

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Joško Frančeski

**Algoritam za validaciju  
numeričkog modela primjenom  
metoda fotogrametrije i  
termografije**

**Zagreb, 2014.**

Ovaj rad izrađen je u Laboratoriju za numeričku mehaniku te Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku, Zavoda za tehničku mehaniku, Katedre za mehaniku i čvrstoću, Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom prof. dr. sc. Zdenka Tonkovića i prof. dr. sc. Janoša Kodvanja i predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2013./14.

Rad je izrađen u okviru RCOP projekta "Centre of Excellence for Structural Health" (CEEStructHealth) sufinanciranog iz sredstava Europske unije (ugovor IPA2007/HR/16IPO/001-040513)

Joško Frančeski

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Motivacija .....	1
1.2. Cilj rada.....	1
2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA .....	3
2.1. Plosnata epruveta za vlačno ispitivanje.....	3
2.2. Optički sustav ARAMIS 4M [2].....	3
2.3. Infracrvena termokamera CEDIP INFRARED – SILVER 420M FLIR SC 5000 [3].	5
2.4. Eksperimentalni postav .....	5
2.5. Utjecaj brzine deformiranja na dijagram naprezanja i deformiranja .....	8
2.6. Dijagrami stvarnih naprezanja i deformacija .....	8
3. NUMERIČKO MODELIRANJE VLAČNOG TESTA .....	14
3.1. Programski paket ABAQUS .....	14
3.1.1. Opis primjenjenih konačnih elemenata.....	14
3.1.2. Verifikacija numeričkog modela.....	15
3.1.2.1. Ravninsko stanje naprezanja.....	16
3.1.2.2. Ravninsko stanje deformacija.....	20
3.2. Numerička formulacija neizoternog materijalnog modela.....	23
3.3. Modeliranje i diskretiziranje epruvete za vlačno ispitivanje i vlačnog eksperimenta	26
4. REZULTATI VLAČNOG TESTA .....	30
4.1. Rezultati eksperimenta, ARAMIS .....	30
4.2. Rezultati eksperimenta, termografija .....	31
4.3. Rezultati numeričke simulacije metodom konačnih elemenata, ABAQUS.....	33
4.4. Usporedba rezultata pomaka određenih fotogrametrijom i numeričkom simulacijom	35
4.5. Usporedba metoda bilježenja plastične deformacije fotogrametrijom i infracrvenom	40
termografijom [17].....	40
4.6. Usporedba metoda bilježenja temperaturnih promjena infracrvenom termografijom i	41
numeričkom simulacijom.....	41
5. VALIDACIJA TESTA SAVIJANJA U TRI TOČKE .....	44
5.1. Epruveta bez zareza za savijanje u tri točke.....	44
5.2. Utvrđivanje mehaničkih parametara aluminijske legure AlCu5BiPB – T8 [18],	44
korištene za epruvetu za savijanje u tri točke .....	44
5.3. Eksperimentalni rezultati testa savijanja epruvete bez zareza .....	46
5.4. Numerički modeliranje testa savijanja epruvete bez zareza .....	48
5.5. Usporedba rezultata određenih sustavom ARAMIS i programskim paketom	54
ABAQUS za test savijanja u tri točke epruvete bez zareza .....	54

---

6. ZAKLJUČAK.....	61
LITERATURA.....	63
ZAHVALE.....	64
SAŽETAK.....	65
SUMMARY.....	66

## POPIS SLIKA

Slika 1	Geometrija epruvete za vlačno ispitivanje .....	3
Slika 2	ARAMIS 4M .....	4
Slika 3	Stohastički uzorak na površini mjernog objekta .....	4
Slika 4	Mreža faceta .....	4
Slika 5	FLIR SC 5000 infracrvena termokamera .....	5
Slika 6	Eksperimentalni postav za ispitivanje epruveta .....	6
Slika 7	Utjecaj brzine deformacije na dijagram naprezanja i deformiranja [4].....	8
Slika 8	Dijagram naprezanje-deformacija za kvazistatičko ispitivanje.....	10
Slika 9	Dijagram naprezanje-deformacija za brzinu ispitivanja $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ .....	11
Slika 10	Dijagram naprezanje-deformacija za brzinu ispitivanja $10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ .....	12
Slika 11	Dvodimenzijski četverokutni konačni element sa četiri čvora [9] .....	14
Slika 12	Geometrija i opterećenje membrane.....	15
Slika 13	Numerički model membrane .....	17
Slika 14	Normalno naprezanje u smjeru osi $x$ za ravninsko stanje naprezanja, Mpa.....	17
Slika 15	Raspodjela deformacija u smjeru osi $x$ za ravninsko stanje naprezanja, - .....	18
Slika 16	Raspodjela deformacija u smjeru osi $y$ za ravninsko stanje naprezanja, - .....	18
Slika 17	Raspodjela pomaka u smjeru osi $x$ za ravninsko stanje naprezanja, mm .....	19
Slika 18	Raspodjela pomaka u smjeru osi $y$ za ravninsko stanje naprezanja, mm.....	19
Slika 19	Normalno naprezanje u smjeru osi $x$ kod ravninskog stanja deformacija, MPa ...	21
Slika 20	Raspodjela deformacija u smjeru osi $x$ za ravninsko stanje deformacija, -.....	21
Slika 21	Raspodjela deformacija u smjeru osi $y$ za ravninsko stanje deformacija, -.....	22
Slika 22	Raspodjela pomaka u smjeru osi $x$ za ravninsko stanje deformacija, mm .....	22
Slika 23	Raspodjela pomaka u smjeru osi $y$ za ravninsko stanje deformacija, mm .....	23
Slika 24	Diskretizirani model ploče .....	25
Slika 25	Ekvivlentno naprezanje po energijskoj teoriji čvrstoće, MPa.....	25
Slika 26	Temperaturno stanje deformirane ploče, °C.....	26
Slika 27	Diskretizirani modeli epruvete s različitim gustoćama mreže konačnih elemenata .....	26
Slika 28	Rubni uvjeti pomaka i sila.....	27
Slika 29	Eksperimentalni rezultati pomaka u smjeru osi $x$ , mm .....	30
Slika 30	Eksperimentalni rezultati pomaka u smjeru osi $y$ , mm .....	31
Slika 31	Promjena temperature za epruvetu deformiranu brzinom $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ .....	32
Slika 32	Promjena temperature za epruvetu deformiranu brzinom $10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ .....	32
Slika 33	Numerički rezultati pomaka u smjeru osi $x$ , mm.....	33
Slika 34	Numerički rezultati pomaka u smjeru osi $y$ , mm.....	33
Slika 35	Promjena temperature za epruvetu deformiranu brzinom $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ , °C.....	34
Slika 36	Promjena temperature za epruvetu deformiranu brzinom $10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ , °C .....	34
Slika 37	Dijagram toka korelacije rezultata numeričke simulacije i eksperimenta.....	36

Slika 38	Lokalne razlike podudaranja geometrije, mm.....	37
Slika 39	Rezultati numeričke simulacije mapirani geometriju epruvete snimljenu sustavom ARAMIS, pomaci u smjeru osi $x$ i $y$ , mm .....	37
Slika 40	Razlika pomaka u smjeru osi $x$ , mm.....	38
Slika 41	Razlika pomaka u smjeru osi $y$ , mm.....	39
Slika 42	Ekvivalentno naprezanje prema energetske teoriji čvrstoće .....	40
Slika 43	Infracrvena temperaturna raspodjela .....	40
Slika 44	Usporedba temperaturnih polja za brzinu deformiranja $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ , °C .....	42
Slika 45	Usporedba temperaturnih polja za brzinu deformiranja $10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ , °C .....	43
Slika 46	Shematski prikaz epruvete za savijanje u tri točke bez zareza .....	44
Slika 47	Dijagram naprezanje istezanje AlCu5BiPB – T8.....	45
Slika 48	ARAMIS, rezultati pomaka u smjeru osi $x$ , mm .....	46
Slika 49	ARAMIS, rezultati pomaka u smjeru osi $y$ , mm .....	47
Slika 50	Dijagram pomaka u smjeru osi $y$ po visini središnjeg presjeka epruvete dobiven eksperimentom .....	47
Slika 51	Kontaktne plohe između gornjeg valjka i gornje površine epruvete.....	48
Slika 52	Kontaktne plohe između donjeg valjka i donje površine epruvete .....	48
Slika 53	Rubni uvjeti pomaka i sila.....	49
Slika 54	Epruveta diskretizirana s 506 CPE4 KE.....	49
Slika 55	Epruveta diskretizirana s 1968 CPE4 KE.....	49
Slika 56	Epruveta diskretizirana s 4522 CPE4 KE.....	50
Slika 57	Numerički rezultati pomaka u smjeru osi $x$ , mm.....	51
Slika 58	Numerički rezultati pomaka u smjeru osi $y$ , mm.....	52
Slika 59	Dijagram pomaka u smjeru $y$ po duljini poprečnog presjeka za mrežu od 506 KE .....	53
Slika 60	Dijagram pomaka u smjeru $y$ po duljini poprečnog presjeka za mrežu od 1968 KE .....	53
Slika 61	Dijagram pomaka u smjeru $y$ po duljini poprečnog presjeka za mrežu od 4522 KE .....	53
Slika 62	Lokalne razlike podudaranja geometrije za mrežu od 506 KE, mm.....	54
Slika 63	Lokalne razlike podudaranja geometrije za mrežu od 1968 KE, mm.....	54
Slika 64	Lokalne razlike podudaranja geometrije za mrežu od 4522 KE, mm.....	55
Slika 65	Rezultati numeričke simulacije mapirani na eksperimentalne podatke, pomaci u smjeru osi $x$ za mrežu od 506 KE, mm.....	55
Slika 66	Rezultati numeričke simulacije mapirani na eksperimentalne podatke, pomaci u smjeru osi $x$ za mrežu od 1968 KE, mm.....	56
Slika 67	Rezultati numeričke simulacije mapirani na eksperimentalne podatke, pomaci u smjeru osi $x$ za mrežu od 4522 KE, mm.....	56
Slika 68	Rezultati numeričke simulacije mapirani na eksperimentalne podatke, pomaci u smjeru osi $y$ za mrežu od 506 KE, mm.....	57
Slika 69	Rezultati numeričke simulacije mapirani na eksperimentalne podatke, pomaci u smjeru osi $y$ za mrežu od 1968 KE, mm.....	57
Slika 70	Rezultati numeričke simulacije mapirani na eksperimentalne podatke, pomaci u smjeru osi $y$ za mrežu od 4522 KE, mm.....	57
Slika 71	Razlika pomaka u smjeru osi $x$ za mrežu od 506 KE, mm.....	58
Slika 72	Razlika pomaka u smjeru osi $x$ za mrežu od 1968 KE, mm.....	58
Slika 73	Razlika pomaka u smjeru osi $x$ za mrežu od 4522 KE, mm.....	59
Slika 74	Razlika pomaka u smjeru osi $y$ za mrežu od 506 KE, mm.....	59

---

Slika 75	Razlika pomaka u smjeru osi $y$ za mrežu od 1968 KE, mm.....	60
Slika 76	Razlika pomaka u smjeru osi $y$ za mrežu od 4522 KE, mm.....	60

## POPIS TABLICA

Tabela 1	Sastav aluminijske legure Al2024 .....	9
Tabela 2	Mehanička svojstva legure Al2024 .....	9
Tabela 3	Ostala svojstva legure Al2024 [6] .....	9
Tabela 4	Prikaz ovisnosti naprežanja i plastičnih deformacija po određenim točkama za kvazistatičko ispitivanje .....	11
Tabela 5	Prikaz ovisnosti naprežanja i plastičnih deformacija po određenim točkama za brzinu ispitivanja $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ .....	12
Tabela 6	Prikaz ovisnosti naprežanja i plastičnih deformacija po određenim točkama za brzinu ispitivanja $10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ .....	13
Tabela 7	Osnovne konstitutivne jednadžbe neizoternog materijalnog modela.....	24
Tabela 8	Tablica konzistentnih jedinica .....	29
Tabela 9	Mehanička svojstva aluminijske legure AlCu5BiPb - T8 [18] .....	45
Tabela 10	Prikaz ovisnosti naprežanja i plastičnih deformacija po određenim točkama.....	45



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A_0$	$\text{mm}^2$	Početna površina poprečnog presjeka epruvete
$F$	N	Sila kojom se opterećuje epruveta
$\sigma_E$	$\text{N/mm}^2$	Inženjersko naprezanje
$l_0$	mm	Početna mjerna duljina epruvete
$l$	mm	Konačna mjerna duljina epruvete
$\varepsilon_E$		Inženjerska deformacija
$\varepsilon_T$		Stvarna deformacija
$V_0$	$\text{mm}^3$	Početni volumen epruvete
$V$	$\text{mm}^3$	Konačni volumen epruvete
$A$	$\text{mm}^2$	Konačna površina poprečnog presjeka epruvete
$\sigma_T$	$\text{N/mm}^2$	Stvarno naprezanje
$\varepsilon_T^{\text{el}}$		Elastična komponenta stvarne deformacije
$\varepsilon_T^{\text{pl}}$		Plastična komponenta stvarne deformacije
$E$	GPa	Youngov modul
$R_{p0,2}$	MPa	Granica razvlačenja
$R_m$	MPa	Vlačna čvrstoća
$\nu$		Poissonov faktor
$\rho$	$\text{kg/mm}^3$	Gustoća
$c_p$	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet
$\lambda$	W/mK	Toplinska provodnost
$p$	MPa	Tlak
$L$	mm	Duljina membrane
$H$	mm	Visina membrane
$d$	mm	Debljina membrane
$\sigma_x$	$\text{N/mm}^2$	Normalno naprezanje u smjeru osi $x$
$\sigma_y$	$\text{N/mm}^2$	Normalno naprezanje u smjeru osi $y$
$\varepsilon_x$		Duljinska deformacija u smjeru osi $x$
$\varepsilon_y$		Duljinska deformacija u smjeru osi $y$
$u_x$	mm	Pomak u smjeru osi $x$
$u_y$	mm	Pomak u smjeru osi $y$
$\dot{T}$	$^{\circ}\text{C}$	Inkrementalno povećanje temperature
$\eta$		Funkcija disipacije energije
$\dot{\sigma}^{ij}$	MPa	Tenzor naprezanja
$\dot{\varepsilon}_{ij}$		Tenzor deformacija
$\dot{q}^{\text{pl}}$	W	Toplinski tok

$D^{ijkl}$	Gpa	Tenzor elastičnosti
$\dot{\epsilon}_{ij}^{el}$		Elastična komponenta tenzora deformacija
$\dot{\epsilon}_{ij}^{pl}$		Plastična komponenta tenzora deformacija
$\dot{\epsilon}_{ij}^t$		Toplinska komponenta tenzora deformacija
$\alpha$	$\mu\text{m/mK}$	Koeficijent linearnog toplinskog rastezanja

## 1. UVOD

### 1.1. Motivacija

Novi zahtjevi na pouzdanost i sigurnost, zajedno s upotrebom novih materijala i novih tehnologija proizvodnje mogu se realizirati jedino primjenom naprednih metoda analize konstrukcije i opisivanja ponašanja materijala. Kao i kod većine drugih problema, numeričke simulacije sve više zamjenjuju mnogo skuplji eksperiment. Osim toga, eksperimentalna analiza procesa deformiranja konstrukcije za vrijeme njene eksploatacije u većini slučajeva nije moguća ili je vrlo teško izvediva, uz visoki rizik i cijenu koštanja. Primjena metode konačnih elemenata omogućuje simuliranje procesa deformiranja materijala sve do potpunog loma konstrukcijske komponente. S druge strane, numeričke simulacije su toliko moćne koliko i fizikalni i matematički modeli koji stoje iza njih. Značajan utjecaj na točnost numeričkog postupka ima opisivanje materijalnog modela koji se definira konstitutivnim relacijama, ali i ispravnost algoritma za rješavanje konstitutivnih jednadžbi na razini točke integracije. Namjera rada je što točnije eksperimentalno odrediti parametre materijala koji ulaze u formulacije energijskih funkcija na kojima se temelje konstitutivni modeli. Eksperimentalno određivanje parametara materijala potrebno je odrediti pomoću metoda fotogrametrije i termografije kako bi se moglo izvršiti digitalnu korelaciju slika stanja numeričkih rezultata i eksperimentalnih podataka.

### 1.2. Cilj rada

Cilj ovog rada je izrada korelacije između teorije, numeričke metode i eksperimenta kao osnove za razvoj numeričkog algoritma kojim bi bilo moguće provesti dovoljno točne simulacije elastoplastičnih problema uz obuhvaćanje pojave temperaturne promjene prilikom nagle promjene opterećenja konstrukcije. Na temelju eksperimentalnih podataka dobivenih u okviru predloženih istraživanja namjera je odrediti parametre materijala u konstitutivnim relacijama koje sprežu elastoplastične mehanizme s termičkim efektima te velike deformacije. To će omogućiti izvod novih originalnih i numerički učinkovitih algoritama za modeliranje kompleksnog procesa deformiranja materijala, čime će se numeričko modeliranje to više približiti realnom ponašanju materijala. Na taj način bit će moguće analizirati složene materijalne modele (elastoplastičnost, viskoplastičnost, oštećenje, puzanje, termoplastičnost, itd) duktilnih metala i njihovih legura, kompozita, polimera, kao i bioloških materijala

Numerička analiza je provedena pomoću programskog paketa ABAQUS 6.11, u Laboratoriju za numeričku mehaniku Zavoda za tehničku mehaniku, a rezultati eksperimenata

zabilježeni su pomoću sustava za fotogrametriju ARAMIS 4M u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku, Zavoda za tehničku mehaniku, te infracrvene termokamere CEDIP INFRARED – SILVER 420M FLIR SC 5000.

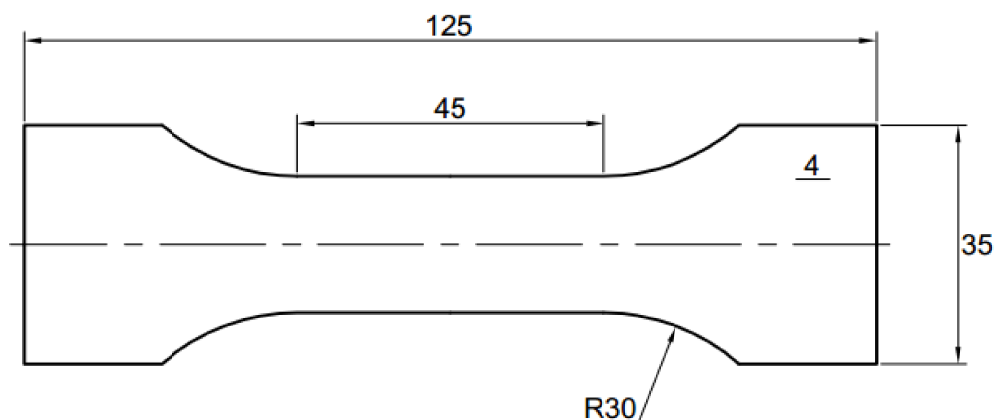
Rad predstavlja nastavak istraživanja provedenog unutar okvira završnog rada autora [1].

## 2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

U okviru eksperimentalnih istraživanja provedeno je statičko i dinamičko vlačno ispitivanje te ispitivanje savijanjem u tri točke epruveta izrađenih iz aluminijskih legura.

### 2.1. Plosnata epruveta za vlačno ispitivanje

Plosnata epruveta za vlačno ispitivanje izrađena je za kvazistatičko i dinamičko ispitivanje u jednoosnom stanju naprezanja. Površina epruvete je polirana kako bi na nju bilo moguće nanijeti stohastički raster potreban za provedbu ispitivanja pomoću sustava ARAMIS 4M. Dimenzije i oblike epruvete prikazane su na slici 1.



Slika 1 Geometrija epruvete za vlačno ispitivanje

### 2.2. Optički sustav ARAMIS 4M [2]

ARAMIS 4M je optički mjerni sustav za beskontaktno nerazorno mjerenje deformacija i raspodjela pomaka statički ili dinamički opterećenih konstrukcija metodom fotogrametrije. Pomoću sustava ARAMIS se može odrediti raspodjela pomaka po čitavome području analize, bez utjecanja na rezultate mjerenja, za razliku od kontaktnih metoda poput tenzometarskih traka koje pružaju podatke o pomacima samo na točkama konstrukcije na kojima su postavljene. Pomoću ARAMIS-a je moguće vrlo točno odrediti trenutni oblik mjerenog objekta, raspodjelu pomaka i deformacija, te iz tih podataka i ponašanje materijala.

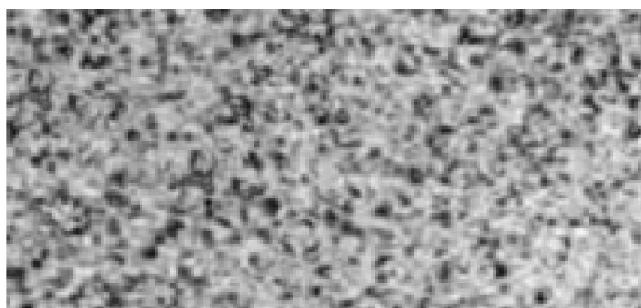
Kao takav, ARAMIS je savršeno prilagođen za određivanje nepoznatih svojstava materijala, dinamičke analize ( ispitivanja sudara, ispitivanja vijeka trajanja, analiza vibracija), te za probleme kod kojih se javljaju velike deformacije i za ispitivanje konstrukcija složene geometrije.

ARAMIS se sastoji od stativa, osvjetljenja te dvije kamere visoke brzine i rezolucije čiji je kalibrirani položaj u prostoru uvjetovan veličinom mjernog objekta, koji može varirati u u rasponu veličina od  $\text{mm}^2$  do više  $\text{m}^2$ , te računala za obradu i prikaz podataka sa pripadajućim programskim paketima, prikazano na slici 2.

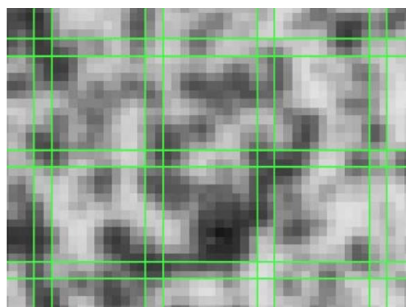


**Slika 2 ARAMIS 4M**

ARAMIS prepoznaje mjerni objekt pomoću stohastički nanesenog rastera. Na nanesenom rasteru se odabire neka početna točka oko koje programski paket izrađuje mrežu faceta. Pomoću faceta i početnog kalibriranja, programski paket ARAMIS povezuje slike koje prima iz obje kamere i na temelju toga izrađuje trodimenzionalni model mjernog objekta.



**Slika 3 Stohastički uzorak na površini mjernog objekta**



**Slika 4 Mreža faceta**

### 2.3. Infracrvena termokamera CEDIP INFRARED – SILVER 420M FLIR SC 5000 [3]

Infracrvena termokamera FLIR SC 5000 je mjerni sustav za beskontaktno nerazorno mjerenje temperaturnih stanja i promjena mjernog objekata metodom infracrvene termografije.

Infracrvena termografija se bazira na bilježenju zračenja površine mjernog objekta u određenom području valnih duljina infracrvenog spektra pomoću uređaja, infracrvene kamere. Infracrvena kamera zabilježava cjelokupno prispjelo zračenje sa površine mjernog objekta, koje se sastoji od vlastitog emitiranog zračenja i reflektiranog zračenja, te je, radi točnosti mjerenja, potrebno eliminirati reflektirano zračenje. Obrada površine epruvete stohastičkim rasterom za potrebe mjernog sustava ARAMIS djeluje pogodno i eliminiranju reflektiranog zračenja.



Slika 5 FLIR SC 5000 infracrvena termokamera

Ispitivanja infracrvenom termokamerom provedena su pod vodstvom prof. dr. sc. Lovre Krstulović-Opare i prof. dr. sc. Željka Domazeta sa Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu.

### 2.4. Eksperimentalni postav

Vlačni test proveden je u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku. Epruveta za vlačno ispitivanje je podvrgnuta različitim brzinama deformiranja na dinamičkoj kidalici LFV 50-HH; Walter, Bai AG, kapaciteta  $\pm 50\text{kN}$ , kao i kvazistatičkom ispitivanju na kvazistatičkoj kidalici MESSPHYSIK BETA 50-5, kapaciteta  $\pm 50\text{kN}$  radi utvrđivanja karakteristika materijala za kvazistatičko opterećenje.



**Slika 6** Eksperimentalni postav za ispitivanje epruveta

Epruvete su podvrgnute brzinama deformiranja od  $0.0125 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  za kvazistatičko ispitivanje te  $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  i  $10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  za dinamičko, te su zabilježeni podatci o naprežanju i deformaciji, kao i o promjeni temperature epruvete tokom deformiranja za dinamičko ispitivanje.

Podatci su istovremeno bilježeni pomoću infracrvene termokamere te fotogrametrijskog sustava ARAMIS 4M, kao i internim sensorima same kidalice LFV 50-HH; Walter, Bai AG za dinamičko ispitivanje, te pomoću uparenog videoekstenzometra i senzora kidalice MESSPHYSIK BETA 50-5 za kvazistatičko ispitivanje.

Podatci o opterećenju su bilježeni pomoću kidalice, podatci o pomacima epruvete pomoću videoekstenzometara i optičkog sustava ARAMIS 4M, te o promjeni temperature epruvete



pomoću infracrvene termokamere FLIR SC5000. Pomoću tih podataka su izvedeni potrebni dijagrami inženjerskog i stvarnog naprezanja i deformacije. Brzina uzorkovanja sustava ARAMIS 4M iznosi 60 Hz, a sustava FLIR SC5000 800 Hz.

