Eksperimentalno i numeričko modeliranje procesa deformiranja epruvete za savijanje u tri točke

Frančeski, Joško

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:498737

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Joško Frančeski

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdenko Tonković

Student:

Joško Frančeski

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem se prvenstveno svom mentoru prof. dr. sc. Zdenku Tonkoviću, na vremenu i strpljenju koje je tokom posljednjih nekoliko godina uložio u mene, kao i na ukazanoj stručnoj pomoći i nesebičnoj potpori, te mu se ovim putem želim iskreno zahvaliti na svim pruženim prilikama.

Za provedbe eksperimentalnih ispitivanja želim zahvaliti prof. dr. sc. Janošu Kodvanju i asistentnu dr. sc. Martinu Surjaku. Asistentu Ivanu Trapiću, mag. ing. dugujem zahvalnost za vrijeme i podučavanje o programskom paketu True Load, jer mi je bio na raspolaganju u bilo kojem trenutku dana. Asistentu Damjanu Čakmaku sam zahvalan na savjetima kojima me izvukao iz neznanja i omogućio mi da napravim ovaj rad. Nadam se da ću se nekako moći odužiti svima koji su mi pomagali tokom izrade rada.

Osim kolega, želio bih se zahvaliti i svojoj obitelji, koja je bila uz mene čitavo vrijeme studija, bespogovorno, strpljivo.

Diplomski rad je napravljen u okviru RCOP projekta „Centre of Excellence for Structural Health“ (CEEStructHealth) sufinanciranog iz sredstava Europske unije (Ugovor IPA2007/HR/16IPO/001-040513)

Joško Frančeski

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Joško Frančeski Mat. br.: 0035172669

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Eksperimentalno i numeričko modeliranje procesa deformiranja epruvete za savijanje u tri točke**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Experimental and Numerical Modelling of Deformation Process of Specimen Under Three-Point Bending Test**

Opis zadatka:

U radu je potrebno provesti eksperimentalno i numeričko modeliranje procesa deformiranja standardne epruvete za savijanje u tri točke izrađene od nodularnog lijeva. Ispitivanja provesti na kidalici na način da se epruveta oslanja na dva valjka i opterećuje s trećim ili da se epruveta oslanja na jedan valjak, a opterećuje s druga dva. Pritom je potrebno analizirati monotono opterećenje epruvete te cikličko opterećenje s konstantnim i promjenjivim amplitudama. Za analizu pomaka i deformacija na površini uzorka koristiti optički sustav *Aramis* koji se temelji na korelaciji digitalne slike.

Za numeričke analize primijeniti program *Abaqus* koji se temelji na metodi konačnih elemenata. Geometriju epruvete diskretizirati s dvodimenzijskim konačnim elementima, a valjke na koje se epruveta oslanja i s kojima se vrši opterećivanje za vrijeme eksperimenta potrebno je u proračunskom modelu modelirati s kontaktnim plohama. Kvazistatičke analize provesti uz pretpostavku malih pomaka i deformacija te linearno elastičnog ponašanja materijala. Promjenom gustoće mreže konačnih elemenata analizirati konvergenciju rješenja. Verifikaciju primijenjenih konačnih elemenata i procedura potrebno je izvršiti na epruveti bez zareza. Za direktnu usporedbu numeričkih rezultata na cijelom području diskretizacije s eksperimentalnim rezultatima dobivenim sustavom ARAMIS razviti algoritam s pripadnim programom. Osim toga, primjenom programskog paketa koji se temelji na tehnici inverznog modeliranja i mjerenih deformacija na površini uzorka potrebno je validirati postupak izračunavanja opterećenja epruvete.

U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
12. studenog 2015.	14. siječnja 2016.	20., 21. i 22. siječnja 2016.

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
SAŽETAK VI
SUMMARY VII
1. UVOD 1
1.1. Pregled dosadašnjih istraživanja 1
1.2. Opis rada i ciljevi 1
2. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE 3
2.1. Savijanje u tri točke aluminijske epruvete bez zareza 4
2.2. Statičko vlačno ispitivanje cilidrične epruvete 9
2.3. Savijanje u tri točke SENB epruvete izrađene od nodularnog lijeva 11
3. NUMERIČKA FORMULACIJA 12
3.1. Abaqus 6.12 12
3.2. Modeliranje i diskretizacija epruvete za savijanje u tri točke 16
3.3. Test savijanja epruvete bez zareza izrađene od aluminijske legure AlCu5BiPb –T8 20
3.4. Test savijanja epruvete bez zareza izrađene od nodularnog lijeva EN-GJS-400-18-LT 23
4. PRIMJENA ALGORITMA ZA VALIDACIJU NUMERIČKE SIMULACIJE METODOM KORELACIJE DIGITALNE SLIKE 26
4.1. Algoritam za validaciju 28
4.2. Usporedba rezultata pomaka epruvete za savijanje u tri točke izrađene od aluminijske legure 29
5. POSTUPAK INVERZNOG MODELIRANJA U PROGRAMSKOM PAKETU TRUE LOAD 36
5.1. Postupak provođenja inverznog modeliranja izračuna opterećenja iz poznatih deformacija pomoću programskog paketa *True Load* 39
5.2. Rezultati korištenja inverznog modeliranja za izračunavanje opterećenja epruvete . 43
6. ZAKLJUČAK 49
LITERATURA 51
PRILOZI 53
7. DODATCI 54
7.1. Python skripta za prevođenje .odb datoteke u sintaksu iskoristivu sustavu Aramis .. 54

POPIS SLIKA

Slika 1 Orijentacija epruveta u odljevcima Y-proba: a) Cilindrična, b) SENB i c) CT epruveta [1] ... 3
Slika 2 Oblik i dimenzije epruveta: a) SENB epruveta za ispitivanje u tri točke, b) Epruveta bez zareza za ispitivanje u tri točke ... 3
Slika 3 Kidalice: a) MESSPHYSIK BETA 50-5, b) LFV 50-HH; Walter, Bai AG ... 4
Slika 4 Dijagram naprezanje istezanje [1] ... 7
Slika 5 Eksperimentalni rezultati pomaka u smjeru *x* osi, mm ... 8
Slika 6 Eksperimentalni rezultati pomaka u smjeru *y* osi, mm ... 8
Slika 7 Dijagram pomaka u smjeru *y* osi po presjeku A-A epruvete na slici 2b) ... 9
Slika 8 Dijagram inženjerskog naprezanja – istezanja [1] ... 11
Slika 9 Shematski prikaz programa za rješavanje numeričkih simulacija ... 14
Slika 10 Epruveta diskretizirana s 506 CPS4 konačna elementa ... 17
Slika 11 Epruveta diskretizirana s 1968 CPS4 konačna elementa ... 17
Slika 12 Epruveta diskretizirana s 4522 CPS4 konačna elementa ... 17
Slika 13 Epruveta diskretizirana s 5840 linearna heksaedarska elementa C3D8 i 584 ljuskastih elemenata S4 ... 18
Slika 14 Prikaz površine modelirane pomoću Skin modula ... 18
Slika 15 Prikaz konačnog elementa: a) CPS4, b) C3D8 i c) S4 ... 19
Slika 16 Dijagram pomaka epruvete u smjeru osi *y* na duž presjeka A-A ... 20
Slika 17 Pomaci u smjeru osi *x,* mm ... 21
Slika 18 Pomaci u smjeru osi *y,* mm ... 22
Slika 19 Konvergencija rješenja savijanja epruvete iz aluminijske legure ... 23
Slika 20 Rezultat ukupne deformacija u smjeru osi *x* za jedinično opterećenje ... 24
Slika 21 Raspodjela elastičnih deformacija u smjeru osi *x* za opterećenje od 23000 N aluminijske epruvete ... 24
Slika 22 Rezultati ukupne deformacija u smjeru osi *y* za jedinično opterećenje ... 25
Slika 23 Raspodjela elastičnih deformacija u smjeru osi *y* za opterećenje od 23000 N aluminijske epruvete ... 25
Slika 24 Stohastički uzorak i mreža faceta ... 27
Slika 25 Sustav za optičko mjerenje, Aramis 4M ... 27
Slika 26 Dijagram toka algoritma za validaciju numeričkog modela ... 28
Slika 27 Lokalne razlike podudaranja geometrije za mrežu od 506 KE ... 30
Slika 28 Lokalne razlike podudaranja geometrije za mrežu od 1968 KE ... 30
Slika 29 Lokalne razlike podudaranja geometrije za mrežu od 4522 KE ... 30
Slika 30 Mapirani numerički pomaci u smjeru osi *x* za mrežu od 506 KE ... 31
Slika 31 Mapirani numerički pomaci u smjeru osi *x* za mrežu od 1968 KE ... 31
Slika 32 Mapirani numerički pomaci u smjeru osi *x* za mrežu od 4522 KE ... 31
Slika 33 Mapirani numerički pomaci u smjeru osi *y* za mrežu od 506 KE ... 32
Slika 34 Mapirani numerički pomaci u smjeru osi *y* za mrežu od 1968 KE ... 32
Slika 35 Mapirani numerički pomaci u smjeru osi *y* za mrežu od 4522 KE ... 32
Slika 36 Razlika pomaka u smjeru osi *x* za mrežu od 506 KE ... 33
Slika 37 Razlika pomaka u smjeru osi *x* za mrežu od 1968 KE ... 33
Slika 38 Razlika pomaka u smjeru osi *x* za mrežu od 4522 KE ... 33
Slika 39 Razlika pomaka u smjeru osi *y* za mrežu od 506 KE ... 34
Slika 40 Razlika pomaka u smjeru osi *y* za mrežu od 1968 KE ... 34
Slika 41 Razlika pomaka u smjeru osi *y* za mrežu od 4522 KE ... 34
Slika 42 Izgled dijaloškog prozora modula Pre – Test ... 40
Slika 43 Prikaz položaja i orijentacije tenzometarskih traka na površini epruvete ... 41

Slika 44 Izgled dijaloškog prozora modula Post – Test 42
Slika 45 Izgled dijaloškog prozora modula True QSA..... 43
Slika 46 Dijagram razlike između izmjerenih i izračunatih deformacija za tenzometar broj 1 43
Slika 47 Dijagram razlike između izmjerenih i izračunatih deformacija za tenzometar broj 2 44
Slika 48 Dijagram razlike između izmjerenih i izračunatih deformacija za tenzometar broj 3 44
Slika 49 Dijagram razlike između izmjerenih i izračunatih deformacija za tenzometar broj 4 44
Slika 50 Korelacija preklapanja izmjerenih i izračunatih deformacija za: a) mjerno mjesto 1, b) mjerno mjesto 2, c) mjerno mjesto 3 i d) mjerno mjesto 4 46
Slika 51 Koncentrirana sila izračunata inverznim modeliranjem prikazana u izometriji u iznosu od 825,5 N..... 47
Slika 52 Zadana koncentrirana sila u izometriji u iznosu od 850 N..... 47
Slika 53 Koncentrirana sila izračunata inverznim modeliranjem u nacrtu u iznosu od 825,5 N 48
Slika 54 Zadana koncentrirana sila u nacrtu u iznosu od 850 N 48
Slika 55 Položaj i iznos koncentrirane sile u bokocrtu za: a) izračun inverznim modeliranjem od 825,5 N, b) zadani iznos od 850 N..... 48

POPIS TABLICA

Tablica 1 Udjeli pojedinih elemenata u kemijskom sastavu aluminijske legure AlCu5BiPb – T8 u (%)..... 5
Tablica 2 Mehanička svojstva aluminijske legure AlCu5BiPb – T8 [1]..... 7
Tablica 3 Udjel pojedinih elemenata u kemijskom sastavu NL (%) ovisno o seriji materijala 10
Tablica 4 Mehanička svojstva nodularnog lijeva EN-GJS-400-18-LT..... 10
Tablica 5 Ovisnost iznosa plastične deformacije o naprezanju materijala AlCu5BiPb – T8 19
Tablica 6 Ovisnost uvjetovanost matrice ***C*** i svojstava sustava..... 38
Tablica 7 Podatci o deformacijama na pojedinim tenzometrima u vremenskom koraku simulacije..... 42
Tablica 8 Chadockova ljestvica..... 45

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ε		Deformacija
σ	MPa	Naprezanje
E	GPa	Youngov modul elastičnosti
K	MPa	Parametar materijala
n		Parametar materijala
ε_{el}		Elastični dio deformacije
ε_{pl}		Plastični dio deformacije
F	N	Sila
σ_{E}	MPa	Inženjersko naprezanje
A_0	mm^2	Početna površina poprečnog presjeka
ε_{E}		Inženjerska deformacija
l	mm	Trenutna duljina
l_0	mm	Početna duljina
$d\varepsilon_{\mathrm{T}}$		Inkrement stvarne deformacije
dl	mm	Inkrement produljenja
V_0	mm^3	Početni volumen
V	mm^3	Trenutni volumen
A	mm^2	Trenutna površina poprečnog presjeka
ε_{T}		Stvarna deformacija
σ_{T}	MPa	Stvarno naprezanje
$\varepsilon_{\mathrm{T}}^{el}$		Elastična komponenta stvarne deformacije
$\varepsilon_{\mathrm{T}}^{pl}$		Plastična komponenta stvarne deformacije
σ_{y}	MPa	Naprezanje u plastičnom području
$R_{p0,2}$	MPa	Granica razvlačenja
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
v		Poissonov omjer
$\boldsymbol{K}$		Globalna matrica krutosti
$\boldsymbol{V}$		Vektor globalnih pomaka
$\boldsymbol{R}$		Globalni vektor čvornih sila
$G\,(x,y)$		Vrijednost sive boje
$G_t\,(x_t,y_t)$		Promjena vrijednosti sive boje
$g,\ g_0,\ g_{1,\ldots}$		parametri osvjetljenja
$a_0,\ a_1,\ \ldots$		parametri afine transformacije
$\boldsymbol{C}$		Matrica krutosti
r		Koeficijent korelacije

SAŽETAK

Na primjeru epruvete za savijanje u tri točke potrebno je provesti istraživanje procesa deformiranja eksperimentom i numeričkom simulacijom. U svrhu zaobilaženja skupih, kontaktnih i razornih metoda eksperimentalne mehanike korištena je beskontaktna optička metoda praćenja pomaka i deformacija po čitavoj površini epruvete sustava Aramis. Pomoću rezultata eksperimenata izračunavaju se materijalni parametri za konstitutivne modele numeričkih simulacija koje su provedene u programskom paketu Abaqus. Izvršena je validacija numeričke metode direktnom usporedbom numeričkih rezultata na cijelom području diskretizacije s eksperimentalnim rezultatima. Kako bi se mogla provesti validacija, razvijen je programski kod i algoritam koji omogućuje direktnu usporedbu rješenja. Osim toga, provedeno je istraživanje inverznog modeliranja pomoću programskog paketa True Load, koji je dio programskog paketa FeSafe i radi u okruženju Abaqus-ovog postporcesora kao *plugin*.

Ključne riječi: Korelacija digitalne slike, Numerička analiza, Inverzno modeliranje

SUMMARY

On the basis of three point bending specimen a research of process of deformation was conducted by experiment and numerical simulation. To bypass expensive, contact and destructive methods of experimental mechanics non contact optical method of measuring displacements and deformations on the entire specimen surface that was enabled by using Aramis system. Results of the experiments were used to calculate material parameters for the constitutive models of numerical simulations used in Abaqus software. Validation of numerical method was conducted by direct comparison of numerical results on the entire area of discretization with experimental results. In order to validate numerical method, it was necessary to develop a program script and algorithm that enables direct comparison of results. Following that, a research of inverse modelling techniques used by True Load software was conducted. True Load is part of the FeSafe software and is used in postprocessor part of Abaqus software as a plugin.

Key words: Digital image correlation, Numerical analysis, Inverse modelling.

1. UVOD

Numeričke metode analize konstrukcija znatno su uznapredovale od svojih početaka i danas omogućuju dovoljno preciznu analizu realnih konstrukcija i opterećenja. Najraširenija numerička metoda korištena u analizi konstrukcija danas je metoda konačnih elemenata, koja se zasniva na teoriji mehanike kontinuuma. Kako bi se konačni elementi uspješno koristili potrebno je opisati materijalni model definiran konstitutivnim jednadžbama na razini točke integracije konačnog elementa. Tako opisani materijali model zahtjeva poznavanje ponašanja materijala.

Točan opis materijalnog modela je od iznimne važnosti za točnost rezultata numeričke simulacije, te se može provjeriti usporedbom rezultata numeričke simulacije s rezultatima dobivenima eksperimentalnim metodama, kao dodatno i pomoću metoda inverznog modeliranja.

U posljednje vrijeme u interesu industrije je proučavanje ponašanja materijala prilikom opterećenja koje odgovara stvarnim slučajevima, tako da je proučavanje zamora materijala pridana posebna važnja u današnjim ispitivanjima.

1.1. Pregled dosadašnjih istraživanja

U literaturi je moguće naći pregled istraživanja procesa deformiranja epruvete za savijanje u tri točke. U radu [1] provedeno je istraživanje procesa deformiranja nodularnog lijeva, pri čemu je ispitano ponašanje epruvete za savijanje u tri točke sa zarezom pri monotonom opterećenju u svrhu ispitivanja lomne žilavosti materijala.

U radu [2] dan je pregled metodologija simulacija i konstitutivnih modela procesa deformiranja i iniciranja pukotine niskocikličkim zamorom.

U radu [3] razvijena je metoda direktne usporedbe numeričkih rezultata na cijelom području diskretizacije s eksperimentalnim rezultatima za test monotonog kvazistatičkog opterećenja epruvete za savijanje u tri točke u svrhu validacije numeričke metode.

1.2. Opis rada i ciljevi

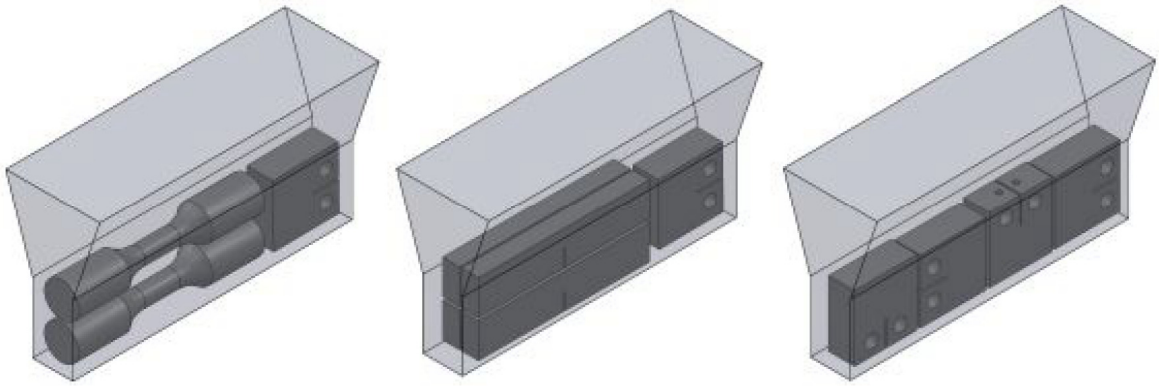
Rad je podijeljen na 6 cjelina. Prva cjelina je uvod u kojem je dan pregled tema rada i problema koje će se pokušati riješiti. Druga cjelina se bavi eksperimentalnim modelom i istraživanjem ponašanja materijala. U drugoj cjelini biti će opisan postupak izvođenja eksperimenata i zabilježavanja potrebnih podataka o materijalu. U trećoj cjelini biti će opisana numerička

formulacija prethodno izvršenih eksperimenata, te će se izvršiti numerička simulacija problema te priprema rezultata za izravnu usporedbu s eksperimentalnim rezultatima. Četvrto poglavlje se bavi validacijom numeričkog modela procesa deformiranja epruvete za savijanje u tri točke usporedbom rezultata numeričke simulacije s rezultatima dobivenima eksperimentalnim ispitivanjem. U petom poglavlju biti će opisan postupak korištenja programskog paketa True Load u svrhu izračunavanja opterećenja iz poznatih deformacija. Šestim poglavljem biti će dan zaključak i osvrt na rad.

U radu će se izvršiti validacija konstitutivnih modela monotonog opterećenja i niskocikličkog zamora konstrukcije. Za potrebe validacije izvršiti će se eksperimenti na epruvetama za savijanje u tri točke. Na temelju rezultata eksperimentalnih istraživanja izračunat će se parametri materijala prema metodama opisanima u [1] i [4], pomoću kojih će se izvršiti numerička simulacija ispitivanog eksperimenta. Kako bi se izvršila direktna usporedba rezultata deformacija, potrebno je snimati polje deformacija na površini epruvete tokom procesa deformiranja pomoću optičkog sustava Aramis 4M. Razvojem i implementacijom algoritma biti će moguće prenijeti podatke o deformaciji izračunatih numeričkom analizom i usporediti ih s rezultatima eksperimenta. Razvoj metode usporedbe rezultata pomoću optičkih metoda mjerenja deformacija na površini uzorka otvara nove mogućnosti na području validacije i rafiniranja materijalnih modela. Korištenjem programskog paketa True Load koji se bazira na tehnici inverznog modeliranja izvršit će se analiza postupka opterećivanja epruveta za savijanje.

2. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE

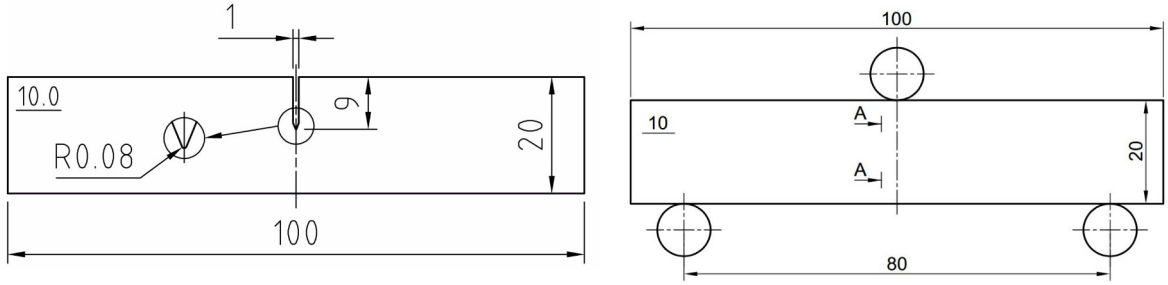
Eksperimentalno ispitivanje je provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku. U ovom poglavlju biti će prikazan postupak i rezultati eksperimentalnog istraživanja procesa deformiranja epruvete za savijanje u tri točke, izrađene od nodularnog lijeva EN-GJS-400-18-LT, kao i epruvete za savijanje u tri točke izrađene od aluminijske legure AlCu5BiPb – T8. Epruvete su izrađene rezanjem iz Y-proba dimenzija 160mm x 40 mm x 23 mm dobivenih lijevanjem, i to isključivo iz donjeg, prizmatičnog dijela predviđenog za uzimanje uzoraka i izradu epruveta, kako je prikazano na Slika 1.



a) **b)** **c)**

Slika 1 Orijentacija epruveta u odljevcima Y-proba: a) Cilindrična, b) SENB i c) CT epruveta [1]

Epruvete za savijanje u tri točke su dimenzioniranje u skladu s normom ASTM E1820, slika 2a), koja propisuje dimenzije epruvete za savijanje u tri točke sa zarezom, Single Edge Notched Bending Specimen (SENB). U ispitivanjima su korištene epruvete sa zarezom prema normi te epruvete za savijanje u tri točke bez zareza, slika 2b).



a) b)

Slika 2 Oblik i dimenzije epruveta: a) SENB epruveta za ispitivanje u tri točke, b) Epruveta bez zareza za ispitivanje u tri točke

Eksperimenti su provedeni na kvazistatičkoj kidalici (MESSPHYSIK BETA 50-5, kapaciteta ±50kN), slika 3a), kao i na dinamičkoj kidalici (LFV 50-HH; Walter, Bai AG, kapaciteta ±50kN), slika 3b), na sobnoj temperaturi. Pri izvođenju eksperimenata korišten je optički sustav ARAMIS 4M koji se bazira na tehnologiji korelacije digitalne slike (DIC – Digital Image Correlation) u svrhu snimanja pomaka na površini epruvete.

Slika 3 Kidalice: a) MESSPHYSIK BETA 50-5, b) LFV 50-HH; Walter, Bai AG

U radu je namijenjeno provesti ispitivanje ponašanja materijala nodularnog lijeva pri monotonom i cikličkom deformiranju. Osim cikličkih ispitivanja, potrebno je i ispitati ponašanje nodularnog lijeva pri statičkom vlačnom testu radi utvrđivanja osnovnih parametara materijala. Uz ispitivanje nodularnog lijeva, provedeno je i ispitivanje na savijanje u tri točke na epruvetama izrađenima od aluminijske legure.

