

# Mehanička karakterizacija vinilester smole ojačane staklenim pletenim vlaknima uslijed jednostavnog smičnog opterećenja

---

**Bilobrk, Juro**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*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:235:509142>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Juro Bilobrk**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Zvonimir Tomičević, mag. ing.

Student:

Juro Bilobrk

Zagreb, 2022

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

Najveću zahvalu upućujem svojem mentoru, doc. dr. sc. Zvonimiru Tomičeviću, na pruženoj prilici za provedbu ovog eksperimenta i izradu diplomskog rada, mnogobrojnim savjetima, uloženom trudu i vremenu, stalnoj dostupnosti i izvrsnoj radnoj atmosferi. Sve to uvelike je olakšalo izradu i unaprijedilo ovaj rad.

Nadalje, zahvaljujem se asistentu Andriji Zaplatiću, mag. ing. mech., na ogromnoj količini izdvojenog vremena prilikom provođenja eksperimenta, korisnim sugestijama te velikodušnoj pomoći pri izradi rada. Također, zahvaljujem asistentici Ani Vrgoč, mag. ing. mech., na pomoći tijekom provođenja analiza i na kvalitetnim savjetima prilikom pisanja rada.

Srdačno zahvaljujem tvrtki *Neo Dens d.o.o.* na ustupljenom CT uređaju te Petru Kosecu, mag. ing. mech., na pomoći pri skeniranjima ispitnih uzoraka.

I would also like to express my gratitude to *EikoSim* for providing the needed license for their software *EikoTwin*.

Naposljetku, zahvaljujem se svojoj obitelji, posebice roditeljima Niki i Suzani bez čije bezuvjetne podrške i brojnih odricanja sve ovo ne bi bilo moguće. Hvala vam!

Ovaj diplomski rad izrađen je u sklopu uspostavnog istraživačkog projekta FULLINSPECT (UIP-2019-04-5460).

Juro Bilobrk



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, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Juro Bilobrk** JMBAG: 0035205272

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mehanička karakterizacija vinilester smole ojačane staklenim pletenim vlaknima uslijed jednostavnog smičnog opterećenja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Mechanical characterization of vinyl ester resin reinforced with glass woven fabric subjected to simple shear loading regime**

Opis zadatka:

Polimeri ojačani vlaknima (*eng. Fiber Reinforced Polymers, FRP*) se zbog svojih karakterističnih mehaničkih svojstava, kao što su visoka specifična čvrstoća i krutost te otpornost na zamor, sve više koriste kao temeljni materijali kod laganih konstrukcija visokih performansi. Glavnu primjenu nalaze u zrakoplovnoj, automobilskoj i svemirskoj industriji, energetskom sektoru te građevini i brodogradnji. Međutim, sveobuhvatna mehanička karakterizacija FRP kompozita na makrorazini zahtijeva provedbu višeosnih ravninskih ispitivanja kako bi se pouzdano opisalo ponašanje materijala.

U ovom radu potrebno je odrediti mehaničko ponašanje vinilester smole ojačane staklenim pletenim vlaknima uslijed smičnog opterećenja primjenom modificiranog Arcan prihvata. Eksperimentalna ispitivanja provest će se na leptirastim ispitnim uzorcima debljine 3 mm. Ispitni uzorci će se tijekom provedbe monotonih i cikličkih ispitivanja promatrati primjenom mono- i stereovizijskog sustava. Na zabilježenim slikama potrebno je provesti ravninska i stereo mjerenja pomaka korištenjem metode korelacije digitalne slike (*eng. Digital Image Correlation, DIC*) temeljene na metodi konačnih elemenata (*eng. Finite Element, FE*). Iz izmjerenih pomaka potrebno je izračunati polja deformacija pomoću kojih će se odrediti globalni odziv predloženog FRP kompozita i odgovarajuće lokalizacije deformacija. Osim toga, iz korelacijskih reziduala promatrati će se inicijacija i rast oštećenja na površini ispitnih uzoraka. U rasterećenom stanju ispitni uzorci će biti skenirani primjenom računalne tomografije X-zraka (XCT) kako bi se odredilo oštećenje unutar predloženog materijala. Tijekom rada potrebno je:

1. Upoznati se s radom statičke kitalice *Messphysik Beta 50-50*, principom stereo FE-DIC algoritma *EikoTwin*<sup>®</sup> i 2D FE-DIC algoritma *Correli3.0*<sup>®</sup>.
2. Predložiti odgovarajući optički postav pomoću kojeg će se primijeniti 2D i stereo DIC mjerenja.
3. Odrediti ponašanje materijala uslijed monotonog i cikličkog smičnog opterećenja.
4. Usporediti polja pomaka izmjerena primjenom 2D i stereo FE-DIC algoritama i procijeniti grešku ravninskog DIC mjerenja.
5. Identificirati mehanizme oštećenja iz zabilježenih 3D volumena primjenom XCT skenera.
6. Odrediti globalno oštećenje materijala uslijed cikličkog opterećenja i detektirati lokalizacijske fenomene na površini ispitnih uzoraka.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predvideni datumi obrane:

11. studenoga 2021.

13. siječnja 2022.

17. – 21. siječnja 2022.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc.dr.sc. Zvonimir Tomičević

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	XI
POPIS ENGLESKIH SKRAĆENICA .....	XII
POPIS OZNAKA .....	XIII
SAŽETAK.....	XIV
SUMMARY .....	XVI
1. Uvod .....	1
2. Polimeri ojačani vlaknima .....	3
3. Korelacija digitalne slike/volumena .....	5
3.1. Globalni pristup korelaciji digitalne slike/volumena .....	5
3.2. Stereo korelacija.....	6
3.2.1. EikoTwin.....	7
4. Eksperimentalno ispitivanje.....	10
4.1. <i>Ex-situ</i> eksperimentalni protokol smičnog ispitivanja s monotonim opterećenjem ..	11
4.2. <i>Ex-situ</i> eksperimentalni protokol smičnog ispitivanja s cikličkim opterećenjem.....	11
4.3. Mehanički postav .....	12
4.3.1. Arcan prihvat .....	13
4.4. Optički postav .....	14
4.4.1. 2D DIC postav .....	14
4.4.2. 3D DIC postav .....	16
4.5. XCT skeniranje ispitnog uzorka .....	17
4.5.1. Računalni tomograf WENZEL® exaCT®s 130.....	17
4.5.2. DVC analiza.....	19
5. Rezultati.....	20
5.1. Monotono smično ispitivanje.....	20

---

5.1.1.	Mjerna nesigurnost.....	20
5.1.1.1.	Mjerna nesigurnost DIC analize .....	20
5.1.1.2.	Mjerna nesigurnost DVC analize.....	21
5.1.2.	Linearni odziv monotonog smičnog ispitivanja.....	28
5.1.2.1.	Polja pomaka u linearnom području .....	28
5.1.2.2.	Polja deformacija u linearnom području.....	31
5.1.2.3.	Polja korelacijskih reziduala u linearnom području.....	32
5.1.3.	Nelinearni odziv monotonog smičnog ispitivanja .....	33
5.1.3.1.	Polja pomaka u nelinearnom području .....	33
5.1.3.2.	Polja deformacija u nelinearnom području .....	37
5.1.3.3.	Polja korelacijskih reziduala u nelinearnom području.....	38
5.1.4.	Usporedba maksimalnih polja pomaka i deformacija u vrhovima ciklusa .....	39
5.1.5.	DVC analiza monotonog smičnog ispitivanja .....	45
5.2.	Cikličko smično ispitivanje.....	48
5.2.1.	Mjerna nesigurnost.....	48
5.2.1.1.	Mjerne nesigurnosti DIC analize .....	48
5.2.1.2.	Mjerna nesigurnost DVC analize.....	49
5.2.1.3.	Usporedba mjernih nesigurnosti monotonog i cikličkog ispitivanja .....	51
5.2.2.	Ciklus 1 .....	54
5.2.3.	Ciklus 2 .....	59
5.2.4.	Ciklus 3 .....	63
5.2.5.	Ciklus 4 .....	67
5.2.6.	Ciklus 5 .....	71
5.2.7.	Ciklus 6 .....	75
5.2.8.	Ciklus 7 .....	79
5.2.9.	DVC analiza cikličkog ispitivanja .....	83
6.	Diskusija .....	88
7.	Zaključak .....	91
8.	Literatura.....	93

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Proizvodni postupak vakuumske infuzije.....	3
Slika 2.	Shematski prikaz pletenih vlakana. ....	4
Slika 3.	Rekonstruirani volumen (lijevo) i središnji presjeci ravnina s vidljivom mikrostrukturom ispitnog uzorka (desno). ....	4
Slika 4.	Princip rada stereo korelacije [7].....	7
Slika 5.	Kalibracija <i>EikoTwin</i> stereo korelacijskog algoritma. ....	9
Slika 6.	Leptirasti ispitni uzorak.....	10
Slika 7.	Dimenzije leptirastog ispitnog uzorka.....	10
Slika 8.	<i>Ex-situ</i> eksperimentalni protokol smičnog ispitivanja s monotonim opterećenjem. ....	11
Slika 9.	<i>Ex-situ</i> eksperimentalni protokol smičnog ispitivanja s cikličkim opterećenjem. ....	12
Slika 10.	Shematski prikaz modificiranog Arcan prihvat [11].....	13
Slika 11.	Ispitni uzorak podijeljen na područja [12]. ....	14
Slika 12.	Optički postav.....	14
Slika 13.	Ispitni uzorak s nanesenim stohastičkim crno-bijelim rasterom. ....	15
Slika 14.	Računalni tomograf WENZEL® exaCT®s 130 tvrtke <i>Neo Dens d.o.o.</i> ....	17
Slika 15.	Postav unutar CT skenera.....	19
Slika 16.	Mjerna nesigurnost pomaka DIC analize monotonog ispitivanja. ....	20
Slika 17.	Mjerna nesigurnost deformacija DIC analize monotonog ispitivanja.....	21
Slika 18.	Mjerne nesigurnosti pomaka DVC analize za monotono ispitivanje gdje je a) mjerna nesigurnost pomaka bis skena, b) mjerna nesigurnost pomaka rbm skena te c) usporedba srednjih vrijednosti mjernih nesigurnosti pomaka bis i rbm skena. Crveni i plavi kvadratići označavaju mjernu nesigurnost pomaka za bis i rbm skenove s regularizacijom od 128 voxela.....	22
Slika 19.	Mjerne nesigurnosti deformacija DVC analize za monotono ispitivanje gdje je a) mjerna nesigurnost pomaka bis skena, b) mjerna nesigurnost pomaka rbm skena te c) usporedba srednjih vrijednosti mjernih nesigurnosti pomaka bis i rbm skena. Crveni i plavi kvadratići označavaju mjernu nesigurnost deformacija za bis i rbm skenove s regularizacijom od 128 voxela.....	23
Slika 20.	Mreža konačnih elemenata – <i>Correli 3.0.</i> ....	24
Slika 21.	Mreža konačnih elemenata - <i>EikoTwin.</i> ....	24



---

Slika 22.	Mreža konačnih elemenata za DVC analizu (lijevo) i mreža konačnih elemenata preklopljena s mikrostrukturom (desno) .....	24
Slika 23.	Područje odabrano za određivanje globalnog odziva materijala na polju glavnih deformacija izračunatom na mreži konačnih elemenata pomoću korelacijskog algoritma <i>Correli 3.0</i> (lijevo) te <i>EikoTwin</i> (desno)(eng. <i>Virtual gauge</i> ). .....	25
Slika 24.	Usporedba posmičnih deformacija izračunatih pomoću <i>Correli 3.0</i> i <i>EikoTwin</i> algoritma za monotono ispitivanje. ....	26
Slika 25.	Usporedni dijagram deformacija - naprezanje za monotono ispitivanje.....	26
Slika 26.	Razlika posmičnih deformacija izračunatih 2D DIC i 3D DIC analizom u korelaciji s izvanravninskim pomacima zabilježenim 3D DIC postavom za monotono ispitivanje. ....	27
Slika 27.	Dijagram deformacija - naprezanje monotonog ispitivanja s označenim analiziranim točkama u linearnom i nelinearnom područje .....	28
Slika 28.	Polja pomaka u $x$ -smjeru u linearnom području mehaničkog odziva materijala izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za monotono ispitivanje.....	29
Slika 29.	Polja pomaka u $x$ -smjeru u linearnom području mehaničkog odziva materijala izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za monotono ispitivanje. ....	29
Slika 30.	Polja pomaka u $y$ -smjeru u linearnom području mehaničkog odziva materijala izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za monotono ispitivanje.....	30
Slika 31.	Polja pomaka u $y$ -smjeru u linearnom području mehaničkog odziva materijala izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za monotono ispitivanje. ....	30
Slika 32.	Polja izvanravninskih pomaka izmjerena u linearnom području mehaničkog odziva materijala pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za monotono ispitivanje. ....	31
Slika 33.	Polja najvećih glavnih deformacija u linearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma.....	32
Slika 34.	Polja najvećih glavnih deformacija u linearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izračunata pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma. ....	32
Slika 35.	Polja korelacijskih reziduala u linearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma.....	33
Slika 36.	Polja pomaka u $x$ -smjeru u nelinearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma. ....	34
Slika 37.	Polja pomaka u $x$ -smjeru u nelinearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izračunata pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma. ....	35

Slika 38.	Polja pomaka u $y$ -smjeru u nelinearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma. ....	35
Slika 39.	Polja pomaka u $y$ -smjeru u nelinearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma.....	36
Slika 40.	Polja izvanravninskih pomaka u nelinearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma.....	36
Slika 41.	Polja najvećih glavnih deformacija u nelinearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma.....	37
Slika 42.	Polja najvećih glavnih deformacija u nelinearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izračunata pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma. ....	38
Slika 43.	Polja korelacijskih reziduala u nelinearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma.....	39
Slika 44.	Polja pomaka u $x$ -smjeru u vrhovima ciklusa monotonog ispitivanja izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma. ....	40
Slika 45.	Polja pomaka u $x$ -smjeru u vrhovima ciklusa monotonog ispitivanja izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma. ....	40
Slika 46.	Polja pomaka u $y$ -smjeru u vrhovima ciklusa monotonog ispitivanja izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma. ....	41
Slika 47.	Polja pomaka u $y$ -smjeru u vrhovima ciklusa monotonog ispitivanja izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma. ....	41
Slika 48.	Polja izvanravninskih pomaka u vrhovima ciklusa monotonog ispitivanja izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma.....	42
Slika 49.	Polja najvećih glavnih deformacija u vrhovima ciklusa monotonog ispitivanja izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma.....	43
Slika 50.	Polja najvećih glavnih deformacija u vrhovima ciklusa monotonog ispitivanja izračunata pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma. ....	43
Slika 51.	Polja korelacijskih reziduala u vrhovima ciklusa monotonog ispitivanja izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma. ....	44
Slika 52.	Ispitni uzorka nakon zadnjeg ciklusa monotonog ispitivanja. ....	44
Slika 53.	Rekonstruirani volumeni ispitnog uzorka tijekom monotonog ispitivanja. Skenovi 0 – 4 odgovaraju slikama a) – e). ....	45
Slika 54.	Posmične deformacije po elementima izračunate DVC analizom pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za monotono ispitivanje. Skenovi 1 – 4 odgovaraju slikama a) – d). ....	46

Slika 55.	Posmične deformacije ograničene najmanjom i najvećom deformacijom od 6% i 15% za monotono ispitivanje. Skenovi 1 – 4 odgovaraju slikama a) – d). .....	47
Slika 56.	Korelacijski reziduali izračunati DVC analizom pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za monotono ispitivanje. Skenovi 1 – 4 odgovaraju slikama a) – d). .....	48
Slika 57.	Mjerna nesigurnost pomaka DIC analize cikličkog ispitivanja.....	49
Slika 58.	Mjerna nesigurnost deformacija DIC analize cikličkog ispitivanja. ....	49
Slika 59.	Mjerne nesigurnosti pomaka DVC analize za cikličko ispitivanje gdje je a) mjerna nesigurnost pomaka bis skena, b) mjerna nesigurnost pomaka rbm skena te c) usporedba srednjih vrijednosti mjernih nesigurnosti pomaka bis i rbm skena. Crveni i plavi kvadratići označavaju mjernu nesigurnost pomaka za bis i rbm skenove s regularizacijom od 128 voxela.....	50
Slika 60.	Mjerne nesigurnosti deformacija DVC analize za cikličko ispitivanje gdje je a) mjerna nesigurnost pomaka bis skena, b) mjerna nesigurnost pomaka rbm skena te c) usporedba srednjih vrijednosti mjernih nesigurnosti pomaka bis i rbm skena. Crveni i plavi kvadratići označavaju mjernu nesigurnost deformacija za bis i rbm skenove s regularizacijom od 128 voxela.....	51
Slika 61.	Usporedba najvećih glavnih deformacija izračunatih pomoću <i>Correli 3.0</i> i <i>EikoTwin</i> algoritma za cikličko ispitivanje. ....	53
Slika 62.	Dijagram deformacija - naprezanje za cikličko ispitivanje. ....	53
Slika 63.	Razlika deformacija izračunatih 2D DIC i 3D DIC postavom u korelaciji s izvanravninskim pomacima zabilježenim 3D DIC postavom za cikličko ispitivanje. ....	54
Slika 64.	Polja pomaka u <i>x</i> -smjeru izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za prvi ciklus cikličkog ispitivanju. ....	55
Slika 65.	Polja pomaka u <i>x</i> -smjeru izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za prvi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	55
Slika 66.	Polja pomaka u <i>y</i> -smjeru izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za prvi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	56
Slika 67.	Polja pomaka u <i>y</i> -smjeru izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za prvi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	56
Slika 68.	Polja izvanravninskih pomaka izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za prvi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	57
Slika 69.	Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> za prvi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	57

Slika 70.	Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za prvi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	58
Slika 71.	Polja korelacijskih reziduala izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za prvi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	58
Slika 72.	Polja pomaka u $x$ -smjeru izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za drugi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	59
Slika 73.	Polja pomaka u $x$ -smjeru izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za drugi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	59
Slika 74.	Polja pomaka u $y$ -smjeru izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za drugi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	60
Slika 75.	Polja pomaka u $y$ -smjeru izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za drugi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	60
Slika 76.	Polja izvanravninskih pomaka izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za drugi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	61
Slika 77.	Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za drugi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	61
Slika 78.	Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za drugi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	62
Slika 79.	Polja korelacijskih reziduala izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za drugi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	62
Slika 80.	Polja pomaka u $x$ -smjeru izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za treći ciklus cikličkog ispitivanja. ....	63
Slika 81.	Polja pomaka u $x$ -smjeru izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za treći ciklus cikličkog ispitivanja. ....	63
Slika 82.	Polja pomaka u $y$ -smjeru izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za treći ciklus cikličkog ispitivanja. ....	64
Slika 83.	Polja pomaka u $y$ -smjeru izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za treći ciklus cikličkog ispitivanja. ....	64
Slika 84.	Polja izvanravninskih pomaka izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za treći ciklus cikličkog ispitivanja. ....	65
Slika 85.	Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za treći ciklus cikličkog ispitivanja. ....	65
Slika 86.	Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za treći ciklus cikličkog ispitivanja. ....	66

---

Slika 87.	Polja korelacijskih reziduala izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za treći ciklus cikličkog ispitivanja. ....	66
Slika 88.	Polja pomaka u $x$ -smjeru izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za četvrti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	67
Slika 89.	Polja pomaka u $x$ -smjeru izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za četvrti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	67
Slika 90.	Polja pomaka u $y$ -smjeru izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za četvrti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	68
Slika 91.	Polja pomaka u $y$ -smjeru izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za četvrti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	68
Slika 92.	Polja izvanravninskih pomaka izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za četvrti ciklus cikličkog smičnog ispitivanja. ....	69
Slika 93.	Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za četvrti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	69
Slika 94.	Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za četvrti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	70
Slika 95.	Polja korelacijskih reziduala izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za četvrti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	70
Slika 96.	Polja pomaka u $x$ -smjeru izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za peti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	71
Slika 97.	Polja pomaka u $x$ -smjeru izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za peti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	71
Slika 98.	Polja pomaka u $y$ -smjeru izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za peti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	72
Slika 99.	Polja pomaka u $y$ -smjeru izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za peti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	72
Slika 100.	Polja izvanravninskih pomaka izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za peti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	73
Slika 101.	Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za peti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	73
Slika 102.	Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za peti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	74
Slika 103.	Polja korelacijskih reziduala izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za peti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	74

---

Slika 104. Polja pomaka u $x$ -smjeru izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za šesti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	75
Slika 105. Polja pomaka u $x$ -smjeru izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za šesti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	75
Slika 106. Polja pomaka u $y$ -smjeru izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za šesti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	76
Slika 107. Polja pomaka u $y$ -smjeru izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za šesti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	76
Slika 108. Polja izvanravninskih pomaka izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za šesti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	77
Slika 109. Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za šesti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	77
Slika 110. Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za šesti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	78
Slika 111. Polja korelacijskih reziduala izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za šesti ciklus cikličkog ispitivanja. ....	78
Slika 112. Polja pomaka u $x$ -smjeru izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za sedmi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	79
Slika 113. Polja pomaka u $x$ -smjeru izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za sedmi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	79
Slika 114. Polja pomaka u $y$ -smjeru izmjerena pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za sedmi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	80
Slika 115. Polja pomaka u $y$ -smjeru izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za sedmi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	80
Slika 116. Polja izvanravninskih pomaka izmjerena pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za sedmi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	81
Slika 117. Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za sedmi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	81
Slika 118. Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću <i>EikoTwin</i> algoritma za sedmi ciklus cikličkog ispitivanja. ....	82
Slika 119. Polja korelacijskih reziduala izračunata pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za sedmi ciklus cikličkog opterećenja. ....	82
Slika 120. Rekonstruirani volumeni ispitnog uzorka tijekom cikličkog ispitivanja. ....	83

---

Slika 121. Posmične deformacije po elementima izračunate DVC analizom pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za cikličko ispitivanje.....	85
Slika 122. Smične deformacije ograničene najmanjom i najvećom deformacijom od 0,06 i 0,15 za cikličko ispitivanje. ....	86
Slika 123. Korelacijski reziduali izračunati DVC analizom pomoću <i>Correli 3.0</i> algoritma za cikličko ispitivanje. ....	87
Slika 124. Usporedba deformacija izračunatih 2D DIC, stereo DIC te DVC analizom za monotono ispitivanje. ....	88
Slika 125. Presjek ispitnog uzorka na početku i na kraju monotonog ispitivanja. ....	89
Slika 126. Usporedba deformacija izračunatih 2D DIC, stereo DIC te DVC analizom za cikličko ispitivanje. ....	89

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Volumni udjeli konstituenata. ....	4
Tablica 2. Parametri 2D DIC postava. ....	15
Tablica 3. Parametri DIC analize. ....	16
Tablica 4. Parametri 3D DIC postava. ....	16
Tablica 5. Parametri 3D DIC analize. ....	17
Tablica 6. Parametri skeniranja. ....	18
Tablica 7. Akvizicijski parametri. ....	18
Tablica 8. Parametri provedene DVC analize. ....	19
Tablica 9. Mjerne nesigurnosti pomaka za monotono i cikličko ispitivanje. Sve vrijednosti su izražene u milimetrima. ....	51
Tablica 10. Mjerne nesigurnosti deformacija za monotono i cikličko ispitivanje. ....	52
Tablica 11. Usporedba korištenih veličina elemenata i regularizacijskih duljina za provedene analize. Sve vrijednosti izražene su u milimetrima. ....	90



---

**POPIS ENGLESKIH SKRAĆENICA**

DIC	Digital Image Correlation
DVC	Digital Volume Correlation
FE	Finite Element
FRP	Fiber Reinforced Polymer
ROI	Region of Interest
VOI	Volume of Interest
XCT	X-Ray Computed Tomography
WF	Woven Fabric

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$\{\mathbf{b}^i\}$	GL	Rezidualni vektor
$E$	MPa	Modul elastičnosti
$F$	N	Sila
$f(\mathbf{x})$	GL	Početna (referentna) slika
$\nabla f$	GL	Gradijent slike
$g(\mathbf{x})$	GL	Deformirana slika
$\tilde{g}(\mathbf{x})$	GL	Korigirana deformirana slika
$\ell$	px, vx	Veličina konačnog elementa
$l_r$	px, mm, vx	Regularizacijska duljina
$[\mathbf{M}]$	-	Matrica korelacijska analize
$u_n$	px, vx	Čvorni pomaci
$u_x$	px, mm	Pomaci u smjeru osi x
$u_y$	px, mm	Pomaci u smjeru osi y
$u_z$	px, mm	Pomaci u smjeru osi z
$\mathbf{u}(\mathbf{x})$	px, vx	Polje pomaka
$\{\delta\mathbf{u}\}$	px, vx	Inkrementalna promjena pomaka
$\mathbf{x}$	px, vx	Lokacija piksela, voksel
$\tau_{12}$	MPa	Smično naprezanje
$\varepsilon_{12}$	-	Smična deformacija
$\varphi_c(\mathbf{x})$	GL	Polje korelacijskih reziduala
$\Phi_c$	GL	Korelacijska funkcija cilja
$\Psi_n(\mathbf{x})$	-	Funkcije oblika
$\sigma_u$	px, vx	Mjerna nesigurnost pomaka
$\sigma_e$	-	Mjerna nesigurnost deformacija

---

**SAŽETAK**

Izuzetna mehanička svojstva polimera ojačanih vlaknima (*eng. Fiber Reinforced Polymers, FRP*) rezultirala su značajnim porastom njihove primjene, posebice u zahtjevnim inženjerskim konstrukcijama. Zbog kombinacije visoke čvrstoće i krutosti, otpornosti na zamor te male mase postali su temeljni materijali brojnih industrija, poput automobilske, zrakoplovne i svemirske, ali i brodogradnje. Međutim, kako bi se njihovo složeno ponašanje, koje je uzrokovano heterogenom mikrostrukturom, pravilno opisalo potrebno je provesti sveobuhvatna eksperimentalna ispitivanja. U tu svrhu koriste se napredne optičke metode koje u kombinaciji s nerazornim metodama ispitivanja (npr. akustičnom emisijom, termografijom, računalnom tomografijom) daju uvid u cjelovito ponašanje materijala.

U ovom diplomskom radu provedeno je monotono i cikličko ispitivanje vinilester smole ojačane staklenim pletenim vlaknima uslijed jednostavnog smičnog opterećenja koje je naravno primjenom modificiranog Arcan prihvaća. Mehanička karakterizacija promatranog materijala provedena je na leptirastim ispitnim uzorcima debljine 3 mm.

Tijekom ispitivanja korišteni su mono- i stereovizijski optički mjerni postav. Svaki sustav bilježio je slike s jedne strane/površine ispitnog uzorka. Primjenom stereovizijskog sustava omogućeno je praćenje izvanravninskih pomaka temeljem kojih se procijenila greška nastala primjenom ravninskog mjerenja. Zabilježene digitalne slike analizirane su primjenom korelacije digitalne slike (*eng. Digital Image Correlation, DIC*) temeljene na metodi konačnih elemenata (*eng. Finite Element, FE*). Budući da je eksperimentalni protokol proveden *ex-situ*, ispitni uzorak skeniran je u rasterećenom stanju primjenom računalne tomografije X-zraka. Zabilježeni skenovi analizirani su pomoću korelacije digitalnih volumena (*eng. Digital Volume Correlation, DVC*). Za analize su korišteni korelacijski algoritmi *Correli 3.0* te *EikoTwin* temeljeni na globalnom pristupu korelacije digitalne slike. Iz izmjerenih polja pomaka izračunata su polja deformacija te je određen globalni odziv. Globalni pristup korelacije digitalne slike/volumena omogućio je uvid u polja korelacijskih reziduala pomoću kojih se pratila inicijacija i razvoj oštećenja na površini i unutar ispitnog uzorka. Rekonstruirani volumen pružio je uvid u oštećenja nastala u unutrašnjosti ispitnog uzorka. Kako bi se detaljnije pratilo mehanizme oštećenja koja se javljaju pri različitim vrijednostima mehaničkog opterećenja provedeno je cikličko ispitivanje čiji su ciklusi određeni s obzirom na globalni odziv materijala definiran iz monotonog ispitivanja.

---

Ključne riječi: polimeri ojačani vlaknima, smik, korelacija digitalne slike/volumena, stereo korelacija, računalna tomografija

---

**SUMMARY**

Outstanding mechanical properties of fiber reinforced polymers led to a significant increase of their application, especially within the demanding engineering constructions. They became fundamental material for numerous industries, e.g., automotive, aircraft, aerospace, and naval architecture due to their distinguished combination of high strength and stiffness, fatigue resistance and low mass. However, to describe their complex mechanical behavior, caused by corresponding heterogeneous microstructure, it is necessary to conduct comprehensive experimental investigations. For that purpose, advanced optical methods are used simultaneously with the non-destructive testing (e.g., acoustic emission, thermography, computed tomography), providing the insight into the overall behavior of the investigated material.

In this master thesis monotonic and cyclic investigation of vinyl ester resin reinforced with glass woven fabric subjected to simple shear loading is performed. Mechanical load is imposed by modified Arcan fixture. Mechanical characterization of the investigated material is done on 3 mm thick butterfly test specimens.

During the experimental investigation, mono- and stereovision optical setups were employed. Each of the systems captured one side/surface of the test specimen. The application of stereovision setup enabled measurement of out of plane displacements. Based on the out of plane displacements, the error of the planar measurements was evaluated. Acquired digital images were analyzed with Digital Image Correlation based on the finite element method. Moreover, which means that the test specimens were scanned in unloaded state by using X-ray Computed Tomography, i.e., *ex-situ* experimental protocol was applied to determine kinematics over the entire of the observed region using Digital Volume Correlation. The analyses were performed by using correlation algorithms *Correli 3.0* and *EikoTwin* which are based on the global approach. Measured full-field displacements were used to calculate strain fields and to determine global response of the investigated material. Global Digital Image/Volume correlation approaches resulted with correlation residual maps which gave insight into initiation and propagation of surface and bulk damage. The reconstructed volume provided the insight of the damage origin inside the test specimen. In order to follow the evolution of damage mechanism, which develops at different load states, cyclic investigation was conducted. Each cycle was determined regarding the global response of the investigated material determined from the monotonic test.

Key words: fiber reinforced polymers, shear, digital image/volume correlation, stereo correlation, computed tomography

## 1. Uvod

Napredak inženjerskih konstrukcija i komponenti sve više naglašava potrebu za razvojem materijala s boljim mehaničkim svojstvima. Razlog tomu je ograničenost mehaničkih svojstava konvencionalnih inženjerskih materijala kao i zahtjev za što manjom masom. Jedno od potencijalnih rješenja navedenog ograničenja su polimeri ojačani vlaknima (eng. *Fiber reinforced polymers*, FRP). Mogućnost modificiranja njihove mikrostrukture rezultira optimiranim mehaničkim svojstvima s obzirom na opterećenje kojem su izloženi. Visoka čvrstoća i krutost pri manjoj masi temeljne su prednosti navedene skupine materijala [1]. Međutim, uslijed heterogenosti mikrostrukture ovih materijala, ograničena je predvidljivost njihovog ponašanja uslijed različitih režima opterećenja. Budući da su sačinjeni od više konstituenata, oštećenja se mogu inicirati te propagirati na površini te unutar materijala. Mogući su različiti mehanizmi oštećenja, poput pucanja vlakana ili matrice, delaminacije slojeva, izvlačenja vlakana ili odvajanja vlakana i matrice [2]. Da bi se na ispravan način provela karakterizacija ovih materijala potrebno je provesti eksperimentalna ispitivanja te analizirati dobivene podatke. Jedan od načina dobivanja potrebnih podataka je korištenjem optičkih mjernih metoda. Tijekom provođenja eksperimenta bilježe se slike koje se potom analiziraju. Osim bilježenja slika provode se i skeniranja ispitnog uzorka primjermom računalne tomografije kako bi se rekonstruirao promatrani volumen [3]. Za analizu zabilježenih slika najčešće se koriste korelacijske metode. Tako se korelacijom digitalne slike (eng. *Digital Image Correlation*, DIC) mogu mjeriti polja pomaka na površini ispitnog uzorka, stereo korelacijom mogu se mjeriti i izvanravninski pomaci uzorka dok se korelacijom digitalnih volumena (eng. *Digital Volume Correlation*, DVC) dobiva uvid u ponašanje materijala unutar mjernog objekta. Navedene korelacijske metode omogućuju pravilnu i detaljnu analizu ponašanja promatranog materijala te detektiranje mehanizama oštećenja kako na površini tako i u unutrašnjosti materijala.

U ovom diplomskom radu provedena su dva *ex-situ* eksperimentalna protokola. Monotono i cikličko ispitivanje omogućili su mehaničku karakterizaciju promatrane vinilester smole ojačane pletenim staklenim vlaknima. Tijekom provođenja eksperimenta registrirane su slike s obje strane ispitnog uzorka. Slike prednje strane uzorka zabilježene su s 2D DIC optičkim postavom dok je slike stražnje strane bilježio 3D DIC optički postav, odnosno stereo optički postav. Osim toga, registriranjem 3D slika (tj. CT skenova) ispitnog uzorka dobivene su

informacije o mehaničkom odzivu u unutrašnjosti materijala. Ispitni uzorak skeniran je korištenjem računalne tomografije rendgenskim zrakama (eng. *X-Ray Computed Tomography*, XCT). Svi skenovi zabilježeni su u neopterećenom stanju nakon provedenih ciklusa mehaničkog opterećenja.

Analiza zabilježenih 2D DIC slika provedena je korištenjem algoritma *Correli 3.0* koji je temeljen na globalnom pristupu korelaciji te implementiran u programski paket *MATLAB*. Zabilježene 3D DIC slike analizirane su u pomoću *EikoTwin DIC* algoritma, razvijenom od strane tvrtke *EikoSim* također temeljenom na globalnom pristupu korelaciji. Rekonstruirani volumeni ispitnog uzorka analizirani su također korištenjem algoritma *Correli 3.0*.

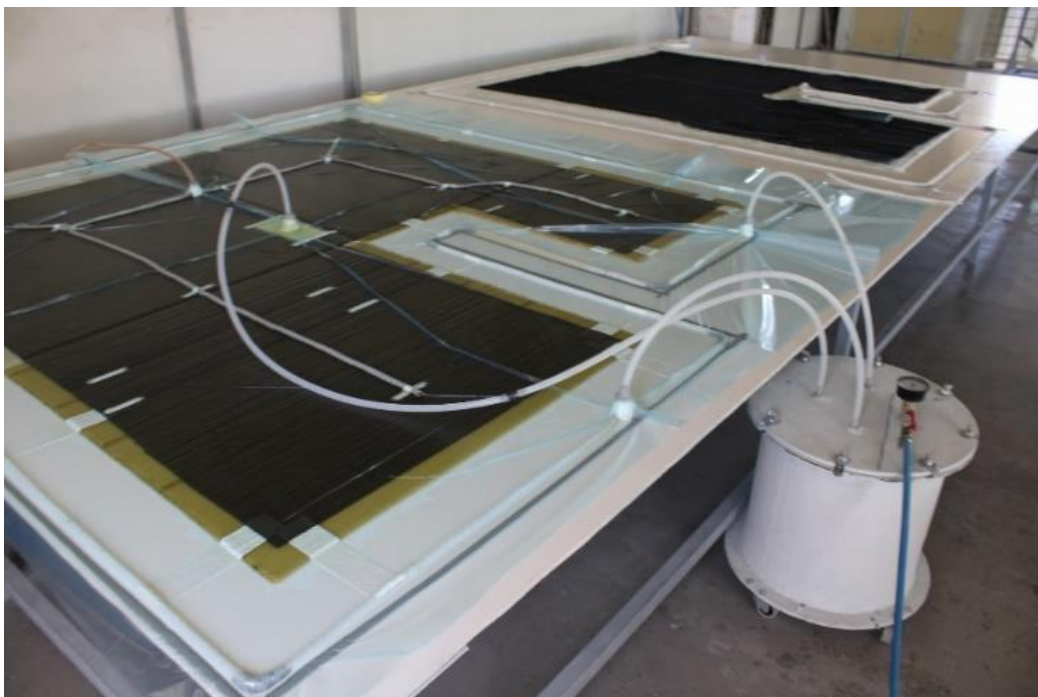
Provedene analize omogućile su računanje potpunih polja pomaka i deformacija. Zahvaljujući korištenju korelacijskih metoda temeljenih na globalnom pristupu dobivena su i polja korelacijskih reziduala koja olakšavaju detektiranje nastalih oštećenja. Nakon analize zabilježenih 2D i stereo slika ispitnog uzorka uspoređeno je globalno ponašanje materijala primjenom dva različita izvora informacija. Naposljetku analizom rekonstruiranih volumena određene su razine zaostalih deformacija te mehanizmi oštećenja unutar mikrostrukture promatranog volumena.



## 2. Polimeri ojačani vlaknima

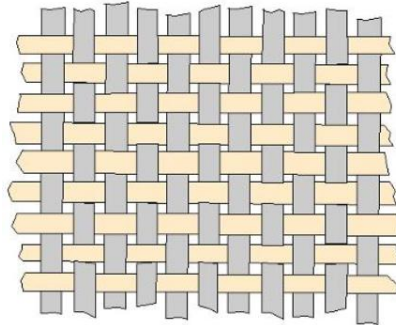
Suvremena industrija, primjerice zrakoplovna ili svemirska, postavlja sve strože kriterije za korištene materijale. Među njima ističu se potreba za visokom čvrstoćom, visokom krutošću, malom masom te visokom kemijskom otpornošću. Kako bi se zahtijevani kriteriji ispunili potrebno je razviti napredne materijale odgovarajućih mehaničkih karakteristika. Zahvaljujući svojim mehaničkim svojstvima, polimeri ojačani vlaknima (eng. *Fiber Reinforced Polymers*, FRP), iskazali su se kao optimalna zamjena za konvencionalne inženjerske materijale. Budući da im se mehanička svojstva mogu podesiti ovisno o primjeni te vrsti opterećenja, većinom se koriste u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji te brodogradnji [1].

U ovom radu za ispitivanje je korištena vinilester smola ojačana pletenim staklenim vlaknima. Promatrani kompozitni materijal dobiven je postupkom vakuumske infuzije, prema Slika 1. Proces izrade navedenog kompozita sastoji se od nekoliko koraka. U prvom koraku ojačalo, tj. pletena vlakna, postavljaju se u kalup nakon čega se isti zatvara. U narednom koraku, se iz zatvorenog kalupa izvlači zrak te ubrizgava matrica, tj. vinilester smola. Prednosti navedenog postupka su bolji omjer vlakana i matrice, manji udio neiskorištene matrice, čistiji postupak u odnosu na tradicionalnu proizvodnju kompozitnih materijala i izbjegavanje poroznosti ukoliko se postupak provede na odgovarajući način. S druge strane nedostaci su složeni proizvodni postav i izvođenja postupka, mogućnost postojanja lokaliteta u koje nije impregnirana smola i korištenje smola niže viskoznosti kako bi se olakšalo ubrizgavanje [4].



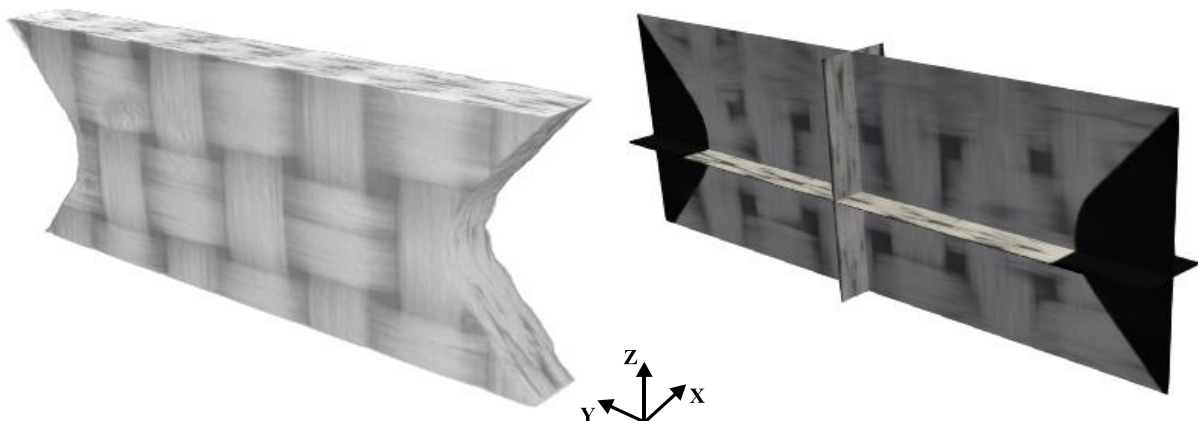
**Slika 1. Proizvodni postupak vakuumske infuzije.**

Staklena vlakna su u svakom sloju pletena u uzdužnom i poprečnom smjeru [ $0^\circ/90^\circ$ ] (eng. *Woven fabric*, WF) kao što je prikazano na Slika 2. Broj slojeva u ispitnom uzorku je 7, dok je debljina svakog sloja 0,44 mm.



**Slika 2. Shematski prikaz pletenih vlakana.**

Prije provedbe mehaničkih ispitivanja ispitni uzorak je skeniran. Rekonstruirani volumen promatrane zone interesa prikazan je na Slika 3. Osim toga, prezentirani su i središnji presjeci svake ravnine na kojima je vidljiv raspored staklenih pletenih vlakana.



**Slika 3. Rekonstruirani volumen (lijevo) i središnji presjeci ravnina s vidljivom mikrostrukturom ispitnog uzorka (desno).**

Na temelju rekonstruiranog volumena određeni su volumni udjeli konstituenata i prikazani u Tablica 1. Dominantan konstituent je stakleno vlakno sa srednjim volumnim udjelom od približno 88%.

**Tablica 1. Volumni udjeli konstituenata.**

	Volumni udio
Vinilester smola	11,9%
Staklena vlakna	88,1%

Budući da su korištene kompozitne ploče izrađene vakumskom infuzijom, udio mjehurića zaostalog zraka je zanemariv.

### 3. Korelacija digitalne slike/volumena

Korelacija digitalne slike je inovativna beskontaktna optička metoda za mjerenje cijelog polja pomaka i deformacija. Zahvaljujući svojoj jednostavnoj i isplativoj upotrebi, ima prednost u odnosu na slične optičke metode, poput interferometrije točaka te videoekstenzometra. DIC te DVC metode rade na način usporedbe uzastopnih slika, tj. volumena, tijekom procesa deformiranja ispitnog uzorka. Iz tog razloga, potrebno je osigurati stohastički i jedinstveni raspored intenziteta piksela na promatranj površini, tj. na promatranom volumenu [5].

#### 3.1. Globalni pristup korelaciji digitalne slike/volumena

Osnovni koncept korelacije digitalne slike temelji se na minimiziranju korelacijskih reziduala, tj. poklapanju rastera promatranih površina u referentnoj i deformiranoj konfiguraciji. Mjerenje cijelog polja pomaka vrši se korelacijom između referentne slike  $f(\mathbf{x})$  i deformirane slike  $g(\mathbf{x})$ . Zabilježene slike su dvodimenzionalne ili trodimenzionalne matrice sive nijanse boja, gdje  $\mathbf{x}$  označava lokaciju piksela odnosno voxela. Jednadžba (3.1) predstavlja zakon očuvanja optičkog toka te vezu između referentne i deformirane slike:

$$f(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})), \quad (3.1)$$

gdje  $\mathbf{u}$  predstavlja polje pomaka. U ovom radu korišten je globalni DIC pristup temeljen na metodi konačnih elemenata (eng. *Finite Element*, FE). Na promatranom području interesa (eng. *Region of Interest*, ROI)  $\Phi_c^2$  predstavlja sumu kvadrata korelacijskih reziduala:

$$\Phi_c^2 = \sum_{\text{ROI}} \varphi_c^2(\mathbf{x}), \quad (3.2)$$

gdje se korelacijski reziduali,  $\varphi_c$  računaju kao razlika između referentne i korigirane deformirane slike:

$$\varphi_c(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})). \quad (3.3)$$

Globalni DIC pristup pretpostavlja kontinuiranost polja pomaka na cijelom ROI-u:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \sum_n u_n \boldsymbol{\psi}_n(\mathbf{x}), \quad (3.4)$$

gdje  $\boldsymbol{\psi}_n$  predstavlja odabrane funkcije oblika polja pomaka povezane s diskretizacijom konačnih elemenata, a  $u_n$  su pripadajući čvorni pomaci. Korelacijska procedura sastoji se od minimiziranja  $\Phi_c^2$  u odnosu na sve nepoznate stupnjeve slobode gibanja  $u_n$ , sadržane u vektoru stupcu  $\{\mathbf{u}\}$ . Korištenjem Gauss-Newtonove sheme, iterativno se rješava sustav linearnih jednadžbi kako bi se odredile inkrementalne korekcije čvornih pomaka  $\{\delta\mathbf{u}\}$ :

$$[\mathbf{M}]\{\delta\mathbf{u}\} = \{\mathbf{b}^i\}, \quad (3.5)$$

gdje je  $[\mathbf{M}]$  Hessian DIC matrica koja sadrži funkcije oblika  $\psi_n$  i gradijente slika  $\nabla f(\mathbf{x})$ , čime se dobije

$$M_{mn} = \sum_{\text{ROI}} (\nabla f(\mathbf{x}) \cdot \psi_m(\mathbf{x})) (\nabla f(\mathbf{x}) \cdot \psi_n(\mathbf{x})). \quad (3.6)$$

Varijabla  $\{\mathbf{b}^i\}$  je vektor reziduala pri iteraciji  $i$  koji sadrži trenutne rezidualne slike

$$b_m^i = \sum_{\text{ROI}} (f(\mathbf{x}) - \tilde{g}^i(\mathbf{x})) (\nabla f(\mathbf{x}) \cdot \psi_m(\mathbf{x})), \quad (3.7)$$

gdje je

$$\tilde{g}^i(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x} + \mathbf{u}^i(\mathbf{x})), \quad (3.8)$$

što predstavlja korigiranu deformiranu sliku, tj. sliku u deformiranoj konfiguraciji koja je korigirana trenutnom procjenom  $\mathbf{u}^i$  polja pomaka [6]. Isti izrazi vrijede i za korelaciju digitalnih volumena uz napomenu da se sada promatra volumen interesa (eng. *Volume of Interest*, VOI). Prilikom analize slika dobivenih 2D i 3D optičkim postavom korišten je algoritam *Correli 3.0* koji je temeljen na prethodno opisanom globalnom pristupu korelaciji digitalne slike/volumena. Algoritam je implementiran i korišten u programskom paketu *MATLAB*.

