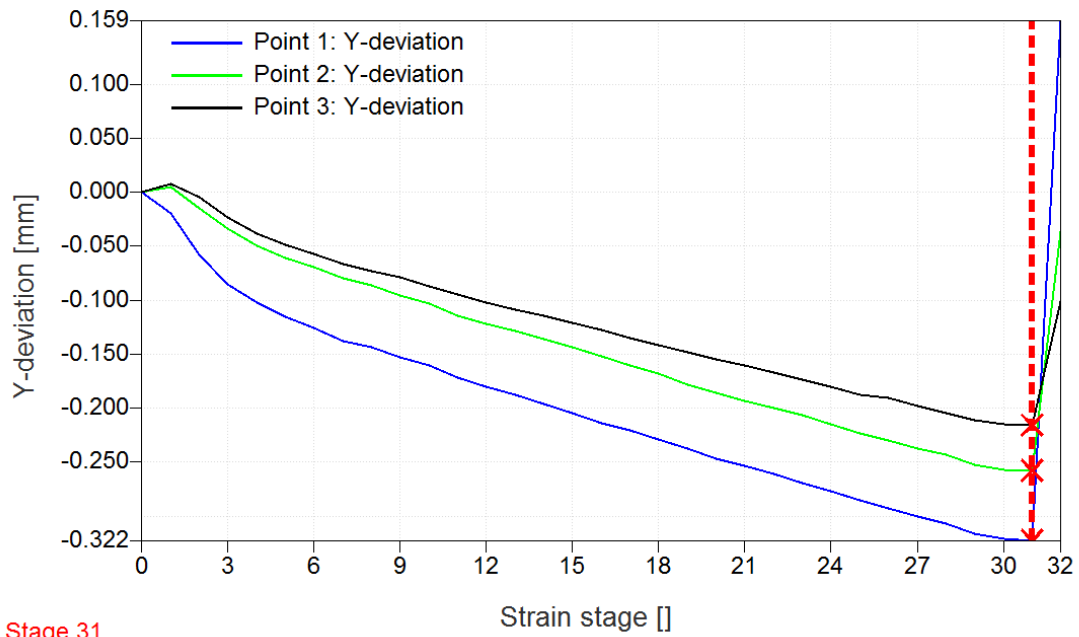
ARAMIS

6/27/12

gom
www.gom.com

Slika 6.18. Dijagram ugaonog pomeranja u zavisnosti od koraka opterećivanja za MM2 opterećeno aksijalnom silom

Vrednosti pomeranja u Y pravcu je moguće prikazati i pomoću dijagrama. Dijagram vertikalnih pomeranja za sve tri tačke je prikazan na slici 6.19. Vrednosti pomeranja u Y pravcu (slika 6.19) su data u funkciji koraka opterećivanja, odnosno za sve korake (snimljene slike) od neopterećenog stanja do maksimalno opterećenog i rasterećenog stanja. Na dijagramu je primetan kontinualan porast pomeranja u Y pravcu sa porastom sile i najveće izmereno pomeranje je u tački 1 (Point 1, označen plavom bojom na dijagramu) i iznosi 0,322 mm. Negativne vrednosti prikazane na dijagramu su zbog smera koordinatnog sistema, odnosno smera Y ose.



Stage 31

ARAMIS

6/27/12

gom
www.gom.com

Slika 6.19. Dijagram pomeranja u Y pravcu tačaka na prirubnicama u zavisnosti od koraka opterećivanja za MM2 opterećeno aksijalnom silom

Za svaku od tačaka i ugaoni primitiv sa slike 6.17 je moguće i tabelarno prikazati vrednosti pomeranja u Y pravcu i promene ugla. U tabeli 6.4 su prikazane vrednosti za aksijalnu silu od 30 kN za ventil 1.

Naponi i deformacije struktura kompleksne geometrije cevovodne armature

Tabela 6.4. Vertikalno pomeranje tačaka na prirubnicama i ugao pomeranja između prirubnica

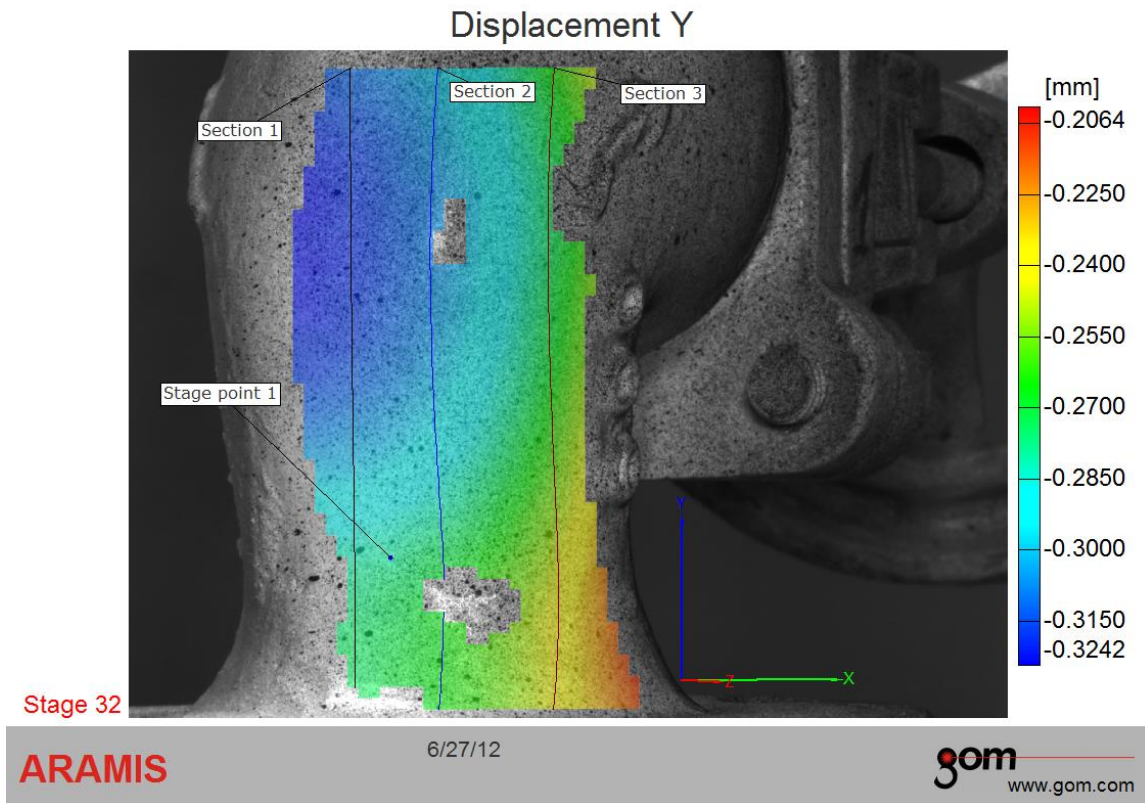
Ventil 1								
Stage (korak opterećivanja)	Pomeranje u Y pravcu [mm]						Ugao pomeranja [deg]	
	Tačka 1		Tačka 2		Tačka 3		Ugao pomeranja [deg]	Promena ugla pomeranja [deg]
	Y koordinata [mm]	Pomeranje u Y pravcu [mm]	Y koordinata [mm]	Pomeranje u Y pravcu [mm]	Y koordinata [mm]	Pomeranje u Y pravcu [mm]		
0	+27,036	+0,000	+28,428	+0,000	-23,004	+0,000	89,527	+0,000
1	+27,016	-0,020	+28,433	+0,005	-22,996	+0,008	89,537	+0,010
2	+26,978	-0,058	+28,414	-0,014	-23,009	-0,005	89,550	+0,023
3	+26,951	-0,086	+28,394	-0,034	-23,028	-0,024	89,556	+0,029
4	+26,934	-0,102	+28,378	-0,050	-23,043	-0,039	89,565	+0,038
5	+26,921	-0,115	+28,368	-0,060	-23,052	-0,048	89,565	+0,038
6	+26,911	-0,125	+28,359	-0,069	-23,061	-0,057	89,565	+0,038
7	+26,898	-0,138	+28,349	-0,079	-23,070	-0,066	89,566	+0,039
8	+26,893	-0,144	+28,341	-0,087	-23,077	-0,073	89,571	+0,044
9	+26,883	-0,153	+28,332	-0,096	-23,083	-0,079	89,570	+0,043
10	+26,875	-0,161	+28,325	-0,103	-23,091	-0,087	89,578	+0,051
11	+26,864	-0,172	+28,314	-0,114	-23,099	-0,095	89,573	+0,046
12	+26,856	-0,180	+28,306	-0,122	-23,106	-0,102	89,576	+0,049
13	+26,849	-0,187	+28,299	-0,129	-23,112	-0,108	89,580	+0,053
14	+26,840	-0,196	+28,292	-0,136	-23,118	-0,114	89,584	+0,056
15	+26,832	-0,204	+28,284	-0,144	-23,125	-0,121	89,580	+0,053
16	+26,823	-0,214	+28,276	-0,152	-23,132	-0,128	89,581	+0,054
17	+26,816	-0,221	+28,268	-0,160	-23,139	-0,135	89,589	+0,062
18	+26,807	-0,229	+28,260	-0,168	-23,145	-0,141	89,586	+0,059
19	+26,799	-0,238	+28,250	-0,178	-23,152	-0,148	89,587	+0,060
20	+26,789	-0,247	+28,242	-0,186	-23,159	-0,155	89,589	+0,062
21	+26,783	-0,254	+28,235	-0,193	-23,165	-0,161	89,592	+0,065
22	+26,775	-0,261	+28,228	-0,200	-23,171	-0,167	89,594	+0,067
23	+26,767	-0,269	+28,222	-0,206	-23,178	-0,174	89,594	+0,067
24	+26,759	-0,277	+28,213	-0,215	-23,184	-0,180	89,600	+0,073
25	+26,751	-0,285	+28,205	-0,223	-23,192	-0,188	89,599	+0,072
26	+26,744	-0,292	+28,198	-0,230	-23,195	-0,191	89,595	+0,068
27	+26,736	-0,300	+28,190	-0,238	-23,202	-0,198	89,604	+0,077
28	+26,729	-0,307	+28,184	-0,243	-23,209	-0,205	89,605	+0,078
29	+26,720	-0,316	+28,176	-0,252	-23,215	-0,211	89,606	+0,079
30	+26,715	-0,321	+28,171	-0,257	-23,219	-0,215	89,608	+0,081
31	+26,713	-0,323	+28,170	-0,258	-23,220	-0,216	89,605	+0,078
32	+27,196	+0,159	+28,391	-0,037	-23,105	-0,101	89,522	-0,005

6.1.3. Rezultati merenja za merno mesto MM3

Merno mesto 3 (MM3) se nalazi uz prirubnicu 2, i kao i merno mesto 1, obuhvata i spoj sfere i cilindra, ali je za razliku od MM1, geometrijski diskontinuitet manji, odnosno blaži je prelaz sa sfere na cilindar. Za MM3 su prikazani rezultati pomeranja u Y pravcu (vertikalni pravac, paralelan pravcu sile opterećenja) i Mizesovih deformacija.

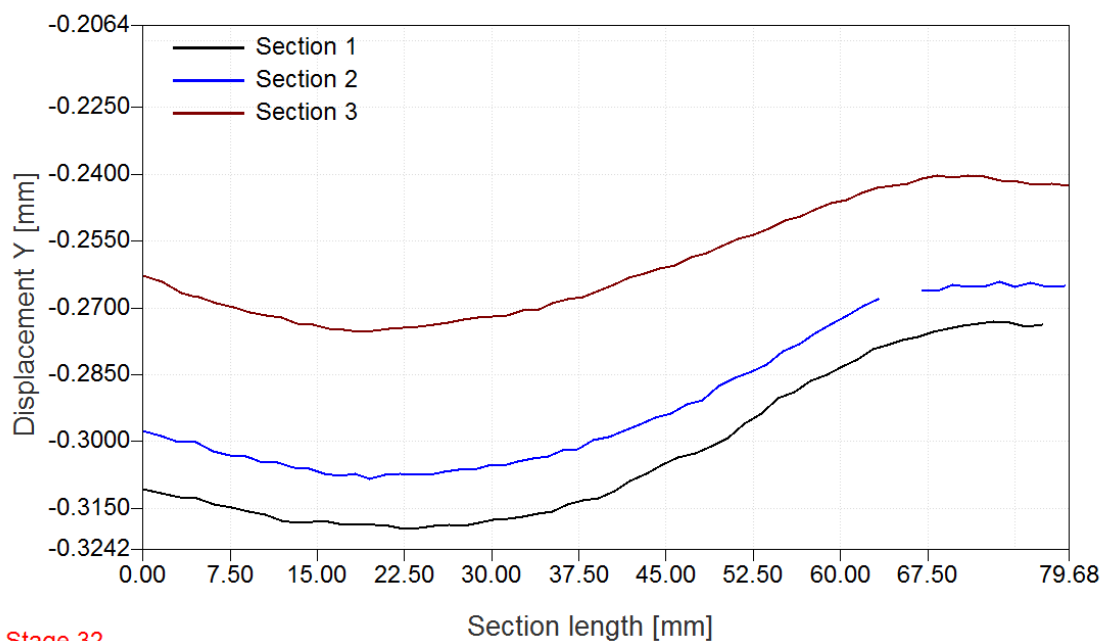
Svaki ventil je analiziran sa 3 linijska preseka (sections) i jednom tačkom (stage point 1). Tačka 1 (stage point 1) je postavljena na spoju sfere i cilindra. Dužina svakog od preseka odgovara vertikalnoj dimenziji mernog mesta, odnosno približno oko 80 mm. Preseci su definisani tako da se dva preseka nalaze na krajevima izmerenog polja, a jedan u sredini. Svaki od preseka se u preseku sastoji od 60 tačaka. Za svaku tačku su izmerene koordinate u neopterećenom stanju, u toku opterećivanja i rasterećenom stanju, kao i prouzrokovana pomeranja/deformacije. Tako je merno mesto 3 opterećeno aksijalnom silom analizirano sa jednom pojedinačno postavljenom tačkom i 9 preseka, odnosno sa oko 540 tačaka.

Polje pomeranja mernog mesta 3 u Y pravcu za slučaj opterećenja maksimalnom silom od 30 kN je prikazano na slici 6.20. Na ordinati slike 6.20 je prikazana skala koja je data u mm, dok su na samoj slici prikazani koordinatni sistem i položaji poprečnih preseka. Negativne vrednosti prikazane na dijagramu su zbog smera koordinatnog sistema, odnosno smera Y ose. Kao što se može videti sa slike, polje sa najvećim pomeranjem u Y pravcu (plava boja) se nalazi na sfernom delu ventila. Pomeranje u Y pravcu u toj zoni iznosi oko 0,3 mm.



Slika 6.20. Polje pomeranja u Y pravcu za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM3

Vrednosti pomeranja u Y pravcu je moguće prikazati i pomoću dijagrama. Dijagram pomeranja u Y pravcu za svaki od poprečnih preseka (slika 6.20) su dati na slici 6.21. Vrednosti pomeranja u Y pravcu (slika 6.21) su data u funkciji dužine poprečnog preseka. Kao što se vidi na dijagramu, vrednosti pomeranja u Y pravcu se smanjuju sa udaljenjem od ravni simetrije ventila. Najveće vrednosti pomeranja (0,275 do 0,32 mm) se javljaju u zoni sfernog dela ventila. Najmanje vrednosti pomeranja su u zoni neposredno uz priрубnicu 2 i iznose od 0,24 do 0,28 mm. Negativne vrednosti prikazane na dijagramu su zbog smera koordinatnog sistema, odnosno smera Y ose.



Stage 32

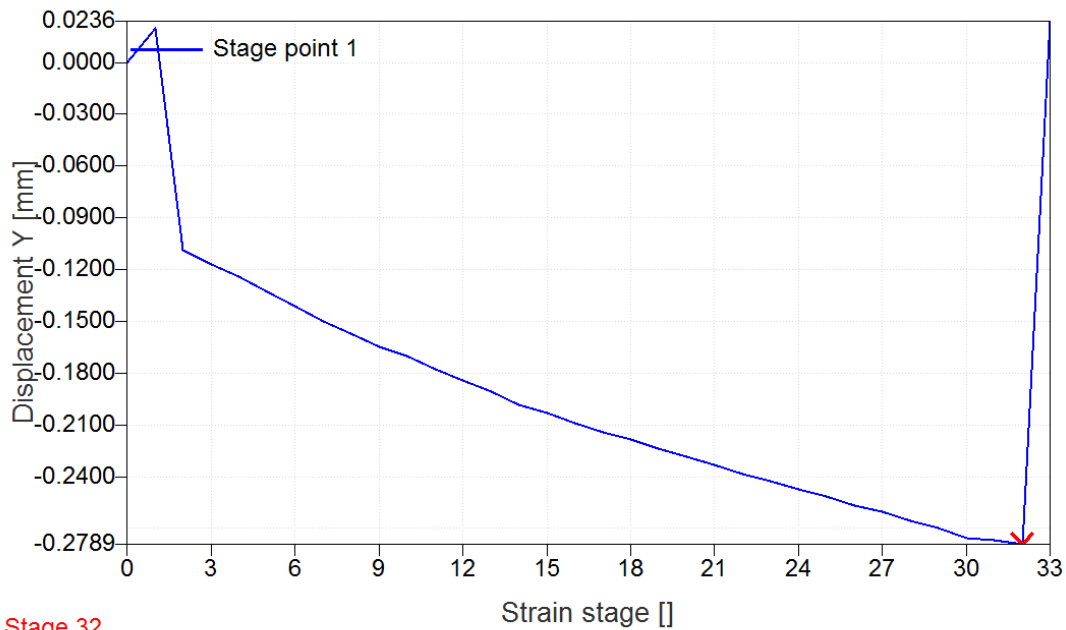
ARAMIS

6/27/12

gom
www.gom.com

Slika 6.21. Dijagram pomeranja u Y pravcu za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM3

Vrednosti pomeranja u Y pravcu za tačku 1 (stage point 1) prikazanu na slici 6.20. je moguće prikazati i u zavisnosti od vremena opterećivanja. Tako je na slici 6.22 prikazana promena vrednosti pomeranja u Y pravcu od neopterećenog stanja (strain stage 0), preko maksimalno opterećenog stanja (strain stage 32) do rasterećenog stanja (strain stage 33). Porast vrednosti pomeranja u Y pravcu (slika 6.22) je prikazan za ventil 1.



Stage 32

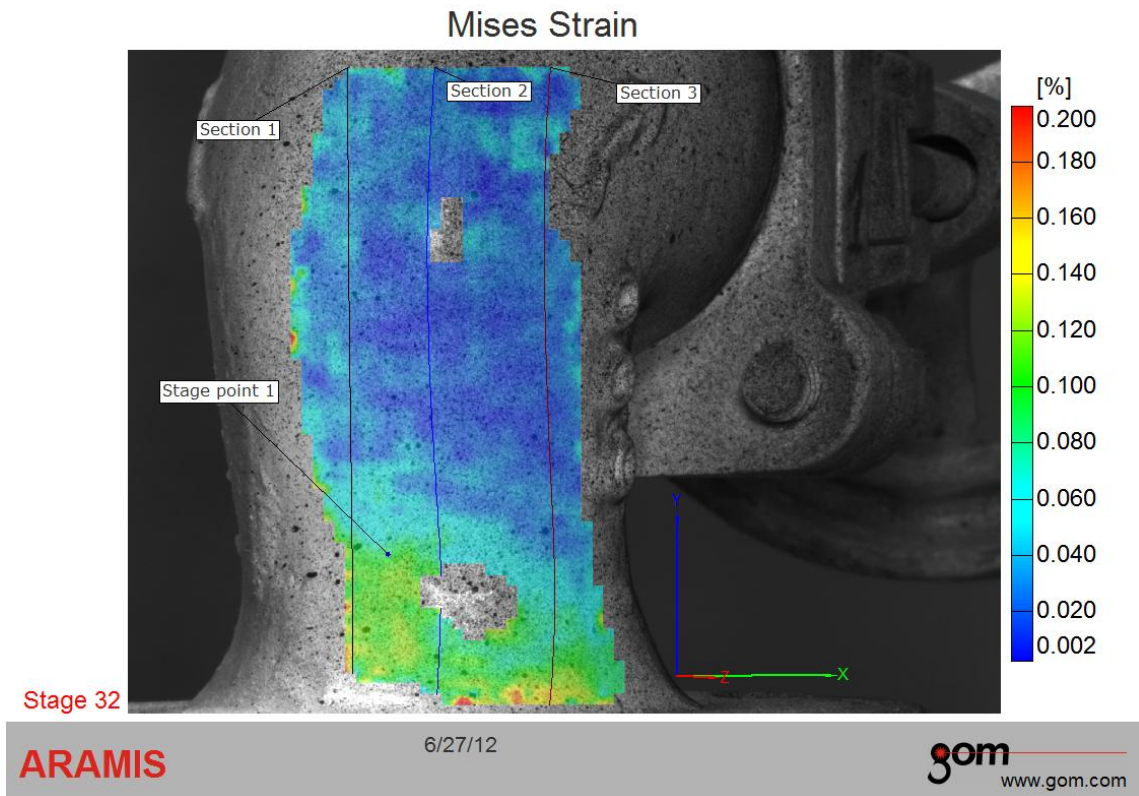
ARAMIS

6/27/12

gom
www.gom.com

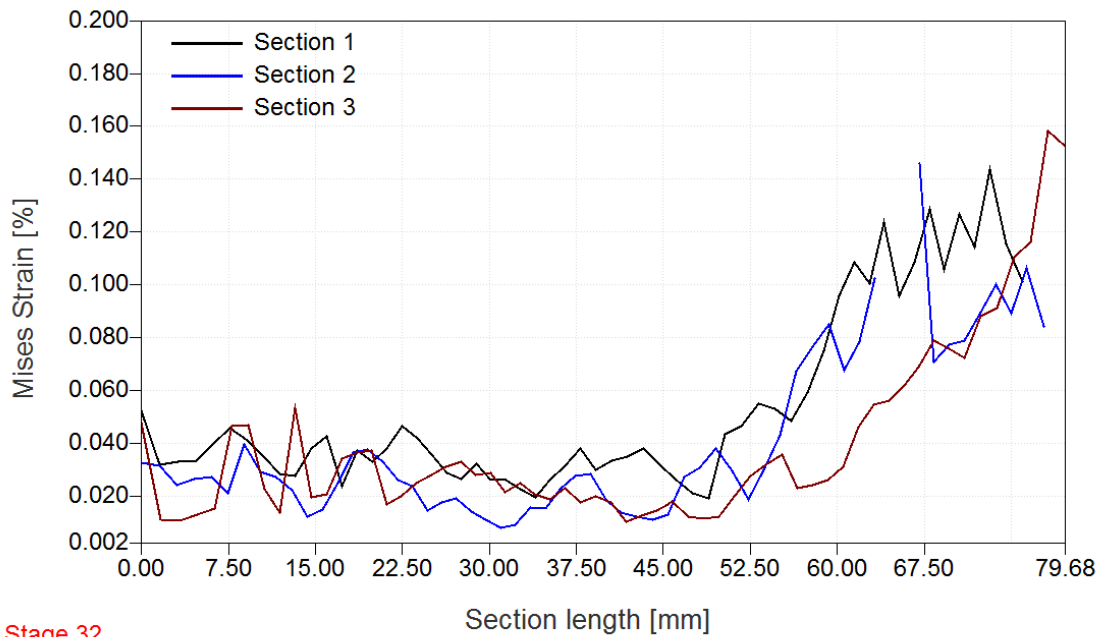
Slika 6.22. Dijagram pomeranja u Y pravcu tačke 1 za slučaj aksijalnog opterećenja za MM3

Polje Mizesovih deformacija je prikazano na slici 6.23 za slučaj opterećenja maksimalnom silom od 30 kN. Na slici 6.23 je na ordinati prikazana skala koja je data u %, dok su na samoj slici prikazani koordinatni sistem i položaji poprečnih preseka. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju u zoni geometrijskih diskontinuiteta, odnosno na spoju sfere i cilindra i iznose oko 0,12 do 0,15 %. Udaljavanjem po x pravcu od ravni simetrije, smanjuje se i geometrijski diskontinuitet, pa samim tim i vrednost deformacija kontinualno opada. Vrednosti Mizesovih deformacija na sfernom delu ventila su gotovo zanemarljive.