2.1. Savijanje u tri točke aluminijske epruvete bez zareza

U svrhu provođenja šireg spektra ispitivanja i validacije postupka korištenog pri modeliranju procesa deformiranja nodularnog lijeva, provedeno je ispitivanje deformiranja epruvete bez zareza za savijanje u tri točke izrađene od aluminjske legure AlCu5BiPb – T8. Osim testa

savijanja, u radu [1] autor je proveo i statičko vlačno ispitivanje, potrebno za utvrđivanje osnovnih parametara materijala. Udjel pojedinih elemenata u kemijskom sastavu legure ALCU5BiPB –T8 dan je u tablici (1).

Tablica 1 Udjeli pojedinih elemenata u kemijskom sastavu aluminijske legure AlCu5BiPb – T8 u (%)

Si	Cu	Fe	Pb	Bi	Zn	Mn	Mg
0,2	5,3	0,7	0,3	0,3	0,03	0,03	0,01

Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja provedenog prema DIN normi [5] prikazani na slici 4 prikazuju ovisnost inženjerskog i stvarnog naprezanja o istezanju s pripadnim parametrima za Ramberg-Osgoodov materijalni model opisan konstitutivnom jednadžbom:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{\frac{1}{n}}, \tag{1}$$

gdje su K i n parametri materijala, a σ i E naprezanje i Youngov modul elastičnosti. U ovom konstitutivnom modelu izraz (1) predstavlja aditivnu dekompoziciju tenzora deformacija na elastični i plastični dio:

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}, \tag{2}$$

gdje je elastični dio deformacije:

$$\varepsilon_{el} = \frac{\sigma}{E}, \tag{3}$$

a plastični dio deformacije je:

$$\varepsilon_{pl} = \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{\frac{1}{n}}. \tag{4}$$

Za cirkularnu epruvetu za vlačno ispitivanje, opterećenu silom F, i početne površine poprečnog presjeka A_0, inženjersko naprezanje iznosi:

$$\sigma_E = \frac{F}{A_0}. \tag{5}$$

Ukoliko je početna mjerna duljina epruvete zadana s l_0, a konačna s l, inženjerska deformacija iznosi:

$$\varepsilon_E = \frac{l - l_0}{l_0}. \tag{6}$$

Stvarna deformacija je pri tome definirana kao inkrement produljenja *dl* podijeljen sa konačnom duljinom *l.*

$$d\varepsilon_T = \frac{dl}{l}. \tag{7}$$

Nakon provedene integracije i antilogaritmiranja te uvrštavanja jednadžbe (6) u jednadžbu (7), stvarnu deformaciju je može zapisati kao:

$$\varepsilon_T = \ln\left(1 + \varepsilon_E\right). \tag{8},$$

Prema [6] i [7] elastična deformacija uzrokuje promjenu u volumenu materijala, dok do velikih, odnosno plastičnih deformacija dolazi bez promjene volumena materijala, iz čega slijedi:

$$V_0 = V \Rightarrow A_0 l_0 = Al \Rightarrow \frac{A_0}{A} = \frac{l}{l_0} \Rightarrow A = \frac{A_0 l}{l_0}. \tag{9}$$

Ukoliko se jednadžbu (9) uvrsti u jednadžbu (7) te izvrši antilogaritmiranje dobije se:

$$\varepsilon_T = \ln\frac{l}{l_0} = \ln\frac{A_0}{A}. \tag{10}$$

Stvarno naprezanje je definirano kao omjer trenutne sile *F* i trenutne površine poprečnog presjeka epruvete *A*:

$$\sigma_T = \frac{F}{A}, \tag{11}$$

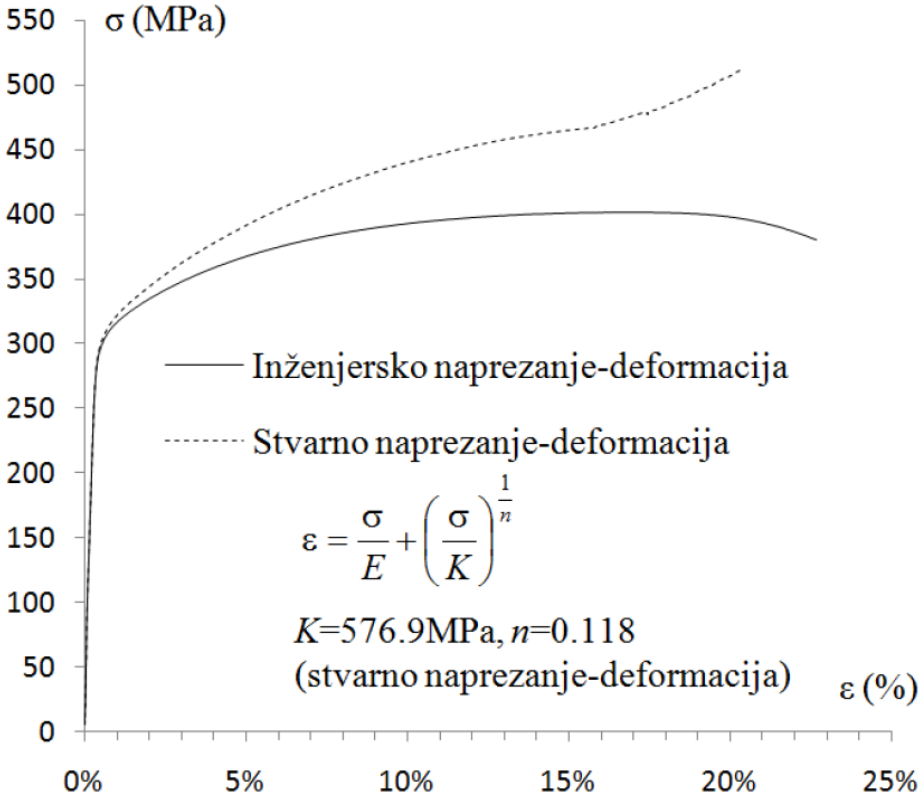
te se primjenom uvjeta konstantnog volumena može zapisati kao:

$$\sigma_T = \frac{Fl}{A_0 l_0} = \sigma_E(1 + \varepsilon_E). \tag{12}$$

Iznos plastične deformacije za neko stanje naprezanja σ_y u plastičnom području stoga glasi:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_T^{el} + \varepsilon_T^{pl} \Rightarrow \varepsilon_T^{pl} = \varepsilon_T - \varepsilon_T^{el} \Rightarrow \varepsilon_T^{pl} = \varepsilon_T - \frac{\sigma_y}{E}. \tag{13}$$

Pomoću jednadžbi (1) do (13) izrađen je dijagram stvarnih naprezanja i istezanja na slici 3, te su izračunati podatci o ponašanju materijala u tablici 2.

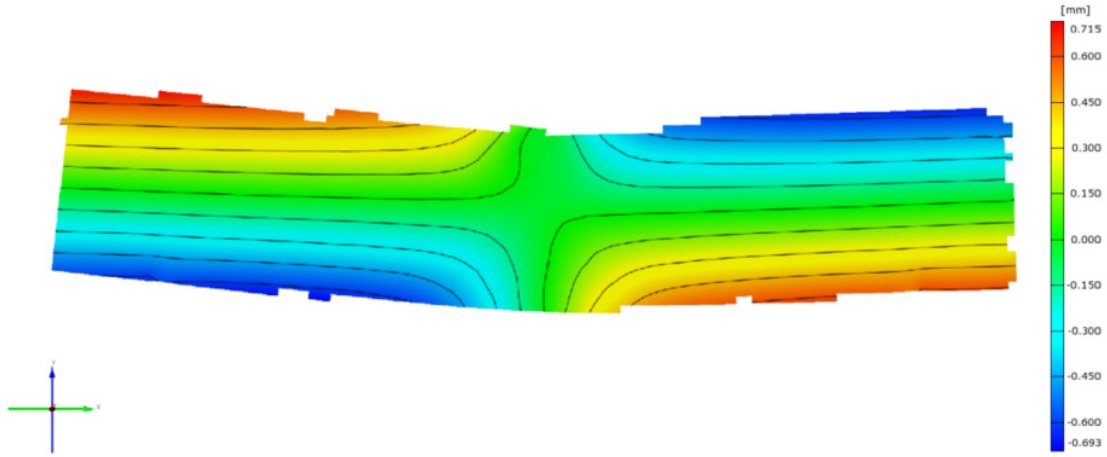


Slika 4 Dijagram naprezanje istezanje [1]

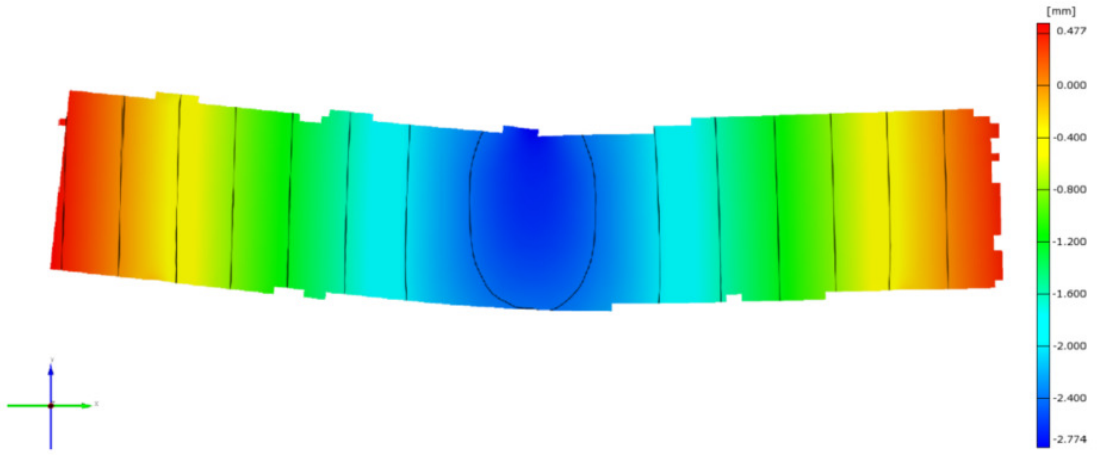
Tablica 2 Mehanička svojstva aluminijske legure AlCu5BiPb – T8 [1]

Granica razvlačenja $R_{p0,2}$, MPa	Vlačna čvrstoća R_m, MPa	Istezljivost (%)	Modul elastičnosti E, GPa	Poissonov omjer, ν
305	401	22	76,7	0,33

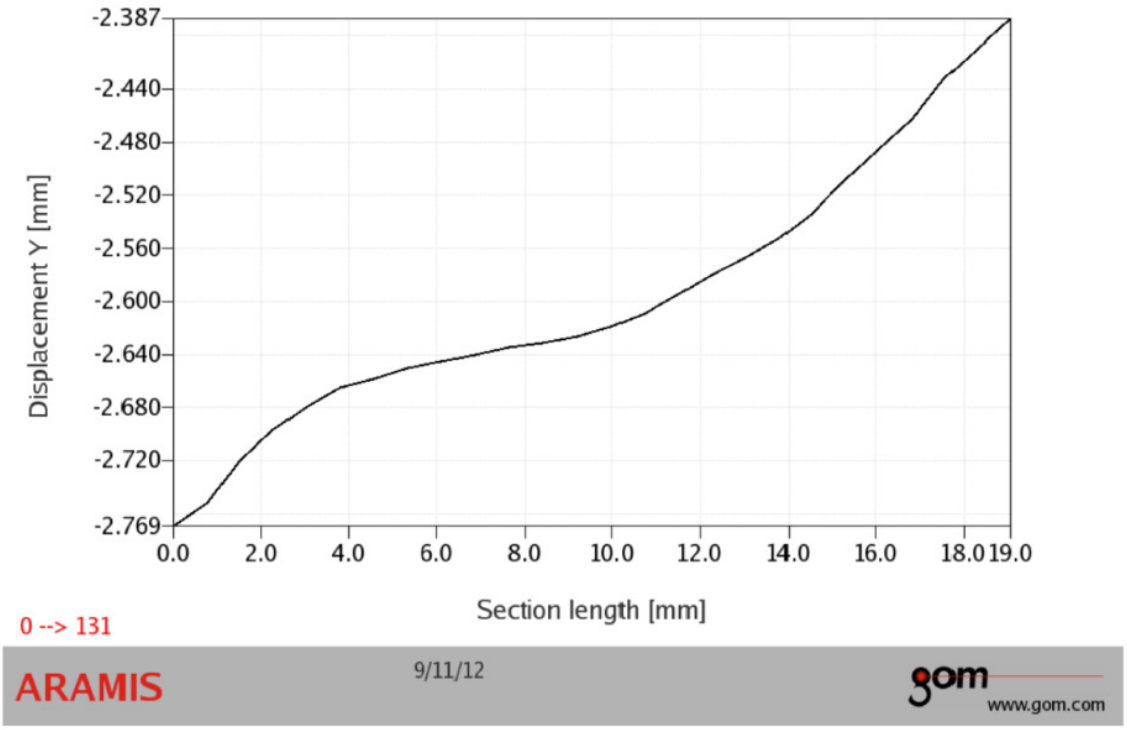
Test savijanja epruvete obavljen je na kvazistatičkoj kidalici pri maksimalnom opterećenju od 23000 N, te je za potrebe praćenja deformacija korištena tehnologija korelacije digitalne slike pomoću sustava ARAMIS 4M. Na slici 5 dani su rezultati pomaka površine epruvete u smjeru horizontalne, *x* osi. Iz rezultata pomaka vidljivo je da dolazi do pomaka rubova epruvete, no da na području presjeka A-A, slika 2b) ne dolazi do pomaka na površini epruvete u smjeru osi x. Na slici 6 dani su rezultati pomaka površine epruvete u smjeru vertikalne, y osi. Raspodjela pomaka je pravilna i na području presjeka A-A dolazi do najvećeg progiba epruvete. Nadalje, na slici 7 dan je dijagram progiba epruvete na presjeku A-A.



Slika 5 Eksperimentalni rezultati pomaka u smjeru *x* osi, mm



Slika 6 Eksperimentalni rezultati pomaka u smjeru *y* osi, mm



Slika 7 Dijagram pomaka u smjeru *y* osi po presjeku A-A epruvete na slici 2b)

2.2. Statičko vlačno ispitivanje cilidrične epruvete

Statičko vlačno ispitivanje cilindrične epruvete obavljeno je u radu [1], za potrebe izračuna osnovnih parametara materijala. Ispitivanje je provedeno na cilindričnoj epruveti izrađenoj prema normi ASTM E606 [8], koja propisuje uvjete za cikličko ispitivanje materijala, odnosno za proučavanje efekta očvršćenja materijala zbog zahtjeva ispitivanja rada, no dimenzionirane su tako da zadovoljavaju i uvjete norme za statičko vlačno ispitivanje [5].

U radu [1] također je provedeno ispitivanje materijala nodularnog lijeva EN-GJS-400-18-LT, izrađenog sa više tehnologija lijevanja. Udjeli pojedinih elemenata u nodularnom lijevu ovise o tehnologiji lijevanja, te su prikazane u tablici 3 :

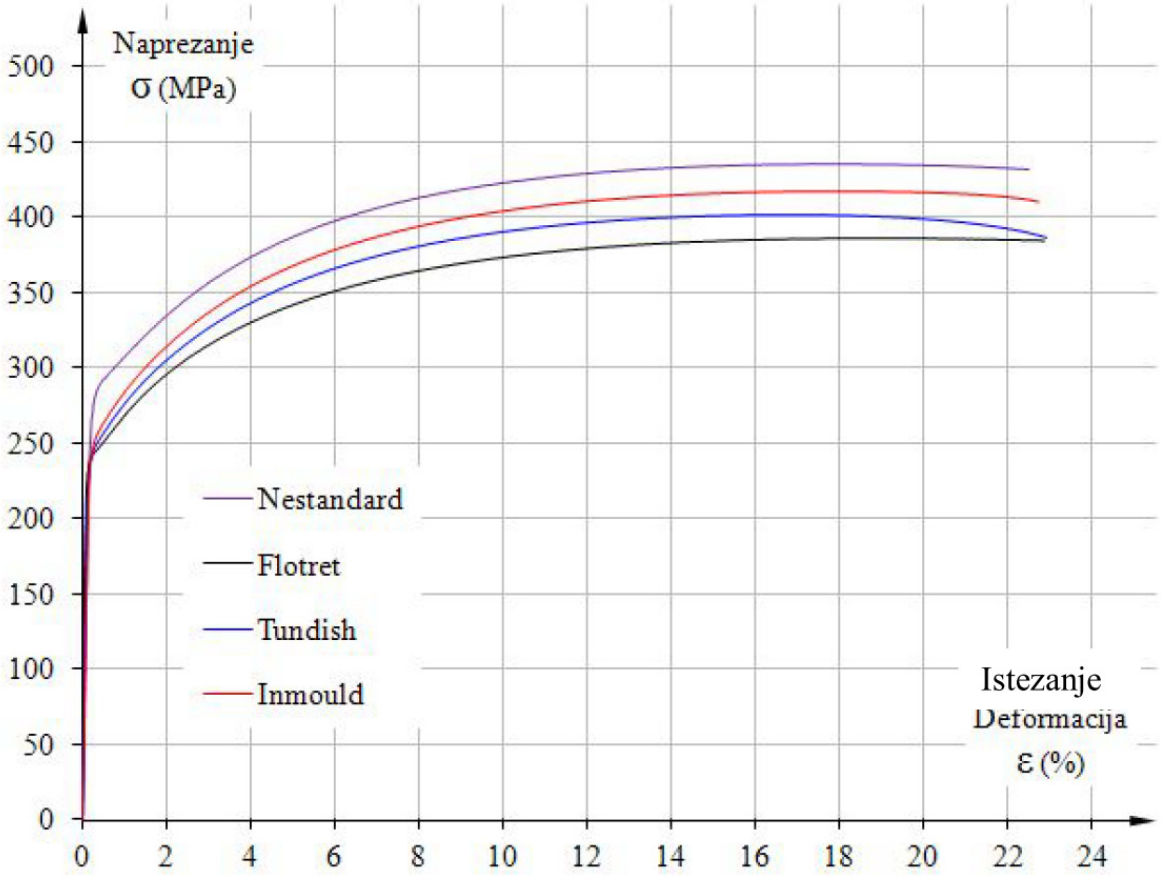
Tablica 3 Udjel pojedinih elemenata u kemijskom sastavu NL (%) ovisno o seriji materijala

Serija materijala	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mg
Nestandardni	3,6	2,122	0,204	0,023	0,004	0,978	0,046
Flortret	3,6	2,044	0,112	0,023	0,003	0,619	0,037
Tundish	3,6	1,968	0,114	0,024	0,003	0,572	0,039
Inmould	3,6	1,976	0,422	0,021	0,002	0,674	0,033

Prilikom provođenja statičkih vlačnih ispitivanja istezanje se mjerilo beskontaktnim video ekstenzometrima, kao i kontaktnim 10 mm ekstenzometrima (model EXA -10), tvrtke Messphysik. Beskontaktnim videoekstenzometrima omogućeno je mjerenje Poissonovog omjera, te stvarnog naprezanja, čime se omogućuje računanje dijagrama stvarnog naprezanja i istezanja, kao i klasičnog inženjerskog dijagrama naprezanja i istezanja, koji je dan na slici 8 za sve četiri serije nodularnog lijeva. Mehanička svojstva nodularnog lijeva dana su u tablici 4.

Tablica 4 Mehanička svojstva nodularnog lijeva EN-GJS-400-18-LT

Serija materijala	$R_{p0.2}$, MPa	R_m, MPa	E, GPa	K, MPa	n
Nestandardna	286,4	435,1	163,4	700,4	0,1726
Flortret	244,0	385,8	180,0	630,4	0,1809
Tundish	250,0	402,0	215,9	666,7	0,1869
Inmould	255,8	417,2	199,9	691,3	0,1868



Slika 8 Dijagram inženjerskog naprezanja – istezanja [1]

Rezultati statičnog vlačnog ispitivanja cilindrične epruvete će biti iznimno korisni u daljnjim ispitivanjima ponašanja deformiranja nodularnog lijeva.

2.3. Savijanje u tri točke SENB epruvete izrađene od nodularnog lijeva

Eksperimentalno ispitivanje nije bilo moguće provesti uslijed kvara na dinamičkoj kidalici LFV 50-HH; Walter, Bai AG koji nije bilo moguće otkloniti u periodu izrade ovog rada.

3. NUMERIČKA FORMULACIJA

Numerička formulacija korištena u izradi ovog rada bazira se na metodi konačnih elemenata. Metoda konačnih elemenata zasniva se na zakonima mehanike kontinuuma, gdje se konstrukcija s beskonačnim brojem stupnjeva slobode diskretizira na niz manjih, određenim zakonitostima međusobno povezanih, dijelova, konačnih elemenata, s ograničenim brojem stupnjeva slobode. Na ovaj način, problem sastavljen od beskonačnog broja diferencijalno malih dijelova svodi se na konačan broj elemenata zadanih dimenzija, opisanih konstitutivnim modelima i koji međudjeluju prema jednadžbama kontinuiteta. Međusobna interakcija konačnih elemenata moguća je putem čvorova, točaka raspodijeljenih po rubovima konačnih elemenata. Raspodjela naprezanja, deformacija i pomaka unutar i duž rubova elementa opisana je pomoću interpolacijskih funkcija. Interpolacijske funkcije također moraju zadovoljavati rubne uvjete duž rubova elemenata kako bi numerički model konstrukcije što vjernije opisao ponašanje stvarnog konstrukcijskog sustava. Interpolacijske funkcije koje opisuju ponašanje i zakonitosti konačnog elementa su obične algebarske jednadžbe, koje mijenjaju jednadžbe mehanike kontinuuma, dakle parcijalne diferencijalne i integralne jednadžbe. Korištenjem običnih algebarskih jednadžbi se olakšava i ubrzava rješavanje postavljenog konstrukcijskog problema, te se omogućava lakše, brže i učinkovitije korištenje računala za rješavanje problema.

U ovom radu koristit će se jedan od brojnih programskih paketa dostupnih za rješavanje problema metodom konačnih elemenata, ABAQUS 6.12 [9], uz dodatak True Load [10] koji se temelji na tehnici inverznog modeliranja, i koji je dio programskog paketa Fe-Safe 6.4 [11], koji se koristi u proračunu zamora konstrukcija.

3.1. Abaqus 6.12

Programski paket Abaqus 6.12 je jedan od komercijalnih programskih paketa za numeričke simulacije. Programski paket se sastoji od tri osnovne komponente, predprocesora, procesora i postprocesora podataka. Predprocesor je dio programskog paketa koji služi definiranju geometrije, rubnih uvjeta, parametara materijala, mreže konačnih elemenata i različitih modula koje je moguće rješavati, kao i tražene veličine. Predprocesor služi kako bi korisnik pripremio problem koji želi riješiti pomoću grafičkog sučelja i tako napisao ulaznu, input datoteku. Korištenje predprocesora nije nužno za rad u programskom paketu Abaqus, jer je moguće napisati ulaznu datoteku s bilo kojim tekstualnim procesorom, ukoliko korisnik poznaje

sintaksu pisanja ulazne datoteke. Procesor je dio programskog paketa koji tumači ulaznu datoteku te zapravo rješava problem. Na temelju konačnih elemenata zadanih u ulaznoj datoteci, procesor stvara globalnu matricu krutosti i globalni vektor opterećenja. Globalna matrica krutosti i globalni vektor opterećenja zajedno s nepoznanicom globalnog vektora pomaka stvaraju globalnu jednadžbu konačnog elementa i time sustav algebarskih jednadžbi kojeg procesor potom rješava i kako bi dobio sve tražene veličine zadane u ulaznoj datoteci. Globalna jednadžba konačnog elementa matrično zapisana glasi:

$$\boldsymbol{K} \cdot \boldsymbol{V} = \boldsymbol{R}, \tag{14}$$

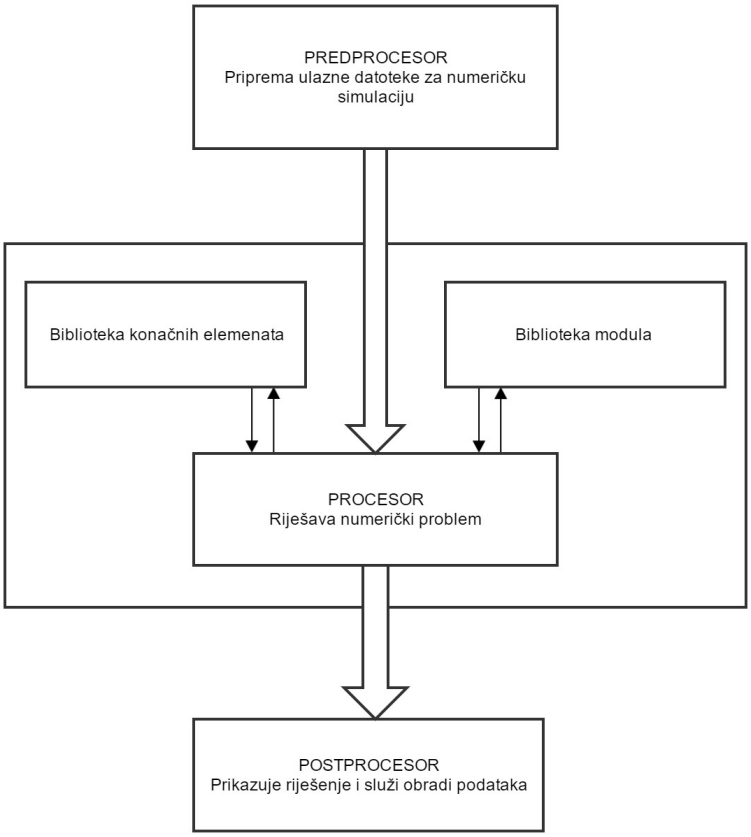
gdje su:

$\boldsymbol{K}$ **–** globalna matrica krutosti numeričkog modela,

$\boldsymbol{V}$ – globalni vektor stupnjeva slobode numeričkog modela i

$\boldsymbol{R}$ – globalni vektor ukupnih čvornih sila numeričkog modela.