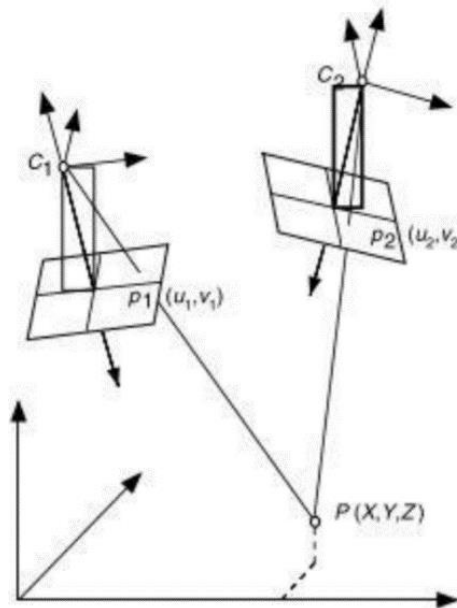
### 3.2. Stereo korelacija

2D DIC metoda na jednostavan način mjeri cijelo polje pomaka, ali postoje i određeni nedostaci prilikom korištenja ove metode. S obzirom da se ispitni uzorak promatra samo jednom kamerom koja mora biti pravilno postavljena, tj. senzor kamere i površina ispitnog uzorka moraju biti paralelni. Ovim pristupom nije moguće mjeriti izvanravninske pomake. Stoga, ukoliko prilikom mjerenja polja pomaka 2D DIC metodom dođe do izvanravninskih pomaka ispitnog uzorka doći će do uvećanja ili smanjenja fizikalne veličine piksela što će uzrokovati pogreške u mjerenju polja pomaka [7].

Prethodno opisani problem koji se javlja primjenom 2D DIC metode izbjegava se korištenjem postupka stereo korelacije, tj. stereo optičkog postava. Stereo korelacija ili 3D DIC omogućava mjerenje i izvanravninskih pomaka. Korištenjem minimalno dviju točaka gledišta moguće je rekonstruiranje 3D scene. Slika 4. prikazuje princip rada stereo korelacije. Točka  $P$  predstavlja poziciju odabrane točke na mjernom objektu, dok su  $p_1$  i  $p_2$  odgovarajuće stereo

projekcije.  $C_1$  i  $C_2$  označavaju optička središta kamera. Poziciju točke  $P$  moguće je izračunati u dva slučaja [7]:

- identifikacijom točaka  $p_1$  i  $p_2$  što je poznato pod nazivom uspoređivanje stereo slika (eng. *stereo image matching*) i
- izračunom linija  $C_1p_1$  i  $C_2p_2$  koje se sijeku u točki  $P$ . Kako bi to bilo moguće potrebno je znati intrinzične i ekstrinzične parametre kamera.



**Slika 4. Princip rada stereo korelacije [7].**

Stereo korelacija je provedena korištenjem dviju optičkih kamera, a mjerenje cijelog polja pomaka provedeno je pomoću *EikoTwin DIC* algoritma.

### 3.2.1. *EikoTwin*

Koncept digitalnog blizanca (eng. *digital twin*) primjenjuje se prilikom proračunavanja konstrukcija u strojarstvu. Nakon provođenja eksperimentalnog ispitivanja mehaničkih svojstava promatranog materijala nužna je provjera vjerodostojnosti dobivenih rezultata odziva materijala. *Digital twin* predstavljen je u obliku *software*-a i u njega je potrebno unijeti podatke dobivene mjerenjem te teorijski model komponente. Podaci mjereni u okviru ovog rada zabilježeni su u obliku slika, koje su dobivene korištenjem dviju kamera. Kako bi se analizirale slike i mreže konačnih elemenata korišten je korelacijski algoritam *EikoTwin* koji je razvila tvrtka *EikoSim*. Postoji nekoliko prednosti prilikom korištenja kamera unutar *digital twin*-a, a to su:

- moguća je usporedba rezultata dobivenih numeričkim simulacijama i ispitivanjem cijele površine promatrane komponente,

b) moguće je izmjenjivati ulazne podatke modela tijekom cijelog stadija ispitivanja.

Kako bi se analizirali podaci dobiveni provedenim eksperimentom u ovom radu korišten je globalni stereo korelacijski algoritam *EikoTwin DIC*. Prije provođenja analize u navedenom *software*-u potrebno je provesti kalibraciju kamera. Kalibracija se provodi na temelju preddefinirane geometrije CAD modela, odnosno na mreži konačnih elemenata. Pravilna kalibracija osigurava pouzdano analiziranje slika čiji su rezultat cijelo polje pomaka i deformacija na mreži konačnih elemenata [7].

Postupak kalibracije je neophodan kako bi se pravilno provela analiza eksperimentalnih podataka. Prilikom kalibriranja *software*-a na temelju preddefinirane geometrije CAD modela nije potrebno koristiti kalibracijski objekt što znatno olakšava samu kalibraciju. Proces kalibracije sastoji se od određivanja intrinzičnih, odnosno unutarnjih i ekstrinzičnih, vanjskih parametara. Unutarnji parametri kamere su središnja točka, koeficijent distorzije leće i žarišna duljina dok su vanjski kut i pozicija kamere definirane stereo optičkim postavom. Dodatna prednost ovog načina kalibracije je u tome što se ona vrši na referentnim slikama (tj. slikama zabilježenim u neopterećenom stanju) provedenog mehaničkog ispitivanja [8].

Registriranjem minimalno jedne slike svakom kamerom započinje proces kalibracije. Nakon toga potrebno je odabrati najmanje šest točaka na teoretskoj površini  $\mathbf{X}(u, v)$  te odgovarajuće točke na slikama s kamera  $(x_i^{l,r}, y_i^{l,r})$ . Trodimenzionalne koordinate  $(X_i, Y_i, Z_i)$  odabiru se na CAD modelu promatranog objekta. Sustav procjenjuje matrice transformacije gdje je  $\tilde{\mathbf{M}}_r$  i  $\tilde{\mathbf{M}}_l$  prva procjena desne i lijeve matrice transformacije. Slijedeći korak je projiciranje teorijske površine na lijevu i desnu sliku na temelju prethodnih matrica. Korištenjem integriranog korelacijskog algoritma ažuriraju se parametri matrica  $m_{ij}$ . Konvergencijom postupka korelacije dobivene su konačne vrijednosti parametara  $m_{ij}$  [8].

Izraz napisan u nastavku daje odnose između prostornih koordinata i pripadajućih projekcija:

$$\begin{pmatrix} l_l x_l \\ l_l y_l \\ l_l \end{pmatrix} = \mathbf{M}_l \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \text{ i } \begin{pmatrix} l_r x_r \\ l_r y_r \\ l_r \end{pmatrix} = \mathbf{M}_r \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.9)$$

Koordinate piksela na lijevoj slici su označene s  $x_l$  i  $y_l$ , a na desnoj slici s  $x_r$  i  $y_r$ . Faktori skaliranja označeni su kao  $l_l$  i  $l_r$  dok su  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  homogene koordinate točke unutar CAD geometrije. Opisani sustav sadrži 24 nepoznanice. Korištenje kinematskih jednadžbi

omogućava direktan izračun komponenti matrice  $m_{ij}$ . Koordinatna osjetljivost zapisana u ovisnosti o parametrima matrice  $m_{ij}$  glasi:

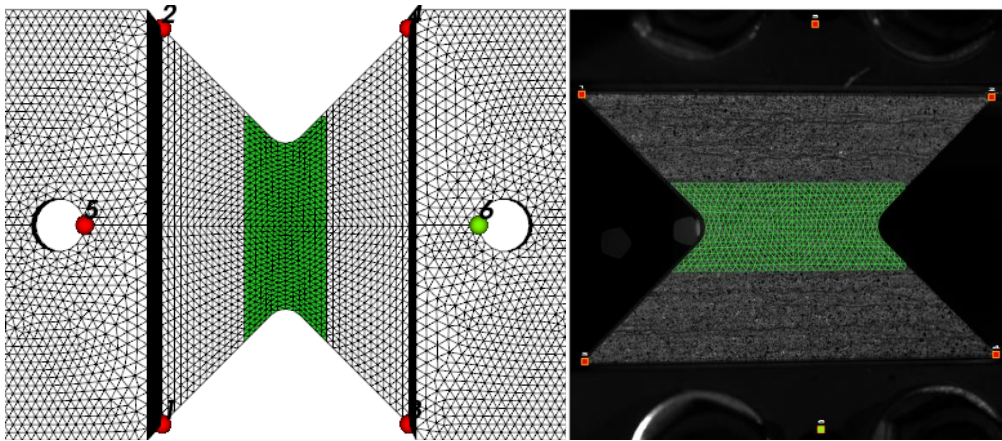
$$d\mathbf{x}_{l,r} = d\mathbf{x}_{l,r}(\tilde{m}_{ij}) + \frac{\partial d\mathbf{x}_{l,r}}{\partial \tilde{m}_{ij}} dm_{ij}. \quad (3.10)$$

Izraz  $d\mathbf{x}_{l,r}$  označava prividne pomake u pojedinim slikama uzrokovane promjenom komponente matrice transformacije. Slike koje su zabilježene svakom od kamera označavaju se kao  $f(\mathbf{x}_l)$  i  $g(\mathbf{x}_r)$ . Slika se prikazuje kao matrica u kojoj svaki član označava piksel s koordinatom  $x$  i ima svoju vlastitu vrijednost sive skale boja. Zakon očuvanja optičkog toka zapisuje se kao [8]:

$$f(\mathbf{x}_l + d\mathbf{x}_l) = g(\mathbf{x}_r + d\mathbf{x}_r). \quad (3.11)$$

Ova metoda ažurira slike u svakoj iteraciji za vrijeme procesa minimiziranja za razliku od ostalih DIC metoda.

Slika 5. prikazuje način kalibriranja *EikoTwin* algoritma. Budući da se radi o kalibraciji temeljenoj na preddefiniranoj CAD geometriji, kako je prethodno opisano, promatrani objekt koristi se i za kalibraciju. Naime, na CAD modelu koji je diskretiziran mrežom konačnih elemenata potrebno je odabrati 6 karakterističnih točaka te potom te iste točke označiti i na obje kamere. Zbog jednostavnijeg prikaza na slici se vidi slika samo jedne kamere.

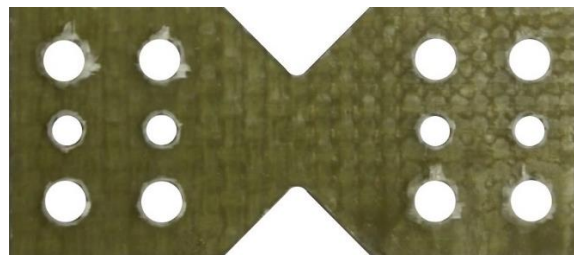


Slika 5. Kalibracija *EikoTwin* stereo korelacijskog algoritma.

## 4. Eksperimentalno ispitivanje

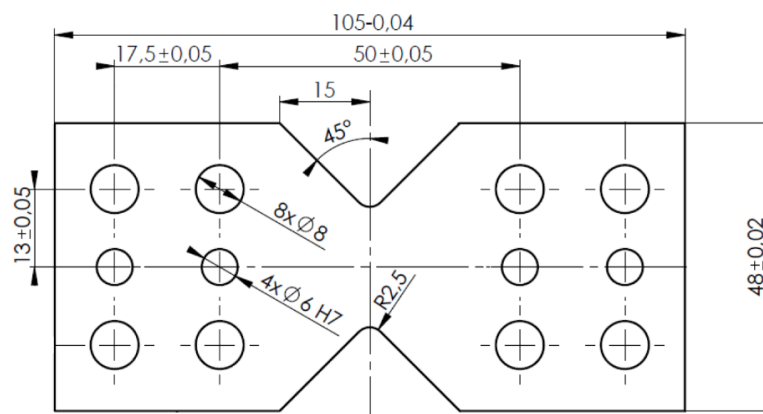
*Ex-situ* eksperimentalno ispitivanje je primjeren i jednostavan način provođenja cikličkih ispitivanja primjenom XCT skenera posebice kod složenih mehaničkih opterećenja. Provođenje ovakvog eksperimenta sastoji se od mehaničkog opterećivanja uzorka do određene, prethodno definirane, razine te rasterećenja uzorka. Tijekom cjelokupnog procesa opterećivanja i rasterećivanja bilježe se slike ispitnog uzorka. Nakon toga slijedi skeniranje ispitnog uzorka u CT uređaju kako bi se zabilježile 2D projekcije (tj. radiografi) te rekonstruirao 3D volumen. Navedeni koraci ponavljaju se nekoliko puta, odnosno do loma uzorka kod kojeg je zabilježen „*post mortem*“ sken [9]. U nastavku su prvo predstavljani uzorci na kojima su provedena predložena ispitivanja, potom su predstavljeni provedeni eksperimentalni protokoli nakon čega slijede primijenjeni mehanički i optički postav te zaključno proces provođenja skeniranja ispitnog uzorka.

Korišteni ispitni uzorci dobiveni su vodenim rezanjem (eng. *water jet*) iz kompozitne ploče debljine 3 mm. Slika 6. prikazuje ispitni uzorak.



**Slika 6. Leptirasti ispitni uzorak.**

Slika 7. prikazuje dimenzije ispitnog uzorka. Radi osiguranja koncentracije posmičnog napreznja u promatranom području konstruiran je V-zarez širine 30 mm pod kutom 45° od središnje osi uzorka. Na uzorku je izrađeno 8 provrta za vijke kojima se uzorak steže u modificirani Arcan prihvat i 4 provrta za zatike koji služe za pozicioniranje.

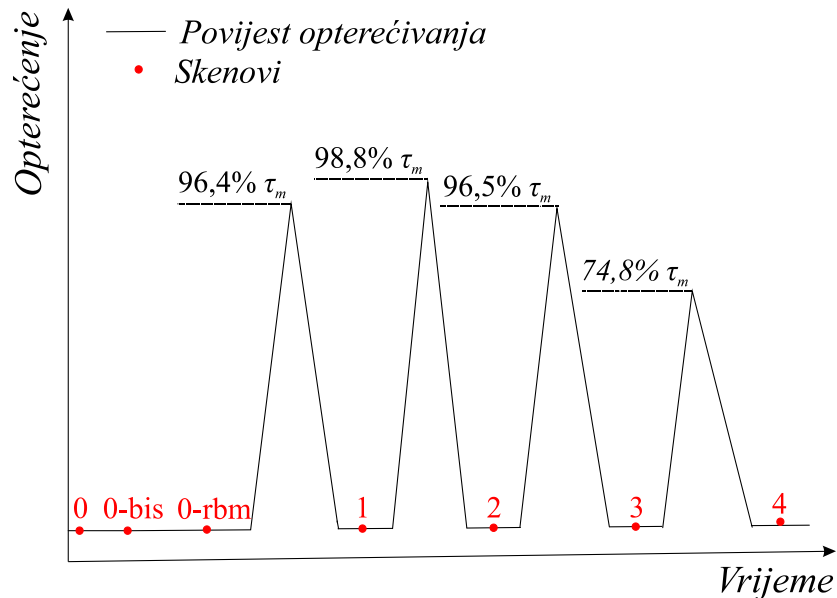


**Slika 7. Dimenzije leptirastog ispitnog uzorka.**



#### 4.1. *Ex-situ* eksperimentalni protokol smičnog ispitivanja s monotonim opterećenjem

Kako bi se odredila ciljana opterećenja svakog ciklusa cikličkog ispitivanja potrebno je prvo provesti monotono ispitivanje. Slika 8. prikazuje provedeni eksperimentalni protokol smičnog ispitivanja s monotonim opterećenjem. Nakon provedenog monotonog ispitivanja definirani su potrebni parametri materijala kako bi se ispravno provelo cikličko ispitivanje.



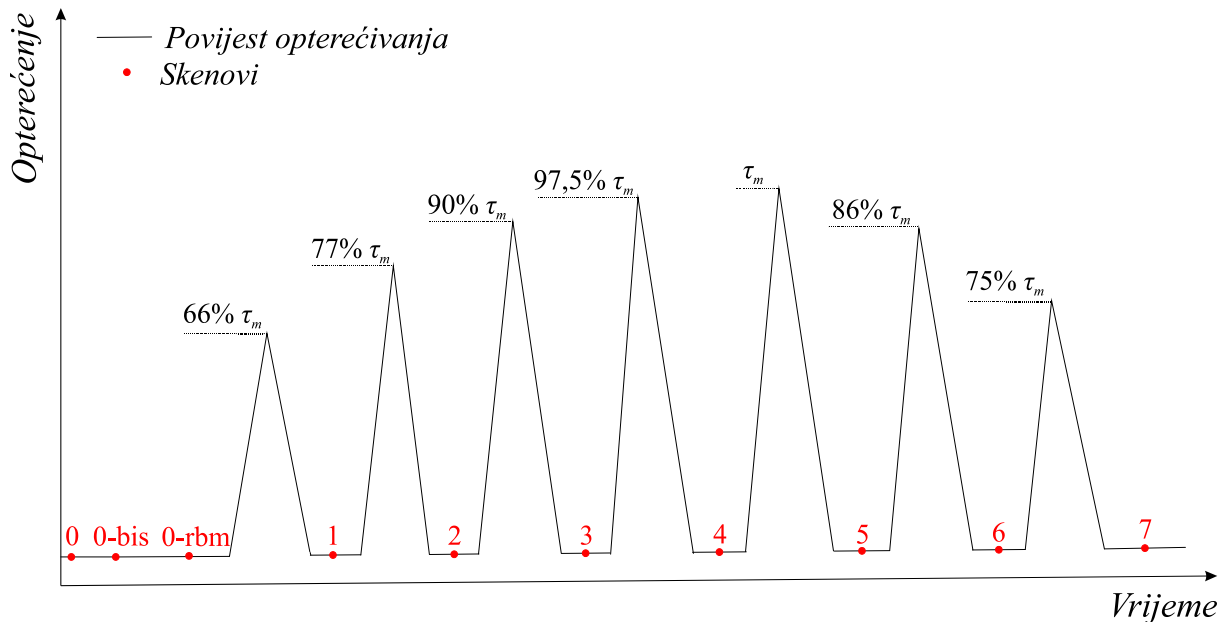
**Slika 8.** *Ex-situ* eksperimentalni protokol smičnog ispitivanja s monotonim opterećenjem.

Prema Slika 8. vidi se kako su zabilježena četiri skena ispitnog uzorka uslijed narinutog mehaničkog opterećenja, dok su prije opterećivanja ispitnog uzorka zabilježeni skenovi 0, 0-bis i 0-rbm. Sken 0 predstavlja referentni sken, sken 0-bis je ponovljeni referentni sken dok sken 0-rbm (eng. *rigid body motion*, rbm) [10] predstavlja sken objekta koji je izvađen te ponovno vraćen u CT skener. Navedeni skenovi snimljeni su kako bi se mogla odrediti mjerna nesigurnost DVC mjerne metode. Tijekom prvog ciklusa ispitni uzorak opterećen je mehaničkim opterećenjem koje izaziva naprezanje od 96,4% iznosa smične čvrstoće. Tijekom drugog ciklusa uzorak je opterećen gotovo maksimalnim mogućim opterećenjem te je ostvareno naprezanje u iznosu od 98,8% smične čvrstoće. U trećem ciklusu došlo je do pojave znatnih oštećenja te je iznos opterećenja počeo padati što je rezultiralo naprezanjem od 96,5% smične čvrstoće. Posljednji ciklus je rezultirao značajno manjim opterećenjem zbog izraženog oštećenja unutar uzorka što je rezultiralo naprezanjem od 74,8% smične čvrstoće.

#### 4.2. *Ex-situ* eksperimentalni protokol smičnog ispitivanja s cikličkim opterećenjem

Nakon provedenog monotonog ispitivanja definirani su iznosi naprezanja na kojima je zaustavljeno opterećivanje te je provedeno skeniranje ispitnog uzorka. Kriterij za određivanje

iznosa željenog opterećenja bila je pojava nelinearnosti na krivulji opterećenja. Pojava nelinearnosti na navedenoj krivulji uzrokovana je pojavom oštećenja u ispitnom uzorku. Nakon pojave prve nelinearnosti do smične čvrstoće napravljena su tri skena kako bi se moglo pravovremeno i detaljno analizirati nastala oštećenja. Slika 9. prikazuje provedeni *ex-situ* eksperimentalni protokol cikličkog ispitivanja.



**Slika 9.** *Ex-situ* eksperimentalni protokol smičnog ispitivanja s cikličkim opterećenjem.

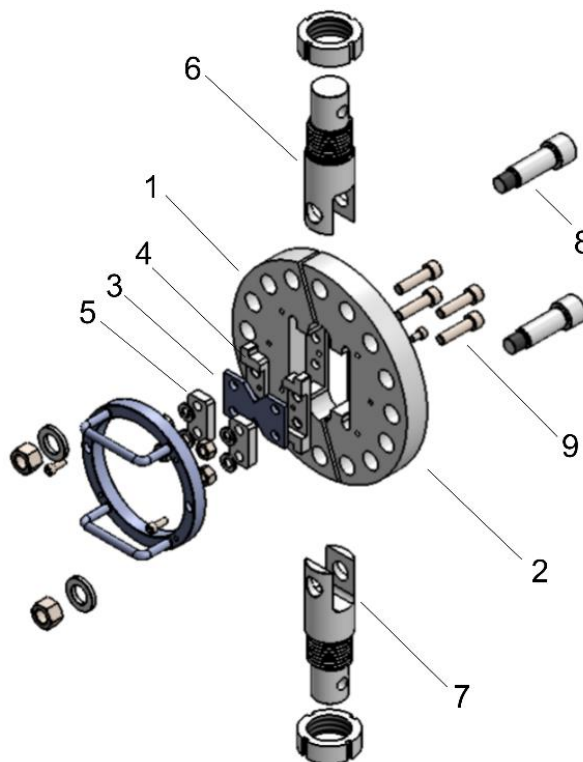
Tijekom cikličkog ispitivanja ispitni uzorak skeniran je u deset navrata. Kao i u monotonom ispitivanju provedena su tri skeniranja prije opterećenja uzorka (tj. zabilježeni su skenovi 0, 0-bis i 0-rbm). Značenje skenova 0-bis i 0-rbm opisano je u poglavlju 4.1. Prvo skeniranje provedeno je nakon pojave prve nelinearnosti. Ispitni uzorak dosegnuo je naprezanje od 66% smične čvrstoće te rasterećen i potom skeniran. Drugi sken zabilježen je nakon postizanja naprezanja od 77% smične čvrstoće. Prije postizanja smične čvrstoće uzorka zabilježeni su skenovi 3 i 4 nakon naprezanja ispitnog uzorka u iznosu od 90% i 97,5%. Sken 5 zabilježen je nakon dostizanja naprezanja koje odgovara smičnoj čvrstoći. Nakon popuštanja uzorka zabilježeni su skenovi 6 i 7 kako bi se promotriale promjene do kojih je došlo nakon maksimalnog iznosa opterećenja.

### 4.3. Mehanički postav

Mehanički postav čine kvazi-statička elektromehanička kidalica *Messphysik* Beta 50-5 te modificirani Arcan prihvat. Arcan prihvat korišten je kako bi se narinulo smično opterećenje. Brzina opterećivanja iznosila je 0,24 mm/min.

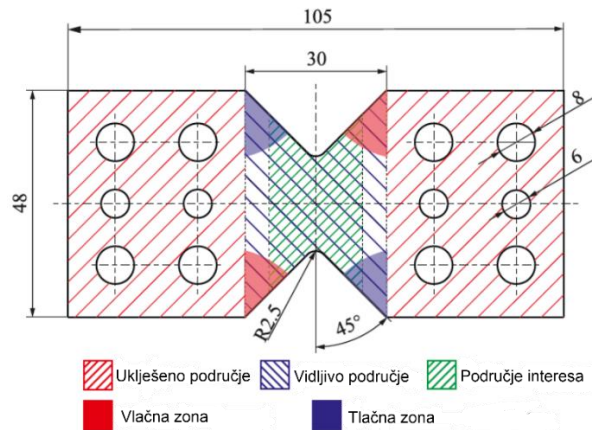
### 4.3.1. Arcan prihvati

Slika 10. prikazuje sve dijelove Arcan prihvata. Brojevima su označeni najbitniji dijelovi. Lijeva prirubnica (1) prihvaćena je na nepomični prihvati (7) kidalice zatikom (8). Također, desna prirubnica (2) prihvaćena je na pomični prihvat (6) kidalice zatikom. Ispitni uzorak (3) pozicionira se u unutarnju pločicu (4) te osigurava tlačnim prihvatom (5). Ispitni uzorci stegnuti su vijcima (9). Generiranjem aktivne sile u desnoj prirubnici (2) javlja se reaktivna sila u lijevoj prirubnici (1). Narinute sile uzorkuju smično opterećenje ispitnog uzorka u promatranom području interesa (tj. između dva V zarez).



**Slika 10. Shematski prikaz modificiranog Arcan prihvat [11].**

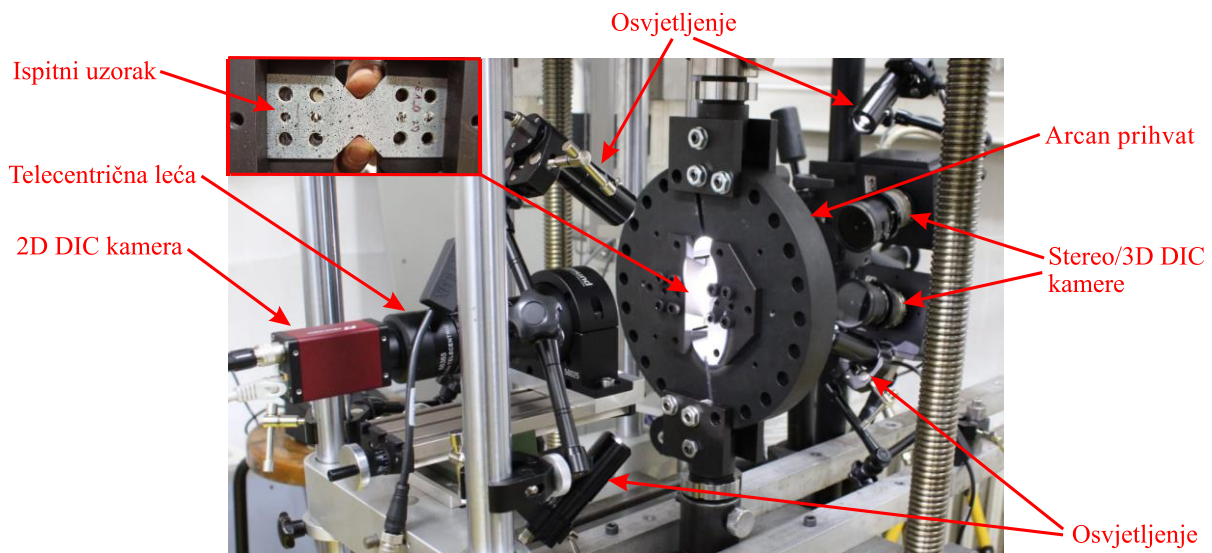
Površina promatranog ispitnog uzorka na Arcan prihvat može se podijeliti u nekoliko područja. Prema Slika 11. uklješteno područje označeno je crvenom šrafurom, koje nije vidljivo optičkom postavu. Područje vidljivo optičkom postavu šrafirano je plavom bojom. Unutar vidljivog područja izabrano područje interesa šrafirano je zelenom bojom. Narinuto smično opterećenje uzrokuje vlačne i tlačne zone koje su asimetrične s obzirom na simetrale ispitnog uzorka. Tako se vlačne zone, označene crvenom bojom, javljaju u gornjem desnom i donjem lijevom području, a tlačne, plava boja, u gornjem lijevom i donjem desnom području.



Slika 11. Ispitni uzorak podijeljen na područja [12].

#### 4.4. Optički postav

Optički postav provedenog eksperimentalnog mjerenja prikazan je na Slika 12. Prednja strana uzorka promatrana je primjenom jedne kamere *Manta G145BASG* na koju je postavljena telecentrična leća. Naime, primjenom telecentrične leće osigurana je oštrina slike u slučaju izvanravninskih pomaka ispitnog uzorka. Slike stražnje strane uzorka bilježile su dvije kamere *Dalsa Falcon 4M60* pod međusobnim kutom od  $25^\circ$ . Tako postavljene kamere omogućuju praćenje izvanravninskih pomaka te korištenje stereo korelacijskog algoritma za daljnju analizu.



Slika 12. Optički postav.

U nastavku su detaljnije opisani optički postavi korišteni u ovom eksperimentu.

##### 4.4.1. 2D DIC postav

Kamera *Manta G145BASG* bilježila je slike prednje površine ispitnog uzorka. Kao što se vidi na Slika 12. na kameru je postavljena telecentrična leća koja osigurava oštrinu slika. Otvor

blende na kameri iznosio je  $f/6$ . Udaljenost od promatranog objekta je 145 mm. Brzina zabilježavanja slika iznosila je 1 sliku po sekundi (1 fps – *frame per second*). Tablica 2. prikazuje sve parametre 2D DIC postava. Kako bi kontrast na slikama bio zadovoljavajući nanesen je stohastički crno-bijeli raster na ispitne uzorke. Slika 13. prikazuje ispitni uzorak na koji je nanesen crno-bijeli stohastički uzorak. Osim stohastičkog uzorka vidljiva je i crvena linija koja označava stranu uzorka koja pri svakom ciklusu ide u nepomični oslonac kako u Arcan prihvatu tako i u CT skeneru. Također, vidljiva je i oznaka strane koja je promatrana 2D DIC postavom.



**Slika 13. Ispitni uzorak s nanesenim stohastičkim crno-bijelim rasterom.**

**Tablica 2. Parametri 2D DIC postava.**

Kamera	Manta G145BASG
Definicija	1388 × 1038
Amplituda sive skale	8 bit
Leća	0.25X – 0.5X VariMagTL™
Otvor	$f/6$
Vidno polje	30,8 × 26,67 mm
Mjerilo	0,026 mm/px
Udaljenost	145 mm
Brzina slikanja	1 fps
Tehnika nanošenja uzorka	Stohastički crno bijeli raster

Osim parametara 2D DIC postava u Tablica 3. definirani su parametri provedene 2D DIC analize. Korišten je korelacijski algoritam *Correli 3.0* temeljen na globalnom pristupu korelacije digitalne slike. Veličina elemenata određena je pomoću analize mjerne nesigurnosti koja je prikazana u slijedećem poglavlju.

**Tablica 3. Parametri DIC analize.**

DIC Software	Correli 3.0
Veličina elementa	24 px
Funkcija oblika	Linearna (T3)
Mreža	Nestrukturirana
Kriterij poklapanja	Kazneni zbroj kvadrata razlika
Regularizacija	48 px
Interpolacija	Kubična

Slika 12. prikazuje i osvjetljenje koje je postavljeno pod kutom od  $\approx 45^\circ$  iznad i ispod kamere kako bi cijelo promatrano područje bilo jednoliko osvjetljeno.

#### 4.4.2. 3D DIC postav

Prema Slika 12. može se primijetiti kako su slike stražnje strane ispitnog uzorka bilježene 3D DIC postavom. Dvije kamere *Dalsa Falcon 4M60* postavljene pod međusobnim kutom od  $25^\circ$  omogućile su praćenje izvanravninskih pomaka. Na kamere su postavljene leće *Titanar 50 mm* u kombinaciji s distantnim prstenima od 7 mm. Kako bi se dobio jednak broj slika 2D DIC kamerom i 3D DIC kamerama propisana je jednaka brzina slikanja od 1 slike po sekundi.

**Tablica 4. Parametri 3D DIC postava.**

Kamera	Dalsa Falcon 4M60
Definicija	$2358 \times 1728$
Amplituda sive skale	8 bit
Leća	Titanar 50 mm (distantni prsten 7 mm)
Otvor	f/5,6
Vidno polje	$50 \times 37$ mm
Udaljenost od objekta	260 mm
Udaljenost kamera	88 mm
Kut između kamera	$25^\circ$
Brzina slikanja	1 fps
Tehnika nanošenja uzorka	Stohastički crno bijeli raster

Tablica 5. prikazuje parametre provedene 3D DIC analize. Analiza je provedena u *software-u EikoTwin*.

**Tablica 5. Parametri 3D DIC analize.**

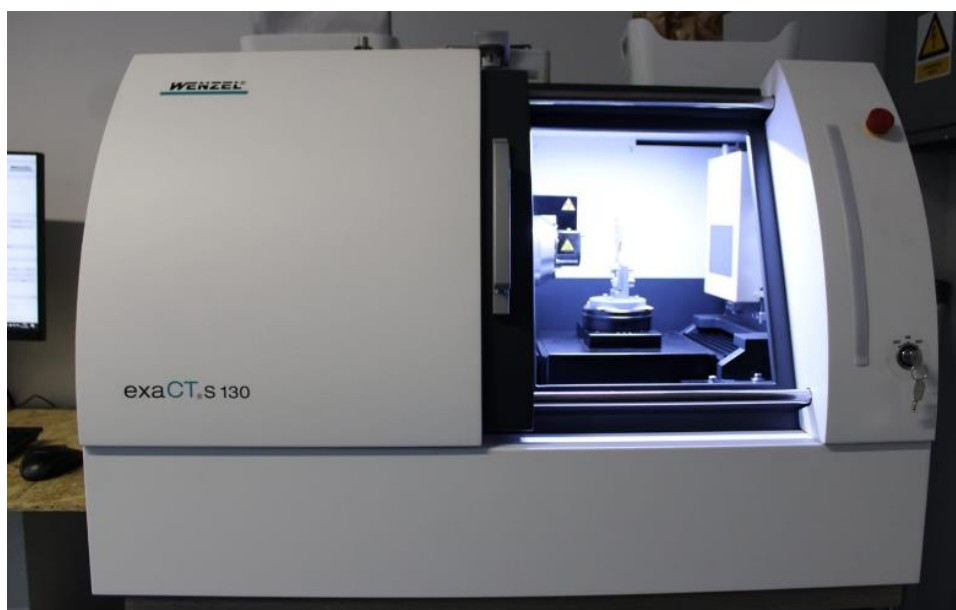
DIC Software	EikoTwin
Veličina elementa	1 mm
Funkcija oblika	Linearna (T3)
Mreža	Strukturirana
Kriterij poklapanja	Kazneni zbroj kvadrata razlika
Regularizacija	12 mm
Interpolacija	Kubična

#### 4.5. XCT skeniranje ispitnog uzorka

Tijekom provođenja *ex-situ* mehaničkog ispitivanja potrebno je skenirati ispitni uzorak nakon svakog ciklusa opterećenja. Dobiveni skenovi omogućuju uvid u mikrostrukturu ispitnog uzorka. Provedbu skeniranja u ovom eksperimentu omogućila je tvrtka *Neo Dens d.o.o.*

##### 4.5.1. Računalni tomograf WENZEL® *exaCT*®s 130

Skeniranje ispitnog uzorka provedeno je u računalnom tomografu WENZEL® *exaCT*®s 130 koji je prikazan na Slika 14.



**Slika 14. Računalni tomograf WENZEL® *exaCT*®s 130 tvrtke Neo Dens d.o.o.**

Prije početka skeniranja potrebno je pravilno postaviti parametre kao i zagrijati izvor X-zraka. Najbitniji parametri su jakost struje i napon izvora. Tablica 6. prikazuje sve parametre koji su definirani. Jakost struje iznosila je 111  $\mu\text{A}$  za monotono dok je za cikličko ispitivanje taj iznos bio nešto viši, odnosno 134  $\mu\text{A}$ . Napon izvora bio je jednak.

**Tablica 6. Parametri skeniranja.**

Naziv uređaja	WENZEL <sup>®</sup> exaCT <sub>es</sub> 130	
Rendgenski izvor	Hamamatsu L9181-02	
Filter	Filter za deblje polimere	
Napon	M – 72 kV	C – 72 kV
Jakost struje	M – 111 $\mu\text{A}$	C – 134 $\mu\text{A}$
Veličina žarišne točke	5 $\mu\text{m}$	
Udaljenost detektora od izvora X zračenja	205 mm	
Udaljenost objekta od izvora X zračenja	54 mm	
Detektor	Ravni detektor od 3 Mpx	
Definicija detektora	2304×1300 px	

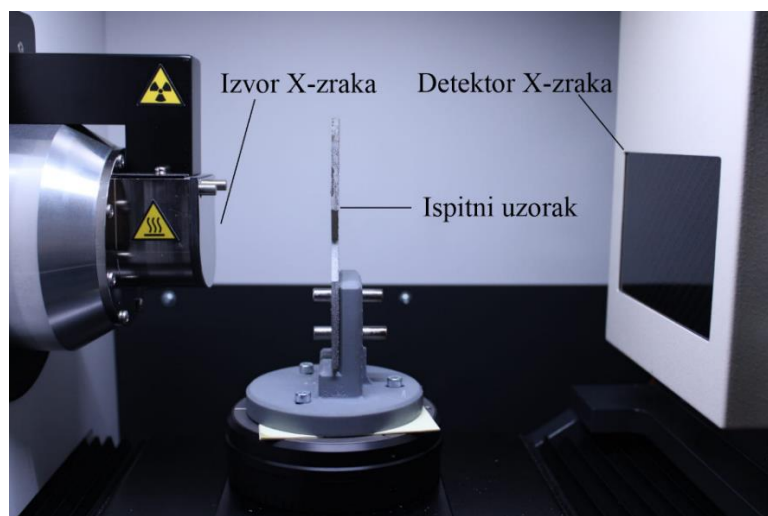
Tablica 7. prikazuje akvizicijske parametre. Tijekom provođenja monotonog smičnog testa zabilježeno je 7 skenova dok je za vrijeme trajanja cikličkog testa zabilježeno 10 skenova. Svaki sken je trajao više od tri sata. Svi zabilježeni skenovi su iste kvalitete.

**Tablica 7. Akvizicijski parametri.**

Parametri skena	
Broj projekcija	1680
Kutna amplituda	0,214°
Brzina zabilježavanja projekcija	0,07 projekcija/s
Trajanje skeniranja	3h 40min
Amplitude sivih skala	8 bit
Veličina volumena	2234 × 2234 × 979 vx
Vidno polje	35,7 × 35,7 × 15,67 mm
Fizikalna veličina	1 vx = 16 $\mu\text{m}$
Uzorak	Prirodna tekstura



Slika 15. prikazuje postav unutar CT skenera. Ispitni uzorak postavlja se na rotacijsko postolje. Tijekom rotacije ispitnog uzorka bilježe se projekcije na temelju kojih se rekonstruira volumen.



**Slika 15. Postav unutar CT skenera.**

#### 4.5.2. DVC analiza

Na rekonstruiranim volumenima provedena je DVC analiza. Za provedbu DVC analize korišten je korelacijski algoritam *Correli 3.0* temeljen na globalnom pristupu korelacije digitalnih volumena. Tablica 8. prikazuje parametre provedene DVC analize. Korelacijski algoritam *Correli 3.0* implementiran je u *MATLAB*, u kojemu su provedene analize.

**Tablica 8. Parametri provedene DVC analize.**

<i>DVC Software</i>	<i>Correli 3.0</i>
Veličina elementa	8 voxela
Funkcija oblika	Linearna (T4)
Mreža	Nestrukturirana
Kriterij poklapanja	Kazneni zbroj kvadrata razlika
Regularizacija	128 voxela
Interpolacija	Kubična

## 5. Rezultati

Rezultati predstavljeni u nastavku podijeljeni su s obzirom na dva provedena mehanička ispitivanja, tj. monotono i cikličko ispitivanje. Pri predstavljanju rezultata prvo su prikazane mjerne nesigurnosti, potom polja pomaka, slijede polja glavnih najvećih deformacija te na kraju polja korelacijskih reziduala.

### 5.1. Monotono smično ispitivanje

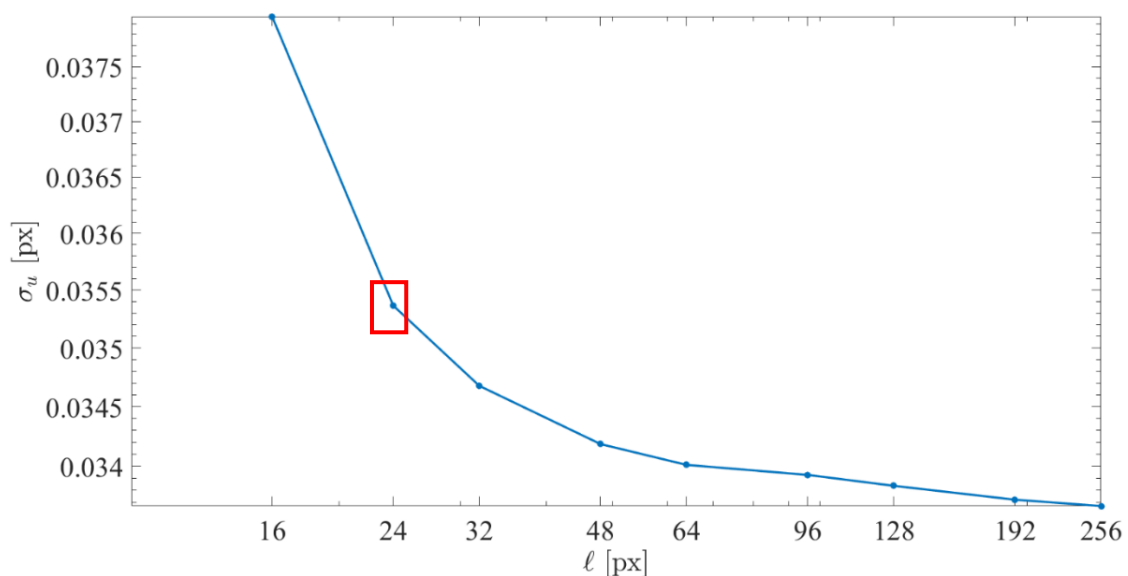
Prvi korak pri provođenju analize je određivanje mjernih nesigurnosti za različite veličine elemenata. Na temelju dobivenih mjernih nesigurnosti odabrane su veličine elemenata koje će se koristiti u DIC/DVC analizama.

#### 5.1.1. Mjerna nesigurnost

Podpoglavlje mjernih nesigurnosti monotonom ispitivanja podijeljeno je s obzirom na dvije provedene analize, odnosno DIC i DVC analizu.

##### 5.1.1.1. Mjerna nesigurnost DIC analize

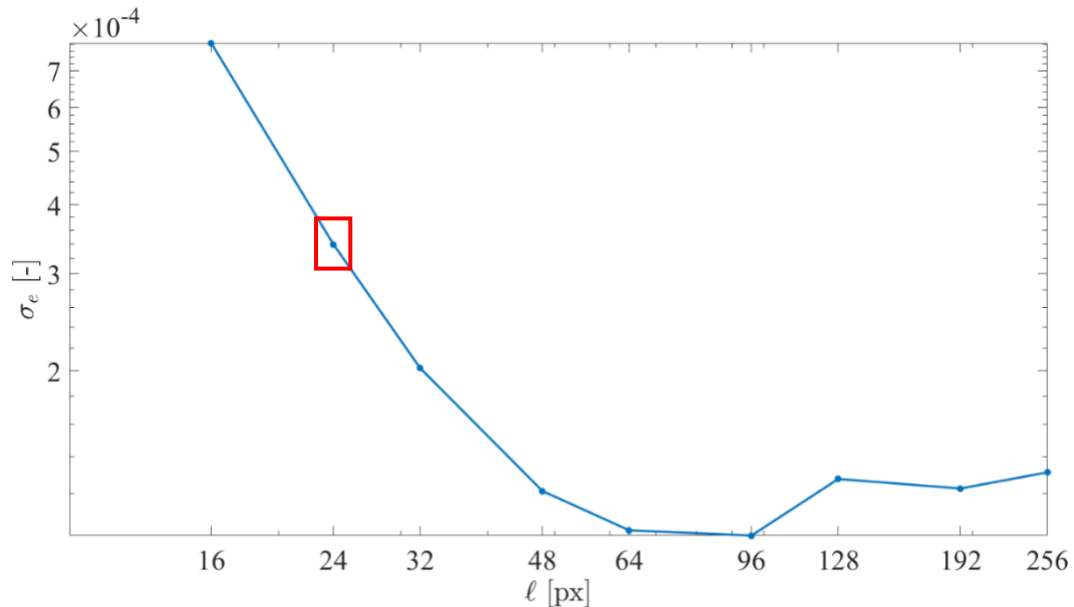
Mjerna nesigurnost pomaka DIC analize za različite veličine elemenata prikazana je na Slika 16. Budući da tijekom mjerenja pomaka na referentnim slikama nije narinuto mehaničko opterećenje, zaključak je da su dobiveni pomaci uzrokovani šumom uslijed registracije digitalnih slika. Iz slike se vidi kako povećanjem veličine elementa pada mjerna nesigurnost. Međutim, veći elementi ne opisuju geometriju ispitnog uzorka dovoljno dobro te se gubi mogućnost praćenja lokalizacijskih efekata.



Slika 16. Mjerna nesigurnost pomaka DIC analize monotonom ispitivanja.

U ovom slučaju odabrani se elementi veličine 24 px, označeni crvenim pravokutnikom, čija mjerna nesigurnost pomaka iznosi 0,03386 px.

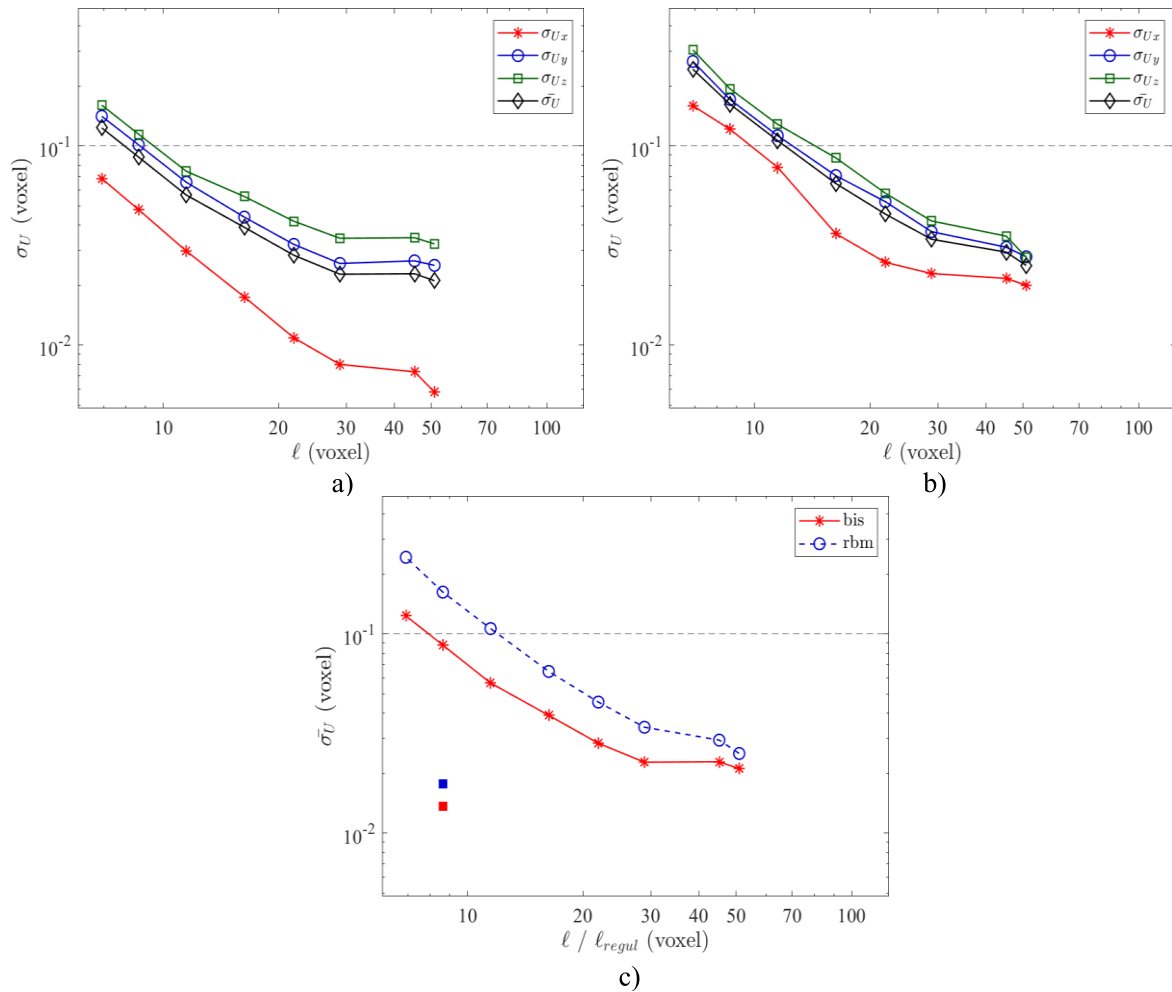
Osim mjernih nesigurnosti pomaka određene su i mjerne nesigurnosti deformacija. Slika 17. prikazuje mjerne nesigurnosti deformacija DIC analize. Za odabranu veličinu elementa od 24 px mjerna nesigurnost deformacija iznosi 0,0003067.