Slika 6.23. Polje Mizesovih deformacija za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM3

Vrednosti Mizesovih deformacija je moguće prikazati i pomoću dijagrama. Dijagram Mizesovih deformacija za svaki od preseka je dat na slici 6.24. Vrednosti Mizesovih deformacija (slika 6.24) su date u funkciji dužine preseka. Kao što se vidi na dijagramu, vrednosti Mizesovih deformacija su najveće na spoju sfera/cilindar i iznose od 0,10 do 0,15 %. Na sfernom delu ventila, deformacije su u granicama od 0,01 do 0,04 %.



Stage 32

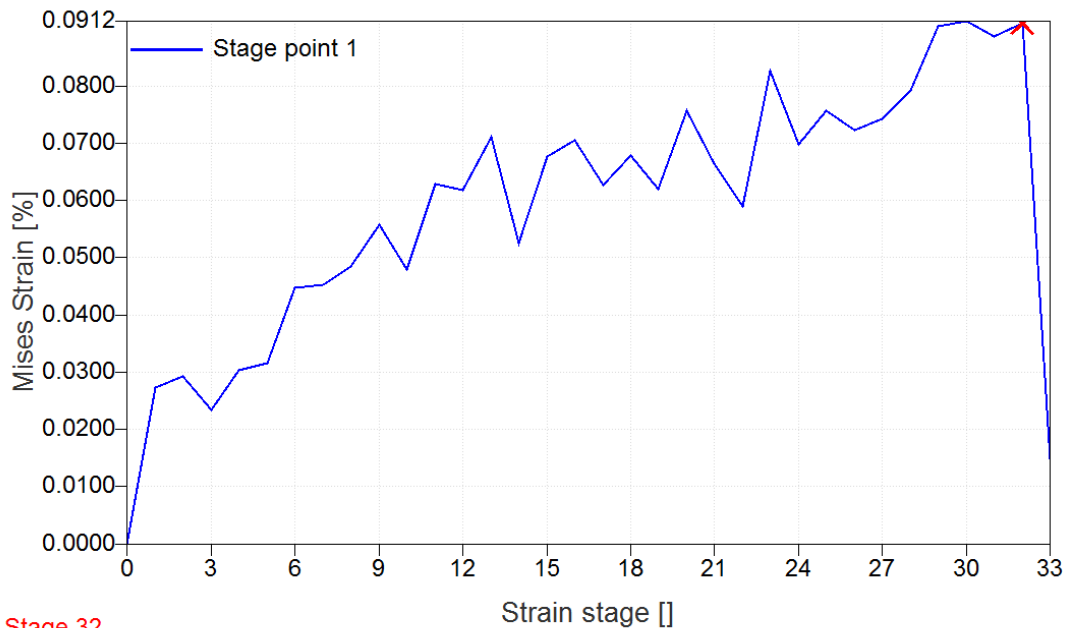
ARAMIS

6/27/12

gom
www.gom.com

Slika 6.24. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj aksijalnog opterećenja za MM3

Vrednosti Mizesovih deformacija za tačku 1 (stage point 1), prikazanu na slici 6.23 je moguće prikazati i u zavisnosti od vremena opterećivanja. Tako je na slici 6.25 prikazana promena vrednosti Mizesovih deformacija od neopterećenog stanja (strain stage 0), preko maksimalno opterećenog stanja (strain stage 32) do rasterećenog stanja (strain stage 33). Porast vrednosti Mizesovih deformacija (slika 6.25) je prikazan za ventil 1.



Stage 32

ARAMIS

6/27/12

gom
www.gom.com

Slika 6.25. Dijagram Mizesovih deformacija tačke 1 za slučaj aksijalnog opterećenja za MM3

Za svaki korak opterećivanja za tačku 1 (stage point 1) prikazanu na slici 6.22 je moguće očitati vrednosti pomeranja u Y pravcu i očitane vrednosti grafički prikazati radi dalje analize. Na slici 6.26 su prikazane vrednosti pomeranja u tački 1 kroz korake opterećivanja od 3 do 32. Koraci od 0 do 3 su izostavljeni iz statističke analize, jer u tim koracima vrednosti sila male i mogu se zanemariti. Korak 33 takođe nije uzet u obzir, jer predstavlja neopterećeno, odnosno rasterećeno stanje.

Kroz korake opterećivanja za tačku 1 prikazanu na slici 6.26 je provučena prava linija, koja daje najbolja poklapanja sa porastom vrednosti pomeranja u Y pravcu. Jednačina koja najbolje opisuje porast vrednosti pomeranja u Y pravcu za ventil 1 je:

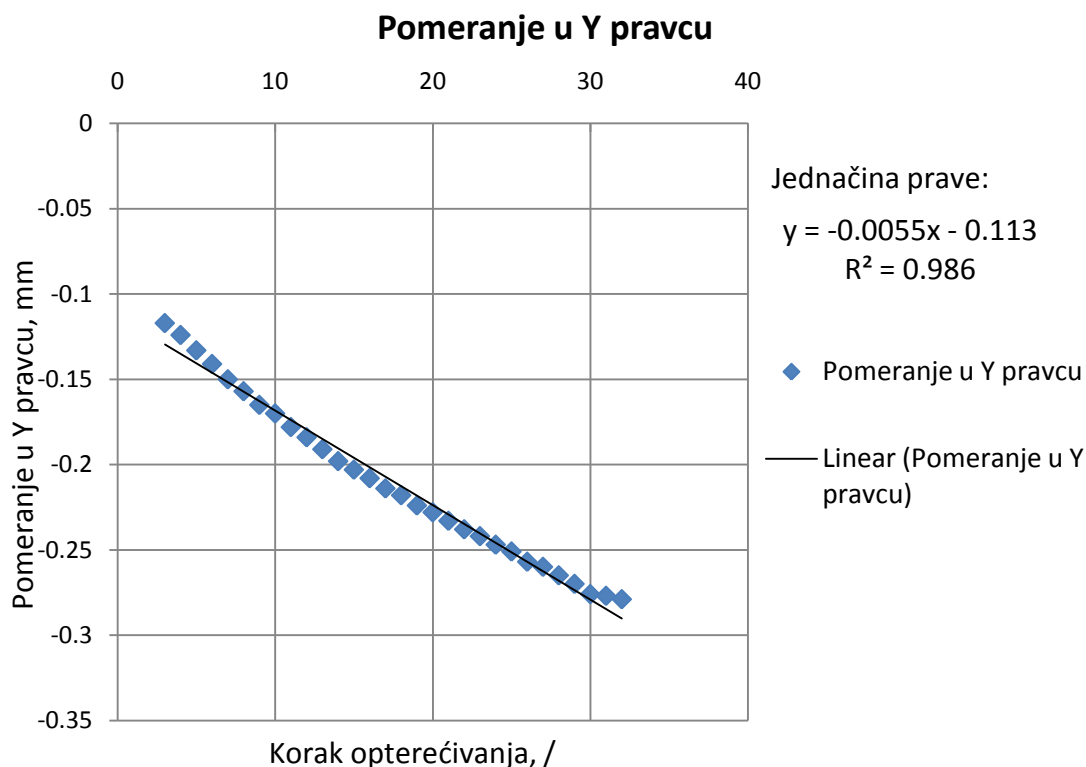
$$y = -0.0055 \cdot x - 0.113 \quad (10)$$

gde je:

– y, mm – vrednost pomeranja u Y pravcu,

– x – korak opterećivanja.

Koeficijent determinacije regresione prave (10) iznosi $R^2 = 0.986$.



Slika 6.26. Zavisnost pomeranja u Y pravcu od koraka opterećivanja za tačku 1 za MM3 opterećeno aksijalnom silom

Za svaki korak opterećivanja za tačku 1 (stage point 1) prikazanu na slici 6.25 je moguće očitati vrednosti Mizesovih deformacija i očitane vrednosti grafički prikazati, radi dalje analize. Na slici 6.27 su prikazane vrednosti Mizesovih deformacija u tački 1 kroz korake opterećivanja od 3 do 32. Koraci od 0 do 3 su izostavljeni iz statističke analize, jer u tim koracima vrednosti sila su male i mogu se zanemariti. Korak 33 takođe nije uzet u obzir, jer predstavlja neopterećeno, odnosno rasterećeno stanje.

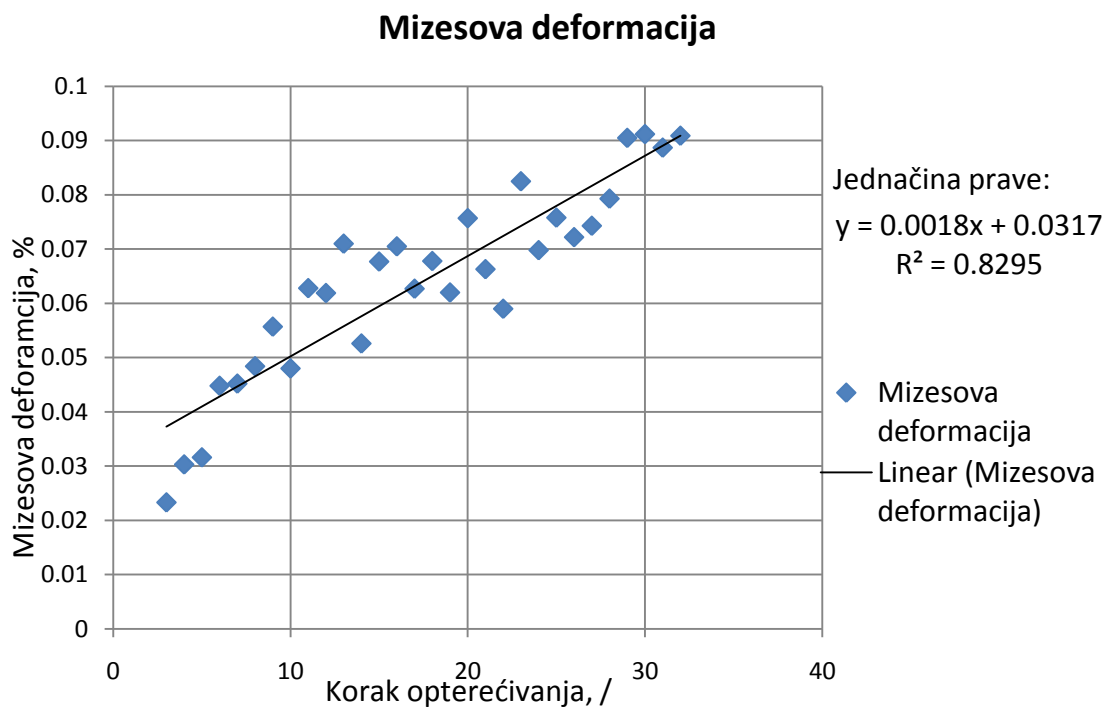
Kroz korake opterećivanja za tačku 1 prikazanu na slici 6.27 je provučena prava linija koja daje najbolja poklapanja sa porastom vrednosti Mizesovih deformacija. Jednačina koja najbolje opisuje porast vrednosti Mizesovih deformacija za ventil 1 je:

$$y = 0.0018 \cdot x + 0.0317 \quad (11)$$

gde je:

- y, mm – vrednost Mizesovih deformacija,
- x – korak opterećivanja.

Koeficijent determinacije regresione prave (11) iznosi $R^2 = 0.8295$.



Slika 6.27. Zavisnost Mizesovih deformacija od koraka opterećivanja za tačku 1 za MM3 opterećeno aksijalnom silom

6.1.4. Rezultati merenja za merno mesto MM4

Merno mesto 4 (MM4) se nalazi između prirubnica 1 i 3. Za MM4 su prikazani rezultati pomeranja u Y pravcu (vertikalni pravac, paralelni pravcu sile opterećenja) i Mizesovih deformacija.

Svaki ventil je analiziran sa 3 linijska preseka (sections). Dužina svakog od preseka odgovara vertikalnoj dimenziji mernog mesta, odnosno približno oko 25 mm. Preseci su

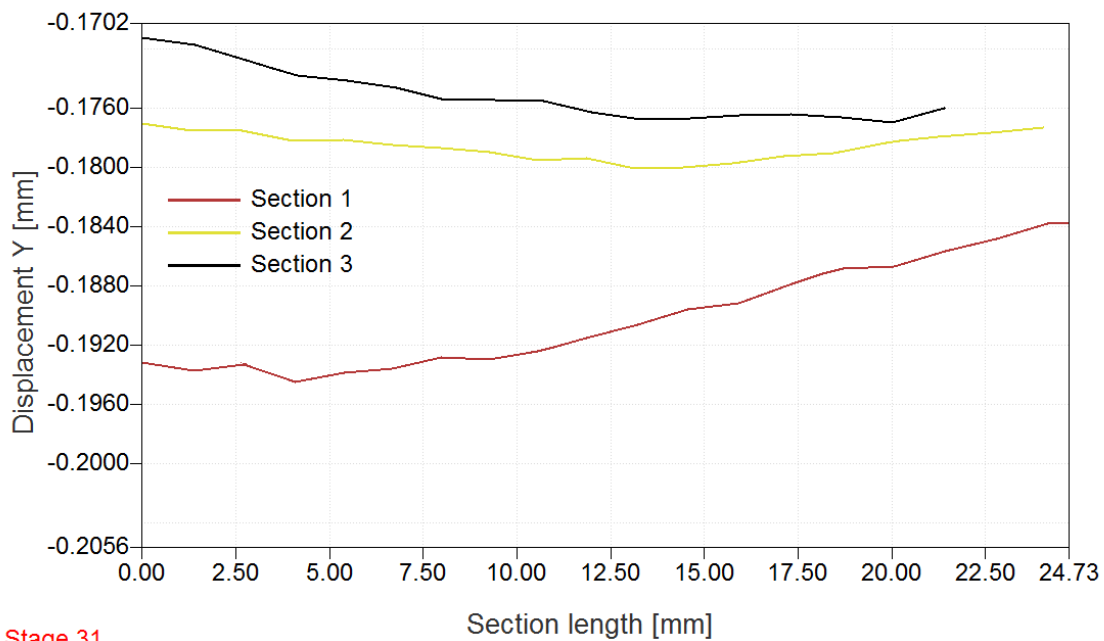
definisani tako da se dva preseka nalaze na krajevima izmerenog polja, a jedan u sredini. Svaki od preseka se u proseku sastoji od 20 tačaka. Za svaku tačku su izmerene koordinate u neopterećenom stanju, u toku opterećivanja i rasterećenom stanju, kao i prouzrokovana pomeranja/deformacije. Tako je merno mesto 4 opterećeno aksijalnom silom analizirano sa 9 preseka, odnosno sa oko 180 tačaka.

Polje pomeranja mernog mesta 4 u pravcu Y je prikazano na slici 6.28 za slučaj opterećenja maksimalnom silom od 30 kN. Na ordinati slike 6.28 je prikazana skala koja ja data u mm, dok su na samoj slici prikazani koordinatni sistem i položaji poprečnih preseka. Negativne vrednosti prikazane na dijagramu su zbog smera koordinatnog sistema, odnosno smera Y ose. Kao što se može videti sa slike, polje sa najvećim vertikalnim pomeranjem (plava boja) se nalazi sa bočne strane ventila. Pomeranje u Y pravcu u toj zoni iznosi oko 0,2 mm.



Slika 6.28. Polje pomeranja u Y pravcu za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM4

Vrednosti pomeranja u Y pravcu je moguće prikazati i pomoću dijagrama. Dijagram pomeranja u Y pravcu za svaki od preseka (slika 6.28) su dati na slici 6.29. Vrednosti pomeranja u Y pravcu (slika 6.29) su data u funkciji dužine poprečnog preseka. Kao što se vidi na dijagramu, vrednosti pomeranja u Y pravcu se povećavaju sa udaljenjem od ravni simetrije ventila. Najveće vrednosti pomeranja (oko 0,195 mm) se javljaju na bočnoj strani ventila. Najmanje vrednosti pomeranja su u zoni neposredno uz ravan simetrije i iznose od 0,17 do 0,177 mm. Negativne vrednosti prikazane na dijagramu su zbog smera koordinatnog sistema, odnosno smera Y ose.



Stage 31

ARAMIS

6/27/12

gom
www.gom.com

Slika 6.29. Dijagram pomeranja u Y pravcu za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM4

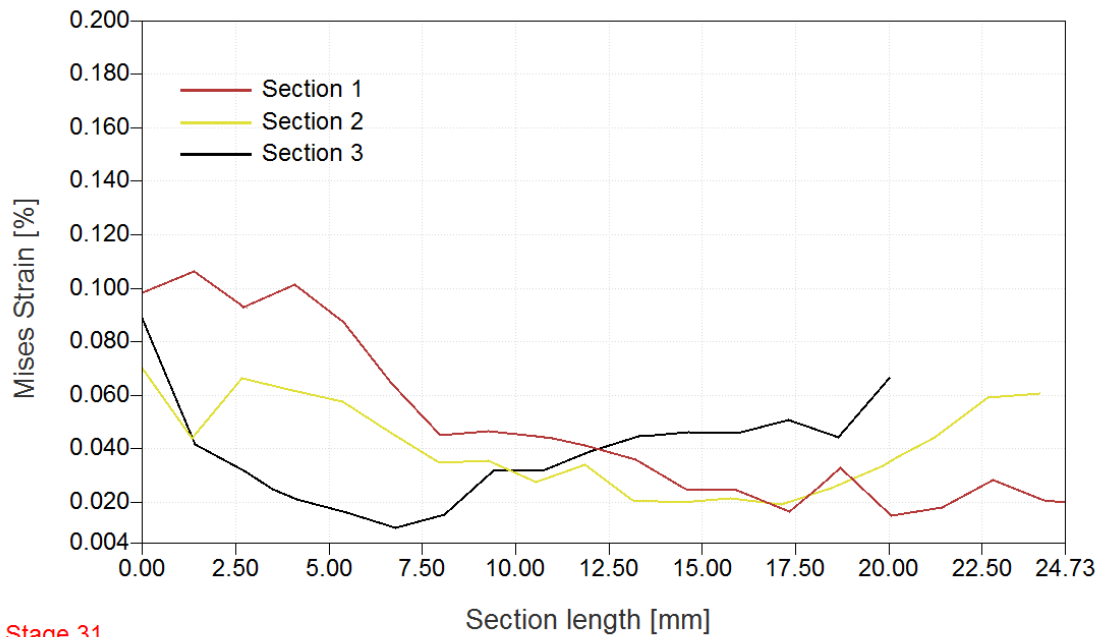
Polje Mizesovih deformacija je prikazano na slici 6.30 za slučaj opterećenja maksimalnom silom od 30 kN. Na slici 6.30 je na ordinati prikazana skala koja je data u %, dok su na samoj slici prikazani koordinatni sistem i položaji preseka. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju u zoni neposredno uz prirubnicu 1 i iznose

oko 0,08 do 0,12 %. Udaljavanjem po x pravcu od ravni simetrije, smanjuje se vrednost Mizesovih deformacija.



Slika 6.30. Polje Mizesovih deformacija za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM4

Vrednosti Mizesovih deformacija je moguće prikazati i pomoću dijagrama. Dijagram Mizesovih deformacija za svaki od preseka je dat na slici 6.30. Vrednosti Mizesovih deformacija (slika 6.31) su date u funkciji dužine preseka. Kao što se vidi na dijagramu, vrednosti Mizesovih deformacija su najveće u zoni neposredno uz prirubnicu 1 i iznose do 0,11 %. Sa udaljavanjem od prirubnice 1 (slika 5.9), vrednost Mizesovih deformacija kontinualno opada.



Stage 31

ARAMIS

6/27/12

gom
www.gom.com

Slika 6.31. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj aksijalnog opterećenja od 30 kN za MM4

6.2. Opterećenje unutrašnjim pritiskom

6.2.1. Rezultati merenja za merno mesto MM1

Merno mesto 1 se nalazi na mestu spoja sfere i cilindra. Za MM1 su prikazani rezultati Mizesovih deformacija.

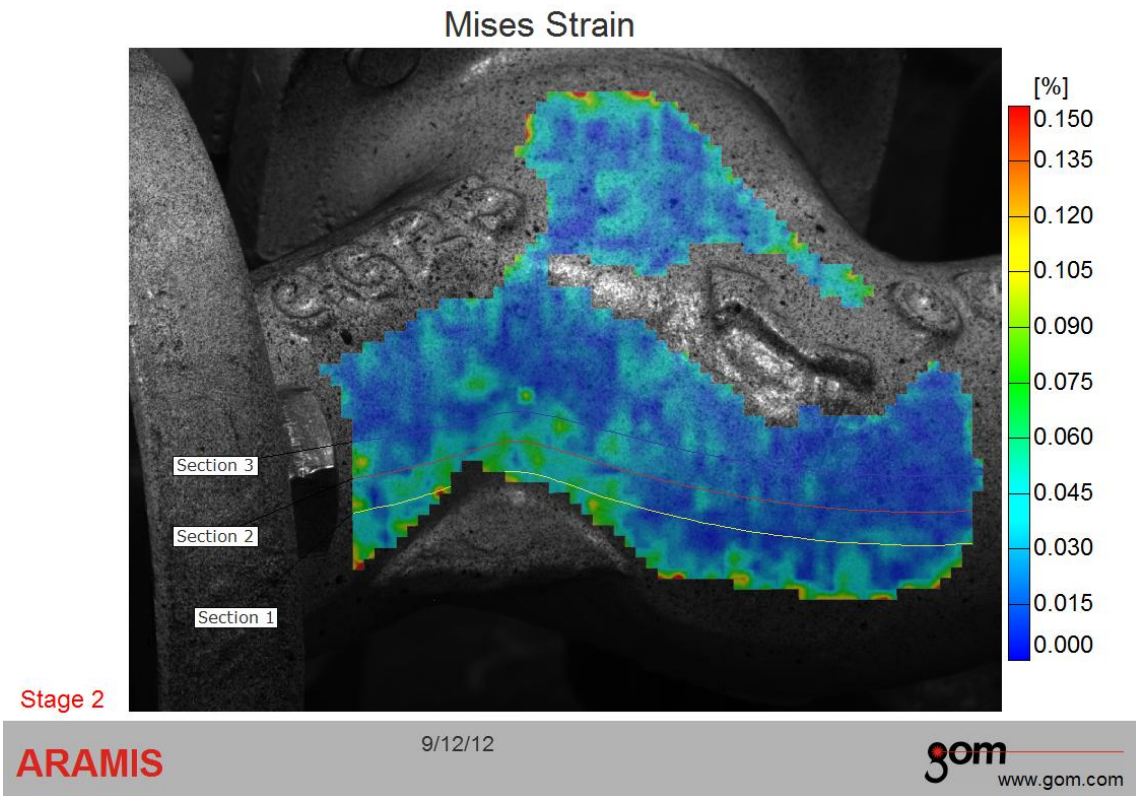
Prilikom eksperimentalnih merenja, sistem automatski definiše položaj globalnog koordinatnog sistema. Za potrebe analitičke analize i dalje obrade rezultata, definisan je novi položaj globalnog koordinatnog sistema. Koordinatni početak je postavljen na spoj sfere i cilindra, pri čemu je koordinata Y postavljena koaksijalno sa silom opterećenja. Tačan položaj koordinatnog sistema je prikazan na slici 6.1.

Svaki ventil je analiziran sa 3 linijska preseka (sections). Dužina svakog od preseka odgovara dimenziji mernog mesta, odnosno približno iznosi 76 mm. Preseci su

definisani tako da se nalaze u preseku ravni koja je paralelna sa ojačanjem i površine samog ventila, odnosno 3D modela mernog mesta. Preseci su postavljeni na međusobnoj udaljenosti od 4 mm. Svaki od preseka se u preseku sastoji od 45 do 68 tačaka. Za svaku tačku su izmerene koordinate u neopterećenom stanju, u toku opterećivanja i rasterećenom stanju, kao i prouzrokovana pomeranja/deformacije. Tako je merno mesto 1 opterećeno unutrašnjim pritiskom analizirano sa 9 preseka, odnosno sa 545 tačaka.