Procesor stvara .odb datoteku koja sadržava tražena rješenja sustava. Postprocesor služi kako bi se rješenja izračunata i zapisana u .odb datoteku mogla što jednostavnije i brže protumačiti. Postprocesor generira grafički prikaz rezultata numeričke simulacije te pruža korisniku alate za tumačenje i manipuliranje prikazom i zapisom traženih rezultata simulacije. Na slici 9 prikazan je shematski prikaz generičkog programa za rješavanje numeričkih simulacija.



Slika 9 Shematski prikaz programa za rješavanje numeričkih simulacija

Programski paket Abaqus 6.12 se sastoji od dva osnovna modula za analizu numeričkih problema, Abaqus/Standard i Abaqus/Explicit. Osim ta dva osnovna paketa za numeričku analizu konstrukcija, postoji i dodatni Abaqus/CFD modul za rješavanje problema računalne dinamike fluida.

Abaqus/Standard koristi tehnologiju rješavanja idealnu za simulacije statičkih problema i dinamičkih problema koji se događaju pri maloj brzini, gdje je bitno što točnije naći rješenja naprezanja i deformacija. Abaqus/Explicit je produkt za analizu konačnim elementima namijenjen simulaciji kratkih tranzijentnih dinamičkih događaja. Dok Abaqus/Standard rješava sustav jednadžbi implicitno u svakom koraku rješenja, Abaqus/Explicit traži rješenje u malom vremenskom priraštaju bez rješavanja globalnih jednadžbi sustava u svakom koraku rješenja.

Kako bi se realizirala numerička simulacija u programskom paketu Abaqus, sa radom se započinje u predprocesoru Abaqus/CAE. Predprocesor je, radi olakšavanja rada korisnicima, podijeljen u smislene cjeline, module, te u sebi sadrži vezu na postprocesor. U svakom modulu korisnik zadaje određene parametre numeričke simulacije:

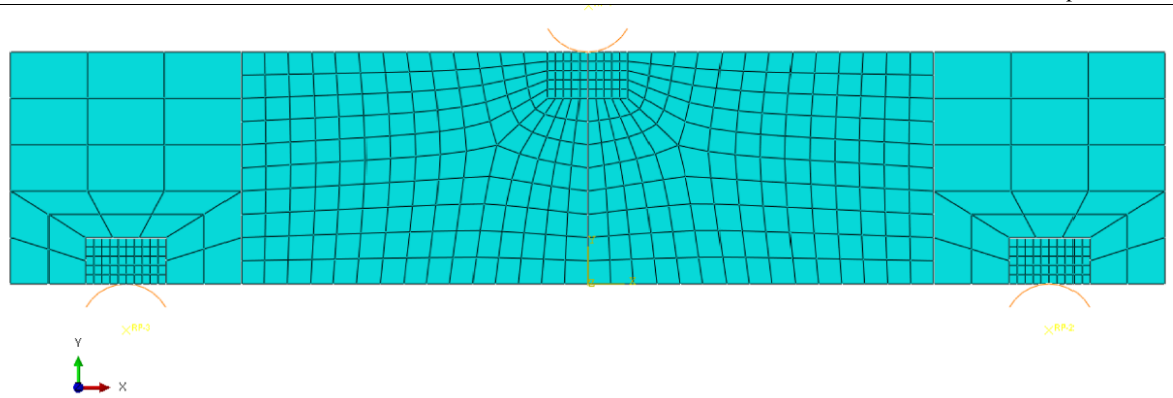
1. Part modul – služi modeliranju geometrije konstrukcije.
2. Property modul – služi zadavanju materijalnih parametara i geometrijskih presjeka.
3. Assembly modul – služi povezivanju dijelova konstrukcije u sklop.
4. Step modul – služi odabiru vrste analize, kreiranju i definiranju koraka analize i definiranju izlaznih podataka.
5. Interaction modul – služi dodjeljivanju veza između dijelova sklopa.
6. Load modul – služi dodjeljivanju rubnih uvjeta i opterećenja.
7. Mesh modul – služi odabiru veličine, vrste i raspodjele konačnih elemenata po geometriji sklopa.
8. Job modul – služi kreiranju zadatka koji se iz ovog modula šalje procesoru na analizu.
9. Visualization modul – otvaranjem visualization modula pokreće se postprocesor programskog paketa Abaqus 6.12 te se korisniku omogućuje manipuliranje rezultatima.
10. Sketch – služi skiciranju dvodimenzionalnih nacrta.

3.2. Modeliranje i diskretizacija epruvete za savijanje u tri točke

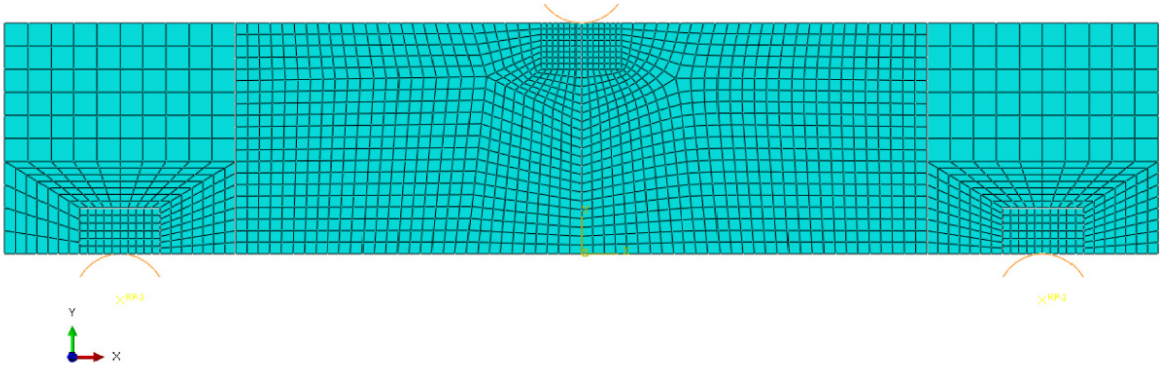
Modeliranje geometrije epruvete za savijanje u tri točke izvedeno je u programskom paketu Abaqus/CAE. Osim geometrije epruvete, potrebno je modelirati i kontaktne površine i kontaktne plohe. Za diskretizaciju epruvete odabrana su dva načina. Prvi način je diskretizacija pomoću dvodimenzijskih konačnih elemenata za ravninsko stanje naprezanja, CPS4, jer se, radi usporedbe s eksperimentom, prati deformiranje površine epruvete, te će se valjci kidalice diskretizirati pomoću analitičkih krutih ploha, jer posjeduju mnogo veću krutost no materijal epruvete, te su njihove deformacije zanemarivih veličina i utjecaja na rezultate simulacije. Drugi način je diskretizacija pomoću trodimenzijskih heksaedarskih konačnih elemenata C3D8, uz postavljanje „skin" površine na površinu epruvete koja se diskretizira pomoću ljuskastih konačnih elemenata S4, radi praćenja deformacija na površini epruvete i mogućnosti provjere modela putem inverznog modeliranja. Valjci kidalice će se modelirati pomoću analitičkih krutih ploha, iz istih razloga. Opterećenje na epruvetu je zadano preko koncentrirane sile koja djeluje putem površine valjka na površinu epruvete. Rubni uvjeti pomaka epruvete su zadani preko kontakta s površinama valjaka na koje se epruveta oslanja, a koji nemaju slobodne stupnjeve slobode, kako bi se što realnije prikazalo opterećenje i rubni uvjeti pri eksperimentalnim uvjetima i time približilo rezultatima eksperimenata.

Na slikama 10 do 12 prikazana je geometrija epruvete za savijanje diskretizirana dvodimenzijskim elementima, za različite brojeve stupnjeve slobode, kako bi se provela provjera konvergencije rješenja sustava. Uz geometriju epruvete prikazani su i modelirani valjci kidalice koji se nalaze u kontaktu s epruvetom. Modeliranje kontakata izvršeno je u modulu *Interaction*, pomoću svojstva kontakta površina na površinu. Prodiranje materijala valjaka u epruvetu regulira se putem metode kažnjavanja (*penalty metoda*) sa zadanim faktorom trenja μ = 0,1. Epruveta je diskretizirana pomoću linearnih dvodimenzijskih konačnih elemenata za ravninsko stanje naprezanja, koji se u Abaqus biblioteci naziva CPS4, slika 15a).

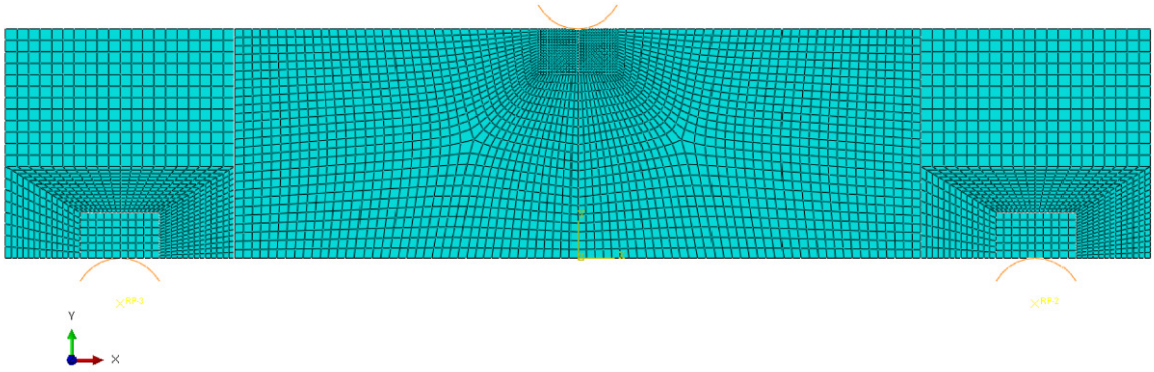
Na slikama 13 i 14 prikazana je geometrija epruvete za savijanje diskretizirana trodimenzijskim elementima. Korišteni su linearni heksaedarski C3D8 elementi s osam čvorova prikazani na slici 15b) i ljuskasti S4 s četiri čvora elementi, slika 15c), te je kontakt valjaka kidalice s površinom epruvete modeliran na isti način kao i dvodimenzijski problem. Epruveta je diskretizirana s više brojeva stupnjeva slobode kako bi se proučila konvergencija rješenja sustava. Ljuskasti elementi su korišteni radi provođenja simulacije korištenjem modula True Load, te su na diskretiziranu geometriju epruvete nanijeti korištenjem Skin svojstva Property modula, slika 14.



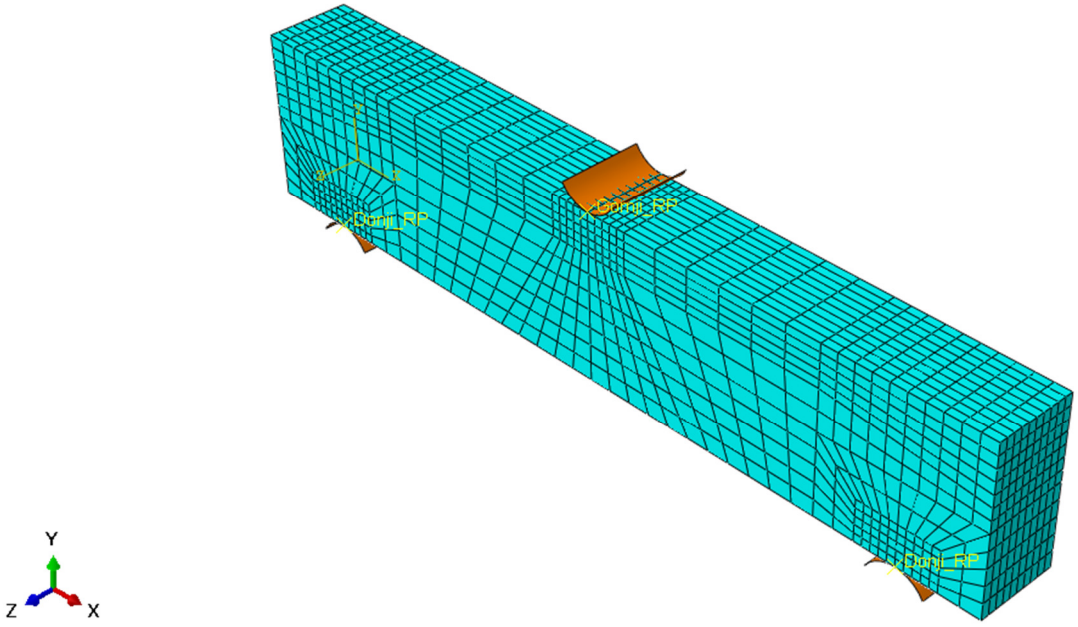
Slika 10 Epruveta diskretizirana s 506 CPS4 konačna elementa



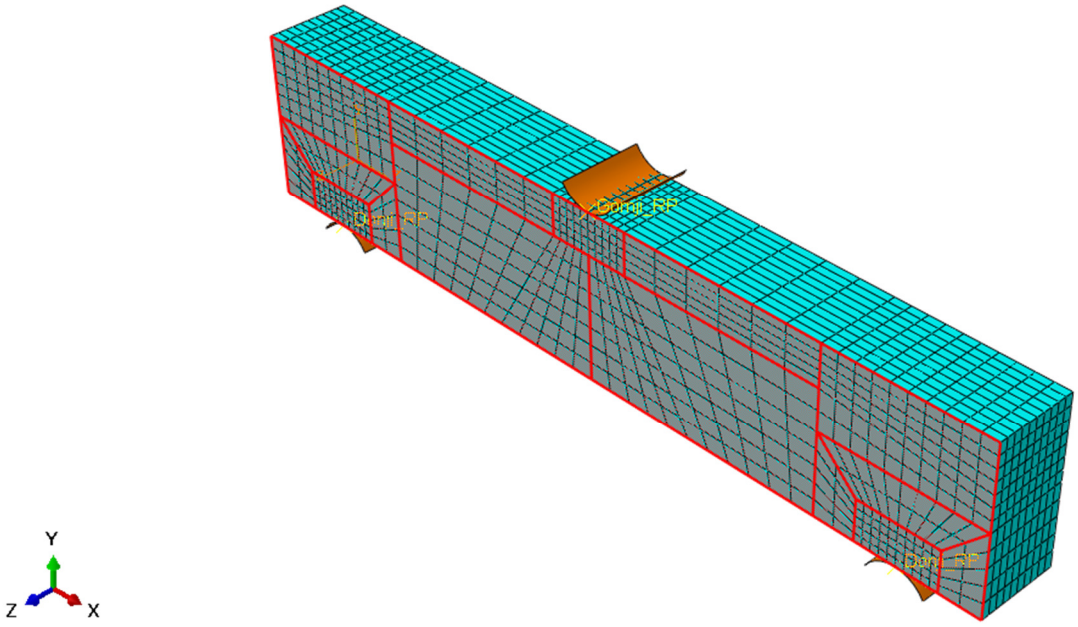
Slika 11 Epruveta diskretizirana s 1968 CPS4 konačna elementa



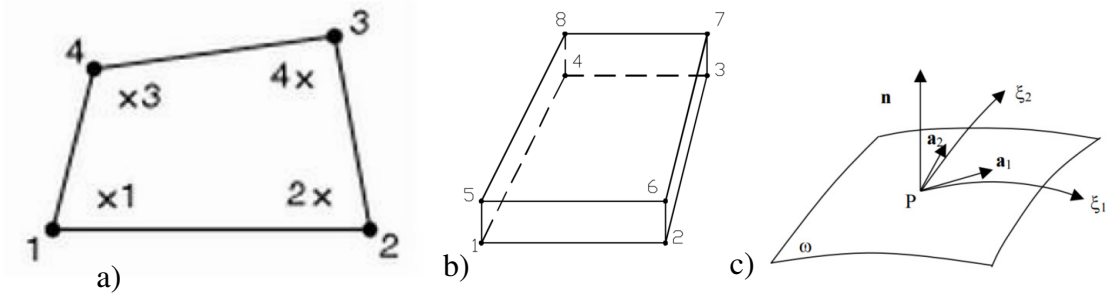
Slika 12 Epruveta diskretizirana s 4522 CPS4 konačna elementa



Slika 13 Epruveta diskretizirana s 5840 linearna heksaedarska elementa C3D8 i 584 ljuskastih elemenata S4



Slika 14 Prikaz površine modelirane pomoću Skin modula



Slika 15 Prikaz konačnog elementa: a) CPS4, b) C3D8 i c) S4

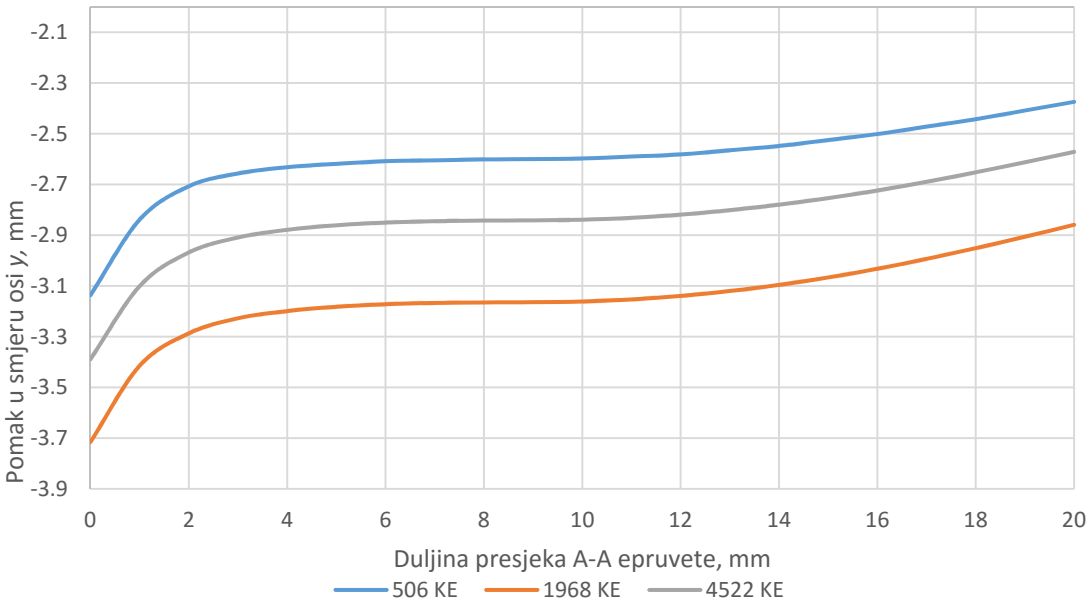
Materijalni parametri dobiveni su iz rezultata eksperimentalnih ispitivanja, prikazanih u tablicama 2 i 4. Za potrebe provjere valjanosti numeričke metode u elastoplastičnom području, za aluminijsku leguru AlCu5BiPb – T8 izračunati su parametri materijala u plastičnom području te su dani u tablici 5.

Tablica 5 Ovisnost iznosa plastične deformacije o naprezanju materijala AlCu5BiPb – T8

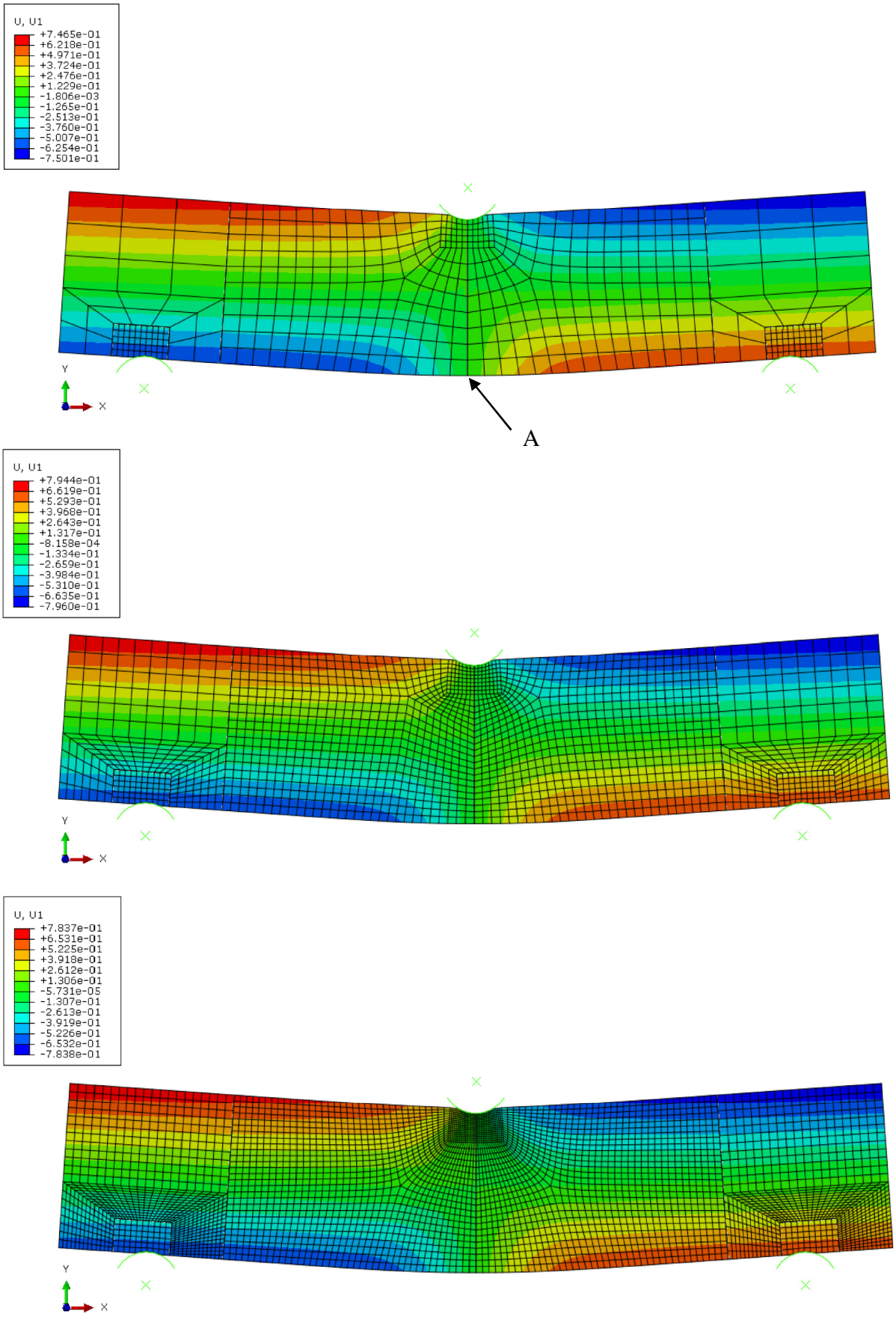
Naprezanje, MPa	Plastična deformacija, %
305	0
310	0,005
320	0,006
330	0,008
340	0,011
350	0,014
360	0,018
370	0,023
380	0,029
390	0,036
400	0,044

3.3. Test savijanja epruvete bez zareza izrađene od aluminijske legure AlCu5BiPb – T8

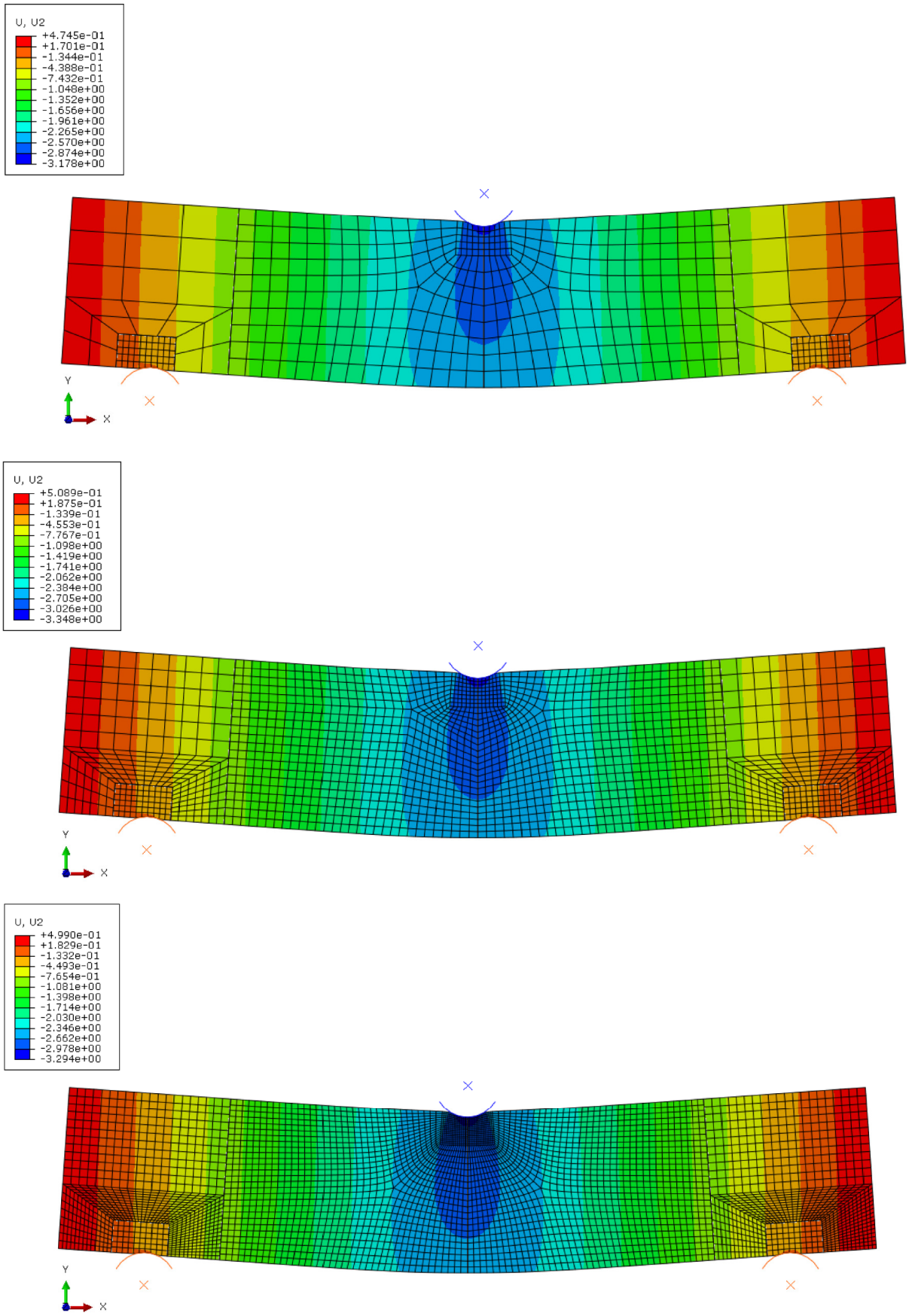
Numerička simulacija testa savijanja u tri točke epruvete bez zareza izrađene od aluminijske legure provedena je pomoću dvodimenzijskih konačnih elemenata CPS4. Epruveta je opterećena silom od 23000 N preko središnjeg valjka kako bi se zadovoljili uvjeti ostvareni eksperimentalnim ispitivanjem. Zbog praćenja polja pomaka na čitavoj epruveti, prikazani su rezultati pomaka u smjeru horizontalne, *x* osi na slici 17, i vertikalne, *y* osi, slika 18, za sve gustoće mreže konačnih elemenata. Također, prikazan je dijagram pomaka presjeka A-A po *y* osi na slici 16, kojeg se može kvantitativno i kvalitativno usporediti s pomacima presjeka dobivenima eksperimentalnim metodama na slici 8. Konvergencija rješenja će se kontrolirati u točki A na slici 17, za slučaj pomaka u smjeru osi *x* i *y*.