**Slika 17. Mjerna nesigurnost deformacija DIC analize monotonog ispitivanja.**

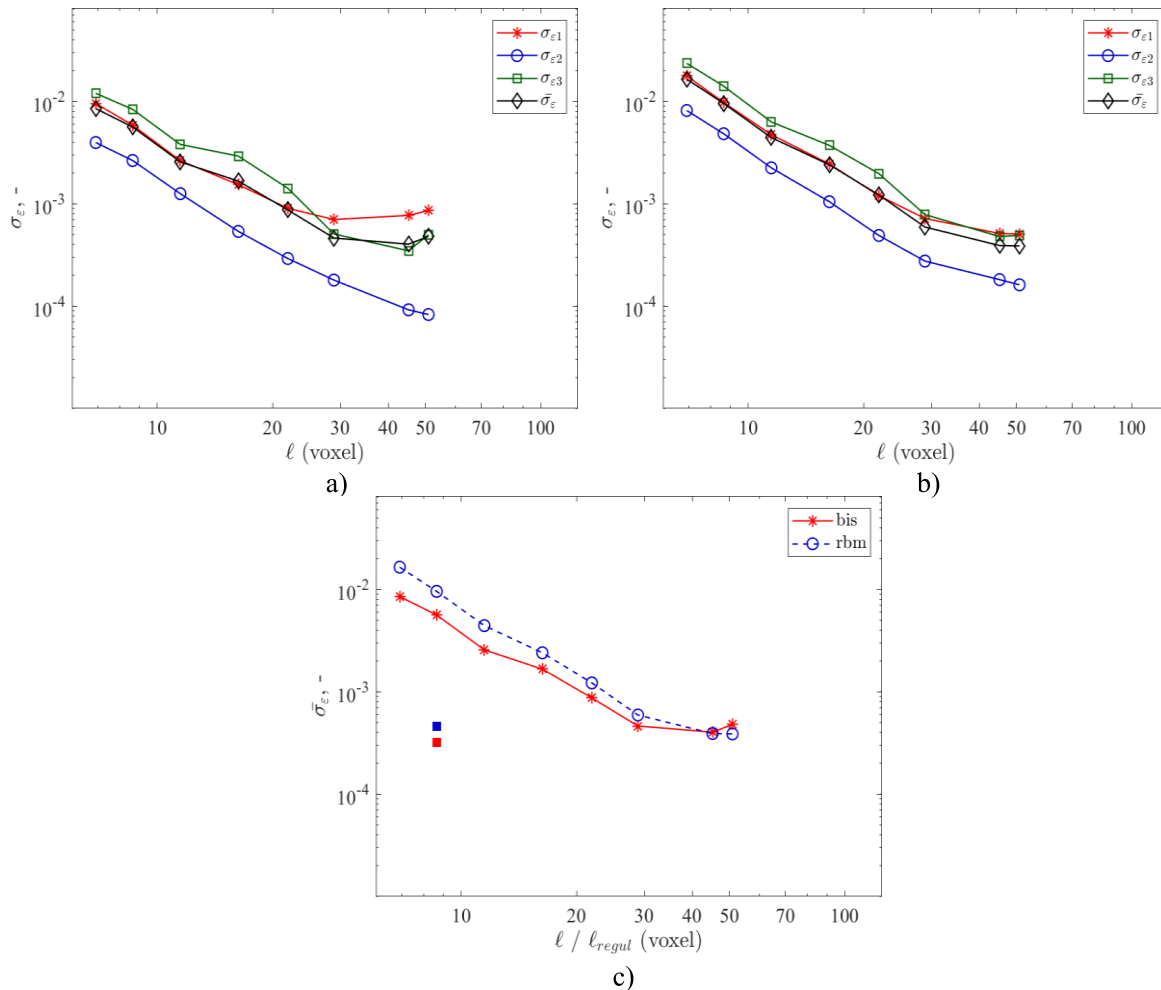
#### 5.1.1.2. Mjerna nesigurnost DVC analize

Mjerne nesigurnosti pomaka DVC analize za monotono ispitivanje prikazane su na Slika 18. Na Slika 18. a) prikazana je mjerna nesigurnost pomaka bis skena, na Slika 18. b) mjerna nesigurnost pomaka rbm skena dok je na Slika 18. c) usporedno prikazana srednja vrijednost mjerne nesigurnosti pomaka za bis i rbm sken s regularizacijom 128 voxela. Prema navedenoj slici uočava se smanjenje mjerne nesigurnosti s povećanjem veličine elemenata. Međutim i za DVC analizu vrijedi da povećanje elemenata vodi lošem opisivanju promatrane geometrije leptirastog ispitnog uzorka. Također, može se primijetiti kako su mjerne nesigurnosti pomaka bis skena manje od mjernih nesigurnosti rbm skena. Razlog tomu je način provođenja tih skeniranja, odnosno uslijed vađenja ispitnog uzorka iz CT-a te ponovnog vraćanja došlo je do povećanja mjerne nesigurnosti pomaka. Prema Slika 18. c) može se uočiti kako je mehanička regularizacija od 128 voxela dovela do značajnih smanjenja srednjih vrijednosti mjerne nesigurnosti pomaka za oba skena.



**Slika 18.** Mjerne nesigurnosti pomaka DVC analize za monotono ispitivanje gdje je a) mjerna nesigurnost pomaka bis skena, b) mjerna nesigurnost pomaka rbm skena te c) usporedba srednjih vrijednosti mjernih nesigurnosti pomaka bis i rbm skena. Crveni i plavi kvadratići označavaju mjernu nesigurnost pomaka za bis i rbm skenove s regularizacijom od 128 voxela.

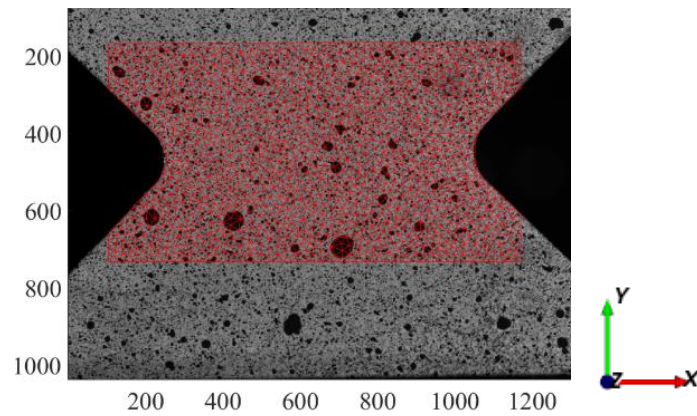
Na Slika 19. prikazane su mjerne nesigurnosti deformacija DVC analize za monotono ispitivanje. Slika 19. a) prikazuje mjerne nesigurnosti deformacija bis skena, Slika 19. b) prikazuje mjernu nesigurnost deformacija rbm skena te Slika 19. c) usporedno prikazuje srednje vrijednosti mjernih nesigurnosti deformacija s regularizacijom od 128 voxela za oba skena. Prema navedenim slikama ponovno se uočava kako rbm sken ima veće vrijednosti mjernih nesigurnosti deformacija u odnosu na bis sken. Na Slika 19. c) vidi se kako je razlika između srednjih vrijednosti mjerne nesigurnosti deformacija manja od razlike između srednjih vrijednosti mjerne nesigurnosti pomaka koje su ranije prikazane.



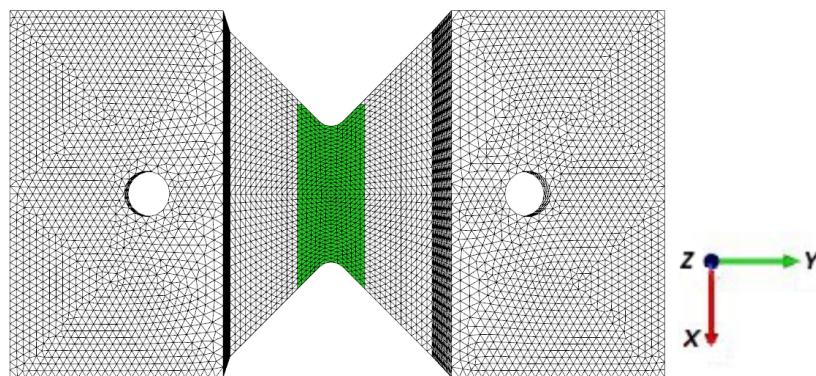
**Slika 19.** Mjerne nesigurnosti deformacija DVC analize za monotono ispitivanje gdje je a) mjerna nesigurnost pomaka bis skena, b) mjerna nesigurnost pomaka rbm skena te c) usporedba srednjih vrijednosti mjernih nesigurnosti pomaka bis i rbm skena. Crveni i plavi kvadratići označavaju mjernu nesigurnost deformacija za bis i rbm skenove s regularizacijom od 128 voxela.

Na temelju prikazanih mjernih nesigurnosti pomaka i deformacija DVC analize odlučeno je kako će se za daljnju analizu koristiti konačni elementi veličine 8 voxela.

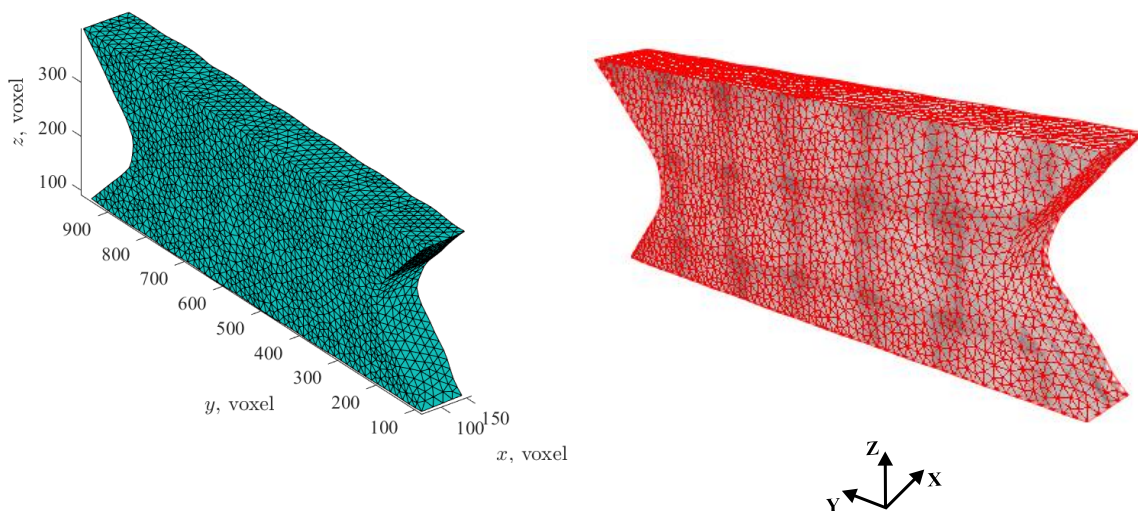
Nakon odabira veličine elemenata kreirane su mreže konačnih elemenata. Slika 20. prikazuje mrežu konačnih elemenata veličine 24 px za analizu pomoću *Correli 3.0* algoritma. Na Slika 21. prikazana je mreža konačnih elemenata korištena za provođenje analize pomoću *EikoTwin* algoritma, dok Slika 22. na lijevoj strani prikazuje mrežu konačnih elemenata za DVC analizu pomoću *Correli 3.0* algoritma te na desnoj strani mrežu konačnih elemenata preklaplenu s mikrostrukturom ispitnog uzorka. Analize monotonog i cikličkog ispitivanja provedene su na mrežama konačnih elemenata jednake veličine.



Slika 20. Mreža konačnih elemenata – *Correli 3.0.*



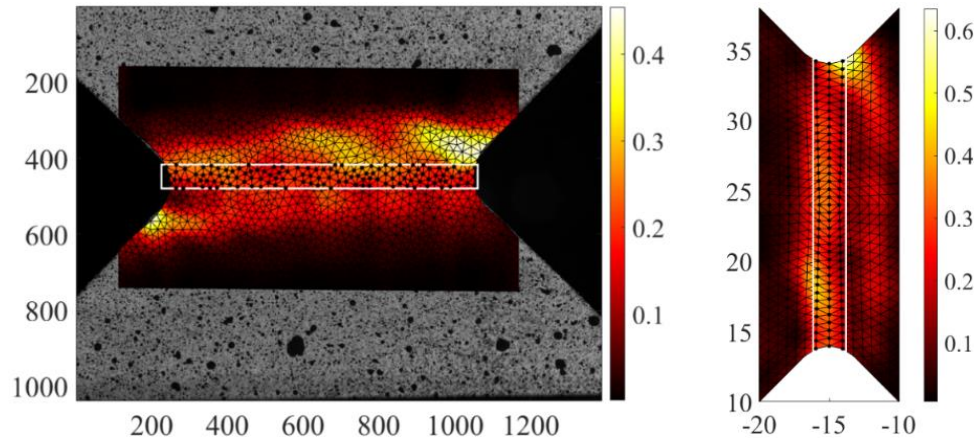
Slika 21. Mreža konačnih elemenata - *EikoTwin.*



Slika 22. Mreža konačnih elemenata za DVC analizu (lijevo) i mreža konačnih elemenata preklapljena s mikrostrukturom (desno)

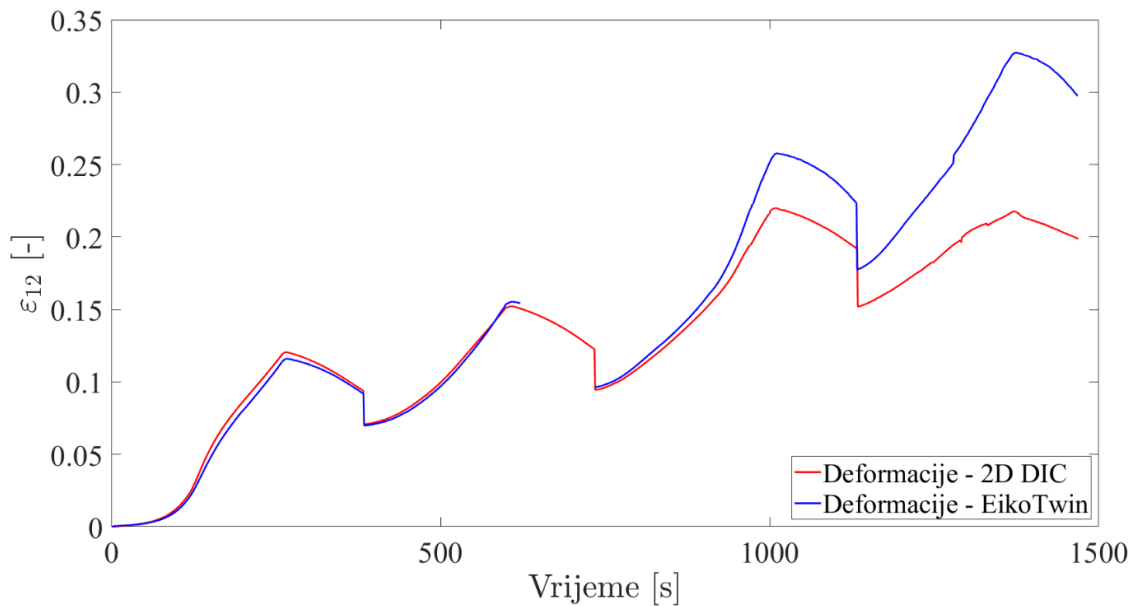
Kako bi se odredio globalni odziv promatranog materijala odabrana su područja u kojima su dominantne smične deformacije. Tako Slika 23. lijevo prikazuje područje koje je odabrano na polju glavnih deformacija koje su izračunate na mreži konačnih elemenata u korelacijskom algoritmu *Correli 3.0.* Slika 23. desno prikazuje područje koje je odabrano u korelacijskom algoritmu *EikoTwin.* Prilikom odabira optičke mjerne trake (eng. *virtual gauge*) potrebno je

paziti da veličina odabranih područja budu približno jednaka. Prilikom odabira većih područja dolazi do smanjenja prosječnog iznosa smičnih deformacija. S druge strane, odabirom premalog područja došlo bi do dodatnog povećanja iznosa smičnih deformacija jer se na najužoj traci ispitnog uzorka javljaju najveće smične deformacije.



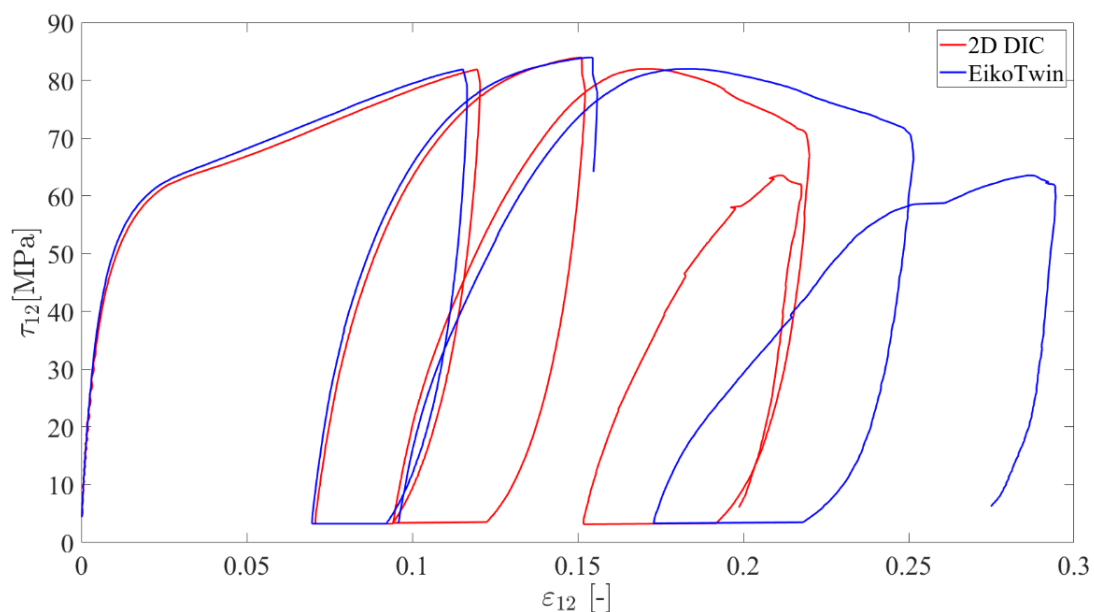
**Slika 23. Područje odabrano za određivanje globalnog odziva materijala na polju glavnih deformacija izračunatom na mreži konačnih elemenata pomoću korelacijskog algoritma *Correlli 3.0* (lijevo) te *EikoTwin* (desno)(eng. *Virtual gauge*).**

Iz odabranih područja izračunate su prosječne vrijednosti smičnih deformacija tijekom mehaničkog ispitivanja. Na temelju tih deformacija kreirani su dijagrami vrijeme – deformacija te deformacija – naprezanje. Slika 24. prikazuje promjenu deformacija tijekom vremena gdje se može uočiti dobro poklapanje oba dijagrama tijekom prva dva ciklusa opterećivanja. Međutim, u trećem i četvrtom ciklusu dolazi do pojave značajnijih razlika. Ta razlika može biti uzrokovana heterogenom mikrostrukturom predloženog materijala, te pojavom izvanravninskih pomaka koje je moguće mjeriti samo stereo algoritmom *EikoTwin*. Naime, kod 2D DIC postava korištena je telecentrična leća kod koje izvanravninski pomaci neće utjecati na ne fizikalno povećanje/smanjenje pomaka ukoliko su izvanravninski pomaci unutar granice telecentričnosti korištenog objektiva. Tijekom provođenja monotonog ispitivanja došlo je do neželjenog gašenja akvizicije 3D DIC postava. Ova pojava može se uočiti na Slika 24. kao prekid krivulje koja opisuje srednje deformacije između vrha drugog i početka trećeg ciklusa.



**Slika 24. Usporedba posmičnih deformacija izračunatih pomoću *Correli 3.0* i *EikoTwin* algoritma za monotono ispitivanje.**

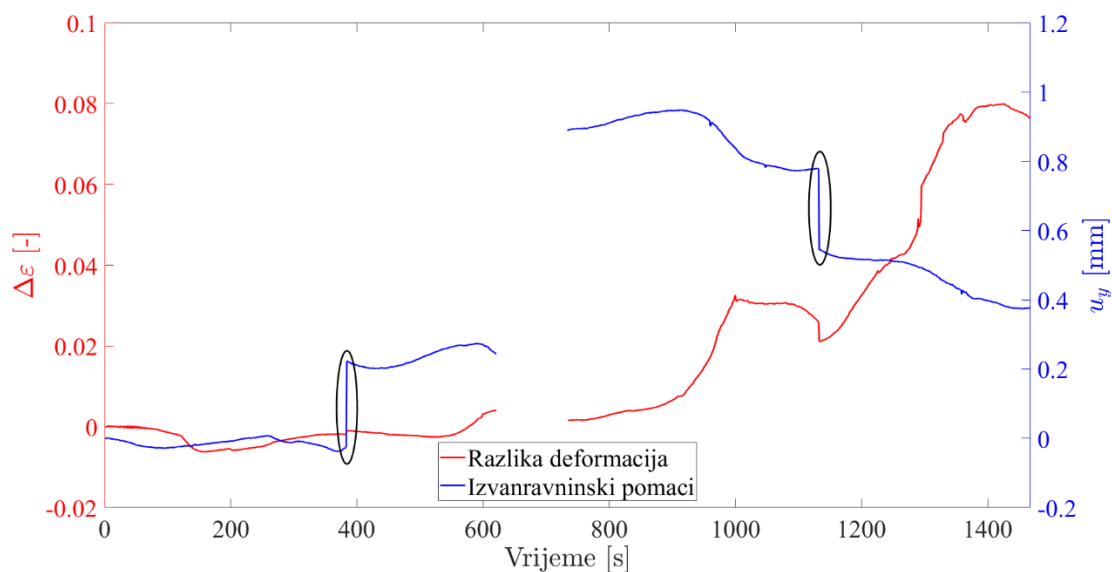
Slika 25. usporedno prikazuje dijagram deformacija – naprezanje monotonog ispitivanja za 2D i 3D DIC postav. Kao i na prethodno prikazanom dijagramu primjetno je vrlo dobro poklapanje tijekom prva dva ciklusa opterećivanja, dok tijekom trećeg i četvrtog ciklusa dolazi do pojave značajnih razlika. Važno je naglasiti kako je nakon trećeg ciklusa zabilježeno veće oštećenje ispitnog uzorka na površini leptirastog uzorka promatranog stereo DIC sustavom. Osim toga, vrlo bitno je primijetiti kako sa svakim ciklusom dolazi do smanjivanja nagiba krivulje što je uzrokovano smanjenjem modula elastičnosti  $E$ . Rezultat degradacije krutosti ispitnog uzorka je pojava značajnih oštećenja.



**Slika 25. Usporedni dijagram deformacija - naprezanje za monotono ispitivanje.**



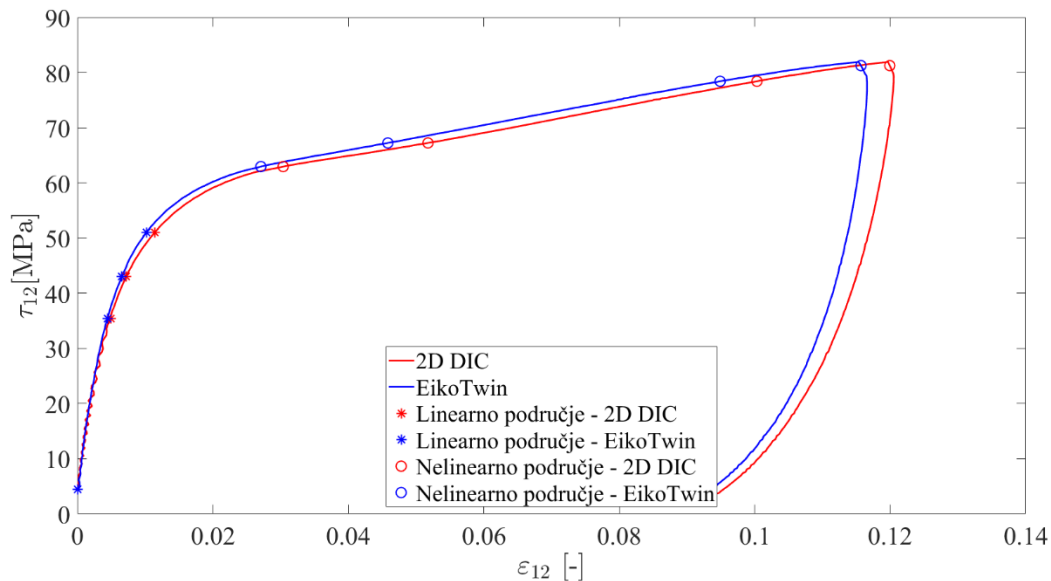
Kako je već i spomenuto, razlika u izračunatim deformacijama može biti uzrokovana pojavom izvanravninskih pomaka, nastalih uslijed oštećenja unutar ispitnog uzorka, koji su u trećem i četvrtom ciklusu postali značajniji, što se vidi na Slika 26. Bitno je primijetiti kako sa svakim ciklusom rastu amplitude izvanravninskih pomaka, a isto tako i razlike u deformacijama. Skokovi na krivulji izvanravninskih pomaka, označeni crnim elipsama na Slika 26., uzrokovani su ponovnom montažom ispitnog uzorka u Arcan prihvat. Maksimalna vrijednost izvanravninskih pomaka iznosi 1 mm što je primjenom predložene telecentrične leće zanemarivi pomak koji ne može utjecati na zabilježenu razliku između 2D i stereo DIC mjerenja. Naime, zbog heterogenosti materijala za očekivati je da će se kod pojave mehaničkog oštećenja mehanički odziv razlikovati s obzirom na promatrane strane.



**Slika 26. Razlika posmičnih deformacija izračunatih 2D DIC i 3D DIC analizom u korelaciji s izvanravninskim pomacima zabilježenim 3D DIC postavom za monotono ispitivanje.**

Nakon određivanja globalnog odziva materijala, u nastavku će se analizirati linearno i nelinearno područje mehaničkog odziva promatranog materijala uslijed monotonog opterećenja. Kako bi se analizirao linearan i nelinearan odziv materijala u obzir je uzet samo prvi ciklus opterećenja ispitnog uzorka budući da u njemu ne postoje prethodna oštećenja uzorka. Stoga, zbog jednostavnijeg prikaza na Slika 27. prikazan je dijagram deformacija – naprezanje za prvo opterećenje na kojem su odabrane točke u kojima su analizirana polja pomaka, glavnih deformacija te korelacijskih reziduala. Tako su u linearnom području odabrane četiri točke koje su na dijagramu označene zvjezdicama. Treća i četvrta točka koje su označene kao linearno područje zapravo predstavljaju prijelaz iz linearnog područja u nelinearno, odnosno početak nelinearnog područja. Isto tako u nelinearnom području odabrane su četiri točke koje su prikazane kružićima. Kriterij za izbor točaka bio je pojava nelinearnosti na

krivulji. U svim odabranim točkama došlo je do promjene nagiba krivulje koji je uzrokovan pojavom oštećenje u ispitnom uzorku. Ispravnim odabirom točaka prati se inicijalizacija i rast oštećenja. Prvotno su prikazani rezultati za linearno, a potom i nelinearno područje.



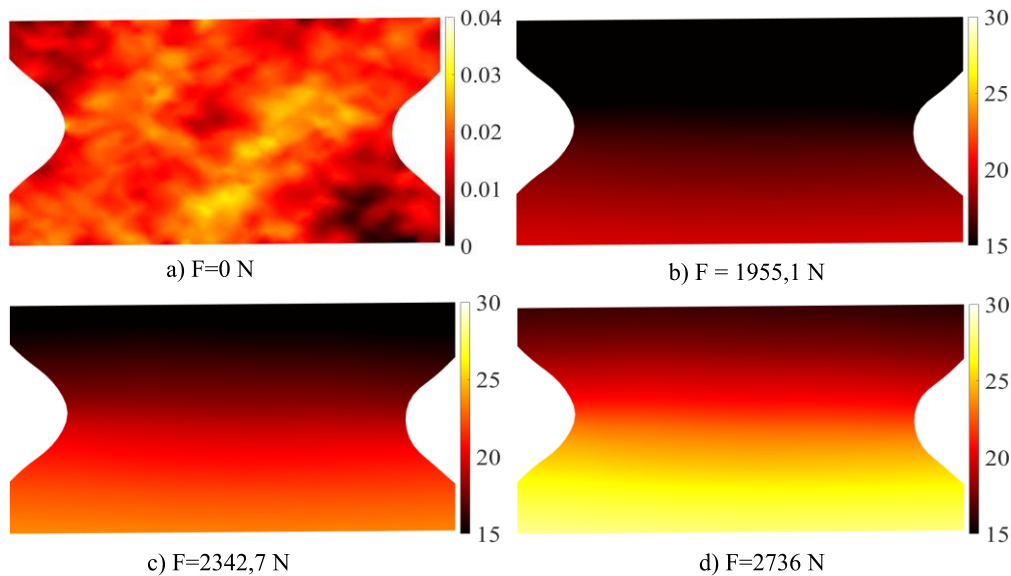
**Slika 27. Dijagram deformacija - naprezanje monotnog ispitivanja s označenim analiziranim točkama u linearnom i nelinearnom područje**

### 5.1.2. Linearni odziv monotnog smičnog ispitivanja

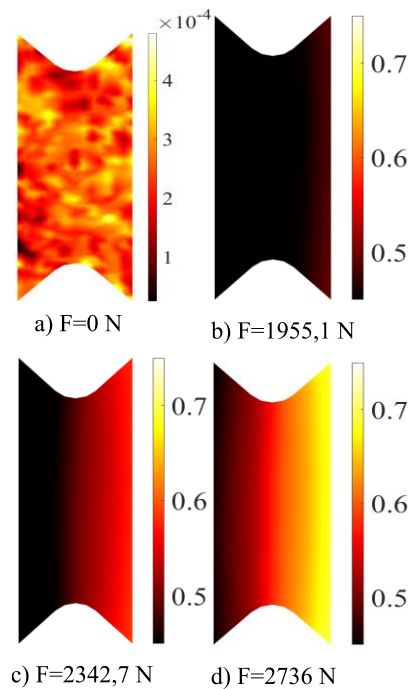
Pri analizi linearnog područja prvo su promatrana polja pomaka, potom glavnih najvećih deformacija te naposljetku korelacijskih reziduala.

#### 5.1.2.1. Polja pomaka u linearnom području

Slika 28. prikazuje polja pomaka u odabranim točkama linearnog područja te pripadajući iznos sila. Prikazana polja pomaka u  $x$ -smjeru, tj. u smjeru djelovanja opterećenja izračunata su u *Correli* 3.0 algoritmu. Slika 28. a) prikazuje polje pomaka zabilježeno u neopterećenom stanju. Može se uočiti stohastička raspodjela pomaka koji su na razini mjerne nesigurnosti. Slika 28. b), c) i d) prikazuju polja pomaka na kojima se vidi jasna razlika između dijela koji je postavljen u nepomični i pomični dio Arcan prihвата. Mjerna skala pomaka izračunatih 2D postavom izražena je u pikselima dok su pomaci izračunati 3D postavom izraženi u milimetrima. Maksimalni iznos pomaka u  $x$ -smjeru na Slika 28. d) iznosi  $\approx 27$  px. Slika 29. prikazuje polja pomaka u  $x$ -smjeru koja su izračunata stereo DIC algoritmom *EikoTwin*. Može se uočiti velika sličnost između polja pomaka. Pri opterećenju od 2736 N maksimalni pomak iznosi  $\approx 0,7$  mm što preračunavanjem u piksele iznosi  $\approx 27$  px te se može zaključiti kako su izmjerena polja pomaka u  $x$ -smjeru približno jednaka u oba programska paketa.

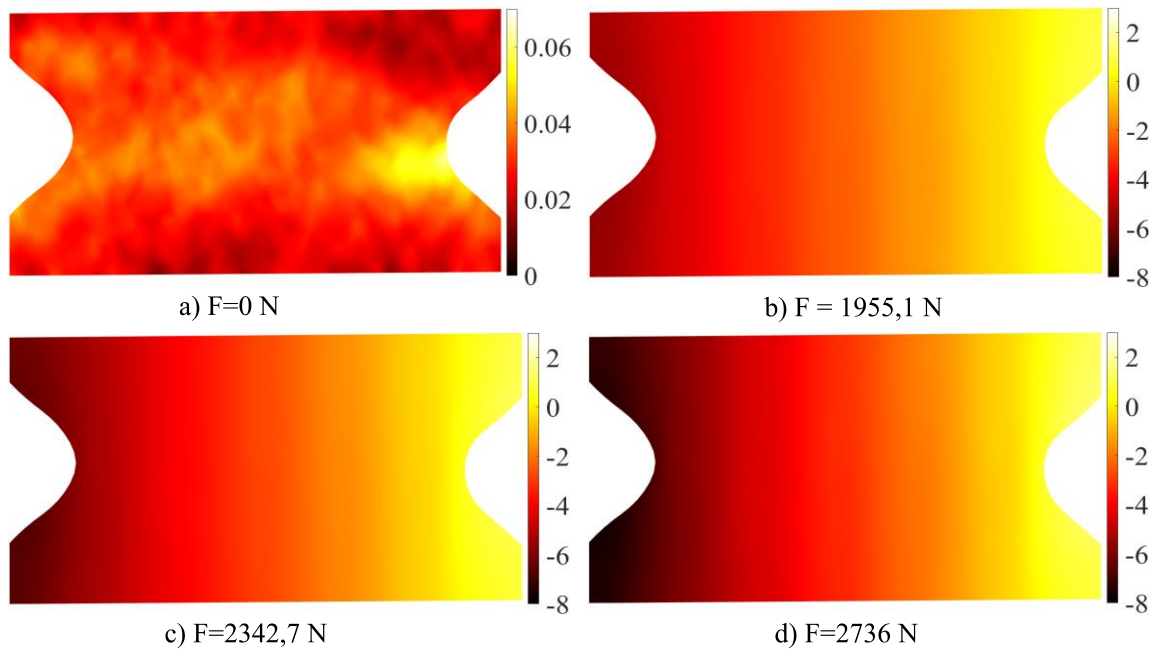


**Slika 28.** Polja pomaka u  $x$ -smjeru u linearnom području mehaničkog odziva materijala izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za monotono ispitivanje.

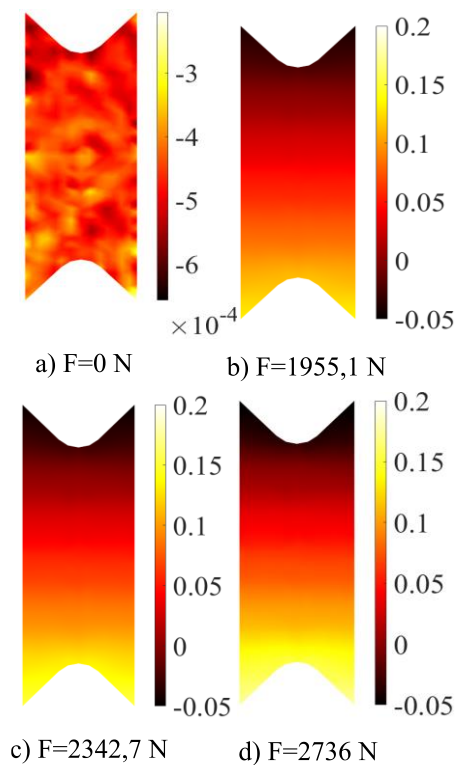


**Slika 29.** Polja pomaka u  $x$ -smjeru u linearnom području mehaničkog odziva materijala izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za monotono ispitivanje.

Slika 30. i Slika 31. prikazuju polja pomaka u  $y$ -smjeru izračunata pomoću 2D i stereo DIC pristupa. Slika 30. a) i Slika 31. a) prikazuju inicijalna polja pomaka u  $y$ -smjeru sa stohastičkom raspodjelom te vrlo malih iznosa. Usporedbom polja pomaka primjetna je slična raspodjela pomaka. Iznosi pomaka u  $y$ -smjeru znatno su manji od pomaka u smjeru opterećenja.

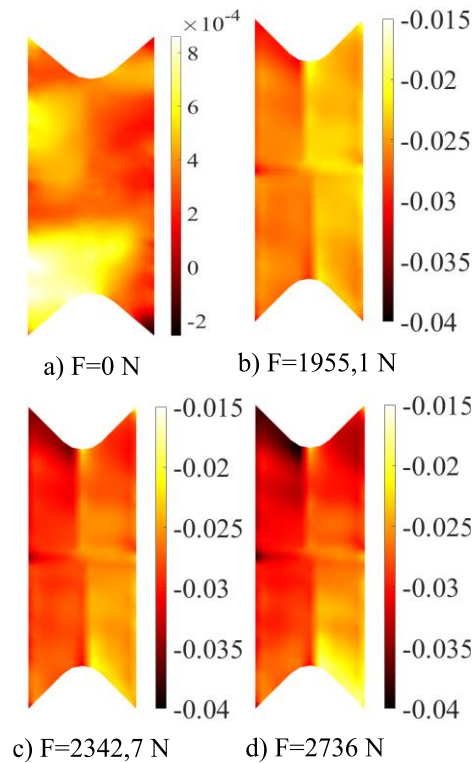


**Slika 30.** Polja pomaka u  $y$ -smjeru u linearnom području mehaničkog odziva materijala izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za monotono ispitivanje.



**Slika 31.** Polja pomaka u  $y$ -smjeru u linearnom području mehaničkog odziva materijala izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za monotono ispitivanje.

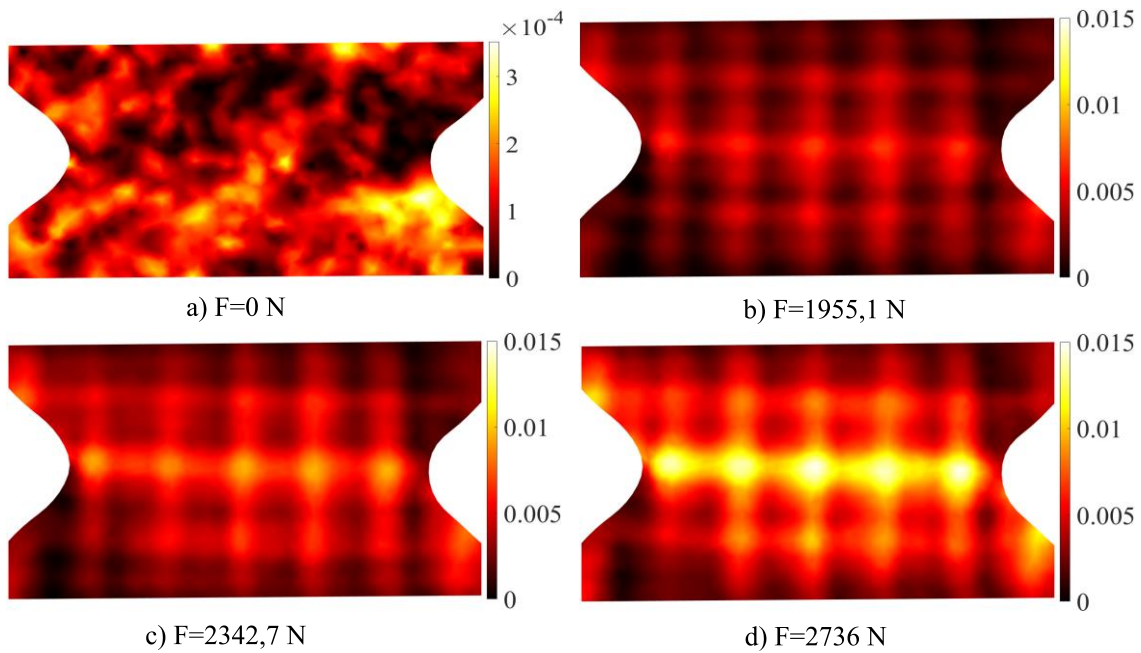
Slika 32. prikazuje izvanravninske pomaka izračunate u *EikoTwin*-u. Budući da se radi o linearnom području izvanravninski pomaci su zanemarivih iznosa.



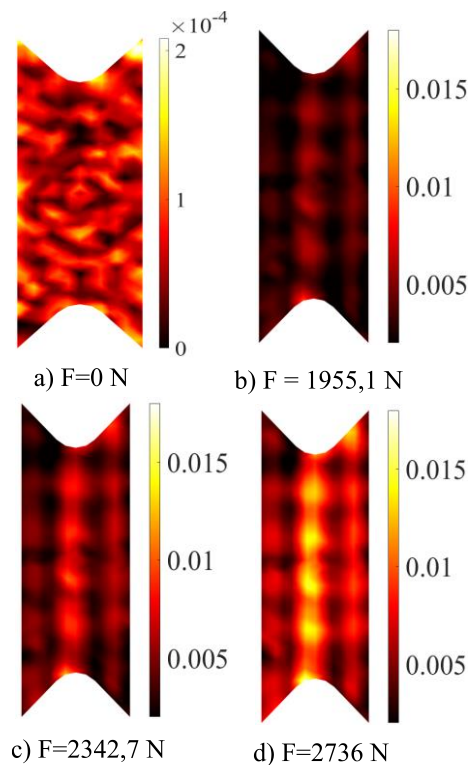
**Slika 32. Polja izvanravninskih pomaka izmjerena u linearnom području mehaničkog odziva materijala pomoću *EikoTwin* algoritma za monotono ispitivanje.**

#### 5.1.2.2. Polja deformacija u linearnom području

Iz prikazanih polja pomaka izračunata su polja deformacija. Slika 33. prikazuje polja najvećih glavnih deformacija u linearnom području izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma. Na Slika 33. a) prikazano je inicijalno polje najvećih glavnih deformacija izračunato u neopterećenom stanju ispitnog uzorka. Neopterećeno stanje uzrokuje stohastičku raspodjelu deformacija na razini mjerne nesigurnosti. Povećanje opterećenja rezultira povećanjem iznosa najvećih glavnih deformacija. Na poljima najvećih glavnih deformacija može se uočiti struktura pletenih staklenih vlakana pod  $0^\circ$  i  $90^\circ$ . Budući da se promatra linearno područje te početak nelinearnog područja najveće glavne deformacije postižu iznose do 0,015. Prema Slika 34. primjetno je kako se polja glavnih deformacija izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma poklapaju s prethodno prikazanim poljima na Slika 33. Maksimalni iznos najvećih glavnih deformacija izračunat pomoću *EikoTwin* algoritma također iznosi 0,015.



**Slika 33.** Polja najvećih glavnih deformacija u linearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma.

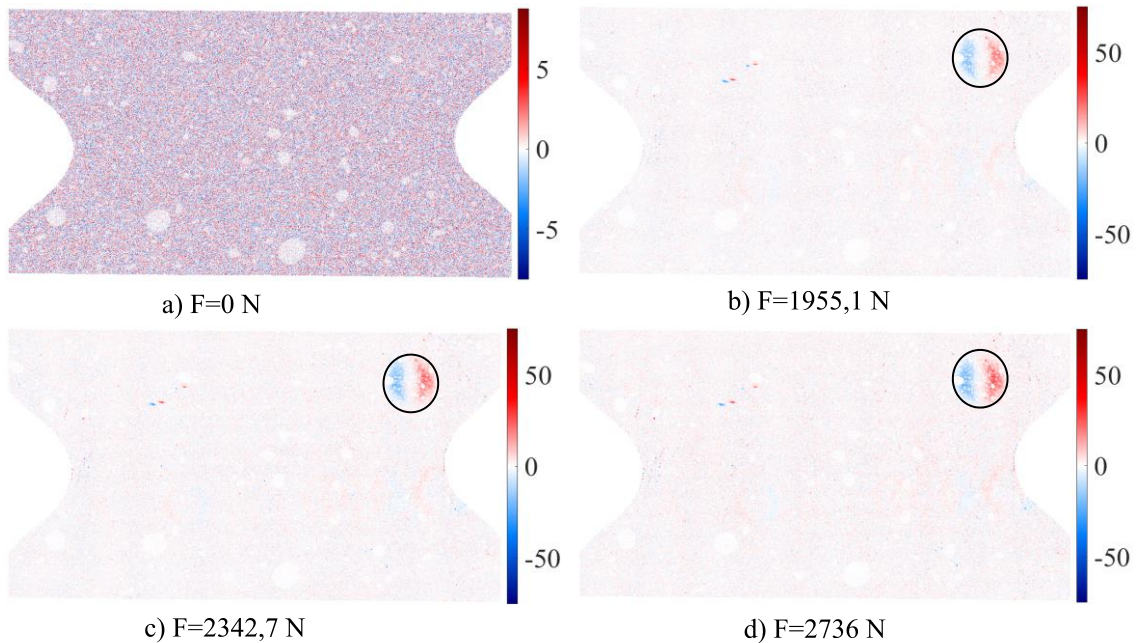


**Slika 34.** Polja najvećih glavnih deformacija u linearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma.

#### 5.1.2.3. Polja korelacijskih reziduala u linearnom području

Na Slika 35. prikazana su polja korelacijskih reziduala u linearnom području. Slika 35. a) prikazuje polje korelacijskih reziduala za sliku zabilježenu u neopterećenom stanju. Kao što je

bilo očekivano, korelacijski reziduali su vrlo malog iznosa. Na Slika 35. b), c) i d) crnim kružićima označena su područja povišenih iznosa korelacijskih reziduala. Međutim, ova područja nisu uzrokovana mehaničkim opterećenjem, nego nesavršenostima korištenog optičkog sustava.