Podaci dobijeni eksperimentalnim putem, prikazani su i grafički za svaki od karakterističnih preseka ventila u cilju dobija krivi deformacija u funkciji dužine preseka.

Polje Mizesovih deformacija je prikazano na slici 6.32 za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 30 bar. Na slici 6.32 je na ordinati prikazana skala koja ja data u %, dok su na samoj slici prikazani koordinatni sistem i položaji poprečnih preseka. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju u zoni najvećih geometrijskih diskontinuiteta, odnosno na spoju sfere i cilindra i iznose oko 0,10 %. Udaljavanjem od ojačanja, smanjuje se i geometrijski diskontinuitet, pa samim tim i vrednost deformacija kontinualno opada.



Slika 6.32. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 30 bar za MMI

Na sfernom delu ventila, deformacije su u granicama od 0,01 do 0,02 %. Na cilindričnom delu ventila, deformacije su veće nego na sfernom delu, i u granicama su od 0,01 do 0,04 %. Vrednosti deformacija na cilindričnom delu (ka prirubnici) kontinualno rastu.

Za svaki od poprečnih preseka prikazanih na slici 6.32 je moguće i tabelarno prikazati vrednosti Mizesovih deformacija za svaku od tačaka koje se nalaze na dužini preseka. U tabeli 6.5 su prikazane vrednosti deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 30 bar.

Tabela 6.5. Vrednosti Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 30 bar za MM1 za ventil 1

Ventil 1						
Redni broj tačke na preseku	Section 1		Section 2		Section 3	
	Dužina sekcije [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina sekcije [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina sekcije [mm]	Mizesova deformacija [%]
1	0,000	0,059	0,000	0,050	0,000	0,028
2	1,459	0,065	1,434	0,048	1,406	0,022
3	2,940	0,017	2,881	0,027	2,097	0,027
4	4,442	0,022	4,351	0,023	2,817	0,032
5	5,413	0,039	5,110	0,021	4,249	0,021
6	5,960	0,049	5,843	0,020	5,697	0,018
7	7,516	0,042	7,348	0,018	7,162	0,014
8	9,100	0,039	8,864	0,040	8,638	0,008
9	10,710	0,042	10,411	0,038	10,128	0,011
10	11,103	0,073	11,865	0,057	11,366	0,025
11	12,360	0,143	11,995	0,059	11,643	0,028
12	14,045	0,068	13,622	0,056	13,186	0,020
13	22,136	0,065	15,278	0,034	14,746	0,018
14	23,492	0,042	16,907	0,020	16,333	0,010
15	24,753	0,032	17,261	0,024	17,924	0,024
16	25,965	0,059	18,537	0,041	17,933	0,024
17	27,144	0,037	20,138	0,053	19,507	0,029
18	28,294	0,040	21,663	0,076	21,031	0,040
19	28,430	0,043	23,090	0,045	22,477	0,025
20	29,439	0,068	24,402	0,071	23,812	0,018
21	30,577	0,049	25,625	0,065	25,071	0,030
22	31,663	0,045	26,804	0,032	26,280	0,036
23	31,714	0,047	27,753	0,039	27,011	0,059
24	32,854	0,061	27,968	0,041	27,461	0,075
25	33,999	0,066	29,123	0,033	28,629	0,050
26	35,148	0,047	30,268	0,037	29,797	0,026
27	35,258	0,047	31,347	0,035	30,966	0,014
28	36,304	0,034	31,410	0,034	31,420	0,014
29	37,464	0,009	32,558	0,020	32,133	0,019
30	38,629	0,008	33,708	0,022	33,301	0,053
31	39,593	0,012	34,860	0,026	34,468	0,041
32	39,797	0,014	35,167	0,026	35,631	0,022
33	40,969	0,019	36,015	0,028	35,871	0,022
34	42,144	0,014	37,177	0,021	36,793	0,022
35	43,325	0,016	38,338	0,016	37,956	0,030
36	44,509	0,011	39,501	0,017	39,122	0,020
37	44,709	0,012	39,545	0,017	40,290	0,023
38	45,704	0,014	40,670	0,023	40,498	0,026
39	46,904	0,016	41,845	0,015	41,463	0,037
40	48,115	0,010	43,027	0,039	42,643	0,016

Naponi i deformacije struktura kompleksne geometrije cevovodne armature

Ventil 1						
Redni broj tačke na preseku	Section 1		Section 2		Section 3	
	Dužina sekcije [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina sekcije [mm]	Mizesova deformacija [%]	Dužina sekcije [mm]	Mizesova deformacija [%]
41	49,334	0,020	44,212	0,022	43,828	0,036
42	50,561	0,010	44,796	0,023	45,025	0,013
43	51,793	0,005	45,404	0,024	46,226	0,019
44	51,890	0,006	46,603	0,024	46,261	0,018
45	53,034	0,013	47,812	0,012	47,437	0,015
46	54,282	0,012	49,030	0,035	48,659	0,017
47	55,537	0,013	50,259	0,014	49,889	0,013
48	56,800	0,025	51,495	0,020	51,125	0,014
49	58,070	0,017	52,319	0,015	52,365	0,015
50	59,351	0,021	52,730	0,013	53,610	0,006
51	60,646	0,029	53,975	0,017	54,864	0,024
52	61,951	0,013	55,228	0,022	55,156	0,023
53	63,261	0,024	56,489	0,010	56,130	0,018
54	64,576	0,035	57,757	0,012	57,407	0,017
55	65,899	0,030	59,034	0,016	58,687	0,016
56	67,232	0,019	60,322	0,017	59,972	0,013
57	68,512	0,019	61,620	0,011	61,267	0,008
58	68,581	0,019	62,925	0,014	62,575	0,008
59	69,946	0,023	64,242	0,011	63,899	0,008
60	70,411	0,018	65,571	0,013	65,232	0,011
61	71,340	0,007	66,912	0,010	66,578	0,007
62	72,767	0,027	68,271	0,004	67,935	0,005
63	74,211	0,034	69,641	0,017	69,303	0,008
64	75,660	0,071	71,019	0,012	70,680	0,011
65	/	/	72,417	0,011	72,074	0,009
66	/	/	73,844	0,009	73,486	0,009
67	/	/	75,283	0,030	74,908	0,014
68	/	/	/	/	76,343	0,033

Matematički model

U cilju opisivanja prethodno prikazanih eksperimentalnih podataka odgovarajućom matematičkom funkcijom, tj. analitičkim obrascem, izvršena je dalja obrada rezultata ispitivanjem velikog broja regresionih modela za svaki od karakterističnih preseka. Tražena je što jednostavnija funkcija promene Mizesove deformacije po dužini jednog preseka na sva tri ispitivana ventila. Ekperimentalni rezultati za svaki od preseka su aproksimirani analitičkim obrascima sa zadovoljavajućom tačnošću. Obrada eksperimentalnih rezultata je sprovedena metodama statističke analize, u cilju

utvrđivanja relevantnih funkcionalnih zavisnosti posmatranih veličina i dobijanja dijagrama.

Procena parametara matematičkog modela je urađena za svaku funkcionalnu zavisnost preseka kućišta ventila. Procena parametara modela je urađena korišćenjem metode najmanjih kvadrata. Funkcija minimizacije korišćena u analizi u okviru disertacije je Levenberg-Marquardt algoritam.

Kako je položaj odgovarajućih preseka isti na sva tri ispitivana ventila, funkcionalna zavisnost Mizesovih deformacija od dužine preseka je definisana za svaki od tri preseka prikazanih na slici 6.32. Funkcionalna zavisnost za isti (jedan) presek je urađena za sva tri ventila.

Funkcionalna zavisnost je urađena za dva slučaja. Prva funkcionalna zavisnost je definisana za celu dužinu preseka, odnosno za oblasti koje obuhvataju deformaciona polja za sferu, cilindar i njihov spoj. Kako se najveće vrednosti deformacija javljaju na spoju sfere i cilindra, fokus je u daljoj analizi stavljen na sam spoj i usku oblast oko spoja. Tako je druga funkcionalna zavisnost definisana na dužinu preseka od 20 mm sa jedne i druge strane spoja sfera/cilindar.

Prvu funkcionalnu zavisnost za celu dužinu preseka najbolje opisuje racionalna polinomna funkcija:

$$y(x) = \frac{a + b \cdot x}{1 + c \cdot x + d \cdot x^2} \quad (12)$$

gde je:

- $y(x)$ – vrednost Mizesovih deformacija,
- x [mm] – koordinata tačke na preseku 1,
- a, b, c, d – koeficijenti.

Vrednosti koeficijenata u funkcionalnoj zavisnosti (12) su prikazani u tabeli 6.6.

Koordinata x u jednačinama za funkcionalnu zavisnost predstavlja rastojanje tačke na preseku u odnosu na početak preseka. Kako bi se lakše definisao položaj tačaka, vrši se preračunavanje koordinata u odnosu na spoj sfere i cilindra. Na slici 6.6 je položaj spoja sfere i cilindra određen crnom vertikalnom linijom označenom nulom. Položaj spoja sfere i cilindra za presek 1 se nalazi na udaljenosti 25,965 mm od početka preseka. Kako se cilindar nalazi sa leve strane spoja (slika 6.6), za određivanje tačnog položaja tačke na cilindru za koju želimo da izračunamo deformaciju, udaljenost od spoja se oduzima od vrednosti 25,965 mm. Kako se sfera nalazi sa desne strane spoja (slika 6.6), za određivanje tačnog položaja tačke na sferi za koju želimo da izračunamo deformaciju, udaljenost od spoja se dodaje na vrednost 25,965 mm. Ovako određena vrednost koordinate x se unosi u jednačinu (1) i određuje se vrednost Mizesove deformacije. Preračunavanje koordinata se sprovodi za sve preseke za oba slučaja funkcionalnih zavisnosti.

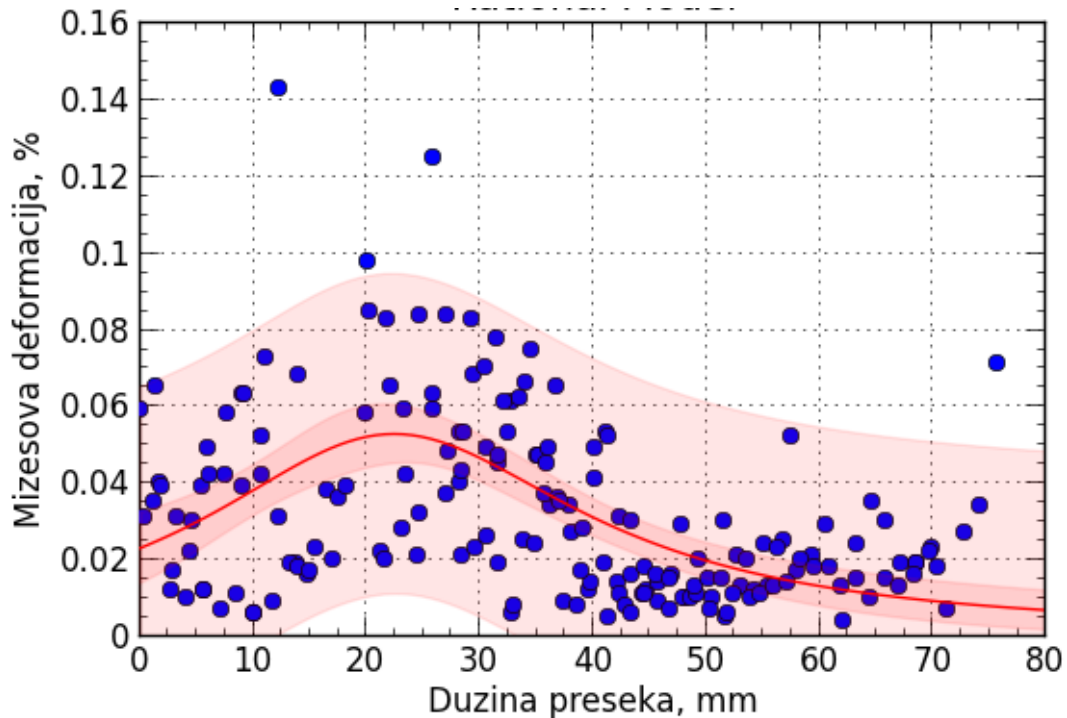
Tabela 6.6. Polinomna funkcija za celu dužinu preseka za unutrašnji pritisak od 30 bar

Preseci	Funkcionalna zavisnost				MPE*, %	RMSE*	χ^2 *	θ *
	$y = \frac{a + b \cdot x}{1 + c \cdot x + d \cdot x^2}$							
	Koeficijenti							
	a	b	c	d				
1	0,023074	0,000078	-0,048868	0,001123	7,509E-02	1,010E-02	4,346E-04	0,493
2	0,016422	0,000049	-0,036536	0,000704	1,616E-02	2,162E-03	2,232E-04	0,398
3	0,020865	-0,000051	-0,014090	0,000248	-3,103E-03	4,152E-04	1,232E-04	0,255

*Napomena:
MPE – srednja procentualna greška (engl. Mean Percent Error),
RMSE – koren srednje kvadratne greške (engl. Root Mean Square Error),
 χ^2 – hi kvadrat (engl. reduced chi-square),
 θ – korelacioni odnos,
 $x = 25,965 \pm a, mm$ (a je rastojanje od preseka na spoju).

Dobro slaganje pretpostavljene funkcije zavisnosti sa vrednostima Mizesovih deformacija su potvrđeni kroz vrednosti srednje procentualne greške, korena srednje kvadratne greške, hi kvadrata i korelacionog odnosa koji su prikazani u tabeli 6.6. Poželjno je da vrednosti srednje relativne procentualne greške, korena srednje kvadratne greške i hi kvadrata teže nuli.

Polinomna funkcija koja opisuje promene Mizesove deformacije za celu dužinu preseka, za presek 1 pri maksimalnom unutrašnjem pritisku, prikazana je na slici 6.33.



Slika 6.33. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka za celu dužinu preseka 1 za unutrašnji pritisak od 30 bar

Drugu funkcionalnu zavisnost za dužinu preseka od 20 mm sa jedne i druge strane spoja sfera/cilindar najbolje opisuje polinomna funkcija:

$$y(x) = \frac{a + b \cdot x}{1 + c \cdot x + d \cdot x^2} \quad (13)$$

gde je:

- $y(x)$ – vrednost Mizesovih deformacija,
- x [mm] – koordinata tačke na preseku 1,
- a, b, c, d – koeficijenti.

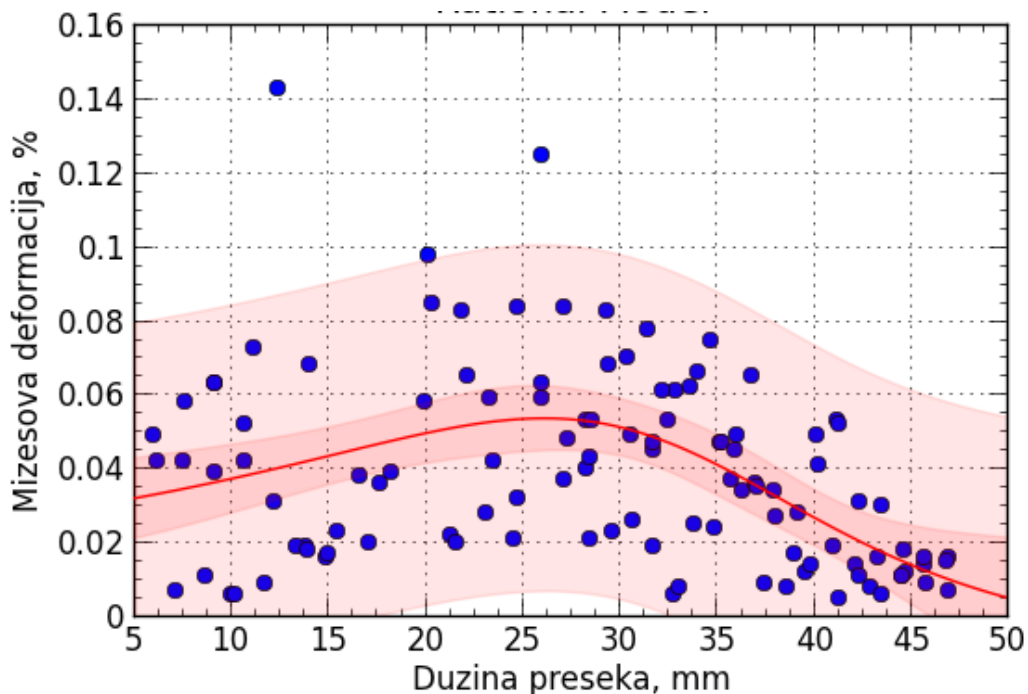
Vrednosti koeficijenata u funkcionalnoj zavisnosti (13) su prikazani u tabeli 6.7.

Tabela 6.7. Polinomna funkcija za dužinu preseka od 20 mm sa jedne i druge strane spoja za unutrašnji pritisak od 30 bar

Preseci	Funkcionalna zavisnost				MPE*, %	RMSE*	χ^2 *	θ *
	$y = \frac{a + b \cdot x}{1 + c \cdot x + d \cdot x^2}$							
	Koefficienti							
	a	b	c	d				
1	0,027789	-0,000510	-0,046574	0,000711	-1,321E-04	1,398E-05	5,410E-04	0,484
2	0,017200	-0,000331	-0,041750	0,000506	-3,862E-03	4,160E-04	2,307E-04	0,397
3	0,019885	-0,000283	-0,026492	0,000282	-2,191E-03	2,369E-04	1,424E-04	0,150

*Napomena:
MPE – srednja procentualna greška (engl. Mean Percent Error),
RMSE – koren srednje kvadratne greške (engl. Root Mean Square Error),
 χ^2 – hi kvadrat (engl. reduced chi-square),
 θ – korelacioni odnos,
 $x = 25,965 \pm a, mm$ (a je rastojanje od preseka na spoju).

Polinomna funkcija koja opisuje promene Mizesove deformacije za dužinu preseka od 20 mm sa jedne i druge strane spoja, za presek 1 pri maksimalnom unutrašnjem pritisku, prikazana je na slici 6.34.



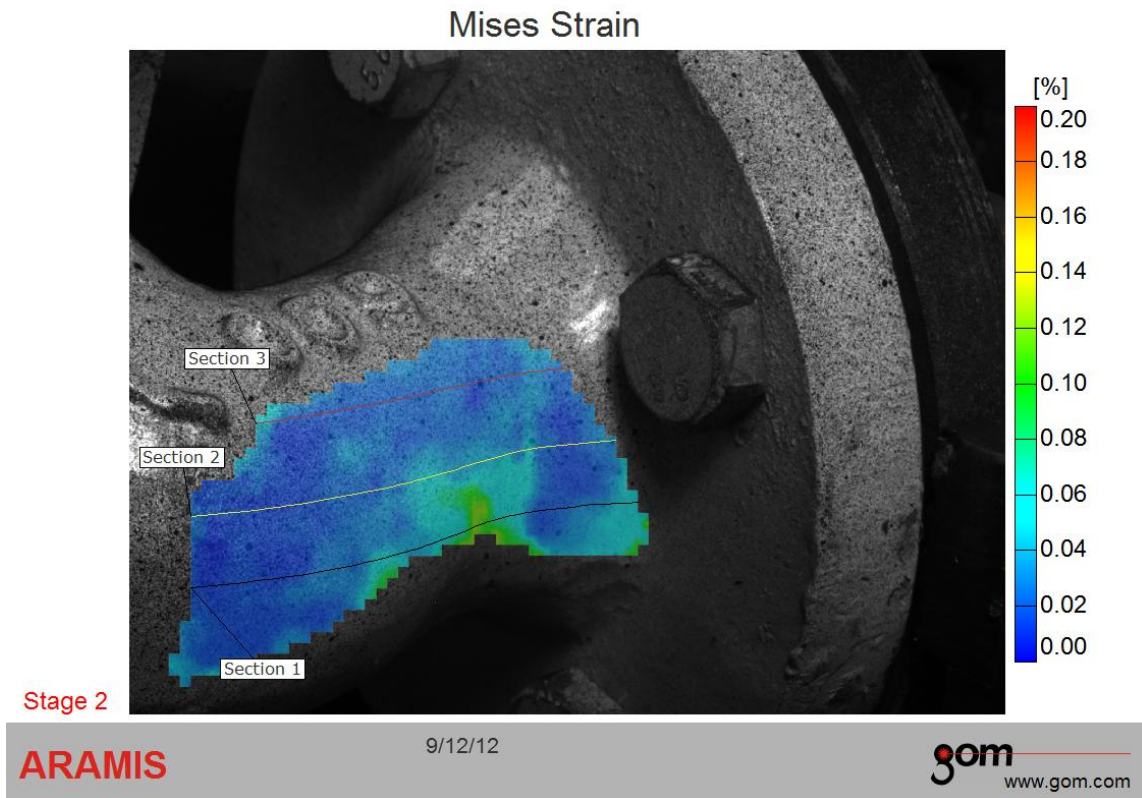
Slika 6.34. Dijagram promene Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka 1 za dužinu preseka od 20 mm sa jedne i druge strane spoja za unutrašnji pritisak od 30 bar

6.2.2. Rezultati merenja za merno mesto MM3

Merno mesto 3 (MM3) se nalazi uz prirubnicu 2 i, kao i merno mesto 1, obuhvata i spoj sfere i cilindra, ali je za razliku od MM1, geometrijski diskontinuitet manji, odnosno blaži je prelaz sa sfere na cilindar. Za MM3 su prikazani rezultati Mizesovih deformacija.

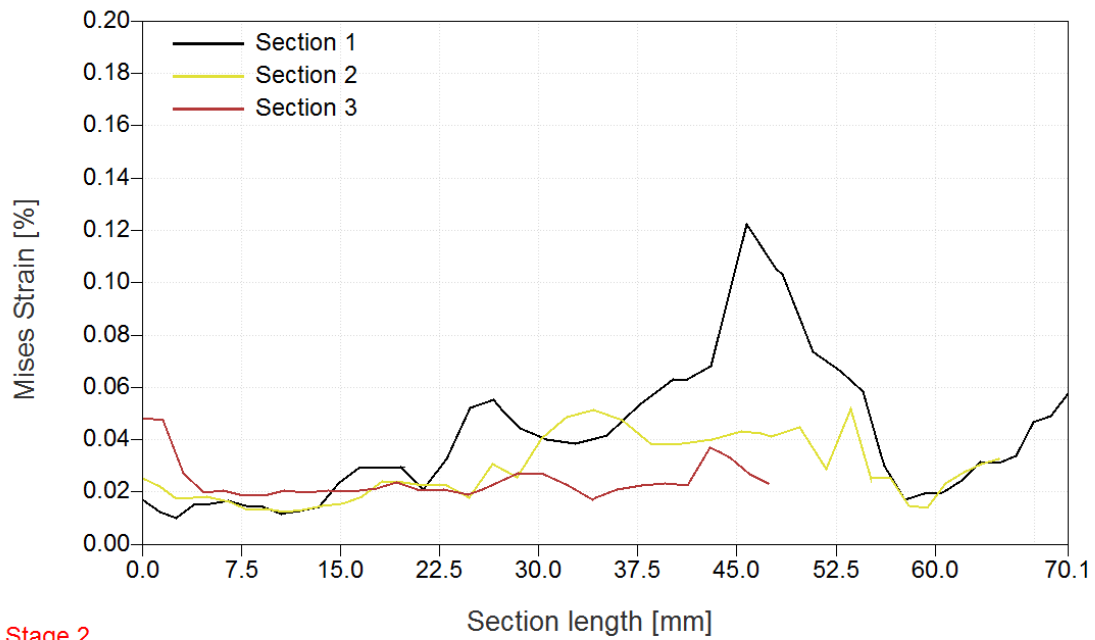
Svaki ventil je analiziran sa 3 linijska preseka (sections). Dužina svakog od preseka odgovara dimenziji mernog mesta, odnosno približno oko 70 mm. Preseci su definisani tako da se dva preseka nalaze na krajevima izmerenog polja, a jedan u sredini. Svaki od preseka se u proseku sastoji od 60 tačaka. Za svaku tačku su izmerene koordinate u neopterećenom stanju, u toku opterećivanja i rasterećenom stanju, kao i prouzrokovana pomeranja/deformacije. Tako je merno mesto 3 opterećeno unutrašnjim pritiskom analizirano sa 9 preseka, odnosno sa oko 540 tačaka.