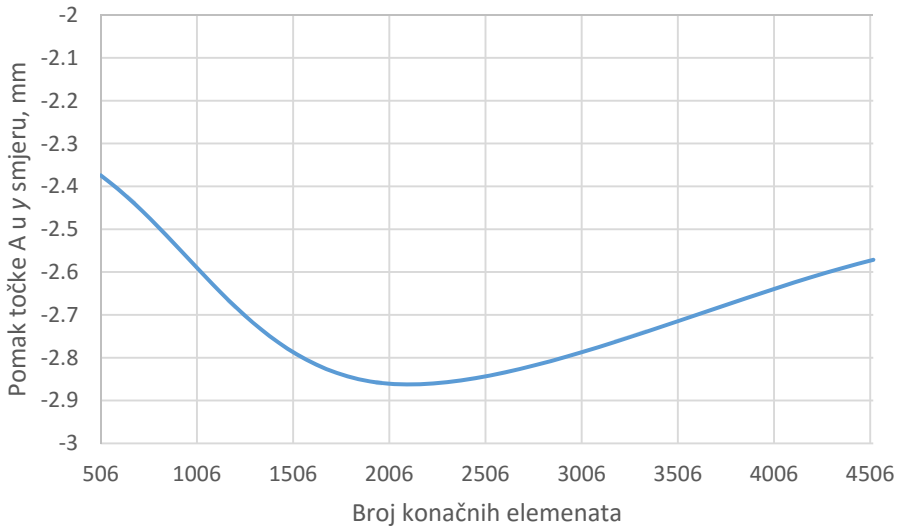
Slika 16 Dijagram pomaka epruvete u smjeru osi *y* na duž presjeka A-A



Slika 17 Pomaci u smjeru osi *x*, mm



Slika 18 Pomaci u smjeru osi *y*, mm



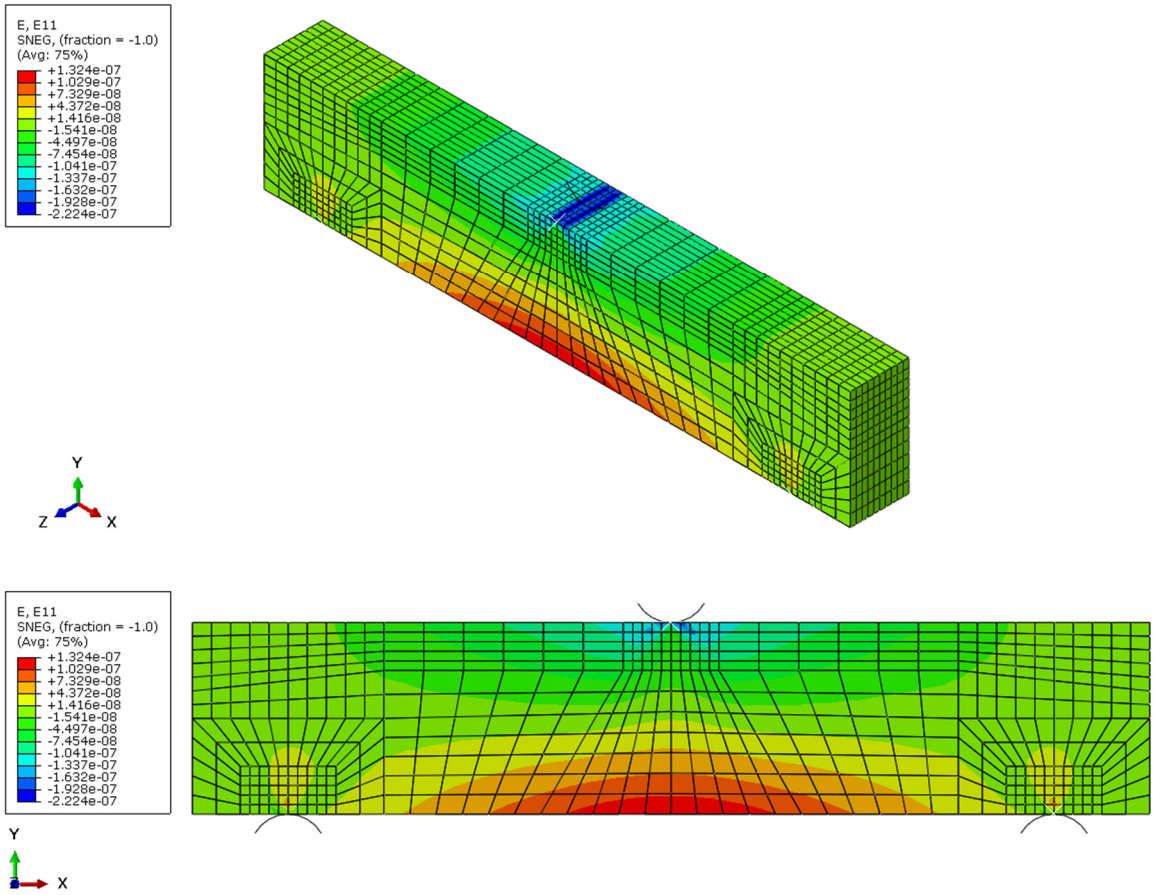
Slika 19 Konvergencija rješenja savijanja epruvete iz aluminijske legure

Iz slika 16 i 19 vidljivo je da konvergencija rješenja savijanja epruvete nije monotona već da s povećanjem broja konačnih elemenata prvo dolazi do otklona, te da se zatim vrati ka početnom rješenju. Kod eksperimentalnog mjerenja, pomak točke *A* u smjeru osi *y* iznosio je 2, 38 mm, dok je kod numeričke simulacije, za slučaj najgrublje mreže s najmanje stupnjeva slobode, pomak točke *A* u smjeru osi *y* iznosio 2,37 mm. Na slikama 17 i 18 potrebno je primjetiti kako dolazi do prodiranja materijala valjaka u materijal epruvete i time do lokalnih plastifikacija i većih deformacija no što je slučaj u drugim dijelovima epruvete. Na slici 17 vidljivo je da na presjeku *A-A* ne dolazi do pomaka epruvete u smjeru osi *x*, što se podudara s eksperimentalnim mjerenjima.

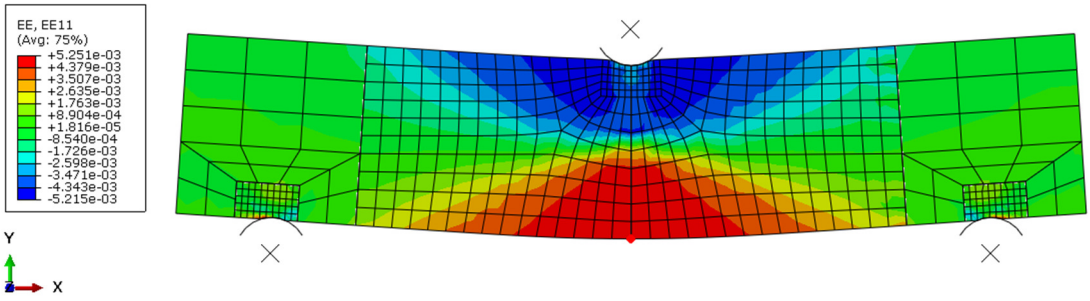
3.4. Test savijanja epruvete bez zareza izrađene od nodularnog lijeva EN-GJS-400-18-LT

Numerička simulacija testa savijanja u tri točke epruvete izrađene od nodularnog lijeva bez zareza provedena je pomoću trodimenzijskih heksaedarskih konačnih elemenata C3D8 i trodimenzijskih ljuskastih elemenata S4. Radi nedostatka eksperimentalnih podataka za usporedbu sa simulacijom, modelirano je jedinično opterećenje kako bi se mogla provesti verifikacija programskog paketa True Load, koji se bazira na tehnologiji inverznog modeliranja. Kako bi se verificiralo metodu, potrebno je epruvetu opteretiti i pomoću sile proizvoljnog iznosa, no dovoljno malenog da ne dođe do velikih pomaka i velikih deformacija, tako da je odabran iznos sile od 850 N. Za razliku od simulacije epruvete izrađene od

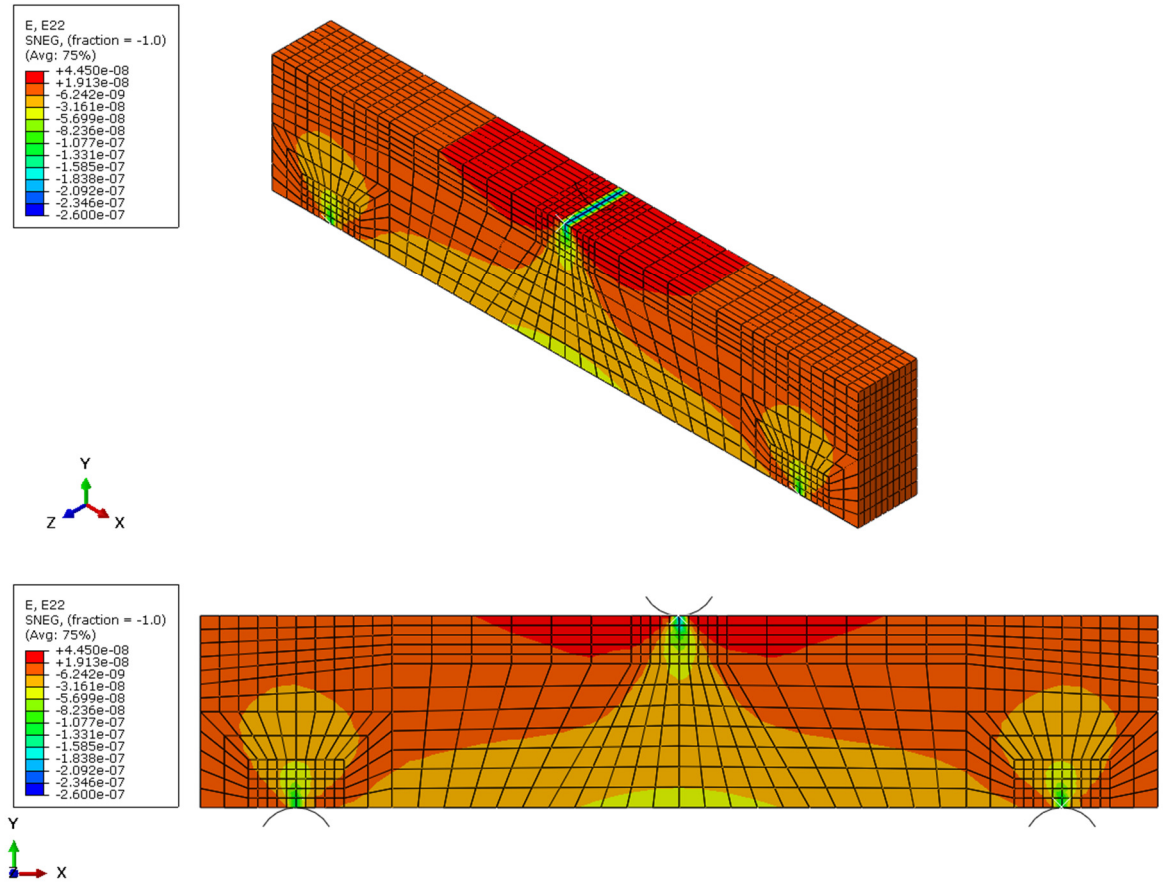
aluminijske legure, zbog toga što neće biti provođena usporedba polja pomaka na čitavoj površini epruvete, već će se model koristiti za verifikaciju True Load-a, traže se rezultati polja ukupne deformacije epruvete, u smjerovima osi *x*, slika 20, te osi *y*, slika 22. Na slikama 21 i 23 dani su rezultati deformacije za analizu savijanja aluminijske epruvete, kako bi se provjerila sličnost raspodjele deformacija za dvodimenzijski i trodimenzijski slučaj.



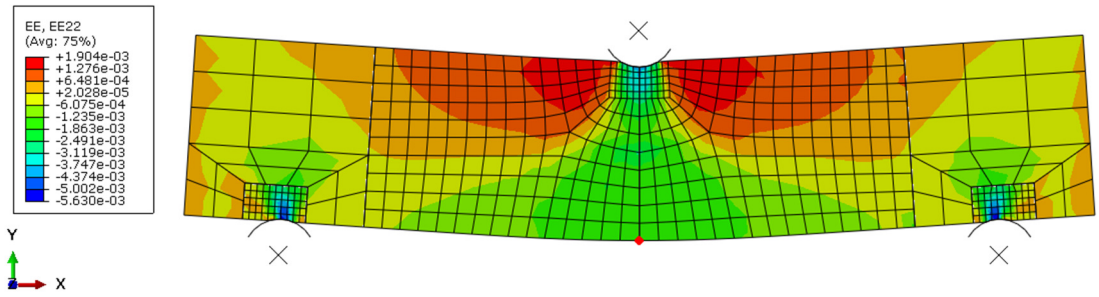
Slika 20 Rezultat ukupne deformacija u smjeru osi *x* za jedinično opterećenje



Slika 21 Raspodjela elastičnih deformacija u smjeru osi *x* za opterećenje od 23000 N aluminijske epruvete



Slika 22 Rezultati ukupne deformacija u smjeru osi *y* za jedinično opterećenje



Slika 23 Raspodjela elastičnih deformacija u smjeru osi *y* za opterećenje od 23000 N aluminijske epruvete

Usporedbom raspodjela deformacija u slučaju jediničnog opterećenja na epruvetu diskretiziranu s trodimenzijskim konačnim elementima i deformacija u slučaju opterećenja od 23000 N na epruveti diskretiziranoj s dvodimenzijskim konačnim elementima može se zaključiti da postoji trend raspodjele deformacija u smjerovima glavnih osi koji je za oba slučaja jednak.

4. PRIMJENA ALGORITMA ZA VALIDACIJU NUMERIČKE SIMULACIJE METODOM KORELACIJE DIGITALNE SLIKE

Korelacija digitalne slike (DIC – Digital image correlation) je metoda koja koristi digitalnu sliku za mjerenje cijelog polja pomaka, te je kao takva sve više korištena u polju identifikacije i validacije konstitutivnih zakona. Korelacija digitalne slike najčešće koristi sliku snimanu iz više izvora, te, poznavanjem međusobnih udaljenosti kamera, stvar prostornu predodžbu objekta ispitivanja [12]. Korelacija digitalne slike prati promjene u vrijednostima sive boje, $G(x, y)$ na uzorku u malim susjednim područjima koja se zovu facete, te na temelju poznatih intrističnih vrijednosti senzora, dobivenih kalibracijom, kao i međusobne udaljenosti senzora i objekta ispitivanja, izračunava polje pomaka svih faceta. Zbog opterećenja uzorka, vrijednosti sive boje u lokalnoj faceti se mijenjaju u $G_t(x_t, y_t)$, gdje je

$$G_t(x_t, y_t) = g_0 + g_1 G(x_t, y_t), \tag{15}$$

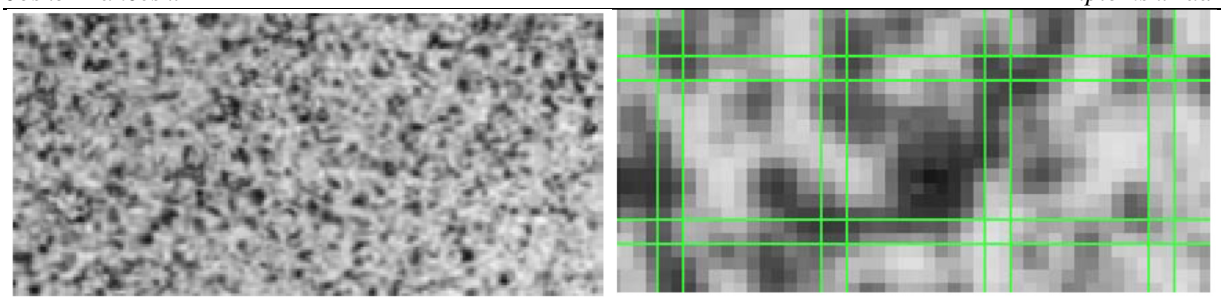
$$\begin{aligned} x_1 &= a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy, \\ y &= a_4 + a_5 x + a_6 y + a_7 xy. \end{aligned} \tag{16}$$

Unutar korelacijskog algoritma razlika ovih uzoraka se minimalizira:

$$\Sigma\left(G_t(x_t, y_t) - G(x, y)\right)^2, \tag{17}$$

te uz variranje parametre osvjetljenja *g* i parametre afine transformacije *a*, može se postići točnost podudaranja viša od 0,01 piksela. Kako bi to bilo moguće, potrebno je prvo riješiti problem jednoznačnosti, to jest, problem nalaženja istog malenog područja na uzorku u svakoj kameri, koja svaka snima uzorak iz vlastitog kuta. U slučaju sustava Aramis 4M, problem jednoznačnosti se rješava nanošenjem stohastičkog uzorka na površinu epruvete slika 24, kojeg programski paket korišten u sustavu analizira koristeći navedenu metodu kako bi pronašao istu točku u svim kamerama računajući razinu sive boje u mreži faceta, slika 24.

Aramis 4M, prikazan na slici 25, je jedan od mjernih sustava koji koristi tehnologiju korelacije digitalne slike. Aramis se sastoji od stativa, LED osvjetljenja koje ne generira značajnu količinu topline, dvije kamere visoke brzine i visoke rezolucije snimanja, čijom kalibracijom u prostoru se može podesiti mjerno područje u rasponu od mm^2 do više m^2, te računala koji se koristi za pokretanje kamera, obradu i prikaz podataka.

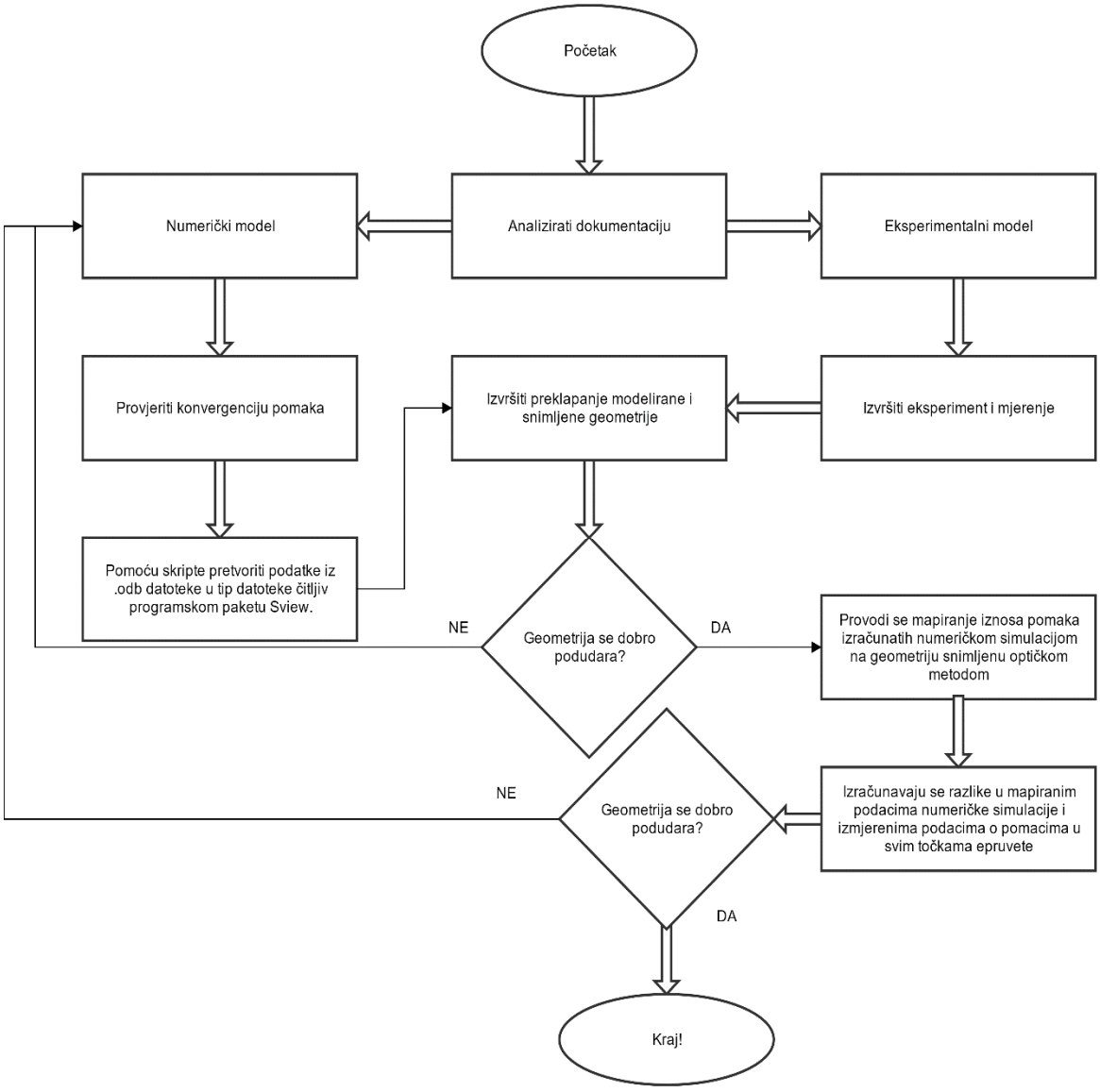


Slika 24 Stohastički uzorak i mreža faceta

Slika 25 Sustav za optičko mjerenje, Aramis 4M

4.1. Algoritam za validaciju

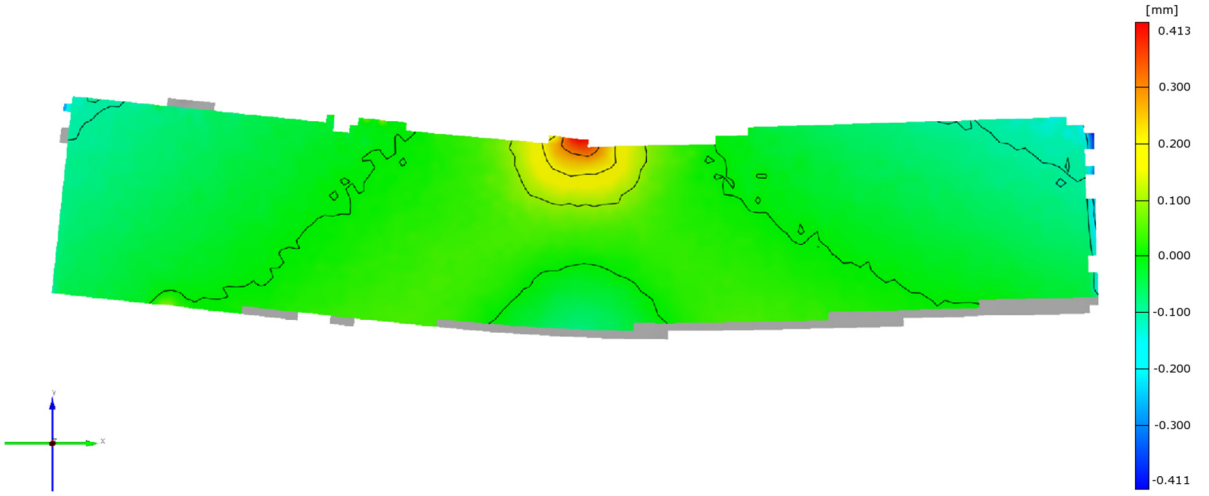
U okviru istraživanja provedenog u sklopu završnog rada autora [13] započet je razvoj algoritma za validaciju numeričkih modela putem usporedbe pomaka na čitavoj površini epruvete. Algoritam spaja rezultate dobivene numeričkom simulacijom s rezultatima eksperimenta prema procesu opisanom na slici 26.