Za plosnatu epruvetu koju se ispituje na vlak, opterećenu silom  $F$ , i početne površine poprečnog presjeka  $A_0$ , inženjersko naprezanje iznosi:

$$\sigma_E = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

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

$$\varepsilon_E = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.2)$$

Stvarna deformacija se definira kao inkrement produljenja  $dl$  podijeljen sa konačnom duljinom  $l$ :

$$d\varepsilon_T = \frac{dl}{l} \quad (2.3)$$

Nakon provedene integracije i antilogaritmiranja te uvrštavanja jednadžbe (1.2), stvarnu deformaciju može se zapisati kao:

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon_E) \quad (2.4)$$

Prema [4], elastična deformacija uzrokuje promjenu u volumenu dok do velikih, odnosno plastičnih deformacija dolazi uz konstantan volumen.

$$V_0 = V \Rightarrow A_0 l_0 = A l \Rightarrow \frac{l}{l_0} = \frac{A}{A_0} \Rightarrow A = \frac{A_0 l}{l_0} \quad (2.5)$$

Ukoliko jednadžbu 1.5 uvrstimo u 1.4 prije antilogaritmiranja dobije se:

$$\varepsilon_T = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A} \quad (2.6)$$

Stvarno naprezanje se definira kao omjer trenutne sile  $F$  i trenutne površine poprečnog presjeka  $A$ :

$$\sigma_T = \frac{F}{A} \quad (2.7)$$

Primjenom uvjeta konstantnog volumena, jednadžba (1.5) u jednadžbu (1.7), stvarno naprezanje se zapisuje kao:

$$\sigma_T = \frac{F \cdot l}{A_0 \cdot l_0} = \sigma_E (1 + \varepsilon_E) \quad (2.8)$$

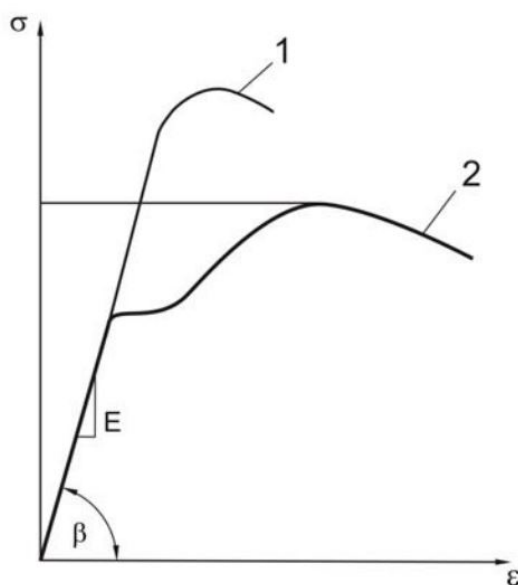
Iznos plastične deformacije za neko stanje naprezanja u plastičnom području,  $\sigma_y$ ,

$$\varepsilon_T = \varepsilon_T^{el} + \varepsilon_T^{pl} \Rightarrow \varepsilon_T^{pl} = \varepsilon_T - \varepsilon_T^{el} \Rightarrow \varepsilon_T^{pl} = \varepsilon_T - \frac{\sigma_y}{E} \quad (2.9)$$

Pomoću jednadžbi (1.4), (1.8) i (1.9), izrađeni su dijagrami stvarnih napreznja i deformacija te tablice podataka ovisnosti plastične deformacije o napreznju za mjerene epruvete.

## 2.5. Utjecaj brzine deformiranja na dijagram napreznja i deformiranja

Prema [5], sa povećanjem brzine deformiranja materijala gubi se izražena ploha tečenja, te raste vlačna čvrstoća, no do loma dolazi pri ukupno manjoj deformaciji. Porastom brzine deformiranja proces izmjene topline generirane disipacijom mehaničke energije sa okolinom postaje neizoterman, te u materijalu dolazi do povećanja temperature.



Slika 7 Utjecaj brzine deformacije na dijagram napreznja i deformiranja [4]

## 2.6. Dijagrami stvarnih napreznja i deformacija

Za epruvete 1 i 2 je proveden kvazistatički eksperiment u svrhu potvrđivanja materijalnih parametara aluminijske legure Al2024, proveden pomoću uparenog videoekstenzometra.

Aluminijska legura Al2024, korištena za eksperiment je legura aluminija i bakra sa masenim udjelima elemenata prema tablici 1 [6].

**Tabela 1 Sastav aluminijske legure Al2024**

Elementi	Maseni udio, %
Al	90.7 - 94.7
Cr	Max 0.1
Cu	3.8 - 4.9
Fe	Max 0.5
Mg	1.2 - 1.8
Mn	0.3 - 0.9
Si	Max 0.5
Ti	Max 0.15
Zn	Max 0.25
Ostali, svaki	Max 0.05
Ostali, maksimalno	Max 0.15

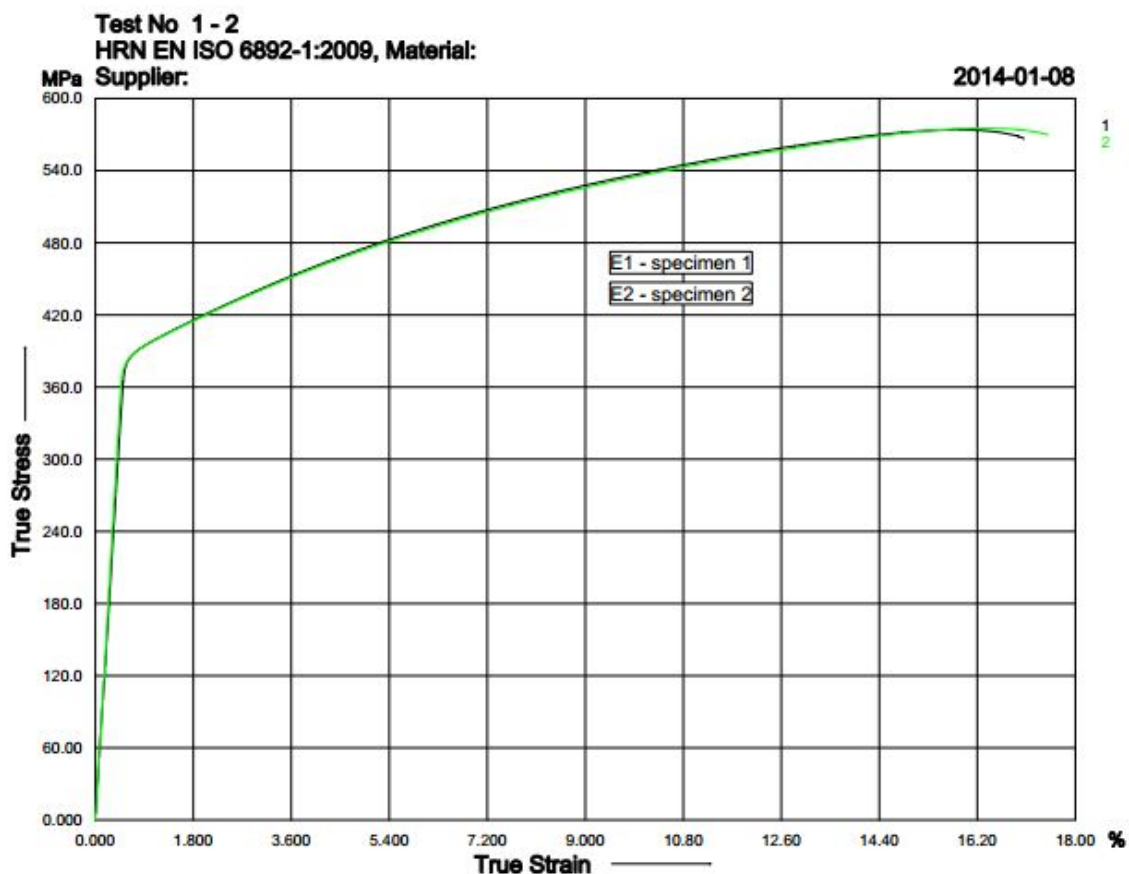
Ekperimentalno utvrđena mehanička svojstva legure su dana u tablici 2.

**Tabela 2 Mehanička svojstva legure Al2024**

Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ , MPa	Vlačna čvrstoća $R_m$ , MPa	Deformacija (%)	Modul elastičnosti $E$ , GPa	Poissonov faktor, $\nu$
385,9	493,6	14,36	72,56	0,33
385,3	492,5	14,58	74,5	0,33

**Tabela 3 Ostala svojstva legure Al2024 [6]**

Gustoća, $\rho$ , $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Koeficijent toplinske rastezljivosti, $\alpha$ , $\frac{\mu\text{m}}{\text{K}}$	Specifični toplinski kapacitet, $c$ , $\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$	Toplinska provodnost $\lambda$ , $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$
2780	23.2	875	121

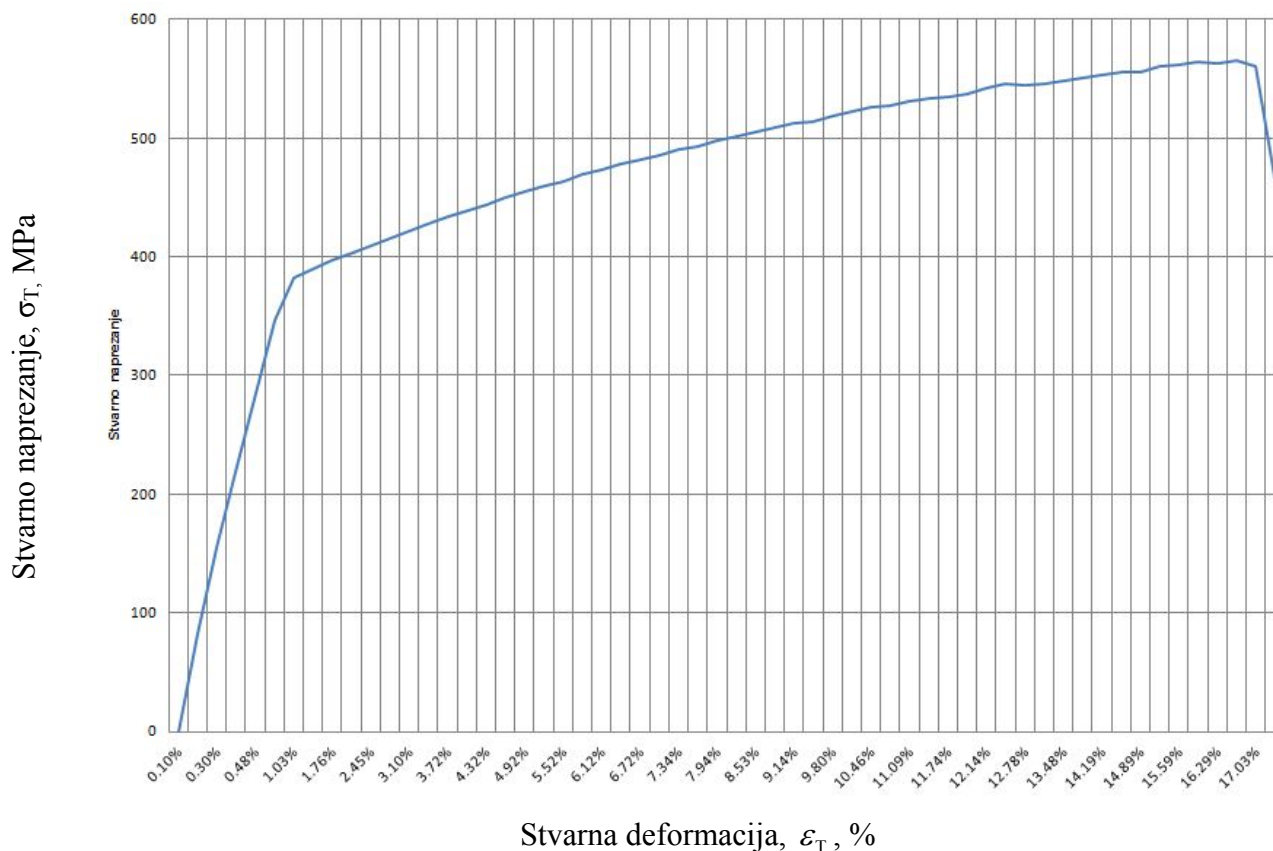


**Slika 8 Dijagram naprezanje-deformacija za kvazistatičko ispitivanje**

U nelinearno plastičnom području potrebno je prikazati ovisnost naprezanja i plastičnih deformacija po određenim točkama, kako bi programski paket interpolacijom između tih točaka dao što vjerniji prikaz ponašanja materijala u nelinearno plastičnom području. [7] Prikaz ovisnosti naprezanja i plastičnih deformacija dan je u tablici 4.

**Tabela 4** Prikaz ovisnosti naprežanja i plastičnih deformacija po određenim točkama za kvazistatičko ispitivanje

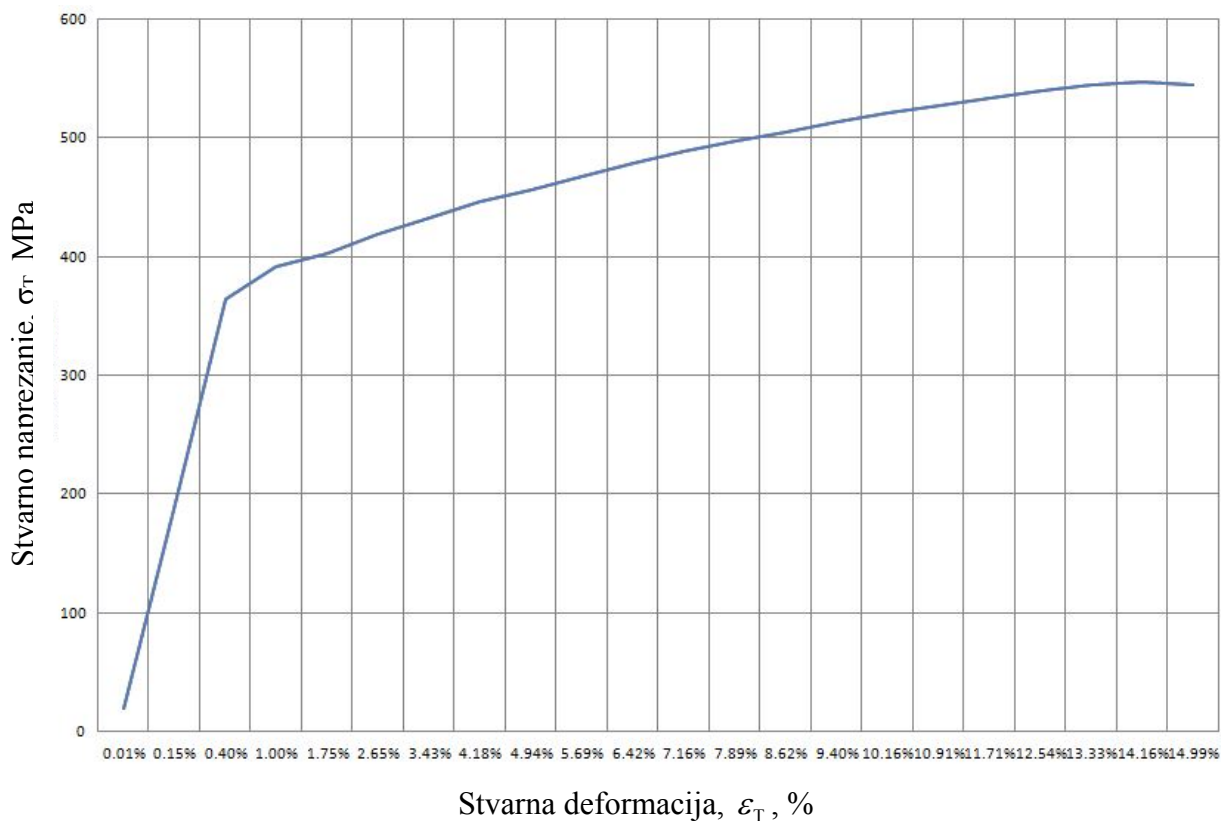
	Naprežanje $\sigma$ , MPa	Plastična deformacija $\varepsilon_{pl}$ , -
1	385.9	0
2	419.77	0.0074
3	459.09	0.023
4	491.94	0.0416
5	516.67	0.0553
6	536.32	0.07
7	554.46	0.0868
8	567.82	0.1006
9	573.98	0.1184



**Slika 9** Dijagram naprežanje-deformacija za brzinu ispitivanja  $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

**Tabela 5** Prikaz ovisnosti napreznaja i plastičnih deformacija po određenim točkama za brzinu ispitivanja  $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

	Napreznaje $\sigma$ , MPa	Plastična deformacija $\epsilon_{pl}$ , -
1	385.9	0
2	421.89	0.0252
3	444.22	0.0371
4	468.82	0.0517
5	501.79	0.0755
6	525.47	0.0974
7	537.36	0.1123
8	552.47	0.1343
9	564.68	0.1589



**Slika 10** Dijagram napreznaje-deformacija za brzinu ispitivanja  $10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

**Tabela 6** Prikaz ovisnosti napreznja i plastičnih deformacija po određenim točkama za  
brzinu ispitivanja  $10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

	Napreznje $\sigma$ , MPa	Plastična deformacija $\epsilon_{pl}$ , -
1	385.9	0
2	419.16	0.0202
3	446.26	0.0358
4	467.56	0.0506
5	497.72	0.0721
6	540.04	0.1026
7	545.16	0.1176
8	546.65	0.1335
9	551.03	0.1425

### 3. NUMERIČKO MODELIRANJE VLAČNOG TESTA

Numeričko modeliranje provedeno je primjenom programskog paketa ABAQUS/Standard[12] koji se temelji na metodi konačnih elemenata. U tekstu koji slijedi dat će se kratki prikaz navedenog programskog paketa s opisom primjenjenih konačnih elemenata. Osim toga, numerički model primjenjen za analizu vlačnog testa verificiran usporedbom s analitičkim rješenjima.

#### 3.1. Programski paket ABAQUS

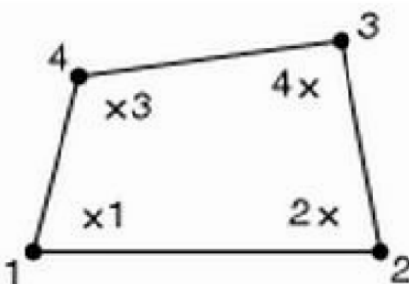
ABAQUS je programski paket koji služi za analizu metodom konačnih elemenata te računalom potpomognuto inženjerstvo ( CAE – Computer Aided Engineering). U sebi uključuje sve potrebne alate za izvođenje potpune simulacije, od samog modeliranja ispitivanog objekta, geometrije, opterećenja i rubnih uvjeta, do izvođenja analize te prikazivanja dobivenih rezultata. Modeliranje je moguće izvesti i u drugim programskim paketima poput CAD alata CATIA. [8]

Tokom ovog rada, ABAQUS će se koristiti za modeliranje i simulaciju vlačnog testa na plosnatoj epruveti za vlačno ispitivanje. Za diskretizaciju geometrije epruvete će se koristiti dvodimenzijски konačni elementi za analizu ravninskog stanja naprezanja.

##### 3.1.1. Opis primjenjenih konačnih elemenata

Za analizu ravninskog stanja naprezanja korišteni su CPS4 konačni elementi iz ABAQUS-ove baze konačnih elemenata. CPS4 je konačni element prvog reda koji se sastoji od 4 čvora te 4 točke integracije.

Za analizu ravninskog stanja naprezanja korišteni su CPE4 konačni elementi. CPE4 konačni element se sastoji od četiri čvora i osam točaka integracije. Izgled navedenih četverokutnih elemenata elementa se može vidjeti na slici 11. [9]



Slika 11 Dvodimenzijски četverokutni konačni element sa četiri čvora [9]

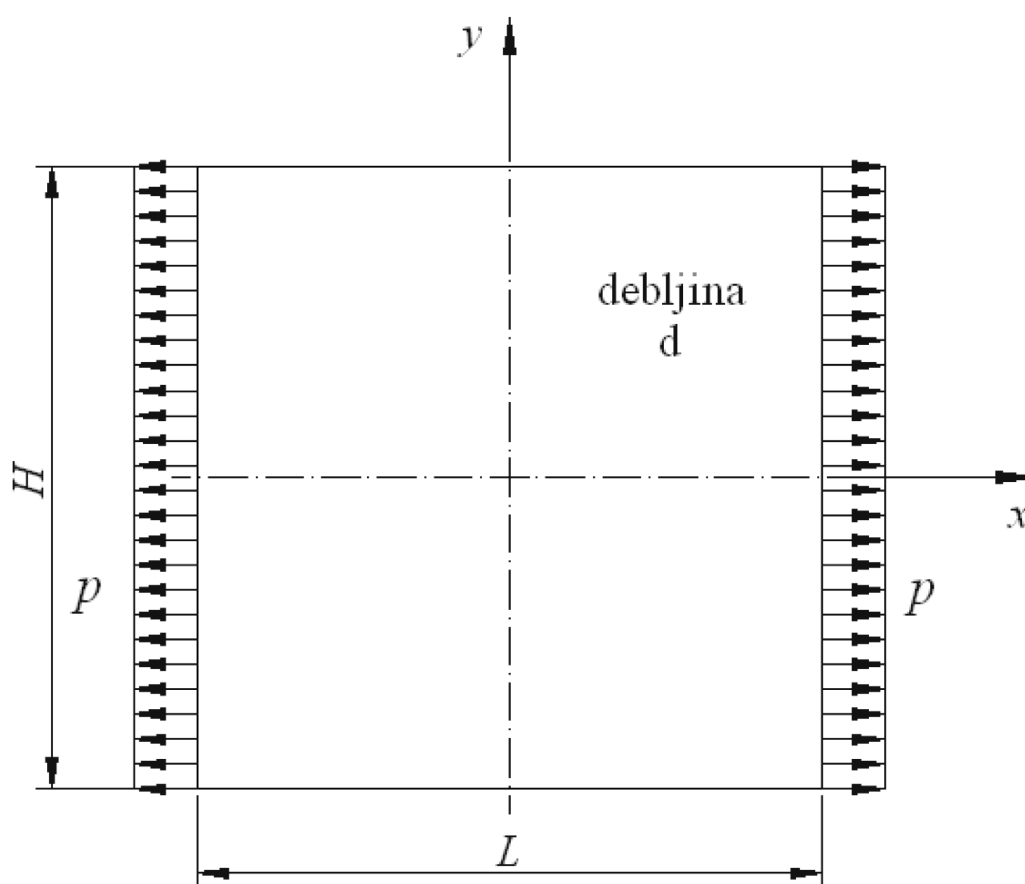


### 3.1.2. Verifikacija numeričkog modela

Verifikacija numeričkog modela provedena je pomoću membrane zadane i opterećene prema slici 12, za koju su analitičkim postupkom određena naprezanja, deformacije i pomaci u smjeru svih osi. Geometrija ploče je diskretizirana jednim konačnim elementom za analizu ravninskog stanja naprezanja, te jednim elementom za analizu ravninskog stanja deformacija.

Zadano:

$$p = 100 \text{ MPa}, L = 200 \text{ mm}, H = 200 \text{ mm}, d = 1 \text{ mm}, d_1 = 40 \text{ mm}, E = 200 \text{ GPa}, \nu = 0.3$$



**Slika 12 Geometrija i opterećenje membrane**

Zbog dvostrukog uvjeta simetrije membrane, problem se može svesti na proračunavanje jedne četvrtine membrane.

## 3.1.2.1. Ravninsko stanje naprezanja

Četvrtina membrane riješena analitičkim metodama Nauke o čvrstoći [10]

Naprezanja:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= 100 \text{ MPa,} \\ \sigma_y &= 0 \text{ MPa.}\end{aligned}\quad (3.1)$$

Deformacije (Hooke-ov zakon):

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \Rightarrow \varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \Rightarrow \varepsilon_x = \frac{100}{200000} = 0,0005, \\ \varepsilon_x &= 0,0005,\end{aligned}\quad (3.2)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \Rightarrow \varepsilon_y = -\frac{\nu\sigma_x}{E} \Rightarrow \varepsilon_y = -\frac{0,3 \cdot 100}{200000} = -0,00015, \\ \varepsilon_y &= -0,00015.\end{aligned}\quad (3.3)$$

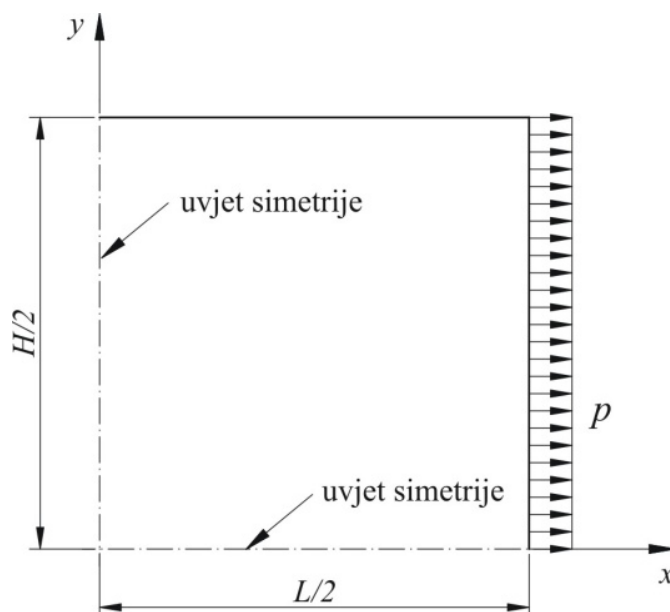
Pomaci:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta L / 2}{L / 2} = \frac{u_x}{L / 2} \Rightarrow u_x = \varepsilon_x \cdot L / 2 \Rightarrow u_x = 0,0005 \cdot 100 = 0,05 \text{ mm,} \\ u_x &= 0,05 \text{ mm,}\end{aligned}\quad (3.4)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_y &= \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta H / 2}{H / 2} = \frac{u_y}{H / 2} \Rightarrow u_y = \varepsilon_y \cdot H / 2 \Rightarrow u_y = -0,00015 \cdot 100 = -0,015 \text{ mm,} \\ u_y &= -0,015 \text{ mm.}\end{aligned}\quad (3.5)$$

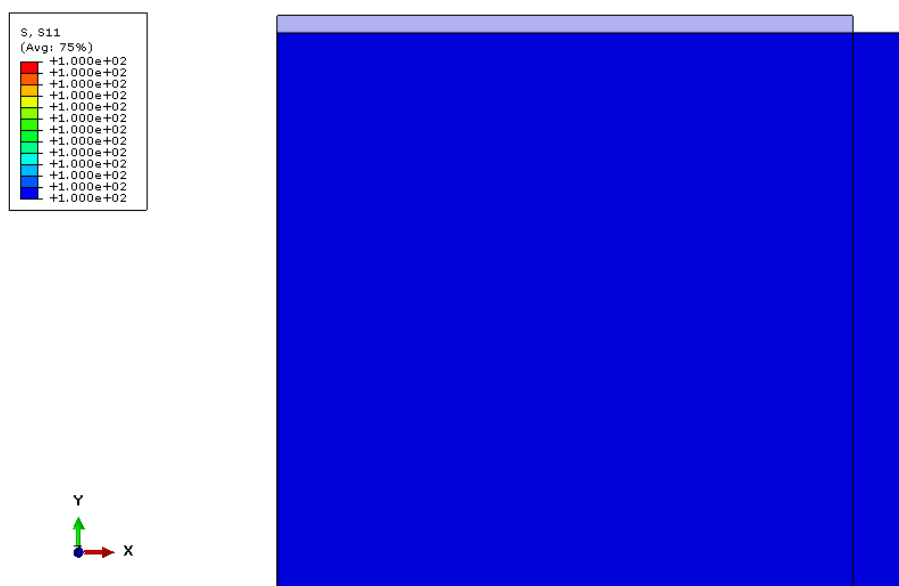
## Numerički model

Četvrtina membrane je diskretizirana pomoću CPS4 konačnog elementa za ravninsko stanje naprezanja kao što je prikazano na slici 13.