Polje Mizesovih deformacija je prikazano na slici 6.35 za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 30 bar. Na slici 6.35 je na ordinati prikazana skala koja je data u %, dok su na samoj slici prikazani koordinatni sistem i položaji poprečnih preseka. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju u zoni geometrijskih diskontinuiteta, odnosno na spoju sfere i cilindra i iznose oko 0,12 %. Udaljavanjem od ravni simetrije, smanjuje se i geometrijski diskontinuitet, pa se samim tim i vrednost deformacija kontinualno opada. Vrednosti Mizesovih deformacija na sfernom delu ventila su gotovo zanemarljive.



Slika 6.35. Polje Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 30 bar za MM3

Vrednosti Mizesovih deformacija je moguće prikazati i pomoću dijagrama. Dijagram Mizesovih deformacija za svaki od preseka je dat na slici 6.36. Vrednosti Mizesovih deformacija (slika 6.36) su date u funkciji dužine preseka. Kao što se vidi na dijagramu, vrednosti Mizesovih deformacija su najveće na spoju sfera/cilindar i iznose do 0,12 %. Na sfernom delu ventila, deformacije su ispod 0,04 %.



Stage 2

ARAMIS

9/12/12

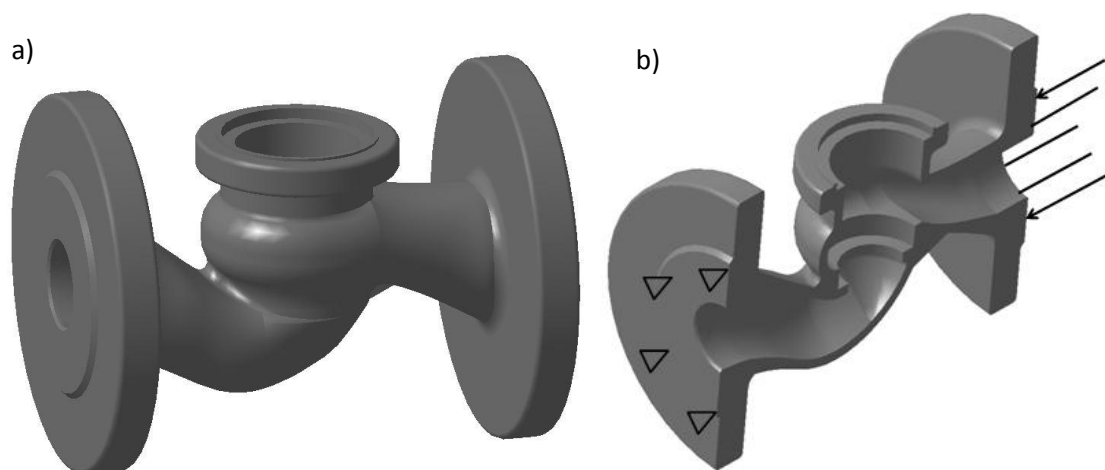
gom
www.gom.com

Slika 6.36. Dijagram Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 30 bar za MM3

POGLAVLJE 7

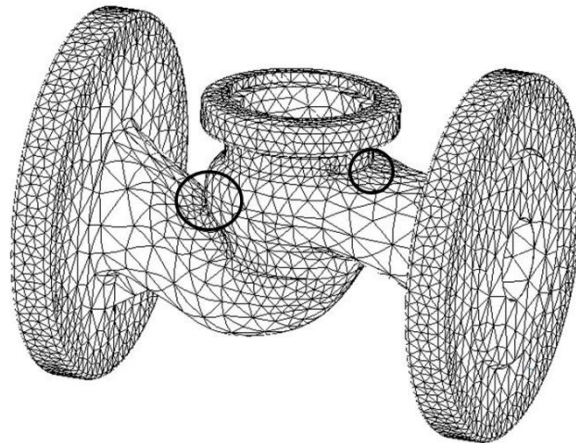
REZULTATI NUMERIČKE ANALIZE

Pored teorijskih i eksperimentalnih analiza, čvrstoća kućišta ravnog zapornog ventila je analizirana i korišćenjem metode konačnih elemenata (MKE). S obzirom na kompleksnu geometriju kućišta (česti geometrijski diskontinuiteti, prelazi, velike krivine), bilo je neophodno što preciznije uraditi 3D model ventila (Slika 7.1a). Kompjutersko modeliranje u ovom istraživanju zasnovano je na digitalizaciji 2D karakterističnih poprečnih preseka eksperimentalnog modela (slike 2.1 i 2.3), pri čemu je povezivanjem svih preseka dobijen 3D solid u kome je moguća formiranje i reprezentacija geometrijski nepravilnih površina kućišta ventila. Formiranje 3D objekta zasnovano je na povezivanju susednih preseka i automatskom generisanju nepravilnih površina između njih. Nepravilne površine su od posebnog značaja pri definisanju geometrije pojedinih delova modela, npr. prelaza na spoju sfere i cilindra, jer oblik znatno utiče na celokupan proračun modela. U ovom poglavlju su prikazani rezultati napona i deformacija usled delovanja aksijalne sile i unutrašnjeg pritiska na kućište ventila. Geometrijski model napravljen je u programskom paketu Catia V5.



Slika 7.1. a) 3D model ventila; b) 3D model sa osloncima i pravcem dejstva aksijalne sile

Trodimenzionalni model je poslužio kao „kalup“ za pravljenje mreže konačnih elemenata. S obzirom da se radi o konstrukciji, čija geometrija ipak odstupa od klasične ljuske, korišćen je element oblika tetraedra sa četiri čvora. Razvijeno je više numeričkih modela različitih gustina mreže kako bi se dobio optimalan broj elemenata. Broj tetradarskih elemenata u usvojenom MKE modelu ventila je 6921. Ova gustina mreže je izabrana tako da za što kraće vreme daje rezultate koji konvergiraju (tj. dalje povećanje broja elemenata ne utiče bitno na rezultate). Mreža je pravljen „poluautomatski“, odnosno u zonama gde su geometrijski prelazi (slika 7.2) i gde se očekuje koncentracija napona, broj elemenata je progresivno povećavan, dok je u „mirnim“ zonama ostavljena retka mreža (sa manjim brojem elemenata). Kod modela koji imaju nepravilnu geometriju, neophodno je korišćenje velikog broja konačnih elemenata i fine podele, kako bi se obuhvatila svaka značajnija zakrivljenost modela. Pre proračuna, vizuelnom kontrolom detaljno je proverena celokupna zapremina modela svih čvorova zbog mogućih odstupanja i geometrijskih diskontinuiteta, koji mogu izazvati nerealnu koncentraciju napona. Za potrebe analize metodom konačnih elemenata korišćen je softver Abaqus.

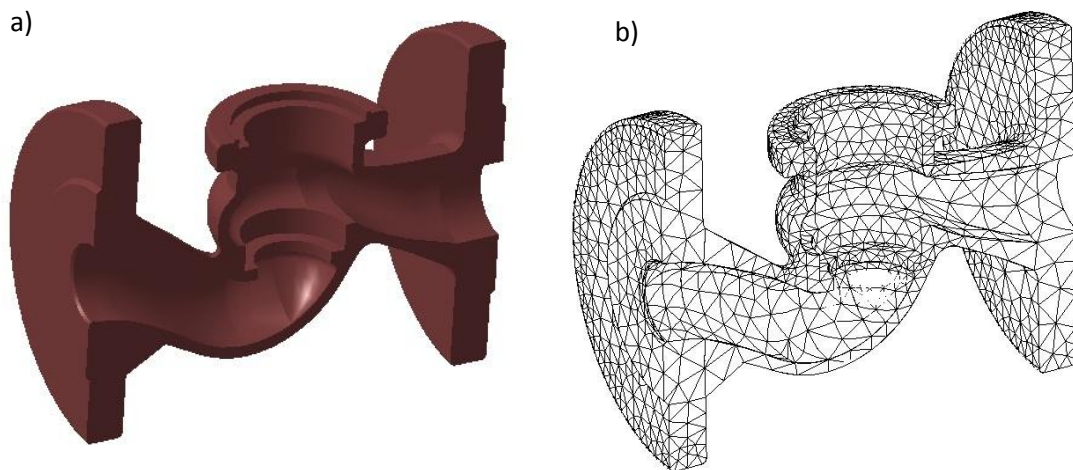


Slika 7.2. MKE model ventila sa označenim zonama povećane gustine mreže

U toku numeričkog proračuna, radi jednostavnosti i smanjenja vremena potrebnog za rad procesora, analizirana je jedna polovina kućišta ventila (slika 7.3). Analiza jedne polovine kućišta ventila je bila moguća, jer model ima jednu ravan simetrije, koja nije samo geometrijska, već predstavlja simetriju i po opterećenjima i po osloncima. Uticaj

preostale polovine modela na analiziranu je predstavljen odgovarajućim konturnim uslovima u ravni simetrije: svim čvorovima u ovoj ravni je sprečeno pomeranje u poprečnom pravcu u odnosu na ravan simetrije.

Na slici 7.3 prikazano je šta u praksi predstavlja diskretizacija domena. Pre definisanja oslonaca i mreže, 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, čiji čvorovi imaju pomeranja koja predstavljaju reakciju sistema na zadata opterećenja i granične uslove. Vrednosti pomeranja unutar samih konačnih elemenata (između čvorova) određuju se interpolacijom vrednosti u samim čvorovima i konačnog broja parametara koji predstavljaju osnovne nepoznate veličine. Sile ne mogu delovati po površini konačnog elementa ili po nekoj njegovoj ivici, već samo u čvorovima. Za analizu i proračun sistema konačnih elemenata važe svi principi i postupci koji važe i za klasične diskretne sisteme.



Slika 7.3. Model kućišta ventila: a) pre diskretizacije i b) posle diskretizacije.

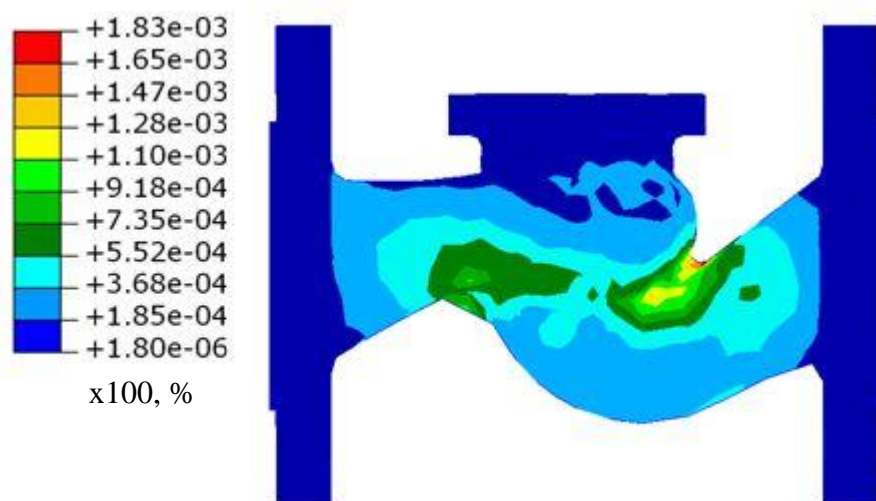
Numerička analiza je sprovedena za dva slučaja opterećenja: ventil opterećen aksijalnom silom na prirubnici 1 (slika 5.9), koja simulira dilatacije cevovoda i ventil opterećen unutrašnjim pritiskom. U prvom slučaju dodatni konturni uslovi uključuju oslonce na prirubnici 2 (slika 7.1b). Kada je model opterećen unutrašnjim pritiskom,

sprečeno je pomeranje slobodnim osloncima u dva čvora, koja su postavljena daleko od zone geometrijskih diskontinuiteta.

U okviru numeričkih proračuna je upotrebljena linearno – statička analiza. Deformacije i naponi se linearno menjaju sa promenom opterećenja tako da se rezultati mogu ekstrapolirati za druge vrednosti opterećenja. Pretpostavljeno je da se materijal ponaša u granicama elastičnosti, što je više nego opravdano, jer su naponi od radnih opterećenja ventila ispod granice tečenja u posmatranim zonama. Kroz eksperimentalne analize je i potvrđeno da se materijal u toku opterećenja nalazi u oblasti elastičnosti. Naime, nakon opterećivanja ventila aksijalnom silom, izvršeno je rasterećivanje i snimanje sistemom za optičko merenje deformacija. Snimak rasterećenog ventila pokazuje da se kućište u potpunosti vratilo u stanje jednako stanju pre opterećenja.

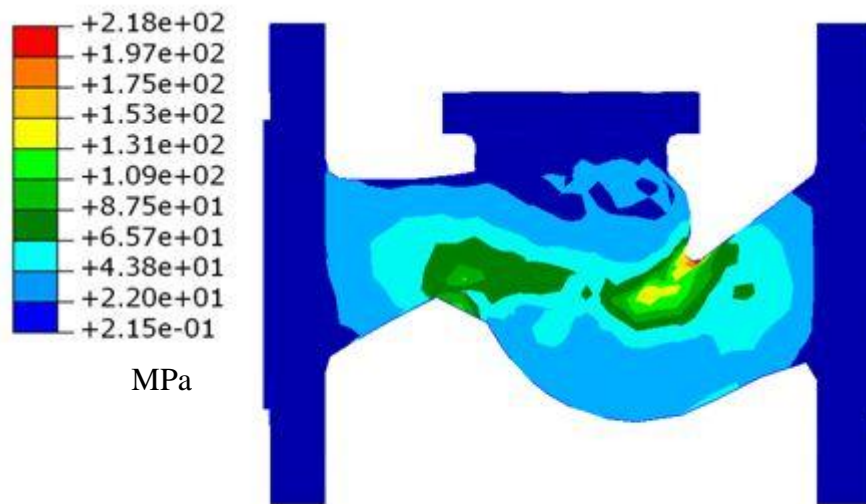
7.1. Opterećenje aksijalnom silom

Polje Mizesovih deformacija kućišta ventila je prikazano na slici 7.4 za slučaj opterećenja aksijalnom silom od 30 kN. Na ordinati slike 7.4 je prikazana skala koja pomnožena koeficijentom 100 daje procentualne vrednosti. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju na mestu najvećih geometrijskih diskontinuiteta i iznose oko 0,18 %. Udaljavanjem od ojačanja (u x pravcu), smanjuje se i geometrijski diskontinuitet, pa samim tim i vrednost deformacija kontinualno opada.



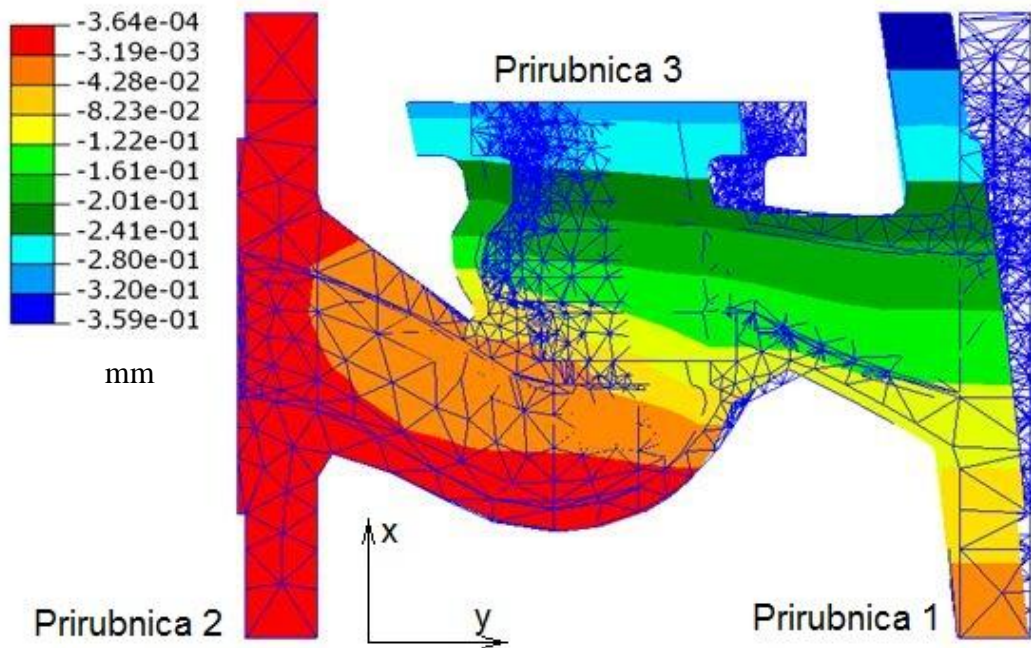
Slika 7.4. Polje deformacija kućišta ventila opterećenog aksijalnom silom od 30 kN

Polje Mizesovih napona kućišta ventila je prikazano na slici 7.5 za slučaj opterećenja aksijalnom silom od 30 kN. Na slici 7.5 je na ordinati prikazana skala Mizesovih napona u MPa. Najveće vrednosti Mizesovih napona se javljaju na mestu najvećih geometrijskih diskontinuiteta i iznose oko 200 MPa.



Slika 7.5. Naponsko polje kućišta ventila opterećenog aksijalnom silom od 30 kN

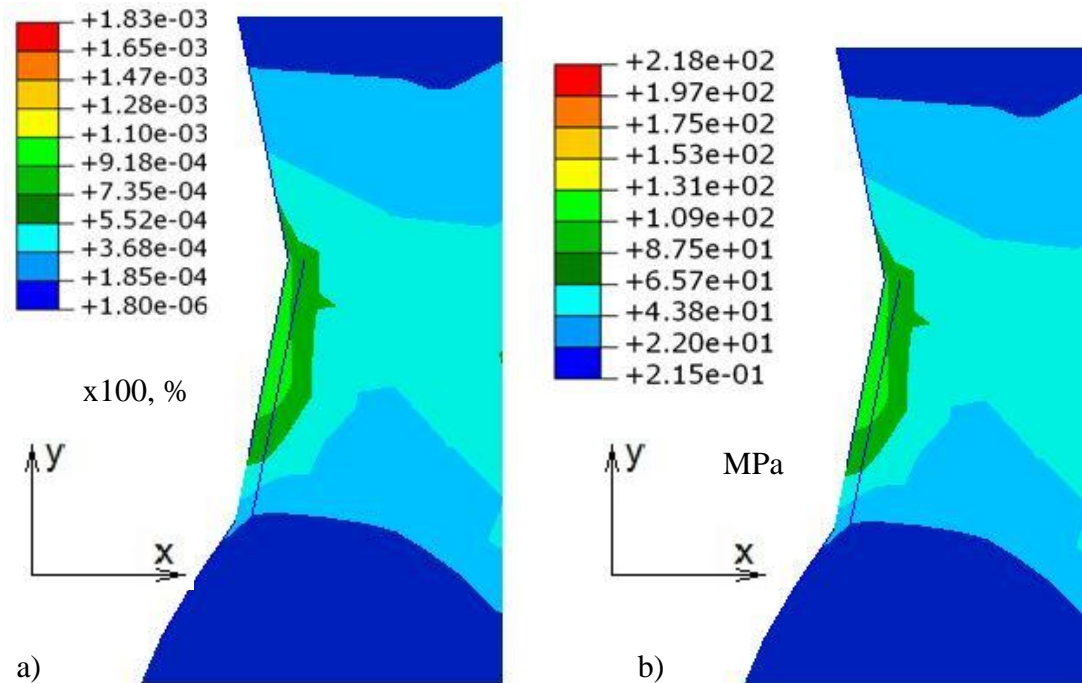
Celo polje pomeranja u Y pravcu za kućišta ventila je prikazano na slici 7.6 za slučaj opterećenja aksijalnom silom od 30 kN. Na slici 7.6 je na ordinati prikazana skala pomeranja u mm. Najveće vrednosti pomeranja se javljaju na prirubnici i iznose oko 0,35 mm.



Slika 7.6. Polje pomeranja u Y pravcu kućišta ventila opterećenog aksijalnom silom od 30 kN

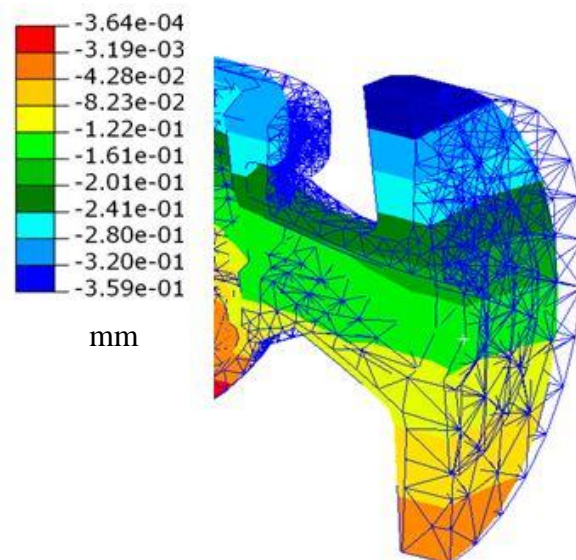
U okviru ovog poglavlja su prikazani i rezultati Mizesovih deformacija i napona za merna mesta 1, 3 i 4 koja su definisana u poglavlju 4 za slučaj opterećenja aksijalnom silom od 30 kN, kao i vrednosti pomeranja za merno mesto 2.

Polje Mizesovih deformacija i napona za merno mesto 1 je prikazano na slici 7.7 za slučaj opterećenja maksimalnom silom od 30kN. Vrednosti prikazane na ordinate slike 7.7a treba pomnožiti koeficijentom 100 kako bi se dobile procentualne vrednosti. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju u zoni najvećih geometrijskih diskontinuiteta, odnosno na spoju sfere i cilindra i iznose oko 0,11 %. Udaljavanjem od ojačanja (u x pravcu), smanjuje se i geometrijski diskontinuitet, pa se samim tim i vrednost deformacija kontinualno opada. Na slici 7.7b je na ordinati prikazana skala Mizesovih napona u MPa. Najveće vrednosti Mizesovih napona se javljaju na mestu najvećih geometrijskih diskontinuiteta i iznose oko 90 MPa.



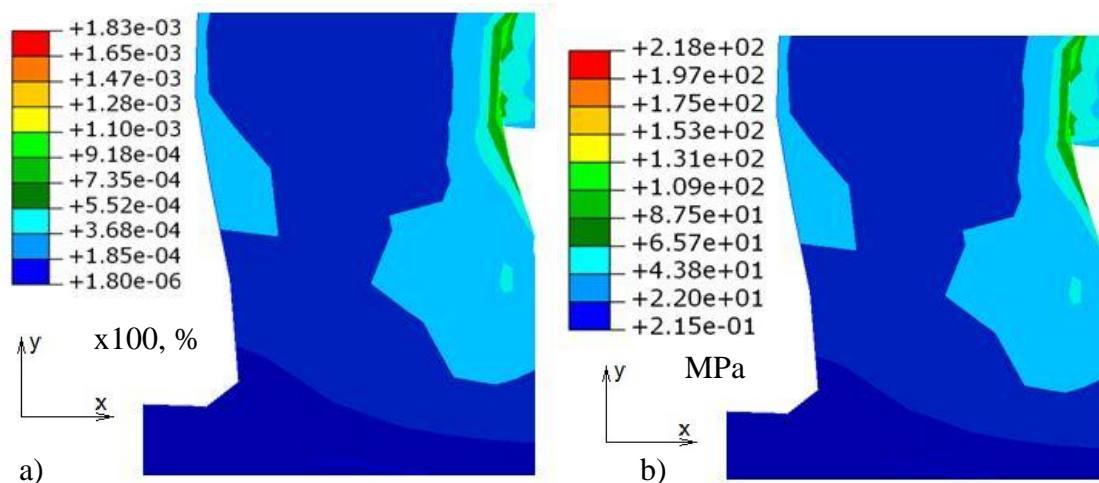
Slika 7.7. Vrednosti Mizesovih deformacija (a) i napona (b) za merno mesto 1

Polje pomeranja u Y pravcu za merno mesto 2 je prikazano na slici 7.8 za slučaj opterećenja aksijalnom silom od 30 kN. Na slici 7.8 je na ordinati prikazana skala pomeranja u mm. Najveće vrednosti pomeranja se javljaju na prirubnici i iznose oko 0,35 mm.