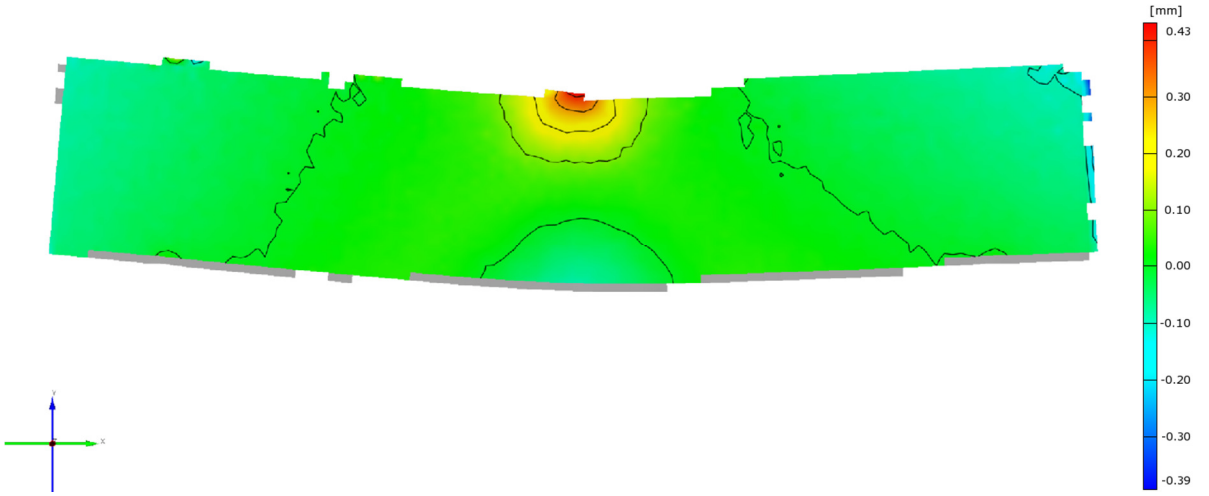
Slika 26 Dijagram toka algoritma za validaciju numeričkog modela

4.2. Usporedba rezultata pomaka epruvete za savijanje u tri točke izrađene od aluminijske legure

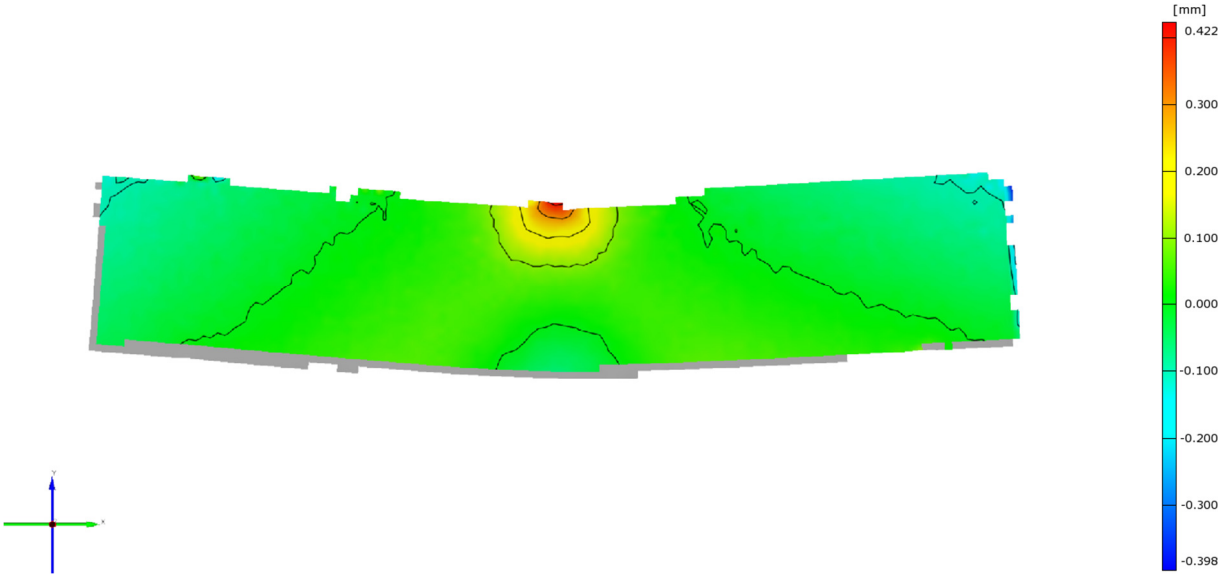
Koristeći dijagram toka algoritma za validaciju numeričkog modela, rezultate pomaka izračunate simulacijom i izmjerene tijekom ispitivanja se uspoređuje u programskom paketu Sview, koji je dio programskog paketa Aramis i služi za obradu podataka. Usporedba rezultata započinje s pretvaranjem podataka iz .odb datoteke u tekstualnu datoteku sa sintaksom koju Aramisov programski kod može čitati i protumačiti. Python skripta kojom se provodi pretvaranje podataka dana je u prilogu 1. Nakon pretvaranja podataka, učitavaju se u programski paket Sview, u postojeću analizu mjerenog eksperimenta. Izvršava se podešavanje površina geometrija jedne na drugu, u slučaju dvodimenzionalne geometrije (ravne plohe) vrši se samo *Manual Pre-registration* (eng – ručna predregistracija) kojom korisnik odabire točke na površini geometrija koje su međusobno identične. Nakon toga, u slučaju trodimenzionalne geometrije vrši se *Best Fit Registration* (eng – registracija za najbolje preklapanje) koja osigurava najbolje preklapanje ploha zadane geometrije. Kada su geometrije numeričke simulacije i snimke što točnije preklopljene, vrši se proračun točnosti preklapanja, te program računa koliko su pojedine točke geometrije numeričke simulacije (čvorovi konačnih elemenata) udaljeni od njihove lokacije na površini geometrije koja je snimljena optičkim sustavom, slike 27 do 29. Nakon preklapanja geometrija provodi se mapiranje podataka numeričke simulacije na geometriju snimljenu optičkom metodom preko mape stvorene preklapanjem geometrija i računanjem udaljenosti među točkama na geometriji, slike 30 do 35. Nakon mapiranja podataka, u programskom paketu Sview odabiru se skupovi podataka o pomacima izračunatima numeričkom simulacijom i skupovi podataka izmjerenih optičkom metodom, te se, pošto su mapirani na istoj geometriji, traže razlike u pomacima na lokacijama čvorova konačnih elemenata te se interpoliraju razlike u pomacima između čvorova, slike 36 do 41.



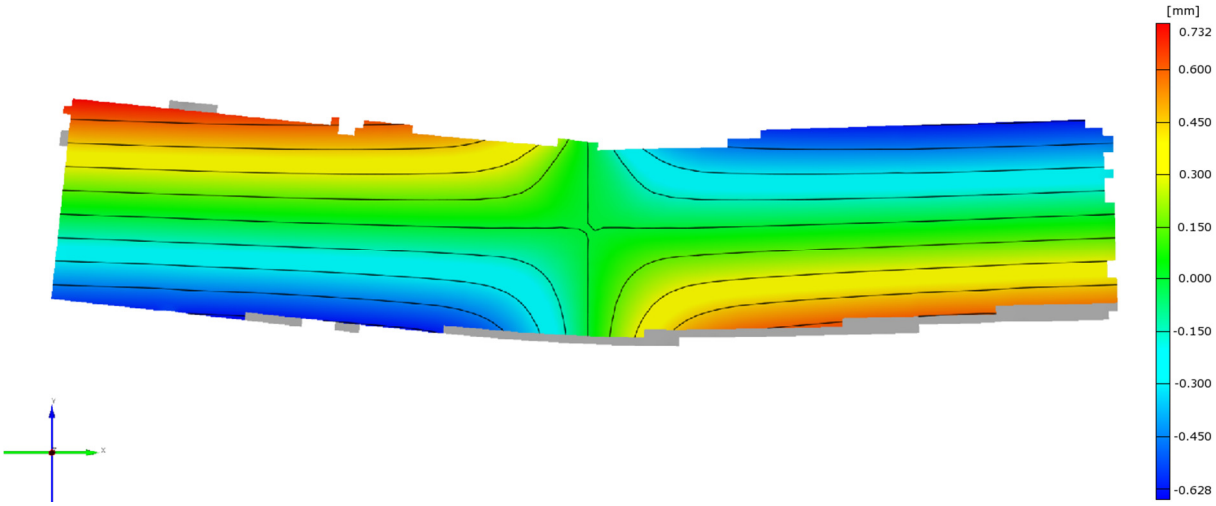
Slika 27 Lokalne razlike podudaranja geometrije za mrežu od 506 KE



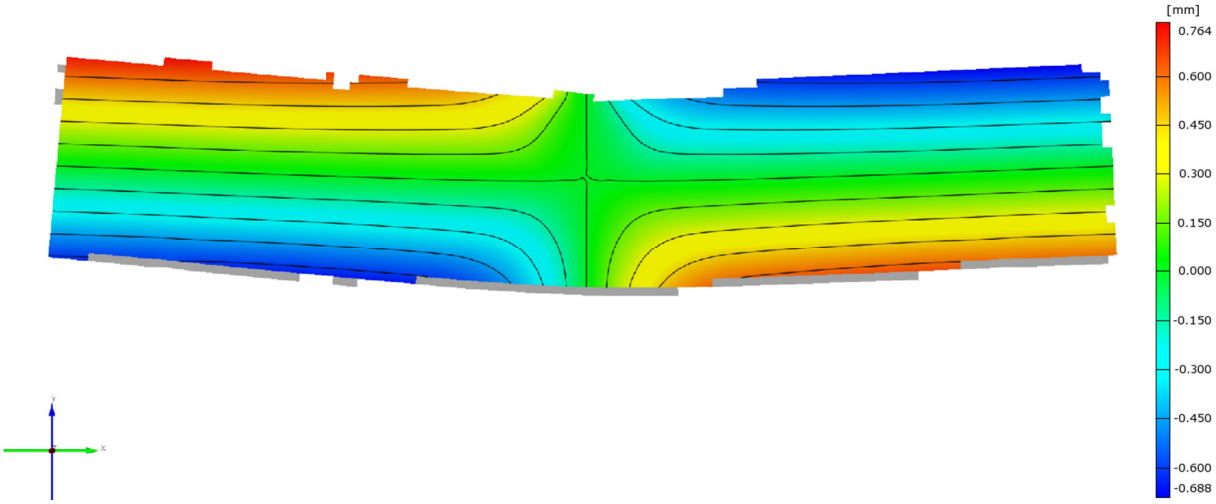
Slika 28 Lokalne razlike podudaranja geometrije za mrežu od 1968 KE



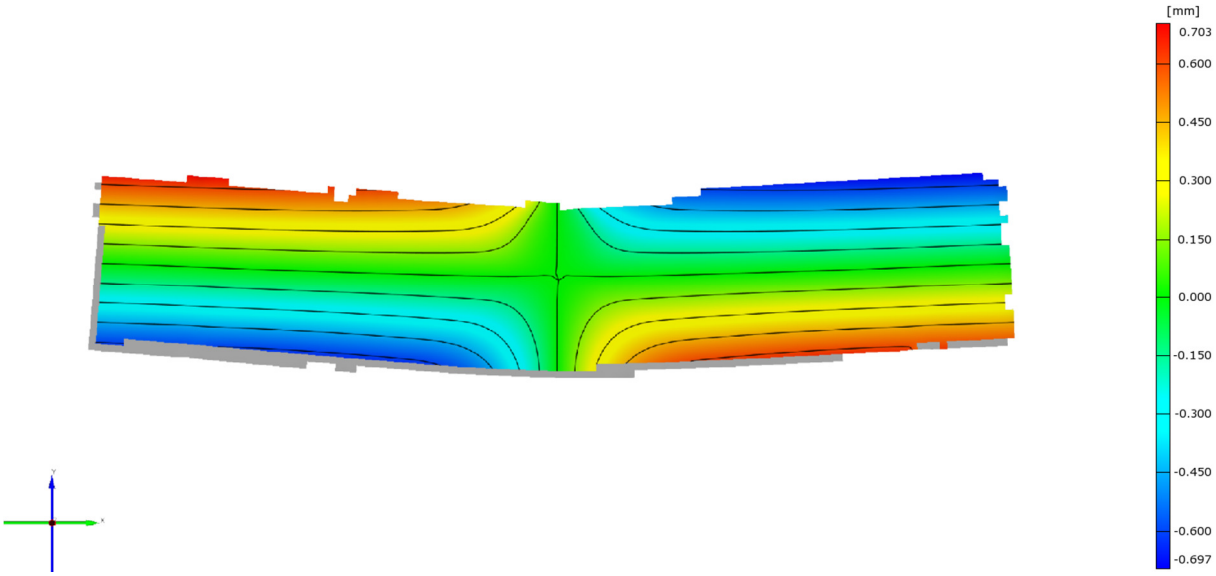
Slika 29 Lokalne razlike podudaranja geometrije za mrežu od 4522 KE



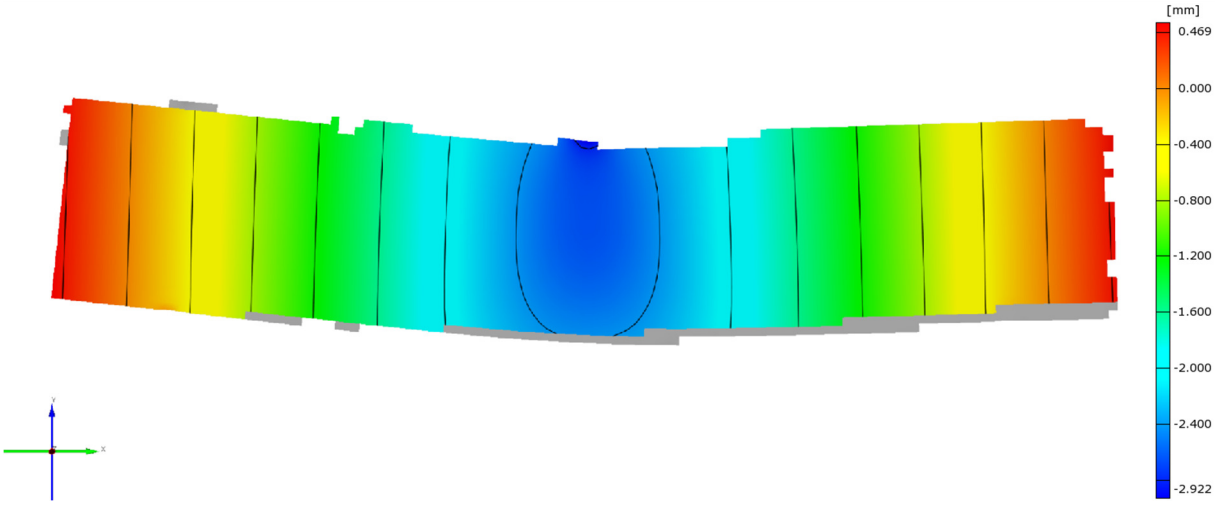
Slika 30 Mapirani numerički pomaci u smjeru osi *x* za mrežu od 506 KE



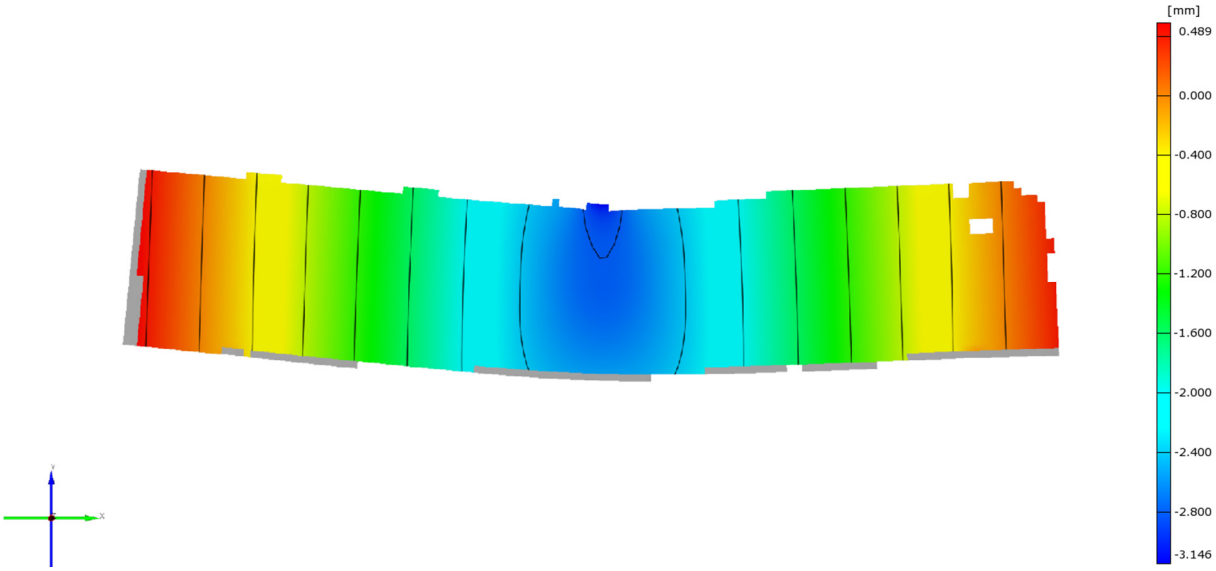
Slika 31 Mapirani numerički pomaci u smjeru osi *x* za mrežu od 1968 KE



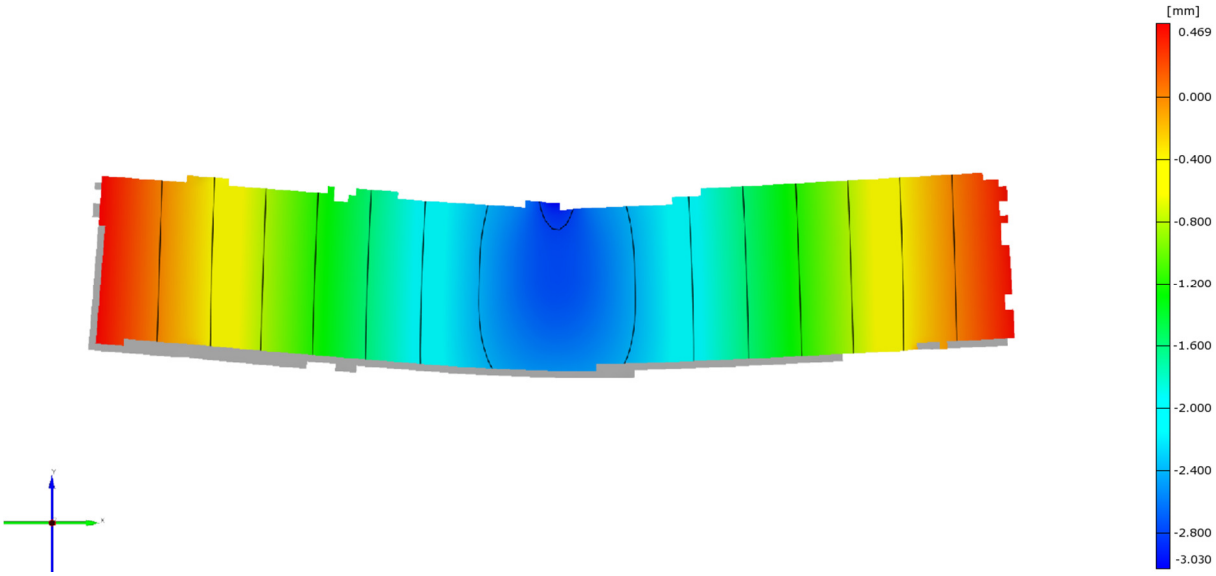
Slika 32 Mapirani numerički pomaci u smjeru osi *x* za mrežu od 4522 KE



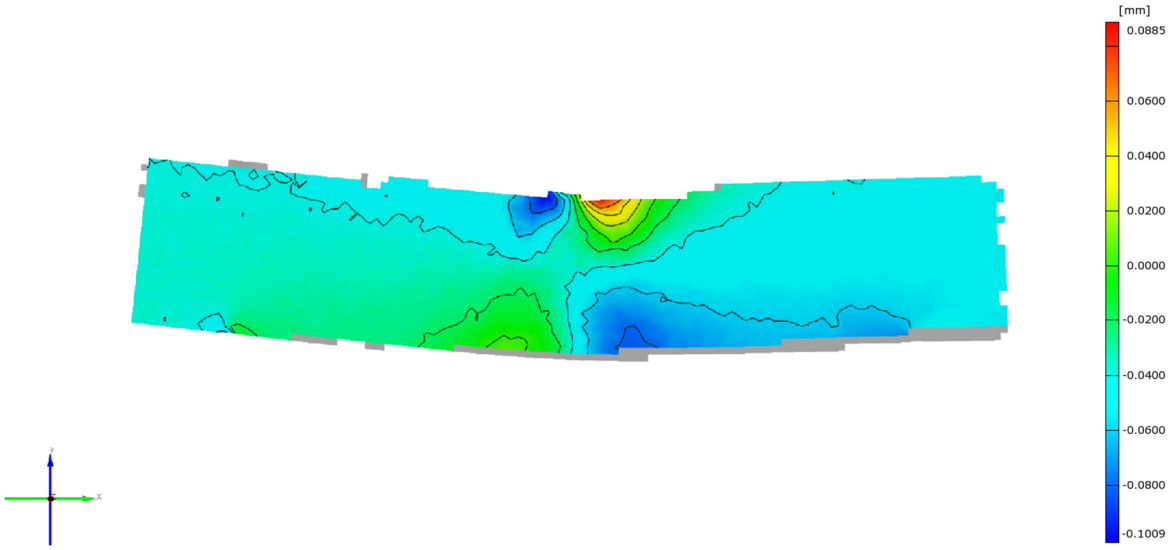
Slika 33 Mapirani numerički pomaci u smjeru osi *y* za mrežu od 506 KE