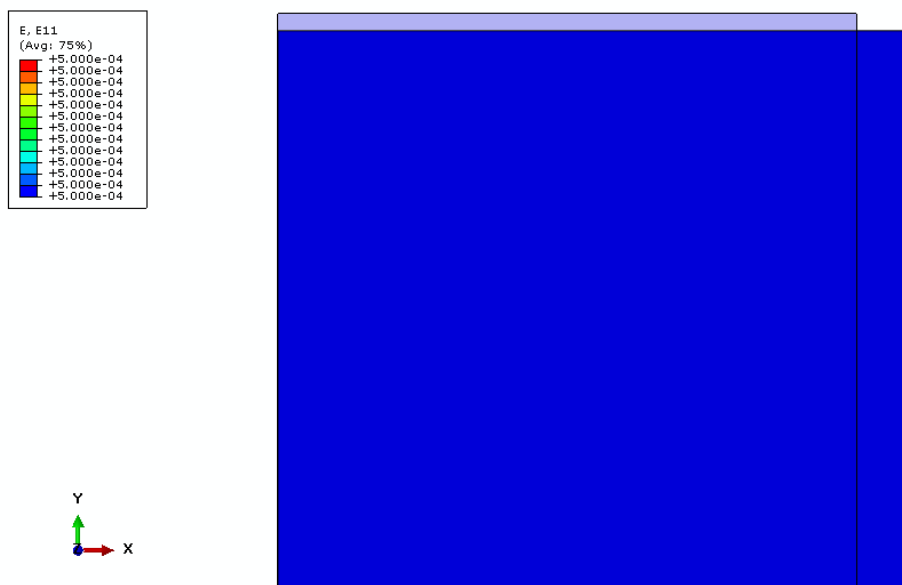
Slika 13 Numerički model membrane

Na slici 14 dan je prikaz raspodjele normalnih naprezanja za ravninsko stanje naprezanja, pri čemu je naprezanje u smjeru osi  $x$  konstantnog iznosa  $\sigma_x = 100$  MPa, iz čega se može zaključiti da se numerički rezultati u potpunosti preklapaju sa analitičkim rezultatima.

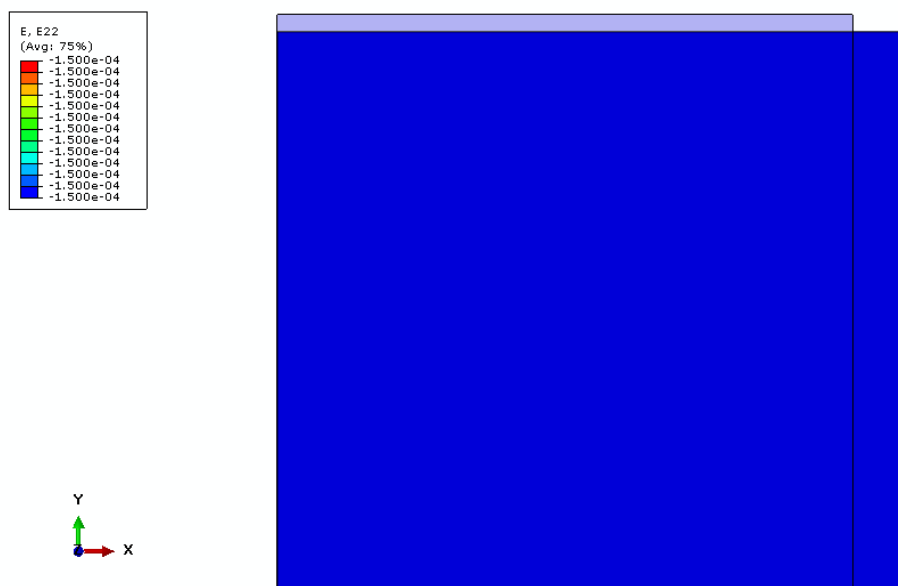


Slika 14 Normalno naprezanje u smjeru osi  $x$  za ravninsko stanje naprezanja, Mpa

Na slikama 15 i 16 prikazani su rezultati deformacija u smjeru osi  $x$  i  $y$ , koji se također podudaraju sa analitički dobivenim rezultatima.

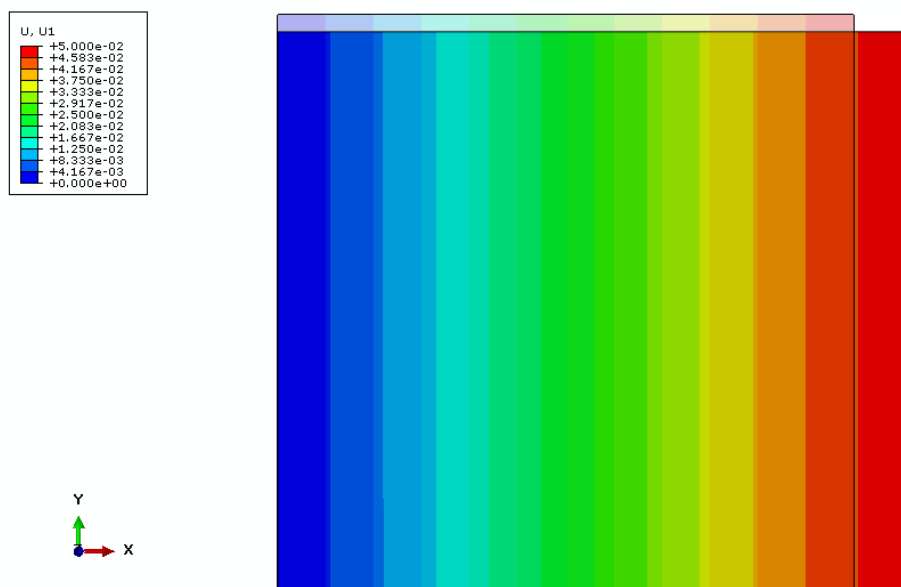


Slika 15 Raspodjela deformacija u smjeru osi  $x$  za ravninsko stanje naprezanja, -

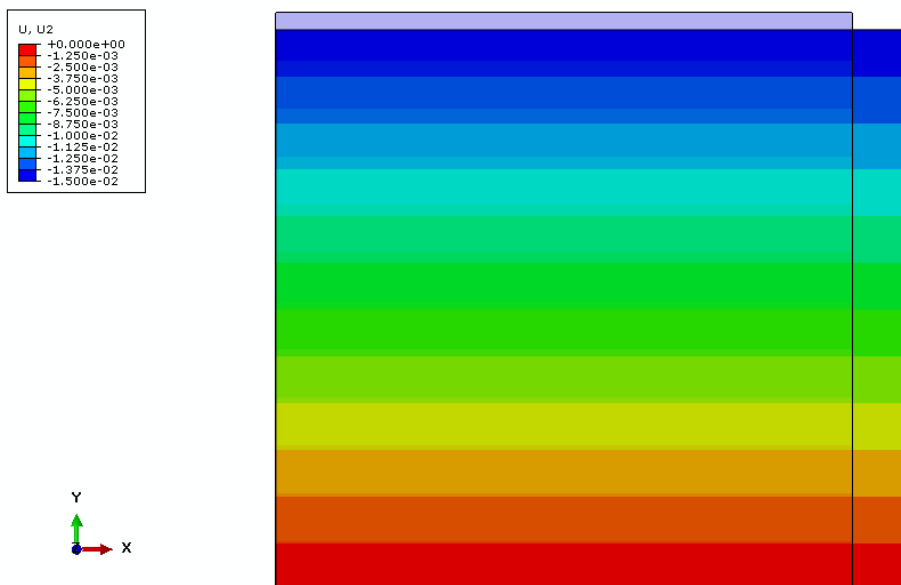


Slika 16 Raspodjela deformacija u smjeru osi  $y$  za ravninsko stanje naprezanja, -

Na slikama 17 i 18 su prikazani pomaci u smjeru osi  $x$  i  $y$ . Na tim slikama se može uočiti da su maksimalni pomaci jednakih vrijednosti kao i maksimalni pomaci dobiveni analitičkim rješenjem.



Slika 17 Raspodjela pomaka u smjeru osi  $x$  za ravninsko stanje naprezanja, mm



Slika 18 Raspodjela pomaka u smjeru osi  $y$  za ravninsko stanje naprezanja, mm

3.1.2.2. Ravninsko stanje deformacija

---

Četvrtina membrane riješena analitičkim metodama Nauke o čvrstoći.

Naprezanja:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= 100 \text{ MPa,} \\ \sigma_y &= 0 \text{ MPa.}\end{aligned}\tag{3.6}$$

Deformacije (Hooke-ov zakon):

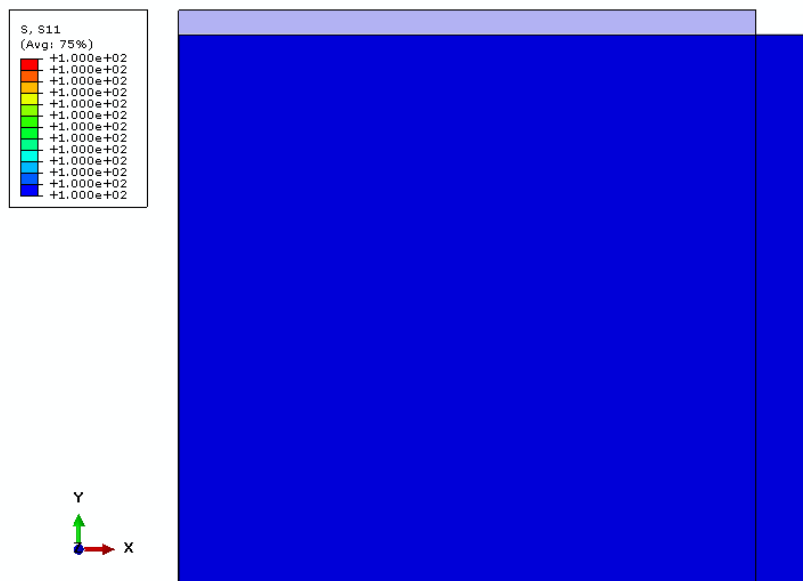
$$E^* = \frac{E}{1-\nu^2} = \frac{200000}{1-0,3^2} = 219780 \text{ MPa,}\tag{3.7}$$

$$\nu^* = \frac{\nu}{1-\nu} = \frac{0,3}{1-0,3} = 0,428,\tag{3.8}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_y &= \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta H / 2}{H / 2} = \frac{u_y}{H / 2} \Rightarrow u_y = \varepsilon_y \cdot H / 2 \Rightarrow u_y = -0,000195 \cdot 100 = -0,0195 \text{ mm,} \\ u_y &= -0,0195 \text{ mm.}\end{aligned}\tag{3.9}$$

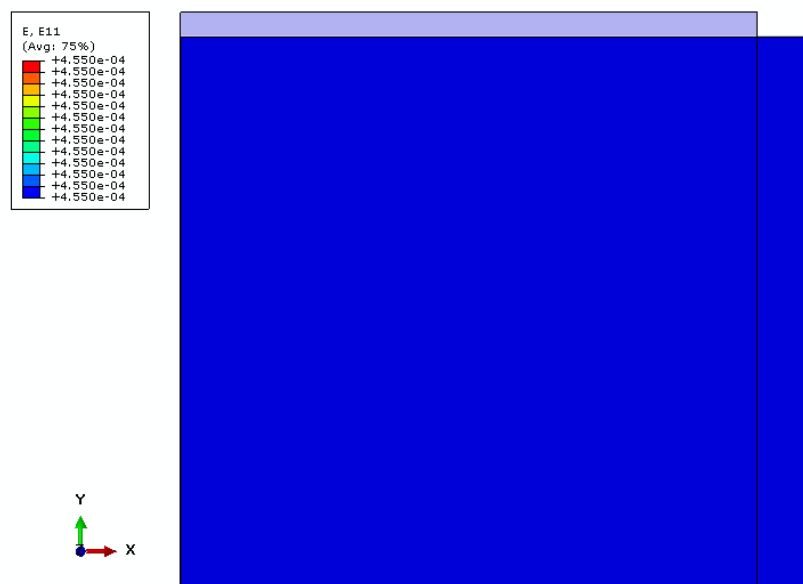
Numerički model je jednak modelu za ravninsko stanje naprezanja na, te ga nema potrebe ponovno prikazivati. Za diskretizaciju četvrtine membrane korišten je CPE4 konačni element za ravninsko stanje deformacija.

Slika 19 prikazuje raspodjelu normalnog naprezanja u smjeru osi  $x$ , konstantnog iznosa  $\sigma_x = 100$  MPa .

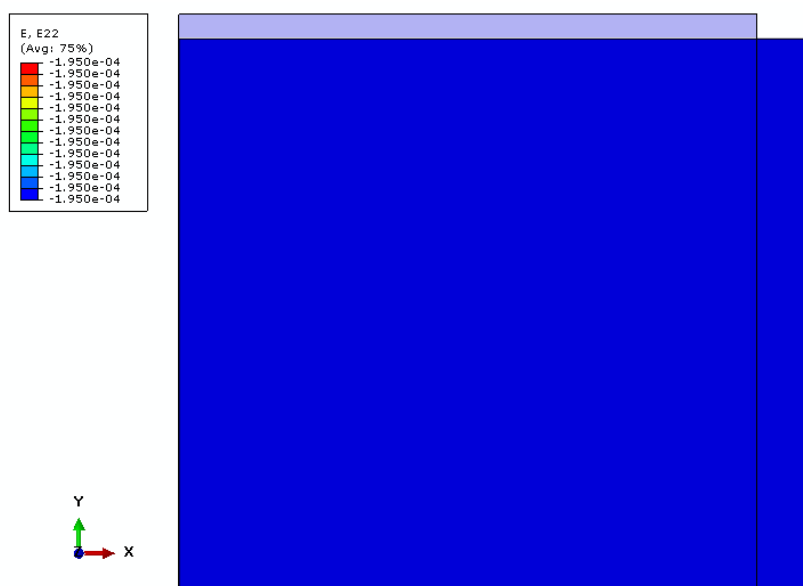


**Slika 19 Normalno naprezanje u smjeru osi  $x$  kod ravninskog stanja deformacija, MPa**

Na slikama 20 i 21 prikazani su rezultati deformacija u smjeru osi  $x$  i  $y$ , koji iznose  $\epsilon_x = 0,000455$  i  $\epsilon_y = -0,000195$  i podudaraju se sa analitički dobivenim rezultatima.

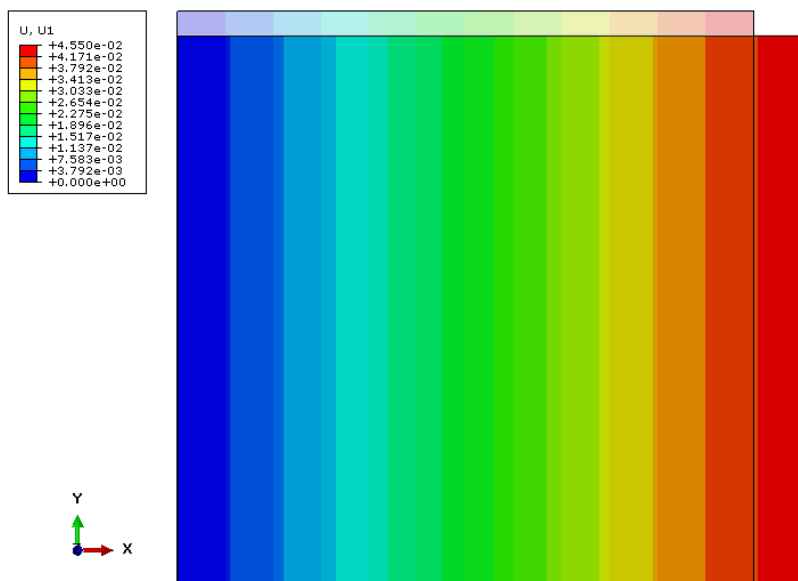


**Slika 20 Raspodjela deformacija u smjeru osi  $x$  za ravninsko stanje deformacija, -**



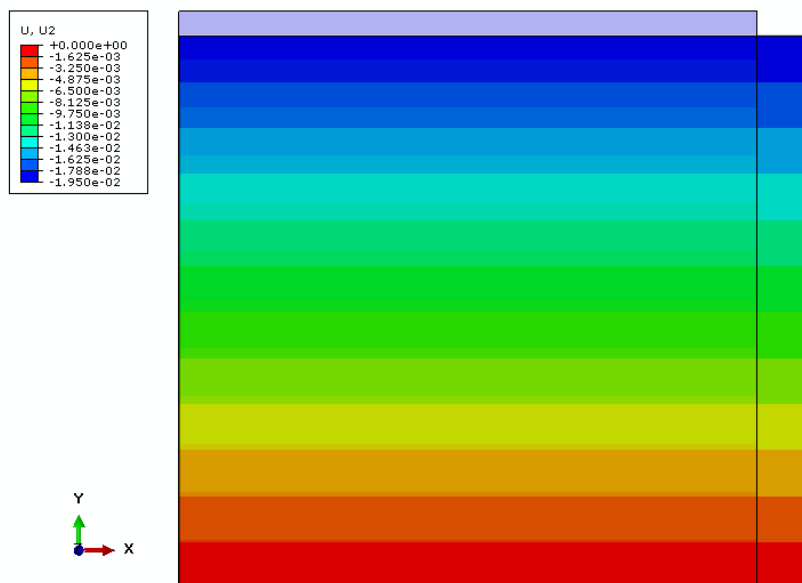
**Slika 21** Raspodjela deformacija u smjeru osi  $y$  za ravninsko stanje deformacija, -

Na slikama 22 i 23 su prikazani pomaci u smjeru osi  $x$  i  $y$ . Maksimalni pomaci iznose  $u_x = 0,0455$  mm i  $u_y = -0,0195$  mm, što odgovara vrijednostima dobivenim analitičkim putem.



**Slika 22** Raspodjela pomaka u smjeru osi  $x$  za ravninsko stanje deformacija, mm





Slika 23 Raspodjela pomaka u smjeru osi  $y$  za ravninsko stanje deformacija, mm

### 3.2. Numerička formulacija neizoternog materijalnog modela

Kao što je opisano u poglavlju 2.5, za neizoterni proces je karakteristično da se porastom brzine deformiranja toplina nastala disipacijom mehaničke energije ne može u potpunosti prenijeti na okolinu te u materijalu dolazi do povećanja temperature. Proces deformiranja pri tome postaje adijabatski.

U okviru ovog istraživanja razmatrat će se model vremenski neovisne elastoplastičnosti, dakle, neće se u obzir uzimati brzina deformiranja. Uz to se uvodi pretpostavka da kod elastičnog deformiranja nema promjene temperature kao i da je raspodjela temperature homogena kako bi se zanemario toplinski protok. Povećanje temperature materijala se javlja samo prilikom plastičnih deformacija. Također, prema [13], zanemaruje promjena temperature usljed generiranja topline tijekom procesa fazne transformacije materijala.

Na osnovu eksperimentalnih istraživanja, prema [11] izveden je izraz za povećanje temperature usljed rada plastične deformacije. Usporedbom ovog izraza s izrazom za povećanje temperature materijalnog modela implementiranog u programski paket ABAQUS [12], vidljivo je da jednadžba prirasta temperature ima isti oblik. U općem slučaju, jednadžba prirasta temperature funkcija je naprezanja, disipacije energije, veličine plastične deformacije, specifičnog toplinskog kapaciteta i gustoće materijala.

Jednadžba (3.10) predstavlja inkrementalno zapisani oblik povećanja temperature materijala.

$$\dot{T} = \frac{\eta}{c_p \rho} \dot{\sigma}^{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^{pl}, \quad (3.10)$$

gdje je  $\eta$  funkcija disipacije energije mehaničkog rada u toplinsku energiju, dok je  $c_p \rho$  produkt gustoće i specifičnog toplinskog kapaciteta. Za potrebe eksperimenta pretpostavlja se temperaturno neovisan produkt  $c_p \rho$ , te se za funkciju disipacije, prema rezultatima dobivenima u [11], [13] te eksperimenta provedenog u [14], može se pretpostaviti da je funkcija disipacije približno konstantna i iznosi  $\eta = 0.96$ .

Da bi se jednadžba (3.11) zapisala u obliku koji odgovara ABAQUS-ovom konstitutivnom modelu, potrebno je definirati toplinski tok u obliku

$$\dot{r}^{pl} = \eta \dot{\sigma}^{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^{pl} \quad (3.11)$$

Prema jednadžbi (3.11) i (3.12), vidljiva je veza između  $r^{pl}$  i  $\dot{T}$ :

$$\dot{r}^{pl} = \dot{T} c_p \rho \quad (3.12)$$

Osnovne konstitutivne jednadžbe neizoternog elastoplastičnog materijalnog modela prikazane su u tablici 7. Detaljniji izvod neizoternog materijalnog modela i njegovu implementaciju u formulaciju konačnih elemenata prikazana je u [11].

**Tabela 7 Osnovne konstitutivne jednadžbe neizoternog materijalnog modela**

<p>Aditivna dekompozicija ukupnog tenzora deformacija:</p> $\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^{el} + \dot{\epsilon}_{ij}^{pl} + \dot{\epsilon}_{ij}^t$
<p>Relacija naprezanje - deformacija:</p> $\dot{\sigma}_{ij} = D^{ijkl} \cdot \dot{\epsilon}_{kl}^e$
<p>Asocijativni zakon tečenja:</p> $\dot{\epsilon}_{ij}^p = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}$
<p>Toplinske deformacije:</p> $\dot{\epsilon}_{ij}^t = \alpha \dot{T} \delta_{ij}$

Povećanje temperature:

$$\dot{T} = \frac{\eta}{c_p \rho} \sigma^{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^{pl}$$

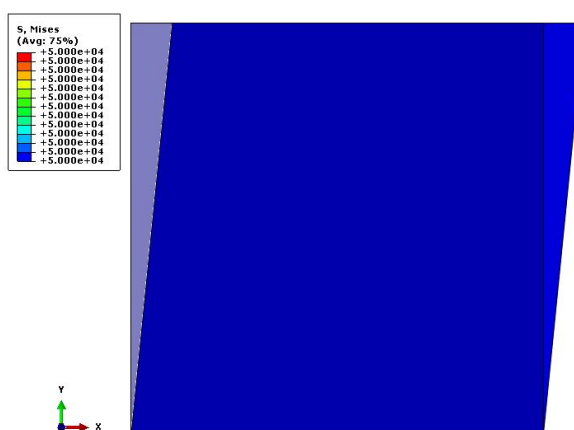
Verifikacija neizoternog materijalnog modela provedena je u skladu sa primjerom danim u verifikacijskom priručniku [15], integriranom u dokumentaciju programskog paketa ABAQUS. Ovdje je verificiran konačni element CPS4 koji je nadalje korišten za provedbu numeričkih analiza.

Zadana je ploča, oslonjena i opterećena prema slici 24. Opterećenje je zadano pomakom gornjeg ruba ploče u smjeru osi  $x$  u iznosu od 0.5 mm.

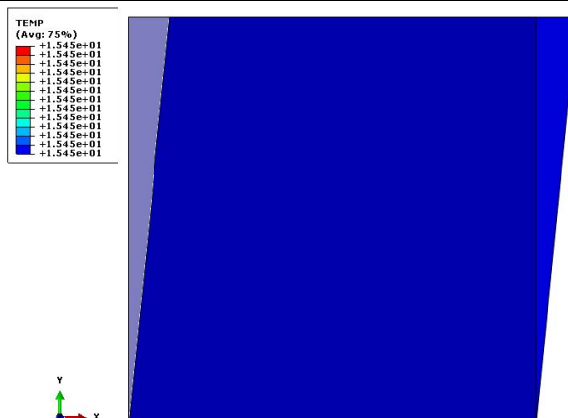


Slika 24 Diskretizirani model ploče

Provedbom numeričke analize za zadani model, dobiju se sljedeći rezultati naprežanja i temperature.



Slika 25 Ekvivalentno naprežanje po energijskoj teoriji čvrstoće, MPa

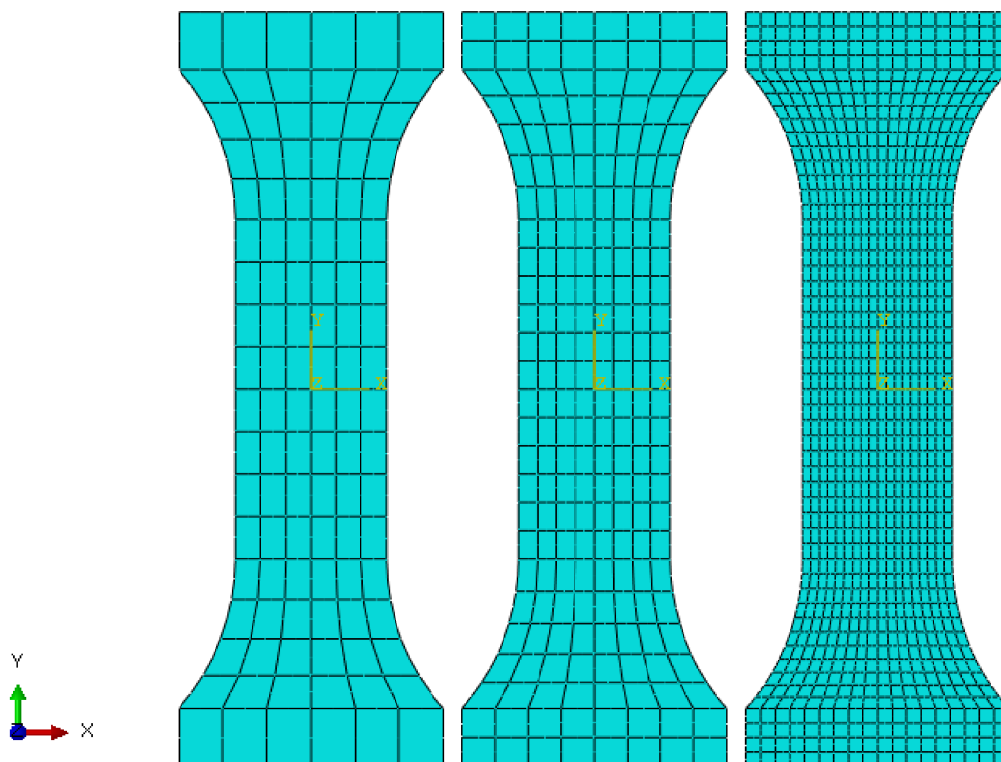


Slika 26 Temperaturno stanje deformirane ploče, °C

Rezultati se u potpunosti podudaraju sa analitičkim rješenjem zadanog problema danim u [15].