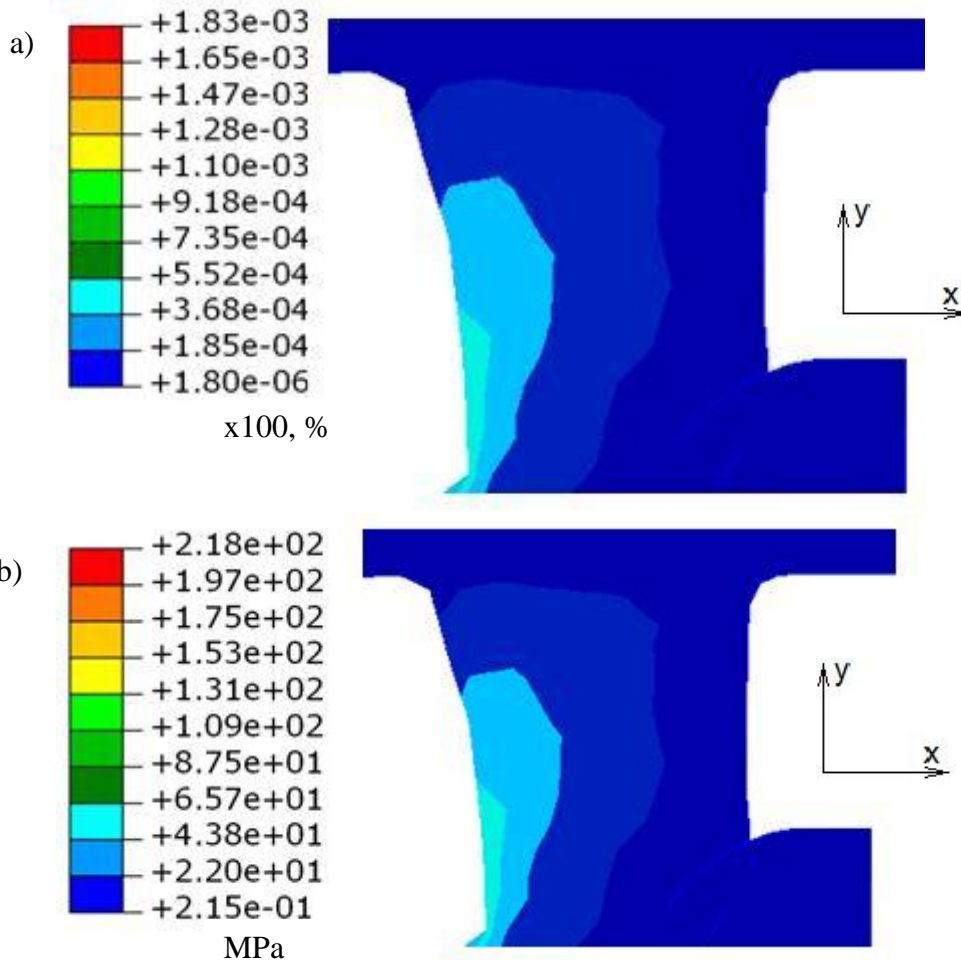
Slika 7.8. Polje pomeranja u Y pravcu mernog mesta 2 opterećenog aksijalnom silom od 30 kN

Polje Mizesovih deformacija i napona za merno mesto 3 je prikazano na slici 7.9 za slučaj opterećenja maksimalnom silom od 30kN. Vrednosti prikazane na ordinate slike 7.9a treba pomnožiti koeficijentom 100 kako bi se dobile procentualne vrednosti. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija iznose oko 0,05 %. Na slici 7.9b je na ordinati prikazana skala Mizesovih napona u MPa. Najveće vrednosti Mizesovih napona i iznose oko 50 MPa.



Slika 7.9. Vrednosti Mizesovih deformacija (a) i napona (b) za merno mesto 3

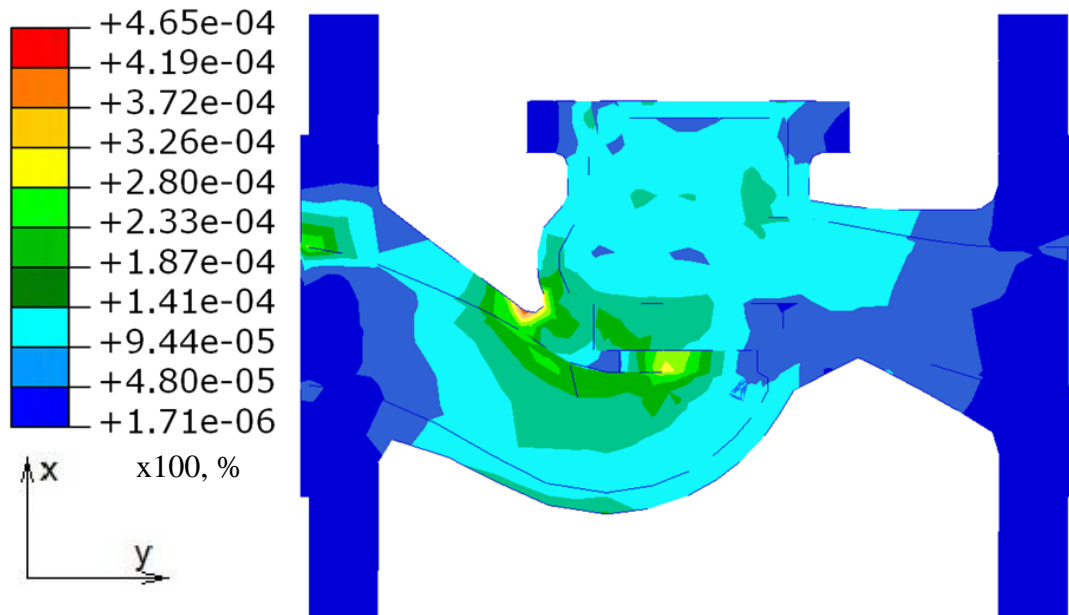
Polje Mizesovih deformacija i napona za merno mesto 4 je prikazano na slici 7.10 za slučaj opterećenja maksimalnom silom od 30kN. Vrednosti prikazane na ordinate slike 7.10a treba pomnožiti koeficijentom 100 kako bi se dobile procentualne vrednosti. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija iznose oko 0,05 %. Na slici 7.10b je prikazana skala Mizesovih napona u MPa. Najveće vrednosti Mizesovih napona i iznose oko 50 MPa.



Slika 7.10. Vrednosti Mizesovih deformacija (a) i napona (b) za merno mesto 4

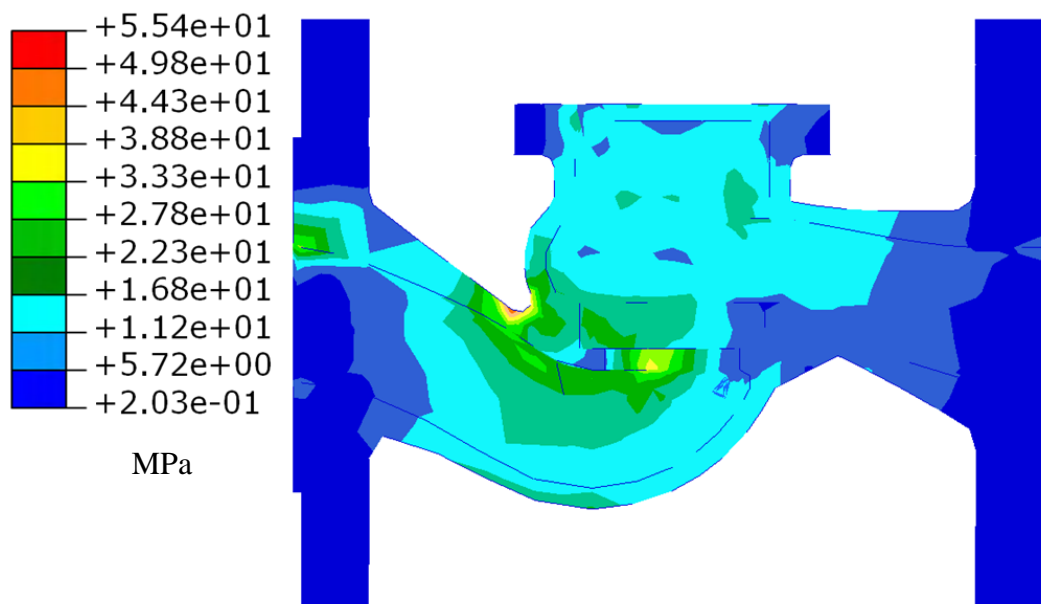
7.2. Opterećenje unutrašnjim pritiskom

Celo polje Mizesovih deformacija kućišta ventila je prikazano na slici 7.11 za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 30 bar. Vrednosti prikazane na ordinate slike 7.11 treba pomnožiti koeficijentom 100 kako bi se dobile procentualne vrednosti. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju na mestu najvećih geometrijskih diskontinuiteta i iznose oko 0,045 %. Udaljavanjem od ojačanja (u x pravcu), smanjuje se i geometrijski diskontinuitet, pa samim tim i vrednost deformacija kontinualno opada.



Slika 7.11. Polje deformacija kućišta ventila opterećenog unutrašnjim pritiskom od 30 bar

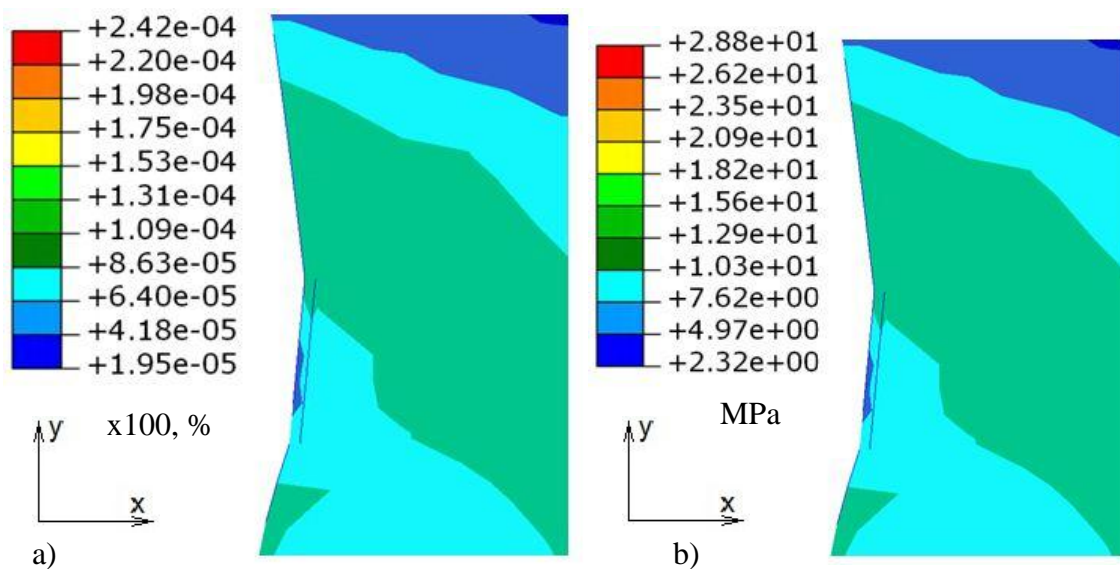
Celo polje Mizesovih napona kućišta ventila je prikazano na slici 7.12 za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 30 bar. Na slici 7.12 je na ordinati prikazana skala Mizesovih napona u MPa. Najveće vrednosti Mizesovih napona se javljaju na mestu najvećih geometrijskih diskontinuiteta i iznose oko 55 MPa.



Slika 7.12. Polje napona kućišta ventila opterećenog unutrašnjim pritiskom od 30 bar

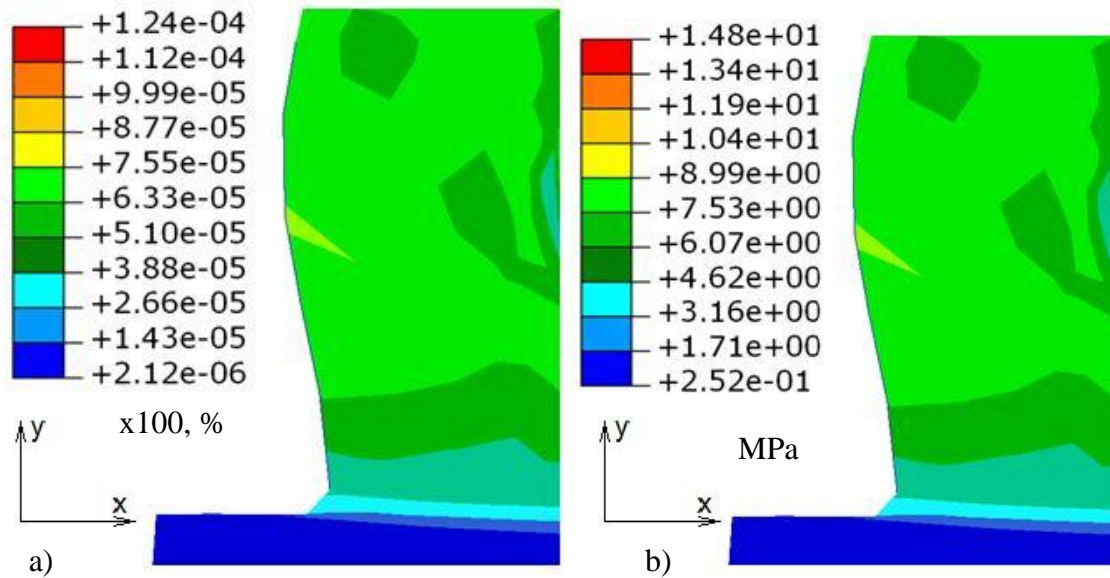
U ovo delu poglavlja su prikazani i rezultati Mizesovih deformacija i napona za merna mesta 1 i 3 koja su definisana u poglavlju 4.

Polje Mizesovih deformacija i napona za merno mesto 1 je prikazano na slici 7.13 za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 30 bar. Vrednosti prikazane na ordinate slike 7.13a treba pomnožiti koeficijentom 100 kako bi se dobile procentualne vrednosti. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija se javljaju u zoni najvećih geometrijskih diskontinuiteta, odnosno na spoju sfere i cilindra i iznose oko 0,013 %. Udaljavanjem od ojačanja (u x pravcu), smanjuje se i geometrijski diskontinuitet, pa se samim tim i vrednost deformacija kontinualno opada. Na slici 7.13b je na ordinati prikazana skala Mizesovih napona u MPa. Najveće vrednosti Mizesovih napona se javljaju na mestu najvećih geometrijskih diskontinuiteta i iznose oko 15 MPa.



Slika 7.13. Vrednosti Mizesovih deformacija (a) i napona (b) za merno mesto 1

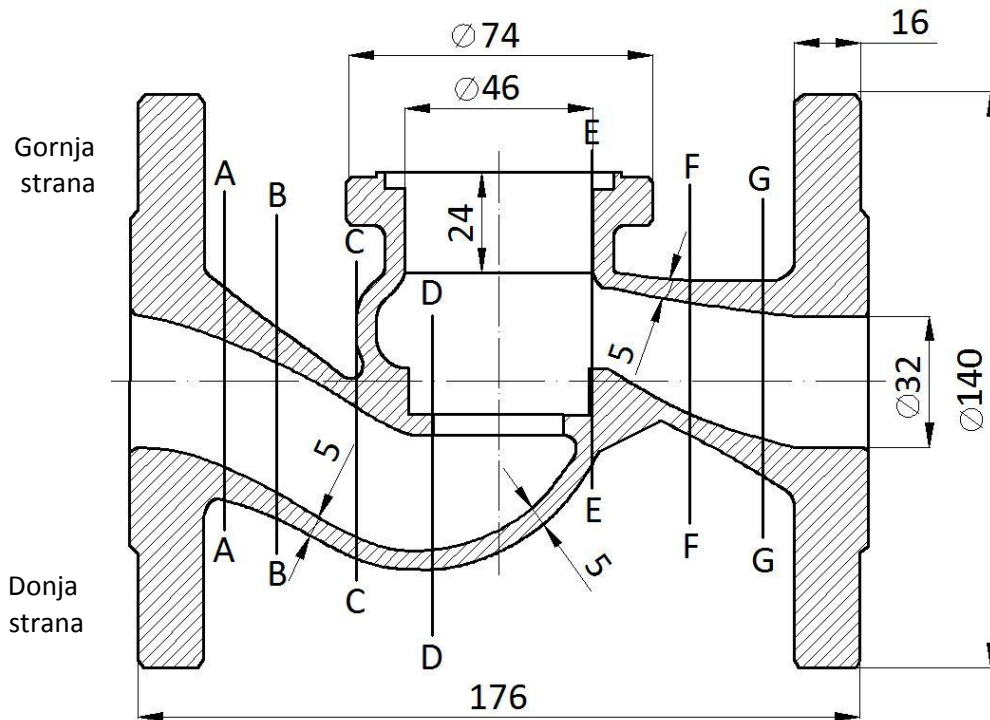
Polje Mizesovih deformacija i napona za merno mesto 3 je prikazano na slici 7.14 za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 30 bar. Vrednosti prikazane na ordinate slike 7.14a treba pomnožiti koeficijentom 100 kako bi se dobile procentualne vrednosti. Najveće vrednosti Mizesovih deformacija iznose oko 0,007 %. Na slici 7.14b je na ordinati prikazana skala Mizesovih napona u MPa. Najveće vrednosti Mizesovih napona iznose oko 8 MPa.



Slika 7.14. Vrednosti Mizesovih deformacija (a) i napona (b) za merno mesto 3

7.3. Poređenje eksperimentalnih, numeričkih i analitičkih rezultata

Teorijska analiza čvrstoće kućišta ravnog zapornog ventila je sprovedena korišćenjem procedure definisane u standardu SRPS EN 12516. Standardizovana procedura uzima u obzir opterećenje kućišta ventila unutrašnjim pritiskom. U okviru standardne procedure se određuje debljina zida kućišta na karakterističnim presecima (A-A, B-B, C-C itd.) kao što je prikazano na slici 7.15. Rezultati teorijske analize su prikazani u poglavlju 2.



Slika 7.15. Položaj karakterističnih preseka kućišta ventila

Na numeričkom modelu je urađena analiza za svaki od karakterističnih preseka korišćenih u teorijskoj analizi. U tabeli 7.1 su prikazani rezultati najvećih vrednosti Mizesovih napona i deformacija za slučaj opterećenja ventila unutrašnjim pritiskom od 30 bar. Vrednosti napona i deformacija su prikazani za gornju i donju stranu preseka kućišta.

Tabela 7.1. Rezultati numeričke analize kućišta opterećenog unutrašnjim pritiskom od 30 bar

presek	Mizesov napon, MPa		Mizesova deformacija, %	
	gore	dole	gore	dole
A-A	11,10	11,00	1.41E-02	9.44E-03
B-B	16,80	16,10	1.45E-02	1.4E-02
C-C	49,80	22,30	4.19E-02	2.33E-02
D-D	5,72	22,30	9.54E-03	1.87E-02
E-E	16,80	11,20	1.41E-02	9.44E-03
F-F	16,40	11,20	1.38E-02	9.40E-03
G-G	5,72	4,19	9.43E-03	4.26E-03

7.3.1. Pomeranje u Y pravcu usled kombinovanog opterećenja

U okviru eksperimentalne analize su određene vrednosti pomeranja u Y pravcu prilikom opterećivanja kućišta aksijalnom silom. Merno mesto 2, koje obuhvata prirubnicu 1 (slika 4.9), je izabrano kao mesto gde je moguće najpreciznije odrediti pomeranje u Y pravcu. U okviru numeričke analize je određeno pomeranje u Y pravcu na mernom mestu 2 (prirubnici 1) za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom, aksijalnom silom i kombinovanim opterećenjem prethodna dva.

Za slučaj opterećenja kućišta ventila unutrašnjim pritiskom od 30 bar, pomeranje na mernom mestu 2 (prirubnici 1) iznosi -0,003 mm (širenje). Za slučaj opterećenja kućišta aksijalnom silom od 30 kN, pomeranje na mernom mestu 2 (prirubnici 1) iznosi +0.373mm (sabijanje kućišta).

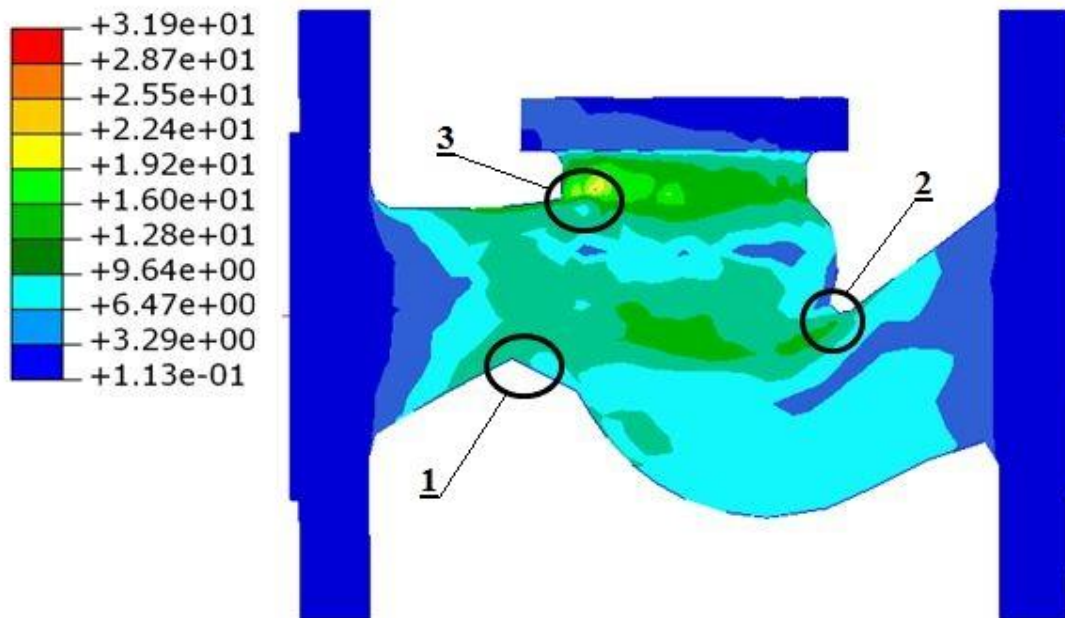
Kada je ventil opterećen kombinovanim opterećenjem, unutrašnjim pritiskom od 30 bar i aksijalnom silom od 30 kN, pomeranje prirubnice 1 u Y pravcu iznosi +0.370mm. Pomeranja u Y pravcu za unutrašnji pritisak i aksijalno sabijanje su suprotnog smera i po potrebi se mogu sabirati, kako bi se dobilo rezultujuće pomeranje za kombinovano opterećenje.

7.3.2. Faktori koncentracije napona

Za mesta sa najvećim geometrijskim diskontinuitetima, odnosno najvećim vrednostima napona, su definisani faktori koncentracije napona. Faktori koncentracije napona su određeni za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom i aksijalnom silom. Faktor koncentracije napona je definisan kao odnos maksimalne vrednosti Mizesovog napona na izabranom mestu i vrednosti nominalnog Mizesovog napona na mestu pravilne geometrije (mesto sa najmanjom raspodelom napona).