**Slika 35. Polja korelacijskih reziduala u linearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma.**

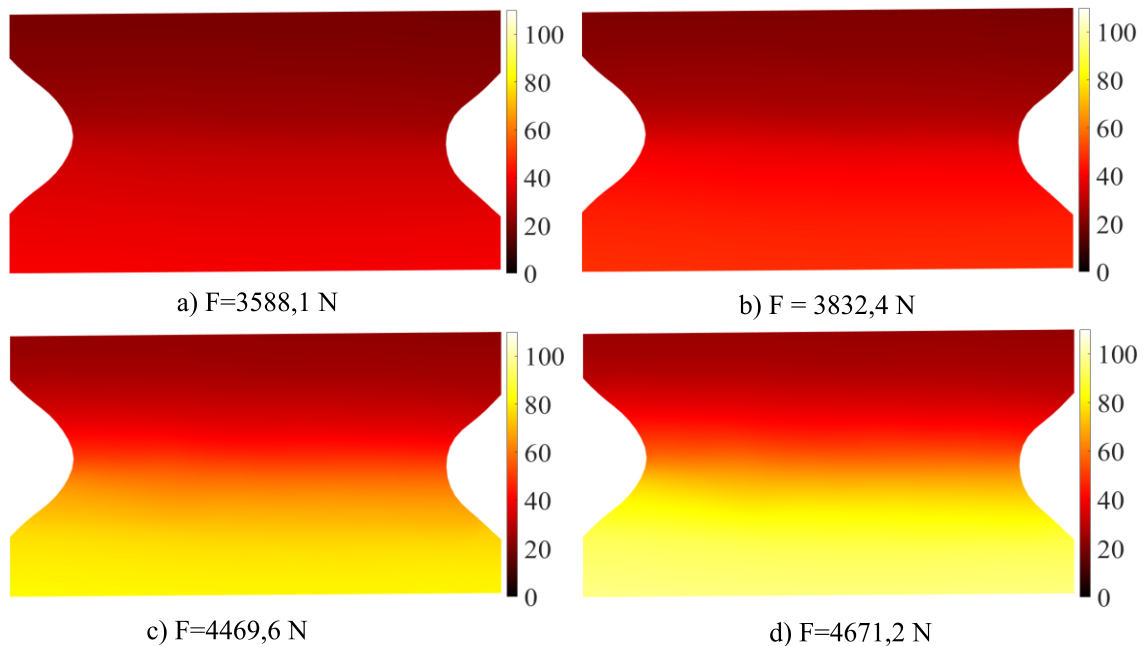
Nakon prikazanih rezultata linearnog područja može se zaključiti kako su polja pomaka u  $x$ - i  $y$ -smjeru izračunata pomoću *Correli 3.0* i *EikoTwin* algoritma približno jednaka. Isto vrijedi i za polja najvećih glavnih deformacija. Iz polja korelacijskih reziduala jasno se vidi kako ne dolazi do iniciranja pukotina pri pripadajućim mehaničkim opterećenjima.

### 5.1.3. Nelinearni odziv monotonog smičnog ispitivanja

Na Slika 27. označene su odabrane točke u nelinearnom području koje su u nastavku analizirane. Pripadajuća polja pomaka, najvećih glavnih deformacija te korelacijskih reziduala prikazana su u nastavku.

#### 5.1.3.1. Polja pomaka u nelinearnom području

Slika 36. prikazuje polje pomaka u  $x$ -smjeru u nelinearnom području izračunato pomoću *Correli 3.0* algoritma. Na svim prikazanim poljima pomaka može se vidjeti slična raspodjela pomaka. Povećanje mehaničkog opterećenja značajno povećava i pomake u smjeru opterećenja. Tako su najveći pomaci u smjeru opterećenja u linearnom području iznosili približno 0,7 mm, a u nelinearnom području iznose približno 2,4 mm, nakon pretvorbe piksela u milimetre.



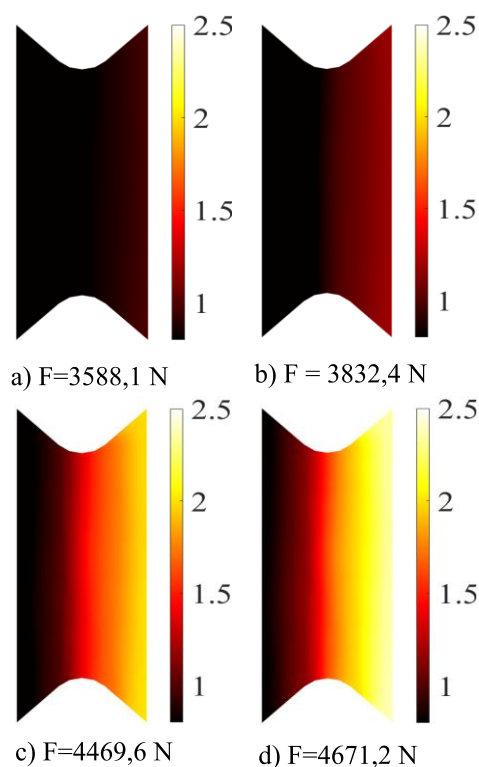
**Slika 36. Polja pomaka u  $x$ -smjeru u nelinearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma.**

Usporedbom Slika 36. i Slika 37. može se uočiti da su polja pomaka izmjerena pomoću *Correli 3.0* i *EikoTwin* algoritma približno jednaka. Usporedbom najvećeg iznosa polja pomaka izmjenjenog pomoću *Correli 3.0* algoritma, iznosa  $\approx 100 \text{ px}$ , odnosno nakon preračunavanja  $\approx 2,6 \text{ mm}$  te maksimalnog iznosa polja pomaka izračunatog u *EikoTwin*-u, čiji je iznos  $\approx 2,4 \text{ mm}$  zaključuje se kako su polja pomaka gotovo identična.

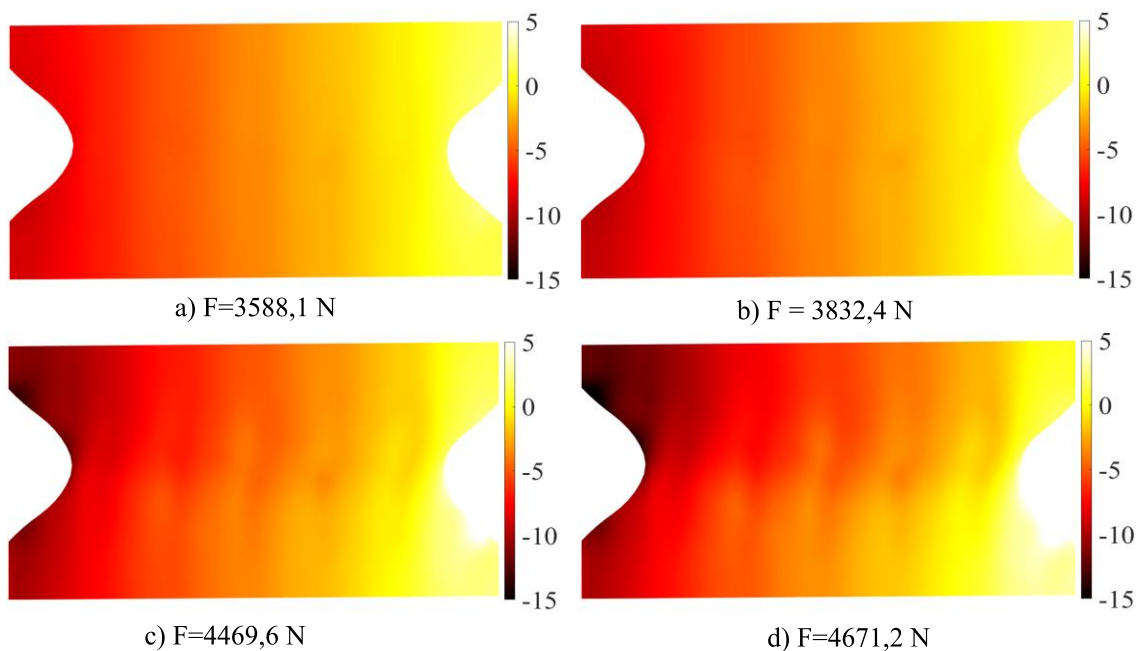
Nakon polja pomaka u  $x$ -smjeru na Slika 38. i Slika 39. prikazana su polja pomaka u  $y$ -smjeru. Budući da mehaničko opterećenje djeluje u  $x$ -smjeru pomaci u  $y$ -smjeru su znatno manji. Međutim, raspodjela polja pomaka povećanjem opterećenja jednaka je primjenom oba optička postava.

Na kraju, Slika 40. prikazuje polja izvanravninskih pomaka izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma. U nelinearnom području došlo je do značajnijeg povećanja amplitude izvanravninskih pomaka u odnosu na linearno područje. Međutim, amplituda izvanravninskih pomaka od  $0,08 \text{ mm}$  i dalje se smatra prihvatljivom, tj. pomaci su dovoljno mali da uz telecentričnu leću ne dolazi do gubitka oštine slike.

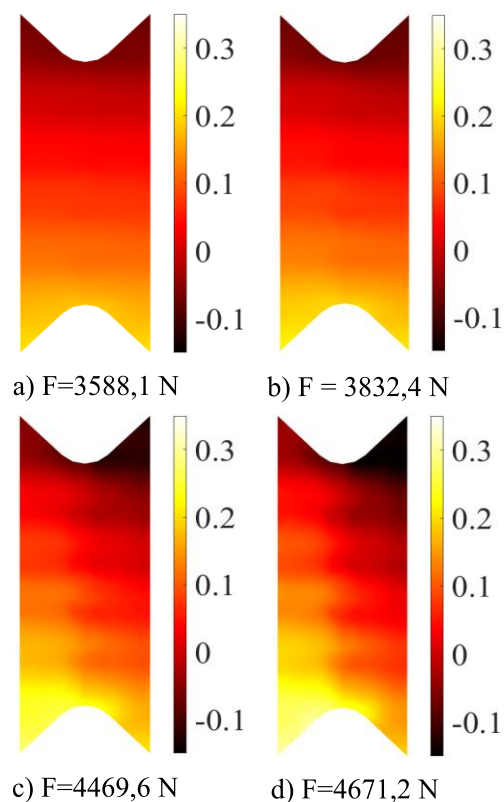




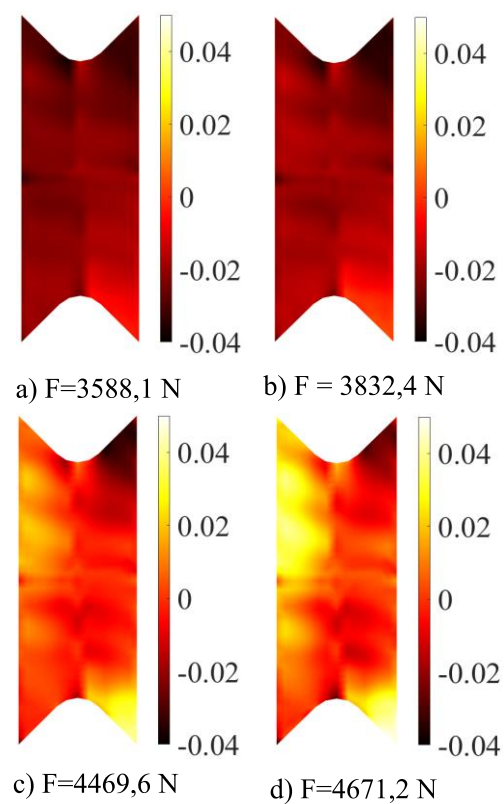
**Slika 37.** Polja pomaka u  $x$ -smjeru u nelinearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma.



**Slika 38.** Polja pomaka u  $y$ -smjeru u nelinearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma.



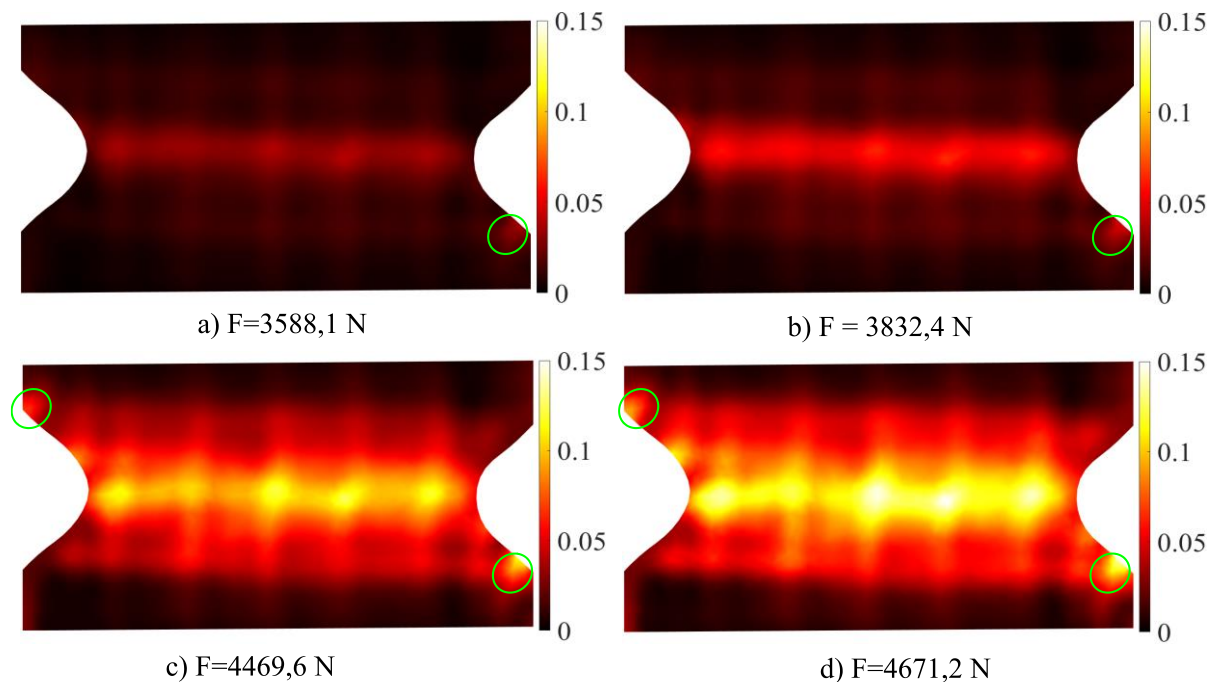
**Slika 39.** Polja pomaka u y-smjeru u nelinearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma.



**Slika 40.** Polja izvanravninskih pomaka u nelinearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma.

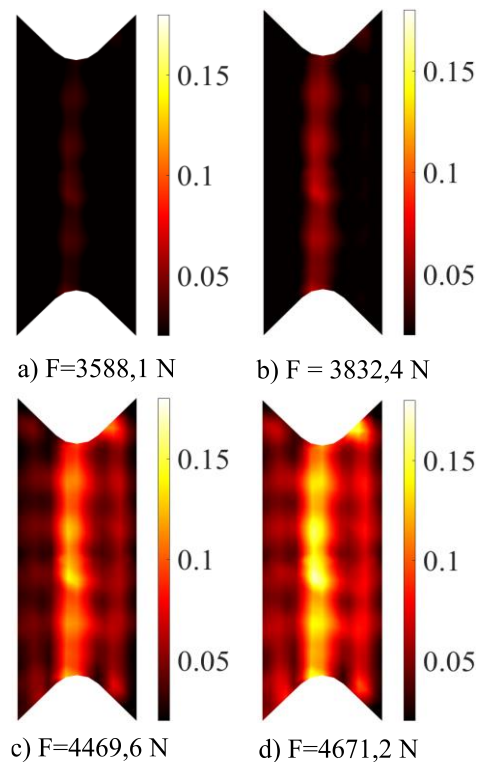
### 5.1.3.2. Polja deformacija u nelinearnom području

Na temelju prethodno prikazanih polja pomaka u nelinearnom području izračunata su polja najvećih glavnih deformacija. Slika 41. prikazuje polja glavnih deformacija izračunata u *Correli*-u. Na svima poljima jasno se vidi lokalizacija deformacija koja odgovara raspodjeli staklenih vlakana. Međutim, u odnosu na linearno područje došlo je do značajnog porasta iznosa najvećih glavnih deformacija. Tako se iznos najvećih glavnih deformacija kreće do 0,15 odnosno 15% za razliku od linearnog područja u kojemu je taj iznos bio 0,015. Osim lokalizacije deformacija duž vlakana pojavila se lokalizacija deformacija u vlačnim zonama označenim zelenim elipsama.



**Slika 41. Polja najvećih glavnih deformacija u nelinearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma.**

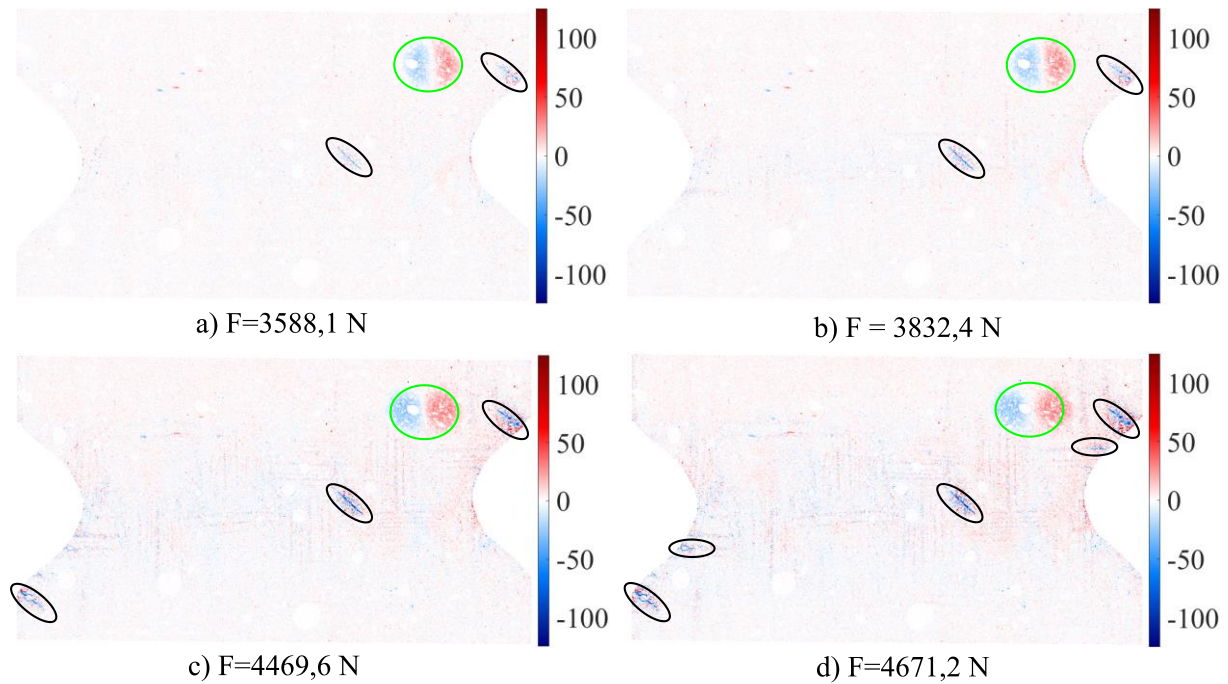
Slika 42. prikazuje polja najvećih glavnih deformacija u nelinearnom području koja su izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma. Na navedenoj slici može se uočiti posmična traka koja je također vidljiva u rezultatima dobivenim pomoću *Correli 3.0* algoritma. Osim slične raspodjele polja najvećih glavnih deformacija vidi se kako se i najveći iznos najvećih glavnih deformacija od 0,15 poklapa s onim izračunatim pomoću *Correli 3.0* algoritma. Dakle, polja glavnih deformacija približno se poklapaju kako u linearnom tako i nelinearnom području prevedenog monotonog smičnog ispitivanja.



**Slika 42. Polja najvećih glavnih deformacija u nelinearnom području mehaničkog odziva materijala monotonom ispitivanja izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma.**

#### 5.1.3.3. Polja korelacijskih reziduala u nelinearnom području

Na Slika 43. prikazana su polja korelacijskih reziduala u nelinearnom području. U odnosu na polja korelacijskih reziduala u linearnom području došlo je do znatnog povećanja iznosa korelacijskih reziduala. Na prikazanim poljima vidljiva su i područja lokalizacije reziduala, koja su označena crnim elipsama. Može se uočiti kako se povećanjem mehaničkog opterećenja njihov iznos povećava, ali jednako tako povećava se i broj lokalizacija korelacijskih reziduala. Osim područja označenih crnim elipsama na poljima korelacijskih reziduala naziru se vertikalne i horizontalne linije koje predstavljaju vlakna koja su preuzela opterećenje te se deformirala. Također, vidi se kako je duž zareza došlo do povećanja reziduala. Uzrok tomu je izbijanje staklenih vlakana iz matrice na površinu ispitnog uzorka između dva V zareza. Kao i na poljima korelacijskih reziduala prikazanim na Slika 35. postoje područja korelacijskih reziduala koja nisu uzrokovana mehaničkim opterećenjem već nesavršenostima optičkog postava te su označena zelenim kružićima.



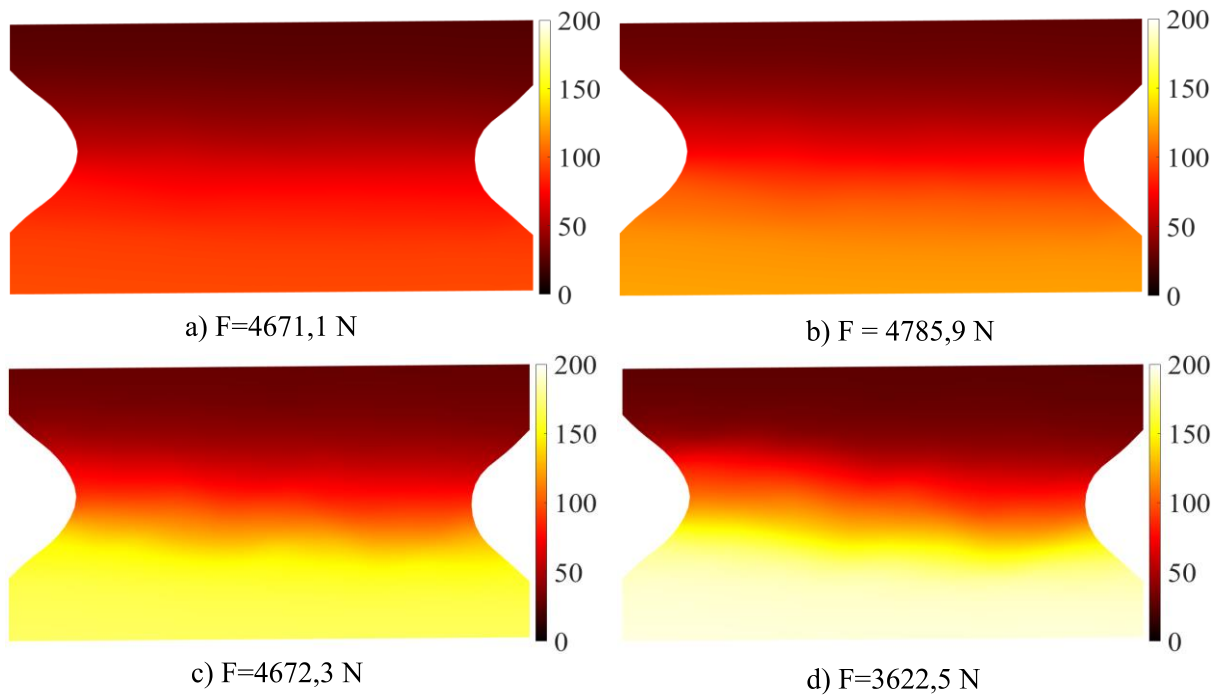
**Slika 43. Polja korelacijskih reziduala u nelinearnom području mehaničkog odziva materijala monotonog ispitivanja izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma.**

U nelinearnom području monotonog smičnog ispitivanja došlo je do znatnog povećanja iznosa pomaka u oba smjera, kao i izvanravninskih pomaka. Iznosi glavnih deformacija povećali su se za jedan red veličine. Iz polja korelacijskih reziduala uočeno je kako su se pojavila i prva oštećenja ispitnog uzorka.

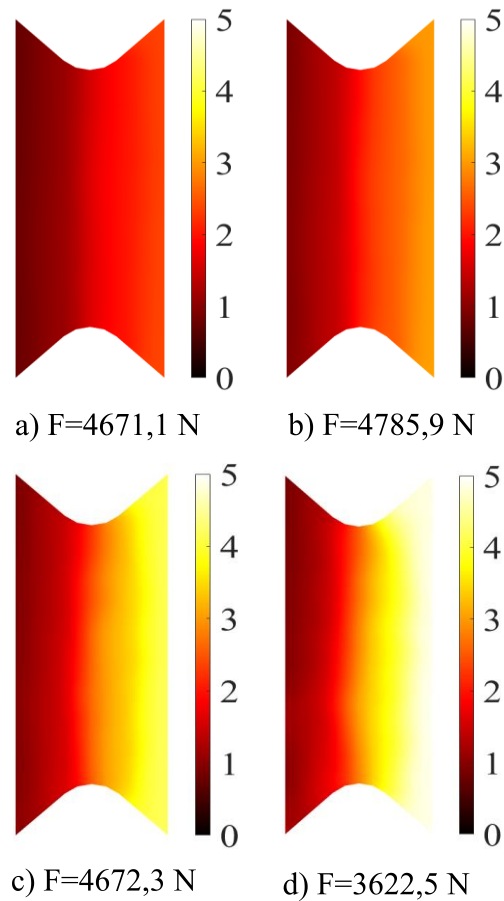
#### 5.1.4. Usporedba maksimalnih polja pomaka i deformacija u vrhovima ciklusa

Na Slika 8. prikazan je eksperimentalni protokol monotonog ispitivanja. U prethodnim podpoglavljima prikazani su rezultati linearnog i nelinearnog područja monotonog ispitivanja. U nastavku su prikazana polja pomaka, najvećih glavnih deformacija i korelacijskih reziduala pri najvećim opterećenjima pojedinih ciklusa. Iako između najvećih iznosa opterećenja ne postoji velika razlika rezultati prikazani u nastavku vrlo su različiti zbog nastalih oštećenja.

Slika 44. prikazuje polja pomaka u  $x$ -smjeru za maksimalne vrijednosti opterećenja narinutih ciklusa. Pri svim opterećenjima vidljiva su dva područja što je bio slučaj i kod prethodno predstavljenih polja pomaka. Usporedbom polja pomaka u  $x$ -smjeru izračunatih *Correli 3.0* i *EikoTwin* algoritma, prema Slika 45., može se uočiti slična raspodjela pomaka. Isto tako preračunavanjem najvećeg iznosa pomaka, izračunatog pomoću *Correli 3.0*  $\approx 190$  px u  $\approx 4,95$  mm i usporedbom s rezultatima pomoću *EikoTwin* algoritma zaključeno je kako su polja pomaka u  $x$ -smjeru, odnosno smjeru opterećenja, približno jednaka tijekom cijelog eksperimentalnog protokola.

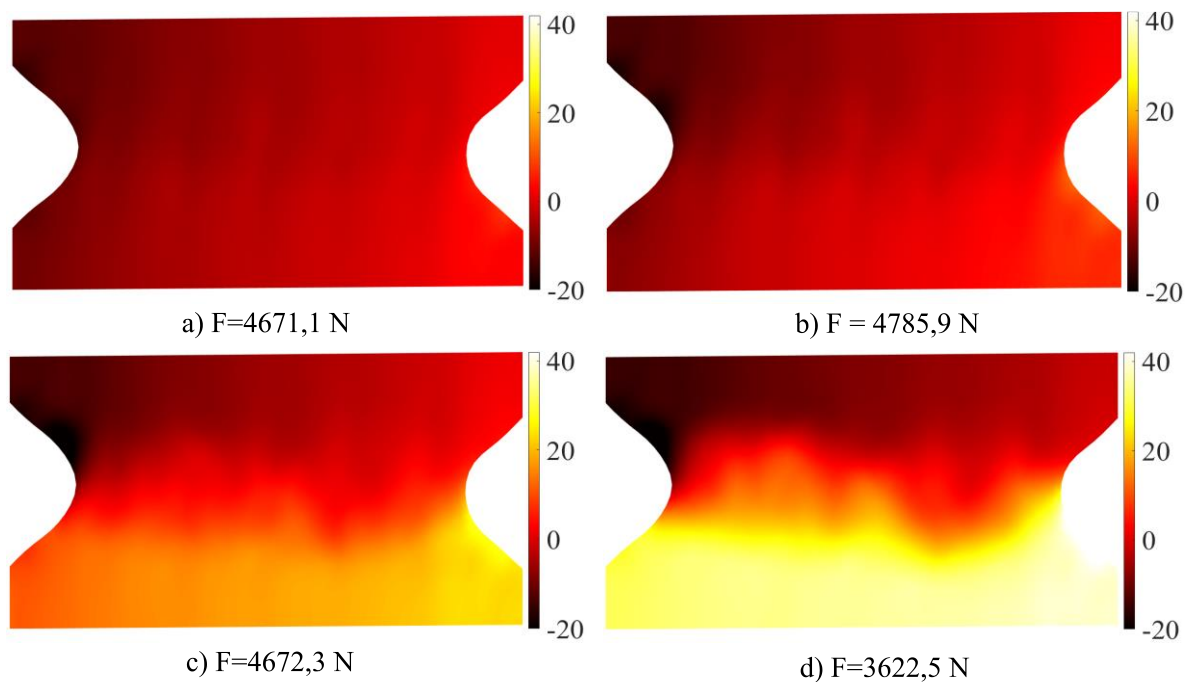


**Slika 44. Polja pomaka u  $x$ -smjeru u vrhovima ciklusa monotonog ispitivanja izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma.**

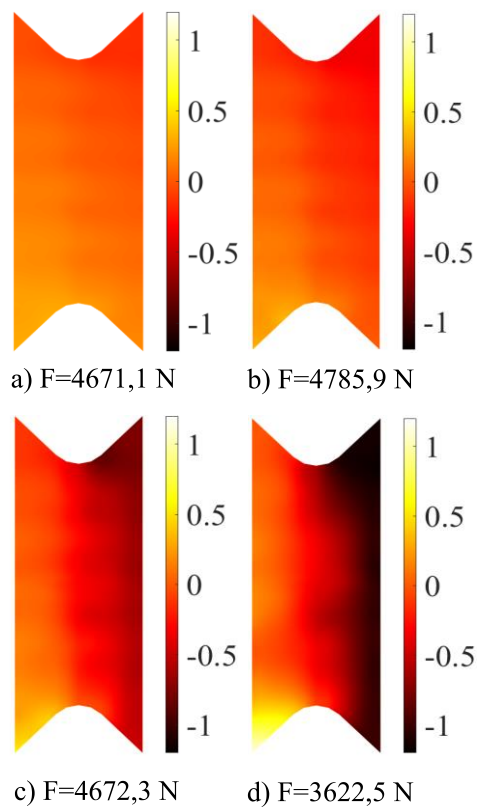


**Slika 45. Polja pomaka u  $x$ -smjeru u vrhovima ciklusa monotonog ispitivanja izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma.**

Polja pomaka u  $y$ -smjeru prikazana na Slika 46. i Slika 47. rezultiraju također vrlo sličnim raspodjelama i maksimalnim iznosima pomaka unutar  $\approx 1$  mm. Budući da je opterećenje u  $x$ -smjeru, znatno su manje vrijednosti polja pomaka u  $y$ -smjeru.

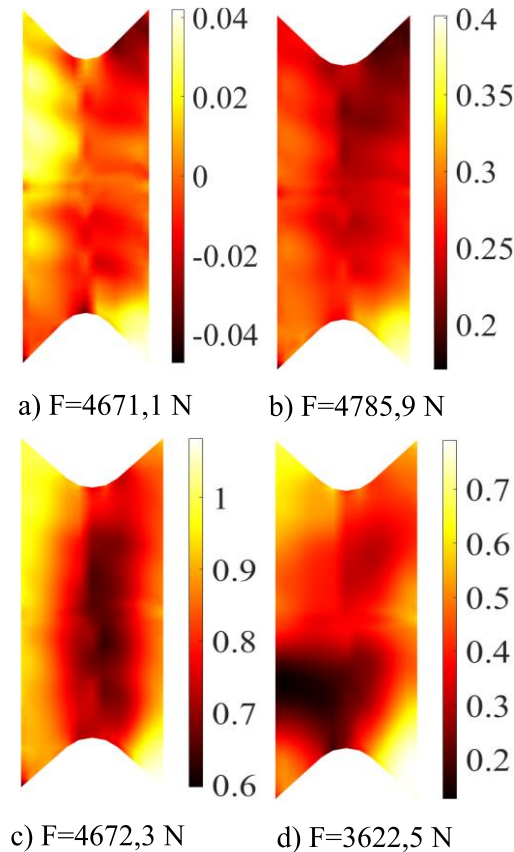


**Slika 46.** Polja pomaka u  $y$ -smjeru u vrhovima ciklusa monotonog ispitivanja izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma.



**Slika 47.** Polja pomaka u  $y$ -smjeru u vrhovima ciklusa monotonog ispitivanja izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma.

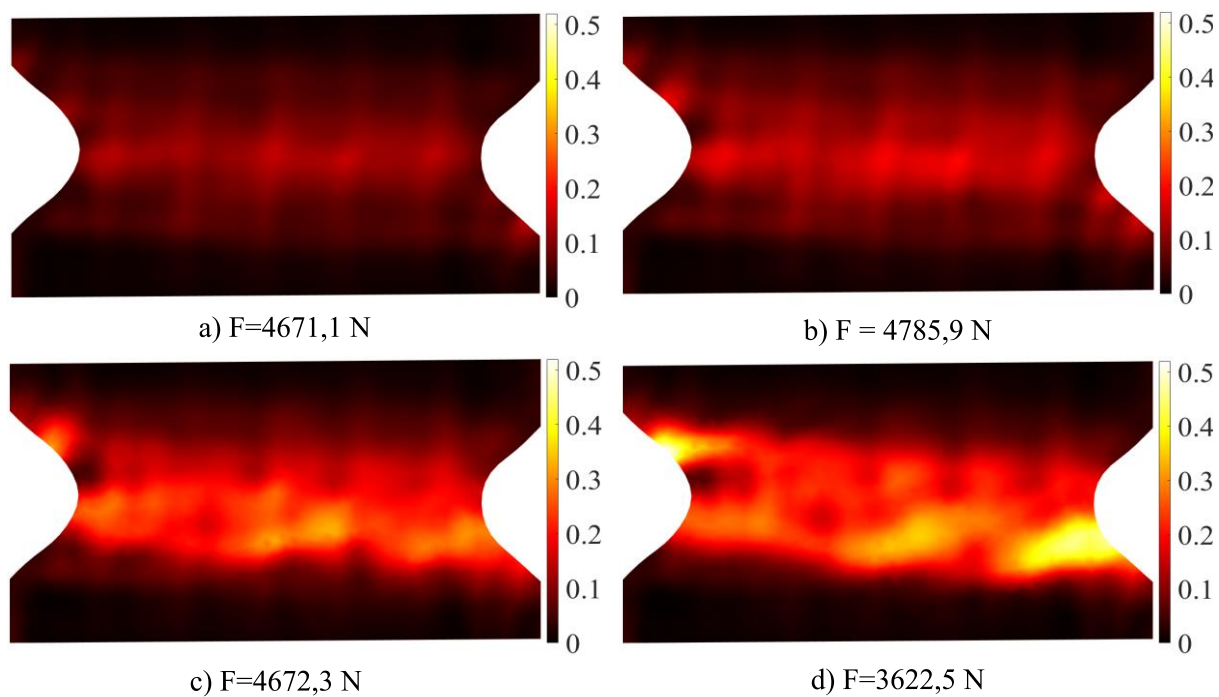
Slika 48. prikazuje izvanravnijske pomake izračunate pomoću *EikoTwin* algoritma. Budući da su kod izvanravnijskih pomaka vrlo bitne njihove amplitude nije korištena jednaka skala. Amplitude izvanravnijskih pomaka rastu kroz cikluse te maksimalnu vrijednost od  $\approx 0,7$  mm postižu u četvrtom ciklusu.



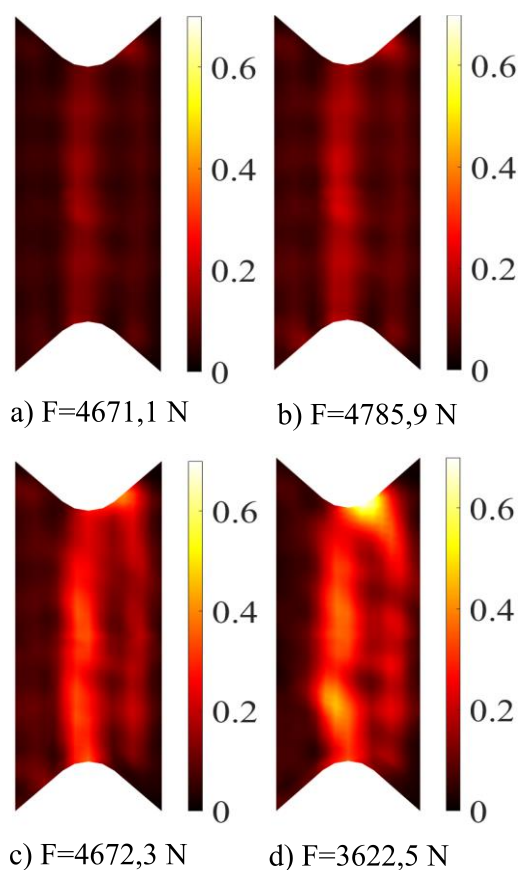
**Slika 48. Polja izvanravnijskih pomaka u vrhovima ciklusa monotonog ispitivanja izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma.**

Polja glavnih deformacija izračunata pomoću *Correli 3.0* i *EikoTwin* algoritma prikazana su na Slika 49. i Slika 50. Usporedbom tih polja primjetna je vrlo slična raspodjela polja deformacija. Tako se pri prva dva ciklusa jasno vide pređe pletenih vlakna kao i porast iznosa deformacija između prvog i drugog ciklusa. Budući da u trećem i četvrtom ciklusu postoje znatna oštećenja njihove raspodjele odstupaju od raspodjela u prva dva ciklusa. Primjetan je dodatni porast deformacija u najtanjem pojasu ispitnog uzorka. Također, dodatno su se povećale deformacije u vlačnim zonama. Međutim, maksimalni iznosi deformacija trećeg i četvrtog ciklusa znatno se razlikuju, što je i prikazano na Slika 24. Maksimalni iznos deformacija izračunatih pomoću *Correli 3.0* algoritma kreću se do  $\approx 0,5$  ili 50% dok *EikoTwin* algoritam zabilježava maksimalne vrijednosti do  $\approx 0,7$  ili 70%.



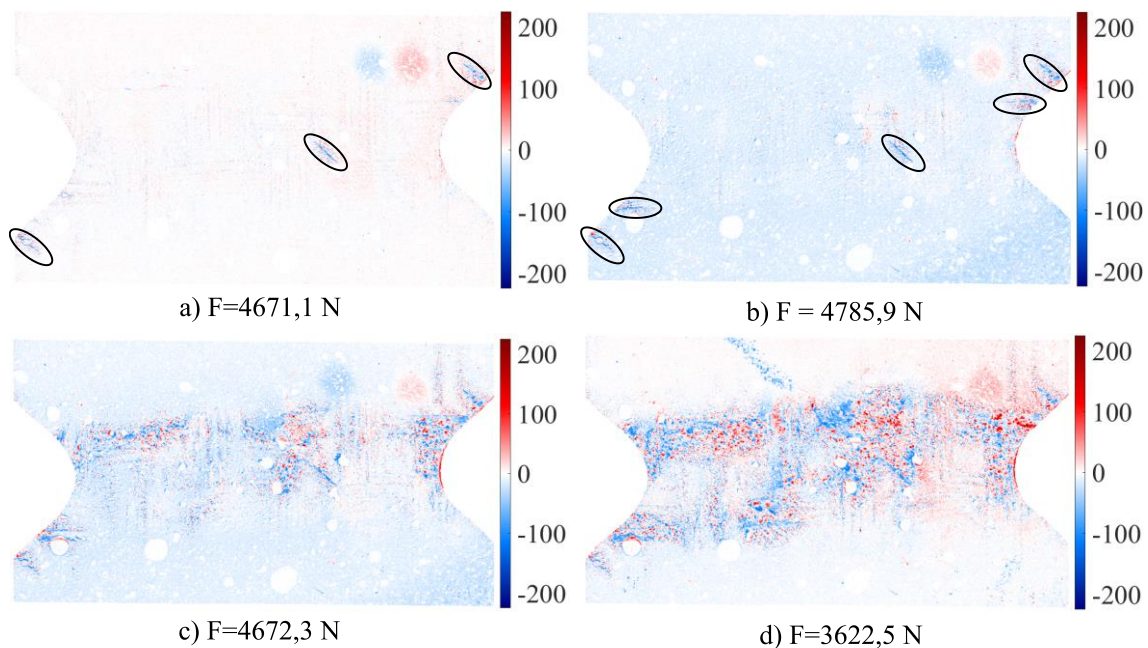


**Slika 49.** Polja najvećih glavnih deformacija u vrhovima ciklusa monotonog ispitivanja izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma.



**Slika 50.** Polja najvećih glavnih deformacija u vrhovima ciklusa monotonog ispitivanja izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma.

Na kraju, na Slika 51. prikazana su polja korelacijskih reziduala pri maksimalnim opterećenjima pojedinog ciklusa. Crnim elipsama označena su područja lokalizacije reziduala za prva dva ciklusa. Na tim mjestima otvorile su se pukotine. Vidljiv je porast broja lokalizacija kao i porast njihovih iznosa. Na Slika 51. c) i d) nisu označena područja lokalizacije budući da su nastupila vrlo velika oštećenja ispitnog uzorka i cijelo promatrano područje ima vrlo velike iznose korelacijskih reziduala.



**Slika 51. Polja korelacijskih reziduala u vrhovima ciklusa monotonog ispitivanja izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma.**

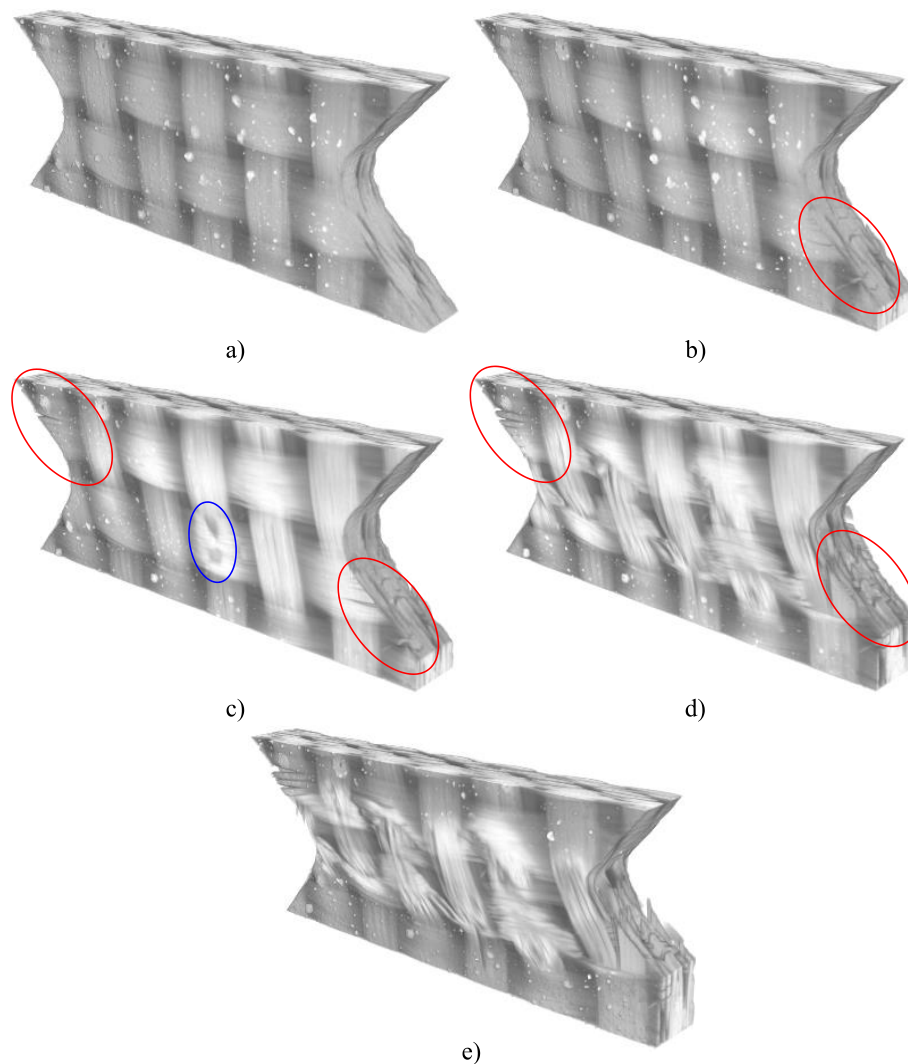
Analizom rezultata dobivenih za opterećenja u vrhovima ciklusa dobio se uvid u ponašanje polja pomaka, glavnih deformacija i korelacijskih reziduala. Budući da nakon drugog ciklusa nastaju vrlo velika oštećenja u ispitnom uzorku pojavljuju se razlike u iznosima glavnih deformacija. Jedan od uzroka tomu je i „boranje“ ispitnog uzorka uslijed delaminacije slojeva što se vidi na Slika 52. Izvanravni pomaci koje 2D DIC postav nije sposoban mjeriti i heterogena distribucija oštećenja imaju velik utjecaj na apsolutno podudaranje izračunatih glavnih deformacija.



**Slika 52. Ispitni uzorka nakon zadnjeg ciklusa monotonog ispitivanja.**

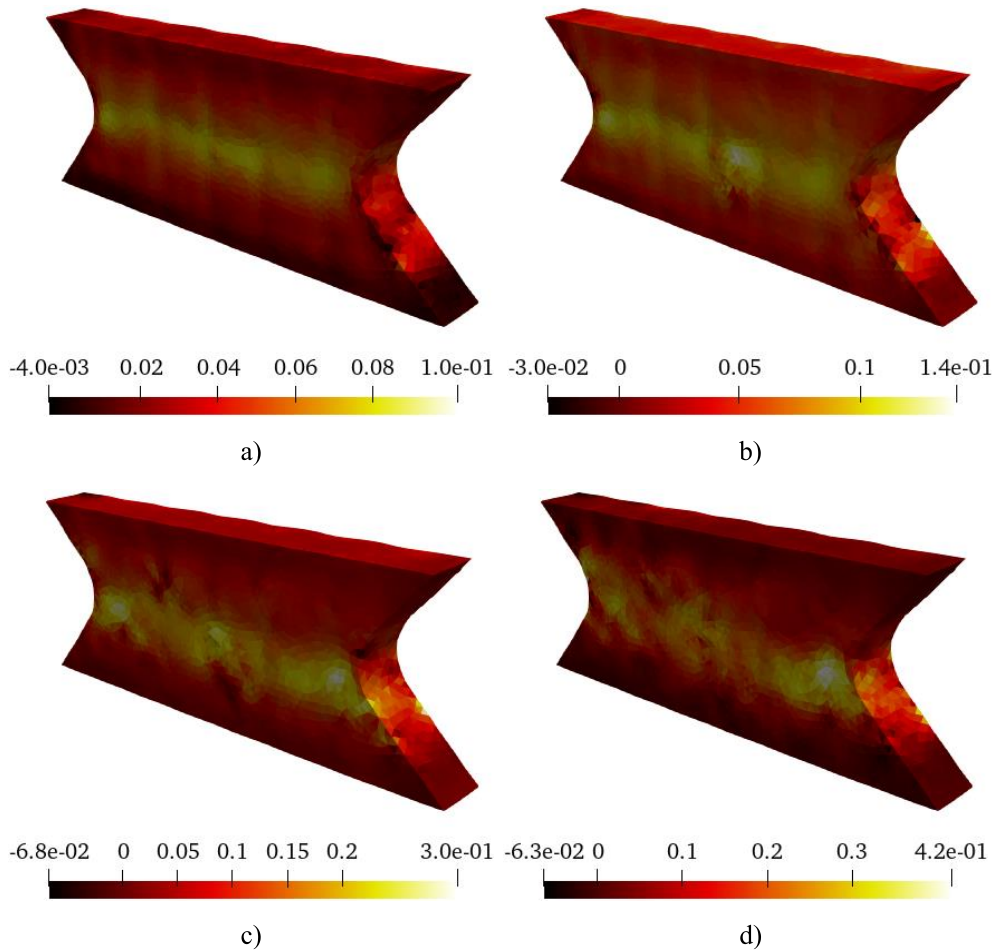
### 5.1.5. DVC analiza monotonog smičnog ispitivanja

Prema Slika 8. ispitni uzorak skeniran je nakon svakog ciklusa opterećenja. Na temelju zabilježenih 2D projekcija kod različitih kutova, rekonstruiran je 3D volumen ispitnog uzorka. Slika 53. prikazuje rekonstruirane volumene nakon svakog ciklusa opterećenja, temeljem kojih se prati razvoj oštećenja ispitnog uzorka, tako Slika 53. a) – e) odgovaraju skenovima 0 – 4 prema Slika 8. Na priloženoj slici, crvenim elipsama označena su mjesta pojave oštećenja u vlačnim zonama. Na skenu nakon prvog ciklusa opterećivanja (Slika 53. b)) može se uočiti kako su nastala prva oštećenja. Na Slika 53. c) plavom elipsom u sredini ispitnog uzorka označeno je mjesto pucanja vlakna koje je prvo nastalo van vlačne zone. Promatranjem svih skenova mogu se uočiti pucanja vlakana, izlazak vlakana iz matrice, pucanje matrice kao i delaminacija. Također na rekonstruiranim volumenima mogu se uočiti fleke uzrokovane nesavršenošću površine ispitnog uzorka.