### 3.3. Modeliranje i diskretiziranje epruvete za vlačno ispitivanje i vlačnog eksperimenta

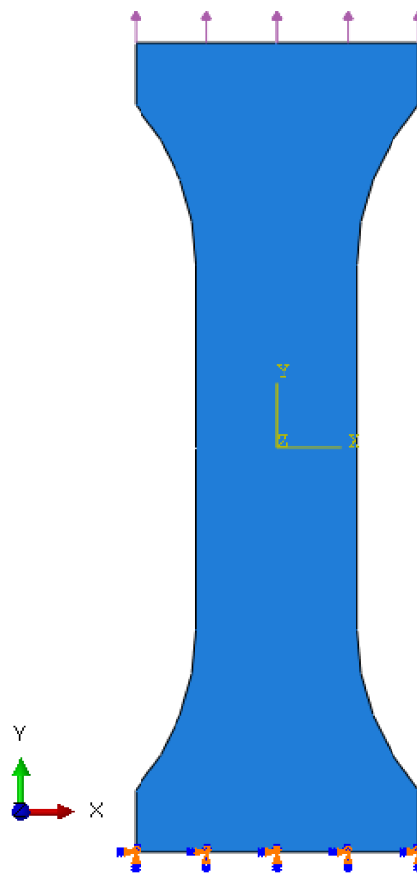
Za potrebe numeričke simulacije vlačnog ispitivanja, a kako bi se mogla pratiti konvergencija pomaka i temperature ovisno o gustoći mreže konačnih elemenata, geometrija epruvete je diskretizirana u 3 različite gustoće mreže konačnih elemenata, u iznosima od 108, 208 i 936 konačnih elemenata.



Slika 27 Diskretizirani modeli epruvete s različitim gustoćama mreže konačnih elemenata

Epruveta je u kidalici položena tako da donja čeljust hvata epruvetu i drži donji kraj epruvete nepomičnim, dok gornja čeljust primjenjuje silu na epruvetu i vrši rad. Rubni uvjeti se modeliraju tako da se za donji rub epruvete zada rubni uvjet pomaka, kojim se zabranjuju translacije i rotacije čvorova na površini ruba, dok se za gornji rub zadaje opterećenje u obliku pritiska koji djeluje u smjeru uzdužne osi epruvete, osi  $y$ , koje se dijeli sa površinom poprečnog presjeka epruvete na tom rubu kako bi se izračunala sila kojom se epruveta opterećuje na vlak.

$$F_{gr} = p_{gr} \cdot A_{\square} \quad (3.13)$$



Slika 28 Rubni uvjeti pomaka i sila

Materijalni model se zadaje prema konstitutivnim jednadžbama, tablica 7, te se upisuje u .inp datoteku na sljedeći način uz poštivanje tablice 8, tablice konzistentnih jedinica prema ABAQUS [16] :

\*\* MATERIALS

\*\*

\*Material, name=A12024\_kvazistaticko

\*Density

2.78e-009,

\*Elastic

73100., 0.33

\*Inelastic Heat Fraction

0.96,

\*Plastic

385.9, 0.

419.77, 0.0074

459.09, 0.023

491.94, 0.0416

516.67, 0.0553

536.32, 0.07

554.46, 0.0868

567.82, 0.1006

573.98, 0.1184

\*Specific Heat

875.,

\*\*

\*\* PREDEFINED FIELDS

\*\*

\*\* Name: Pocetna\_temperatura Type: Temperature

\*Initial Conditions, type=TEMPERATURE

\_PickedSet18, 20.

**Tabela 8 Tablica konzistentnih jedinica**

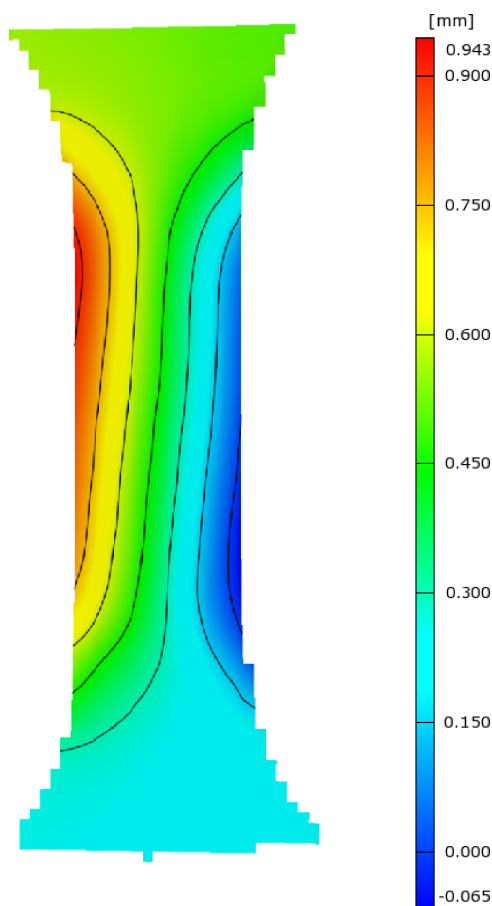
<b>Quantity</b>	<b>SI</b>	<b>SI (mm)</b>	<b>US Unit (ft)</b>	<b>US Unit (inch)</b>
Length	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	kg	tonne (10 <sup>3</sup> kg)	slug	lbf s <sup>2</sup> /in
Time	s	s	s	s
Stress	Pa (N/m <sup>2</sup> )	MPa (N/mm <sup>2</sup> )	lbf/ft <sup>2</sup>	psi (lbf/in <sup>2</sup> )
Energy	J	mJ (10 <sup>-3</sup> J)	ft lbf	in lbf
Density	kg/m <sup>3</sup>	tonne/mm <sup>3</sup>	slug/ft <sup>3</sup>	lbf s <sup>2</sup> /in <sup>4</sup>

## 4. REZULTATI VLAČNOG TESTA

### 4.1. Rezultati eksperimenta, ARAMIS

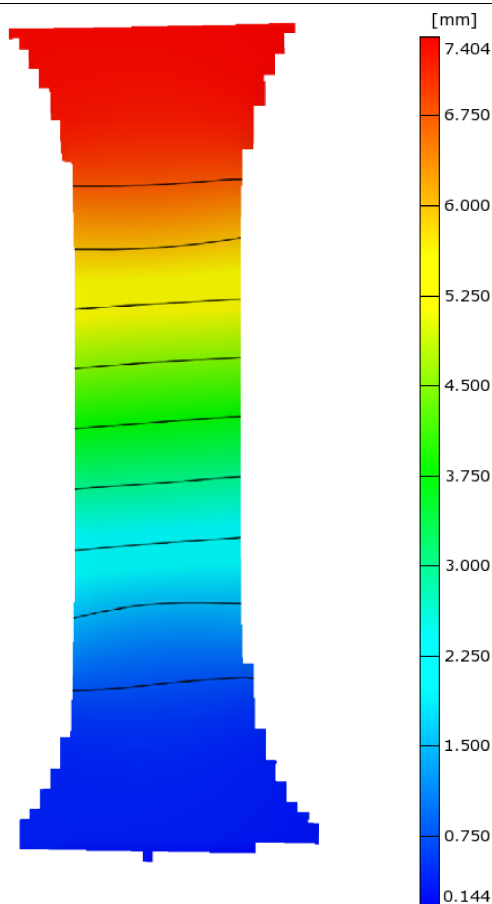
Analizom polja pomaka epruvete u smjerovima osi  $x$  i  $y$  dolazi se do rezultata prikazanih na slici 29, potrebnih za provođenje usporedbe sa rezultatima dobivenima numeričkom simulacijom. Analiza se vrši u trenutku prije loma epruvete, kada naprezanje u epruveti postiže svoju graničnu vrijednost. Pomaci epruvete su prikazani u smjerovima koordinatnih osi  $x$  i  $y$ , gdje je  $x$  os, os okomita na smjer opterećivanja, a  $y$  os, os u smjeru opterećivanja epruvete.

Prema slikama 29 i 30, vidljivo je da dolazi do suženja poprečnog presjeka i povećanja ukupne duljine epruvete, što je u skladu s očekivanim rezultatima eksperimenta.



Slika 29 Eksperimentalni rezultati pomaka u smjeru osi  $x$ , mm

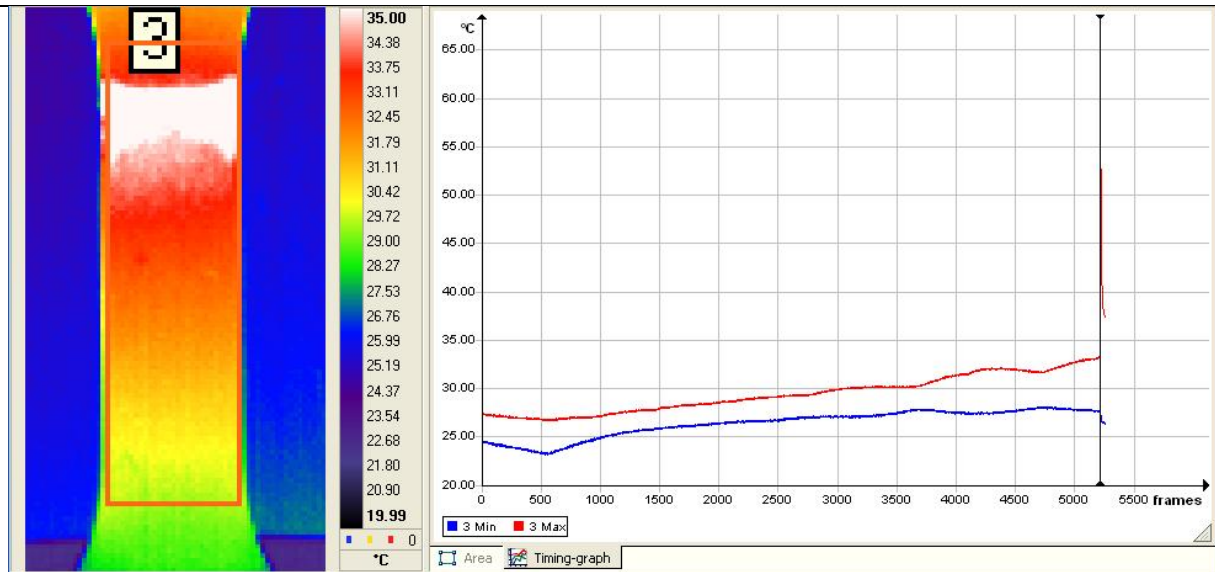




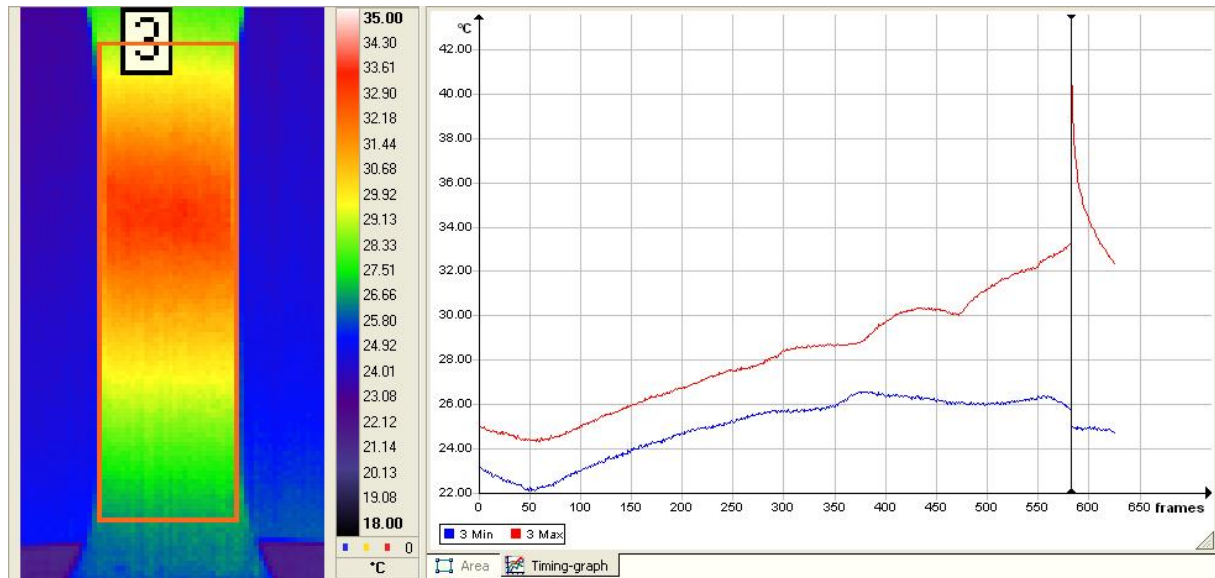
Slika 30 Eksperimentalni rezultati pomaka u smjeru osi y, mm

#### 4.2. Rezultati eksperimenta, termografija

Podatci o promjeni temperature epruvete zabilježeni su za područje promatranja omeđeno crvenim pravokutnikom na slikama 31 i 32. Uz obrađene fotografije priložena je temperaturna legenda te dijagram koji prikazuje promjene najviše i najniže temperature unutar područja promatranja tokom vremena snimanja. Tokom početnog opterećenja primjetan je temperaturni pad, koji odgovara termoelastičnom ohlađivanju elastično opterećene epruvete, dakle, povratnog dijela u zagrijavanju. Povećanje temperature nakon temperaturnog pada se događa usljed rada nepovratne plastifikacije materijale epruvete.



Slika 31 Promjena temperature za epruvetu deformiranu brzinom  $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

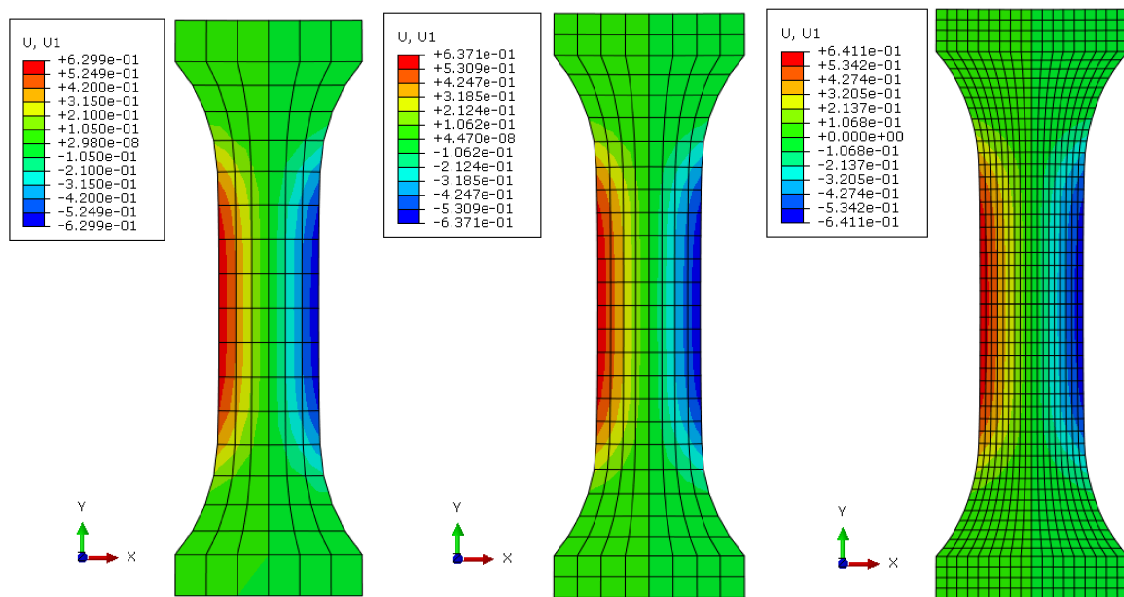


Slika 32 Promjena temperature za epruvetu deformiranu brzinom  $10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

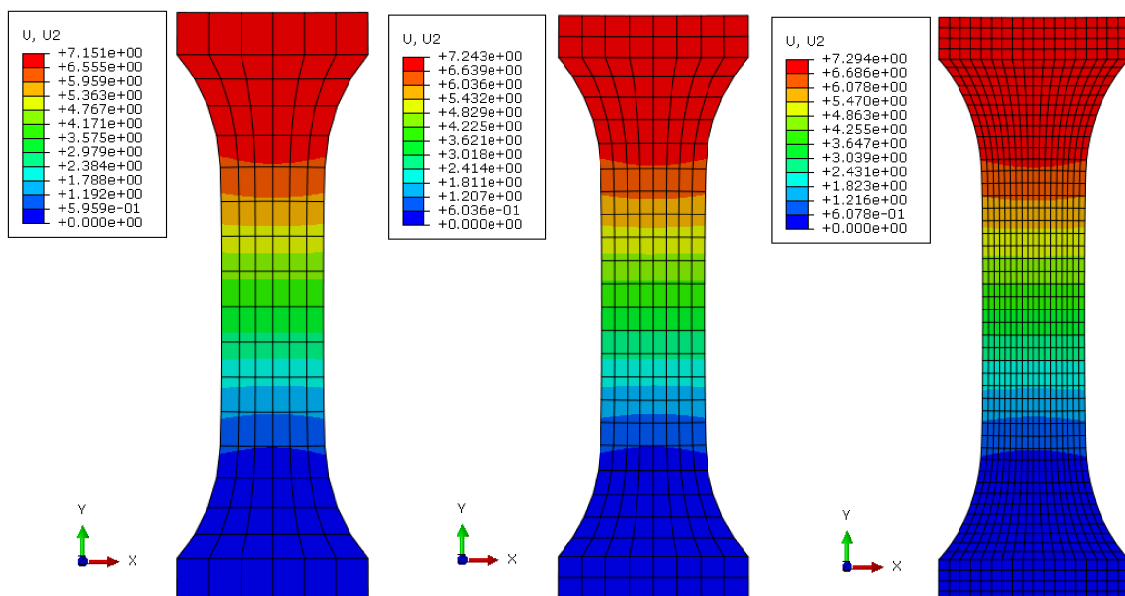
### 4.3. Rezultati numeričke simulacije metodom konačnih elemenata, ABAQUS

Analogno 4.1, numeričkom simulacijom se epruvete dovelo do maksimalnog napreznja koje se razmatra u toku ovog rada, vlačne čvrstoće. Zabilježeni su pomaci epruvete u trenutku prije loma te temperaturno polje materijala epruvete, sa koordinatnim osima analogno postavljenima kao i kod eksperimenta.

Prema slikama 33 i 34 vidljivo je da dolazi do deformacija sukladnih deformacijama dobivenima eksperimentom.



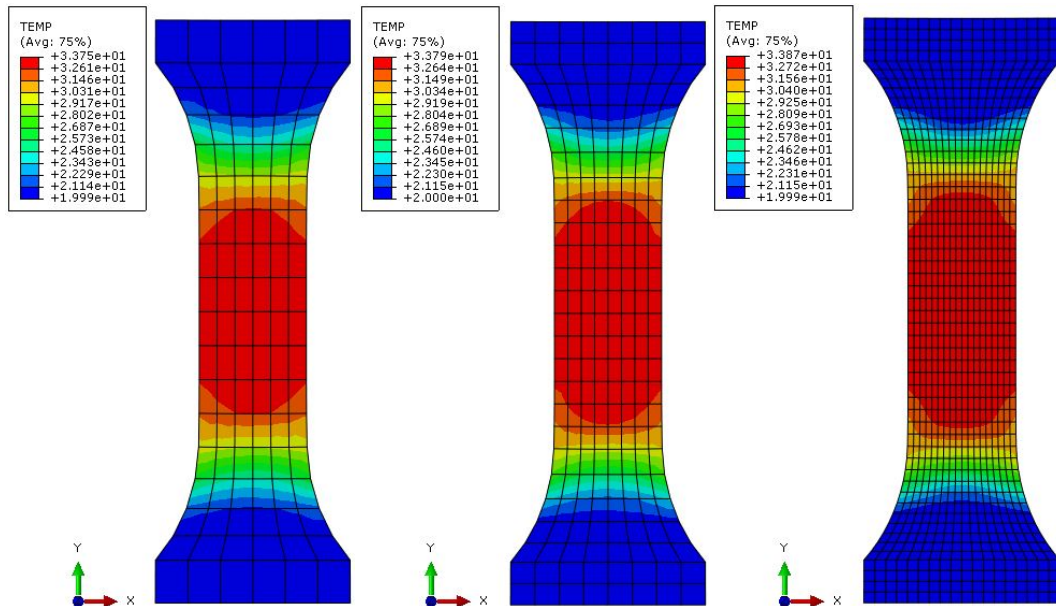
Slika 33 Numerički rezultati pomaka u smjeru osi x, mm



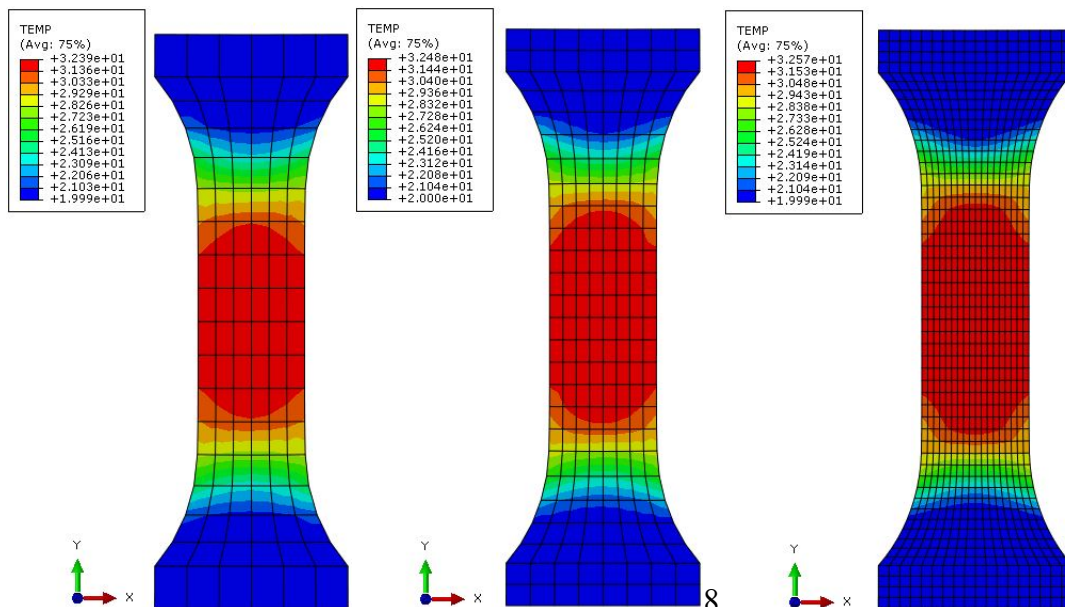
Slika 34 Numerički rezultati pomaka u smjeru osi y, mm

Vidljivo je da dolazi do konvergencije rezultata povećanjem broja konačnih elemenata. Za daljnju analizu koristiti će se rezultati izračunati korištenjem najgušće mreže konačnih elemenata.

Na slikama 35 i 36 dani su rezultati numeričke simulacije za promjenu temperature materijala epruvete, za različite brzine deformiranja epruvete.



Slika 35 Promjena temperature za epruvetu deformiranu brzinom  $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ , °C

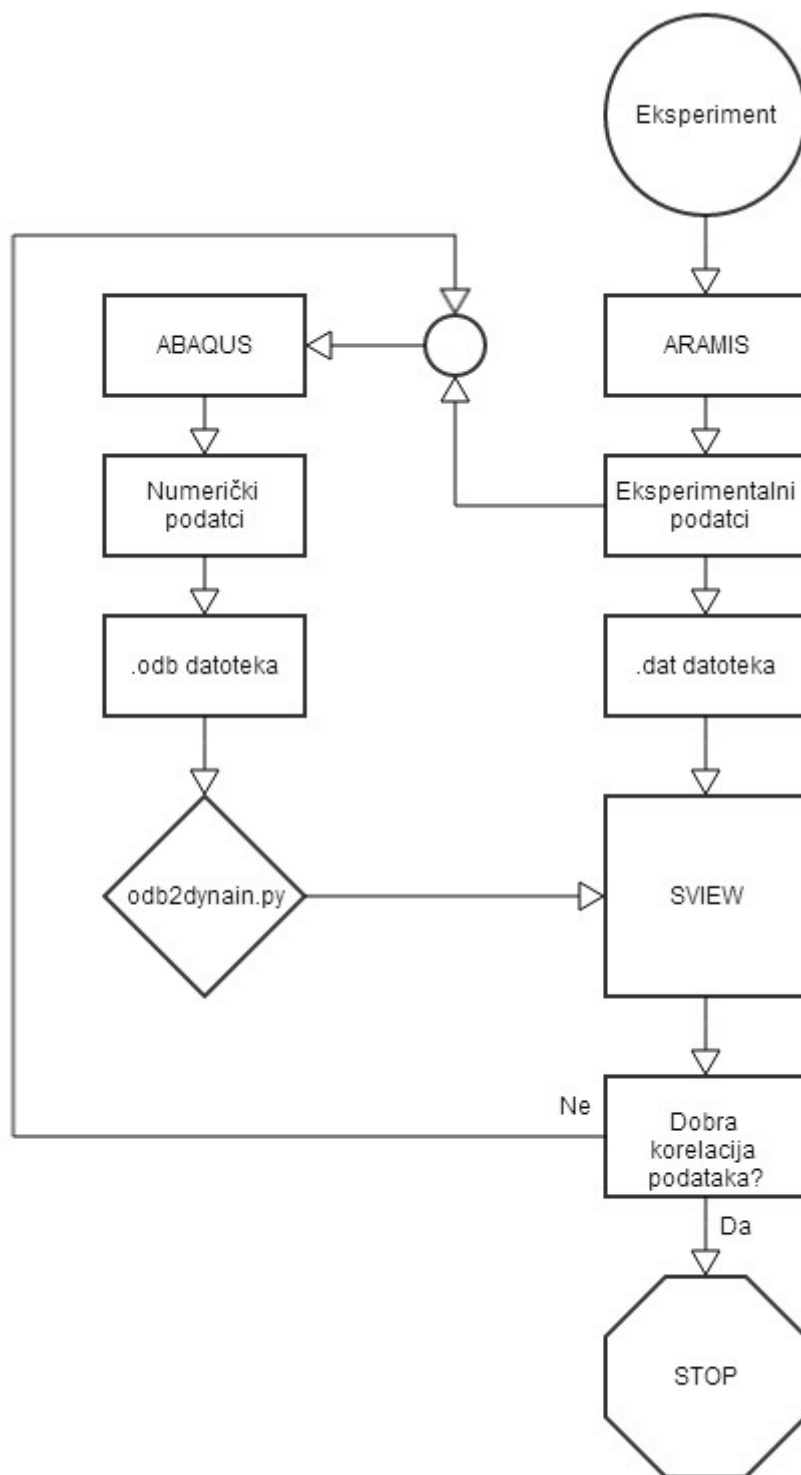


Slika 36 Promjena temperature za epruvetu deformiranu brzinom  $10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ , °C

#### **4.4. Usporedba rezultata pomaka određenih fotogrametrijom i numeričkom simulacijom**

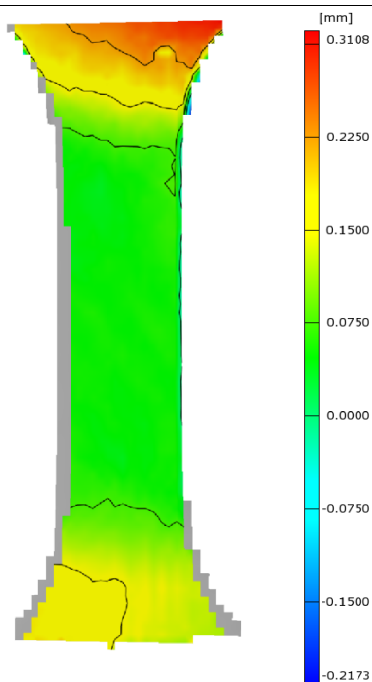
Usporedba rezultata se vrši pomoću programskog paketa SVIEW, dijela programskog paketa sustava ARAMIS, koji omogućuje mapiranje podataka iz različitih izvora te izračunavanje razlika među istima. SVIEW prihvaća CAD i FEA podatke u ASCII formatu, te je prvo potrebno prevesti rezultate određene sustavom ABAQUS, koji rezultate zapisuje u \*.odb datoteke, u prikladan format, pomoću odb2dynain.py skripte za ABAQUS. Na slici 37 prikazan je dijagram toka algoritma za validaciju numeričkog modela pomoću fotogrametrije.