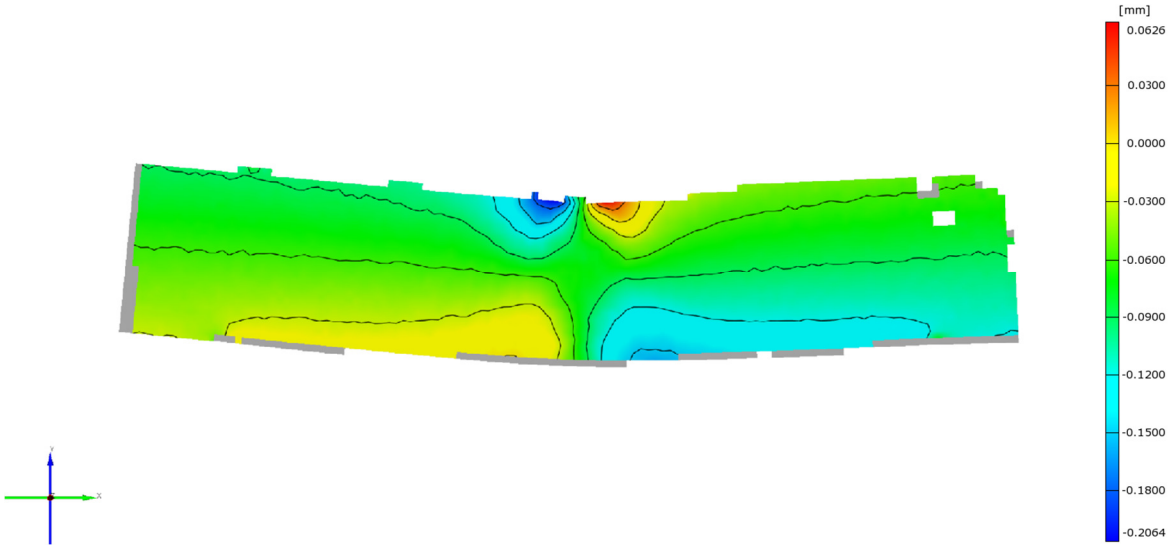
Slika 34 Mapirani numerički pomaci u smjeru osi *y* za mrežu od 1968 KE



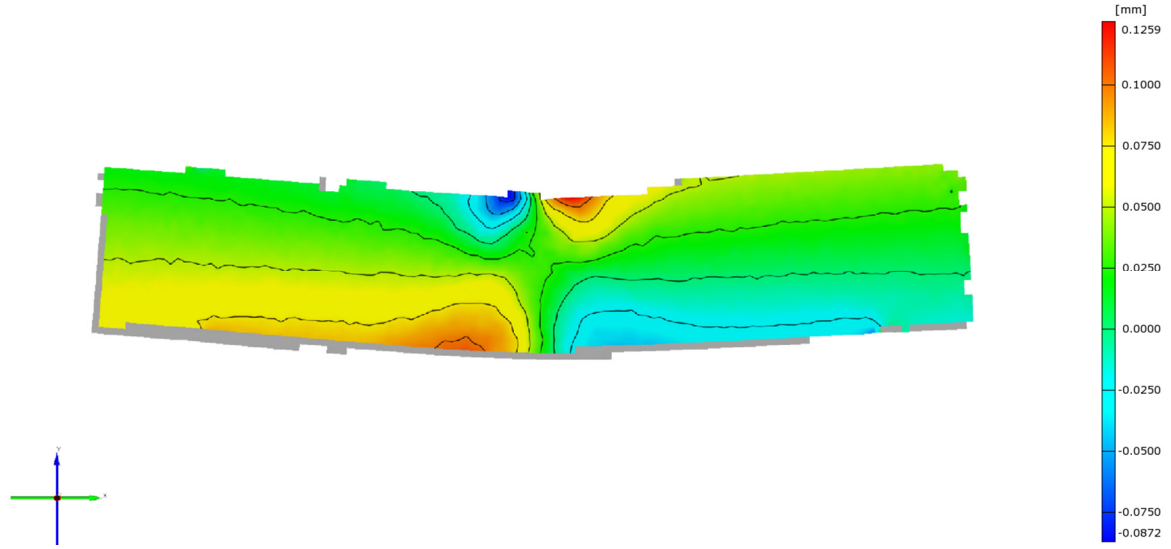
Slika 35 Mapirani numerički pomaci u smjeru osi *y* za mrežu od 4522 KE



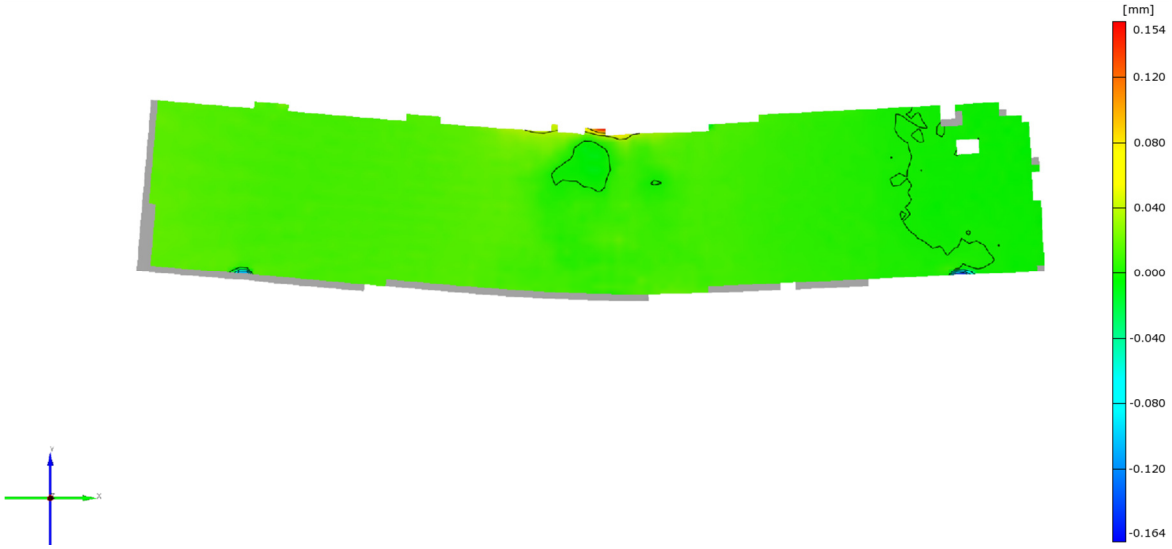
Slika 36 Razlika pomaka u smjeru osi *x* za mrežu od 506 KE



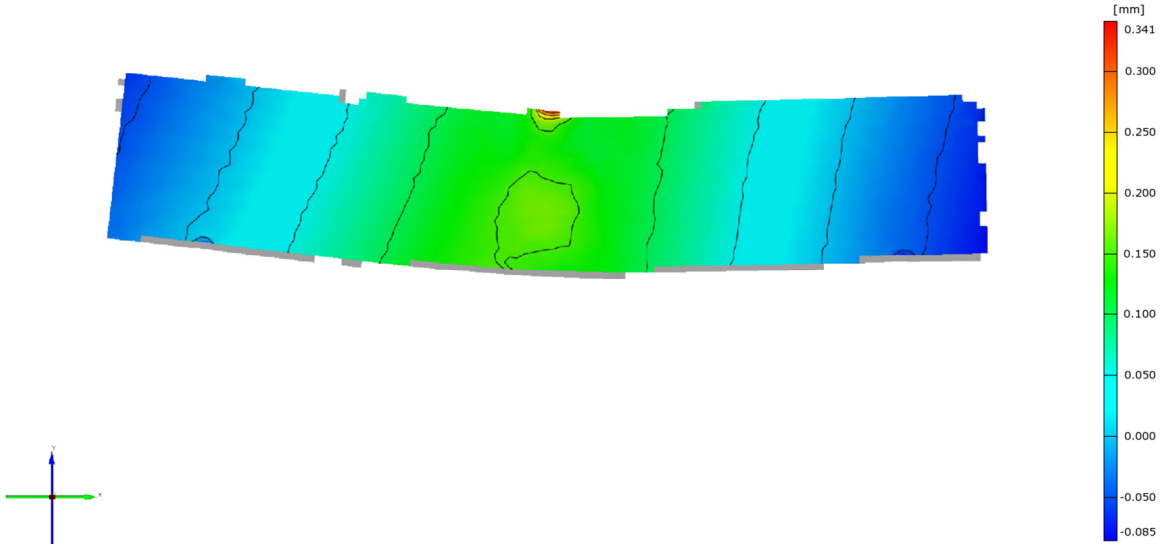
Slika 37 Razlika pomaka u smjeru osi *x* za mrežu od 1968 KE



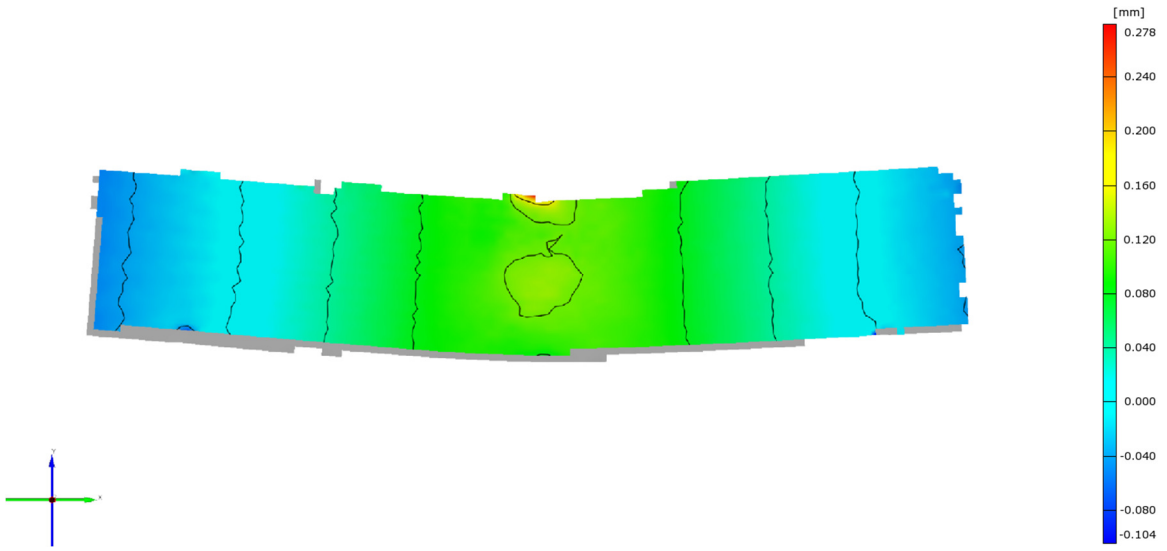
Slika 38 Razlika pomaka u smjeru osi *x* za mrežu od 4522 KE



Slika 39 Razlika pomaka u smjeru osi *y* za mrežu od 506 KE



Slika 40 Razlika pomaka u smjeru osi *y* za mrežu od 1968 KE



Slika 41 Razlika pomaka u smjeru osi *y* za mrežu od 4522 KE

Na slikama razlike pomaka u smjeru osi *x*, slike 36 do 38, vidljivo je da do najveće razlike između numeričkih i eksperimentalnih podataka dolazi u područjima neposredno uz gornji valjak kidalice preko kojeg se vrši opterećenje na sustav. Do većih razlika u tim područjima dolazi zbog velike lokalne plastifikacije i gradijenta deformacije. U slučaju razlike pomaka u smjeru osi *y*, slike 39 do 41, vidljivo je da su za slučaj rijetke mreže konačnih elemenata, slika 39, razlike u pomacima praktički i nepostojeće, osim na mjestima oslanjanja valjaka kidalice i mjestu opterećenja preko gornjeg valjka kidalice. Za slučaj srednje guste mreže, slika 40, vidljivo je da do najvećih razlika u pomacima dolazi također na mjestima kontakata, no vidljivo je da postoji razlika u presjeku *A-A* u iznosu prosječno 0,1 mm. Za slučaj guste mreže, slika 41, izuzevši mjesta kontakta valjaka i epruvete, do razlike u pomacima dolazi na slobodnim krajevima epruvete, dok su razlike u pomacima na presjeku *A-A* gotovo zanemarive. Kao što je i u testu konvergencije bio slučaj, mreža od 1968 konačnih elemenata je pokazala najlošije rezultate naspram eksperimenta, dok je mreža od 506 konačnih elemenata pokazala najbolje rezultate. Čak i uz grešku pomaka za srednje gustu mrežu, greška iznosi 0,1 mm na ukupnom pomaku od 2,37 mm što iznosi 4,3%, što je još uvijek prihvatljiva greška, pogotovo kad se u obzir uzmu moguće greške mjerenja.

5. POSTUPAK INVERZNOG MODELIRANJA U PROGRAMSKOM PAKETU TRUE LOAD

True Load (eng – stvarno opterećenje) dio je programskog paketa *Fe – Safe*, a koristi se kao dodatak programskom paketu Abaqus. *True Load* na temeljuu izvršenih simulacija u Abaqusu oblikuje matermatičke relacije veza između deformacija i opterećenja te omogućava rješavanje inverznog problema dobivanja opterećenja na temelju poznatih (izračunatih, izmjerenih) deformacija [14].

True Load je rastavljen na tri modula:

1. Pre – Test
2. Post – Test
3. True QSA

Programski paket *True Load* sa svojim prvim modulom je zamišljen da se koristi prije postavljanja tenzometarskih traka na neki realni predmet ili konstrukciju, te odatle i potječe naziv Pre – Test (eng – Prije testiranja). U tom modulu se, nakon izvršene simulacije procesa opterećivanja konstrukcije, odabiru konačni elementi koji su potencijalna mjesta za postavljanje tenzometara na konstruciju, kao i ukupan broj tenzometara koji će biti postavljeni na ta potencijalna mjesta. Program samostalno raspoređuje zadani broj tenzometara na konačne elemente koji su odabrani za potencijalna mjesta na takav način da dobije što manju uvjetovanost matrice krutosti. Nakon što program dodijeli tenzometre na idealna mjesta, korisnik može mijenjati usmjerenje tenzometara u prostoru, kao i mijenjati njihov raspored, kako bi si što više olakšao rad. Nakon završetka rada u Pre-Test modulu potrebno je izvršiti mjerenja na konstrukciji, tako da se slijedi položaj i orijentacija tenzometara postavljenih u modelu.

S prikupljenim podatcima o deformacijama na mjestima tenzometara može se pristupiti idućem modulu, Post – Test (eng – nakon testiranja). U Post – Test modulu se uz pomoć matrice krutosti formirane u Pre – Test modulu pokušava ostvariti isto stanje deformacija stvarne konstrukcije i modela izrađenog u Abaqusu. True Load pritom pokušava ostvariti jednake iznose deformacija izmjerenih na tenzometrima i na mjernim mjestima smještenima na odabranim konačnim elementima.

Modul True - QSE je postprocesorski dio True Load-a. True –QSE koristi podatke generirane od strane Post – Test modula kako bi generirao Abaqus .odb datoteku koju je moguće pregledati pomoću postprocesorskog, Visualization, modula programskog paketa Abaqus. True –QSE po

potrebi može sadržavati polja deformacija, pomaka, naprezanja, reakcija u osloncima no najvažnije i raspodjelu koncentriranih sila i momenata koji djeluju na konstrukciju za izmjerene deformacije. *True – QSE* je akronim za *True – Quasi Static Event*, što u prijevodu na hrvatski znači kvazi statički događaj. Razlog tomu je što *True Load* shvaća sve podatke koje obrađuje kao djelove statičkog koraka u kojem inercija sustava ne igra nikakvu ulogu. Zbog toga što se radi o mjerenjima ostvarenim na realnim konstrukcijama ili u laboratorijskim uvjetima i postoji konačan protok vrememena, problem se naziva kvazi statički.

True Load je namijenjen za analizu u linearno elastičnom području deformacija i naprezanja. Moguće je imati djelove konstrukcije koji se nalaze u nelinearnom području, poput zavara, spojeva ili kontakata, te dobiti valjane rezultate ukoliko se mjerna mjesta, konačni elementi kandidati za tenzometre postave dovoljno daleko od mjesta koncentracije naprezanja i nelinearne raspodjele deformacija. Općenito, linearna veza između sila F i deformacija ε, prema [15], se može prikazati na sljedeći način:

$$\boldsymbol{\varepsilon} \times \boldsymbol{C} = \boldsymbol{F}. \tag{18}$$

Relacija jednadžbe deformacija koja je prilagođena za fiksna mjerna mjesta (tenzometre) i više slučajeva opterećenja glasi:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{1,1} & \varepsilon_{1,2} & \cdots & \varepsilon_{1,\mathrm{m}} \\ \varepsilon_{2,1} & \varepsilon_{2,2} & \cdots & \varepsilon_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{\mathrm{n},1} & \varepsilon_{\mathrm{n},2} & \cdots & \varepsilon_{n,m} \end{bmatrix} \times [\boldsymbol{C}] = \begin{bmatrix} F_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & F_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & F_n \end{bmatrix}. \tag{19}$$

Matrica deformacija u jednadžbi (19) konstruirana je tako da predstavlja slučaj sa n sila na m mjernih mjesta. Svaki red u matrici deformacija predstavlja vrijednost deformacija na tenzometrima, dok je matrica opterećenja dijagonalna. Ukoliko se postave jedinične vrijednosti opterećenja, prema [15] vrijedi:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{1,1} & \varepsilon_{1,2} & \cdots & \varepsilon_{1,\mathrm{m}} \\ \varepsilon_{2,1} & \varepsilon_{2,2} & \cdots & \varepsilon_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{\mathrm{n},1} & \varepsilon_{\mathrm{n},2} & \cdots & \varepsilon_{n,m} \end{bmatrix} \times [\boldsymbol{C}] = [\mathbf{I}], \tag{20}$$

te izraz za matricu $\boldsymbol{C}$ glasi

$$[\boldsymbol{C}] = \left[\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}} \quad \boldsymbol{\varepsilon}\right]^{-1} \times \left[\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}}\right]. \tag{21}$$

Formulacija matrice krutosti $\boldsymbol{C}$ uvelike ovisi o raspodjeli mjernih mjesta na konstrukciji. Kako bi se ostvarili što točniji rezultati potrebno je ostvariti što manju uvjetovanost matrice krutosti.

Kako bi se najlakše ostvarila što manja uvjetovanost matrice, programski paket *True Load* sadržava algoritam pomoću kojeg samostalno računa koji su najbolji elementi sa zadane liste elemenata kandidata za postavljanje tenzometara. Osim rasporeda tenzometara, algoritam ostvaruje niže vrijednosti uvjetovanosti matrice krutosti skaliranjem opterećenja primijenjene sile i momenta u svrhu ostvarenja što manje razlike minimalne i maksimalne deformacije koje se pojavljuju u jednadžbama. Korisnik nije primoran koristiti mjerna mjesta i orijentaciju tenzometara koje je algoritam postavio, već po potrebi može mijenjati lokaciju i orijentaciju mjernih mjesta, što u većini slučajeva uzrokuje lošiju uvjetovanost matrice $\boldsymbol{C}$. U tablici 6 dana je ovisnost između uvjetovanosti matrice $\boldsymbol{C}$ i svojstava analiziranog sustava prema [15]. Cilj koji se želi postići prilikom postavljanja i orijentiranja mjernih mjesta je što niža uvjetovanost matrice. Iz tablice 6 vidljivo je da je gornja praktična granica iskoristive vrijednosti uvjetovanosti matrice 50, te bi veće vrijednosti trebalo izbjegavati zbog mogućnosti propagacije grešaka i nedostataka modela u rezultate analize.

Tablica 6 Ovisnost uvjetovanost matrice $\boldsymbol{C}$ i svojstava sustava

Uvjetovanost matrice $\boldsymbol{C}$	Svojstva sustava
<10	Veoma stabilan sustav koji bi trebao pokazati visoku toleranciju prema šumu
<50	Dobar sustav. Može doći do pojave pojačanja šuma
<100	Marginalno stabilan sustav. Potrebno je proširiti listu kandidata i/ili proučiti sličnost opterećenja
>100	Neprihvatljiv sustav. Mora se povećati broj kandidata elemenata i proučiti sličnost opterećenja.

Nakon provođenja analize s jediničnim opterećenjem sustav je prvo pronašao članove matrice $\boldsymbol{C}$, tako da na temelju sada poznate matrice $\boldsymbol{C}$ se mogu izračunati novi slučajevi opterećenja. Opterećenja se računaju prema jednadžbi:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{t1,1} & \varepsilon_{t1,2} & \cdots & \varepsilon_{t1,m} \\ \varepsilon_{t2,1} & \varepsilon_{t2,2} & \cdots & \varepsilon_{t2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{tn,1} & \varepsilon_{tn,2} & \cdots & \varepsilon_{tn,m} \end{bmatrix} \times [\boldsymbol{C}] = \begin{bmatrix} F_{t1,1} & F_{t1,2} & \cdots & F_{t1,n} \\ F_{t2,1} & F_{t2,2} & \cdots & F_{t2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{tk,1} & F_{tk,2} & \cdots & F_{tk,n} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

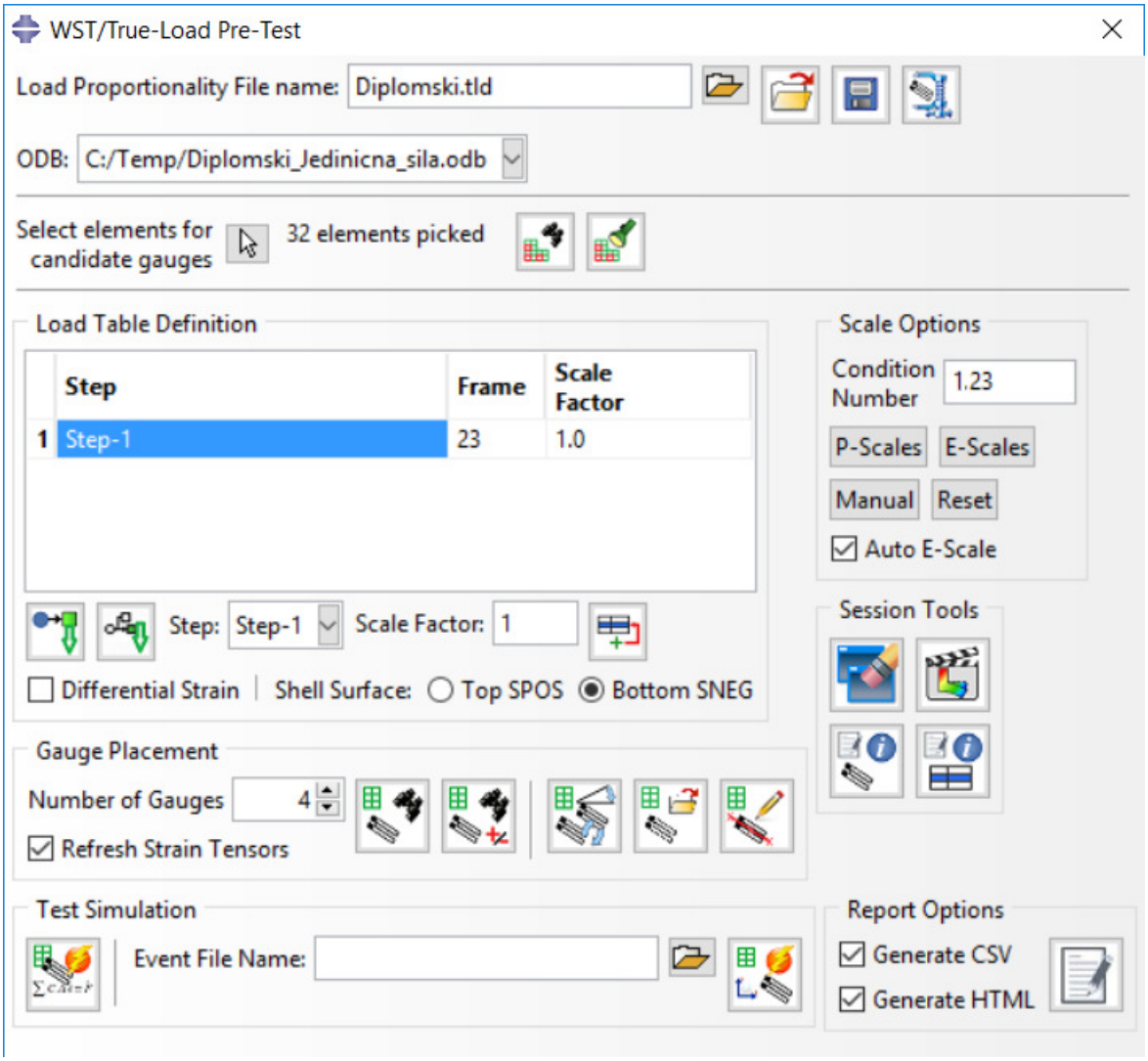
Matrica deformacija u jednadžbi (22) sadržava deformacije svim *m* tenzometara u svim razmatranim trenutcima kojih ima ukupno *k.* Matrica sila sadržava vrijednosti sila po komponentama kojih ima *n* za svaki razmatrani vremenski trenutak. Iz toga je vidljivo da svaki redak matrice sila prikazuje opterećenje konstrukcije u vremenskom trenutku u kojem je mjerenje izvršeno.