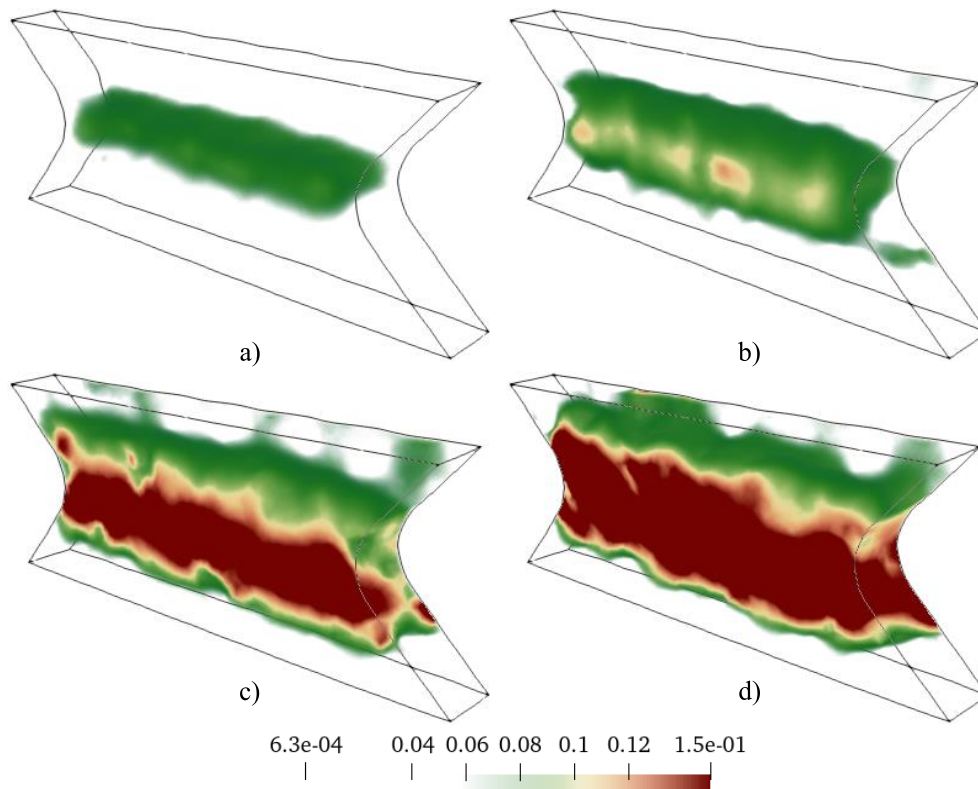
**Slika 53. Rekonstruirani volumeni ispitnog uzorka tijekom monotonog ispitivanja. Skenovi 0 – 4 odgovaraju slikama a) – e).**

Slika 54. prikazuje posmične deformacije izračunate po elementima DVC analizom pomoću *Correli 3.0* algoritma. Slika 54. a) – d) odgovaraju skenovima 1 – 4. Svaki rekonstruirani volumen ima vlastitu mjernu skalu kako bi se pratilo povećanje deformacija sa svakim skeniranjem. Prema Slika 54., najveći iznos posmičnih deformacija nakon prvog ciklusa opterećivanja je  $\approx 8\%$ . Taj iznos posmičnih deformacija je narastao do  $\approx 12\%$  nakon drugog ciklusa opterećivanja, a nakon trećeg je iznosio  $\approx 25\%$ . Nakon završetka monotonog ispitivanja, izračunata je najveća lokalna deformacija iznosa  $\approx 35\%$ .



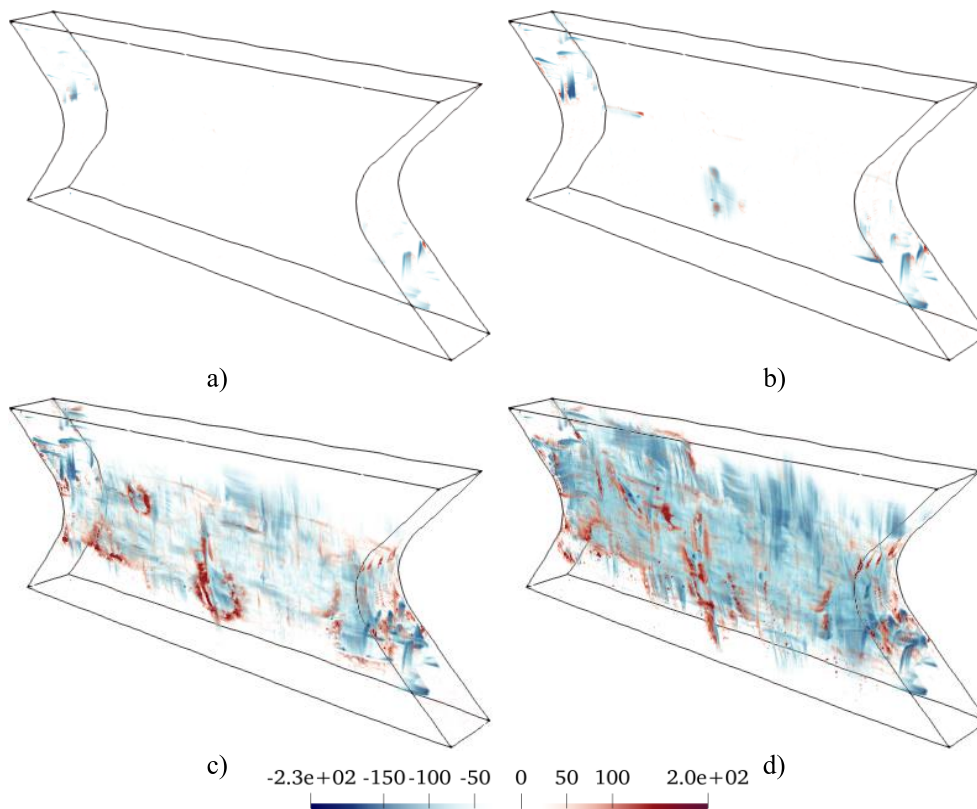
**Slika 54.** Posmične deformacije po elementima izračunate DVC analizom pomoću *Correli 3.0* algoritma za monotono ispitivanje. Skenovi 1 – 4 odgovaraju slikama a) – d).

Slika 55. prikazuje polje posmične deformacije u ispitnom uzorku koje su ograničene na vidljivi raspon deformacija od 6% do 15%. Prikazivanjem deformacija na ovaj način uočava se formacija i razvoj posmične trake. Sa svakim skenom vidi se kako područje lokalizirane posmične trake raste kao i iznosi deformacija. Na kraju monotonog ispitivanja, utjecaj posmične trake se proširio na gotovo cijelu promatranu zonu interesa.



**Slika 55. Posmične deformacije ograničene najmanjom i najvećom deformacijom od 6% i 15% za monotono ispitivanje. Skenovi 1 – 4 odgovaraju slikama a) – d).**

Na Slika 56. prikazani su korelacijski reziduali na promatranom volumenu ispitnog uzorka. Vrijednosti korelacijskih reziduala od -30 do 30 su isključeni iz prikaza budući da su oni na razini šuma. Na Slika 56. a) mogu se uočiti lokalizacije reziduala koju se uzrokovane prvenstveno odvajanjem vlakana u pređi (tj. iniciranjem pukotina) u vlačnoj zoni ispitnog uzorka. Slika 56. b) prikazuje kako su se lokalizacije korelacijskih reziduala u vlačnim zonama proširile kao i porast njihovih iznosa. Osim lokalizacija u vlačnim zonama, može se uočiti i lokalizacija u središtu promatranog volumena što odgovara delaminaciji (vidi Slika 53. b)). Na Slika 56. c) i d) vidi se kako su se područja povišenih korelacijskih reziduala značajno proširila kao i porast njihovog iznosa uzrokovan visokim stupnjem oštećenja ispitnog uzorka.



**Slika 56. Korelacijski reziduali izračunati DVC analizom pomoću *Correli 3.0* algoritma za monotono ispitivanje. Skenovi 1 – 4 odgovaraju slikama a) – d).**

## 5.2. Cikličko smično ispitivanje

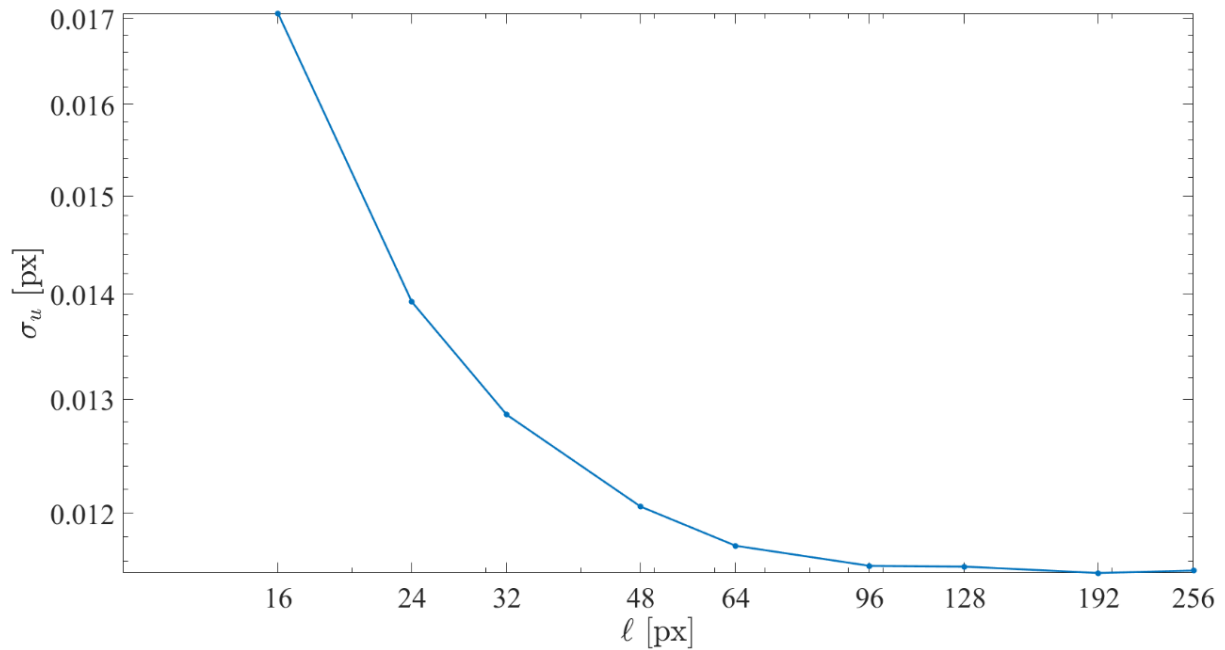
U nastavku su prikazani rezultati cikličkog ispitivanja. Jednako kao i kod rezultata monotonog ispitivanja prvo su prikazane mjerne nesigurnosti DIC i DVC analize nakon čega su prikazana polja pomaka, glavnih najvećih deformacija i korelacijskih reziduala po ciklusima.

### 5.2.1. Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnosti pomaka i deformacija cikličkog ispitivanja određene su na isti način kao i kod monotonog ispitivanja. Naime, prvih 10 slika zabilježeno je u neopterećenom stanju kako bi se odredile mjerne nesigurnosti DIC analize. Za određivanje mjerne nesigurnosti DVC analize zabilježena su tri skena (0, 0-bis i 0-rbm) prije opterećenja uzorka.

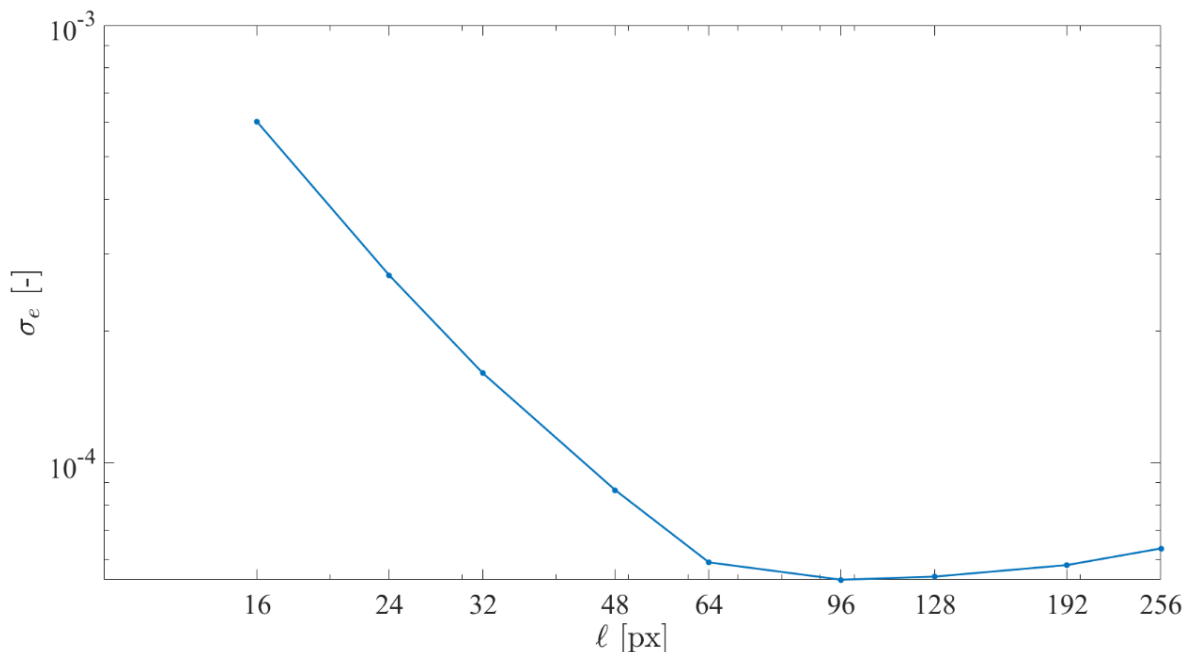
#### 5.2.1.1. Mjerne nesigurnosti DIC analize

Slika 57. prikazuje mjernu nesigurnost pomaka DIC analize za različite veličine elemenata. Jednako kao i na Slika 16. može se uočiti pad mjerne nesigurnosti pomaka s povećanjem elemenata. Međutim, bitno je naglasiti kako veći elementi ne bi mogli pratiti lokalizacije koje nastaju uslijed opterećenja ispitnog uzorka.



**Slika 57. Mjerna nesigurnost pomaka DIC analize cikličkog ispitivanja.**

Na Slika 58. prikazane su mjerne nesigurnosti deformacija DIC analize. Na navedenoj slici ponovno se jasno vidi pad mjerne nesigurnosti deformacija s povećanjem veličine konačnih elemenata. Također, može se uočiti kako kod elemenata većih od 96 px dolazi do saturacije, tj. blagog rasta mjerne nesigurnosti deformacija.

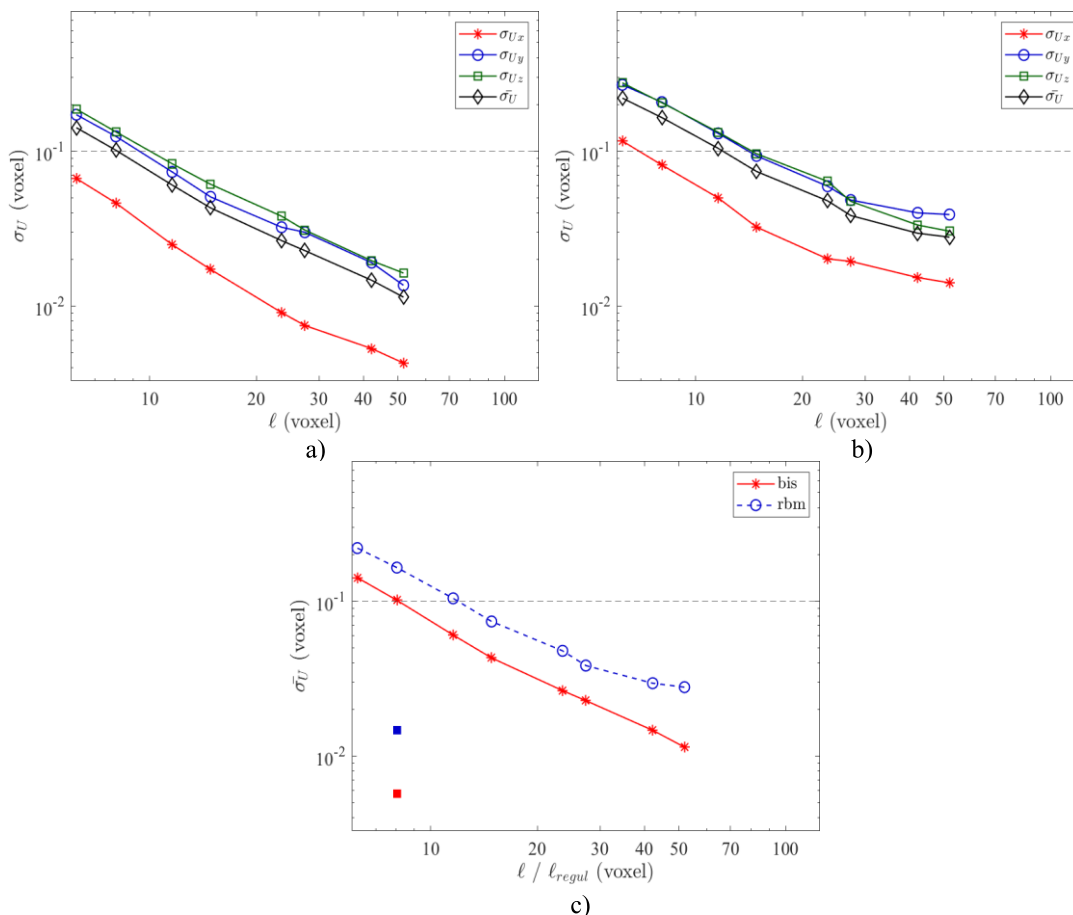


**Slika 58. Mjerna nesigurnost deformacija DIC analize cikličkog ispitivanja.**

#### 5.2.1.2. Mjerna nesigurnost DVC analize

Na Slika 59. prikazane su mjerne nesigurnosti pomaka DVC analize za cikličko ispitivanje. Slika 59. a) prikazuje mjernu nesigurnost pomaka bis skena, Slika 59. b) mjernu

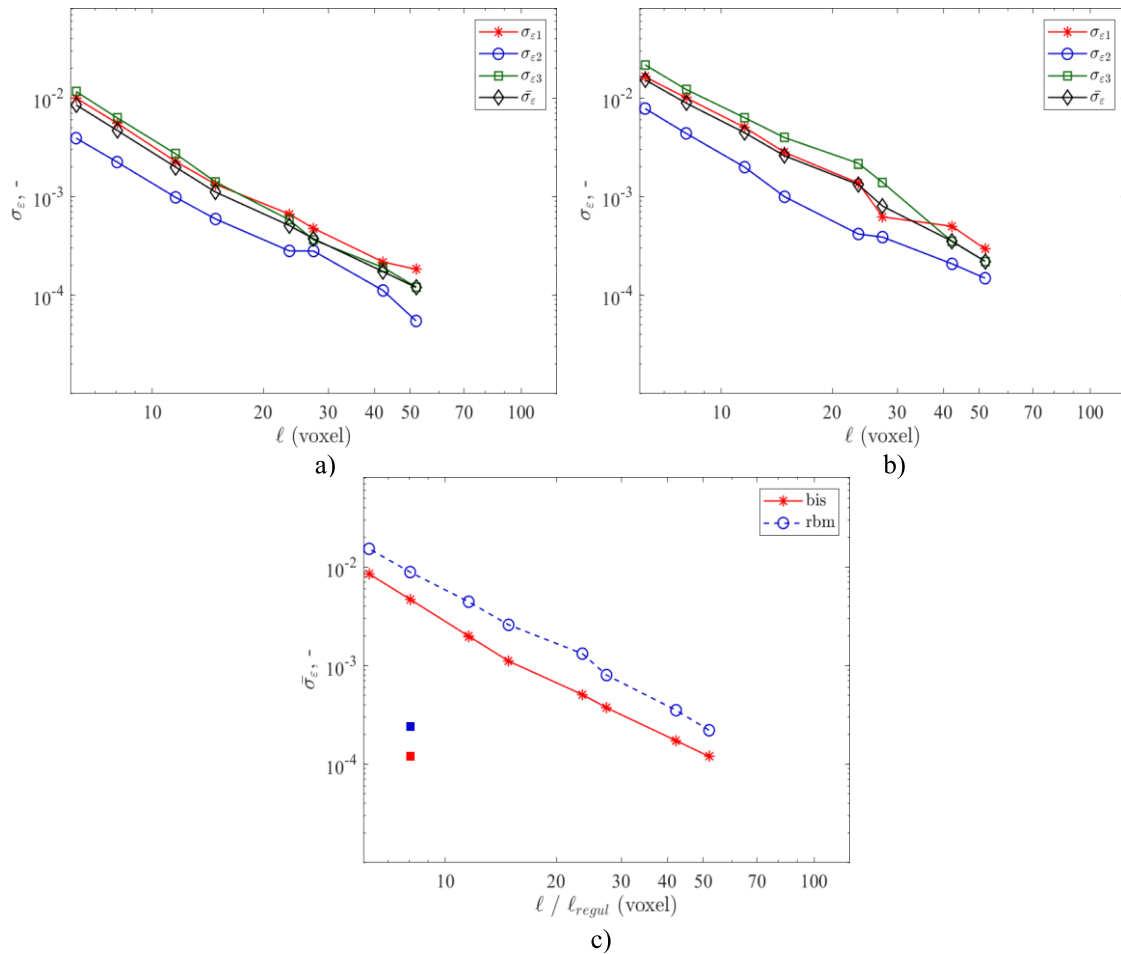
nesigurnost pomaka rbm skena te Slika 59. c) usporedno prikazuje srednje vrijednosti mjerne nesigurnosti pomaka za oba skena s primjenom mehaničke regularizacije od 128 voxela. Budući da se radi o dva popuno odvojena ispitivanja mjerne nesigurnosti su različite. Mjerne nesigurnosti pomaka cikličkog smičnog ispitivanja imaju veće vrijednosti kao i linearniji pad u odnosu na monotono ispitivanje. Također, uočene su i veće vrijednosti srednjih mjernih nesigurnosti kod cikličkog smičnog ispitivanja u odnosu na monotono. Na Slika 18. i Slika 59. vidi se crna isprekidana linija koja predstavlja preporučenu vrijednosti mjerne nesigurnosti pomaka prema [13].



**Slika 59.** Mjerne nesigurnosti pomaka DVC analize za cikličko ispitivanje gdje je a) mjerna nesigurnost pomaka bis skena, b) mjerna nesigurnost pomaka rbm skena te c) usporedba srednjih vrijednosti mjernih nesigurnosti pomaka bis i rbm skena. Crveni i plavi kvadratići označavaju mjernu nesigurnost pomaka za bis i rbm skenove s regularizacijom od 128 voxela.

Naposljetku, na Slika 60. prikazane su mjerne nesigurnosti deformacija DVC analize za cikličko ispitivanje. Slika 60. a) prikazuje mjernu nesigurnost deformacija za bis sken, Slika 60. b) prikazuje mjernu nesigurnost deformacija za rbm sken dok je na Slika 60. c) prikazana usporedba srednjih vrijednosti mjernih nesigurnosti bis i rbm skena. Postavljanjem regularizacije na iznos od 128 voxela došlo je do značajnog pada mjernih nesigurnosti što je prikazano crvenim i plavim kvadratićem za bis i rbm sken.





**Slika 60.** Mjerne nesigurnosti deformacija DVC analize za cikličko ispitivanje gdje je a) mjerna nesigurnost pomaka bis skena, b) mjerna nesigurnost pomaka rbm skena te c) usporedba srednjih vrijednosti mjernih nesigurnosti pomaka bis i rbm skena. Crveni i plavi kvadratići označavaju mjernu nesigurnost deformacija za bis i rbm skenove s regularizacijom od 128 voxela.

5.2.1.3. Usporedba mjernih nesigurnosti monotonog i cikličkog ispitivanja

Tablica 9. usporedno prikazuje mjerne nesigurnosti pomaka za monotono i cikličko ispitivanje. Može se uočiti kako je mjerna nesigurnost pomaka stereo DIC analize najmanja dok je najveća kod DVC analize. Uočava se i kako je mjerna nesigurnost pomaka DIC i stereo DIC analize pri cikličkom ispitivanju manja od mjerne nesigurnosti pomaka pri monotonom ispitivanju dok je kod DVC analize mjerna nesigurnost pomaka kod cikličkog ispitivanja veća od one pri monotonom ispitivanju.

**Tablica 9.** Mjerne nesigurnosti pomaka za monotono i cikličko ispitivanje. Sve vrijednosti su izražene u milimetrima.

	DIC	Stereo DIC	DVC
Monotono	$8,81 \cdot 10^{-4}$	$6,72 \cdot 10^{-4}$	$5,19 \cdot 10^{-3}$
Cikličko	$3,62 \cdot 10^{-4}$	$2,68 \cdot 10^{-4}$	$5,26 \cdot 10^{-4}$

U Tablica 10. usporedno su prikazane mjerne nesigurnosti deformacija za provedene analize. Kao i u slučaju mjernih nesigurnosti pomaka uočeno je kako su mjerne nesigurnosti najveće za DVC analizu. Mjerna nesigurnost deformacija monotonog ispitivanja veća je u odnosu na cikličko ispitivanje za sve provedene analize.

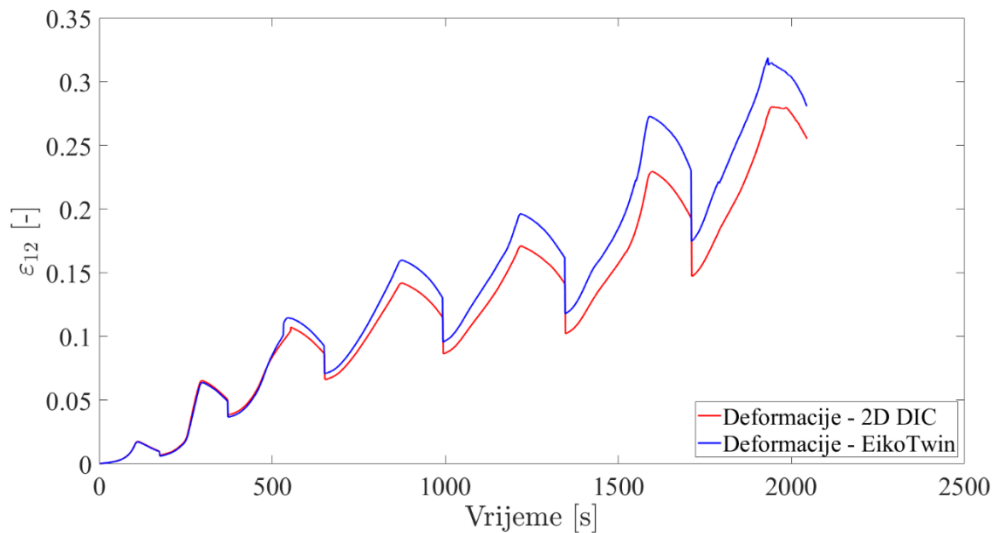
**Tablica 10. Mjerne nesigurnosti deformacija za monotonu i cikličko ispitivanje.**

	DIC	Stereo DIC	DVC
Monotono	$3,01 \cdot 10^{-4}$	$4,22 \cdot 10^{-4}$	$9,58 \cdot 10^{-3}$
Cikličko	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-4}$	$8,88 \cdot 10^{-4}$

Jedan od razloga nastanka razlike između mjerne nesigurnosti pomaka DIC i stereo DIC analize je korištenje različite veličine konačnih elemenata te drukčije strukturirane mreže. Naime, za provođenje DIC analize mreža konačnih elemenata kreirana je pomoću *Correli 3.0* algoritma u kojemu su i provedene analize dok je mreža konačnih elemenata koja je korištena za provođenje stereo DIC analize kreirana u *Abaqus-u*, a analize su provedene pomoću *EikoTwin* algoritma koji nema implementiranu mogućnost kreiranja mreže konačnih elemenata.

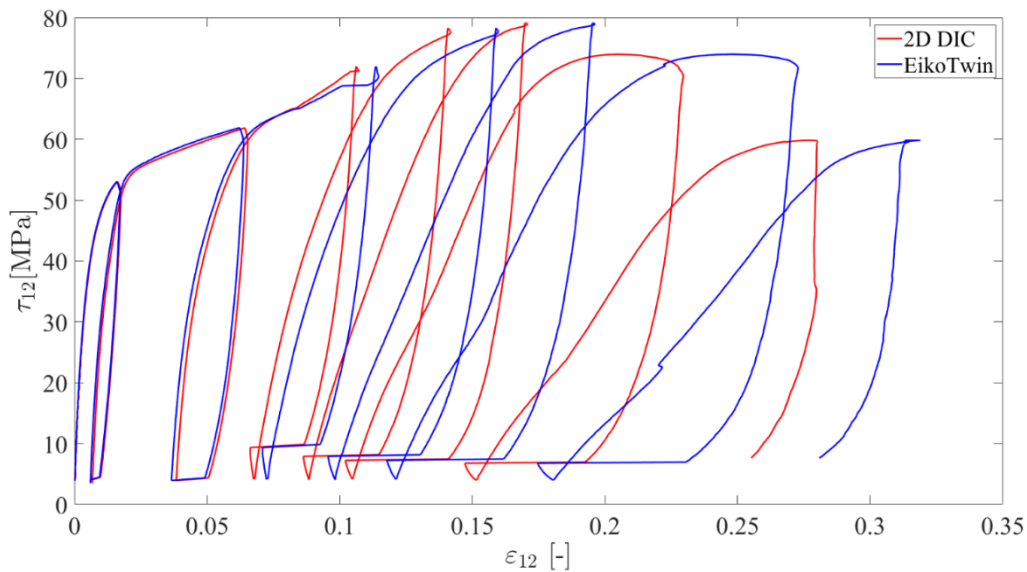
Nakon provedenog monotonog ispitivanja određen je globalni odziv ispitivanog materijala na temelju kojeg su definirana mehanička opterećenja svakog ciklusa cikličkog ispitivanja. Nakon opterećenja slijedilo je rasterećenje te skeniranje ispitnog uzorka jednako kao i kod monotonog ispitivanja. Na Slika 9. prikazan je *ex-situ* eksperimentalni protokol cikličkog ispitivanja koji se sastoji od sedam ciklusa.

Na Slika 61. usporedno su prikazane deformacije izračunate korelacijskim algoritmima *Correli 3.0* i *EikoTwin*. Prema slici vidi se jako dobro poklapanje iznosa deformacija tijekom prva dva te polovice trećeg ciklusa. Pojava razlike u iznosu deformacija uzrokovana je otvaranjem pukotina na površini ispitnog uzorka kao i pojavom izvanravninskih pomaka. Porastom iznosa mehaničkog opterećenja rastu iznosi deformacija te nastaje sve veća razlika između deformacija izračunatih pomoću *Correli 3.0* i *EikoTwin* algoritma.



**Slika 61. Usporedba najvećih glavnih deformacija izračunatih pomoću *Correli 3.0* i *EikoTwin* algoritma za cikličko ispitivanje.**

Slika 62. usporedno prikazuje dijagrame deformacija – naprezanje dobivene pomoću *Correli 3.0* i *EikoTwin* algoritma. Kao i u prethodnom slučaju vidljivo je jako dobro poklapanje dijagrama tijekom prva tri ciklusa. Pri rasterećenju trećeg ciklusa dolazi do pojave razlika u dijagramima koja s povećanjem narintnog mehaničkog opterećenja postaje sve izraženija.

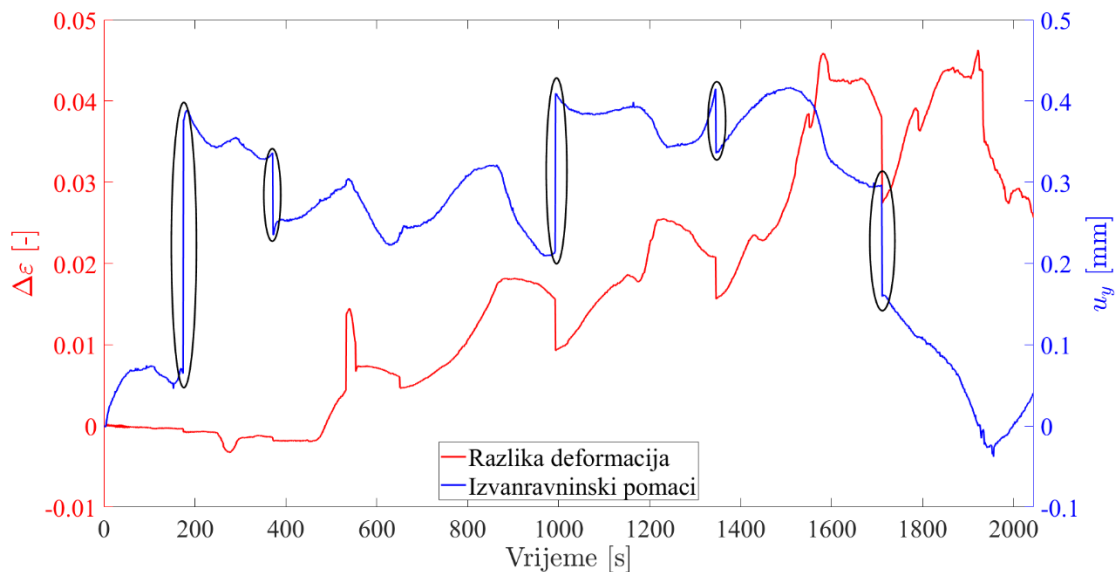


**Slika 62. Dijagram deformacija - naprezanje za cikličko ispitivanje.**

Na navedenom dijagramu bitno je primijetiti kako je nagib krivulje približno jednak samo za prva dva ciklusa dok je ispitni uzorak u linearnom području. Nakon prva dva ciklusa, za svaki slijedeći ciklus pada nagib krivulje zbog smanjivanja modula elastičnosti, tj. degradacije krutosti promatranog materijala.

Razlog pojave razlika u izračunatim deformacijama su izvanravninski pomaci i heterogena mikrostruktura promatranog FRP materijala. Stoga, Slika 63. prikazuje na lijevoj crvenoj osi

iznos razlike deformacija dok desna plava os prikazuje iznos izvanravninskih pomaka tijekom ispitivanja. Crnim elipsama označeni su skokovi izvanravninskih pomaka koji su nastupili uslijed ponovnog postavljanja uzorka u mehanički postav. Kao i kod monotonog testa amplituda izvanravninskih pomaka raste sa svakim novim ciklusom. Važno je napomenuti kako je raspon izvanravninskih pomaka približno jednak 0,5 mm, što nema utjecaj na mjerenja provedena 2D DIC metodom budući da telecentričnost leće dozvoljava i veće izvanravninske pomake a da ne dođe do skaliranja pomaka.

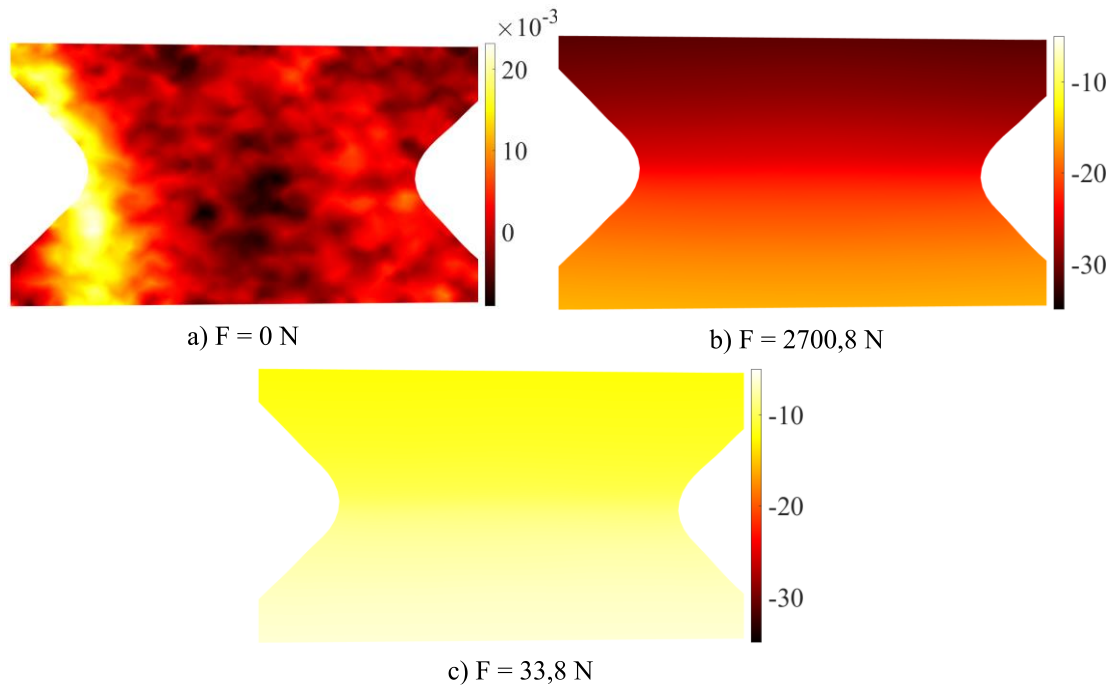


**Slika 63. Razlika deformacija izračunatih 2D DIC i 3D DIC postavom u korelaciji s izvanravninskim pomacima zabilježenim 3D DIC postavom za cikličko ispitivanje.**

Nakon prikazanog globalnog odziva materijala tijekom cikličkog ispitivanja u nastavku su usporedno prikazana polja pomaka, najvećih glavnih deformacija i korelacijskih reziduala izračunata korelacijskim algoritmima *Correli 3.0* i *EikoTwin* tijekom provedenih sedam ciklusa.

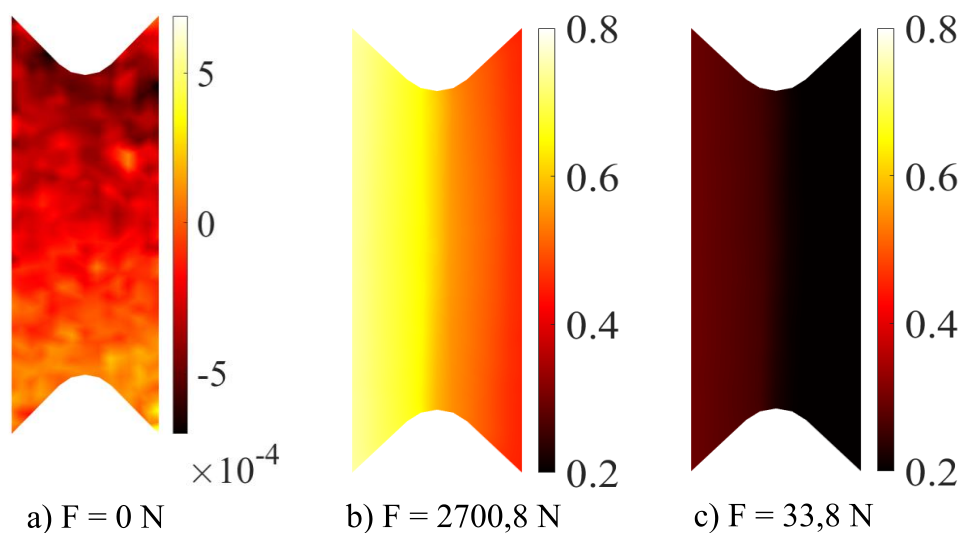
### 5.2.2. *Ciklus 1*

Najveće mehaničko opterećenje prvog ciklusa bilo je iznosa sile  $F = 2700,8$  N. Slika 64. prikazuje polje pomaka u  $x$ -smjeru izmjereno pomoću *Correli 3.0* algoritma. Slika 64. a) prikazuje polje pomaka izmjereno u neopterećenom stanju na kojemu se vidi stohastička raspodjela pomaka na razini mjerne nesigurnosti. Pri najvećem iznosu sile prvog ciklusa dolazi do formiranja dviju zona. Tako se prema Slika 64. b) vidi da je donji dio promatranog područja nepomičan dok se gornji dio pomiče. Rasterećenjem ispitni uzorka vraća se u početni položaj s neznatnim zaostalim pomacima, prema Slika 64. c).



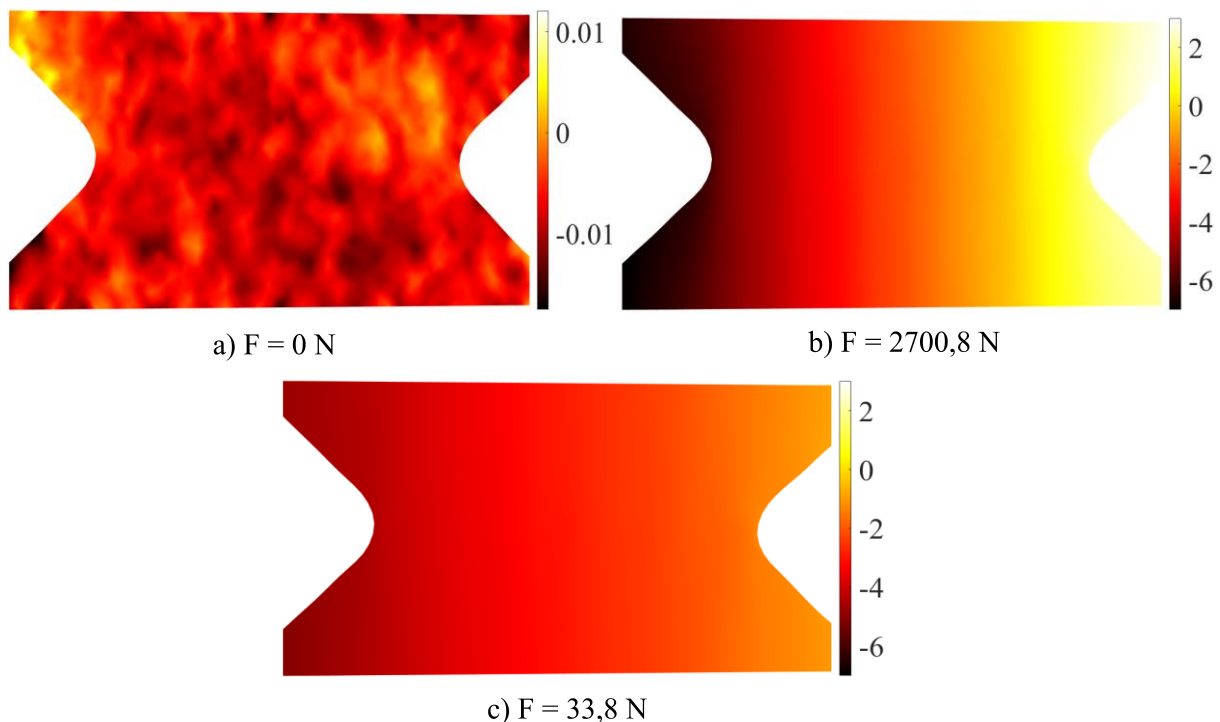
**Slika 64.** Polja pomaka u  $x$ -smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za prvi ciklus cikličkog ispitivanja.

Na Slika 65. prikazano je polje pomaka u  $x$ -smjeru izmjereno pomoću *EikoTwin* algoritma. Usporedbom s poljima pomaka izmjenjenim pomoću *Correli* algoritma može se uočiti jednaka raspodjela polja pomaka. Također, ukoliko se uspoređi najveći iznos polja pomaka izmjenjen pomoću *Correli 3.0* od  $\approx 30 \text{ px}$ , odnosno preračunavanjem  $\approx 0,8 \text{ mm}$  s najvećim iznosom polja pomaka izmjenjenim pomoću *EikoTwin*-a  $\approx 0,8 \text{ mm}$  zaključuje se kako se polja pomaka približno poklapaju.

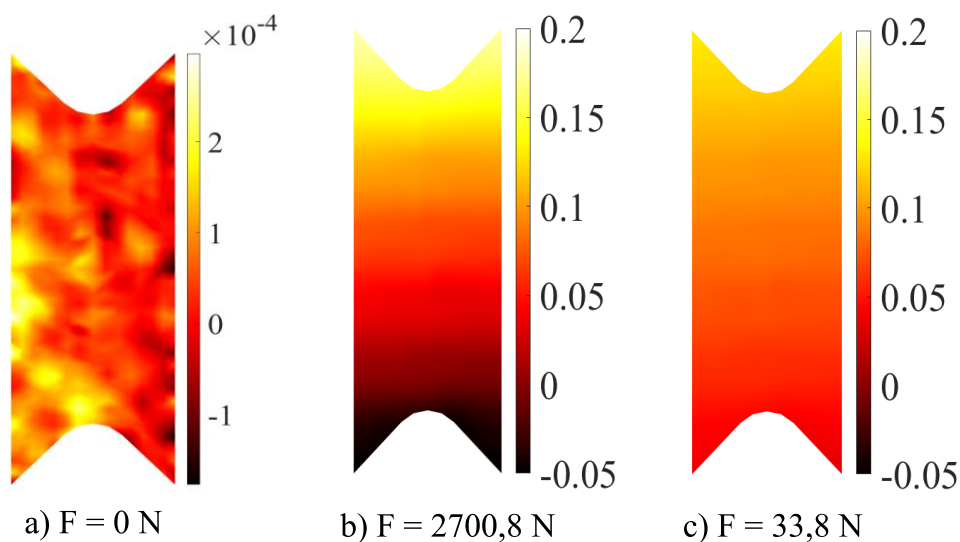


**Slika 65.** Polja pomaka u  $x$ -smjeru izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za prvi ciklus cikličkog ispitivanja.