Rezultati određeni sustavom ARAMIS se učitaju u SVIEW, te se na njih vežu rezultati numeričke simulacije, tako da se vrši ručno, približno podudaranje geometrije, a zatim i automatsko, točnije podudaranje. Nakon toga, vrši se računanje lokalnih razlika u geometrijama definiranim numeričkom simulacijom i eksperimentom, kako bi se mogli mapirati podatci izračunati numeričkom simulacijom na eksperimentalne podatke. Idući korak je mapiranje podataka numeričke simulacije na geometriju određenu sustavom ARAMIS, te izračunavanje razlike između mapiranih podataka i podataka sustava ARAMIS, čime se dolazi do grafičkog pregleda razlika po čitavoj površini epruvete.



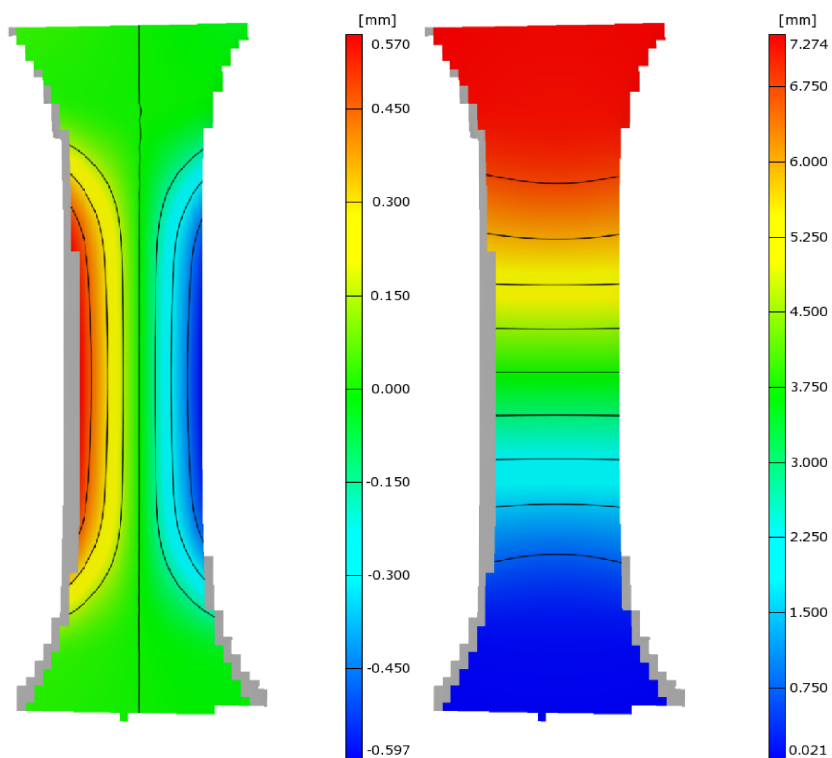
**Slika 37 Dijagram toka korelacije rezultata numeričke simulacije i eksperimenta**

Na slici 38 prikazane su lokalne razlike podudaranja geometrije epruveta modeliranih u ABAQUS-u te geometrije epruvete koje je sustav aramis snimio. Usljed nesavršenosti preklapanja modela i snimljene geometrije, dolazi do lokalnih razlika koje je potrebno uzeti u obzir u kasnijoj analizi.



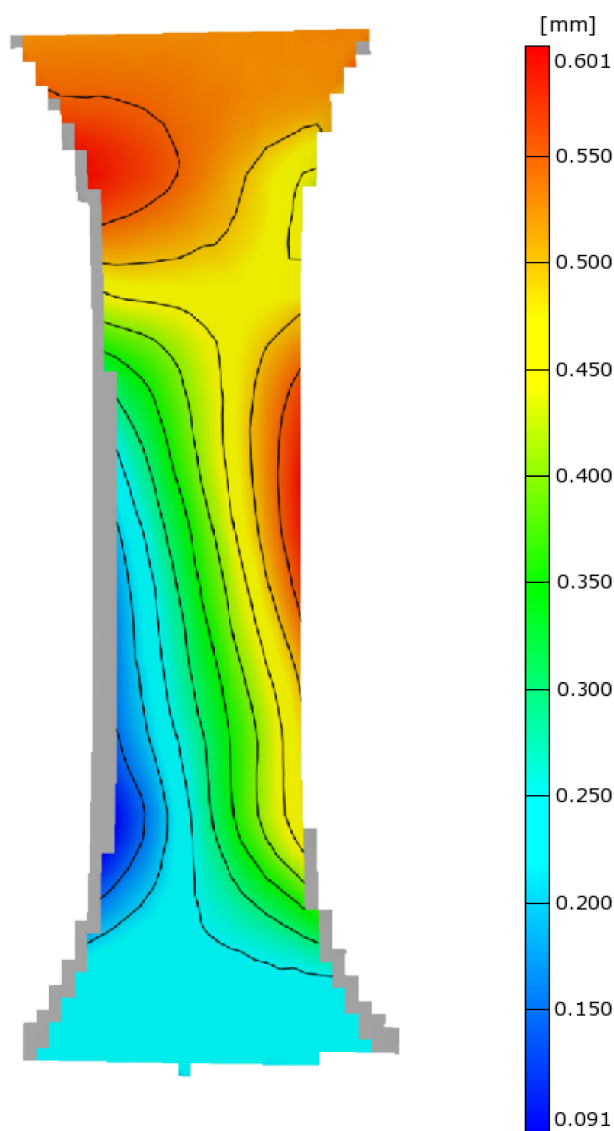
**Slika 38** Lokalne razlike podudaranja geometrije, mm

Na slici 29 dani su rezultati numeričke simulacije mapirani na snimljenu geometriju epruvete sustavom ARAMIS.



**Slika 39** Rezultati numeričke simulacije mapirani geometriju epruvete snimljenu sustavom ARAMIS, pomaci u smjeru osi  $x$  i  $y$ , mm

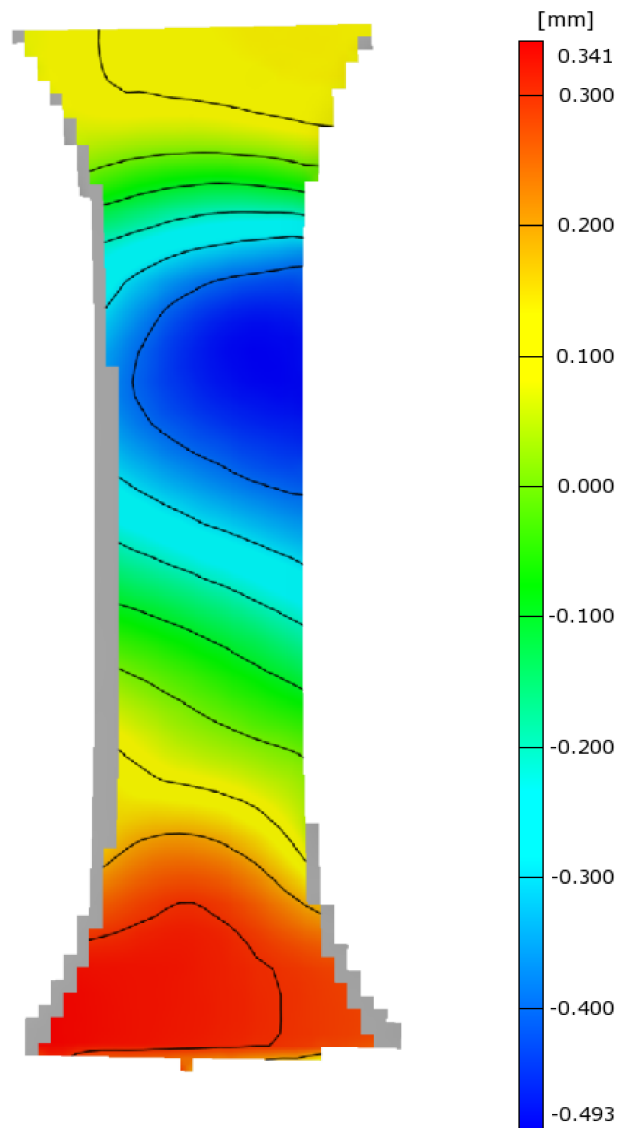
Na slici 40 dana je razlika u rezultatima numeričke simulacije i eksperimentalno utvrđenih rezultata sustavom ARAMIS za pomake u smjeru osi  $x$ . Do lokalnih nepodudarnosti dolazi usljed nesavršenosti preklapanja i mapiranja geometrije, kao i zbog činjenice da je epruveta snimljena u trenutku prije loma, dakle pri opterećenju jednakom vlačnoj čvrstoći ili većem, te da je došlo do stvaranja vrata epruvete, fenomena koji nije još opisan u algoritmu za validaciju numeričke metode.



**Slika 40** Razlika pomaka u smjeru osi  $x$ , mm



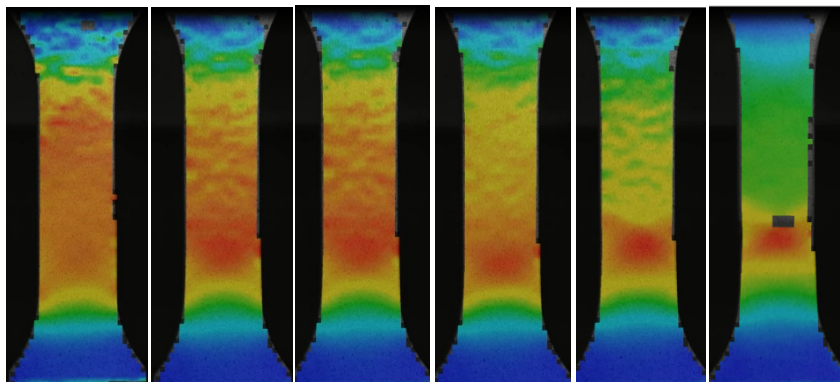
Na slici 41 dana je razlika u rezultatima numeričke simulacije i eksperimentalno utvrđenih rezultata sustavom ARAMIS za pomake u smjeru osi  $x$ .



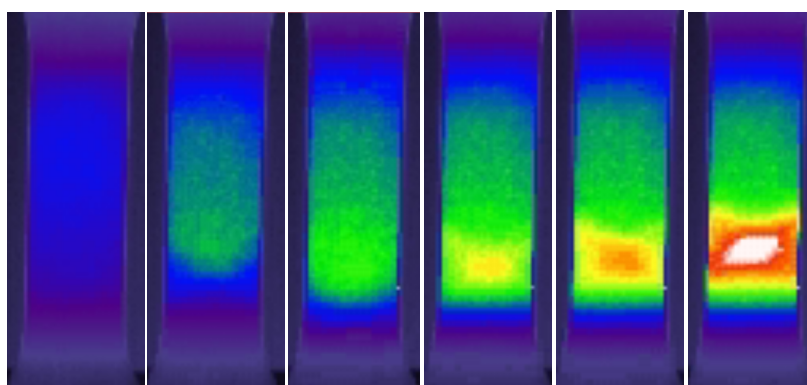
**Slika 41** Razlika pomaka u smjeru osi  $y$ , mm

#### 4.5. Usporedba metoda bilježenja plastične deformacije fotogrametrijom i infracrvenom termografijom [17]

Na slikama 42 i 43 prikazani su snimke opterećivanja epruvete za brzinu deformiranja  $10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ . Slika 42, dobijena fotogrametrijom predstavlja ekvivalentno stanje napreznja prema energijskoj teoriji čvrstoće. Slika 43, dobijena infracrvenom termografijom pokazuje temperaturne promjene u materijalu epruvete koje su produkt plastične deformacije. Pomoću obje serije slika može se pratiti plastifikacija epruvete od pojave prvih plastičnih zona bliže sredini epruvete pa do početka tečenja materijala bliže dnu epruvete, što je iznimno vidljivo na slikama koje prikazuju temperaturne pojave.



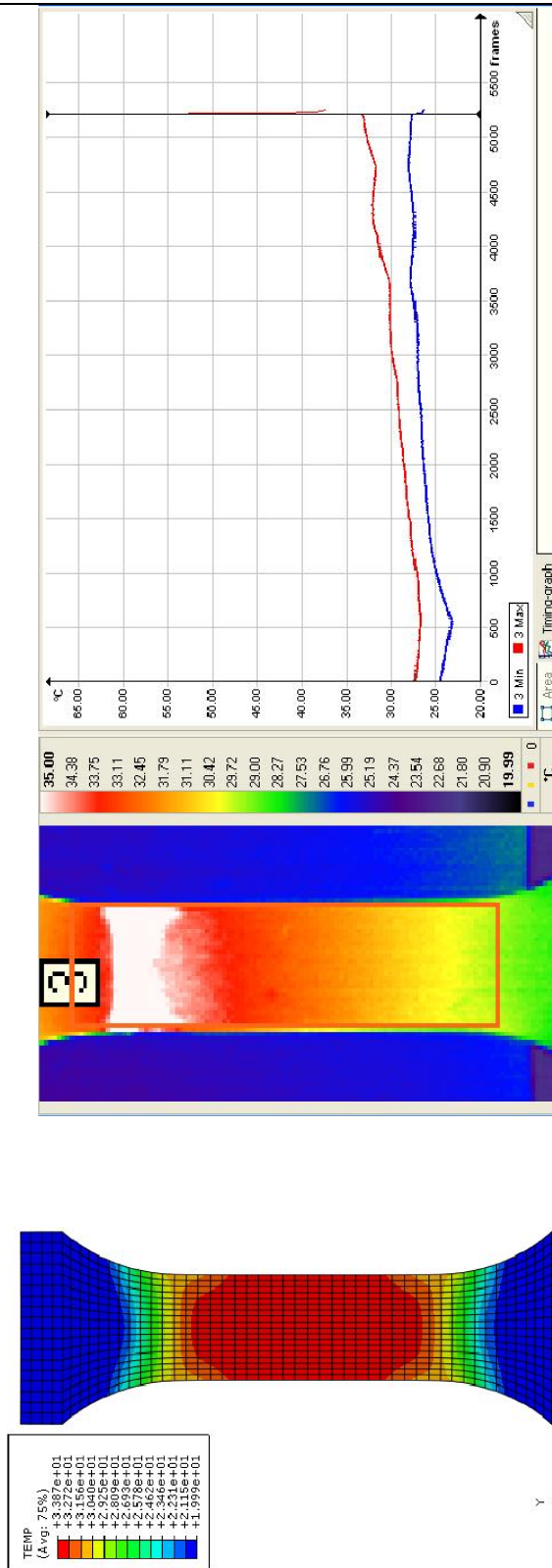
Slika 42 Ekvivalentno napreznja prema energetske teoriji čvrstoće



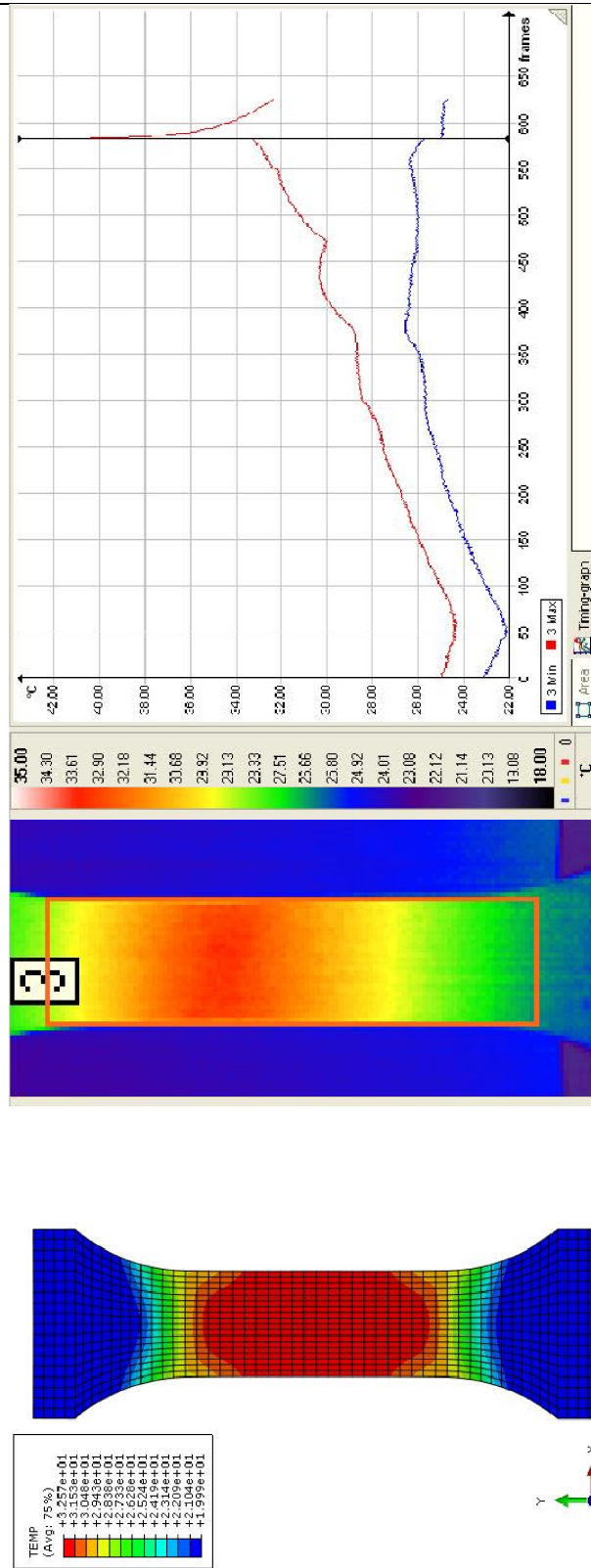
Slika 43 Infracrvena temperaturna raspodjela

#### **4.6. Usporedba metoda bilježenja temperaturnih promjena infracrvenom termografijom i numeričkom simulacijom**

Na slikama 44 i 45 usporedno su dani rezultati numeričke analize temperaturnih promjena i termografski zabilježenih podataka o temperaturnim promjenama za brzine deformiranja  $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  i  $10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ . Analizom rezultata mogu se primjetiti razlike u rezultatima numeričke simulacije i eksperimentalno određenih rezultata. Rezultati numeričke simulacije daju homogenije riješenje jer ne uzimaju u obzir nesavršenosti kristalne rešetke usljed kojih dolazi do nepotpuno homogenog zagrijavanja materijala epruvete. Također, u numeričkoj simulaciji je zanemaren utjecaj elastične deformacije, koji sačinjava povratni rad, usljed kojeg dolazi do pada temperature materijala.



Slika 44 Usporedba temperaturnih polja za brzinu deformiranja  $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ , °C



Slika 45 Usporedba temperaturnih polja za brzinu deformiranja  $10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ , °C

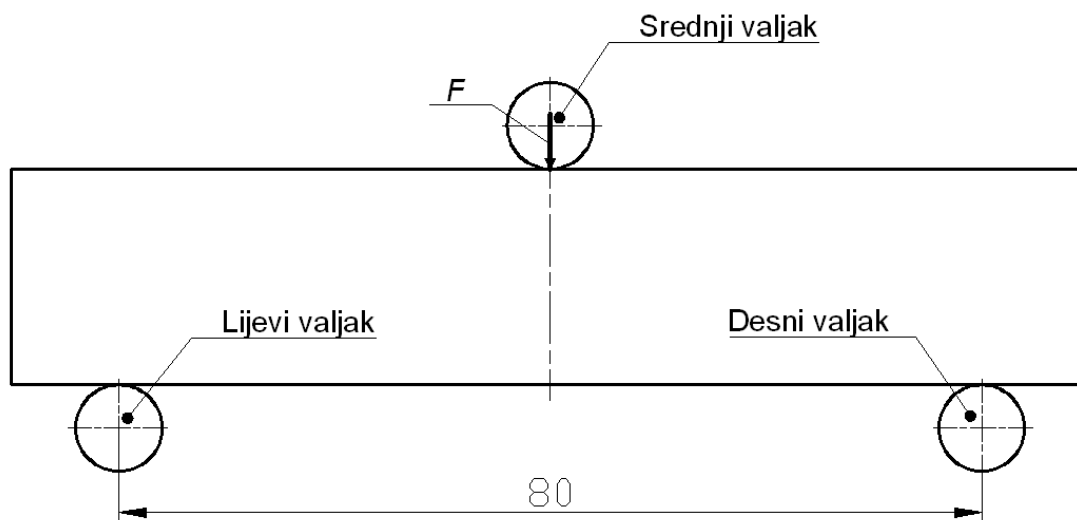
## 5. VALIDACIJA TESTA SAVIJANJA U TRI TOČKE

Osim na jednostavnom primjeru vlačnog testa epruvete, algoritam za validaciju numeričkog modela verificiran je na problemu savijanja epruvete bez zareza u tri točke.

### 5.1. Epruveta bez zareza za savijanje u tri točke

U svrhu ovog ispitivanja koristiti će se epruveta za savijanje u 3 točke bez zareza. Na površinu epruvete bez se postavljaju jednaki zahtjevi za obradom kao i za površinu epruvete za vlačno ispitivanje, radi tehnoloških potreba sustava ARAMIS 4M.

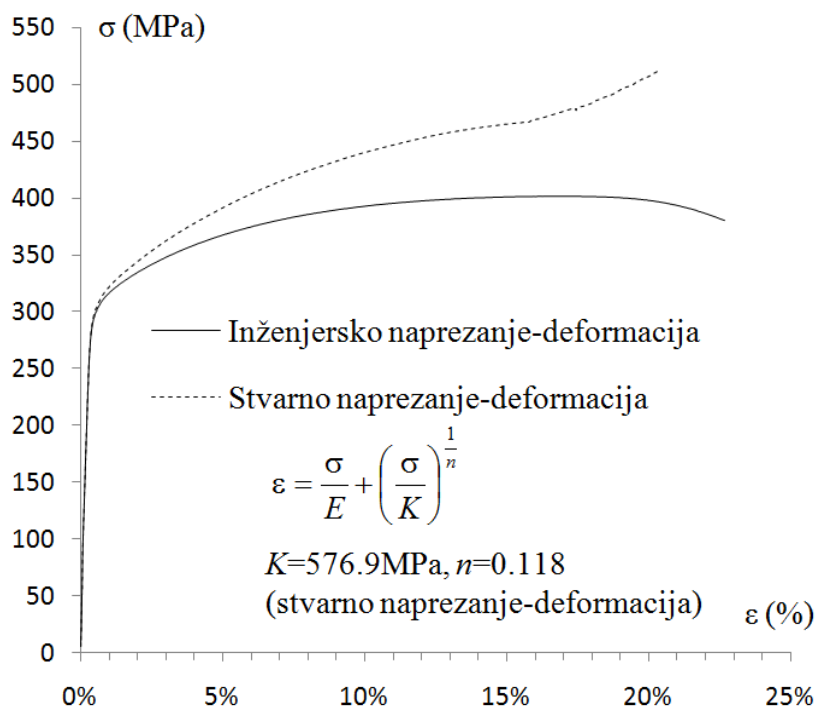
Geometrija epruvete bez zareza je prikazana na slici 46.



Slika 46 Shematski prikaz epruvete za savijanje u tri točke bez zareza

### 5.2. Utvrđivanje mehaničkih parametara aluminijske legure AlCu5BiPb – T8 [18], korištene za epruvetu za savijanje u tri točke

U sklopu utvrđivanja mehaničkih parametara aluminijske legure AlCu5BiPb – T8 eksperimentom su obuhvaćena statička vlačna ispitivanja, simetrična i asimetrična ciklička ispitivanja, te ispitivanje lomne žilavosti i rasta zamorne pukotine u materijalu. Eksperiment je proveden u okviru doktorskog rada dr. sc. Predraga Čanžara, Prilog A, [18] te se ovdje referira na izvedene parametre tokom tog istraživanja.



Slika 47 Dijagram naprezanje istežanje AlCu5BiPb – T8

Mehaničke karakteristike materijala dobivene statičkim vlačnim ispitivanjem dane su u tablici 9.