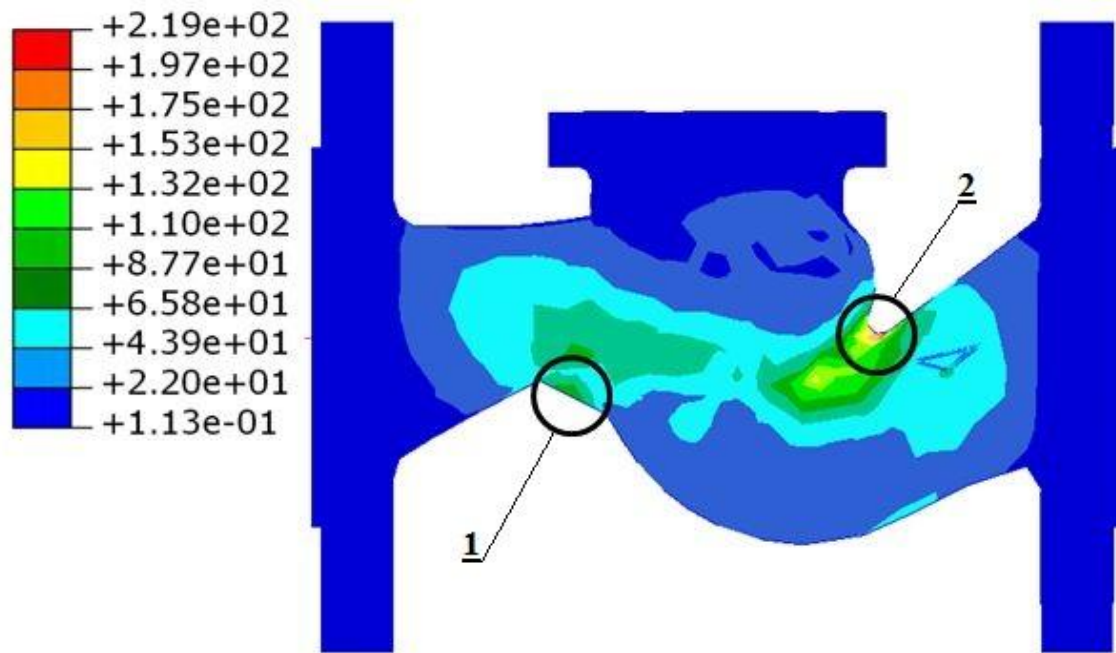
Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom, faktori koncentracije napona (FKNUP) su određeni na pozicijama tri geometrijska diskontinuiteta. Pozicije geometrijskih

diskontinuiteta (1, 2 i 3) su prikazani na slici 7.16. Na pozicijama 1 i 2 FKNUP iznosi 1,7, dok na poziciji 3 FKNUP iznosi 2,64.



Slika 7.16. Položaj mesta za određivanje faktora koncentracije napona za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom

Za slučaj opterećenja aksijalnom silom, faktori koncentracije napona (FKNA) su određeni na mestu dva geometrijska diskontinuiteta. Tačna mesta geometrijskih diskontinuiteta (1 i 2) su prikazani na slici 7.17. Na mestu 1 FKNA iznosi 2,51, dok na mestu 2 FKNA iznosi 3,3.



Slika 7.17. Položaj mesta za određivanje faktora koncentracije napona za slučaj opterećenja aksijalnom silom

7.3.3. Faktori koncentracije deformacija

Za mesto spoja sfere i cilindra, odnosno za poziciju 1 na slici 7.16, definisani su faktori koncentracije deformacija (FKD). Faktor koncentracije deformacija je određen za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom i aksijalnom silom. Faktor koncentracije napona je definisan kao odnos maksimalne vrednosti Mizesove deformacije na izabranom mestu i vrednosti nominalne Mizesove deformacije na mestu pravilne geometrije (mesto sa najmanjom raspodelom deformacija). Faktori koncentracije deformacija su definisani korišćenjem eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih metodom konačnih elemenata.

Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom, faktor koncentracije deformacija (FKDUP) određen korišćenjem eksperimentalnih rezultata iznosi 1.79, dok FKDUP određen korišćenjem rezultata dobijenih metodom konačnih elemenata iznosi 1.65. Procentualno odstupanje FKDUP iznosi 8.5 %.

Za slučaj opterećenja aksijalnom silom, faktor koncentracije deformacija (FKDA) određen korišćenjem eksperimentalnih rezultata iznosi 2.62, dok FKDA određen korišćenjem rezultata dobijenih metodom konačnih elemenata iznosi 2.49. Procentualno odstupanje FKDA iznosi 5.2 %.

7.3.4. Poređenje numeričkih i eksperimentalnih rezultata

Radi verifikacije numeričkog modela, izvršeno je poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata. U Tabeli 7.2 je predstavljen uporedni prikaz rezultata dobijenih metodom konačnih elemenata i sistema za optičko merenje pomeranja i deformacija, kao i procentualna odstupanja rezultata. Eksperimentalna ispitivanja, prikazana u tabeli 7.2, su izvršena na ventilu 3, pri čemu su prikazani rezultati koji su karakteristični za svako od mernih mesta. Vrednosti pomeranja u Y pravcu i Mizesovih deformacija su prikazane za iste tačke na numeričkom i eksperimentalnom modelu.

Tabela 7.2. Uporedni prikaz rezultata numeričke i eksperimentalne analize

	Metoda konačnih elemenata		Sistem za optičko merenje pomeranja i deformacija		Procentualna razlika	
	Pomeranje u Y pravcu, [mm]	Mizesova defomacija, [%]	Pomeranje u Y pravcu, [mm]	Mizesova defomacija, [%]	Pomeranje u Y pravcu	Mizesova defomacija
Merno mesto 1	0,241	0,105	0,298	0,14	19,1 %	25 %
Merno mesto 2	0,280	/	0,330	/	15,1 %	/
Merno mesto 3	/	0,05	/	0,07	/	28,6 %
Merno mesto 4	/	0,05	/	0,07	/	28,6 %

7.3.5. Poređenje numeričkih i analitičkih rezultata

Analitički proračun debljine zida kućišta ventila korišćenjem standarda je sproveden za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom. Korišćenjem analitičkih obrazaca je moguće odrediti vrednost napona za usvojenu debljinu zida kućišta za izabrani poprečni presek i uporediti sa rezultatima dobijenim metodom konačnih elemenata.

Analitički proračun je pokazao da je najveća debljina zida kućišta potrebna na poprečnom preseku E-E. Kako je deo poprečnog preseka E-E oblika sfere, korišćenjem analitičkih obrazaca je određena vrednost napona, za usvojenu debljinu zida kućišta, koja iznosi 6 MPa. Poređenjem sa vrednošću napona dobijenog metodom konačnih elemenata, koja iznosi 5,72 MPa, procentualna odstupanja iznose 4,9 %.

Poređenje analitičkih i numeričkih rezultata je izvršeno i za sferni deo kućišta ventila. Korišćenjem analitičkih obrazaca je određena vrednost napona na sferi, za usvojenu debljinu zida kućišta, koja iznosi 25.8 MPa. Poređenjem sa vrednošću napona dobijenog metodom konačnih elemenata, koja iznosi 23 MPa, procentualna odstupanja iznose 12,2 %.

POGLAVLJE 8

DISKUSIJA REZULTATA

Dosadašnja istraživanja u oblasti opreme pod pritiskom, odnosno merenja i određivanja napona i deformacija struktura kompleksne geometrije su se oslanjala na analitičke proračune najčešće bazirane na teoriji ljuski, numeričke proračune upotrebom računarskih softvera i konvencionalne eksperimentalne metode. Kao jedan od najčešćih zaključaka u svojim radovima, istraživači su naveli nepostojanje adekvatnih eksperimentalnih rezultata u postojećoj literaturi, odnosno iskazali potrebu za detaljnom eksperimentalnom analizom kritičnih mesta za koje nije moguće precizno odrediti veličine pomeranja, deformacija ili napona upotrebom analitičkih obrazaca ili numeričkih modela.

Ograničenja korišćenih eksperimentalnih metoda su se ogledala u više aspekata. Prvo, za analizu geometrijskih diskontinuiteta, najčešće su korišćene standardizovane epruvete sa pripremljenim diskontinuitetima i ispitivane na istezanje. Na osnovu dobijenih rezultata su pravljene dijagrami sa faktorima koncentracije napona, koji su kasnije primenjivani na probleme geometrijski kompleksnih struktura. Ovakav pristup je davao samo okvirna rešenja, koja nisu bila dovoljno precizna i tačna. Drugo, eksperimenti su sprovedeni konvencionalnim metodama. Ograničenje konvencionalnih metoda je lokalno merenje, odnosno dobijanje vrednosti merenih veličina samo u jednoj tački. Treće, merenja su vršena samo u blizini geometrijskih diskontinuiteta, a ne na samim spojevima, tako da nije bilo moguće merenje najvećih vrednosti deformacija.

Jedan od ciljeva ove teze je upravo taj da prevaziđe navedene eksperimentalne probleme, odnosno da pokaže da je moguće primeniti relativno novu metodu digitalne korelacije slika na slučajeve ispitivanja struktura kompleksne geometrije u oblasti cevovodne armature. Metoda korelacije digitalnih slika, prevazilazi ograničenja metode mernih traka i omogućava merenje celih polja pomeranja i deformacija. Jednim

eksperimentalnim merenjem se dobija velika količina podataka koja zamenjuje više desetina/stotina mernih traka i značajno smanjuje vreme pripreme eksperimenta, a samim tim i troškove. S druge strane, kako se metodom konačnih elemenata dobija kompletno polje pomeranja i deformacija, sama verifikacija se mnogo jednostavnije sprovodi poređenjem sa rezultatima koji su predstavljeni na isti način. Eksperimentalno merenje celih polja deformacija omogućuje precizno određivanje mesta kritičnih, odnosno najvećih deformacija, kao i pravce glavnih deformacija koje omogućava bolju teorijsku analizu kompleksnih struktura.

Soden i grupa autora su u svom radu [16] prikazali rezultate eksperimentalne i numeričke analize raspodele deformacija na sfernoj posudi od fiberglasa sa radijalno postavljenim priključkom. Eksperiment je izvršen korišćenjem mernih traka, postavljenih na spoljašnjoj i unutrašnjoj površini posude u uzdužnom i obodnom pravcu. Posuda je opterećena unutrašnjim pritiskom. Analitička analiza je sprovedena pod istim uslovima kao i eksperimentalna analiza, radi poređenja rezultata, pri čemu su vrednosti unutrašnjeg pritiska izabrane tako da materijal posude bude u zoni elastičnosti. Eksperimentalni rezultati, kao i rezultati dobijeni metodom konačnih elemenata su dati na slici 1.15, gde je prikazana raspodela uzdužnih i obodnih deformacija za posudu bez ojačanja opterećenu unutrašnjim pritiskom od 83 kPa. Kao što se vidi sa slike 1.15, najveće vrednosti deformacija se javljaju na spoju sfera/priključak. Poredeći raspored najvećih deformacija sa eksperimentalnim rezultatima na kućištu ventila dobijenim u okviru disertacije, odnosno na spoju sfera/cilindar kućišta, rezultati u radu [16] pokazuju isti trend porasta deformacija na mestu geometrijskog diskontinuiteta.

Raspodela deformacija u radu [16], dobijena analitičkim putem se dobro slaže sa eksperimentalnim rezultatima, osim za oblast spoja sfere i priključka. Na slici 1.15 se može primetiti da eksperimentalni rezultati u oblasti spoja sfera/cilindar imaju veće vrednosti u odnosu na numeričke rezultate u istoj oblasti. Takođe, potrebno je naglasiti da su eksperimentalni rezultati u radu [16] lokalnog karaktera, odnosno prikazuju vrednosti deformacija u jednoj tački, za razliku od sistema za optičko merenje deformacija koje prikazuje celo polje deformacija.

Kućište ravnog zapornog ventila je izrađeno od sivog liva. Livena gvožđa su legure železa sadržajem ugljenika većim od 2,1 % [83]. Sivo liveno gvožđe se obrazuje kada količina ugljenika u leguri pređe vrednost koja se može rastvoriti u austenitu. Mehanička svojstva sivog livenog gvožđa zavise od strukture metalne osnove, kao i od vrste, rasporeda i količine grafita. Što je manje grafita, što su grafitne lamele sitnije i u većem stepenu izolovane, to su bolja mehanička svojstva. Grafitne lamele se ponašaju kao tanke prsline u strukturi sivog liva, sa oštrim krajevima koji predstavljaju izvor koncentracije napona pri zatezanju, zbog čega sivi liv ima malu zateznu čvrstoću i žilavost, a izduženje od samo 1 % i manje. Materijal kućišta ravnog zapornog ventila je GG25 (EN GJL-250), čije se izduženje u trenutku loma nalazi u granicama od 0,3 do 0,8 %. Imajući na umu prethodno navedene karakteristike materijala kućišta ventila, očekivane su male vrednosti deformacija prilikom eksperimentalnih merenja. Eksperimentom je pokazano da su najveće deformacije koje su izmerene na kućištu oko 0,22 %, što se slaže sa početnim pretpostavkama vezanim za materijale.

Diskusija eksperimentalnih rezultata doktorske disertacije

U okviru disertacije je urađena eksperimentalna analiza kućišta ventila opterećenog aksijalnom silom i unutrašnjim pritiskom. Eksperiment je sproveden na tri ventila istih dimenzija i radnih parametara. Za slučaj opterećenja aksijalnom silom, eksperimentalno merenje je sprovedeno na četiri merna mesta (MM1, MM2, MM3 i MM4), kao što je to definisano u poglavlju 5 (slike 5.9 i 5.10). Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom, eksperimentalno merenje je sprovedeno na dva merna mesta (MM1 i MM2), kao što je to definisano u poglavlju 5 (slike 5.9 i 5.10).

Merno mesto 1 se nalazi na mestu spoja sfere i cilindra. Za MM1 opterećeno aksijalnom silom su prikazani rezultati pomeranja u Y pravcu i Mizesovih deformacija. Svaki ventil je analiziran sa 4 linijska preseka za slučaj opterećenja aksijalnom silom, odnosno 3 linijska preseka za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom. U poglavlju 6 su prikazani rezultati sa jednog reprezentativnog uzorka. Polje pomeranja u Y pravcu (slika 6.2) na sva tri ispitivana ventila pokazuje istu prostornu raspodelu najvećih i najmanjih

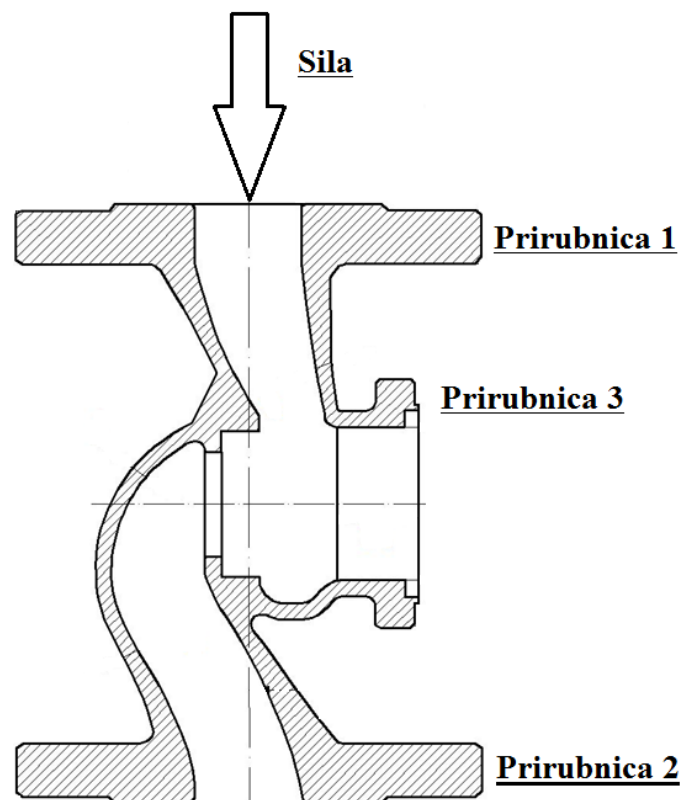
pomeranja, s tim da se vrednosti najvećih pomerenja razlikuju. Vrednosti pomerenja u Y pravcu se za sva tri ventila nalaze u oblasti ispod prirubnice 1 i u granicama su od 0,3 do 0,5 mm. Razlike u vrednostima pomerenja se objašnjavaju činjenicom da mehaničke karakteristike materijala od kojih su napravljeni ventili nisu identične. Sa dijagrama 6.3 se vidi da se sa udaljavanjem od ojačanja, smanjuju i vrednosti pomerenja. Kućište ventila uz prirubnicu 1 i 2 nije simetrično, kao i kućište ventila uz prirubnicu 3 s jedne i sfernog dela sa druge strane (slika 8.1). Geometrijska asimetričnost kućišta je razlog smanjenja vrednosti pomerenja sa udaljavanjem od ojačanja, odnosno objašnjenje za najmanje vrednosti pomerenja na spoju sfera/cilindar.

Polje Mizesovih deformacija (slika 6.5) na sva tri ispitivana ventila opterećena aksijalnom silom i unutrašnjim pritiskom pokazuje istu prostornu raspodelu najvećih i najmanjih deformacija, s tim da se vrednosti najvećih Mizesovih deformacija razlikuju. Maksimalne vrednosti deformacija se nalaze na spoju sfera/cilindar. Za slučaj opterećenja aksijalnom silom vrednosti Mizesovih deformacija su u granicama su od 0,15 do 0,22 %. Vrednosti maksimalnih Mizesovih deformacija na ventilima 1 i 2 su u granicama od 0,21 do 0,22 %, dok je na ventilu 3 maksimalna vrednost Mizesovih deformacija oko 0,15 %. Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom vrednosti Mizesovih deformacija su do 0,105 %. Vrednosti maksimalnih Mizesovih deformacija na ventilima 1 i 2 su u granicama od 0,08 do 0,10 %, dok je na ventilu 3 maksimalna vrednost Mizesovih deformacija oko 0,05 %. Razlika u vrednostima maksimalnih deformacija na ventilima 1 i 2 i na ventilu 3 nastaje zbog razlika u mehaničkim karakteristikama materijala kućišta ventila, odnosno iako su kućišta od istog materijala, proizvedena su u različitim serijama, što i dovodi do odstupanja rezultata u eksperimentalnim merenjima.

Na slici 6.6 je prikazan dijagram Mizesovih deformacija za svaki od preseka na maksimalnom opterećenju aksijalnom silom. Maksimalne vrednosti deformacija se nalaze na spoju sfere i cilindra. Na presecima se te oblasti nalaze na udaljenosti od 45 mm od nulte tačke preseka. Levo od maksimalnih vrednosti su prikazane deformacije na cilindru, a sa desne strane su vrednosti deformacija na sferi. Sa dijagrama se vidi da su vrednosti deformacija na cilindru veće nego vrednosti deformacija na sferi. Mnogi

autori su se bavili problematikom vezanom za spoj sfere i cilindra i u svojim radovima [6, 7, 11] su prikazali rezultate koji eksperimentalna istraživanja u ovoj disertaciji potvrđuju.

Merno mesto 2 (MM2) su dve prirubnice – 1 i 3. Za merno mesto 2 su merene vrednosti pomeranja gornje prirubnice u Y pravcu i ugaonog pomeranja ravni dve prirubnice, a u poglavlju 6 su prikazani rezultati sa jednog uzorka. Svaki ventil je analiziran sa tri tačke i jednim ugaonim primitivom. Ugaoni primitiv pokazuje ugao koji zaklapaju dve ravni koje su paralelne prirubnicama 1 i 3 (slika 6.16). Tačke 1 i 2 su postavljene na prirubnicu 1, dok je tačka 3 postavljena na prirubnicu 3. Iako se nalaze na istoj prirubnici, pomeranje u Y pravcu se razlikuje kod tačaka 1 i 2. Do razlike u pomeranjima u Y pravcu dolazi usled asimetričnosti kućišta ventila u pravcu delovanja aksijalne sile na delu kod prirubnice 3 i sfernog dela kućišta (slika 8.1).



Slika 8.1. Presek kućišta ventila po ravni simetrije

Merno mesto 3 (MM3) se nalazi uz prirubnicu 2 i, kao i merno mesto 1, obuhvata i spoj sfere i cilindra, ali je za razliku od MM1, geometrijski diskontinuitet manji, odnosno blaži je prelaz sa sfere na cilindar. Za MM3 opterećeno aksijalnom silom su prikazani rezultati pomeranja u Y pravcu i Mizesovih deformacija, dok su za opterećenje unutrašnjim pritiskom prikazani rezultati Mizesovih deformacija. Svaki ventil je analiziran sa 3 linijska preseka, a u poglavlju 6 su prikazani rezultati sa jednog reprezentativnog uzorka. Polje pomeranja u Y pravcu (slika 6.20) na sva tri ispitivana ventila pokazuje istu prostornu raspodelu najvećih i najmanjih pomeranja, s tim da se vrednosti najvećih pomeranja razlikuju. Vrednosti pomeranja u Y pravcu se za sva tri ventila nalaze na sfernom delu kućišta i u granicama su od 0,27 do 0,32 mm. Razlike u vrednostima pomeranja se objašnjavaju činjenicom da mehaničke karakteristike materijala od kojih su napravljeni ventili nisu identične. Sa dijagrama 6.21 se vidi da se sa udaljavanjem od ravni simetrije, smanjuju i vrednosti pomeranja. Kućište ventila uz prirubnicu 1 i 2 nije simetrično, kao i kućište ventila uz prirubnicu 3 s jedne i sfernog dela sa druge strane (slika 8.1). Geometrijska asimetričnost kućišta je razlog smanjenja vrednosti pomeranja sa udaljavanjem od ravni simetrije, odnosno objašnjenje za najmanje vrednosti pomeranja na bočnoj strani ventila.

Polje Mizesovih deformacija (slika 6.23) na sva tri ispitivana ventila opterećena aksijalnom silom i unutrašnjim pritiskom pokazuje istu prostornu raspodelu najvećih i najmanjih deformacija, s tim da se vrednosti najvećih Mizesovih deformacija razlikuju. Maksimalne vrednosti deformacija se nalaze na spoju sfera/cilindar. Za slučaj opterećenja aksijalnom silom vrednosti Mizesovih deformacija su u granicama su od 0,10 do 0,15 %. Vrednosti maksimalnih Mizesovih deformacija na ventilima 1 i 2 su u granicama od 0,13 do 0,15 %, dok je na ventilu 3 maksimalna vrednost Mizesovih deformacija oko 0,10 %. Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom vrednosti Mizesovih deformacija su u granicama su od 0,08 do 0,12 %. Vrednosti maksimalnih Mizesovih deformacija na ventilima 1 i 2 su u granicama od 0,10 do 0,12 %, dok je na ventilu 3 maksimalna vrednost Mizesovih deformacija oko 0,08 %. Razlika u vrednostima maksimalnih deformacija na ventilima 1 i 2 i na ventilu 3 nastaje zbog razlika u mehaničkim karakteristikama materijala kućišta ventila, odnosno iako su kućišta od istog materijala, proizvedena su u različitim serijama, što i dovodi do odstupanja rezultata u eksperimentalnim merenjima.

Merno mesto 4 (MM4) se nalazi između prirubnica 1 i 3. Za MM4 su prikazani rezultati pomeranja u Y pravcu i Mizesovih deformacija. Svaki ventil je analiziran sa 3 linijska preseka, a u poglavlju 6 su prikazani rezultati sa jednog reprezentativnog uzorka. Polje pomeranja u Y pravcu (slika 6.28) na sva tri ispitivana ventila pokazuje istu prostornu raspodelu najvećih i najmanjih pomeranja, s tim da se vrednosti najvećih pomeranja razlikuju. Vrednosti pomeranja u Y pravcu se za sva tri ventila su u granicama od 0,2 do 0,3 mm. Razlike u vrednostima pomeranja se objašnjavaju činjenicom da mehaničke karakteristike materijala od kojih su napravljeni ventili nisu identične.