5.1. Postupak provođenja inverznog modeliranja izračuna opterećenja iz poznatih deformacija pomoću programskog paketa *True Load*

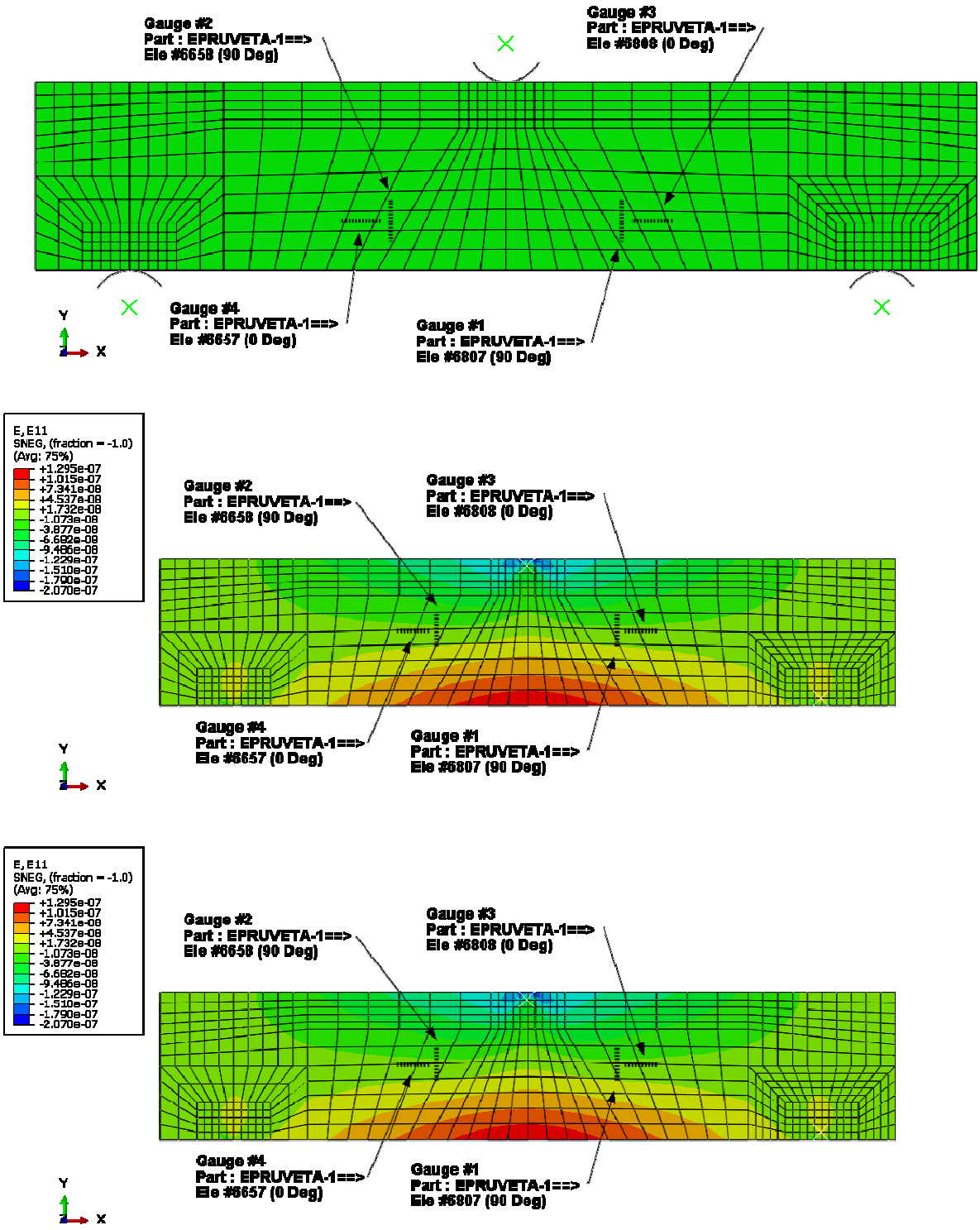
True Load je programski paket koji omogućava rješavanje inverznog problema putem mjerenih deformacija . Verifikacija modela će biti provedena na epruveti za savijanje u tri točke bez zareza, koja se nalazi u dodiru s tri valjka, od čega je na dva oslonjena, a treći vrši opterećenje na epruvetu. Opterećenje se zadaje preko valjka i jediničnog je iznosa kako bi bilo moguće naći riješenje matrice ***C***. Deformacije epruvete opterećene jediničnom silom dane su u poglavlju 3.4. Nakon pronalaženja rješenja matrice ***C***, provest će se traženje opterećenja na epruvetu koja je opterećena silom od 850 N i za koje su poznate deformacije na mjernim mjestima.

Proračun inverznog modeliranja započinje otvaranjem Pre –Test modula Visualization modulu Abaqus programskog paketa, slika 42. U Pre – Test modulu potrebno je prvo imenovati Load Proportionality datoteku, .tld, datoteku koja će sadržavati sve podatke o matrici ***C***. Zatim je potrebno odabrati .odb datoteku koju se proučava. Nakon odabira .odb datoteke učitavaju se podatci iz koraka opterećenje. U ovom slučaju bilo je bitno samo opterećenje na kraju ciklusa, te se učitao samo poslijednji inkrement koraka opterećenja. Zatim se odabiru elementi kandidati za mjerna mjesta te se odabire broj mjernih mjesta i pokreće algoritam za odabir mjernih mjesta kako bi uvjetovanost matrice bila što manja. Nakon toga se tenzometri postavljeni na mjerna mjesta mogu dodatno namjestiti i orijentirati, što je u ovom radu i učinjeno kako bi tenzometri bili usmjereni u smjeru glavnih osi, slika 43. Nakon ovog koraka sprema se .tld datoteka i izlazi iz Pre – Test modula. Prije no što se otvori Post –Test modul, potrebno je izmjeriti deformacije na mjernim mjestima. U slučaju proučavanja realne konstrukcije, očitat će se podatci s tenzometarskih traka ili s polja deformacija koje se zabilježe optičkim sustavima. Te podatke

je potrebno upisati u .dat datoteku, prema sintaksi objašnjenoj u radu [16]. Kad su podatci o deformacijama zabilježeni, otvara se True Load Post – Test modul, slika 44. U njemu je potrebno učitati .tld datoteku iz Pre – Test modula koja sadrži matricu krutost i .dat datoteku u kojoj su upisane deformacije. Pokretanjem *Event Generation* algoritma pokreće se rješavač koji pokušava postići jednako stanje opterećenja i deformiranja epruvete kakvo je očitano na tenzometrima. Ovaj modul generira .html datoteku koja sadržava pregled svih lokacija tenzometara, položaj, orijentaciju, kao i grafove koji prikazuju razliku između mjerenih i simuliranih opterećenja. True QSA modul je moguće pokrenuti čim je Post Test modul završio s radom, slika 45. U True QSA modulu se učita generirana .qse datoteka koja sadrži sve potrebne podatke koji True QSA modulu trebaju da bi generirao .odb datoteku koju je moguće pregledavati pomoću programskog paketa Abaqus.



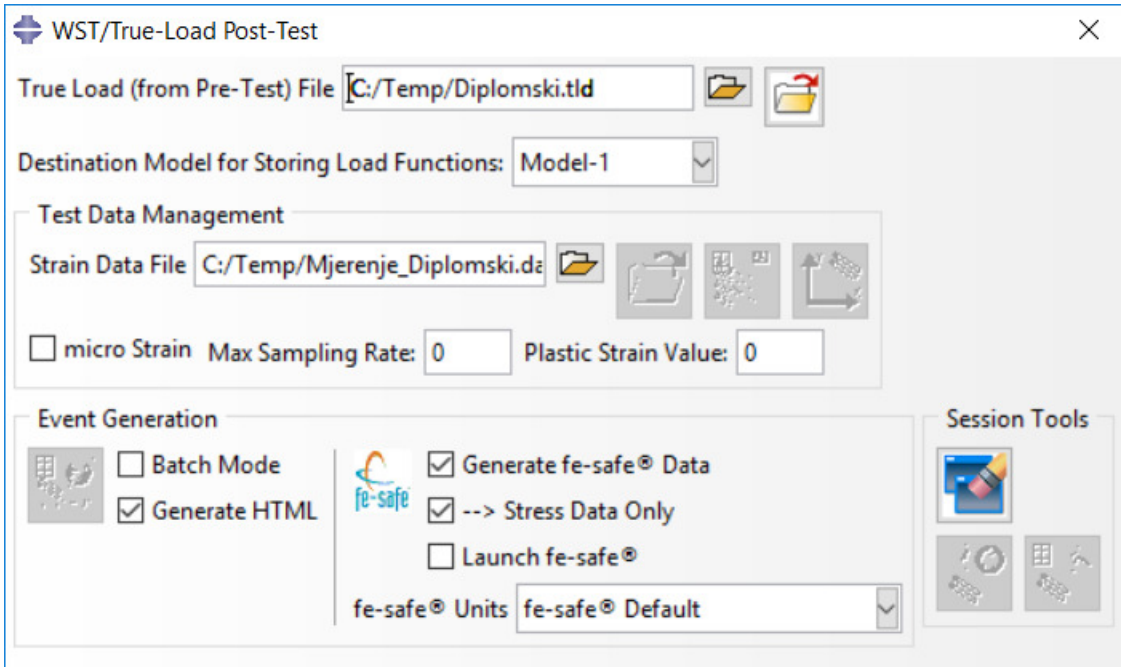
Slika 42 Izgled dijaloškog prozora modula Pre – Test



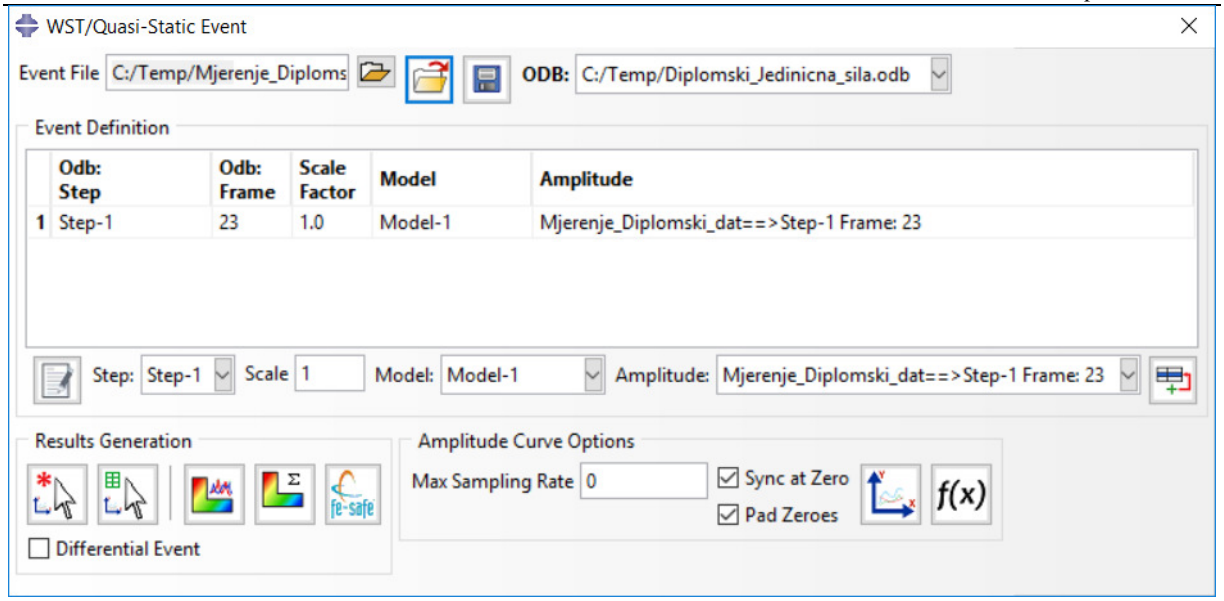
Slika 43 Prikaz položaja i orijentacije tenzometarskih traka na površini epruvete

Tablica 7 Podatci o deformacijama na pojedinim tenzometrima u vremenskom koraku simulacije

Vrijeme\Iznos deformacije	G1	G2	G3	G4
0	0	0	0	0
1	-0,000011417	-0,000011416	0,0000330853	0,0000330853



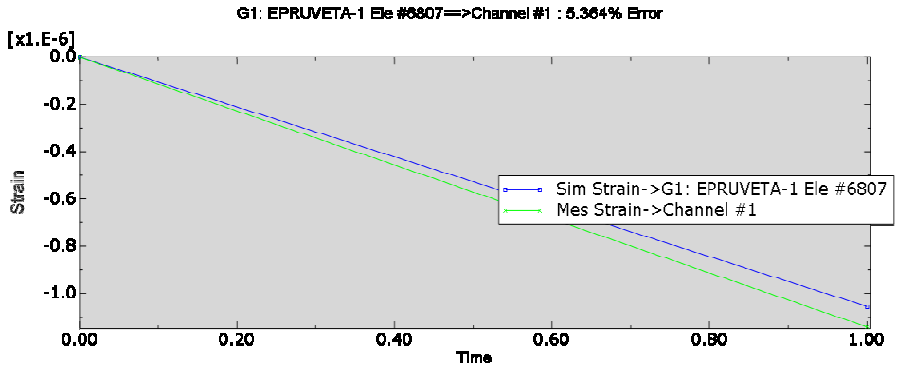
Slika 44 Izgled dijaloškog prozora modula Post – Test



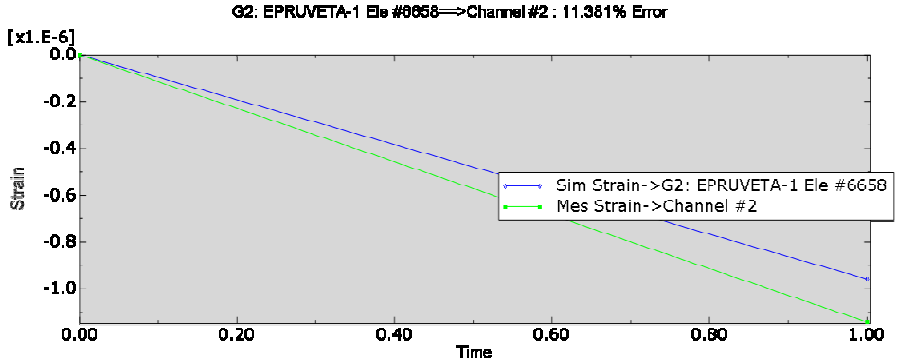
Slika 45 Izgled dijaloškog prozora modula True QSA

5.2. Rezultati korištenja inverznog modeliranja za izračunavanje opterećenja epruvete

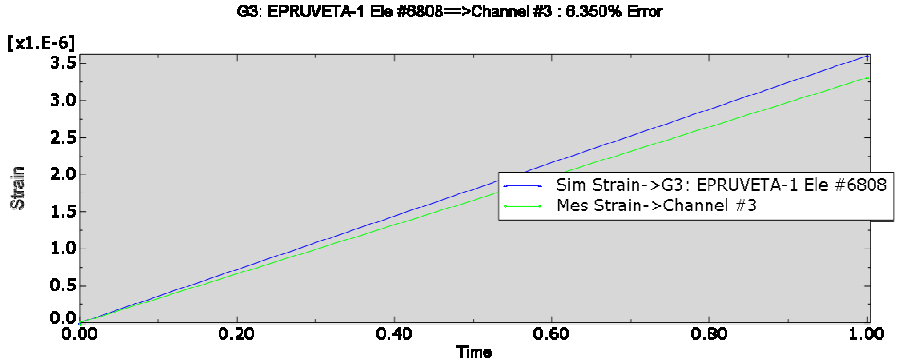
Na slikama 46 do 49 prikazani su dijagrami korelacije izmjerene i simulirane deformacije za svako mjerno mjesto. Zelenom bojom je označena izmjerena deformacija kroz vremenski korak, dok je plavom bojom označena deformacija dobivena inverznim modeliranjem. Vidljivo je da se greške izračunate deformacije kreću između 5,3% i 11,4%, što nije zanemarivo s obzirom da se radi o osnovnom primjeru testa savijanja u tri točke. Moguće je poboljšati rezultate simulacije uključivanjem većeg broja elemenata kandidata, te bi algoritam za pozicioniranje mjernih mjesta u tom slučaju mogao odabrati bolju lokaciju.



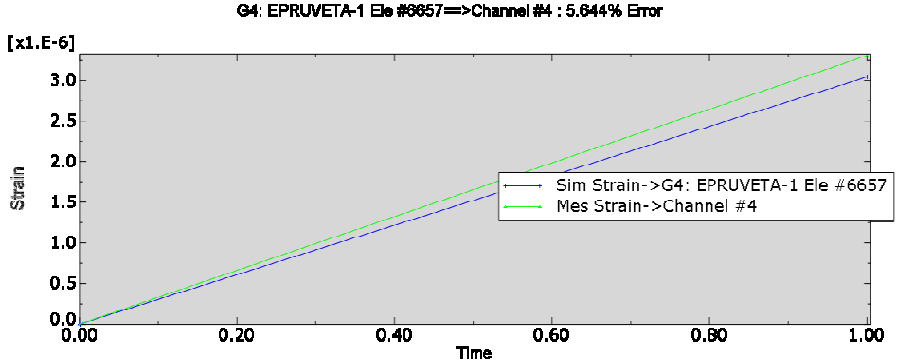
Slika 46 Dijagram razlike između izmjerenih i izračunatih deformacija za tenzometar broj 1



Slika 47 Dijagram razlike između izmjerenih i izračunatih deformacija za tenzometar broj 2



Slika 48 Dijagram razlike između izmjerenih i izračunatih deformacija za tenzometar broj 3



Slika 49 Dijagram razlike između izmjerenih i izračunatih deformacija za tenzometar broj 4

Na slici 50 prikazani su rezultati analize u pravokutnom koordinatnom sustavu. Na osi X sustava prikazane su izmjerene deformacije, a na osi Y prikazane su izračunate deformacije. U slučaju

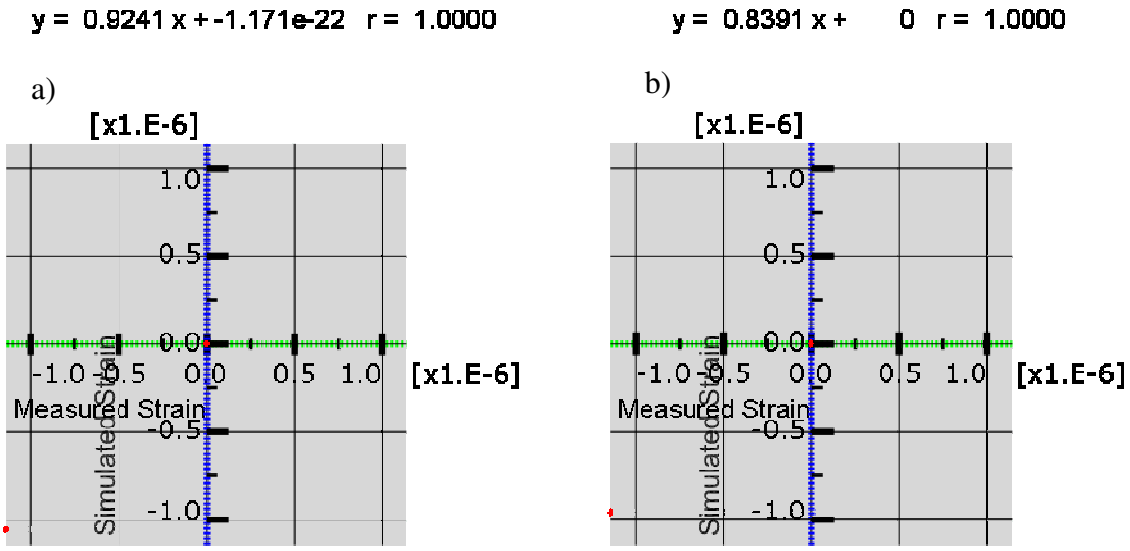
idealnog riješenja točke mjerenja će imati istu vrijednost te će se sve nalaziti na pravcu $y = x$. Za ovakav način prikaza deformacija programski paket koristi izračun koeficijenta korelacija r između razmatranih deformacija. Vrijednosti koeficijenta kreću se u intervalu od minus do plus jedan:

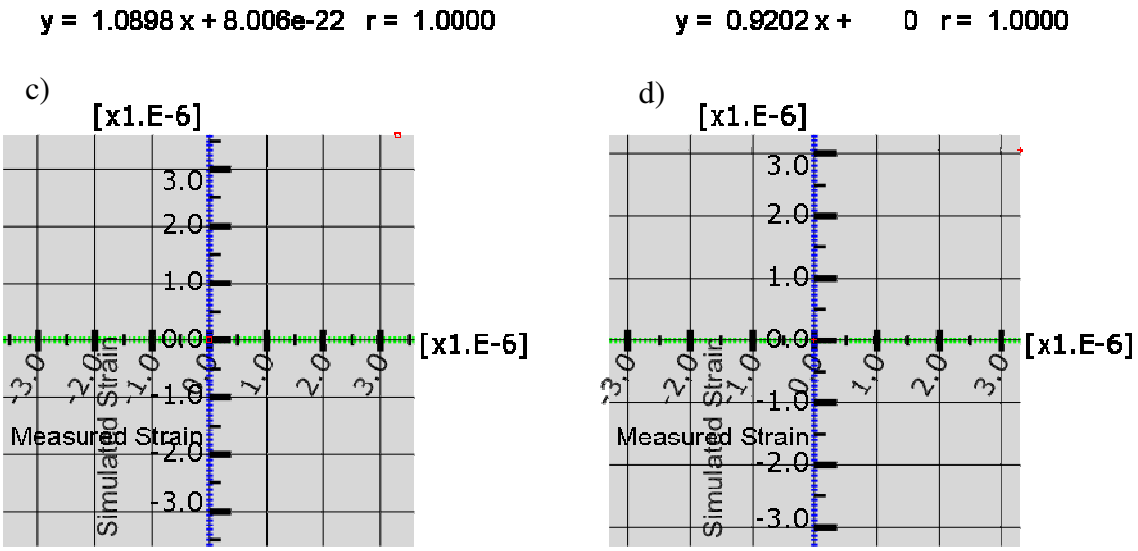
$$-1 \le r \le 1. \tag{23}$$

U tablici 8 dana je Chadockova ljestvica [17] koja pojašnjava ovisnost koeficijenta korelacije i same korelacije.