Slika 66. i Slika 67. prikazuju polja pomaka u  $y$ -smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* i *EikoTwin* algoritma. Budući da je mehaničko opterećenje narinuto u  $x$ -smjeru iznosi polja pomaka u  $y$ -smjeru znatno su manji od prethodno prikazanih pomaka u  $x$ -smjeru.

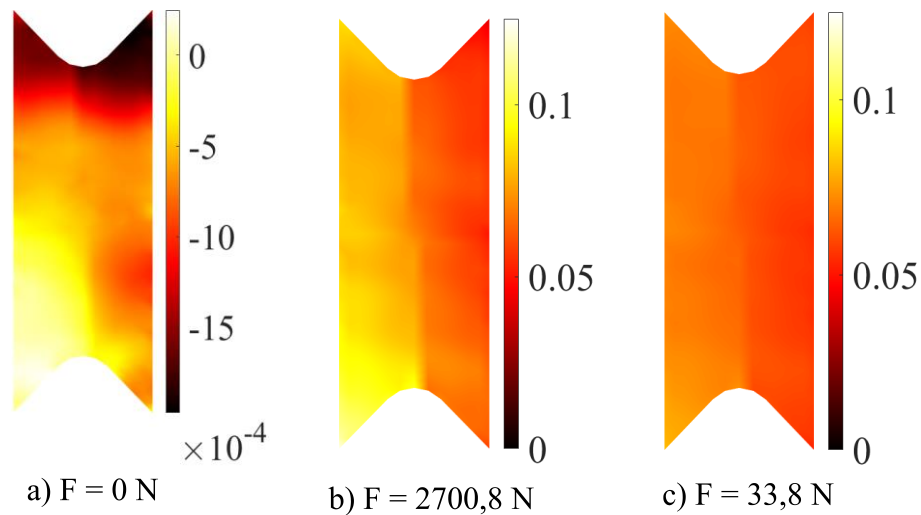


**Slika 66.** Polja pomaka u  $y$ -smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za prvi ciklus cikličkog ispitivanja.



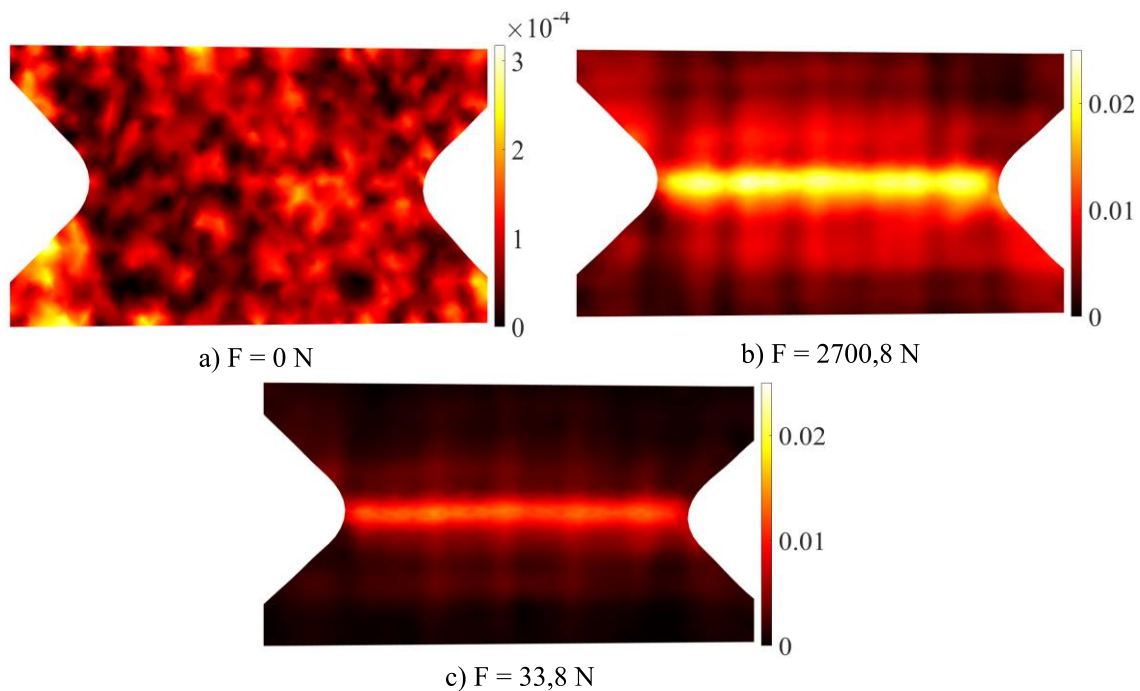
**Slika 67.** Polja pomaka u  $y$ -smjeru izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za prvi ciklus cikličkog ispitivanja.

Na Slika 68. prikazana su izmjerena polja izvanravninskih pomaka pomoću *EikoTwin* algoritma za prvi ciklus. Pri najvećem opterećenju prvog ciklusa najveći izvanravninski pomak manji je od 0,1 mm što se može smatrati zanemarivim.



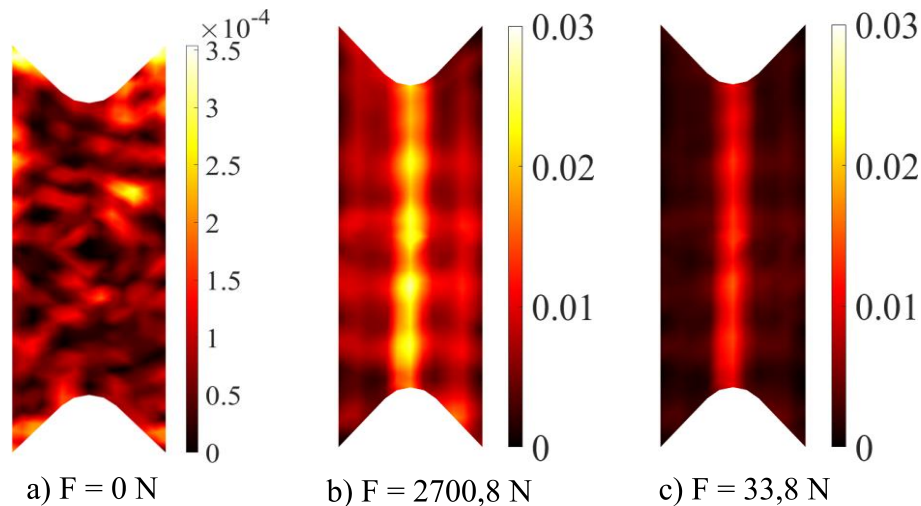
**Slika 68.** Polja izvanravninskih pomaka izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za prvi ciklus cikličkog ispitivanja.

Iz prikazanih polja pomaka izračunata su polja najvećih glavnih deformacija. Slika 69. prikazuje polja najvećih glavnih deformacija prvog ciklusa izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma. Na Slika 69. a) prikazano je polje najvećih glavnih deformacija sa stohastičkom raspodjelom koje je izračunato za neopterećeno stanje te su deformacije na razini mjerne nesigurnosti. Najveće opterećenje izazvalo je najveće glavne deformacije od 0,025, tj. 2,5%. Prema Slika 69. b) vidi se formacija posmične trake u kojoj su povišeni iznosi deformacija. Nakon rasterećenja ispitnog uzorka iznos zaostalih deformacija je  $\approx 0,01$  odnosno 1%. Također, može se uočiti raspored WF pređa u promatranom području ispitnog uzorka.



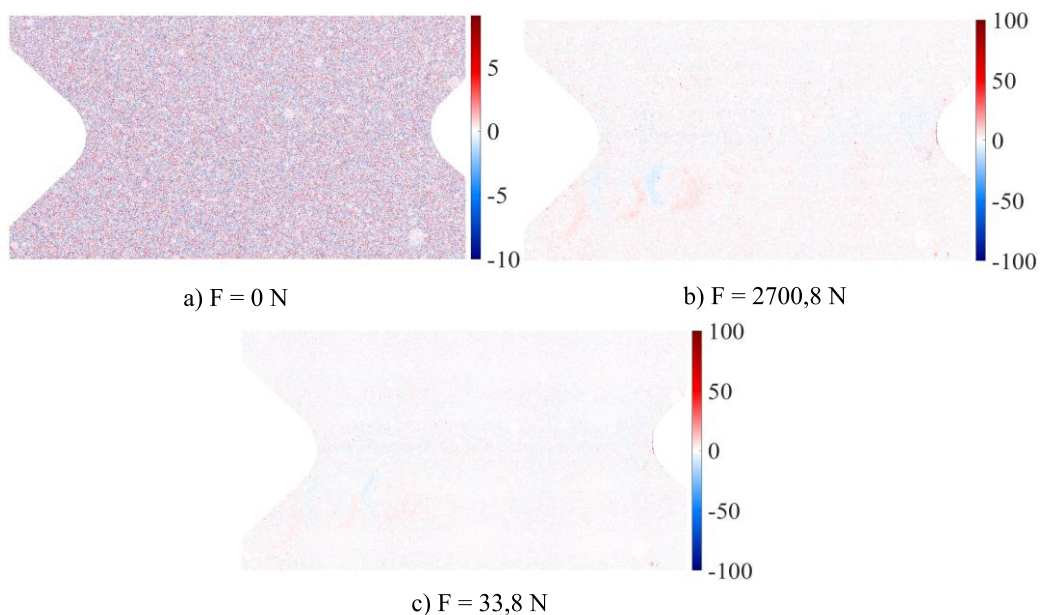
**Slika 69.** Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *Correli 3.0* za prvi ciklus cikličkog ispitivanja.

Polja najvećih glavnih deformacija prvog ciklusa izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma prikazana su na Slika 70. Kao i na polju najvećih glavnih deformacija izračunatih pomoću *Correli 3.0* algoritma formirala se posmična traka povišenih deformacija. Budući da je i ovdje maksimalni iznos glavnih deformacija  $\approx 0,025$  zaključuje se kako se polja glavnih deformacija prvog ciklusa približno poklapaju.



**Slika 70. Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma za prvi ciklus cikličkog ispitivanja.**

Naposljetku, Slika 71. prikazuje polja korelacijskih reziduala prvog ciklusa. Na Slika 71. a) polje korelacijskih reziduala ima vrlo niske vrijednosti što je očekivano budući da nije narinuto mehaničkog opterećenje. Na Slika 71. b) i c) nema lokalizacije korelacijskih reziduala što ukazuje da u prvom ciklusu nije došlo do iniciranja površinskog oštećenja.

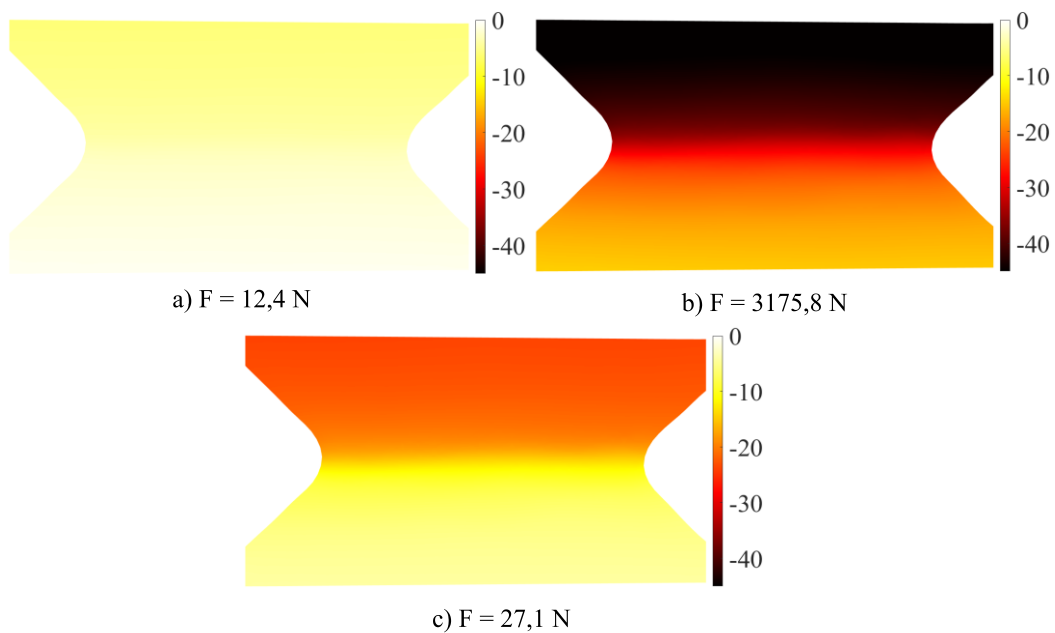


**Slika 71. Polja korelacijskih reziduala izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma za prvi ciklus cikličkog ispitivanja.**

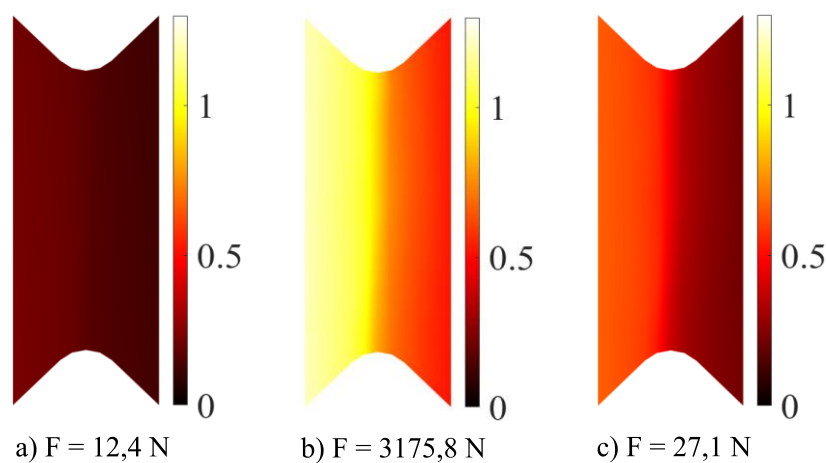


### 5.2.3. Ciklus 2

U drugom ciklusu najveće mehaničko opterećenje bilo je kod iznosa sile  $F = 3175,8 \text{ N}$  nakon čega je uzorak rasterećen. Na Slika 72. i Slika 73. prikazana su polja pomaka u  $x$ -smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* i *EikoTwin* algoritma. S obzirom na neznatan iznos mehaničkog opterećenja na početku ciklusa vrijednosti polja pomaka približno su nula, prema Slika 72. a) i Slika 73. a). Pri najvećem iznosu opterećenja može se uočiti diskontinuitet na najužem dijelu promatranog područja koji ga dijeli. Rasterećenjem uzorka smanjuje se iznosa pomaka, međutim uslijed plastifikacije ispitnog uzorka ne dolazi do potpunog vraćanja u početno stanje. Najveći iznosi pomaka povećali su se u odnosu na prvi ciklus.

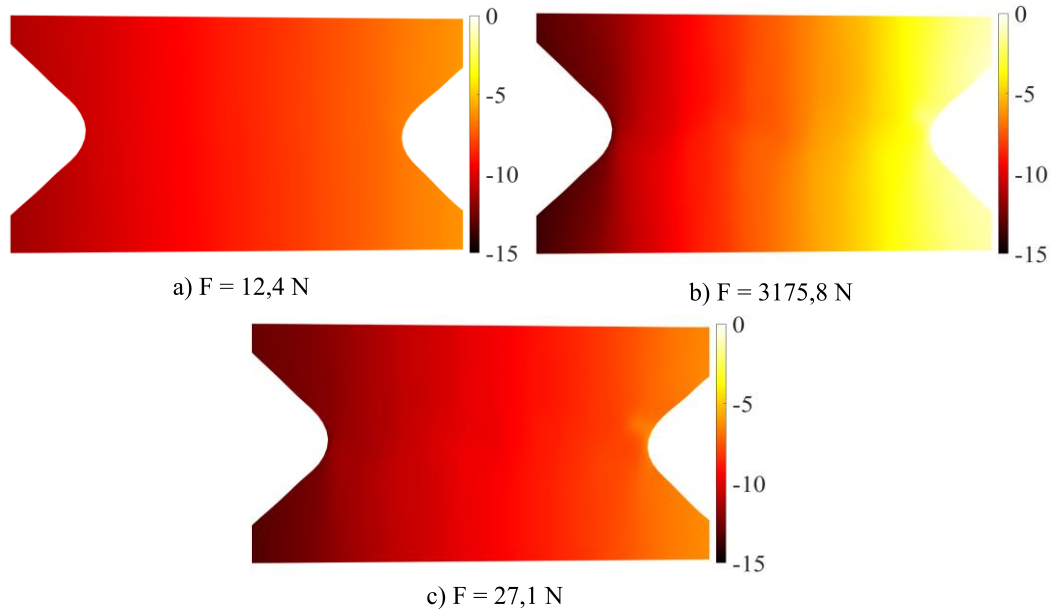


**Slika 72.** Polja pomaka u  $x$ -smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za drugi ciklus cikličkog ispitivanja.

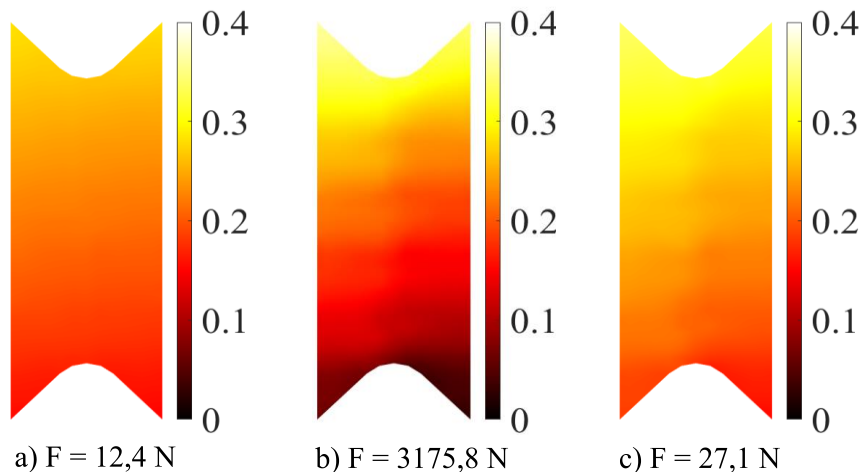


**Slika 73.** Polja pomaka u  $x$ -smjeru izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za drugi ciklus cikličkog ispitivanja.

Polja pomaka u y-smjeru za drugi ciklus prikazana su na Slika 74. i Slika 75. Usporedbom polja pomaka izmjerenih pomoću *Correli 3.0* i *EikoTwin* algoritma uočene su slične raspodjele pomaka. Zbog povećanja mehaničkog opterećenja dolazi do većih pomaka u odnosu na prvi ciklus.

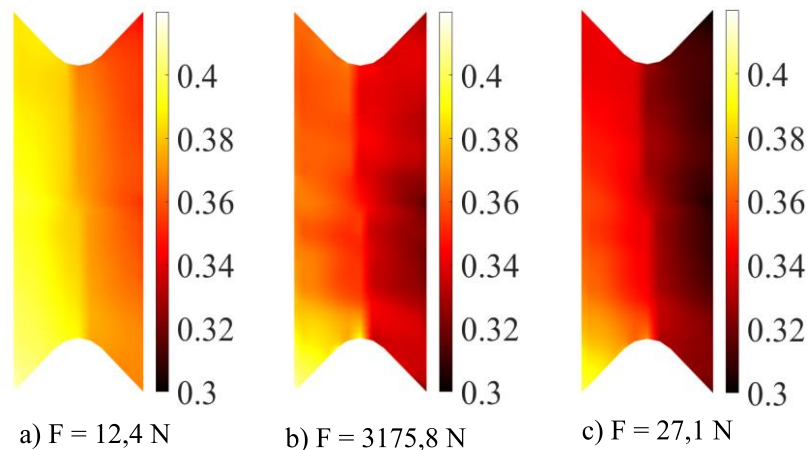


**Slika 74.** Polja pomaka u y-smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za drugi ciklus cikličkog ispitivanja.



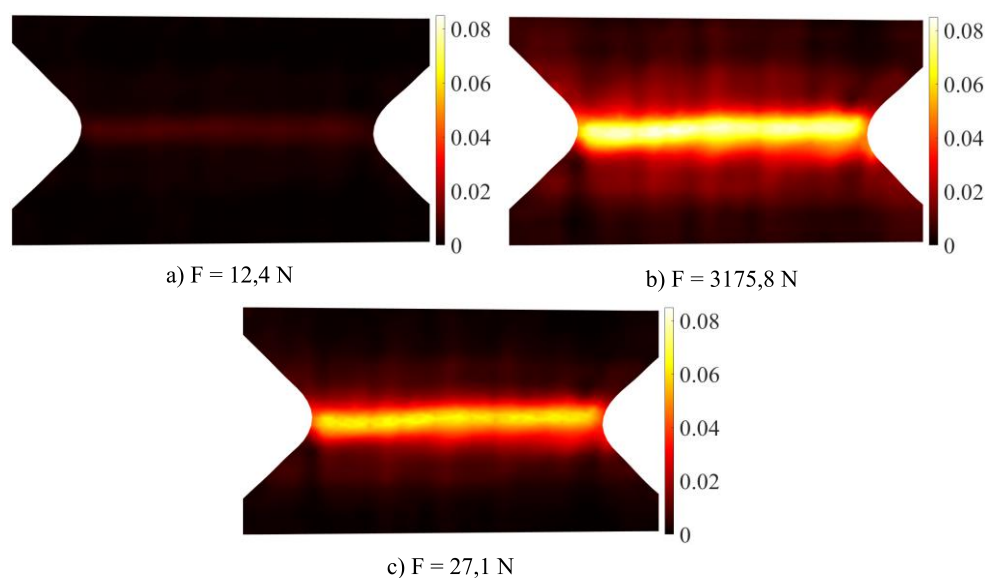
**Slika 75.** Polja pomaka u y-smjeru izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za drugi ciklus cikličkog ispitivanja.

Na Slika 76. prikazana su polja izvanravninskih pomaka drugog ciklusa izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma. Usporedbom amplitude izvanravninskih pomaka prvog i drugog ciklusa uočeno je kako su one približno jednake. Međutim, apsolutni iznosi znatno su narasli što je uzrokovano nešto drugačijim postavljanjem ispitnog uzorka u Arcan prihvat. Odnosno tijekom drugog ciklusa ispitni uzorak postavljen je bliže 3D DIC postavu zbog čega se povećao iznos izvanravninskih pomaka.

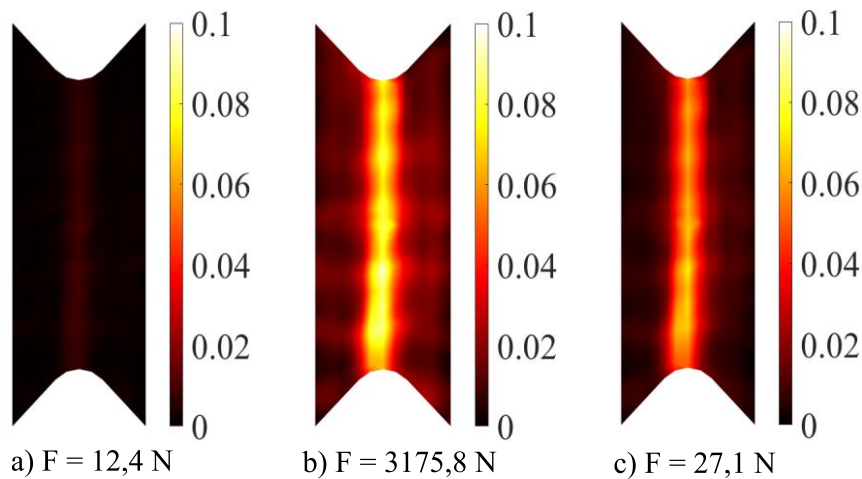


**Slika 76. Polja izvanravninskih pomaka izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za drugi ciklus cikličkog ispitivanja.**

Iz prikazanih polja pomaka izračunata su polja najvećih glavnih deformacija drugog ciklusa pomoću *Correli 3.0* algoritma. Na Slika 77. a) prikazane su zaostale deformacije prvog ciklusa. Slika 77. b) jasno prikazuje posmičnu traku lokaliziranih deformacija kao i u prvom ciklusu. Međutim, s obzirom na rast mehaničkog opterećenja rastao je i iznos najvećih glavnih deformacija s 2,5% na  $\approx 0,08$ , tj. 8%. Nakon rasterećenja uzorka smanjile su se deformacije, ali zaostale deformacije drugog ciklusa znatno se veće nego prvog ciklusa. Osim formirane posmične trake s izraženim deformacijama nazire se i raspored staklenih pređa koja preuzimaju mehaničko opterećenje. Na Slika 78. prikazana su polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma. Budući da je i pomoću *EikoTwin* algoritma najveći iznos glavnih deformacija približno 8% te raspodjela polja jednaka zaključuje se kako se i u drugom ciklusu polja glavnih deformacija približno poklapaju.

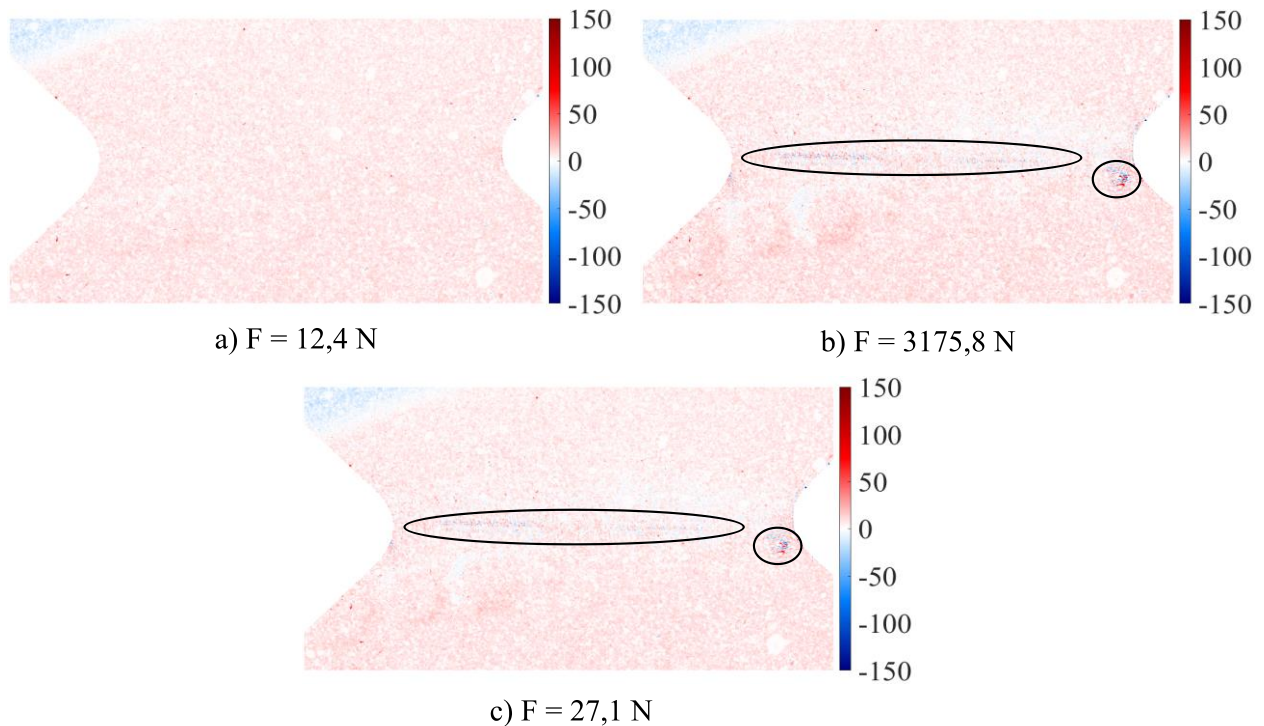


**Slika 77. Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma za drugi ciklus cikličkog ispitivanja.**



**Slika 78.** Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma za drugi ciklus cikličkog ispitivanja.

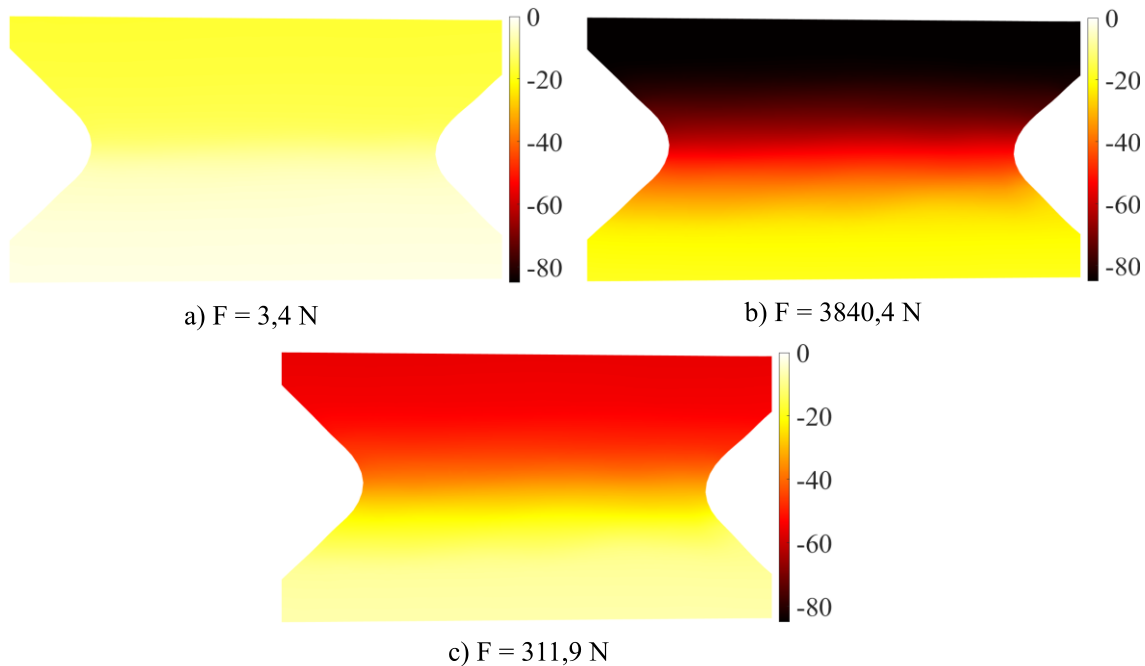
Slika 79. prikazuje polja korelacijskih reziduala drugog ciklusa izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma. Budući da se na polju glavnih deformacija formirala posmična traka povišenih deformacija i na polju korelacijskih reziduala nazire se linija povišenih korelacijskih reziduala na najužem dijelu ispitnog uzorka što je označeno crnom elipsom. Međutim, crnim kružićem označeno je i jedno manje područje lokaliziranih korelacijskih reziduala. Budući da su se pojavila područja povišenih iznosa korelacijskih reziduala može se zaključiti kako je na površini ispitnog uzorka došlo do otvaranja pukotina u vlačnoj zoni.



**Slika 79.** Polja korelacijskih reziduala izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma za drugi ciklus cikličkog ispitivanja.

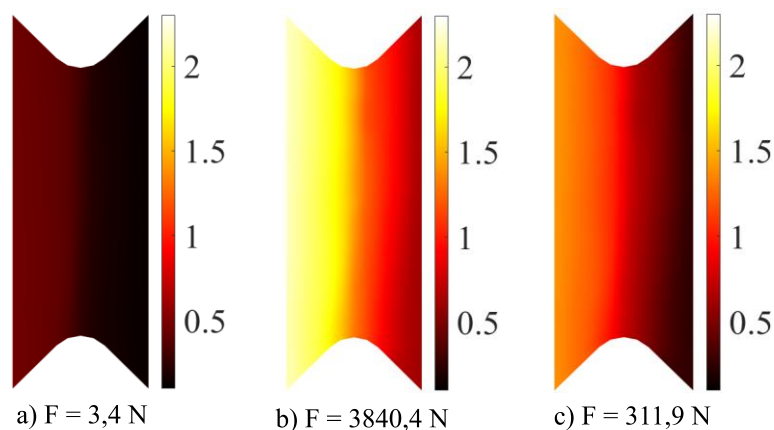
### 5.2.4. Ciklus 3

U trećem ciklusu maksimalno mehaničko opterećenje iznosilo je  $F=3840,4$  N. Slika 80. prikazuje polje pomaka u  $x$ -smjeru izmjereno pomoću *Correli 3.0* algoritma. Na početku ciklusa vrijednosti pomaka približno su jednaki nuli, prema Slika 80. a). Pri maksimalnom opterećenju kao i u prethodna dva ciklusa jasno se vidi diskontinuitet koji dijeli promatrano područje na pomični i nepomični dio. Rasterećenjem uzorka dolazi do njegovog vraćanja u početni položaj.



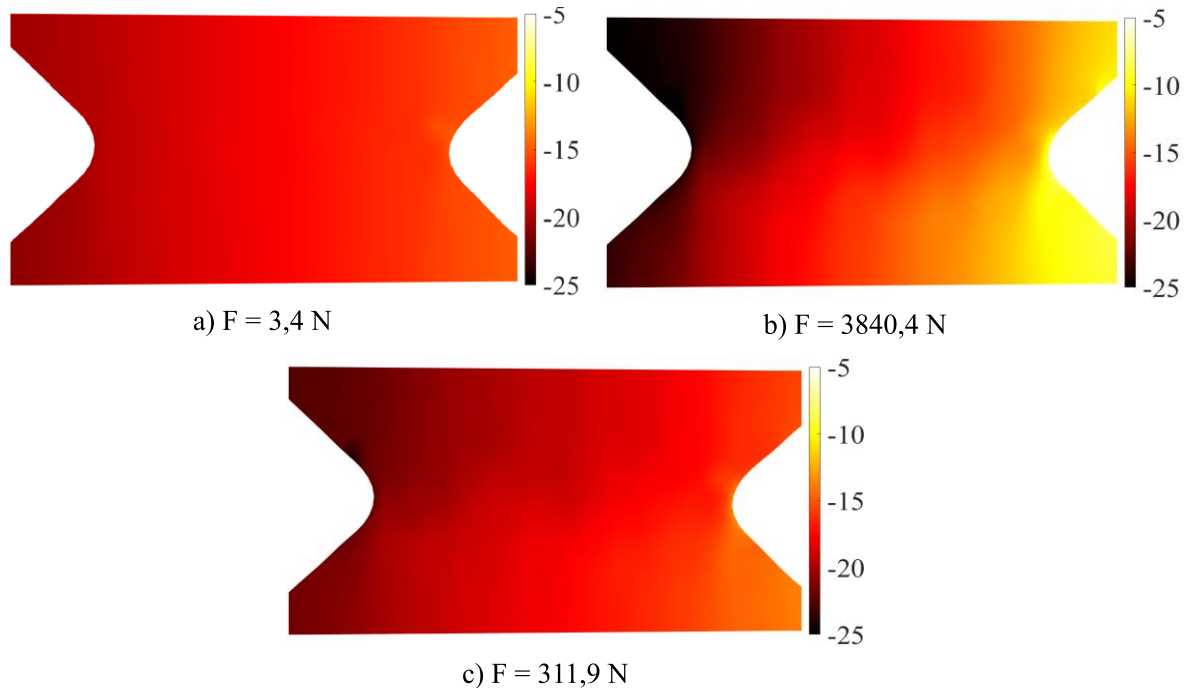
**Slika 80.** Polja pomaka u  $x$ -smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za treći ciklus cikličkog ispitivanja.

Slika 81. prikazuje polje pomaka u  $x$ -smjeru izmjereno pomoću *EikoTwin* algoritma. Izmjereno polje pomaka približno odgovara prethodno predstavljenom polju pomaka izmjenom pomoću *Correli 3.0*.

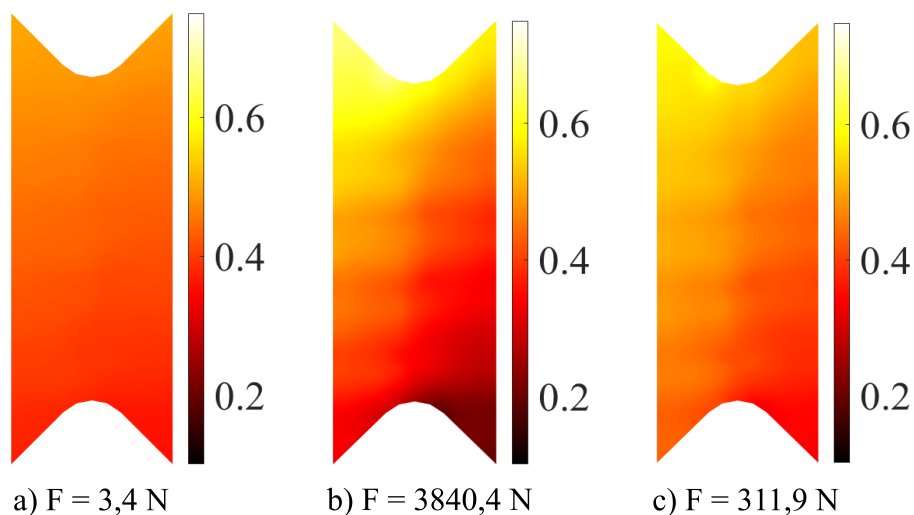


**Slika 81.** Polja pomaka u  $x$ -smjeru izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za treći ciklus cikličkog ispitivanja.

Slika 82. i Slika 83. prikazuju polja pomaka u y-smjeru. Najveći iznos polja pomaka u y-smjeru iznosi približno 0,6 mm ili  $\approx 24$  px što znači da se iznosi izmjereni pomoću *Correli 3.0* i *EikoTwin* poklapaju. Raspodjela pomaka je u oba slučaja slična. Međutim, na kraju trećeg ciklusa ne dolazi do potpunog vraćanja ispitnog uzorka u početni položaj.

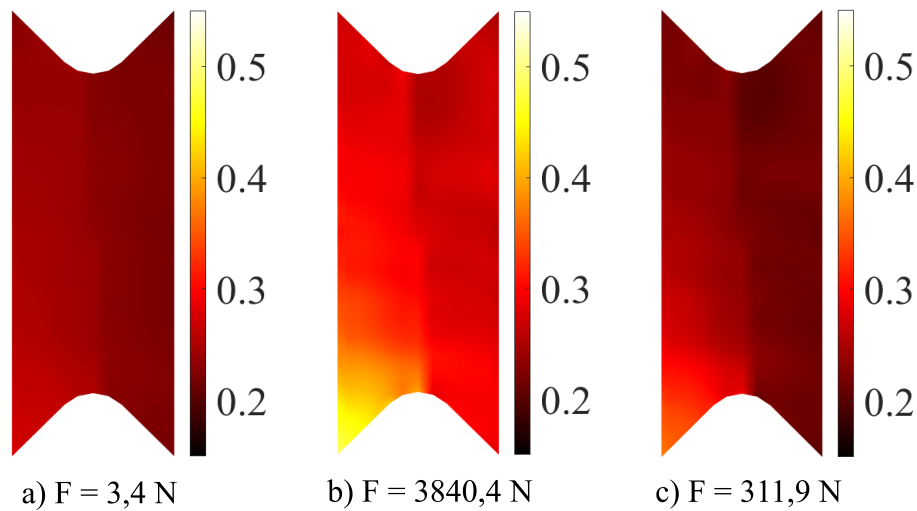


**Slika 82.** Polja pomaka u y-smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za treći ciklus cikličkog ispitivanja.



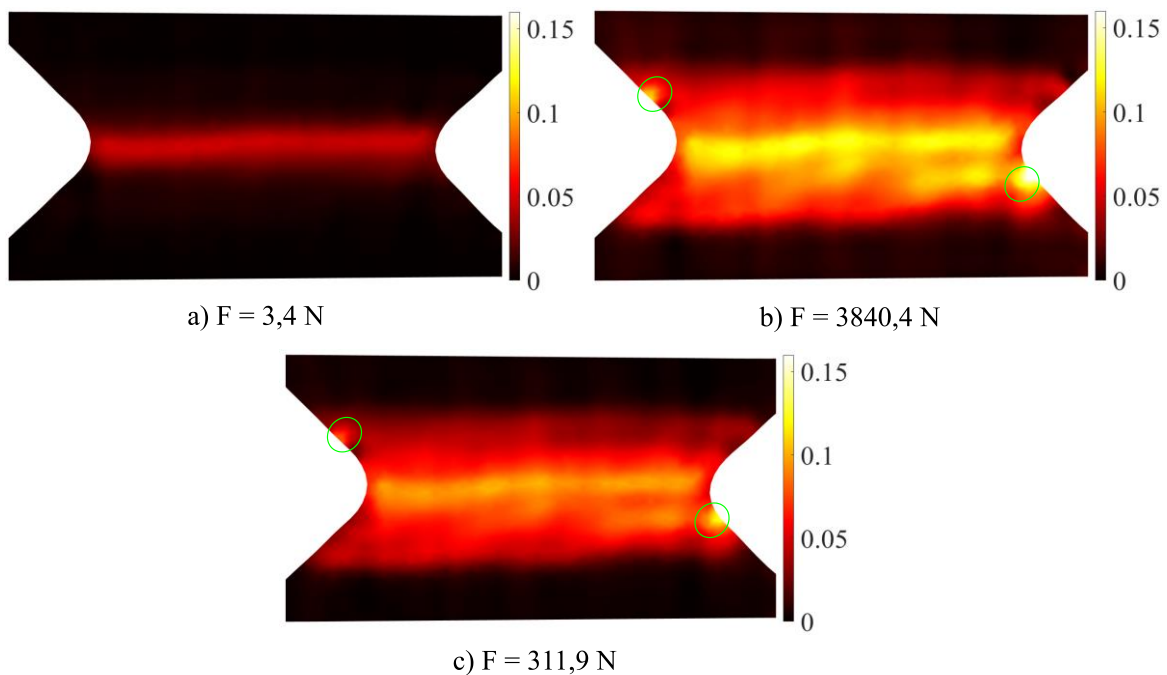
**Slika 83.** Polja pomaka u y-smjeru izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za treći ciklus cikličkog ispitivanja.

Na Slika 84. prikazana su polja izvanravninskih pomaka trećeg ciklusa. Za razliku od prva dva ciklusa, u trećem je nastupilo povećanje amplitude izvanravninskih pomaka. Povećanje amplitude izvanravninskih pomaka ukazuje da se u ispitnom uzorku iniciraju oštećenja koja su praćena izvanravninskim pomacima.

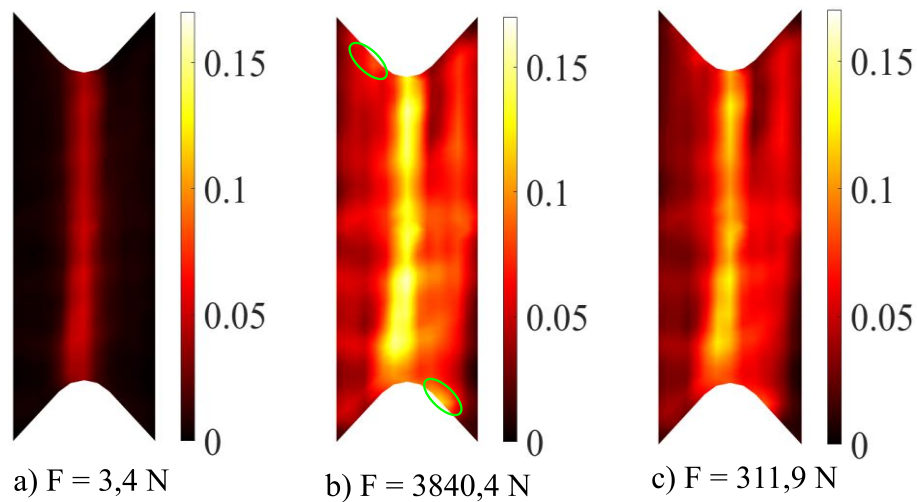


**Slika 84.** Polja izvanravninskih pomaka izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za treći ciklus cikličkog ispitivanja.

Slika 85. i Slika 86. prikazuju polja najvećih glavnih deformacija trećeg ciklusa. Na Slika 85. a) i Slika 86. a) uočavaju se već značajne zaostale deformacije od  $\approx 5\%$ . Povećanje mehaničkog opterećenja u trećem ciklusu rezultiralo je značajnim širenjem posmične trake povišenih deformacija, što se vidi na Slika 85. b) i Slika 86. b). Osim širenja posmične trake uočena su i nova lokalizacijska područja koje su označene zelenim elipsama. Najveći iznos najvećih glavnih deformacija trećeg ciklusa je u oba korelacijska algoritma približno jednak te iznosi  $\approx 0,15$ . Rasterećenjem ispitnog uzorka iznos deformacija pada, međutim lokalizacijska područja su i dalje vidljiva.

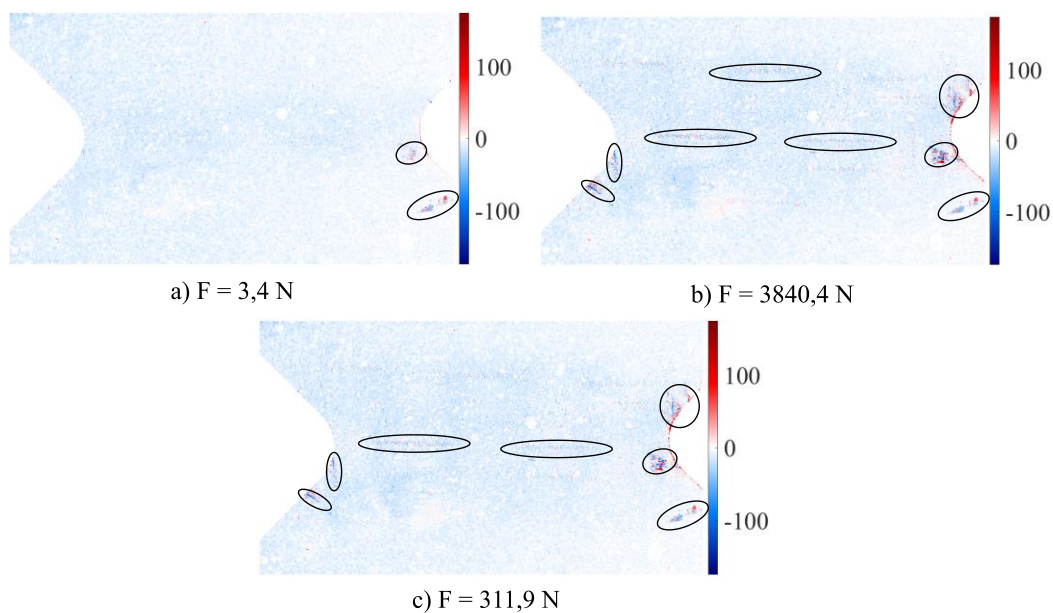


**Slika 85.** Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma za treći ciklus cikličkog ispitivanja.



**Slika 86. Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma za treći ciklus cikličkog ispitivanja.**

Slika 87. prikazuje polja korelacijskih reziduala trećeg ciklusa. Na slici se vide područja lokaliziranih korelacijskih reziduala koja su označena crnim elipsama. Pri najvećem opterećenju trećeg ciklusa stvaraju se nova područja lokalizacije koja upućuju na oštećenja uzorka. Nekoliko je različitih mjesta na kojima se javljaju oštećenja. Već na početku trećeg ciklusa postoji oštećenje pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na uzdužnu os uzorka. Pri najvećem opterećenju javlja se simetrično oštećenje na drugoj strani uzorka. Isto tako u vrhovima zarezava pojavile su se vertikalne lokalizacije. Na kraju, vide se i horizontalna lokalizacijska područja koja su duža, ali i manjeg intenziteta. Rasterećenjem uzorka smanjuje se intenzitet navedenih područja, ali pojedina iščezavaju.