Tabela 9 Mehanička svojstva aluminijske legure AlCu5BiPb - T8 [18]

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

Ovisnost plastičnih deformacija o naprezanju je prikazana u tablici 10.

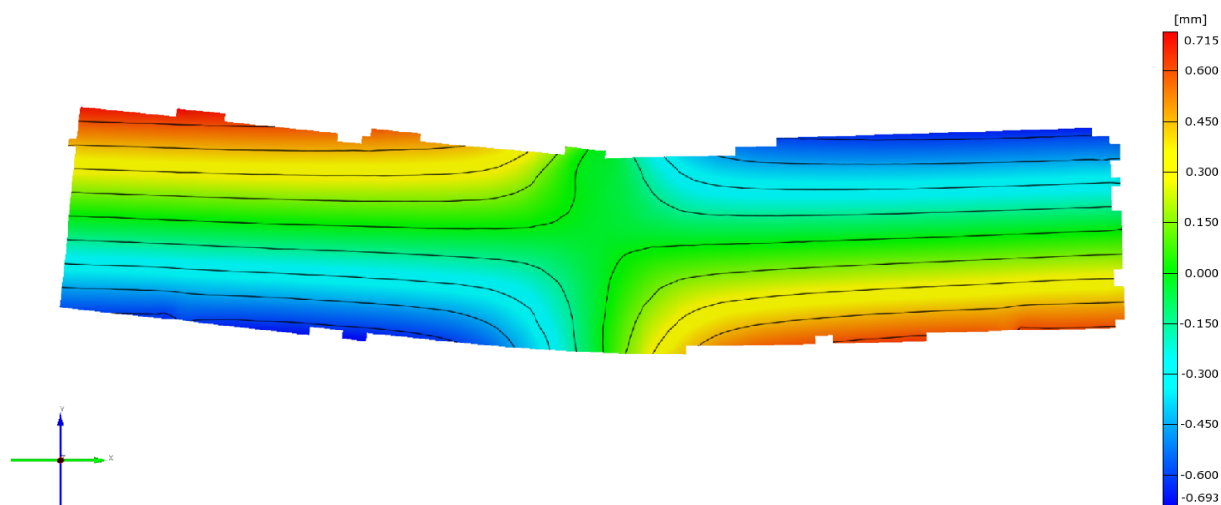
Tabela 10 Prikaz ovisnosti naprezanja i plastičnih deformacija po određenim točkama

	Naprezanje $\sigma$ , MPa	Plastična deformacija $\varepsilon_{pl}$ , -
1	305	0
2	310	0,005
3	320	0,007
4	330	0,009
5	340	0,011
6	350	0,014
7	360	0,018

8	370	0,023
9	380	0,029
10	390	0,036
11	400	0,045
12	410	0,055
13	420	0,068
14	430	0,082
15	440	0,101
16	450	0,122
17	460	0,147
18	470	0,176
19	480	0,211
20	490	0,251

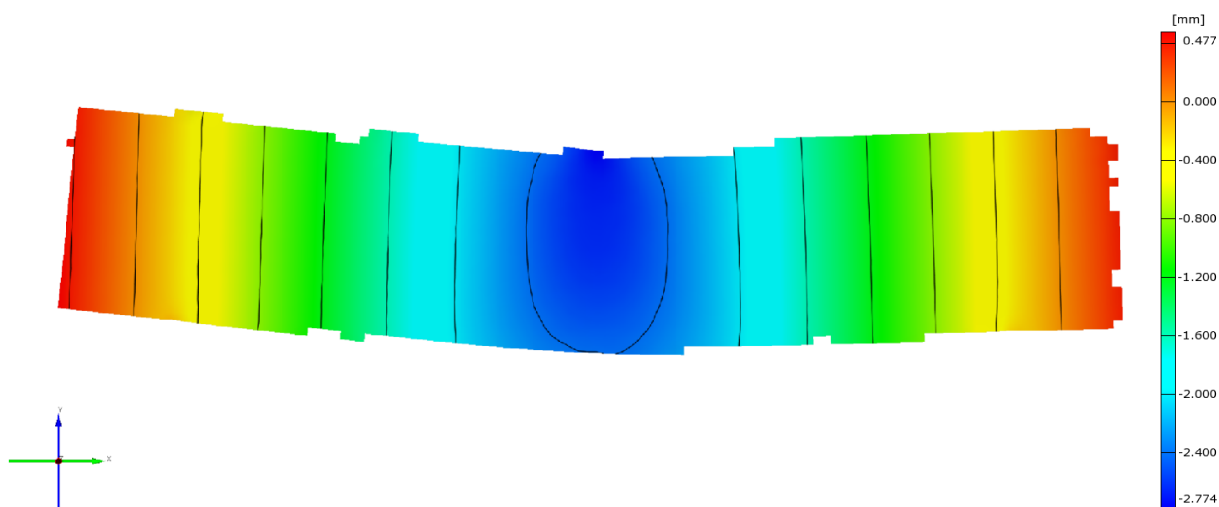
### 5.3. Eksperimentalni rezultati testa savijanja epruvete bez zareza

Analizom polja pomaka epruvete u smjerovima osi  $x$  i  $y$  dolazi se do rezultata prikazanih na slikama 48 i 49, potrebnih za provođenje usporedbe sa rezultatima dobivenima numeričkom simulacijom. Analiza se vrši za trenutak kada je epruveta opterećena maksimalnom silom u iznosu od 23000 N. Također je izrađen dijagram pomaka u smjeru osi  $y$  u središnjem presjeku epruvete

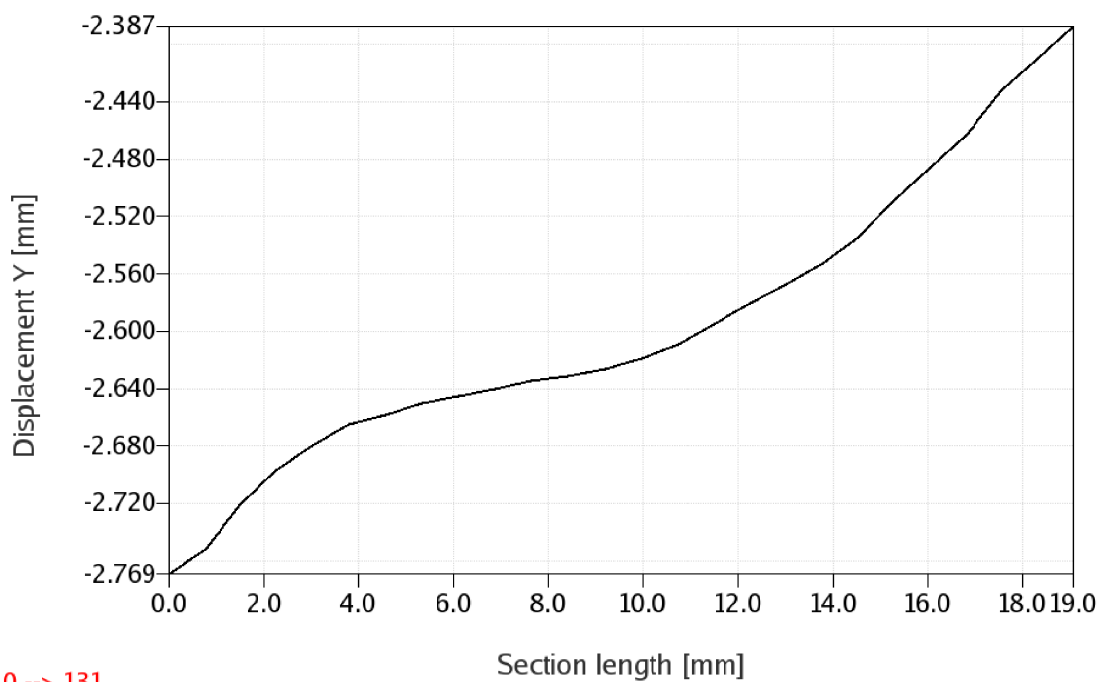


Slika 48 ARAMIS, rezultati pomaka u smjeru osi  $x$ , mm





Slika 49 ARAVIS, rezultati pomaka u smjeru osi y, mm



0 --> 131

ARAMIS

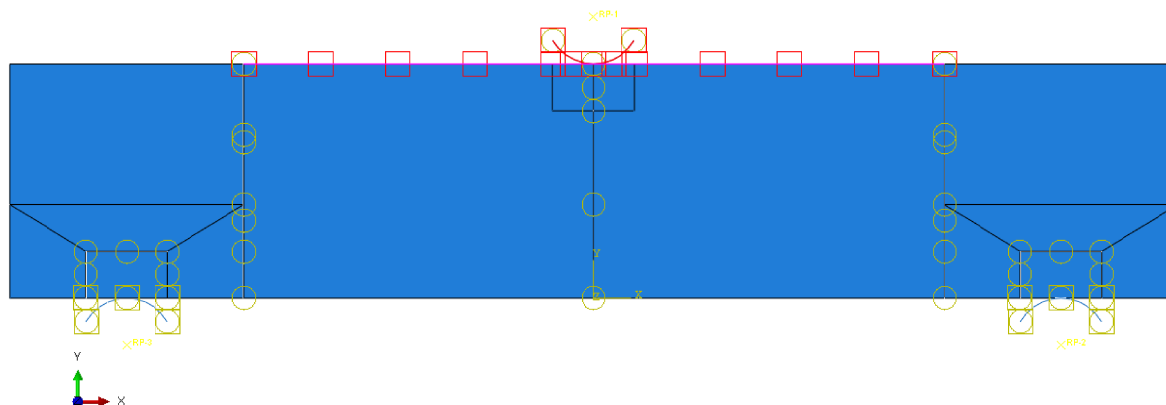
9/11/12

gom  
www.gom.com

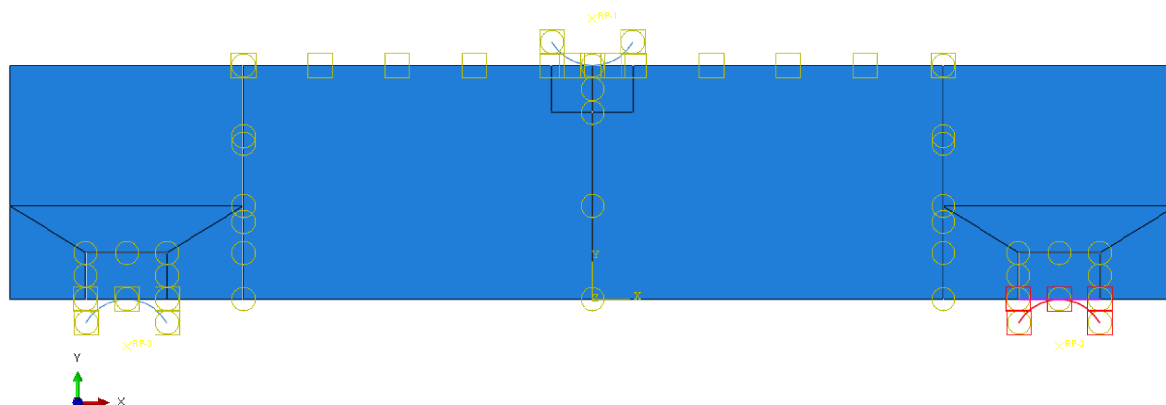
Slika 50 Dijagram pomaka u smjeru osi y po visini središnjeg presjeka epruvete dobiven eksperimentom

#### 5.4. Numerički modeliranje testa savijanja epruvete bez zarez

Za potrebe numeričke simulacije testa savijanja u tri točke, prema parametrima zadanim u ovom radu, bilo je potrebno modelirati kontakte između površina valjaka i epruvete putem kontaktnih ploha. Rubni uvjeti pomaka i sila su kontrolirani samo na valjcima, koji su diskretizirani kao kruta tijela.



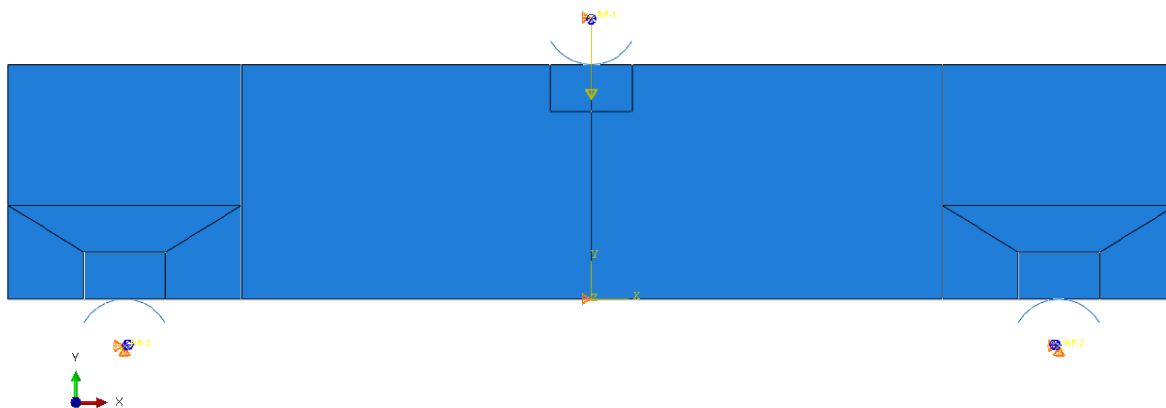
Slika 51 Kontaktne plohe između gornjeg valjka i gornje površine epruvete



Slika 52 Kontaktne plohe između donjeg valjka i donje površine epruvete

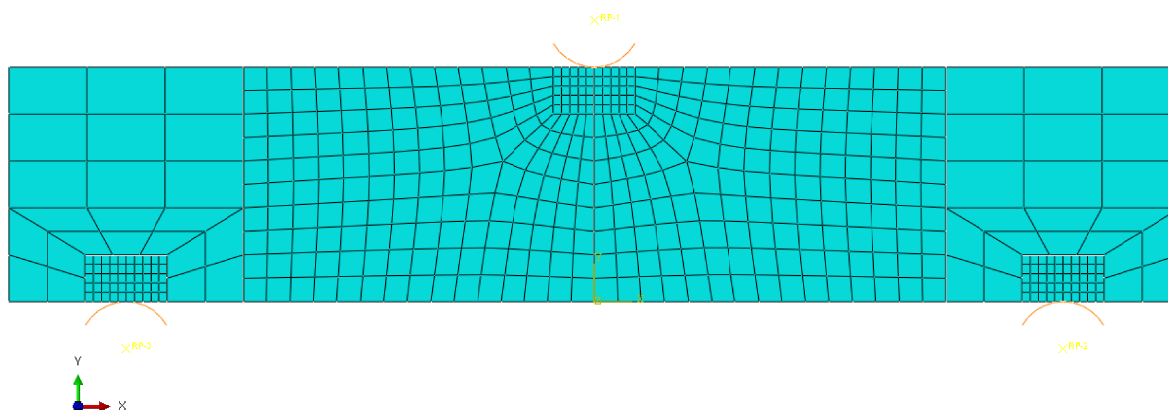
Kontaktne plohe su opisane pomoću modula Interaction, svojstva Surface to surface contact. Kao master plohe odabrane su plohe valjaka, a kao slave plohe epruvete. Faktor trenja između površina je određen sa  $\mu = 0.1$ , te je se koristi Penalty metoda za rješavanje kontakta. Osim kontaktnih ploha između valjaka i epruvete, radi potrebe mreže konačnih elemenata, epruveta je napravljena od više djelova koji su povezani međusobno svojstvom Tie, koje im omogućava da se deformiraju kao da su uniformno tijelo.

Epruveta je oslonjena i opterećena prema slici 53.

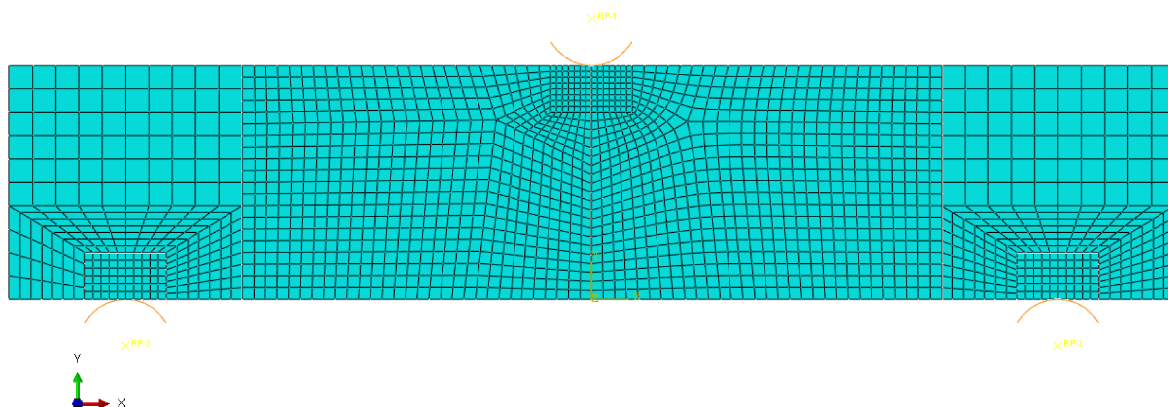


**Slika 53 Rubni uvjeti pomaka i sila**

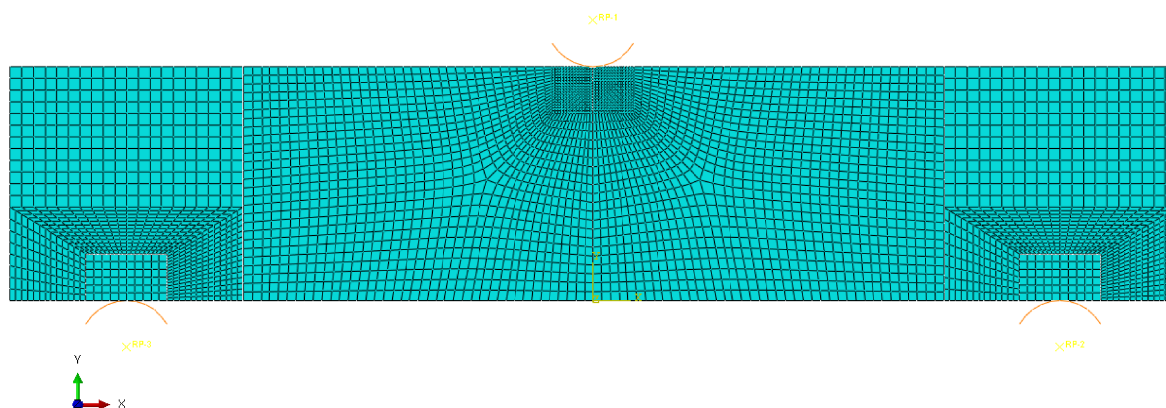
Za potrebe numeričke simulacije testa savijanja u tri točke, a kako bi se mogla pratiti konvergencija pomaka ovisno o gustoći mreže konačnih elemenata, geometrija epruvete je diskretizirana u 3 različite gustoće mreže konačnih elemenata, u iznosima od 506, 1968 te 4522 konačna elemenata.



**Slika 54 Epruveta diskretizirana s 506 CPE4 KE**

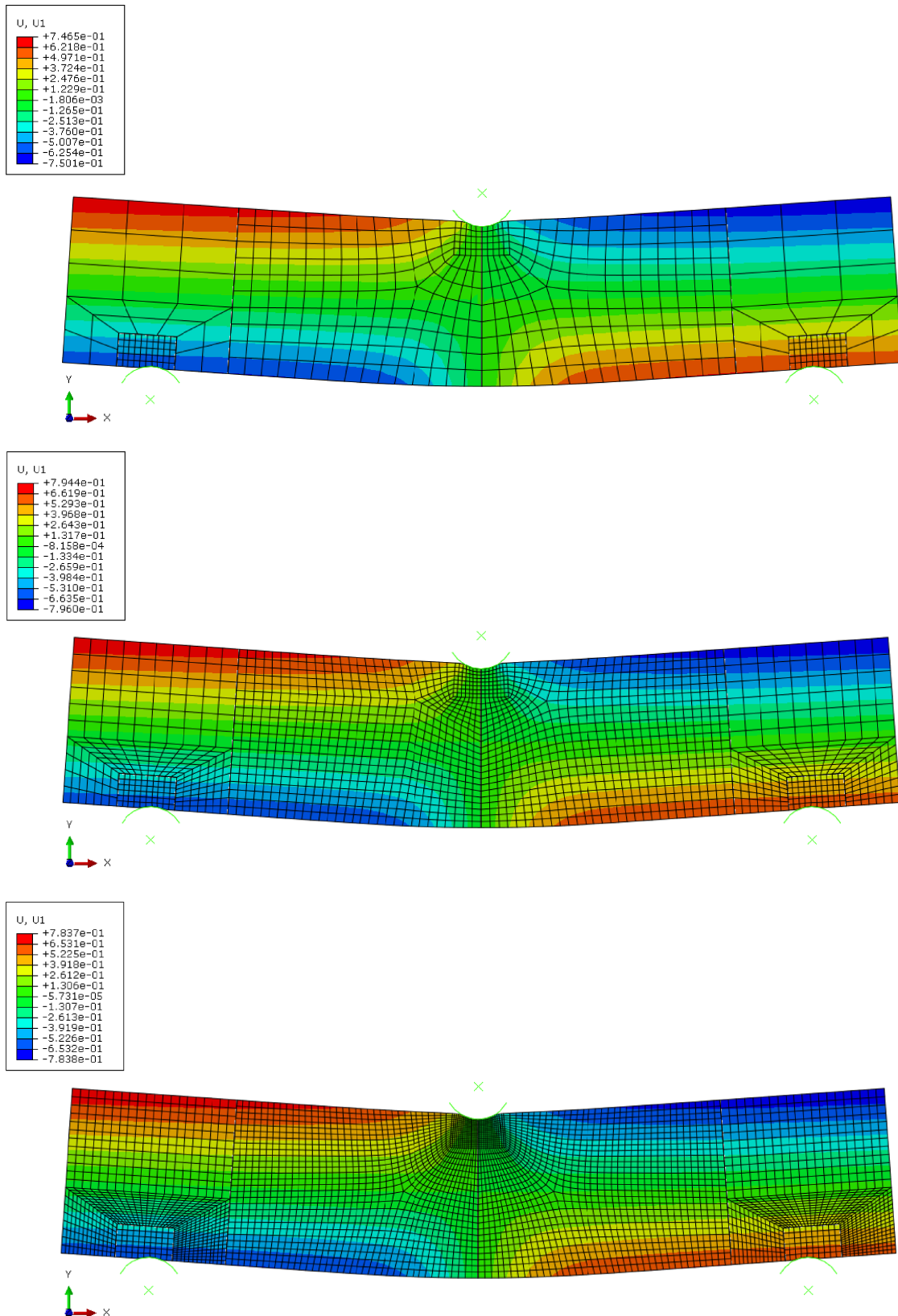


**Slika 55 Epruveta diskretizirana s 1968 CPE4 KE**

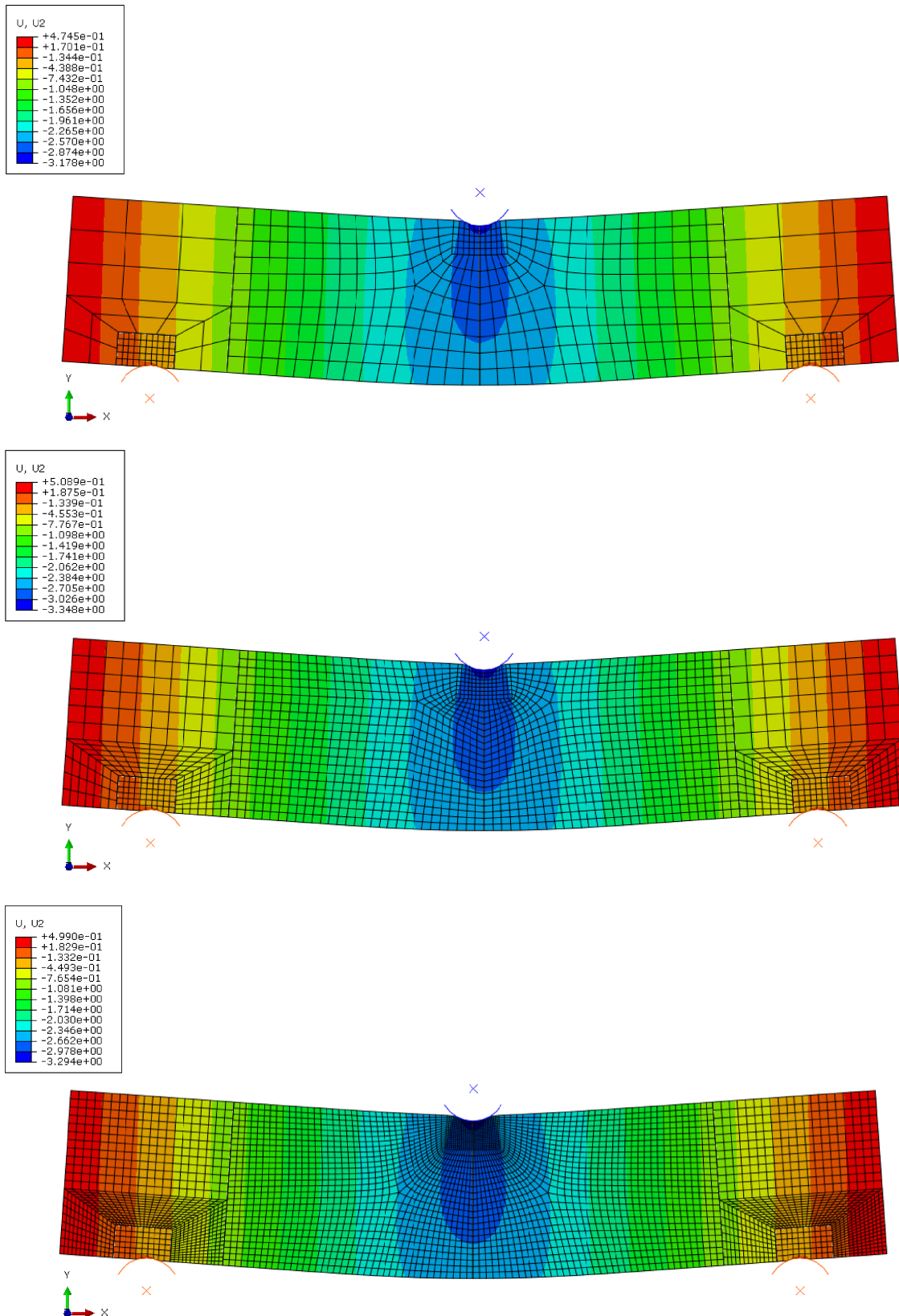


**Slika 56 Epruveta diskretizirana s 4522 CPE4 KE**

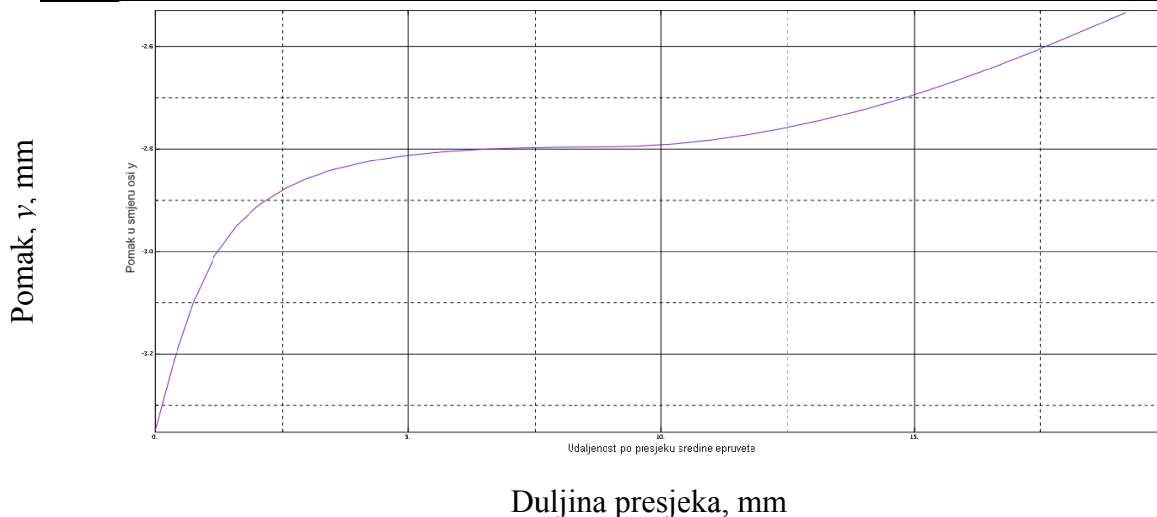
Nakon provedene numeričke analize, prema slikama 57 i 58 , te dijagramima na slikama 59, 60 i 61 može se zaključiti da dolazi do konvergencije rezultata sa povećanjem stupnja gustoće mreže konačnih elemenata. Također, vidljivo je da osim što dolazi do savijanja čitavog područja epruvete, dolazi i do lokalnih plastifikacija u područjima kontakta epruvete s valjcima, što odgovara eksperimentu.