Polje Mizesovih deformacija (slika 6.30) na sva tri ispitivana ventila opterećena aksijalnom silom pokazuje istu prostornu raspodelu najvećih i najmanjih deformacija, s tim da se vrednosti najvećih Mizesovih deformacija razlikuju. Maksimalne vrednosti deformacija se nalaze u oblasti uz prirubnicu 1. Za slučaj opterećenja aksijalnom silom vrednosti Mizesovih deformacija su u granicama su od 0,08 do 0,12 %. Vrednosti maksimalnih Mizesovih deformacija na ventilima 1 i 2 su u granicama od 0,09 do 0,12 %, dok je na ventilu 3 maksimalna vrednost Mizesovih deformacija oko 0,08 %. Razlika u vrednostima maksimalnih deformacija na ventilima 1 i 2 i na ventilu 3 nastaje zbog razlika u mehaničkim karakteristikama materijala kućišta ventila, odnosno iako su kućišta od istog materijala, proizvedena su u različitim serijama, što i dovodi do odstupanja rezultata u eksperimentalnim merenjima.

U cilju opisivanja eksperimentalnih rezultata izmerenih na mernom mestu 1, izvršena je matematička analiza regresionih modela za svaki od karakterističnih preseka. Analiza je sprovedena za slučaj opterećenja aksijalnom silom i unutrašnjim pritiskom.

Matematički model promene Mizesovih deformacija po dužini istog preseka na sva tri kućišta ventila najbolje opisuje polinomna funkcija definisana u poglavlju 6, pri čemu su vrednosti parametara funkcije prikazani u tabelama 6.2, 6.3, 6.8 i 6.9. Procena parametara polinomne funkcije je urađena korišćenjem metode najmanjih kvadrata, odnosno korišćenjem Levenberg-Marquardt algoritma. Kvalitet izabrane funkcije je analiziran korišćenjem srednje procentualne greške (MPE), korena srednje kvadratne greške (RMSE) i hi kvadrata.

Za matematički model, za slučaj opterećenja aksijalnom silom, vrednosti srednje procentualne greške su u opsegu od $1,642E-03$ do $7,329E-03$, vrednosti korena srednje kvadratne greške su u granicama od $1,706E-02$ do $9,996E-02$, dok su vrednosti hi kvadrata u granicama $5.370E-04$ do $1.080E-03$. Manje vrednosti srednjih procentualnih grešaka, korena srednjih kvadratnih grešaka i hi kvadrata se javljaju za drugu funkcionalnu zavisnost, odnosno za dužinu preseka od 20 mm sa jedne i druge strane spoja. Manje vrednosti grešaka se javljaju zbog činjenice da druga funkcionalna zavisnost ne uzima u obzir uticaj prelaza sa cilindričnog dela na prirubnicu 1, već samo spoj i oblast neposredno uz spoj. Svi parametri procene polinomne funkcije su zadovoljavajućih vrednosti.

Za matematički model, za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom, vrednosti srednje procentualne greške su u opsegu od $-1.321E-06$ do $7.509E-04$, vrednosti korena srednje kvadratne greške u granicama od $1.398E-05$ do $1.010E-02$ dok su vrednosti hi kvadrata u granicama od $1.232E-04$ do $5.410E-04$. Manje vrednosti srednjih procentualnih grešaka, korena srednjih kvadratnih grešaka i hi kvadrata se javljaju za drugu funkcionalnu zavisnost, odnosno za dužinu preseka od 20 mm sa jedne i druge strane spoja. Manje vrednosti grešaka se javljaju zbog činjenice da druga funkcionalna zavisnost ne uzima u obzir uticaj prelaza sa cilindričnog dela na prirubnicu 1, već samo spoj i oblast neposredno uz spoj. Svi parametri procene polinomne funkcije su zadovoljavajućih vrednosti.

Za slučaj opterećenja aksijalnom silom, za merna mesta 1 i 3, određene su jednačine koje opisuju promene pomeranja u Y pravcu ili Mizesovih deformacija u zavisnost od koraka opterećivanja. Kvalitet izabrane funkcije je analiziran korišćenjem koeficijenta determinacije (R^2). Vrednosti koeficijenta determinacije za merno mesto 1 iznose $R^2 = 0.9896$ (pomeranje u Y pravcu) i $R^2 = 0.9656$ (Mizesova deformacija). Vrednosti koeficijenta determinacije za merno mesto 3 iznose $R^2 = 0.986$ (pomeranje u Y pravcu) i $R^2 = 0.8295$ (Mizesova deformacija). Vrednosti koeficijenta determinacije su zadovoljavajuće za sve analizirane slučajeve. Korišćenjem navedenih funkcionalnih zavisnosti (jednačina prave) je pokazano da je ponašanje kućišta ventila opterećenog

aksijalnom silom na sabijanje linearno, odnosno da je linearna zavisnost promene deformacije sa porastom aksijalne sile.

Diskusija numeričkih rezultata

Dobijeni rezultati napona primenom MKE često predstavljaju krajnji podatak u analizi uz predhodnu eksperimentalnu verifikaciju celokupne metode. Veliki problem predstavlja usavršavanje eksperimentalnih metoda za proveru rezultata dobijenih metodom konačnih elemenata. Rešenja dobijena MKE su približna ili aproksimativna rešenja. Zato je potrebno postaviti pitanje njihove tačnosti uzimajući u obzir niz pretpostavki. Pod pojmom tačnosti se podrazumeva odstupanje približnog od tačnog rešenja. Verifikacija numeričkog modela urađena je poređenjem dobijenih vrednosti pomeranja korišćenjem 3D optičke bezkontaktne metode, s obzirom da su vrednosti pomeranja direktno merene.

Metodom konačnih elemenata je analizirano kućište ventila opterećenog aksijalnom silom, unutrašnjim pritiskom i kombinovanim opterećenjem aksijalne sile i unutrašnjeg pritiska. Analiza je sprovedena na numeričkom modelu sastavljenom od tetraedarskih konačnih elemenata. Pretpostavljeno je da se materijal ponaša u granicama elastičnosti što je više nego opravdano jer su naponi od radnih opterećenja ventila ispod napona tečenja u posmatranim zonama. Kroz eksperimentalne analize je i potvrđeno da se materijal u toku opterećenja nalazi u oblasti elastičnosti.

U okviru MKE analize su prikazane vrednosti deformacija i Mizesovih napona za celo kućište ventila, kao i za merna mesta definisana u poglavlju 5. Najveće vrednosti deformacija i napona se javljaju na mestu najvećih geometrijskih diskontinuiteta, na prelazu kućišta između prirubnica 1 i 3. Za slučaj opterećenja aksijalnom silom od 30 kN, vrednosti napona iznose 90 MPa, a deformacija 0,11 %. Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 30 bar, vrednosti napona iznose 55,4 MPa, a deformacija 0,046 %. S obzirom na izuzetno izražen geometrijski prelaz i mali radijus zaobljenja, na porast napona utiču i oblik i dimenzije konačnih elementa koji povećavaju vrednosti u odnosu na očekivane.

Posmatrajući definisana merna mesta, najveće vrednosti napona i deformacija se javljaju na mernom mestu 1, gde se i nalazi geometrijski diskontinuitet spoja sfere i cilindra. Najveće vrednosti napona na mernom mestu 1 za slučaj opterećenja aksijalnom silom iznose oko 90 MPa, odnosno najveće vrednosti deformacija oko 0,11 %. Najveće vrednosti napona na mernom mestu 1 za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom iznose oko 8 MPa, odnosno najveće vrednosti deformacija oko 0,007 %. Vrednosti napona za sva merna mesta na kućištu ventila su manje od vrednosti konvencionalnog napona tečenja materijala sivog liva od kojeg je izrađeno kućište.

U okviru rada je izvršena i analiza pomeranja prirubnice 1 za slučaj opterećenja kombinovanim opterećenjem aksijalne sile i unutrašnjeg pritiska, kao i poređenje sa pojedinačnim slučajevima opterećenja. Za slučaj opterećenja kućišta ventila unutrašnjim pritiskom od 30 bar, pomeranje na mernom mestu 2 (prirubnici 1) iznosi -0,003 mm (kretanje je ka spolja). Za slučaj opterećenja kućišta aksijalnom silom od 30 kN, pomeranje na mernom mestu 2 (prirubnici 1) iznosi +0.373mm (sabijanje kućišta). Kada je ventil opterećen kombinovanim opterećenjem, unutrašnjim pritiskom od 30 bar i aksijalnom silom od 30 kN, pomeranje prirubnice 1 u Y pravcu iznosi +0.370mm. Pomeranja u Y pravcu za unutrašnji pritisak i aksijalno sabijanje su suprotnog smera i po potrebi se mogu sabirati kako bi se dobilo rezultujuće pomeranje za kombinovano opterećenje.

Za mesta sa najvećim geometrijskim diskontinuitetima, odnosno najvećim vrednostima napona, su definisani faktori koncentracije napona. Faktori koncentracije napona su određeni za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom i aksijalnom silom (slike 7.12 i 7.13). Mesta najvećih vrednosti faktora koncentracije napona za različita opterećenja se razlikuju. Najveće vrednosti faktora koncentracije napona za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom je na poziciji 3, i iznosi 2,64, dok je za slučaj opterećenja aksijalnom silom najveća vrednost na poziciji 2 i iznosi 3.3. Mesta najvećih vrednosti faktora koncentracije napona se razlikuju zbog vrste i načina delovanja opterećenja.

Za mesto spoja sfere i cilindra, odnosno za poziciju 1 (slika 7.16), su definisani faktori koncentracije deformacija. Faktori koncentracije napona su određeni za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom i aksijalnom silom korišćenjem eksperimentalnih i numeričkih rezultata. Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom, faktor koncentracije deformacija (FKDUP) određen korišćenjem eksperimentalnih rezultata iznosi 1.79, dok FKDUP određen korišćenjem rezultata dobijenih metodom konačnih elemenata iznosi 1.65. Procentualno odstupanje FKDUP iznosi 8.5 %. Za slučaj opterećenja aksijalnom silom, faktor koncentracije deformacija (FKDA) određen korišćenjem eksperimentalnih rezultata iznosi 2.62, dok FKDA određen korišćenjem rezultata dobijenih metodom konačnih elemenata iznosi 2.49. Procentualno odstupanje FKDA iznosi 5.2 %. Faktori koncentracije deformacija pokazuju dobro poklapanje eksperimentalnih i numeričkih rezultata – razlike su ispod 10 % za obe vrste opterećenja.

Korišćenjem analitičkih obrazaca (za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom) su proračunati naponi na karakterističnim mestima na kućištu ventila – na sfernom delu kućišta i na poprečnom preseku E-E, na kome je izračunata najveća potrebna debljina zida. Izračunate vrednosti napona su poređene sa metodom konačnih elemenata. Procentualna odstupanja za navedena karakteristična mesta iznose 12,2 i 4,9 %. Dobra poklapanja analitičkih i numeričkih rezultata omogućavaju korišćenje jednostavnih analitičkih formula za određivanje napona na sfernom delu, a zatim je korišćenjem faktora koncentracije napona moguće odrediti napone na kritičnom mestu – spoju sfere i cilindra.

Diskusija osnovnih naučnih ciljeva disertacije

Osnovni naučni cilj doktorske disertacije je bio da se pokaže da je moguće sistematsko ispitivanje pomeranja i deformacija geometrijski kompleksnih struktura 3D optičkom bezkontaktnom metodom. U poglavlju 6 su predstavljene rezultati pomeranja u Y pravcu i Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja aksijalnom silom za četiri merna mesta i rezultati Mizesovih deformacija za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom za dva merna mesta. Dva merna mesta predstavljaju spoj sfere i cilindra – merno mesto 1 je spoj na kome je geometrijski diskontinuitet oštiji i ima ojačanje i merno mesto 3 je spoj

sa blažim geometrijskim diskontinuitetom bez ojačanja. Mnogi istraživači su se bavili analizom napona i deformacija neposredno na spoju sfere i cilindra, ali su samo uspevali da eksperimentalno izmere vrednosti deformacija u tačkama u blizini spoja. Vrednosti deformacija u blizini spoja su koristili za verifikaciju numeričkog modela pomoću kojeg su analizirali spoj. U okviru ove disertacije su eksperimentalno izmerene vrednosti pomeranja i deformacija neposredno na spoju sfere i cilindra. Za razliku od dosadašnjih istraživanja koja su eksperimentalne rezultate prikazavala lokalno, odnosno u jednoj tački, u ovoj disertaciji je prikazan pun potencijal 3D optičke metode koja prikazuje cela polja pomeranja i deformacija na kompleksnim geometrijskim strukturama.

Vrednosti najvećih napona na kućišu ventila za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 30 bar, koji je daleko viši od vrednosti radnih i ispitnih pritisaka (ventil PN6), iznose oko 55 MPa. Kako je metodom konačnih elemenata urađena analiza u oblasti elastičnosti, tako se ekstrapolacijom mogu odrediti vrednosti napona za druge vrednosti unutrašnjeg pritiska. Za opterećenje pritiskom od 6 bar, vrednosti najvećih napona na kućištu ventila iznose oko 11 MPa. Kako je konvencionalni napon tečenja materijala kućišta 200 MPa, može se zaključiti da su debljine zida kućišta ventila daleko veće nego što je potrebno, odnosno da je kućište ventila predimenzionisano.

Ograničenja rada

U okviru eksperimentalnih rezultata se pojavljuje šum na slikama polja deformacija. Šum se manifestuje u obliku malih crvenih polja, odnosno polja sa znatno većim vrednostima deformacija od realnih. Do nastanka šuma dolazi kada kamere, usled hrapavosti površine kućišta ventila i promene položaja senki (intenziteta svetlosti) na nepravilnoj površini, nisu u mogućnosti da isprate promene na malim površinama – fasetama. Pripremom kućišta ventila i korišćenjem odgovarajućeg osvetljenja, šum je sveden na minimum.

Teorijske i praktične implikacije rada

U okviru rada [5], Galić i grupa autora su analizirali kućište ventila opterećenog unutrašnjim pritiskom koristeći standard EN 12516-2 i metodu konačnih elemenata. Koristeći metodologiju koju definiše standard EN 12516-2, odredili su vrednosti maksimalnih pritisaka i kritična mesta na kućištu ravnog zapornog ventila. Koristeći MKE su pokazali da postoje odstupanja položaja kritičnih mesta na kućištu ventila u odnosu na položaj kritičnih mesta koje definiše standard. U okviru ove disertacije je razvijen MKE model kućišta ravnog zapornog ventila. MKE model razvijen u okviru disertacije, po obliku pripada sličnoj seriji ventila kao i model u radu [5], dok se razlikuju nazivni prečnik i pritisak, kao i odgovarajuće debljine zidova kućišta. Koristeći model verifikovan u disertaciji, pokazano je da se položaj kritičnih mesta dobijen numeričkim proračunom, razlikuje u odnosu na mesta koje definiše standard. Standard SRPS EN 12516, kao kritična mesta, definiše tačke S_L i S_R koje su definisane na slici 1.10. Numerička analiza urađena u okviru disertacije je pokazala da standard ne obuhvata kritični presek koji obuhvata mesta najvećih napona.

Metodom konačnih elemenata je sprovedena i analiza deformacija i napona za karakteristične preseke (A-A, B-B, C-C itd.) koji su definisani u teorijskoj analizi (slika 2.1). Rezultati za svaki preseka (tabela 7.1) su pokazali da se najveće vrednosti deformacija i napona javljaju na gornjoj strani preseka C-C, gde se i nalazi najveći geometrijski diskontinuitet. Najmanje vrednosti se javljaju na mestima koja su udaljena od geometrijskih diskontinuiteta – na mestima sfere i cilindra kućišta (presek G-G i donji deo preseka D-D).

U okviru teze su prikazane analitička, numerička i eksperimentalna analiza kućišta ventila. Analitički proračun ventila prema standardu EN 12516-2 je pokazao da se neophodne debljine zida kućišta oko 2 mm, dok se kućište ventila izrađuje sa debljinama zidova od 5 mm. Velika razlika u debljinama zidova se javlja zbog vrednosti dodataka koji se koriste zbog procesa livenja. Numerička i eksperimentalna analiza su potvrdile pretpostavku i polaznu hipotezu da je kućište ventila predimenzionisano, odnosno da kućište može da izdrži mnogo više vrednosti pritisaka od projektnih

vrednosti. Na slici 2.4 je prikazana debljina zida kućišta dobijena proračunom i stvarno izvedena debljina. Razvijene procedure i primena modernih eksperimentalnih metoda doprineće povećanju pouzdanosti kućišta industrijskog ventila, smanjenju mase, uštedi materijala kao i energije utrošene na proizvodnju industrijskih ventila. Uštede u energiji i materijalu u proizvodnji ventila će neposredno uticati na ekološku prihvatljivost i smanjenje cene, a samim tim i na povećanje konkurentnosti na tržištu.

Pravci daljeg istraživanja

Kako kućište ventila ima višestruku funkciju, u toku eksploatacije je izloženo i različitim vrstama opterećenja. U okviru disertacije je sprovedena analiza kućišta ravnog zapornog ventila nezavisno opterećenog unutrašnjim pritiskom i aksijalnim sabijanjem. U daljim istraživanjima je potrebno analizirati ponašanje kućišta ventila izloženog i drugim vrstama dinamičkih i statičkih opterećenja, kao što su uvijanje, savijanje, hidraulički udar, termička naprezanja i dr.

Kućište ravnog zapornog ventila predstavlja spoj sfere i cilindra. Analizom uniformnog spoja u okviru ove disertacije je postavljena osnova za dalju analizu drugih tipova geometrijskih diskontinuiteta i kompleksnijih problema. Primeri geometrijskih diskontinuiteta koji treba analizirati u nekim od daljih istraživanja su spojevi cilindar/cilindar, cilindar/konus i dr.

Na kompleksnost problema sa geometrijskim diskontinuitetima utiče i prisustvo zavarenih spojeva. Sa postojećom analizom geometrijskog diskontinuiteta napravljenog od istog materijala, odnosno spoja bez promena u njegovoj strukturi i sastavu, u dalje istraživanje treba uključiti i uticaj zavarenog spoja.

POGLAVLJE 9

ZAKLJUČAK

Na osnovu polazne hipoteze, koja podrazumeva mogućnost sistematskog ispitivanja pomeranja i deformacija geometrijski kompleksnih struktura 3D optičkom bezkontaktnom metodom, urađena su eksperimentalna istraživanja na kućištu ravnog zapornog ventila opterećenog unutrašnjim pritiskom i aksijalnom silom na sabijanje. Pored eksperimentalnih istraživanja, za bolje razumevanje mehaničkog ponašanja kućišta ventila sprovedene su i teorijske i numeričke analize. U okviru disertacije je urađeno sledeće:

- Data su početna razmatranja koja obuhvataju predmet istraživanja i stanje nauke u predmetnoj oblasti. Predmet istraživanja ove doktorske disertacije je ispitivanje struktura kompleksne geometrije, tj. analiza kućišta ravnog zapornog ventila opterećenog unutrašnjim pritiskom i aksijalnom silom na sabijanje. Dat je kratak prikaz osnovnih oblika kućišta ventila i vrsta opterećenja kojima mogu biti podvrgnuta. S obzirom na kompleksnost kućišta, prikazane su i teorijske osnove za kućišta kompleksnih oblika i dosadašnji načini analize kompleksnih struktura. Takođe, dat je prikaz dosadašnje primene metode za optičko merenje pomeranja i deformacija na osnovu dostupne literature.
- Analitički proračun čvrstoće kućišta ventila je sproveden prema standardu SRPS EN 12516. Objašnjen je tok proračuna i prikazan je oblik i položaj karakterističnih poprečnih preseka kućišta ventila. Rezultati proračuna za svaki od preseka su prikazani tabelarno i grafički.
- Definisani su osnovni delovi i način rada sistema za 3D optičko merenje pomeranja i deformacija. Definisana je procedura merenja kroz 16 koraka. U okviru procedure su detaljno razvijeni koraci koji obuhvataju hardversku pripremu i kalibraciju sistema (merna zapremina, priprema uzorka idr), softversku pripremu i kalibraciju sistema (“male površine”, proračunske maske i

dr.) i način obrade rezultata. Takođe su prikazane i metode za proračun deformacija u okviru optičkog sistema.

- Eksperiment je sproveden na tri ravna zaporna ventila, odnosno na kućištima u sklopu ventila, istih dimenzija i radnih parametara opterećena unutrašnjim pritiskom i aksijalnom silom. Detaljno je prikazan način pripreme kućišta za ispitivanje. Za svako opterećenje je prikazana i opisana eksperimentalna instalacija, radni parametri, način pozicioniranja i postupak merenja. Kako nije bilo moguće izmeriti pomeranja i deformacije celog kućišta ventila u okviru jednog merenja, definisana su merna mesta na kojima je sprovedena eksperimentalna analiza. Za definisana četiri merna mesta, prikazani su rezultati polja pomeranja u Y pravcu, ugaonih pomeranja i polja Mizesovih deformacija. Rezultati su prikazani korišćenjem slika i dijagrama za definisane preseke i tačke.
- Na osnovu eksperimentalnih rezultata je sprovedena i statistička analiza. Naime, za merno mesto 1, koje obuhvata spoj sfere i cilindra, razvijeni su matematički modeli za slučaj opterećenja aksijalnom silom i unutrašnjim pritiskom. Matematički modeli prikazuju zavisnost Mizesovih deformacija od položaja tačke na definisanom preseku, odnosno zavisnost Mizesovih deformacija od položaja tačke na definisanom preseku.
- Pored teorijske, eksperimentalne i statističke analize, urađena je i analiza korišćenjem metode konačnih elemenata. Za metodu konačnih elemenata je dat osvrt na razvoj metode, osnovne principe i korake u numeričkoj analizi. MKE analiza je sprovedena za jednu simetričnu polovinu kućišta ventila. Za MKE analizu su postavljeni isti parametri i uslovi koji su korišćeni za eksperimentalnu analizu radi poredivosti rezultata i verifikaciju numeričkog modela. Pored prikazanih rezultata pomeranja u Y pravcu, Mizesovih deformacija i Mizesovih napona, definisani su i vrednosti deformacija i napona na mestima karakterističnih poprečnih preseka kućišta ventila, kao i faktori koncentracije napona i deformacija na mestima geometrijskih diskontinuiteta.
- Na osnovu dobijenih rezultata diskusijom su pojašnjena pitanja o ponašanju analiziranih kućišta ventila izloženih dejstvu unutrašnjeg pritiska i aksijalne sile.

U okviru diskusije su prikazana i ograničenja koja su se javila u radu, kao i pravci daljih istraživanja.

Na osnovu prethodno urađenog, mogu se izvesti sledeći **zaključci**:

- Sistem za 3D optičko merenje pomeranja i deformacija zasnovan na metodi korelacije digitalnih slika je moguće primeniti na slučajeve kompleksne geometrije. Korišćenjem eksperimentalne metode koja se može primeniti na sve vrste materijala i za koju je u disertaciji pokazano da se može koristiti i za različite 3D oblike strukture, može se unaprediti znanje o ponašanju kompleksnih struktura pod različitim vrstama opterećenja. Takođe, eksperimentalna polja pomeranja i deformacija omogućavaju lakšu i precizniju verifikaciju numeričkih modela.
- Kroz teorijsku, eksperimentalnu i numeričku analizu je pokazano da kućište ventila može da bude podvrgnuto znatno većim opterećenjima od nominalnih, odnosno da je predimenzionisano.
- Ponašanje kućišta ventila u toku opterećenja aksijalnom silom na sabijanje je linearno.
- Matematički model koji definiše zavisnost deformacije od položaja tačke na preseku je opisan polinomnom funkcijom sa promenljivim koeficijentima. Koršćenjem matematičkih modela je moguće analitički odrediti vrednost Mizesovih deformacija za bilo koju tačku na preseku.
- Korišćenjem faktora koncentracije deformacija dobijenih u okviru disertacije je pokazano zadovoljavajuće slaganje rezultata eksperimenta i numerike. Analizom napona na sfernom delu kućišta i na poprečnom preseku sa najvećom potrebnom debljinom zida korišćenjem numeričkog i analitičkog proračuna, pokazano je zadovoljavajuće slaganje numeričkih i analitičkih rezultata. Na ovaj način je pokazano da se spoj sfere i cilindra može analizirati analitički, odnosno moguće je proračunati vrednosti napona na sfernom delu, a korišćenjem definisanih faktora koncentracije napona odrediti vrednosti napona na kritičnom mestu – spoju sfere i cilindra.
- Za slučaj kombinovanog opterećenja aksijalne sile i unutrašnjeg pritiska, vrednosti pomeranja u Y pravcu (koaksijalno pomeranje sa osom simetrije

ventila) je moguće sabirati za slučajeve pojedinačnog opterećenja. Naime, za sprovedena eksperimentalna ispitivanja za pojedinačna opterećenja, ukupno pomeranje za kombinovana opterećenja je moguće dobiti sabiranjem pomeranja.