Tablica 8 Chadockova ljestvica

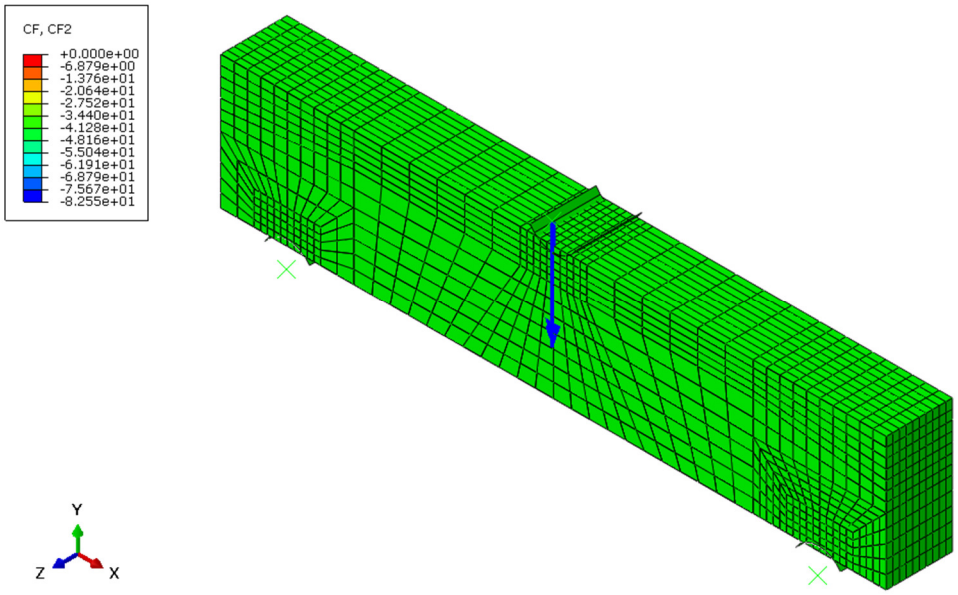
$\|r\|$	0	0-0,5	0,5-0,8	0,8-1	1
Objašnjenje	Odsutnost veze	Slaba veza	Veza srednje jakosti	Čvrsta veza	Potpuna veza



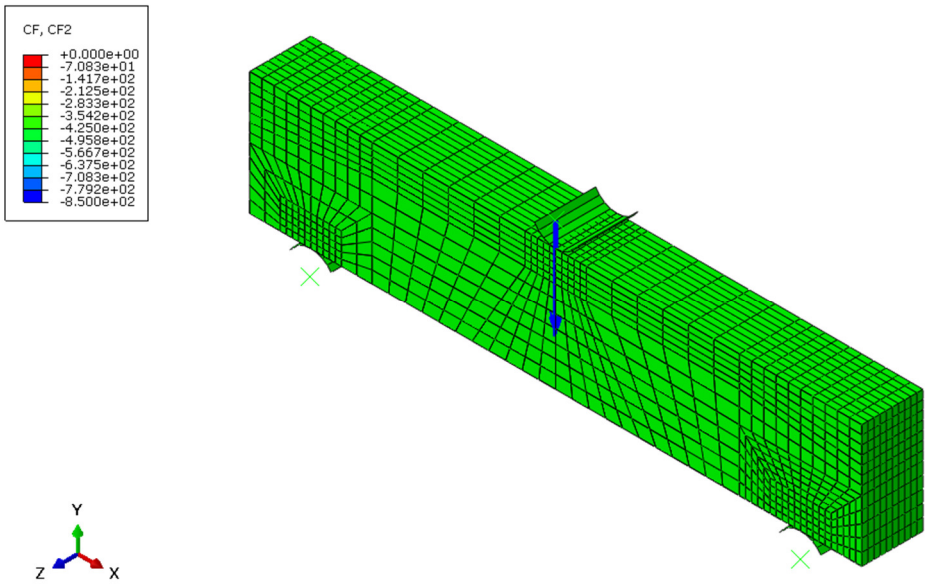


Slika 50 Korelacija preklapanja izmjerenih i izračunatih deformacija za: a) mjerno mjesto 1, b) mjerno mjesto 2, c) mjerno mjesto 3 i d) mjerno mjesto 4

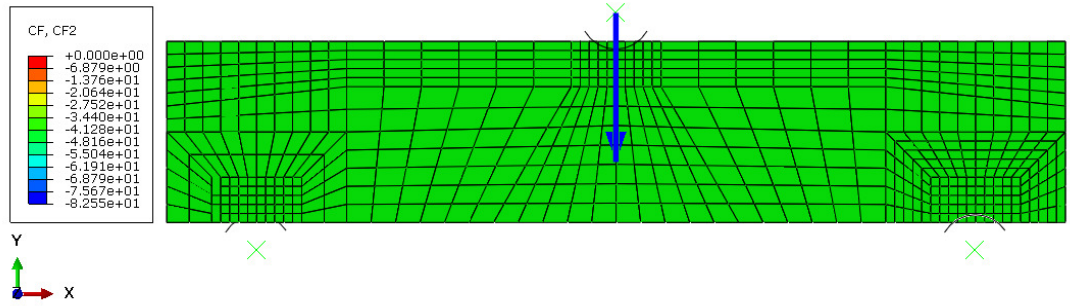
Na slici 50 vidljivo je da je koeficijent korelacije jednak 1, iako točke mjerenja nisu točno na pravcu $y = x$. Numerička simulacija deformacija inverznim modeliranjem za ovaj slučaj opterećenja je veoma pouzdana, te bi pomoću ove metode trebalo biti moguće veoma točno izračunati koncentrirano opterećenje na sustav. Na slikama 51 do 55 dan je položaj i iznos koncentrirane sile izračunate metodom inverznog modeliranja i, radi usporedbe, položaj i iznos koncentrirane sile zadane u simulaciji. Konačan iznos izračunate sile iznosi -825,5 N, što predstavlja grešku s obzirom na zadanu silu u iznosu od 2,96%, što je prihvatljiv iznos u inženjerskoj praksi.



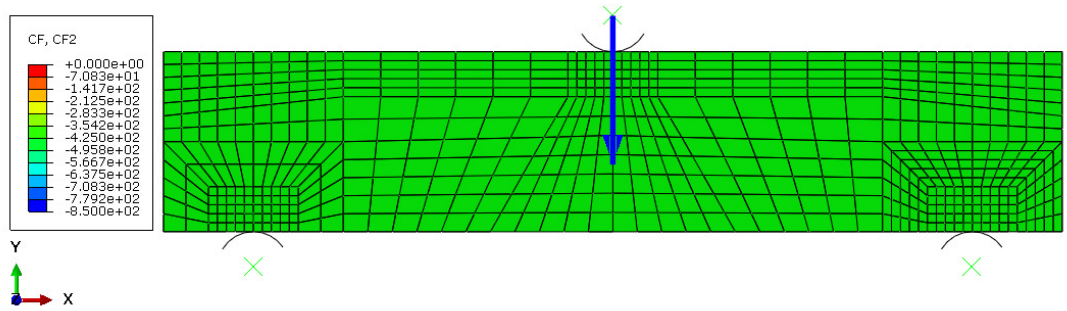
Slika 51 Koncentrirana sila izračunata inverznim modeliranjem prikazana u izometriji u iznosu od 825,5 N



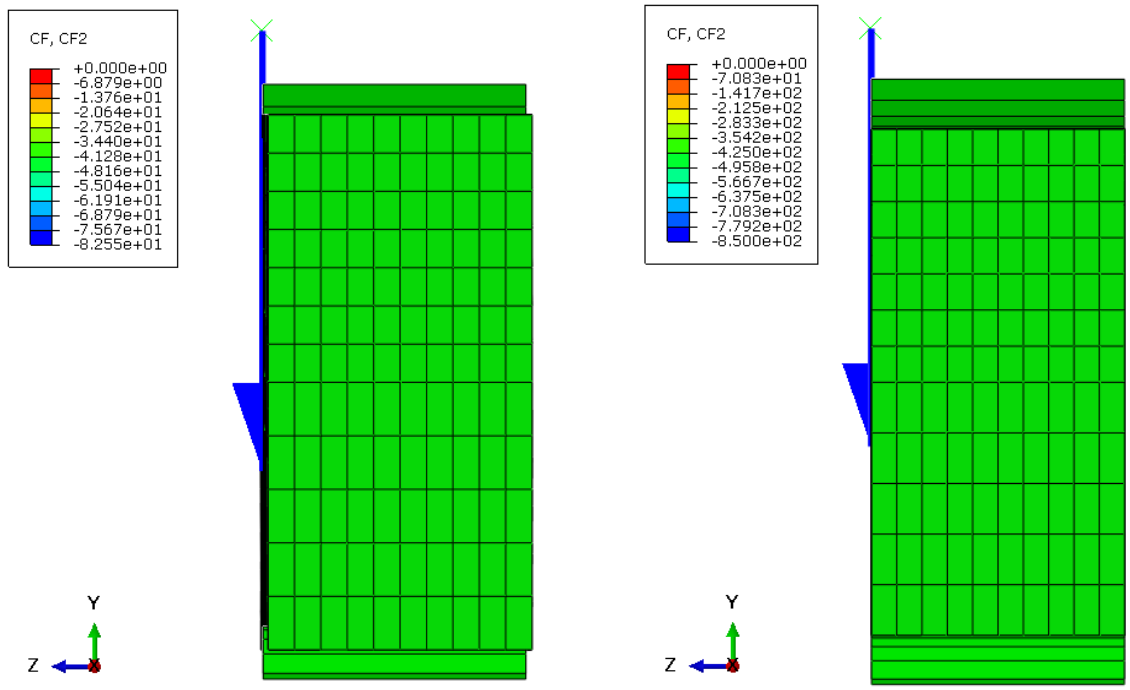
Slika 52 Zadana koncentrirana sila u izometriji u iznosu od 850 N



Slika 53 Koncentrirana sila izračunata inverznim modeliranjem u nacrtu u iznosu od 825,5 N



Slika 54 Zadana koncentrirana sila u nacrtu u iznosu od 850 N



Slika 55 Položaj i iznos koncentrirane sile u bokocrtu za: a) izračun inverznim modeliranjem od 825,5 N, b) zadani iznos od 850 N

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu dan je pregled modeliranja procesa deformiranja epruvete za savijanje u tri točke bez zareza. Eksperimentalno ispitivanje je provedeno na uzorcima izrađenima od aluminijske legure, te preuzeto iz literature za uzorke izrađene od nodularnog lijeva. Ispitivanje na uzorcima izrađenima od nodularnog lijeva nije provedeno usljed kvara na kidalici u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku, Fakultet strojarstva i brodogradnje, koji nikako nije bilo moguće otkloniti u vrijeme pisanja rada.

U radu je opisano numeričko modeliranje procesa deformiranja standardne epruvete za savijanje u tri točke. Za rad s numeričkim simulacijama korišten je programski paket Abaqus, koji, zajedno sa sustavom Aramis i programskim paketom True Load, tvori iznimno moćan alat za numeričku analizu konstrukcija i postupak inverznog modeliranja. Razvijen je postupak validacije numeričkog modela na čitavom području diskretizacije ispitivanog uzorka. Postupak se bazira metodama korelacije digitalne slike, što omogućuje sustav Aramis. Nadalje, u radu je proveden postupak inverznog modeliranja pomoću programskog paketa True Load. True Load je namjenjen za izračun nepoznatih sila koje djeluju na konstrukciju kada su poznata svojstva materijala konstrukcije i deformacije u mjernim točkama. Mjerne točke bi na realnoj konstrukciji predstavljale točke na kojima su postavljene tenzometarske trake, i korisnik bi bio ograničen postojećim stanjem pri izradi modela. U slučaju korištenja sustava koji prati polje deformacija na čitavoj površini konstrukcije ili uzorka, kao što je sustav Aramis, korisnik ima slobodu modelirati sustav tako da u modelu postavi mjerne točke na njihova optimalna mjesta. Usljed kvara opreme Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku, nije bilo moguće provesti ispitivanje točnosti programskog paketa True Load na takav način, već su uzete vrijednosti deformacija dobivene numeričkom simulacijom testa savijanja u tri točke kao vrijednosti polja deformacija za True Load. Test savijanja u tri točke je ranije u radu verificiran na temelju prethodnih radova autora, te je kao takav pouzdan kao izvor informacija o stanju deformacija na površini epruvete. Uz tako zadane deformacije, na epruveti modeliranoj 3D konačnim elementima s rubnim uvjetima zadanima preko kontaktnih ploha, metoda inverznog modeliranja je dala dovoljno pouzdane rezultate.

U daljnjem radu za verificiranje metodi potrebno je:

1. Provesti eksperimente cikličkog zamora na epruvetama uz poznate amplitude opterećenja i praćenje eksperimenata pomoću sustava Aramis radi stvaranja baze podataka o svojstvima materijala.

2. Ispitati mogućnost programskog paketa Aramis za izradu programskih skripti koje bi sadržavale konstitutivne modele i preko kojih bi se računala opterećenja konstrukcije na temelju poznatih deformacija čitavog uzorka.
3. Verificirati numeričku simulaciju cikličkog zamora epruveta.
4. Provjeriti valjanost programskog paketa True Load pri cikličkom opterećenju konstrukcije. Pritom treba paziti da se opterećenje zadaje i deformacije mjere u elastičnom području zbog ograničenja samog programskog paketa True Load.

LITERATURA

[1] P. Čanžar, Eksperimentalno i numeričko modeliranje zanornog ponašanja nodularnog lijeva, Doktorski rad, Zagreb, 2012..

[2] R. Darveaux, »Effect of Simulation Methodology on Solder Joint Crack Growth Correlation«.

[3] J. Frančeski, Algoritam za validaciju numeričkog modela primjenom metoda fotogrametrije i termografije, Rektorova nagrada, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013.

[4] R. Hormozi, Experimental and Numerical Simulations of Type 316 Stainless Steel Failure under LCF/TMF Loading Conditions, Doctoral Thesis, London: Imperial College, 2014.

[5] *DIN 50125 Prüfung metallischer Werkstofffe -Zugproben, 2009..*

[6] *FE Safe, Volume 2, Fatigue Theory Reference Manual, Safe Technology Limited, 2008.*

[7] I. Alfirević, Uvod u tenzore i mehaniku kontinuuma, Zagreb: Golden Marketing - Tehnička knjiga , 2003.

[8] ASTM Standard E606: Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing, 2002..

[9] *programski paket Abaqus 6.12, SIMULIA, Dassault Systemes.*

[10] *programski paket True Load, Wolf StarTechnologies.*

[11] *programski paket Fe-Safe 6.4, Safe Technology.*

[12] Z. P. F. S. M. i. K. J. Tomičević, »Primjena regularicazije na korelaciju digitalne slike,« u *Peti susret Hravtskog društva za mehaniku*, Donja Stubica, 2016.

[13] J. Frančeski, Numeričko modeliranje testa savijanja u tri točke, Zagreb: Završni rad, 2014.

[14] I. Trapić, Diplomski rad, Zagreb, 2014..

[15] Safe Technology: Fe -Safe True Load Component User Manual, 2011..

[16] T. Stanković, Fe-Safe True Load, analiza membrane, Zagreb: Prezentacija za industrijsku praksu, 2014.

[17] [Mrežno]. Available: http://www.oliver.efri.hr/~statist/Regresija%20i%20korelacija.pdf.

[18] I. Skozrit, J. Frančeski, Z. Tonković, M. Surjak, L. Krstulović - Opara, M. Vesenjak, J. Kodvanj, B. Gunjević i D. Lončarić, »Validation of numerical model by means of digital image correlation and thermography,« *Proceedings of the 3rd International Conference on Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading,* pp. 48-48, 2015..

[19] I. Skozrit, J. Frančeski, Z. Tonković, M. Surjak, L. Krstulović-Opara, M. Vesenjak, J. Kodvanj, B. Gunjević i D. Lončarić, »Validation of numerical model by means of digital image correlation and thermography,« *Prcedia Engineering,* svez. 101, pp. 450-458, 2015.

[20] J. Frančeski, Z. Tonković, I. Skozrit, M. Surjak, L. Krstulović-Opara, M. Vesenjak, J. Kodvanj i Ž. Domazet, »Validacija numeričkog modela primjenom metoda digitalne korelacije slike i termografije,« *Zbornik radova šestog susreta Hrvatskog društva za mehaniku ,* pp. 61-66, 2014.

[21] L. Krstulović-Opara, M. Surjak, M. Vesenjak, Z. Tonković, J. Frančeski, J. Kodvanj i Ž. Domazet, »Determination of material properties using dynamic tests supported by

thermography, digital image correlation and numerical simulation,« *Book of Abstracts of 8th International Congress of Croatian Society of Mechanics,* pp. 53-53, 2015.

PRILOZI

I. CD-R disc

7. DODATCI

7.1. Python skripta za prevođenje .odb datoteke u sintaksu iskoristivu sustavu Aramis

U nastavku je dana programska skripta koja se koristi za prevođenje podataka iz .odb datoteka u .dynain tekstualni zapis kojeg je moguće koristiti u programskom paketu Aramis.

```
# odb2dynain v1.0 / 22.02.2011
# ================================
# by T.Moeller (t.moeller@gom.com), modified by J.Frančeski and J.Markučič.
# GOM mbH (http://www.gom.com)
# ABAQUS python script to export odb-model and -result data
# to a *.dynain file which can be read by GOM SVIEW
# to compare ABAQUS data to optical strain measurement data.
# It exports all steps from all *.odb-files in the current path.
# Usage:
# ------
# - Command line:
#   abaqus python odb2dynain.py
# - ABAQUS/CAE:
#   Make shure the path-variable in this script (l. 46) is set right.
#   File -> Run Script -> Select this script in the Run Script dialog box
# Requirements:
# -------------
# - The *.odb-file must contain the node displacements and shell strains.
# - Refer to the Abaqus Analysis User's Manual Vol.1
#   4.1.3 Output to the output database
# - Enable it in the *.inp-file by:
#   *OUTPUT,FIELD
#   *NODE OUTPUT
#   U
#   *ELEMENT OUTPUT
#   LE
# - or enable it in ABAQUS/CAE by:
#   Step module: field output request editor
```

```
# Edited Version to include contact pairs that have to instance name, also
added float function for values in v.instance.name


import os, os.path
from glob import glob
# special ABAQUS libaries
import odbAccess as odba
from abaqusConstants import *

path = 'C:\\Users\\User\\Diplomski\\23KN_nonreduced\\odb2dynain' # path
to search for *.odb-files to export, use \\ for windows and \ for unix

sup3shells = ['S3', 'S3R', 'CPS3', 'CPS3R', 'CPE3', 'CPE3R'] # supported
three node shells
sup4shells = ['S4', 'S4R', 'CPS4', 'CPS4R', 'CPE4', 'CPE4R'] # supported
four node shells

for odbf in glob (os.path.join (path, '23k_nonreduced.odb')):
    print '-------\nhandling output database %s'%(odbf)
    odb = odba.openOdb (odbf)
    elements = {}
    nodes = {}
    eoffsets = {}
    noffsets = {}
    inst = odb.rootAssembly.instances
    for i in inst.keys():
        print 'reading elements from instance %s'%(inst[i].name)
        elements[i] = {}
        nnodes = set() # needed nodes
        for element in inst[i].elements:
            et = element.type
            # only shell elements supported in SVIEW
            if et not in sup3shells + sup4shells:
                continue
```

```
            e = {'id': None, 'nodes':(), 'type':'', 'epsx_upper':None,
'epsy_upper':None,          'epsxy_upper':None,          'major_upper':None,
'minor_upper':None,         'thickred_upper':None,         'epsx_lower':None,
'epsy_lower':None,          'epsxy_lower':None,          'major_lower':None,
'minor_lower':None, 'thickred_lower':None, 'epsx_2d':None, 'epsy_2d':None,
'epsxy_2d':None, 'major_2d':None, 'minor_2d':None, 'thickred_2d':None}
            id = element.label
            e['id'] = id
            ec = element.connectivity
            e['nodes'] = ec
            for nid in ec:
                nnodes.add (nid)
            e['type'] = et
            elements[i][id] = e
        if elements[i]:
            print 'reading nodes from instance %s'%(inst[i].name)
            nodes[inst[i].name] = {}
            for node in inst[i].nodes:
                id = node.label
                # only nodes from shell elements needed
                if id not in nnodes:
                    continue
                n = {'id': None, 'coord':[], 'dx':None, 'dy':None,
'dz':None, 'elements':[]}
                n['id'] = id
                n['coord'] = node.coordinates
                nodes[inst[i].name][id] = n
        else:
            print 'no shell elements found in instance %s'%(inst[i].name)
            del elements[i]
    # check number of instances and id offsets for unique ids in dynain file
    if len (elements.keys()) == 0:
        print 'no shell elements found in %s at all - no export
possible'%(odbf)
```

```
        continue
    elif len (elements.keys()) == 1:
        eoffsets[elements.keys()[0]] = 0
        noffsets[nodes.keys()[0]] = 0
    elif len (elements.keys()) > 1:
        maxeid = max ([max (elements[i].keys()) for i in elements.keys()])
        maxnid = max ([max (nodes[i].keys()) for i in nodes.keys()])
        edigits = len (str (maxeid))
        ndigits = len (str (maxnid))
        if edigits > 6 or ndigits > 6:
            print 'id values in %s are too long for valid export'%(odbf)
            continue
        for i, k in enumerate (elements.keys()):
            eoffsets[k] = i * 10**edigits
            noffsets[k] = i * 10**ndigits
    for step in odb.steps.keys():
        print 'handling step %s'%(odb.steps[step].name)
        for frame in range (len (odb.steps[step].frames)):
            #uspjeh1 = False
            #uspjeh2 = False
            print 'handling frame %u'%(frame)
            outp = odb.steps[step].frames[frame].fieldOutputs
            if outp.has_key ('U'):
                print 'get nodal deformations'
                u = outp['U']
                for v in u.values:
                    # dodano v.instance is not None and
                    if v.instance is not None and v.instance.name in
nodes.keys() and v.position == NODAL and v.nodeLabel in
nodes[v.instance.name].keys():
                        #uspjeh1 = True
                        if v.precision == DOUBLE_PRECISION:
                            dv = v.dataDouble
```

```
                        else:
                            dv = v.data
                        nodes[v.instance.name][v.nodeLabel]['dx']         =
float(dv[0]) #dodan float
                        nodes[v.instance.name][v.nodeLabel]['dy']         =
float(dv[1]) # dodan float
                        # take 2D projects into account
                        if len (dv) > 2:
                            nodes[v.instance.name][v.nodeLabel]['dz']     =
dv[2]
                        else:
                            nodes[v.instance.name][v.nodeLabel]['dz'] = 0.0
            else:
                print 'no nodal deformations found in %s, step %s\nUse
"*OUTPUT,FIELD" and "*NODE OUTPUT", "U"'%(odbf, odb.steps[step].name)
                continue
            if outp.has_key ('E') or outp.has_key ('LE'):
                print 'get element strains'
                if outp.has_key ('LE'):
                    strain = outp['LE'].getSubset (position=CENTROID) # only
use center if more than one integration point is defined
                    strfac = 1.0
                elif outp.has_key ('E'):
                    strain = outp['E'].getSubset (position=CENTROID) # only
use center if more than one integration point is defined
                    strfac = 100.0
                for v in strain.values:
                    # dodano v.instance is not None and
                    if v.instance is not None and v.instance.name not in
elements.keys() or v.elementLabel not in elements[v.instance.name].keys():
                        continue
                    layer = None
                    # take 2D projects into account
                    if type (v.sectionPoint) == type (None):
```

```
                        layer = '2d'
                    else:
                        # differentiate between upper and lower layer for
strains
                        if 'SPOS' in v.sectionPoint.description:
                            layer = 'upper'
                        elif 'SNEG' in v.sectionPoint.description:
                            layer = 'lower'
                    if layer:
                        sv = v.data

elements[v.instance.name][v.elementLabel]['epsx_%s'%(layer)] = float(sv[0]
* strfac)    #dodani floatovi tu

elements[v.instance.name][v.elementLabel]['epsy_%s'%(layer)] = float(sv[1]
* strfac)

elements[v.instance.name][v.elementLabel]['epsxy_%s'%(layer)]            =
float(sv[3] * strfac)

elements[v.instance.name][v.elementLabel]['major_%s'%(layer)]            =
float(v.maxInPlanePrincipal * strfac)

elements[v.instance.name][v.elementLabel]['minor_%s'%(layer)]            =
float(v.minInPlanePrincipal * strfac)

elements[v.instance.name][v.elementLabel]['thickred_%s'%(layer)] = float(-
v.outOfPlanePrincipal * strfac)
            else:
                print 'no element strains found in %s, step %s\nUse
"*OUTPUT,FIELD"    and    "*ELEMENT    OUTPUT",    "E"    or    "LE"'%(odbf,
odb.steps[step].name)
                continue
            print 'write *.dynain-file for %s, step %s, frame %u'%(odbf,
odb.steps[step].name, frame)
```

```
            fout = open (os.path.join (path, '.'.join (os.path.basename
(odbf).split ('.')[:-1]) + '_' + odb.steps[step].name + '_frame-
%u.dynain'%(frame)), 'w')
            fout.write ('*KEYWORD\n')
            print 'write nodes'
            fout.write ('*NODE\n')
            for i in nodes.keys():
                for n in nodes[i].items():
                    q = n[-1]
                    if type (q['dx']) == float:
                        fout.write ('%8u%16.8e%16.8e%16.8e\n'%(q['id'] +
noffsets[i], q['coord'][0] + q['dx'], q['coord'][1] + q['dy'], q['coord'][2]
+ q['dz']))
                    else:
                        fout.write ('%8u%16.8e%16.8e%16.8e\n'%(q['id'] +
noffsets[i], q['coord'][0], q['coord'][1], q['coord'][2]))
            print 'write elements'
            fout.write ('*ELEMENT_SHELL\n')
            for i in elements.keys():
                for e in elements[i].items():
                    e = e[-1]
                    fout.write ('%8u%8u%8u%8u%8u'%(e['id'] + eoffsets[i],
1, e['nodes'][0] + noffsets[i], e['nodes'][1] + noffsets[i], e['nodes'][2]
+ noffsets[i]))
                    # three node shells
                    if e['type'] in sup3shells:
                        fout.write ('%8u\n'%(e['nodes'][2] + noffsets[i]))
                    # four node shells
                    elif e['type'] in sup4shells:
                        fout.write ('%8u\n'%(e['nodes'][3] + noffsets[i]))
            for res in ['dx', 'dy', 'dz']:
                print 'write nodal results of %s displacement'%(res)
                fout.write ('$NODAL_RESULTS\n$RESULT OF %s\n'%(res))
                for i in nodes.keys():
```

```
                    for n in nodes[i].items():
                        n = n[-1]
                        if type (n[res]) == float:
                            fout.write   ('%10u   %10.4e\n'%(n['id']   +
noffsets[i], n[res]))

            for res in ['major_upper', 'minor_upper', 'thickred_upper',
'epsx_upper', 'epsy_upper', 'epsxy_upper', 'major_lower', 'minor_lower',
'thickred_lower', 'epsx_lower', 'epsy_lower', 'epsxy_lower', 'major_2d',
'minor_2d', 'thickred_2d', 'epsx_2d', 'epsy_2d', 'epsxy_2d']:
                print 'write element results of %s strain'%(res)
                fout.write      ('$SHELL_ELEMENT_RESULTS\n$RESULT      OF
%s\n'%(res))
                for i in elements.keys():
                    for e in elements[i].items():
                        e = e[-1]
                        if type (e[res]) == float:
                            fout.write   ('%10u   %10.4e\n'%(e['id']   +
eoffsets[i], e[res]))
            fout.write('*END\n')
            fout.close()
print 'finished'
```