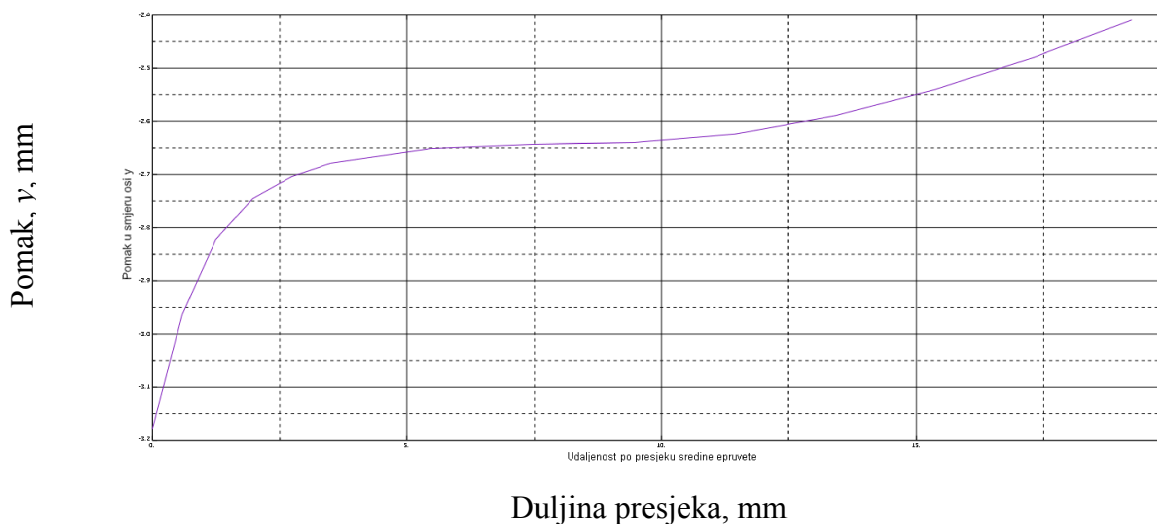
Slika 57 Numerički rezultati pomaka u smjeru osi x, mm



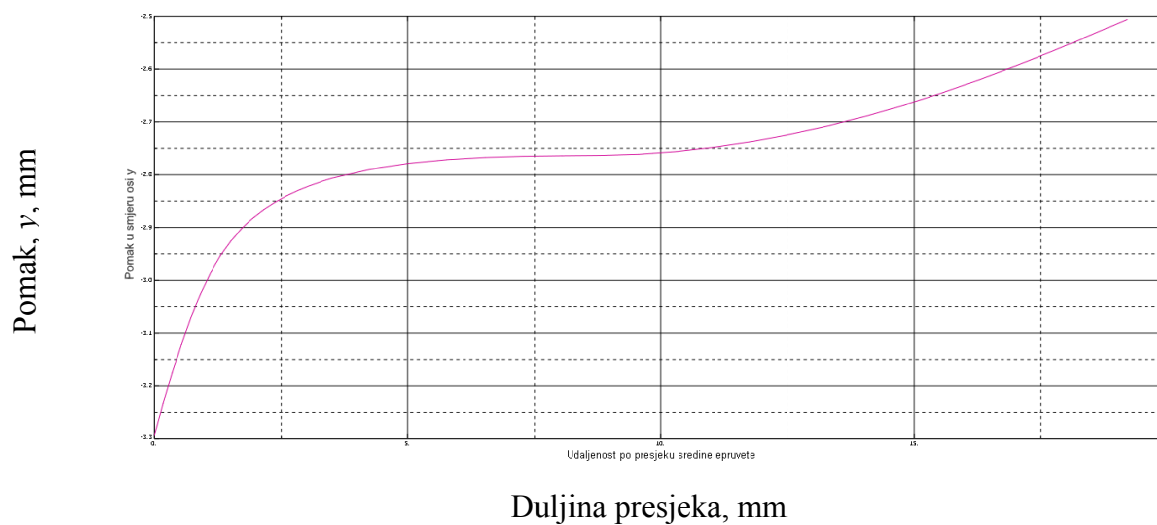
Slika 58 Numerički rezultati pomaka u smjeru osi y, mm



**Slika 59** Dijagram pomaka u smjeru  $y$  po duljini poprečnog presjeka za mrežu od 506 KE



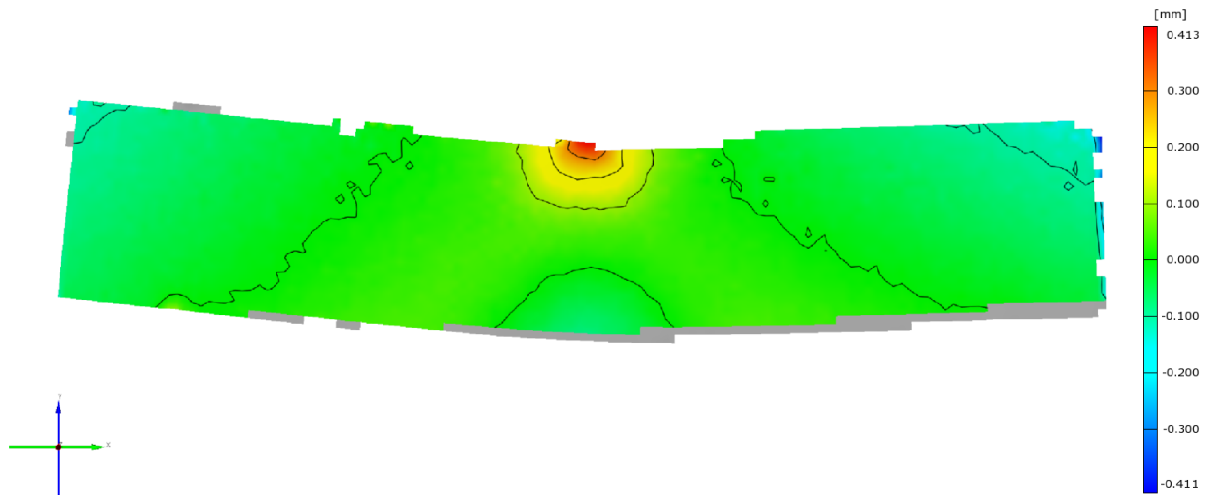
**Slika 60** Dijagram pomaka u smjeru  $y$  po duljini poprečnog presjeka za mrežu od 1968 KE



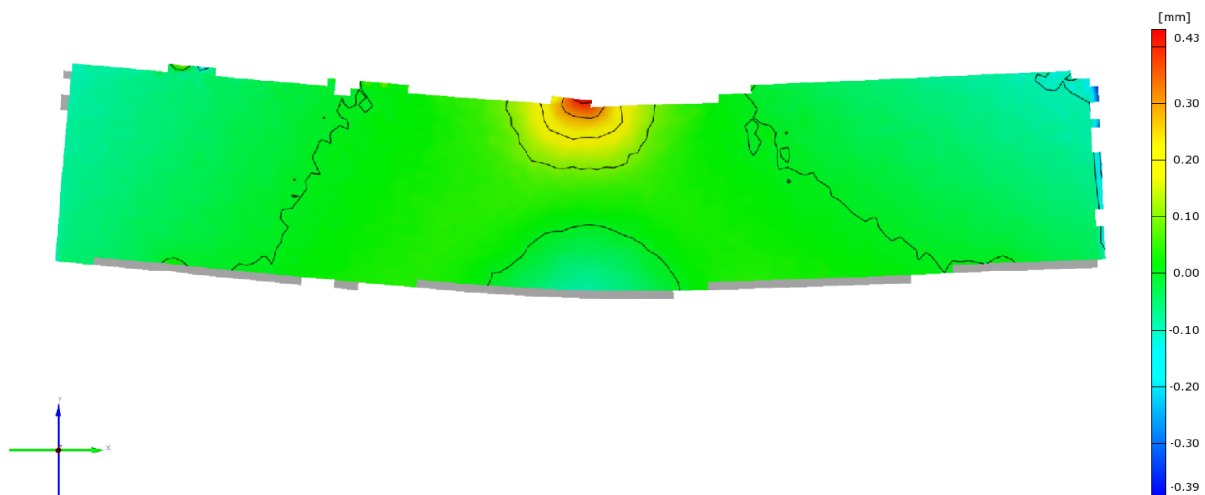
**Slika 61** Dijagram pomaka u smjeru  $y$  po duljini poprečnog presjeka za mrežu od 4522 KE

### 5.5. Usporedba rezultata određenih sustavom ARAMIS i programskim paketom ABAQUS za test savijanja u tri točke epruvete bez zareza

Postupkom istovjetnim postupku opisanim u poglavlju 4.4 računaju se razlike u pomacima između rezultata izračunatih numeričkim i eksperimentalnim metodama. Na slikama 62, 63 i 64 dane su lokalne razlike podudaranja geometrije numeričkog modela i geometrije snimljene sustavom ARAMIS za različite stupnjeve gustoće mreže konačnih elemenata.

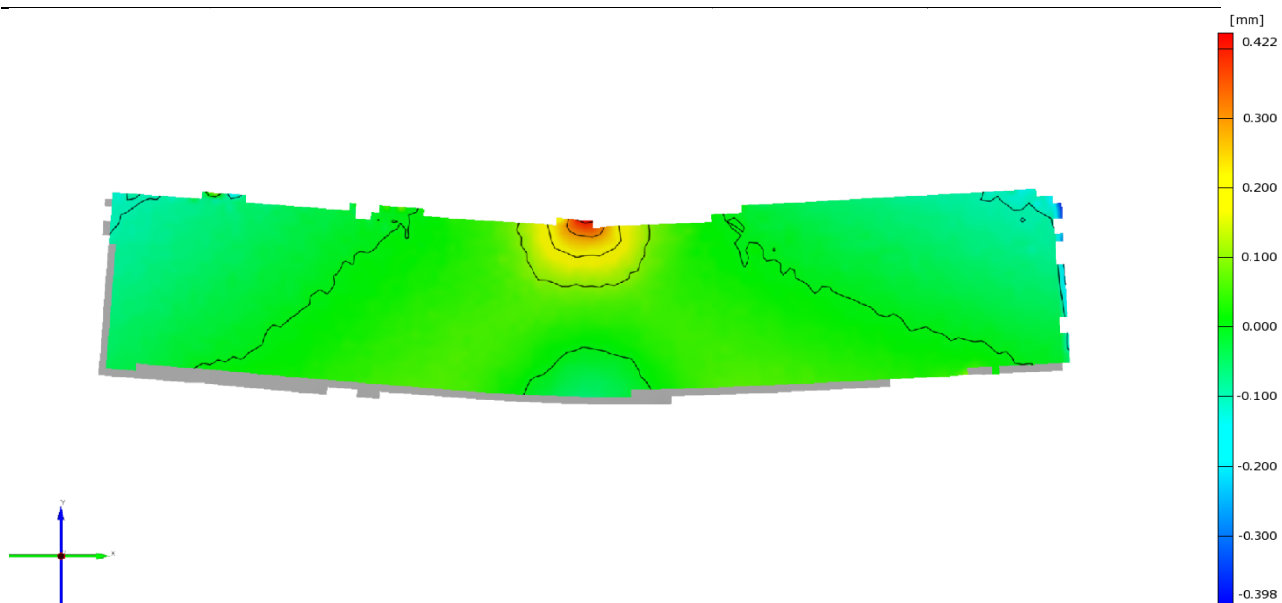


Slika 62 Lokalne razlike podudaranja geometrije za mrežu od 506 KE, mm



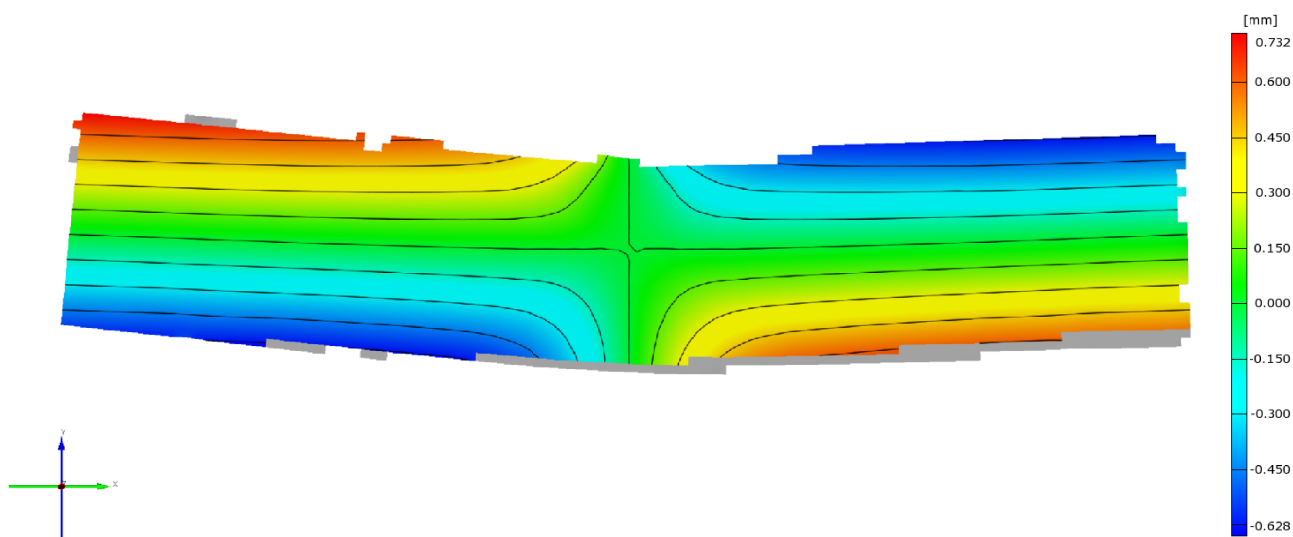
Slika 63 Lokalne razlike podudaranja geometrije za mrežu od 1968 KE, mm



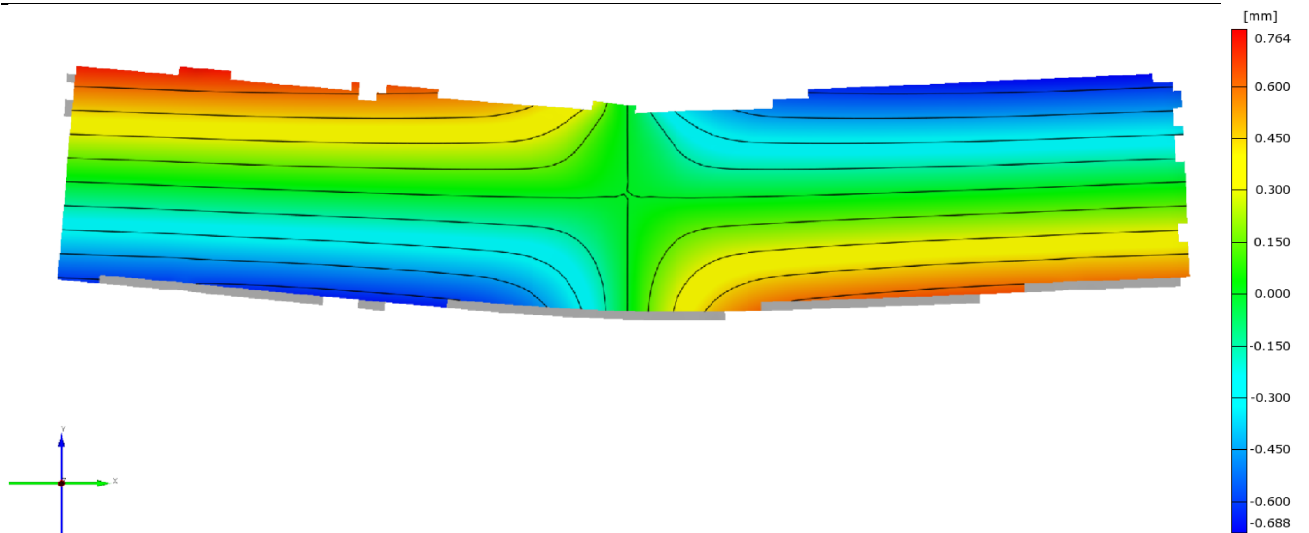


**Slika 64** Lokalne razlike podudaranja geometrije za mrežu od 4522 KE, mm

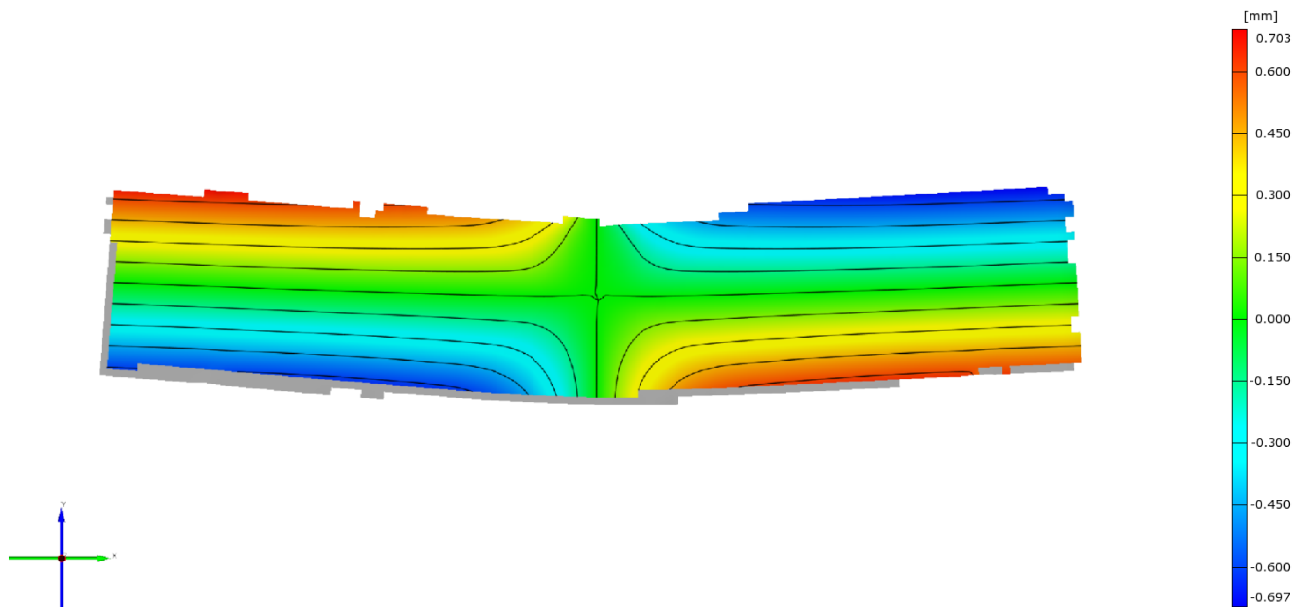
Nakon poravnavanja geometrija i izračunavanja lokalnih razlika, mapiraju se podatci o pomacima dobivenima numeričkom simulacijom na geometriju snimljenu sustavom ARAMIS, prema slikama 65, 66 i 67 za pomake u smjeru osi  $x$ , te slikama 68, 69 i 70 za pomake u smjeru osi  $y$ .



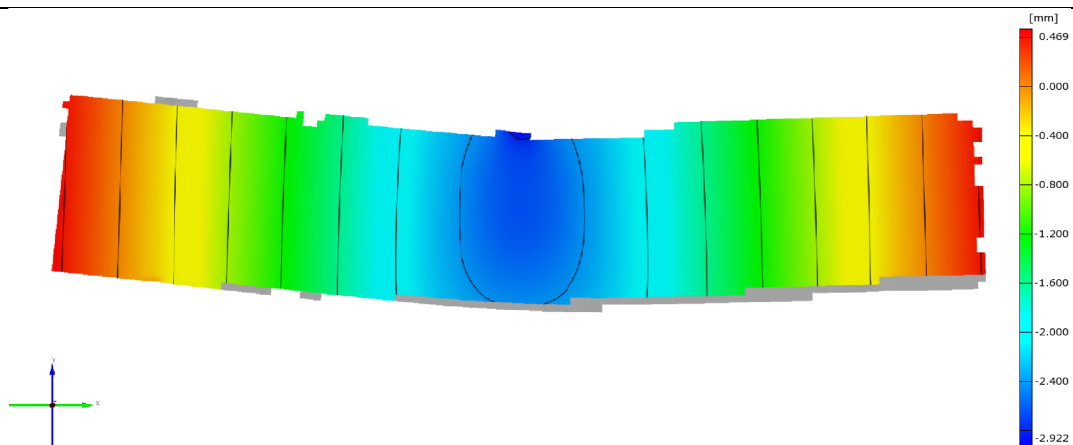
**Slika 65** Rezultati numeričke simulacije mapirani na eksperimentalne podatke, pomaci u smjeru osi  $x$  za mrežu od 506 KE, mm



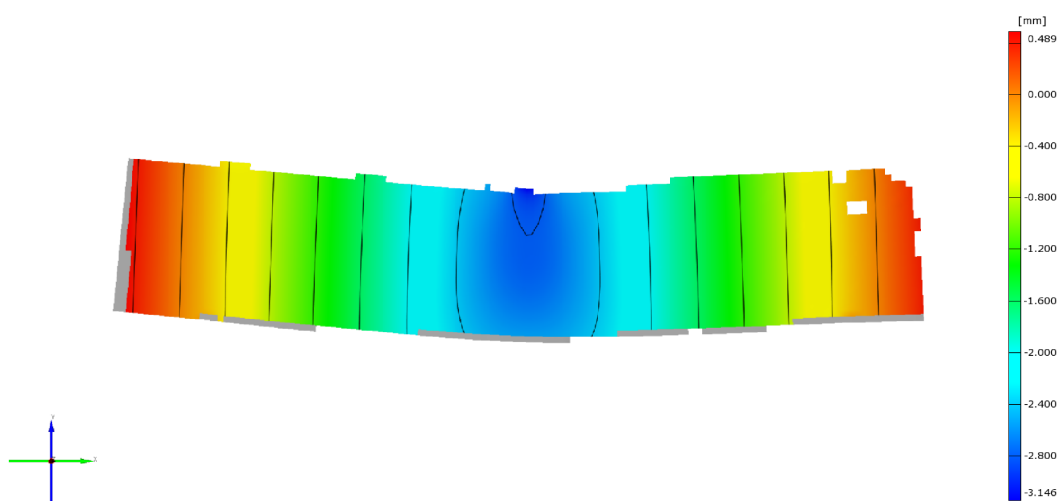
**Slika 66** Rezultati numeričke simulacije mapirani na eksperimentalne podatke, pomaci u smjeru osi  $x$  za mrežu od 1968 KE, mm



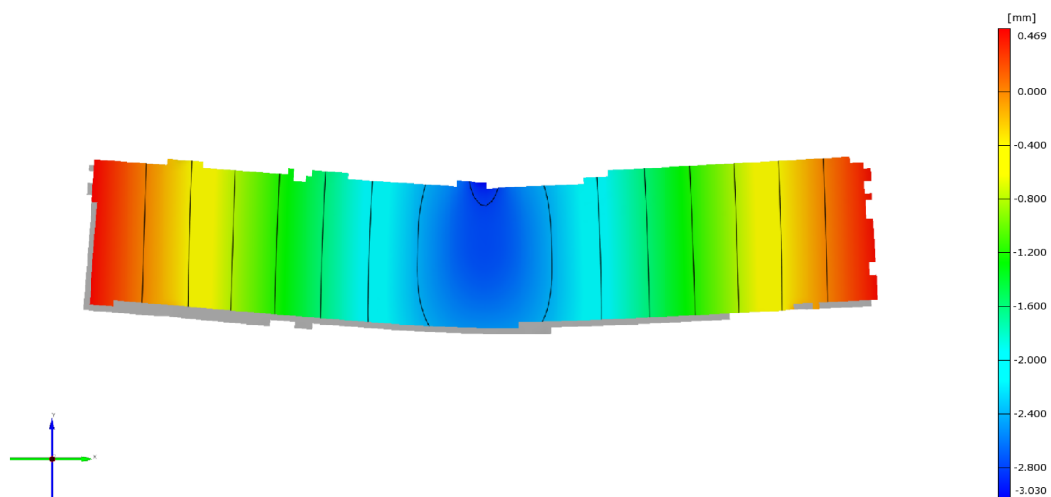
**Slika 67** Rezultati numeričke simulacije mapirani na eksperimentalne podatke, pomaci u smjeru osi  $x$  za mrežu od 4522 KE, mm