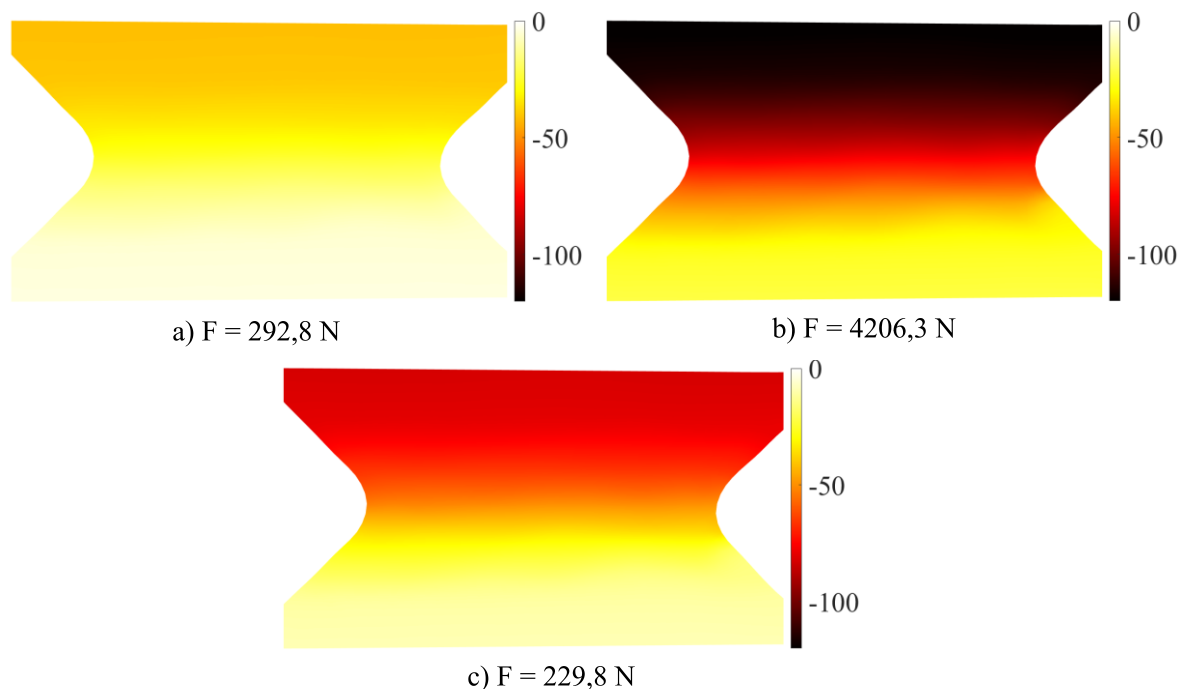


**Slika 87. Polja korelacijskih reziduala izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma za treći ciklus cikličkog ispitivanja.**

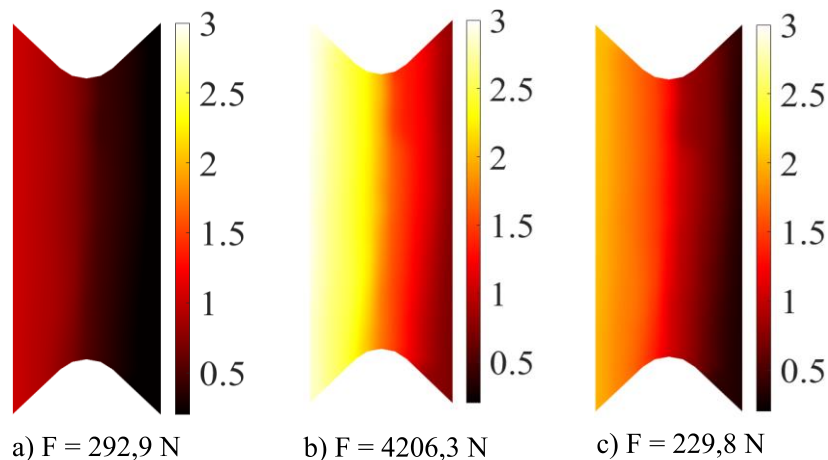


### 5.2.5. Ciklus 4

Najveće mehaničko opterećenje četvrtog ciklusa iznosilo je  $F = 4206,3$  N. Povećano opterećenje dovelo je do rasta pomaka kao i do širenja posmične trake. S obzirom da se ispitni uzorak plastično deformirao, iznosi zaostalih pomaka su se povećali. Slika 88. prikazuje polje pomaka u  $x$ -smjeru četvrtog ciklusa. Raspodjela polja pomaka slična je kao i u prethodnim ciklusima. Međutim, došlo je do povećanja pomaka te najveći pomak četvrtog ciklusa iznosi  $\approx 3$  mm, odnosno  $\approx 115$  px čime se uočava da je najveći pomak izmjeren pomoću oba algoritma jednak. Na Slika 89. prikazano je polje pomaka izmjereno pomoću *EikoTwin* algoritma. Raspodjela polja pomaka kao i maksimalni pomak približno se poklapaju i za ovaj ciklus.

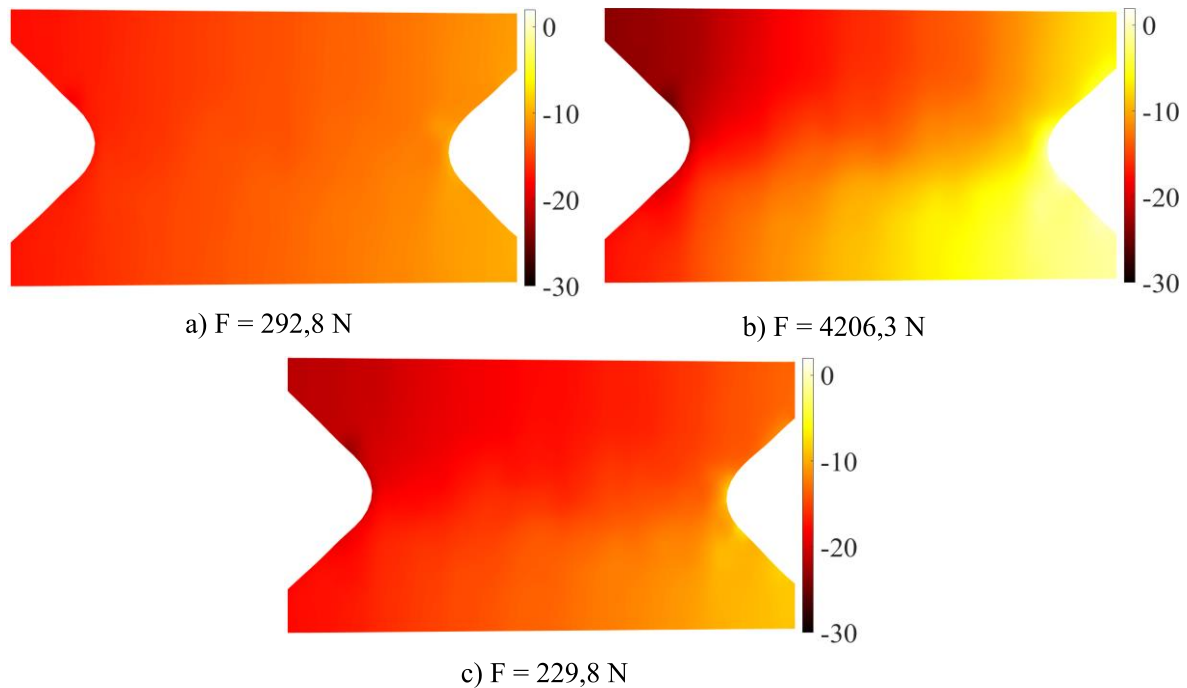


**Slika 88.** Polja pomaka u  $x$ -smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za četvrti ciklus cikličkog ispitivanja.

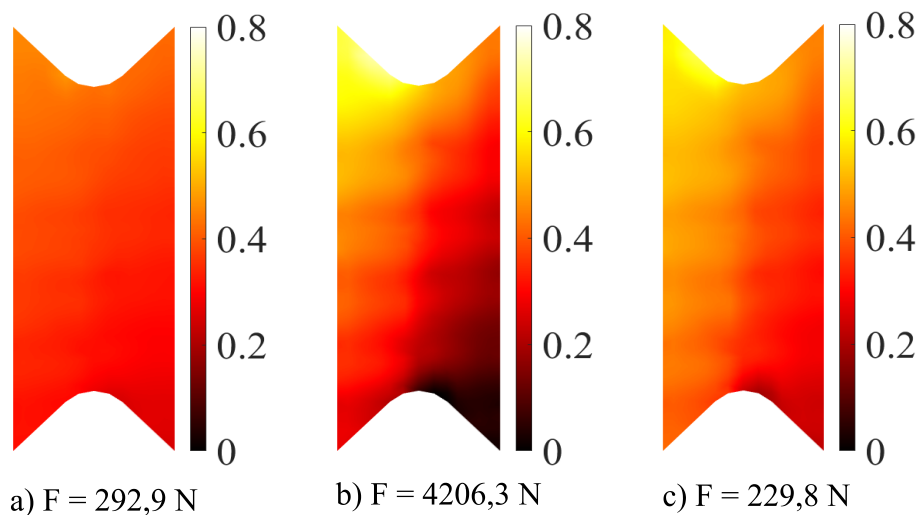


**Slika 89.** Polja pomaka u  $x$ -smjeru izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za četvrti ciklus cikličkog ispitivanja.

Polja pomaka u  $y$ -smjeru prikazana su na Slika 90. i Slika 91. Iznosi polja pomaka u  $y$ -smjeru manji su približno tri puta od onih u  $x$ -smjeru budući da narinuto opterećenje djeluje u  $x$ -smjeru. Međutim, usporedbom polja pomaka izmjerenih pomoću oba algoritma uočava se njihovo približno poklapanje.



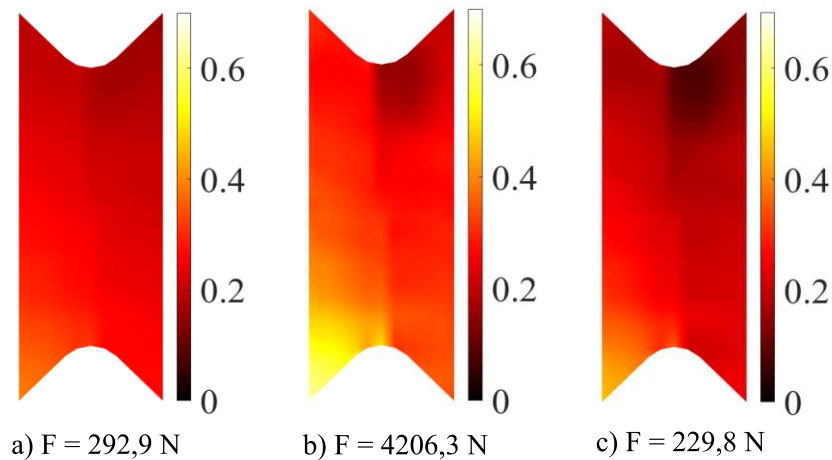
**Slika 90.** Polja pomaka u  $y$ -smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za četvrti ciklus cikličkog ispitivanja.



**Slika 91.** Polja pomaka u  $y$ -smjeru izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za četvrti ciklus cikličkog ispitivanja.

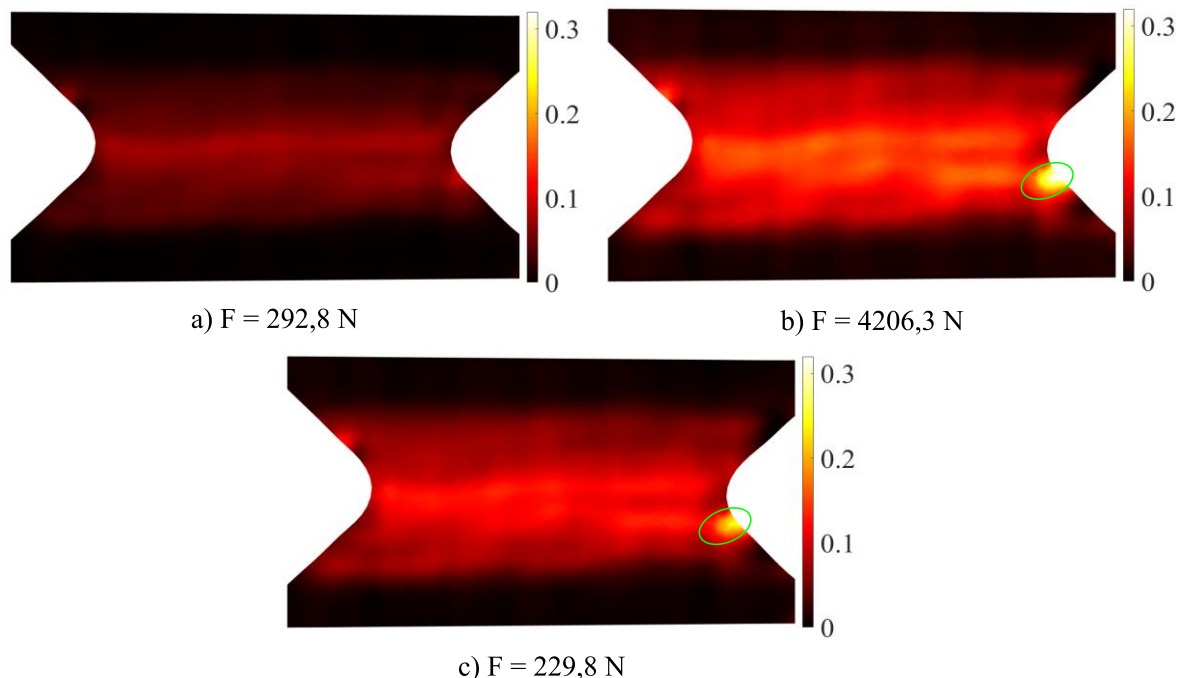
Polja izvanravinskih pomaka četvrtog ciklusa prikazana su na Slika 92. U četvrtom ciklusu došlo je do ponovnog povećanja amplitude izvanravinskih pomaka koja sada iznosi približno 0,5 mm. Pri maksimalnom opterećenju četvrtog ciklusa uočava se formacija lokalizacije

izvanravninskih pomaka u donjem lijevom kutu promatranog područja. Rasterećenjem se diskontinuitet polja pomaka smanjuje.



**Slika 92. Polja izvanravninskih pomaka izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za četvrti ciklus cikličkog ispitivanja.**

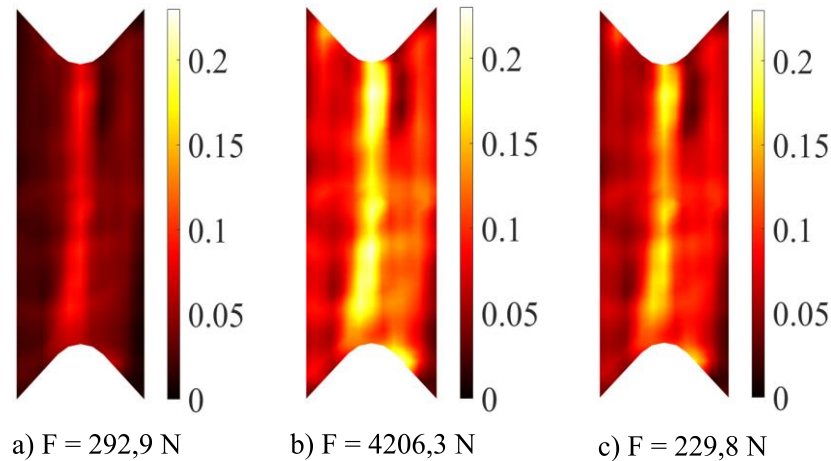
Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma prikazana su na Slika 93. U četvrtom ciklusu pojavila se lokalizacija kod desnog V zareza ispitnog uzorka koja je označena zelenom elipsom. Deformacija u tom području iznose približno 0,3. Lokalizacijska područja deformacija iz trećeg ciklusa prisutna su i dalje međutim njihov iznos je manji.



**Slika 93. Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma za četvrti ciklus cikličkog ispitivanja.**

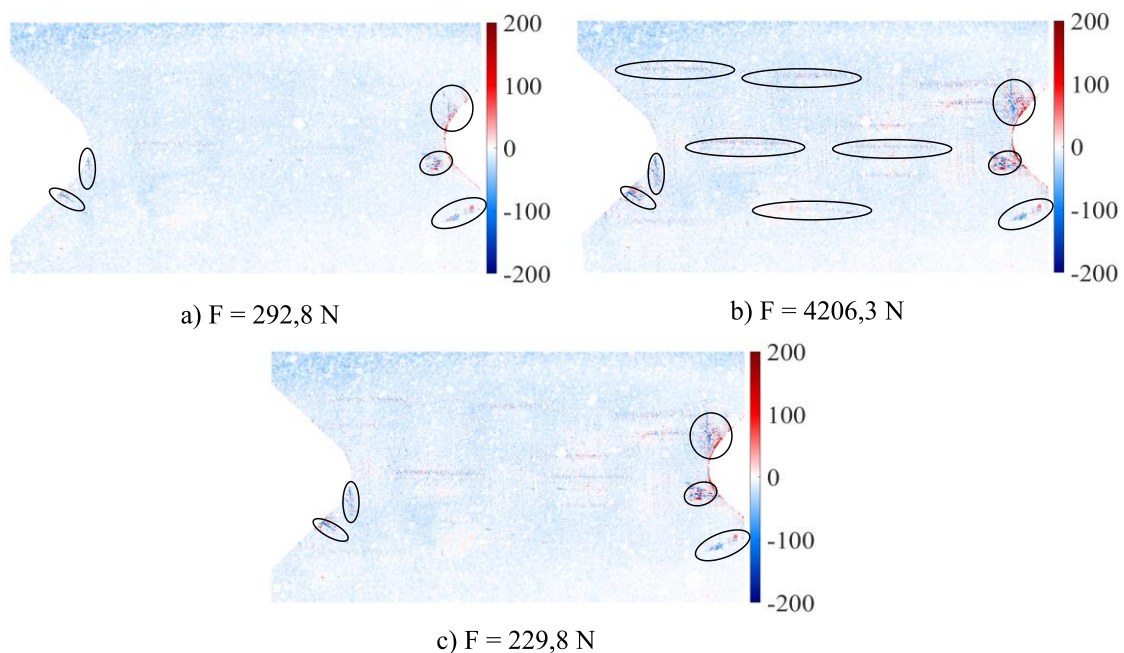
Slika 94. prikazuje polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma. Za razliku od prethodno prikazanog polja glavnih deformacija u kojemu se jedna lokalizacija

ističe u ovom slučaju nije došlo do iste pojave. Naime, u odnosu na treći ciklus došlo je do povećanja iznosa deformacija. Pri maksimalnom opterećenju i dalje se vrlo jasno vidi lokalizirana posmična traka. Najveći iznos deformacija četvrtog ciklusa izračunat pomoću *EikoTwin* iznosi približno 20% dok pomoću *Correli 3.0* algoritma taj iznos je gotovo 30%.



**Slika 94.** Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma za četvrti ciklus cikličkog ispitivanja.

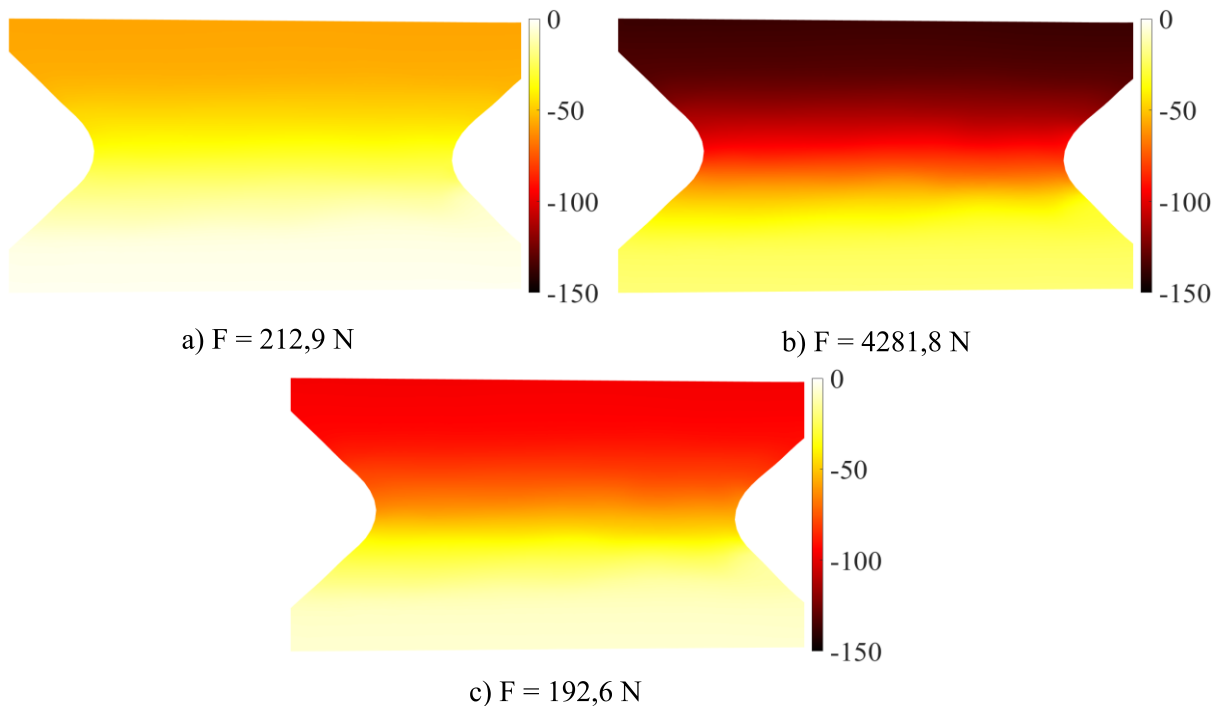
Naposljetku, Slika 95. prikazuje polja korelacijskih reziduala četvrtog ciklusa. Prema Slika 95. a) mogu se uočiti oštećenja razvijena u trećem ciklusu. Pri najvećem opterećenju četvrtog ciklusa povećali su se korelacijski reziduali u tim područjima. Osim širenja i povećanja iznosa već postojećih lokalizacija na Slika 95. b) vide se i novoformirane linije povišenih reziduala označene dugačkim crnim elipsama.



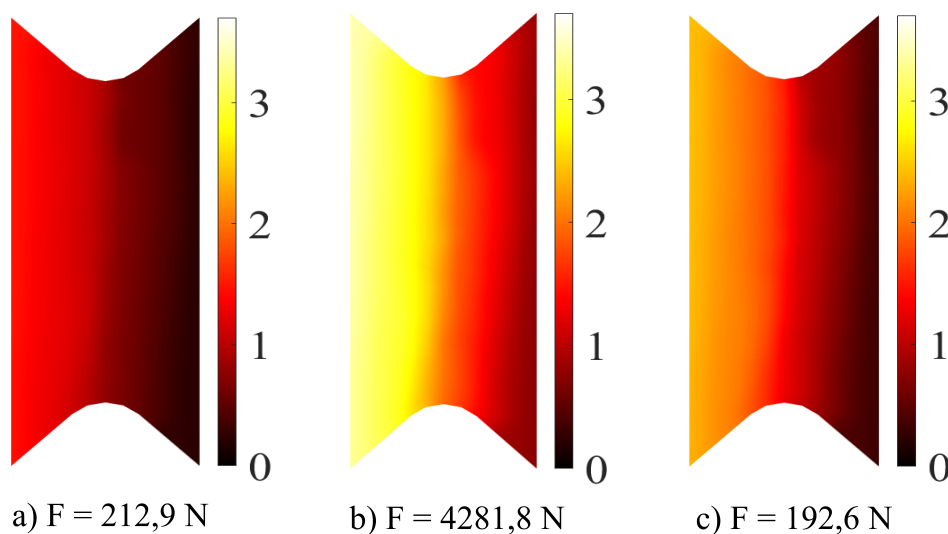
**Slika 95.** Polja korelacijskih reziduala izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma za četvrti ciklus cikličkog ispitivanja.

### 5.2.6. Ciklus 5

Najveće mehaničko opterećenje petog ciklusa bilo je  $F = 4281,8 \text{ N}$ . Na Slika 96. i Slika 97. prikazana su polja pomaka u  $x$ -smjeru. Zbog značajnih oštećenja ispitnog uzorka porasli su zaostali pomaci prema Slika 96. a) i Slika 97. a) u odnosu na prethodno promatrane cikluse. Osim toga dodatan porast mehaničkog opterećenja povećao je najveći iznos pomaka ispitnog uzorka koji je sada približno 4 mm. Izmjerena polja pomaka približno se poklapaju kako u iznosima tako i u raspodjelama.

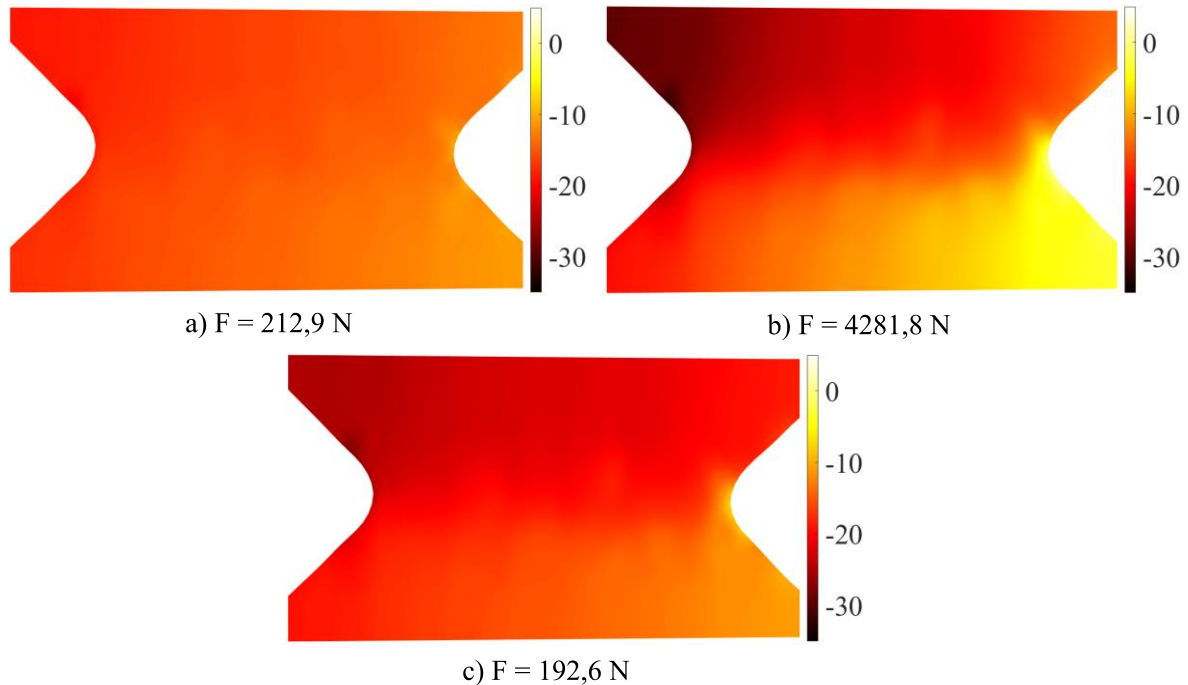


**Slika 96.** Polja pomaka u  $x$ -smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za peti ciklus cikličkog ispitivanja.

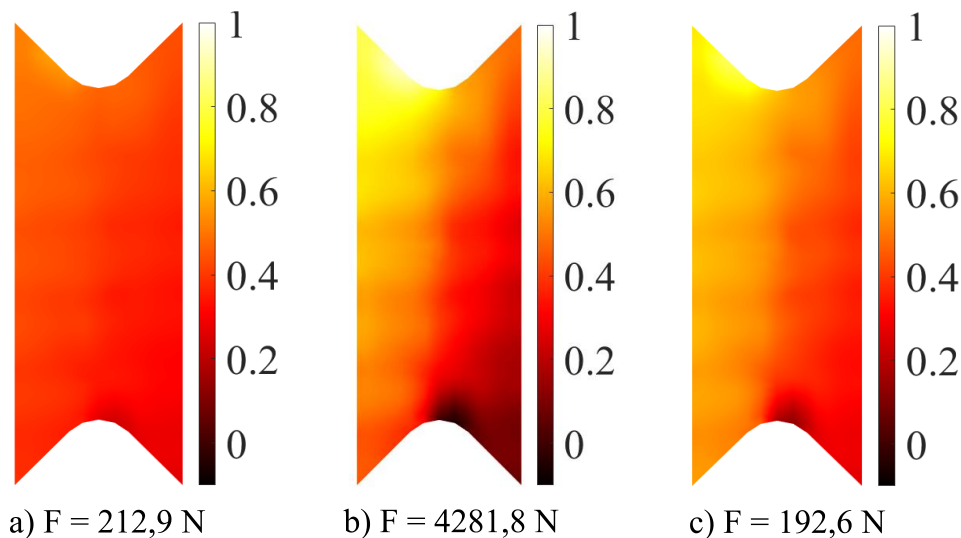


**Slika 97.** Polja pomaka u  $x$ -smjeru izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za peti ciklus cikličkog ispitivanja.

Polja pomaka u y-smjeru petog ciklusa prikazana su na Slika 98. i Slika 99. S obzirom na povećanje mehaničkog opterećenja rasli su iznosi pomaka u y-smjeru. Usporedbom najvećih iznosa pomaka uočena je pojava odstupanja između tih iznosa. Međutim, s obzirom na prilično male iznose pomaka u y-smjeru razlike su zanemarive.

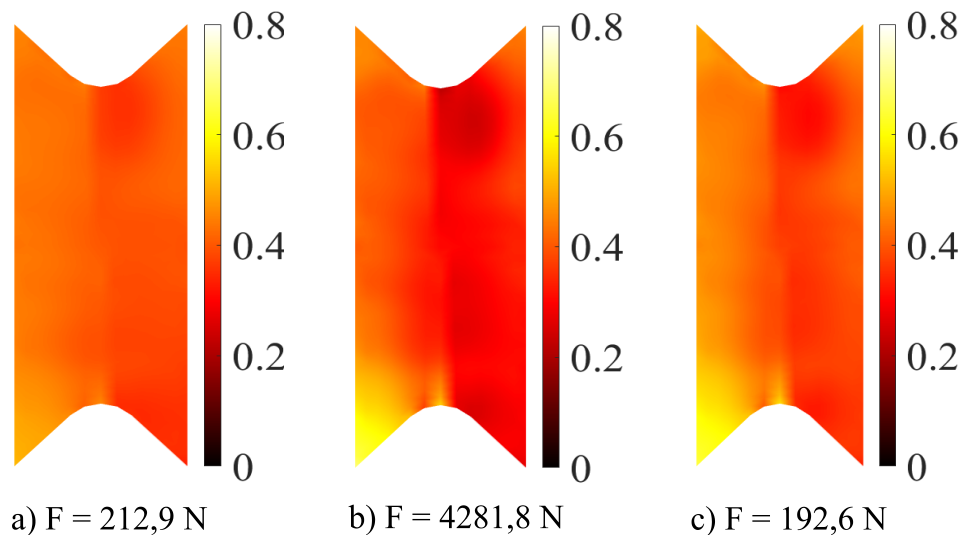


**Slika 98.** Polja pomaka u y-smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za peti ciklus cikličkog ispitivanja.



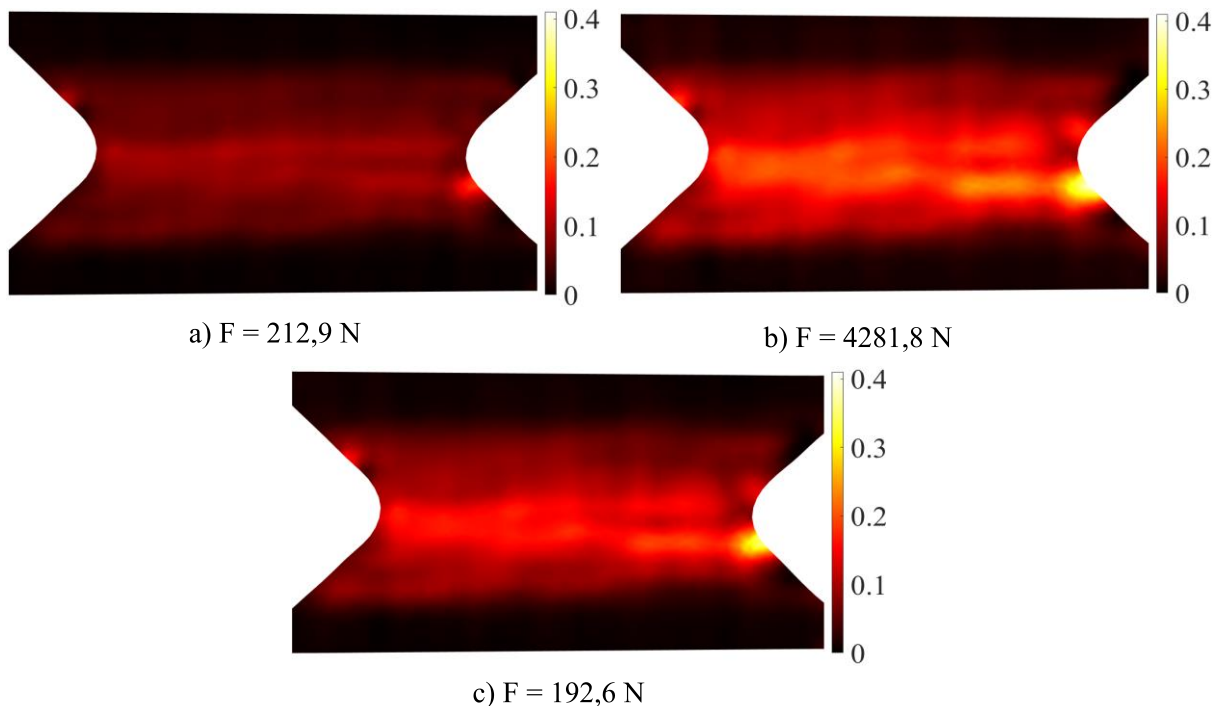
**Slika 99.** Polja pomaka u y-smjeru izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za peti ciklus cikličkog ispitivanja.

Zbog porasta mehaničkog opterećenja došlo je i do rasta amplitude izvanravninskih pomaka, koji su prikazani na Slika 100. Jednako kao u četvrtom ciklusu primjetna je formacija lokalizacije izvanravninskih pomaka u donjem lijevom kutu ispitnog uzorka.



**Slika 100. Polja izvanravninskih pomaka izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za peti ciklus cikličkog ispitivanja.**

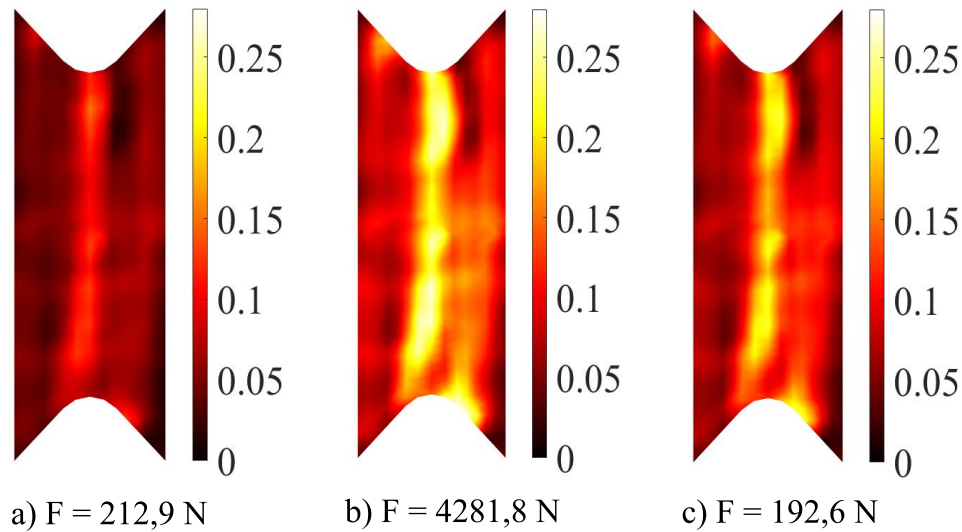
Polje najvećih glavnih deformacija petog ciklusa, prikazano na Slika 101. ima vrlo sličnu raspodjelu kao i polje najvećih glavnih deformacija četvrtog ciklusa koje je prikazano na Slika 93. Lokalizacijsko područje se proširilo, ali porastao je i iznosa deformacija koji sada iznosi približno 40%.



**Slika 101. Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma za peti ciklus cikličkog ispitivanja.**

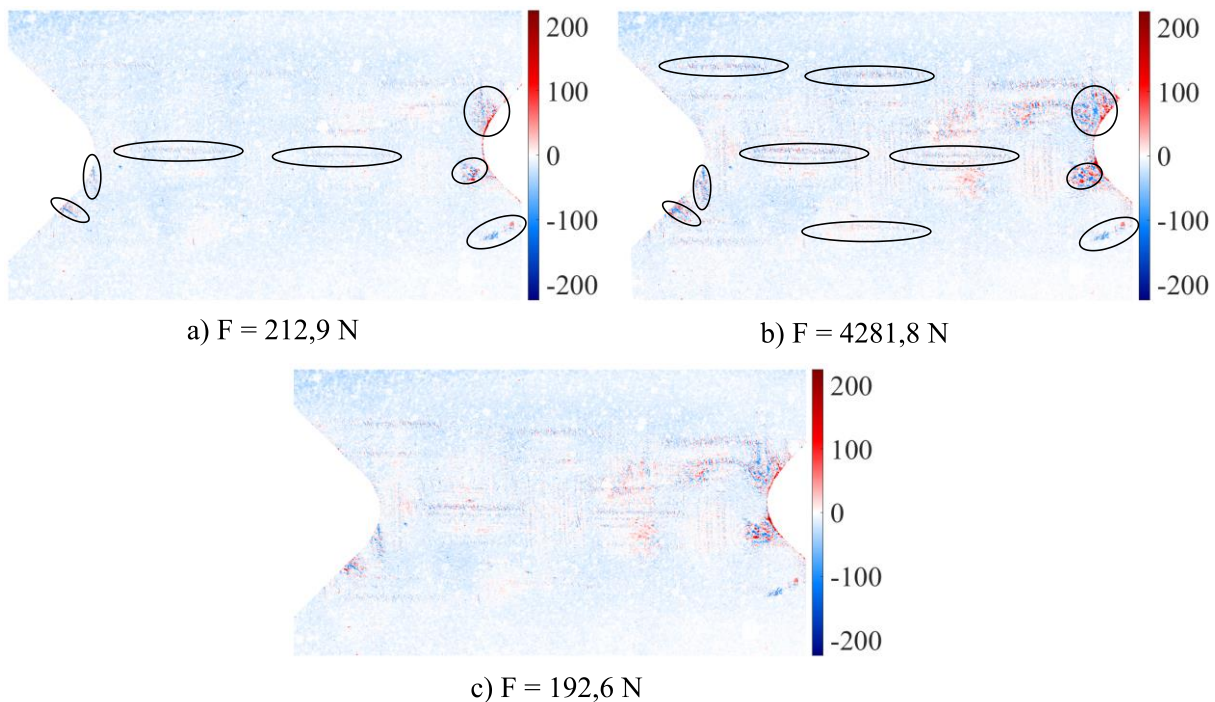
Slika 102. prikazuje polja najvećih glavnih deformacija petog ciklusa izračunatih pomoću *EikoTwin* algoritma. Usporedbom prethodno predstavljenih polja najvećih glavnih deformacija izračunatih pomoću *Correli 3.0* s deformacijama iz *EikoTwin* algoritma uočava se značajno

odstupanje u najvećem iznosu deformacija. Taj iznos pomoću *EikoTwin* algoritma je približno 28% dok je pomoću *Correli 3.0* taj iznos 40%.



**Slika 102. Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma za peti ciklus cikličkog ispitivanja.**

Slika 103. prikazuje polja korelacijskih reziduala petog ciklusa. Na Slika 103. a) prikazana su oštećenja nastala tijekom četvrtog ciklusa dok se na Slika 103. b) formiraju nova područja povišenih korelacijskih reziduala. Na cijelom promatranom području formirane su horizontalne linije povišenih reziduala. Isto tako naziru se i vertikalne linije povišenih reziduala koje su slabijeg intenziteta.

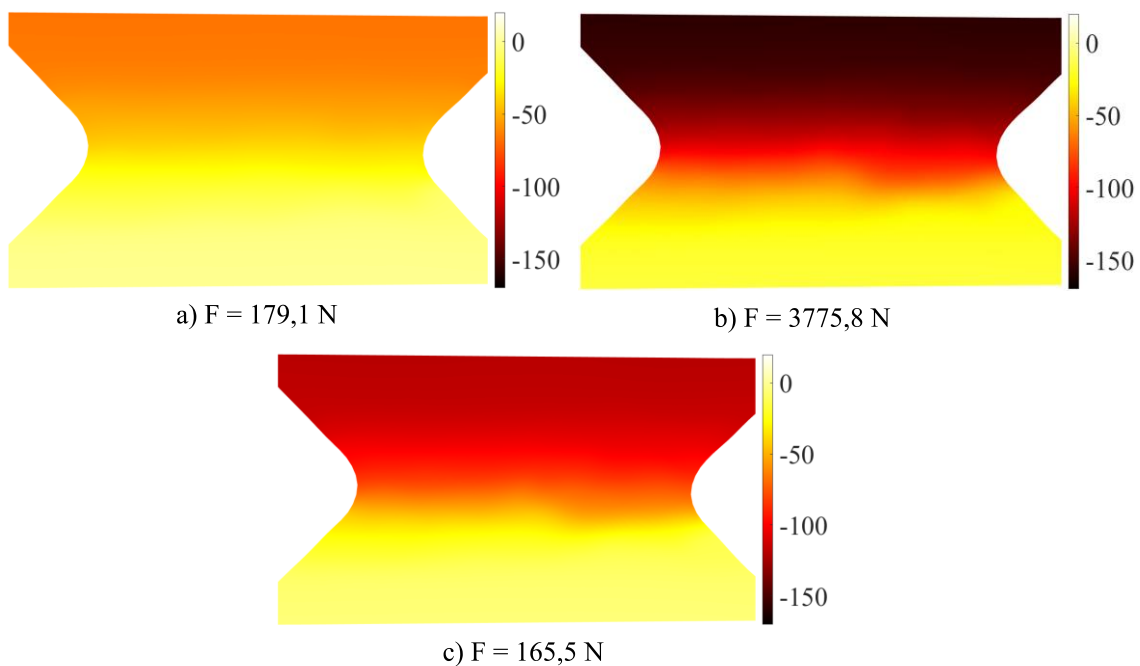


**Slika 103. Polja korelacijskih reziduala izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma za peti ciklus cikličkog ispitivanja.**

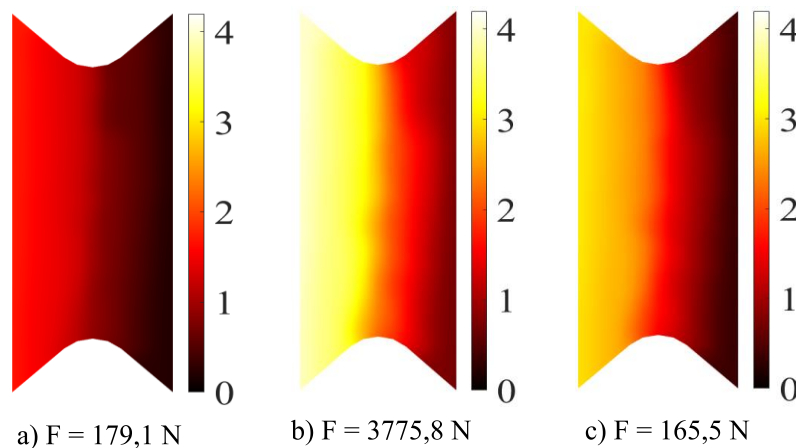


### 5.2.7. Ciklus 6

Šesti ciklus ispitivanja proveden je nakon dostizanja smične čvrstoće u petom ciklusu. Stoga, najveće mehaničko opterećenje ovog ciklusa pada te iznosi  $F = 3775,8 \text{ N}$ . Razlog tomu su vrlo velika oštećenja nastala tijekom prethodnih ciklusa te je degradirana krutost ispitnog uzorka. Iako je mehaničko opterećenje ovog ciklusa znatno manje ponovno dolazi do povećanja iznosa pomaka. Prema Slika 104. vidi se povećanje najvećeg iznosa pomaka u odnosu na prethodni ciklus. Na Slika 105. prikazano je i polje pomaka u  $x$ -smjeru izmjereno pomoću *EikoTwin* algoritma. Kao i u prethodnim ciklusima polja pomaka u  $x$ -smjeru približno se poklapaju po raspodjelama i po najvećim iznosima koji u ovom ciklusu iznose više od 4 mm odnosno 150 px.