Ostvareni **naučni doprinos** doktorske disertacije:

- Analizirana su i objašnjena polja pomeranja, deformacija i napona geometrijski kompleksne strukture, što je sprovedeno na kućištima ravnih zapornih ventila koja u geometrijskom smislu predstavljaju spoj cilindra i sfere. Analiza je sprovedena u simuliranim radnim uslovima (opterećenje unutrašnjim pritiskom i aksijalnom silom). Od posebne je važnosti istaći da su eksperimentalno izmerene vrednosti polja pomeranja i deformacija, osim na cilindričnom i sfernom delu, i na spoju sfere i cilindra, što dosadašnjim eksperimentalnim metodama nije bilo moguće, odnosno nije bilo podataka u dostupnoj literaturi.
- Eksperimentalnom i regresionom analizom su određene funkcionalne zavisnosti pomeranja/deformacija i dužine karakterističnih preseka za definisane preseke na kućištu ravnih zapornih ventila.
- Definisana je metodologija ispitivanja, odnosno sistem procedura, koja uključuje primenu trodimenzionalne optičke analize za dobijanje vrednosti deformacija i pomeranja geometrijski kompleksnih objekata, polja deformacija materijala i ugaonih pomeranja u toku opterećivanja.
- Pokazano je da vrednosti pomeranja i Mizesovih deformacija kućišta ventila opterećenog aksijalnom silom imaju linearan porast.
- Razvijeni su originalni trodimenzionalni numerički modeli kućišta ventila i upotrebom odgovarajućeg MKE softvera dobijeni su i objašnjeni rezultati ponašanja kućišta pod dejstvom opterećenja.
- Verifikovani su trodimenzionalni numerički modeli uporednom analizom sa eksperimentalnim rezultatima; primenom verifikovanih numeričkih modela izvršena je analiza napona.
- Utvrđena su kritična mesta sa aspekta napona i deformacija na kućištu ravnog zapornog ventila. Takođe su za kritična mesta određene vrednosti faktora koncentracije napona.

- Pokazano je da se korišćenjem konvencionalnih postupaka proračuna kućišta dobijaju znatno veće vrednosti debljine zida kućišta ventila, tj. da je debljina zida kućišta ventila predimenzionisana.
- Razvijene su procedure i naučne metode na osnovu tehnike ispitivanja koje obuhvataju operacije pre ispitivanja (definisane oblika i dimenzija predmeta ispitivanja, priprema za ispitivanje, priprema merne površine uzoraka, stezanje, pozicioniranje, podešavanje senzorske jedinice, kalibracija sistema, izbor uslova ispitivanja, merenje pre ispitivanja, ...), operacije u toku ispitivanja (provere pre puštanja aparata u rad, merenje u toku rada...), operacije posle ispitivanja (definisane koordinantinih osa, određivanje početnih tačaka...) i obrada rezultata (definisane polja najvećih pomeranja i deformacija, vizualizacija vektora pomeranja...).
- Rezultati dobijeni 3D bezkontaktnom kvalitativnom i kvantitativnom analizom deformacija i pomeranja daju realniji uvid u ponašanje geometrijski kompleksnih struktura, odnosno ravnog zapornog ventila podvrgnutim različitim vrstama opterećenja. Dobijeni rezultati i razvijene metode otvaraju novi prostor za dalje sistematsko ispitivanje i drugih geometrijski kompleksnih struktura koje nisu pogodne za primenu drugih konvencionalnih metoda.
- Razvijanje novih procedura ispitivanja i njihova primena na analizu pomeranja, deformacija i napona kućišta doprinose povećanju pouzdanosti kućišta industrijskog ventila, smanjenju mase, uštedi materijala kao i energije utrošene na proizvodnju industrijskih ventila što neposredno utiče na njegovu ekološku prihvatljivost i nižu cenu, a samim tim i na povećanje njegove konkurentnosti na tržištu.

LITERATURA

- [1] Petrović, A.: Određivanje napona u cilindričnim omotačima posuda pod pritiskom izazvanih lokalnim opterećenjima, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.
- [2] Živković, M., Maneski, T.: Termomehanički naponi cevovoda i posuda, SMEITS, Beograd, 2006.
- [3] Ognjanović, M.: Čvrstoća i zaptivanje kućišta pod pritiskom, Mašinski fakultet, Beograd, 1997.
- [4] SRPS EN 12516-2:2009, Industrijske armature – Čvrstoća kućišta - Deo 2: Proračunski postupak za proračun tela čelične armature.
- [5] Galic, I., Vuckovic, K., Tonkovic, Z.: Nonlinear analysis of two-way globe valve housing, *Technical Gazette* 17, 1, 67-74, 2010 .
- [6] Spence, J., Tooth AS.: Pressure vessel design concepts and principles, London Chapman & Hall, 1994.
- [7] Attwater, I., Anderson, J., Findlay, G.: Three-dimensional finite element analysis of sphere/cylinder intersections under axisymmetric loading, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 231-235, 1994.
- [8] Schindler, S., Zeman, J.L.: Stress concentration factors of nozzle-sphere connections, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 80, 87-95, 2003.
- [9] Spence, J., Nash, D.H.: Milestones in pressure vessel technology, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 81, 89-118, 2004.
- [10] Leckie, F.A., Penny, R.K.: Stress concentration factors for the stresses at nozzle intersections in pressure vessels, *Welding Research Council Bulletin*, No. 90, 1963.
- [11] Rodabaugh, E.C., Witt, F.J., Cloud, R.L.: Stresses at nozzles in spherical shells loaded with pressure, moment or thrust, Phase report No.2, US Atomic Energy Consumption, 1966.
- [12] Weis, E., Rudolph, J.: Finite element analysis concerning the fatigue strength of nozzle-to-spherical shell intersections, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 64, 101-109, 1995.

- [13] Chen, H.F., Cen, Z.Z., Xu, B.Y., Zhan, S.G.: A numerical method for reference stress in the evaluation of structure integrity, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 71, 47-53, 1997.
- [14] Ascough, J., Malalasekera, W.M.G., Rusu-Casandra, A.: Stress analysis of hemispherical shells with single nonradially penetrated nozzles, *Engineering Structures*, vol. 18, 894-900, 1996.
- [15] Skopinsky, V.N., Smetankin, A.B.: Parametric study of reinforcement of pressure vessel head with offset nozzle, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 80, 333-343, 2003.
- [16] Soden, P.D., Leach, J., Tang, W.M., Soden, P.M., Kitching, R.: Stresses and strains in hemispherical GRP pressure vessel with radial cylindrical branch connections, *Composite Structures*, vol.28, 263-281, 1994.
- [17] Galic, I., Tonkovic, Z., Vuckovic, K.: Experimental and numerical investigation of collapse and burst pressures for a valve housing, *Strain*, vol 47, 519-524, 2011.
- [18] Petrović A., Milošević M., Mitrović N.: Uporedni prikaz dimenzionisanja ravnog zapornog ventila prema postojećim i EN standardima, *YUSQ ICQ 2010 – International Journal, Total Quality Management & Excellence*, Vol 38, No. 1, str 324-331, 2010.
- [19] 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*, 103-104, 2011.
- [20] Milošević, M., Petrović, A., Mitrović, N., Momčilović, N.: „Analiza napona i deformacija ravnih zapornih ventila“, *Procesing 2010 – 23. kongres o procesnoj industriji*, Tara, 2010.
- [21] Momčilović, N., Petrović, A., Mitrović, N., Milošević, M.: „Numerička analiza deformacija i napona ravnog zapornog ventila opterećenog na spoljašnji aksijalni pritisak“, *Procesing 2011 – 24. kongres o procesnoj industriji*, 2011.
- [22] Hild, F., Roux, S.: Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties – a review, *Strain*, vol 42, 69-80, 2006.
- [23] Berthaud, Y., Torrenti, J.M., Fond, C.: Analysis of localization in brittle materials through optical techniques, *Experimental Mechanics*, vol. 37, 216–220, 1997.

- [24] Forquin, P., Rota, L., Charles, Y., Hild, F.: A method to determine the toughness scatter of brittle materials, *International Journal of Fracture*, vol. 125, 171–187, 2004.
- [25] Chevalier, L., Calloch, S., Hild, F., Marco, Y.: Digital image correlation used to analyze the multiaxial behavior of rubber-like materials, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, vol. 20, 169–187, 2001.
- [26] Andrieux, S., Abda, A.B., Bui, H.D.: On the identification of planar cracks in elasticity via reciprocity gap concept, vol.324, 1431-1438, 1997.
- [27] Claire, D., Hild, F., Roux, S.: Identification of damage fields using kinematic measurements, *Comptes Rendus Mecanique*, vol. 330, 729–734, 2002.
- [28] Geymonat, G., Hild, F., Pagano, S.: Identification of elastic parameters by displacement field measurement. *Comptes Rendus Mecanique*, vol. 330, 403–408, 2002.
- [28] Milosevic, M., Miletic, V., Mitrovic, N., Manojlovic, D., Savic-Stankovic, T., Maneski, T.: Measurement of local deformation fields in dental composites using 3D optical system, *Chemicke listy*, vol. 105, 751-753, 2011.
- [29] Miletic V., Manojlovic D., Milosevic M., Mitrovic N., Savic-Stankovic T., Maneski T.: Analysis of local shrinkage patterns of self-adhering and flowable composites using 3D digital image correlation, *Quintessence International*, vol. 42, 797-804, 2011.
- [30] Tihacek-Sojic Lj., Milic-Lemic A., Tanasic I., Mitrovic N., Milosevic M., Petrovic A.: Compressive strains and displacement in a partially dentate lower jaw rehabilitated with two different treatment modalities, *Gerodontology*, 2011.
- [31] Tanasic I., Milic Lemic A., Tihacek-Sojic Lj., Stancic I., Mitrovic N.: Analysis of the compressive strain below the removable and fixed prosthesis in the posterior mandible using a digital image correlation method, *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 11, 751-758, 2012.
- [32] Tanasic I., Tihacek-Sojic Lj., Milic Lemic A., Djuric M., Mitrovic N., Milosevic M., Sedmak A.: Optical aspect of deformities analysis in the bone-denture complex, *Collegium Antropologicum*, vol. 36, 173-178, 2012.
- [32] Maneski T., Milošević M., Mitrović N.: „Mogućnosti primene optičkih merenja deformacija u procesnoj tehnici“, *Procesing 2009 – 22. kongres o procesnoj industriji*, Beograd, 2009.

- [33] 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.
- [34] 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, 96, 2010.
- [35] Milosevic M., Mitrovic N., Sedmak A.: Digital Image Correlation Analysis of Biomaterials, 15th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems 2011, 421-425, 2011.
- [36] Milosevic M., Mitrovic N., Tanasic I., Ezdenci A., Tihacek-Sojic 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, 101-102, 2011.
- [37] 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, 103-104, 2011.
- [38] Miletic V., Manojlovic D., Savic Stankovic T., Milosevic M., Mitrovic N.: Digital image correlation study on polymerization shrinkage of resin-based composites“, Journal of Dental research, 2011.
- [39] Sedmak A., Milosevic M., Mitrovic N., Petrovic A., Maneski T.: Digital image correlation in experimental mechanical analysis, NT2F11 – 11th International Conference on New Trends in Fatigue and Fracture 11, 2011.
- [40] Sutton, M.A., McNeill, S.R., Helm, J.D., Chao, Y.J.: Advances in Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision, Photomechanics, vol. 77, 323-372, 2000.
- [41] Peters, W.H., Ranson, W. F.: Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis, Optical Engineering, vol. 21, 427, 1981.
- [42] 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.

- [43] 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, 143-150, 1986.
- [44] Sutton, M.A., McNeill, S.R., Jang, J., Babai, M.: The Effects of Subpixel Image Restoration on Digital Correlation Error Estimates, *Optical Engineering*, vol. 27, 173, 1988.
- [45] 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, 2009.
- [46] Zhang, D., Zhang, X., Cheng, G.: Compression strain measurement by digital speckle correction, *Experimental Mechanics*, vol. 39, 62–65, 1999.
- [47] Chasiotis, I., Knauss, W.G.: A new microtensile tester for the study of MEMS materials with the aid of atomic force microscopy, *Experimental Mechanics*, vol. 42, 51–57, 2002.
- [48] Cho, S.W., Chasiotis, I., Friedman, T.A., Sullivan, J.P.: Young's modulus, Poisson's ratio and failure properties of tetrahedral amorphous diamond-like carbon for MEMS devices, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, 728–735, 2005.
- [49] Roux, S., Hild, F.: Stress intensity factor measurements from digital image correlation: post-processing and integrated approaches, *International Journal of Fracture*, vol. 140, 141–157, 2006.
- [50] Avril, S., Bonnet, M., Bretelle, A.S., Grediac, M., Hild, F., Jeny, P., Latourte, F., Lemosse, D., Pagano, S., Pagnacco, E., Pierron, F.: Overview of identification methods of mechanical parameters based on full-field measurements, *Experimental Mechanics*, vol. 48, 381–402, 2008.
- [51] Sun, Y.F., Pang, J.H.L.: Experimental and numerical investigations of near-crack-tip deformation in a solder alloy, *Acta Materialia*, vol. 56, 537–548, 2008.
- [52] Knauss, W.G., Chasiotis, I., Huang, Y.: Mechanical measurements at the micron and nanometer scales, *Mechanics of Materials*, vol. 35, 217–231, 2003.
- [53] Chen, J., Jin, G., Meng, L.: Applications of digital correlation method to structure inspection, *Tsinghua Science and Technology*, vol. 12, 237-243, 2007.

- [54] Wattrisse, B., Chrysochoos, A., Muracciole, J.M., Nemoz-Gaillard, M.: Analysis of strain localization during tensile tests by digital image correlation, *Experimental Mechanics*, vol. 41, 29–39, 2001.
- [55] Xiang, G.F., Zhang, Q.C., Liu, H.W., Wu, X.P., Ju, X.Y.: Time-resolved deformation measurements of the Portevin–Le Chatelier bands, *Scripta Materialia*, vol. 56, 721–724, 2007.
- [56] Bastawros, A.F., Bart-Smith, H., Evans, A.G.: Experimental analysis of deformation mechanisms in a closed-cell aluminum alloy foam, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 48, 301–322, 2000.
- [57] Abanto-Bueno, J., Lambros, J.: Investigation of crack growth in functionally graded materials using digital image correlation, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 69, 1695–1711, 2002.
- [58] Chiang, F.P., Uzer, G., Krukenkamp, I.B.: Micro-/nano-speckle method with applications to materials, tissue engineering and heart mechanics, *Strain*, vol. 44, 27–39, 2008.
- [59] Orteu, J.J.: 3-D computer vision in experimental mechanics, *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 47, 282–291, 2009.
- [60] Chang, S., Wang, C.S, Xiong, C.Y., Fang, J.: Nanoscale in-plane displacement evaluation by AFM scanning and digital image correlation processing, *Nanotechnology*, vol. 16, 344–349, 2005.
- [61] Hogstrom, P., Ringsberg, J.W., Johnson, E.: An experimental and numerical study of the effects of length scale and strain state on the necking and fracture behaviours in sheet metals, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, 1194–1203, 2009.
- [62] Godara, A., Raabe, D.: Influence of fiber orientation on global mechanical behavior and mesoscale strain localization in a short glass-fiber-reinforced epoxy polymer composite during tensile deformation investigated using digital image correlation, *Composites Science and Technology*, vol. 67, 2417–2427, 2007.
- [63] Ahn, B., Kim, J.: Measurement and characterization of soft tissue behavior with surface deformation and force response under large deformations, *Medical Image Analysis*, vol. 14, 138–148, 2010.

- [64] Sadowski, T., Marsavina, L., Craciun, E.M., Kneć, M.: Modelling and experimental study of parallel cracks propagation in an orthotropic elastic material, *Computational Materials Science*, vol. 52, 231-235, 2012.
- [65] Jerabek, M., Major, Z., Lang, R.W.: Strain determination of polymeric materials using digital image correlation, *Polymer Testing*, vol. 29, 407-416, 2010.
- [66] Goellner, M., Schmitt, J., Karl, M., Wichmann, M., Holst, S.: Photogrammetric measurement of initial tooth displacement under tensile force, *Medical Engineering & Physics*, vol. 32, 883-888, 2010.
- [67] Sztefek, P., Vanleene, M, Olsson, R., Collinson, R., Pitsillides, A.A., Shefelbeine, S.: Using digital image correlation to determine bone surface strains during loading and after adaptation of the mouse tibia, *Journal of Biomechanics*, vol. 43, 599-605, 2010.
- [68] Lomov, S.V., Willems, A., Verpoest, I., Zhu, Y., Barburski, M., Stoilova, Tz.: Picture Frame Test of Woven Composite Reinforcements with a Full-Field Strain Registration, *Textile Research Journal*, vol. 76, 243-252, 2006.
- [69] Sozen, S., Guler, M.: Determination of displacement distributions in bolted steel tension elements using digital image techniques, *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 49, 1428-1435, 2011.
- [70] Lamkanfia, E., Van Paepegema, W., Degriecka, J., Ramault, C., Makris, A., Van Hemelrijck, D.: Strain distribution in cruciform specimens subjected to biaxial loading conditions. Part 1: Two-dimensional versus three-dimensional finite element model, *Polymer Testing*, vol. 29, 7-13, 2010.
- [71] Garcia, D., Orteu, J.J., Penazzi, L.: A combined temporal tracking and stereo-correlation technique for accurate measurement of 3D displacements: application to sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 125–126, 736–742, 2002.
- [72] Pan, B., Xie, H., Yang, L., Wang, Z.: Accurate Measurement of Satellite Antenna Surface Using 3D Digital Image Correlation Technique, *Strain*, vol. 45, 194-200, 2009.
- [73] Han, Y., Rogalsky, A.D., Zhao, B., Kwon, H.J.: The Application of Digital Image Techniques to Determine the Large Stress–Strain Behaviors of Soft Materials, *Polymer Engineering and Science*, vol. 52, 826-834, 2012.

- [74] Kwon, H.J., Rogalsky, A.D., Kovalchick, C., Ravichandran, G.: Application of Digital Image Correlation Method to Biogel, *Polymer Engineering and Science*, vol. 50, 1585-1593, 2010.
- [75] Berfield, T. A., Patel, J. K., Shimmin, R. G., Braun, P. V., Lambros, J., Sottos, N. R.: Micro- and Nanoscale Deformation Measurement of Surface and Internal Planes via Digital Image Correlation, *Experimental Mechanics*, vol. 47, 51-62. (2007).
- [76] Tung, S.H., Shih, M.H., Kuoc, J.C.: Application of digital image correlation for anisotropic plastic deformation during tension testing, *Optics and Lasers in Engineering*, vol 48, 636-641, 2010.
- [77] Heinz, S.R., Wiggins, J.S.: Uniaxial compression analysis of glassy polymer networks using digital image correlation, *Polymer Testing*, vol. 29, 925-932, 2010.
- [78] Sekulović, M.: Metod konačnih elemenata, Građevinska knjiga, Beograd, 1988.
- [79] Segerlind, L.J.: Applied Finite Element Method, John Wiley & Sons, New York, 1984.
- [80] Kalajdžić, M.: Metod konačnih elemenata, Institut za alatne mašine i alate, Beograd, 1978.
- [81] Zaimović-Uzunović, N., Lemeš, S.: Metod konačnih elemenata, Dom štampe, Zenica, 2002.
- [82] ***: www.gom.com
- [83] Đorđević, D.: Mašinski materijali, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.
- [84] Mitrovic N., Milosevic M., Momcilovic, N., Petrovic, A., Sedmak A., Maneski T., Zrilic, A.: Experimental and numerical analysis of local mechanical properties of globe valve housing, *Chemicke Listy* 106, s491 – s494, 2012.
- [85] 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, *Chemicke Listy* 106, s485 – s488, 2012

BIOGRAFSKI PODACI AUTORA

Nenad Mitrović je rođen 14.08.1984. godine u Beogradu. Osnovnu školu Mihailo Petrović Alas i Prvu beogradsku gimnaziju završio je u Beogradu. Diplomirao je na Mašinskom fakultetu, Univerziteta u Beogradu 2008. godine na Katedri za procesnu tehniku, sa prosečnom ocenom 9,33 (devet i 33/100). Odranio je diplomski rad sa ocenom 10 (deset) na temu „Procedure CE označavanja za vertikalne električne zagrejače vode zapremine od 30 do 120 l”. Doktorske studije upisao je na Mašinskom fakultetu, Univerziteta u Beogradu 2008. godine.

Zaposlen je u zvanju istraživač-saradnik u Inovacionom centru Mašinskog fakulteta u Beogradu od 2008. do 2011. godine. Od 2011. godine je zaposlen na Mašinskom fakultetu u zvanju asistenta na Katedri za procesnu tehniku. Tokom dosadašnjeg rada ovladao je korišćenjem programa za eksperimentalnu 3D optičku analizu deformacija i pomeranja različitih materijala i konstrukcija. Angažovan je u izvođenju nastave na predmetima „Cevovodi i armatura”, „Konstruisanje procesne opreme“, „Tehnički propisi“ i „Projektovanje, izgradnja i eksploatacija procesnih sistema“ na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Bio je akreditovani predavač na programu stručnog usavršavanja u obrazovanju i vaspitanju pod nazivom “Program zaštite životne sredine-savremena tehnologija i održivi razvoj”, kao i predavač na kursu „Metode i postupci za ocenjivanje usaglašenosti novih proizvoda i proizvoda u eksploataciji (kontrola i ispitivanje)“. Uspešno je završio više kurseva stručnog usavršavanja.

U dosadašnjem stručnom i istraživačkom radu učestvovao je u više naučno-istraživačkih projekata finansiranih od strane Ministarstva za nauku. Aktivan je član istraživačke grupe Društva za integritet i vek konstrukcija. Tečno govori engleski jezik, a služi se francuskim, nemačkim i japanskim. Autor je i koautor na više od 35 stručnih i naučnih radova, koji su saopšteni na naučnim skupovima ili objavljeni u časopisima različitih kategorija, a od toga 8 (osam) radova štampano je u međunarodnim časopisima koji imaju impakt faktor na SCI listi. Za tri prezentovana rada, kao autor i koautor, dobio je nagrade za najbolje selektovane radove na međunarodnim konferencijama.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Ненад Р. Митровић

број уписа D1/08

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

НАПОН И ДЕФОРМАЦИЈЕ СТРУКТУРА КОМПЛЕКСНЕ ГЕОМЕТРИЈЕ
ЦЕВОВОДНЕ АРМАТУРЕ

- 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 кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанта

У Београду, 25.03.2013.

Ненад Митровић

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

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

НАПОН И ДЕФОРМАЦИЈЕ СТРУКТУРА КОМПЛЕКСНЕ ГЕОМЕТРИЈЕ
ЦЕВОВОДНЕ АРМАТУРЕ

која је моје ауторско дело.

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

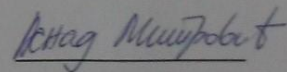
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

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 докторанта

У Београду, 25.03.2013.



1. Ауторство - Дозвољавање умножавања, 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. Дозвољавање умножавања, 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. Дозвољавање умножавања, 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. Дозвољавање умножавања, 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. Дозвољавање умножавања, 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. Дозвољавање умножавања, 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.