Slika 68 Rezultati numeričke simulacije mapirani na eksperimentalne podatke, pomaci u smjeru osi y za mrežu od 506 KE, mm



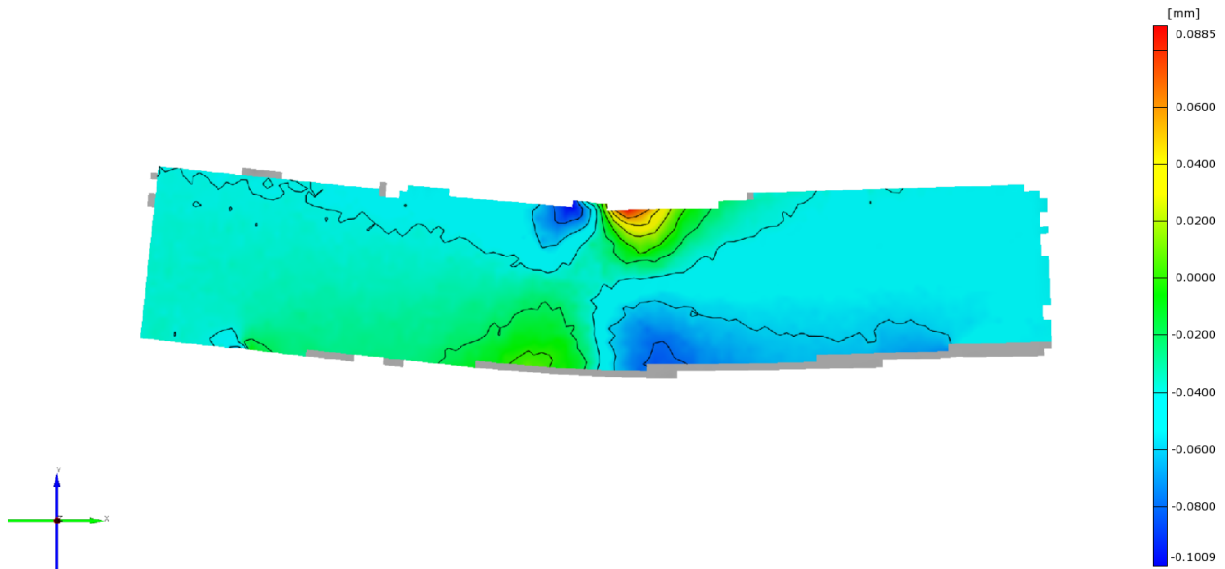
Slika 69 Rezultati numeričke simulacije mapirani na eksperimentalne podatke, pomaci u smjeru osi y za mrežu od 1968 KE, mm



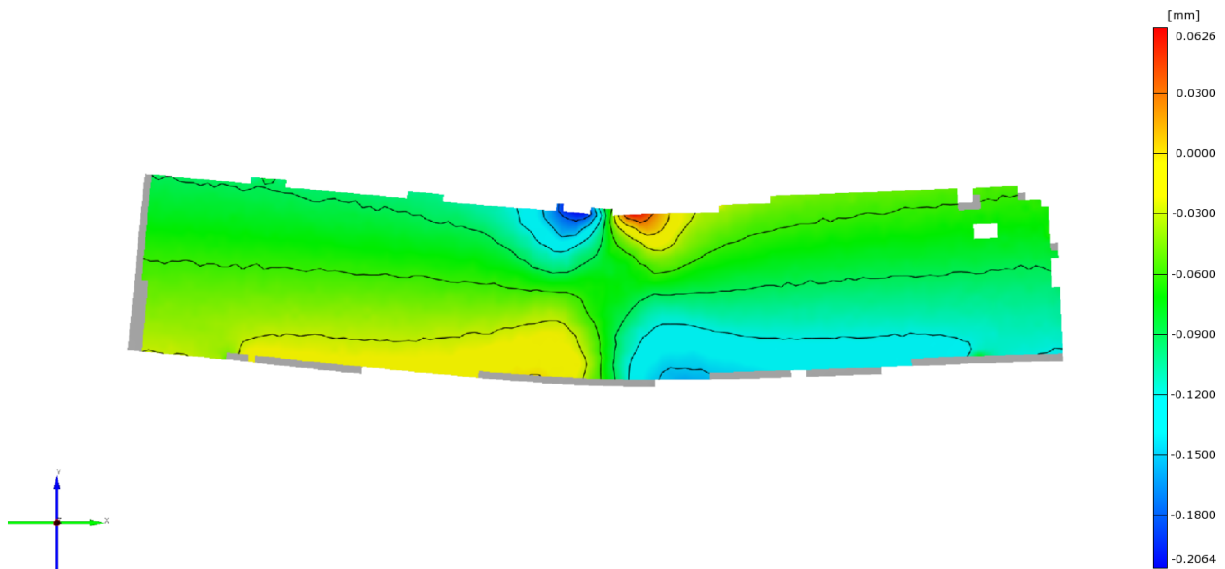
Slika 70 Rezultati numeričke simulacije mapirani na eksperimentalne podatke, pomaci u smjeru osi y za mrežu od 4522 KE, mm

Sljedeći istovjetni postupak kao u poglavlju 4.4 izračunaju se razlike u podacima o pomacima za numeričke simulacije i eksperiment.

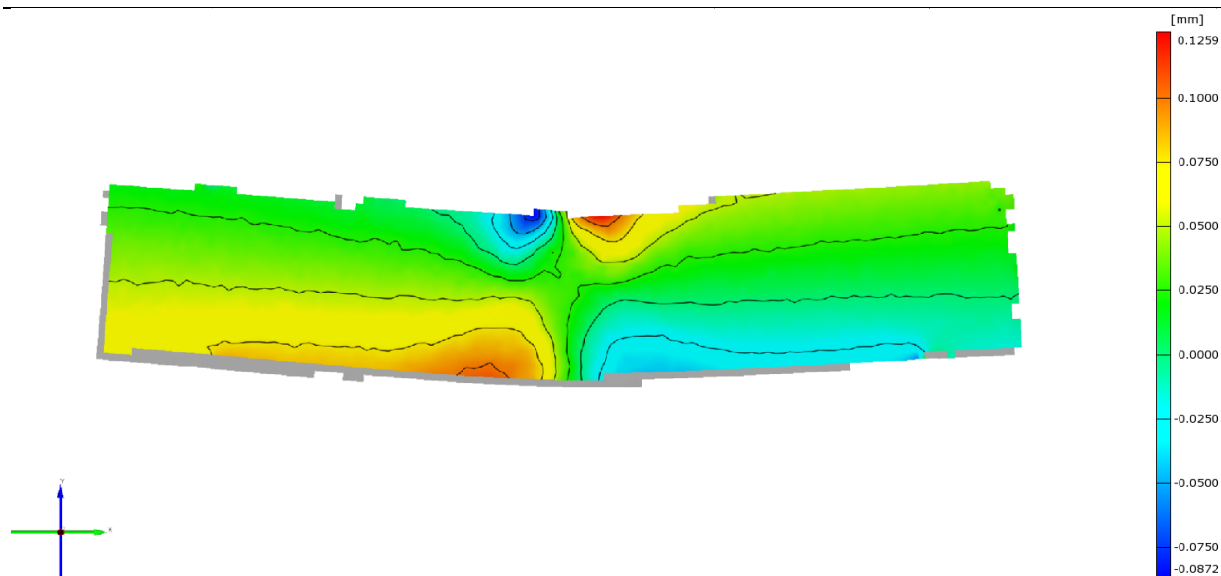
Na slikama 71, 72 i 73 dane su razlike pomaka u smjeru osi  $x$  za podatke dobivene numeričkom simulacijom i podatke izmjerene sustavom ARAMIS. Vidljivo je da do najvećih razlika dolazi u područjima iznimno velikih plastičnih deformacija, to jest, u točkama kontakta epruvete i valjaka, no čak i te razlike su zanemarive u usporedbi sa ukupnom deformacijom.



Slika 71 Razlika pomaka u smjeru osi  $x$  za mrežu od 506 KE, mm

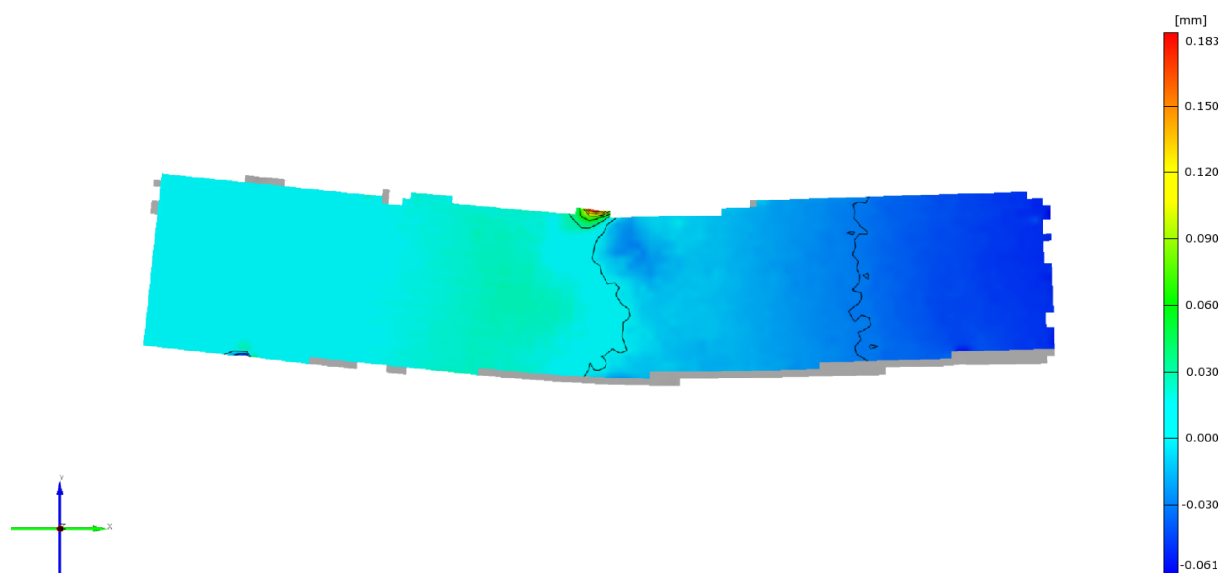


Slika 72 Razlika pomaka u smjeru osi  $x$  za mrežu od 1968 KE, mm

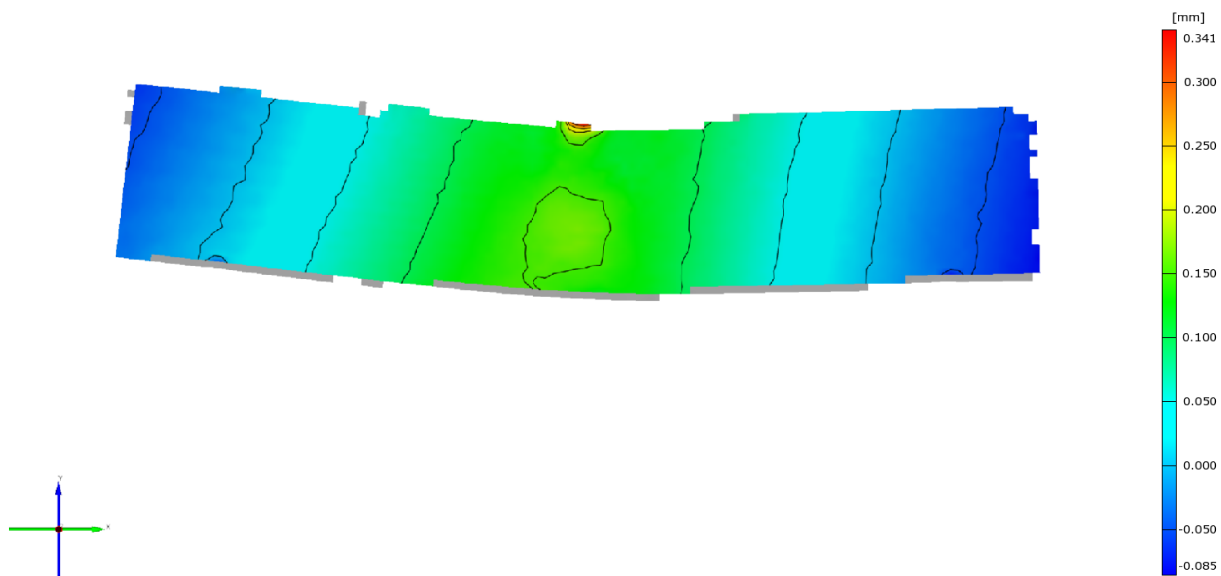


**Slika 73 Razlika pomaka u smjeru osi  $x$  za mrežu od 4522 KE, mm**

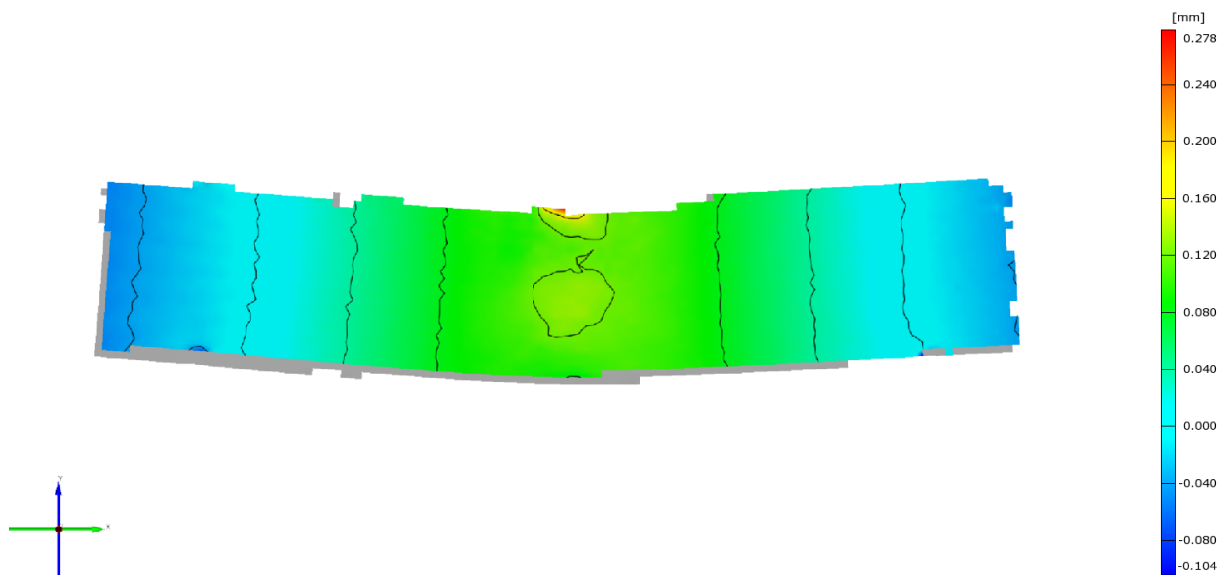
Na slikama 74, 75 i 76 dane su razlike pomaka u smjeru osi  $y$  za podatke dobivene numeričkom simulacijom i podatke izmjerene sustavom ARAMIS. Vidljivo je, kao i za pomake u smjeru osi  $x$ , da do najvećih razlika dolazi u područjima iznimno velikih plastičnih deformacija, to jest, u točkama kontakta epruvete i valjaka, no čak i te razlike su zanemarive u usporedbi sa ukupnom deformacijom.



**Slika 74 Razlika pomaka u smjeru osi  $y$  za mrežu od 506 KE, mm**



**Slika 75** Razlika pomaka u smjeru osi y za mrežu od 1968 KE, mm



**Slika 76** Razlika pomaka u smjeru osi y za mrežu od 4522 KE, mm

## 6. ZAKLJUČAK

Cilj rada je bio razviti algoritam za validaciju numeričkog modela primjenom optičkog sustava ARAMIS 4M i infracrvene termografije da bi se numerički rezultati što bolje podudarali s eksperimentom. U tu svrhu provedena su eksperimentalna istraživanja procesa deformiranja aluminijskih legura u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb. Provedeni su vlačni testovi na kidalicama LFV 50-HH; Walter, Bai AG, i MESSPHYSIK BETA 50-5, brzinama deformiranja  $0.0125 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ ,  $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  i  $10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ . Tijekom procesa deformiranja materijala, izvršena je analiza pomaka i deformacija na površini epruvete pomoću optičkog sustava ARAMIS 4M, dok su promjene temperature materijala epruvete praćene primjenom infracrvene termokamere FLIR SC5000. U okviru numeričkog modeliranja u prvom koraku provedena je verifikacija primijenjenih konačnih elemenata i procedura verificirana je na jednostavnijim problemima statičke analize. Da bi se numeričko modeliranje procesa deformiranja što više približilo realnom ponašanju konstrukcije, potrebno je dovoljno točno opisati materijalni model koji se definira konstitutivnim relacijama. Za to je potrebno eksperimentalno odrediti parametre materijala na kojima se temelje konstitutivni modeli. U tu svrhu u radu je razvijen algoritam primjenjen u programskoj skripti odb2dynain koji omogućuje direktnu usporedbu numeričkih rezultata na cijelom području diskretizacije, odnosno čitavoj površini epruvete s eksperimentalnim rezultatima koji su praćeni optičkim sustavom ARAMIS 4M. Skripta razvijena u radu je bazirana na programskom jeziku Python, te omogućuje prijepis podataka o obliku, deformacijama i naprezanju iz .odb tipa datoteke u .dynain tip datoteke za 2D i 3D modele, koji je moguće koristiti u sprezi sa ARAMIS programskim paketom za izvršavanje digitalne korelacije slike.

Usporedba podataka o prirastu temperature infracrvenom termografijom i numeričkom simulacijom izvršena je pomoću usporedbe snimljenih temperaturnih stanja površine epruvete u trenucima neposredno prije loma. Kao što je vidljivo iz rezultata, dobivena je dobra korelacija između numerike i eksperimenata, tome doprinosi algoritam razvijen u ovom radu koji omogućuje točnije kalibriranje parametara materijala, što u dosadašnjoj literaturi nije napravljeno.

Nakon što je algoritam provjeren na primjeru vlačnog testa, prešlo se na kompleksniji model testa savijanja u tri točke, za koji je izuzev modeliranja elastoplastičnog stanja materijala bilo potrebno izvršiti i modeliranje kontakata i kontaktnih ploha između valjaka i epruvete za savijanje u tri točke.



## LITERATURA

- [1] Frančeski, J., Numeričko modeliranje testa savijanja u tri točke, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [2] ARAMIS: User Manual - Software, GOM.
- [3] The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals, FLIR.
- [4] FE Safe, Volume 2, Fatigue Theory Reference Manual, Safe Technology Limited, 2008.
- [5] Pustaić, D., Cukor, I. Teorija plastičnosti i viskoelastičnosti, sažetak predavanja
- [6] ASM Metals Reference Book, Third edition, Michael Baucio, Ed. ASM International, Materials Park, OH, 1993.
- [7] Sorić, J., Tonković, Z., Skozrit, I., Predavanja i vježbe iz kolegija Nelinearna numerička analiza konstrukcija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [8] <http://en.wikipedia.org/wiki/Abaqus>
- [9] Sorić, J., Metoda konačnih elemenata, Golden marketing - Tehnička knjiga, Zagreb, 1970.
- [10] Alfirević, I., Nauka o čvrstoći I, Tehnička knjiga, Zagreb 1995
- [11] Tonković, Z., Izvod konačnog elementa za analizu elastoplastičnog ponašanja ljuskastih konstrukcija, doktorska disertacija, Zagreb, 1998.
- [12] ABAQUS/Standard, Abaqus Theory Manual, Version 6.11
- [13] Perez - Castellanos, J-L., Rusinek, A., Temperature Increase Associated With Plastic Deformation Under Dynamic Compression: Application to Aluminium Alloy Al6082, Warsaw, 2012.
- [14] Kapoor, R., Nemat - Nasser, S., Determination of temperature rise during high strain rate deformation, San Diego, 1997.
- [15] ABAQUS/Standard, Abaqus Verification Manual, Version 6.11
- [16] ABAQUS/Tutorials, Keywords Edition, Version 6.11
- [17] Krstulović - Opara, L., Surjak, M., Vesenjaka, M., Tonković, Z., Kodvanj, J., Domazet, Ž., Comparison Of Infrared And 3D Digital Image Correlation Techniques Applied For Mechanical Testing Of Materials, Danubia-Adria Symposium, Germany, 2014.
- [18] Čanžar, P., Eksperimentalno i numeričko modeliranje zamornog ponašanja nodularnog lijeva, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.

## ZAHVALE

Prilikom izrade ovog rada i tokom studija Inženjerskog modeliranja i računalnih simulacija, iznimnu pomoć i vodstvo mi je pružio mentor prof. dr. sc. Zdenko Tonković, te mu se ovim putem želim srdačno zahvaliti. Za provedbu eksperimentalnog ispitivanja ključnu ulogu imali su prof. dr. sc. Janoš Kodvanj i asistent Martin Surjak, mag. ing., koji su mi nesebično pružali na korištenje Laboratorij za eksperimentalnu mehaniku, kao i vlastito vrijeme tokom izrade ovog rada. Njihova pomoć i podrška su mi omogućili izradu rada na razini i iskreno im se zahvaljujem za pomoć. Također, bez potpore prof. dr. sc. Lovre Krstulović - Opare i prof. dr. sc. Željka Domazeta ne bi bilo moguće provesti termografsku analizu te im se zahvaljujem za pružanje opreme i stručnosti na korištenje pri izradi ovog rada. Asistentu dr. sv. Ivici Skozritu se želim zahvaliti za pomoć koju mi je pružio u učenju i svladavanju problema numeričkog modeliranja u programskom paketu ABAQUS. Profesoru dr. sc. Mateju Vesenjaku se želim zahvaliti za pomoć pruženu pri utvrđivanju materijalnih modela korištenih pri numeričkim simulacijama.

Zahvaljujem se i RCOP projektu "Centre of Excellence for Structural Health" (CEEStructHealth) sufinanciranog iz sredstava Europske unije (ugovor IPA2007/HR/16IPO/001-040513), pod IPA projektom koji mi je omogućio financije za provedbu eksperimenata.

Posebno se želim zahvaliti svojoj obitelji, majci Mirjani, ocu Branku, te bratu i sestri Hrvoju i Hrvojki, kao i najbližim prijateljima Andreju, Marku, Vedrani i Ines za pomoć i potporu koju su mi pružili tokom izrade ovog rada.

## SAŽETAK

**Naslov rada:** Algoritam za validaciju numeričkog modela metodama fotogrametrije i termografije

Novi zahtjevi na pouzdanost i sigurnost, zajedno s upotrebom novih materijala i novih tehnologija proizvodnje mogu se realizirati jedino primjenom naprednih metoda analize konstrukcije i opisivanja ponašanja materijala. Kao i kod većine drugih problema, numeričke simulacije sve više zamjenjuju mnogo skuplji eksperiment. Kako bi numeričke simulacije što bolje opisivale realno ponašanje konstrukcije, potrebno je što točnije eksperimentalno odrediti parametre materijala u konstitutivnim relacijama. U tu svrhu, u radu je provedeno eksperimentalno određivanje mehaničkih parametara materijala Al2024 za statičke i dinamičke vlačne testove na plosnatoj epruveti za više brzina deformiranja. Raspodjele pomaka i temperatura na epruveti za vrijeme vlačnih testova određene su pomoću metoda fotogrametrije i infracrvene termografije. To je omogućilo točnije kalibriranje parametara materijala u termoplastičnom konstitutivnom modelu. Osim toga, provedeno je dvodimenzijsko numeričko modeliranje vlačnih testova primjenom programskog paketa ABAQUS koji se temelji na metodi konačnih elemenata. Za usporedbu eksperimentalnih i numeričkih rezultata razvijen je algoritam koji je implementiran u programsku skriptu odb2dynain.py. Ovaj algoritam omogućuje direktnu usporedbu eksperimentalnih i numeričkih rezultata na čitavoj površini epruvete, što u dosadašnjoj literaturi nije napravljeno. Osim toga, provedena je i usporedba rezultata promjene temperature određene infracrvenom termografijom i numeričkom simulacijom. Na kraju je proveden eksperiment i numerička simulacija za test savijanja u tri točke na epruveti bez zareza, te su provedene usporedbe kao i za vlačno ispitivanje. Verifikacija primijenjenih konačnih elemenata i procedura verificirana je na jednostavnijim problemima statičke analize.

**Ključne riječi:** Eksperiment, ARAMIS, Korelacija digitalne slike (DIC), Termografija, Metoda konačnih elemenata, ABAQUS, Elastoplastičnost.

## **SUMMARY**

**Naslov rada:** An algorithm for validation of numerical models by means of photogrammetry and thermography

New demands on reliability and safety, together with the use of new materials and new production technologies can be realized only by using advanced methods of structural analysis and material behavior. It is necessary to accurately determine the material parameters in constitutive relations using experiments, in order to better describe real behaviour of the structure by means of numerical simulations. For that purpose, in this thesis, experimental determination of the mechanical parameters of material Al2024 for static and dynamic tensile tests had been carried out on flat specimen, for multiple cases of deformation speed. Displacement and temperature distribution of specimen during the tensile tests were determined by means of photogrammetry and infrared thermography. This enables more precise calibration of material parameters in thermoplastic constitutive model. In addition, two dimensional numerical modeling of the tensile tests using the ABAQUS software package, based on the finite element method, was carried out. For comparison of the experimental and numerical results an algorithm was developed and implemented in software script odb2dynain.py. This algorithm enables direct comparison of the experimental and numerical results over the entire surface of the specimen, something that was not done before. In addition, comparison of the temperature change results, determined by infrared thermography and numerical simulation, was carried out. In the end, an experiment and numerical simulation of the three point bending test on a specimen without a notch, was carried out, and comparison between numerical and experimental data, as for tensile test was carried out. Verification of the used finite elements and procedures was done on simpler problems of static analysis.

**Key words:** Experiment, ARAMIS, Digital Image Correlation (DIC), Thermography, Finite element method, ABAQUS, Elastoplasticity.