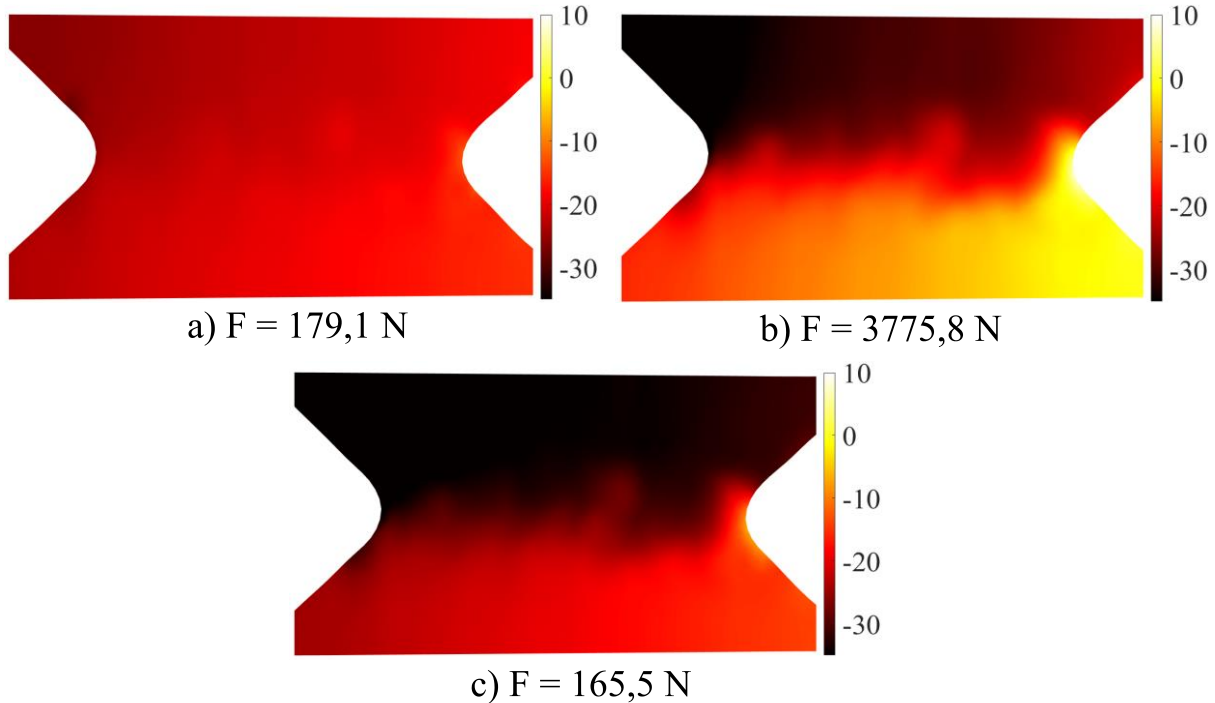


**Slika 104. Polja pomaka u  $x$ -smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za šesti ciklus cikličkog ispitivanja.**

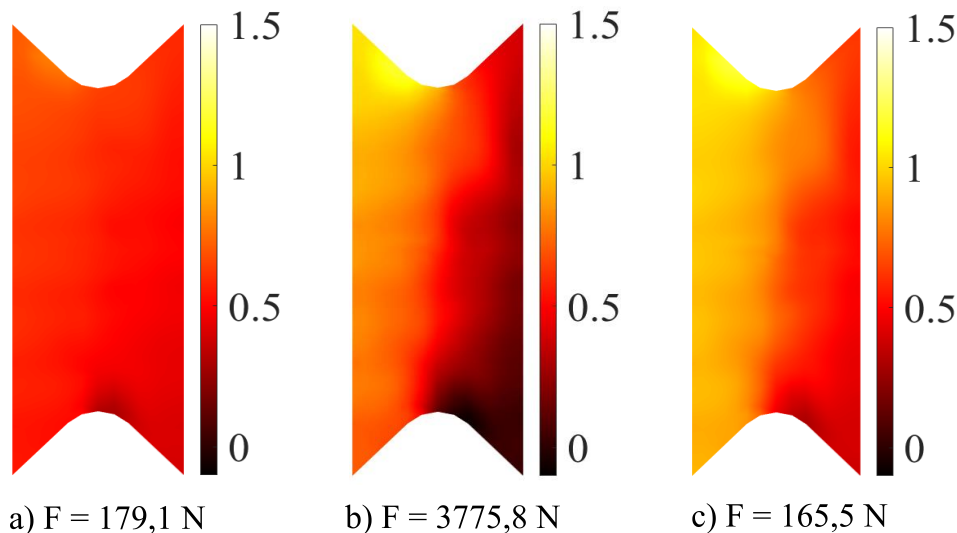


**Slika 105. Polja pomaka u  $x$ -smjeru izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za šesti ciklus cikličkog ispitivanja.**

Slika 106. i Slika 107. prikazuju polja pomaka u  $y$ -smjeru šestog ciklusa. Pomaci u  $y$ -smjeru neznatno se razlikuju što je bio slučaj i u prethodnom ciklusu. Razlike su nastale u raspodjeli, ali i u najvećim vrijednostima izmjerenih pomaka. Međutim, budući da se radi o pomacima koji su unutar 1 mm te razlike mogu se zanemariti s obzirom na pomake u  $x$ -smjeru.

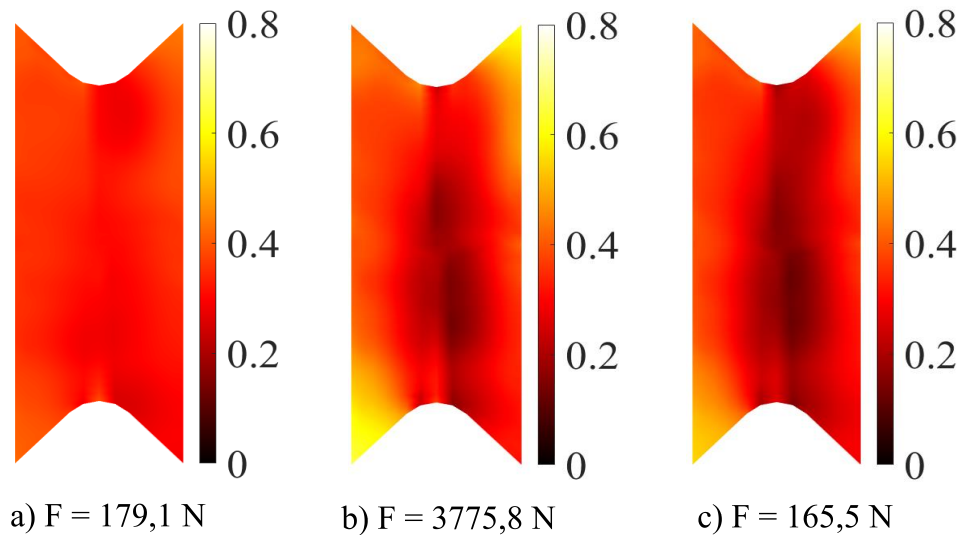


**Slika 106. Polja pomaka u  $y$ -smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za šesti ciklus cikličkog ispitivanja.**



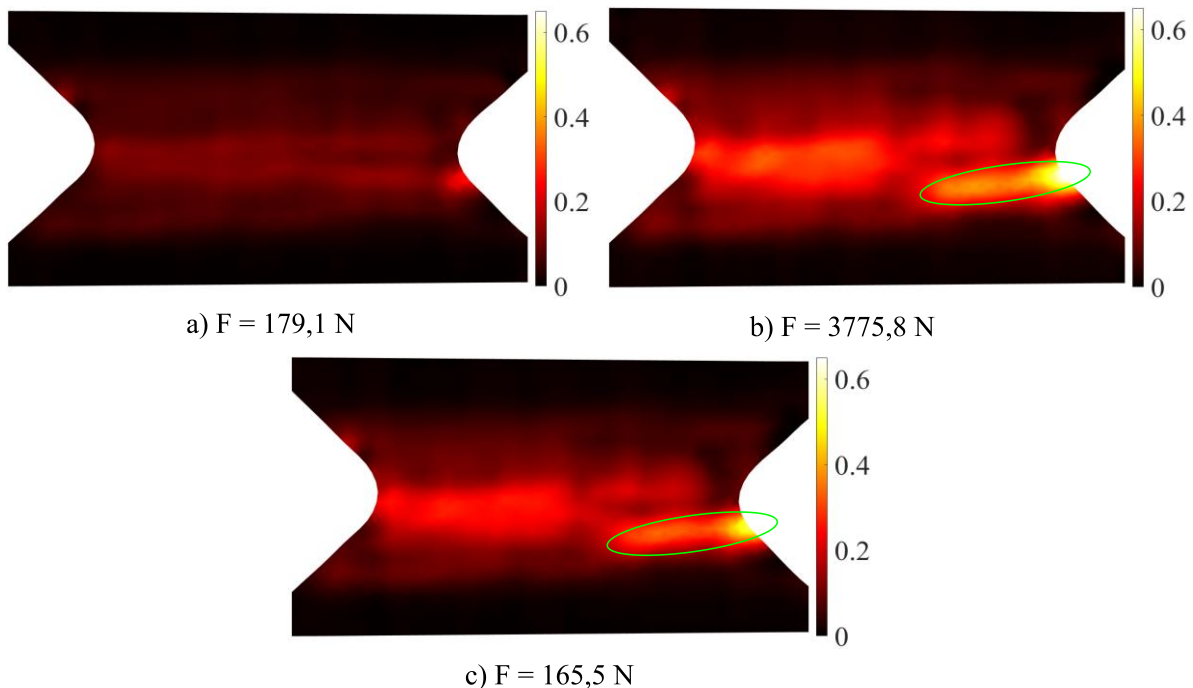
**Slika 107. Polja pomaka u  $y$ -smjeru izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za šesti ciklus cikličkog ispitivanja.**

Budući da su u ovom ciklusu oštećenja ispitnog uzorka vrlo značajna došlo je i do povećanja iznosa izvanravninskih pomaka. Slika 108. prikazuje polja izvanravninskih pomaka na kojima se to vidi.



**Slika 108.** Polja izvanravninskih pomaka izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za šesti ciklus cikličkog ispitivanja.

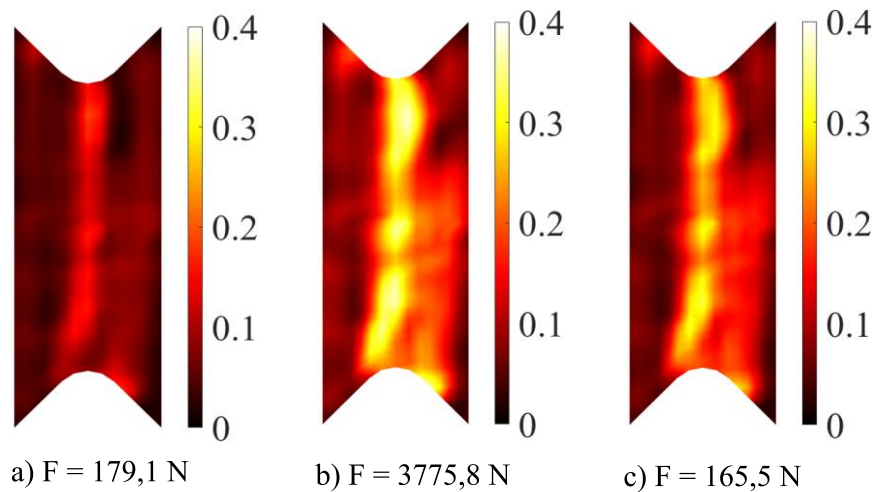
Polja najvećih glavnih deformacija šestog ciklusa izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma prikazana su na Slika 109. Bez obzira na pad mehaničkog opterećenja iznos deformacija dodatno je narastao. Tako u području koje je označeno zelenom elipsom iznos deformacija je 0,6 odnosno 60%. Posmična traka i dalje postoji, ali je iznos deformacija nešto je niži.



**Slika 109.** Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma za šesti ciklus cikličkog ispitivanja.

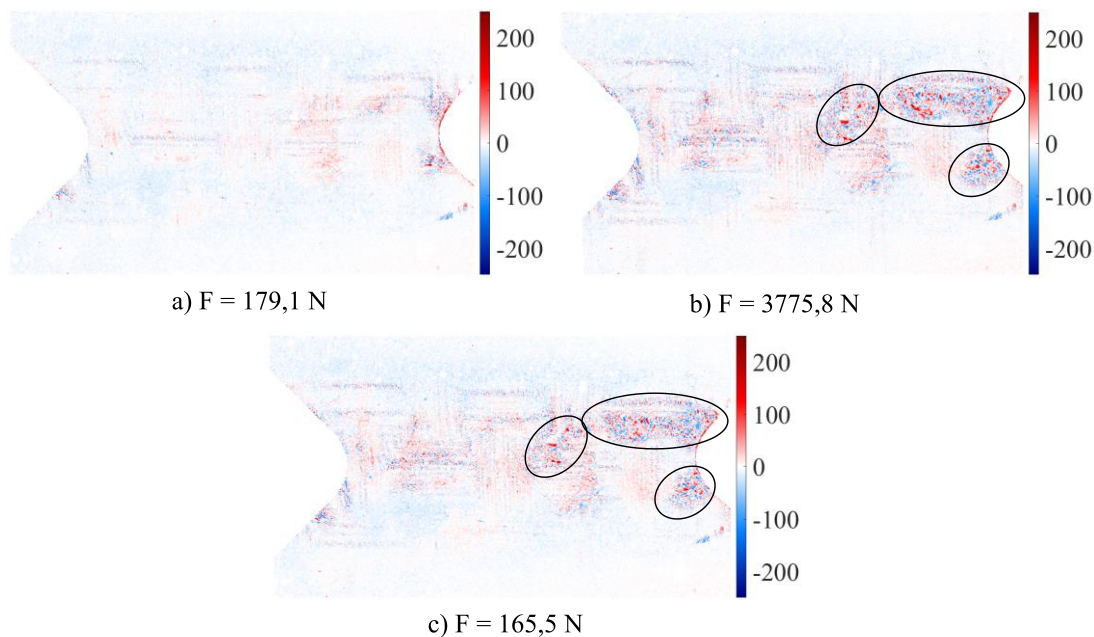
Slika 110. prikazuje polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma. Usporedbom polja najvećih glavnih deformacija uočava se kako razlika najvećih deformacija raste sa svakim ciklusom. Najveći iznos najvećih glavnih deformacija izračunatih

pomoću *EikoTwin* algoritma je  $\approx 0,4$  što je značajno manje u odnosu na *Correli 3.0*. Također vrlo jasno se vidi posmična traka povišenih najvećih glavnih deformacija na srednjem dijelu uzorka.



**Slika 110. Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma za šesti ciklus cikličkog ispitivanja.**

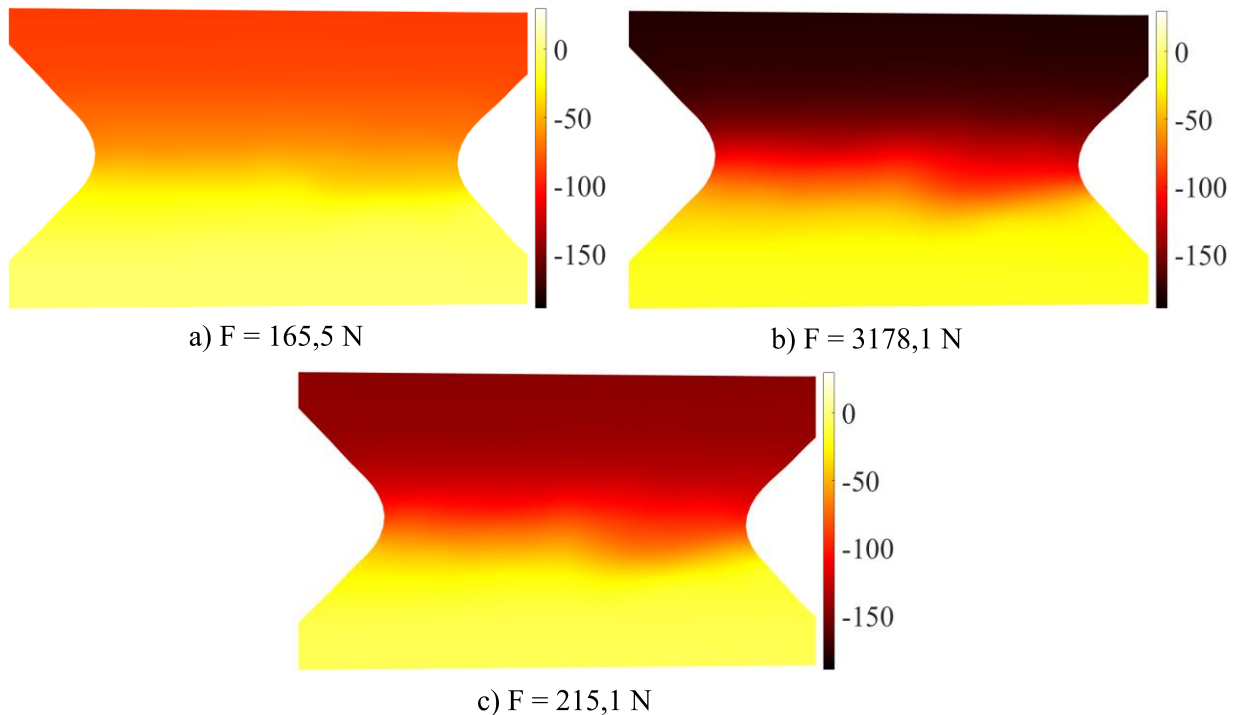
S obzirom na značajna oštećenja ispitnog uzorka u šestom ciklusu povećanje iznosa korelacijskih reziduala je očekivano. Tako se na Slika 111. vidi dodatan rast iznosa reziduala te širenje njihovih područja. Pri najvećem opterećenju šestog ciklus, prema Slika 111., crnim elipsama označena su samo područja najviših reziduala. Slika 111. c) koja prikazuje rezidualne nakon rasterećenja ispitnog uzorka ne prikazuje znatne razlike u odnosu na opterećeno stanje. Razlog tomu je izuzetno visok stupanj oštećenja ispitnog uzorka.



**Slika 111. Polja korelacijskih reziduala izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma za šesti ciklus cikličkog ispitivanja.**

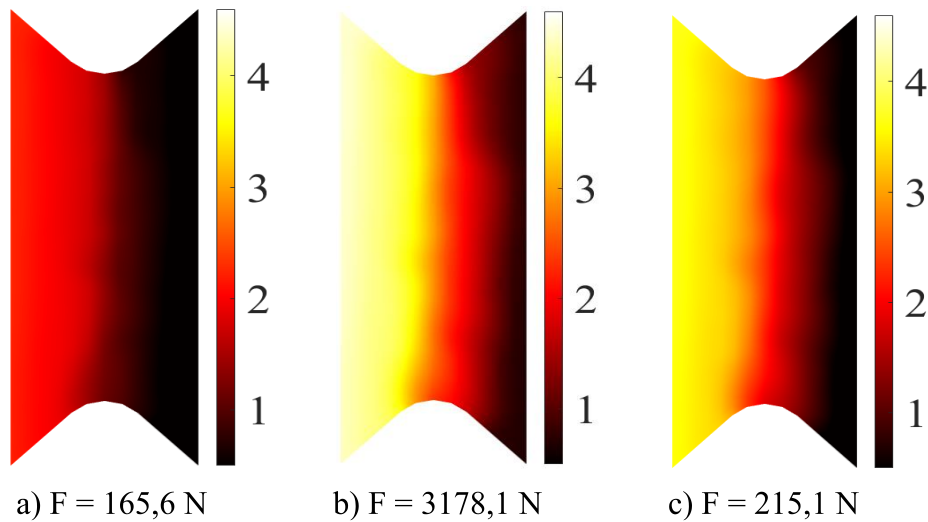
### 5.2.8. Ciklus 7

Posljednji, tj. sedmi ciklus ispitivanja imao je najveće mehaničko opterećenjem od  $F = 3178,1$  N. Najveće mehaničko opterećenje ponovno je manje u odnosu na prethodni ciklus. Međutim, iznos polja pomaka u  $x$ -smjeru porastao je što se može vidjeti na Slika 112. i Slika 113.



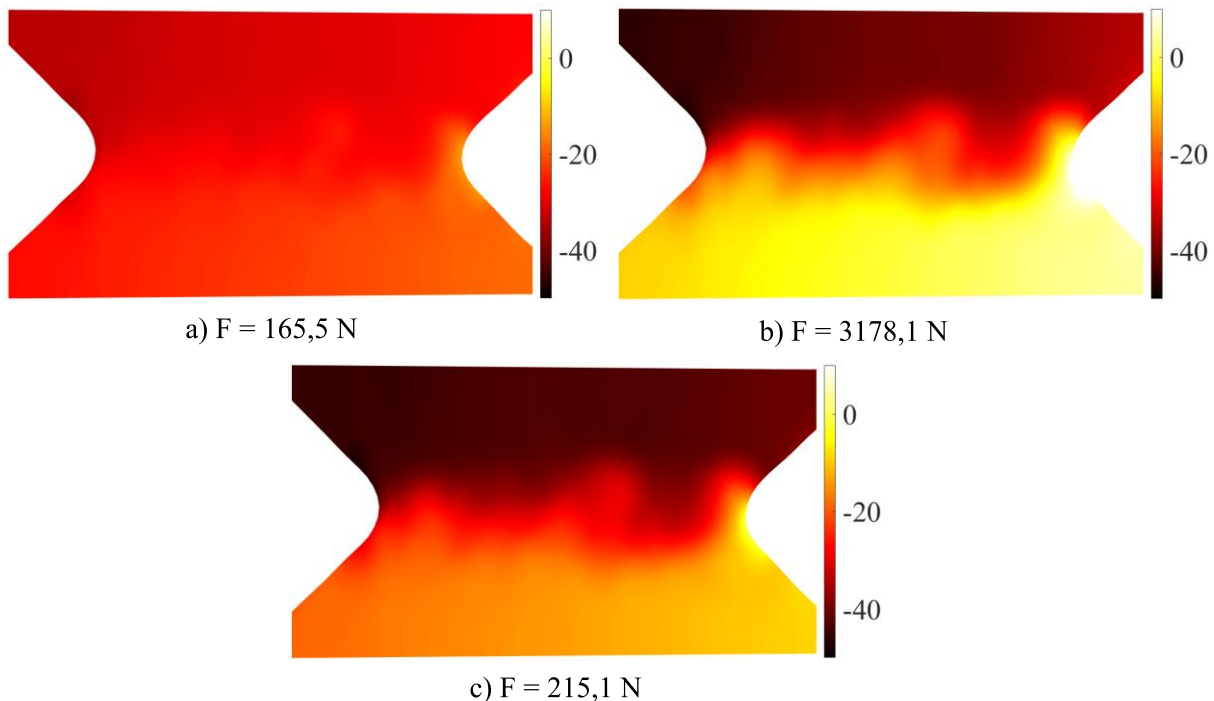
**Slika 112. Polja pomaka u  $x$ -smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za sedmi ciklus cikličkog ispitivanja.**

Usporedbom raspodjela i najvećih pomaka u  $x$ -smjeru vidi se približno poklapanje tijekom posljednjeg ciklusa. Najveći iznos pomaka u smjeru opterećenja tijekom cikličkog ispitivanja iznosio je  $\approx 4,5$  mm odnosno  $\approx 150$  px.

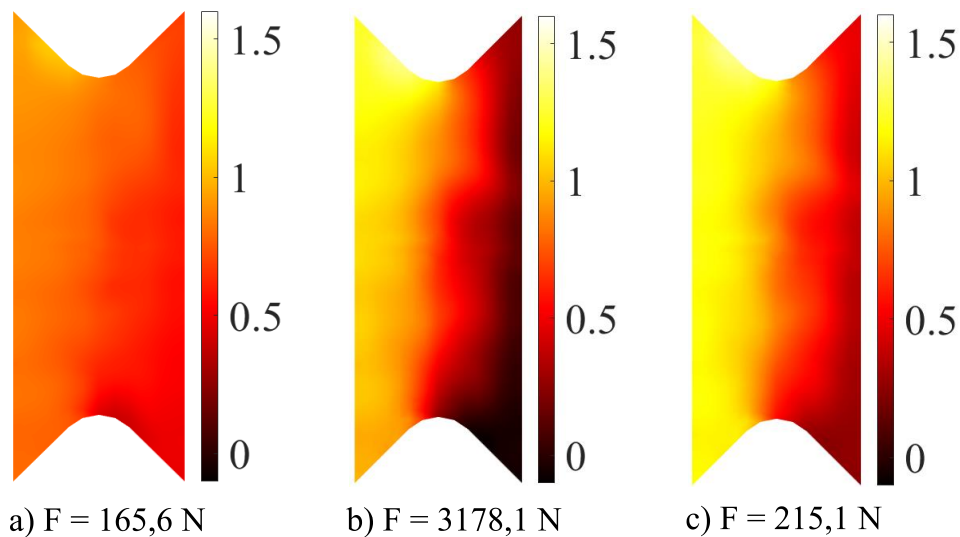


**Slika 113.** Polja pomaka u  $x$ -smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za sedmi ciklus cikličkog ispitivanja.

Polja pomaka u  $y$ -smjeru posljednjeg ciklusa prikazana su na Slika 114. te Slika 115. Nakon pojave značajnih oštećenja pojavila se razlika u raspodjelama pomaka u  $y$ -smjeru. Međutim, zbog znatno manjih pomaka u smjeru osi  $y$  te razlike kreću se u prihvatljivim granicama. Krajnji pomak u  $y$ -smjeru iznosi  $\approx 1,5 \text{ mm}$ .

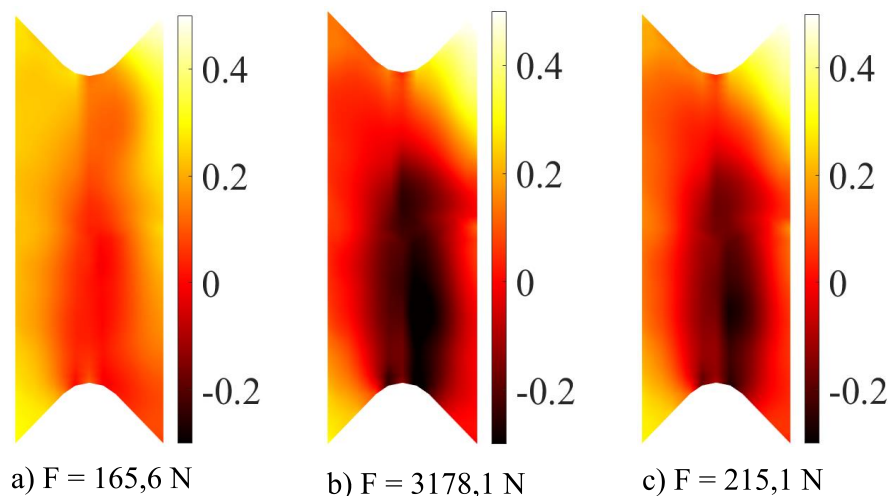


**Slika 114.** Polja pomaka u  $y$ -smjeru izmjerena pomoću *Correli 3.0* algoritma za sedmi ciklus cikličkog ispitivanja.



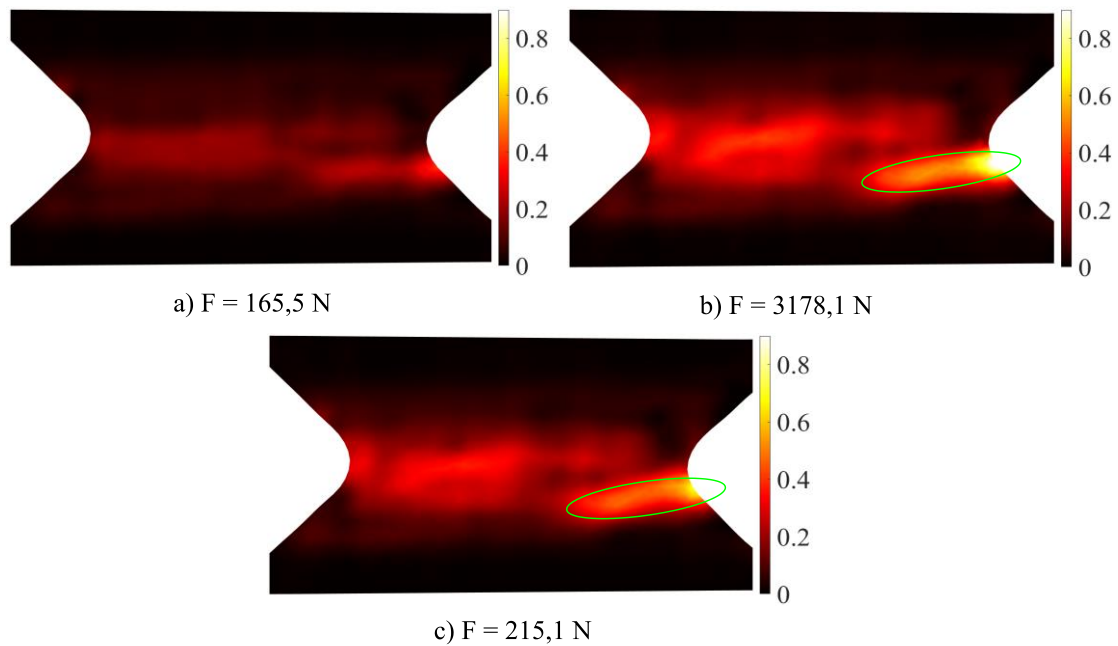
**Slika 115. Polja pomaka u y-smjeru izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za sedmi ciklus cikličkog ispitivanja.**

Na Slika 116. prikazana su konačna polja izvanravninskih pomaka cikličkog ispitivanja. Kao i u slučaju polja pomaka u x- i y-smjeru i izvanravninski pomaci dodatno su narasli. Međutim, bitno je naglasiti da se amplituda izvanravninskih pomaka tijekom cijelog cikličkog ispitivanja kretala unutar 0,5 mm.

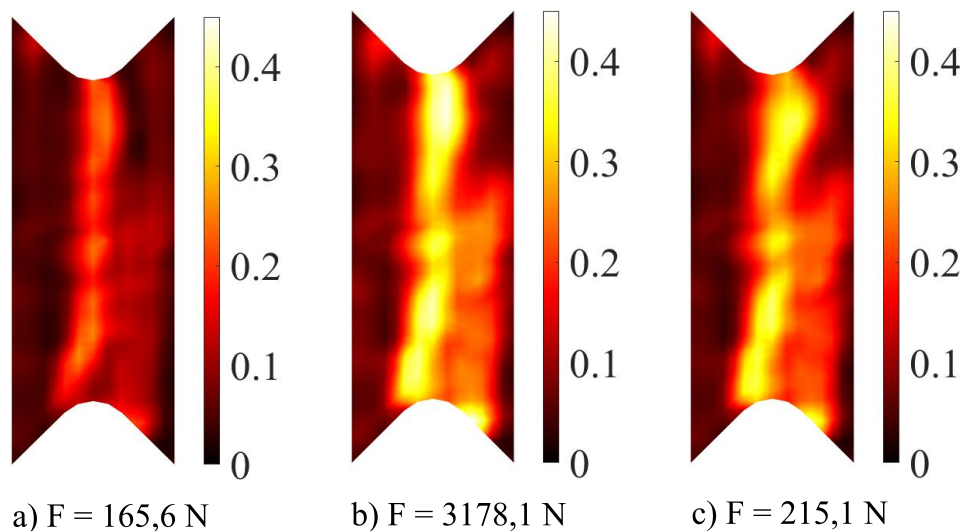


**Slika 116. Polja izvanravninskih pomaka izmjerena pomoću *EikoTwin* algoritma za sedmi ciklus cikličkog ispitivanja.**

Slika 117. prikazuje polja najvećih glavnih deformacija sedmog ciklusa. Prema slici vidi se povećanje iznosa deformacija koje u području označenom zelenom elipsom dostižu čak 80%. Međutim, ukoliko se pogleda polje najvećih glavnih deformacija izračunato pomoću *EikoTwin* algoritma, prema Slika 118., vidi se znatna razlika. Naime, na polju najvećih glavnih deformacija izračunatih pomoću *EikoTwin*-a najveći iznos gotovo je dvostruko manji, tj. najveće deformacije su  $\approx 40\%$ . Također, lokalizacija glavnih deformacija u posmičnoj traci primjetna je kao i tijekom cijelog cikličkog ispitivanja.



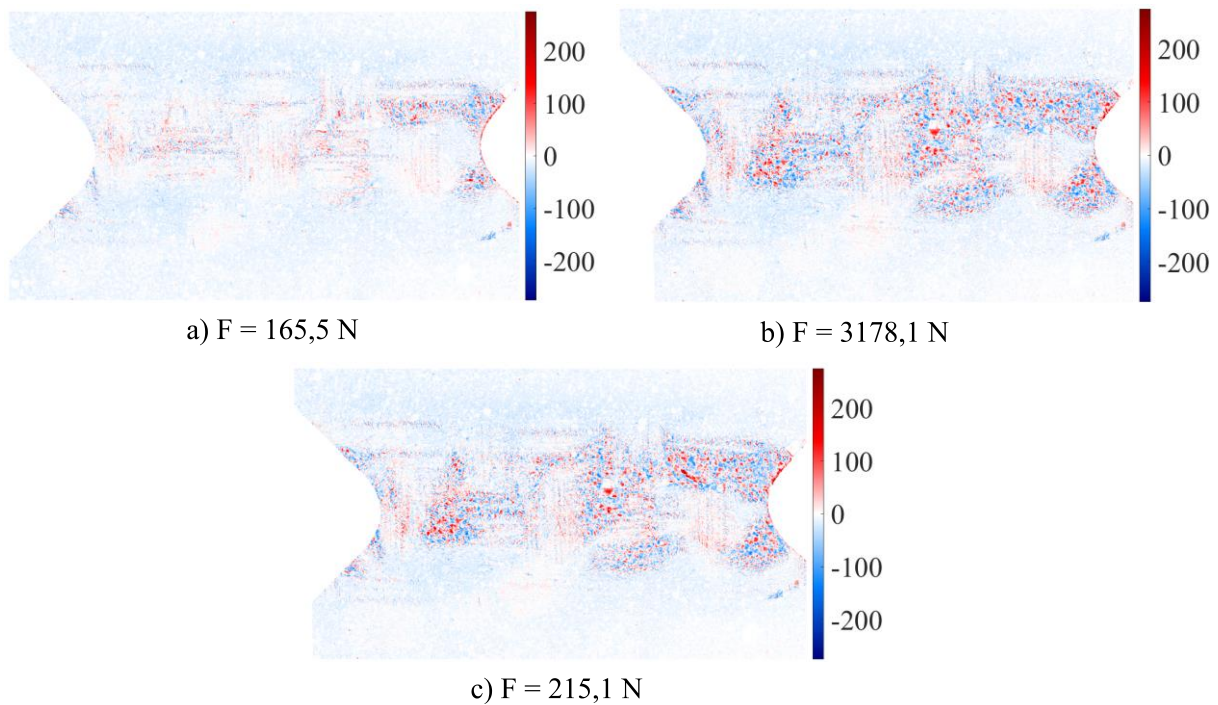
**Slika 117. Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma za sedmi ciklus cikličkog ispitivanja.**



**Slika 118. Polja najvećih glavnih deformacija izračunata pomoću *EikoTwin* algoritma za sedmi ciklus cikličkog ispitivanja.**

Naposljetku, Slika 119. prikazuje polja korelacijskih reziduala posljednjeg ciklusa. Pri najvećem opterećenju sedmog ciklus cijelo područje posmične trake ima visok iznos reziduala, što se može vidjeti prema Slika 119. b) i c). Oštećenja koja su se akumulirala tijekom prethodnih ciklusa spojila su se u posljednjem ciklusu što je uzrokovalo ovakvu raspodjelu korelacijskih reziduala.

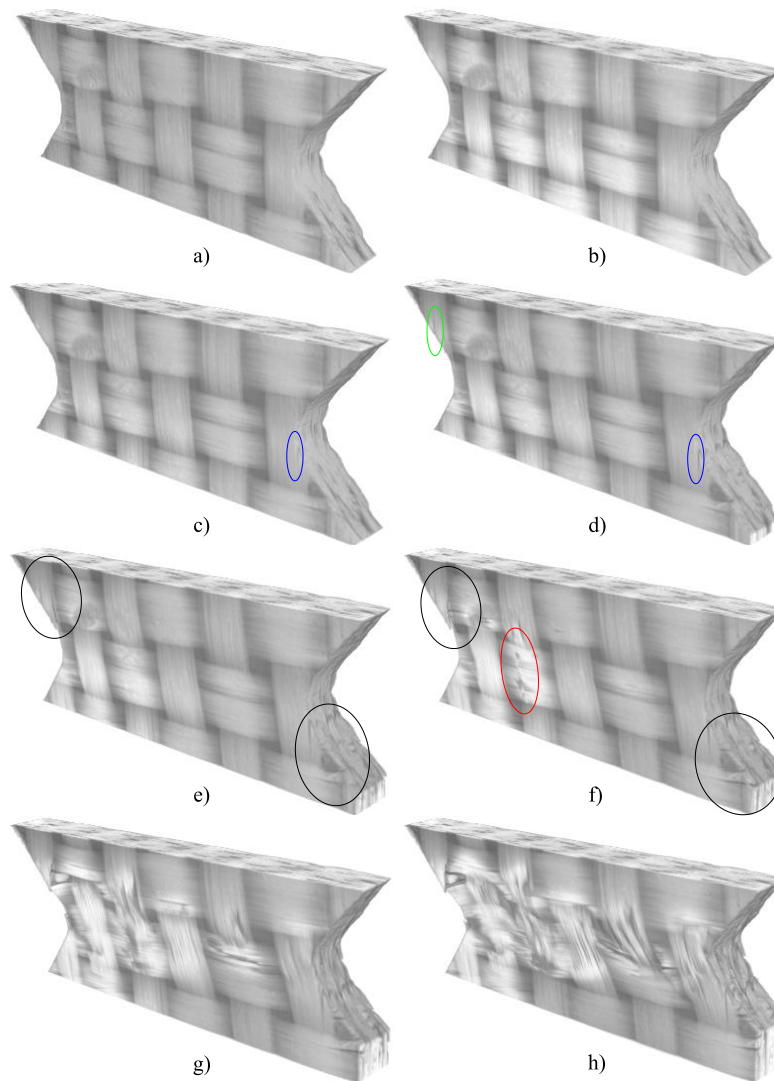




**Slika 119.** Polja korelacijskih reziduala izračunata pomoću *Correli 3.0* algoritma za sedmi ciklus cikličkog opterećenja.

### 5.2.9. DVC analiza cikličkog ispitivanja

Rekonstruirani volumeni ispitnog uzorka dobiveni na temelju provedenih skeniranja tijekom cikličkog ispitivanja prikazani su na Slika 120. Skenovi 0 – 7 prikazani su redom na Slika 120. a) – g). Slika 120. prikazuje referentni sken. Na Slika 120. b) nisu uočena oštećenja. Nakon drugog ciklusa (Slika 120. c)) uočeno je vertikalno oštećenje vlakna u vlačnoj zoni, označeno plavom elipsom. Daljnjim povećanjem opterećenja pojavila su se oštećenja i u drugoj vlačnoj zoni što je označeno zelenom elipsom (Slika 120. d)). Slika 120. e) prikazuje kako su se oštećenja proširila na cijele vlačne zone koje su označene crnim elipsama. Na Slika 120. f) osim oštećenja u vlačnim zonama, može se uočiti i puknuće vlakana na površini ispitnog uzorka i delaminacije što je označeno crvenom elipsom. Slika 120. g) i h) prikazuju rekonstruirane volumene ispitnog uzorka nakon posljednja dva ciklusa opterećivanja. Mogu se uočiti znatna oštećenja te zadebljanje ispitnog uzorka u kritičnom području (tj., između vrhova V zareza) te u zonama vlačnog opterećenja.

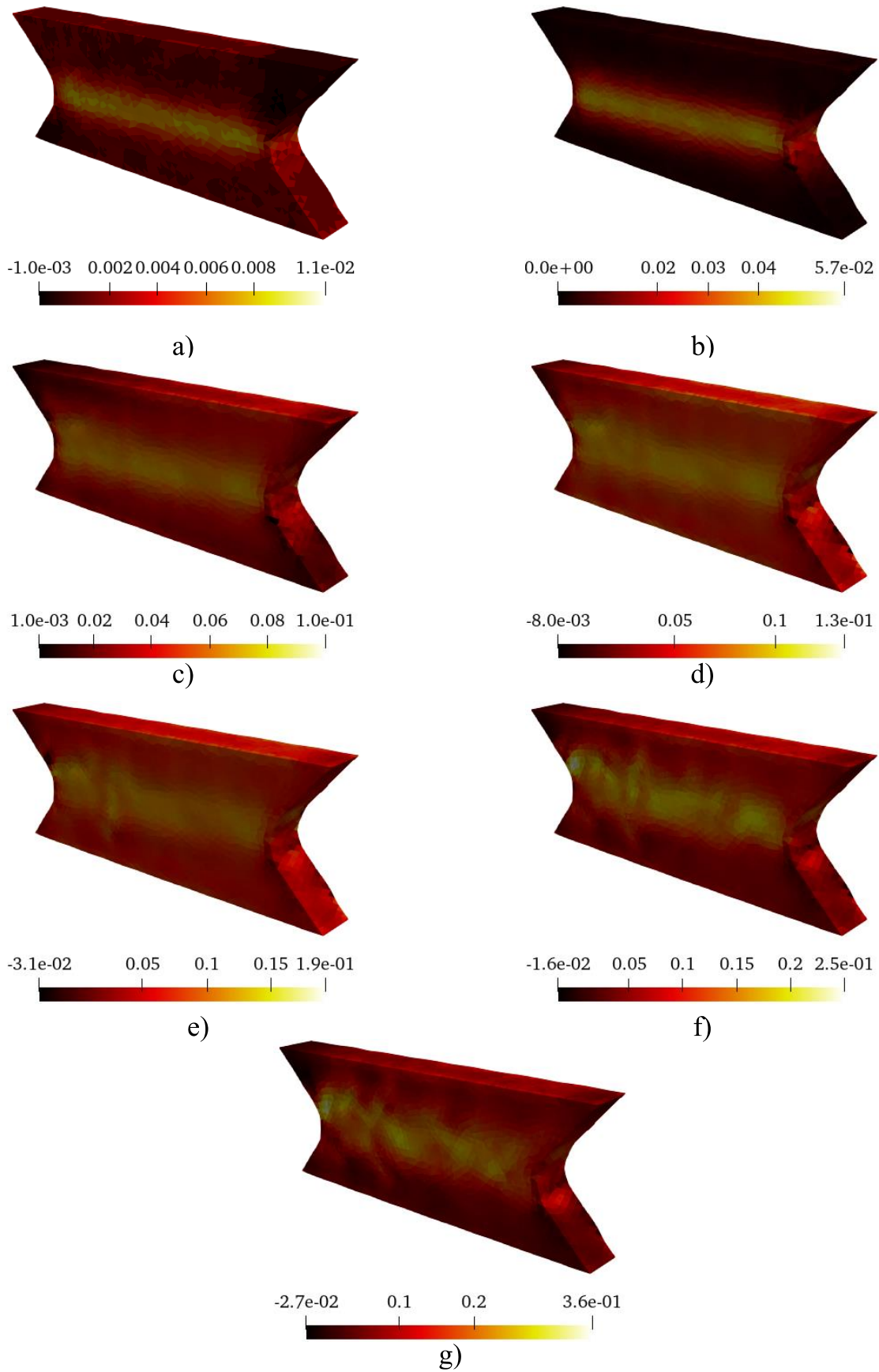


**Slika 120. Rekonstruirani volumeni ispitnog uzorka tijekom cikličkog ispitivanja.**

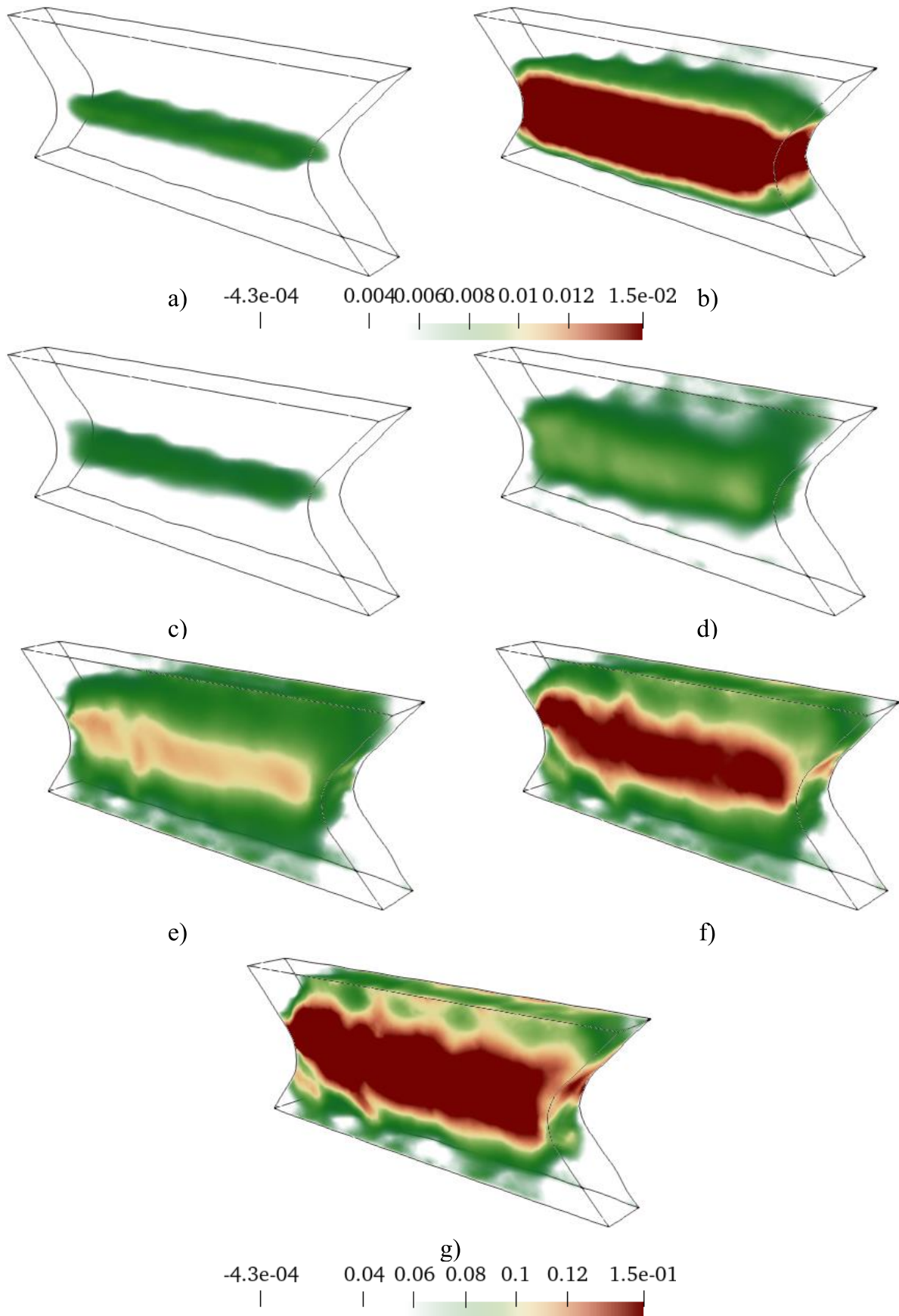
Slika 121. prikazuje posmične deformacije po elementima koje su izračunate DVC analizom pomoću *Correli 3.0* algoritma. Kako bi se mogao pratiti rast deformacija svaki volumen ima svoju vlastitu mjernu skalu. Slika 121. a) prikazuje polje deformacija nakon prvog ciklusa opterećivanja gdje se može uočiti formacija posmične trake. Najveći iznos deformacija u ovom slučaju iznosi  $\approx 1\%$ . Nakon drugog ciklusa opterećivanja (Slika 121. b)) može se uočiti jasno formirana posmična traka gdje je zabilježen najveći iznos posmičnih deformacija od  $\approx 5\%$ . Slika 121. c) i d) prikazuju polja deformacija izračunata pri vrlo sličnim opterećenjima. Stoga, raspodjela i najveći iznos deformacija nakon ova dva skeniranja vrlo su slični. Najveće deformacije u ovim slučajevima iznose  $\approx 9\%$  i  $\approx 11\%$ . Nakon svakog narednog ciklusa opterećenja (Slika 121. e – g)), stupanj oštećenja ispitnog uzorka znatno raste, a samim time i iznosi deformacija. Nakon petog ciklusa opterećenja, najveći iznos deformacije iznosi  $\approx 15\%$ . Taj iznos je narastao na  $\approx 22\%$  nakon šestog ciklusa te nakon posljednjeg sedmog ciklusa, najveći iznos deformacija iznosio je  $\approx 30\%$ .

Na Slika 122. prikazane su deformacije s ograničenim najmanjim i najvećim iznosom kako bi se pratio razvoj posmične trake. Tako je za Slika 122. a) i b) iznos deformacija ograničen na 0,6 do 1,5%. Nakon prvog ciklusa može se uočiti stvaranje posmične trake u kritičnom području koja je izraženija nakon drugog ciklusa. Za preostale Slika 122. c) – g) deformacije su ograničene na iznos 6% do 15%. Povećanjem mehaničkog opterećenja, posmična traka obuhvaća veće područje te su iznosi deformacija narasli.

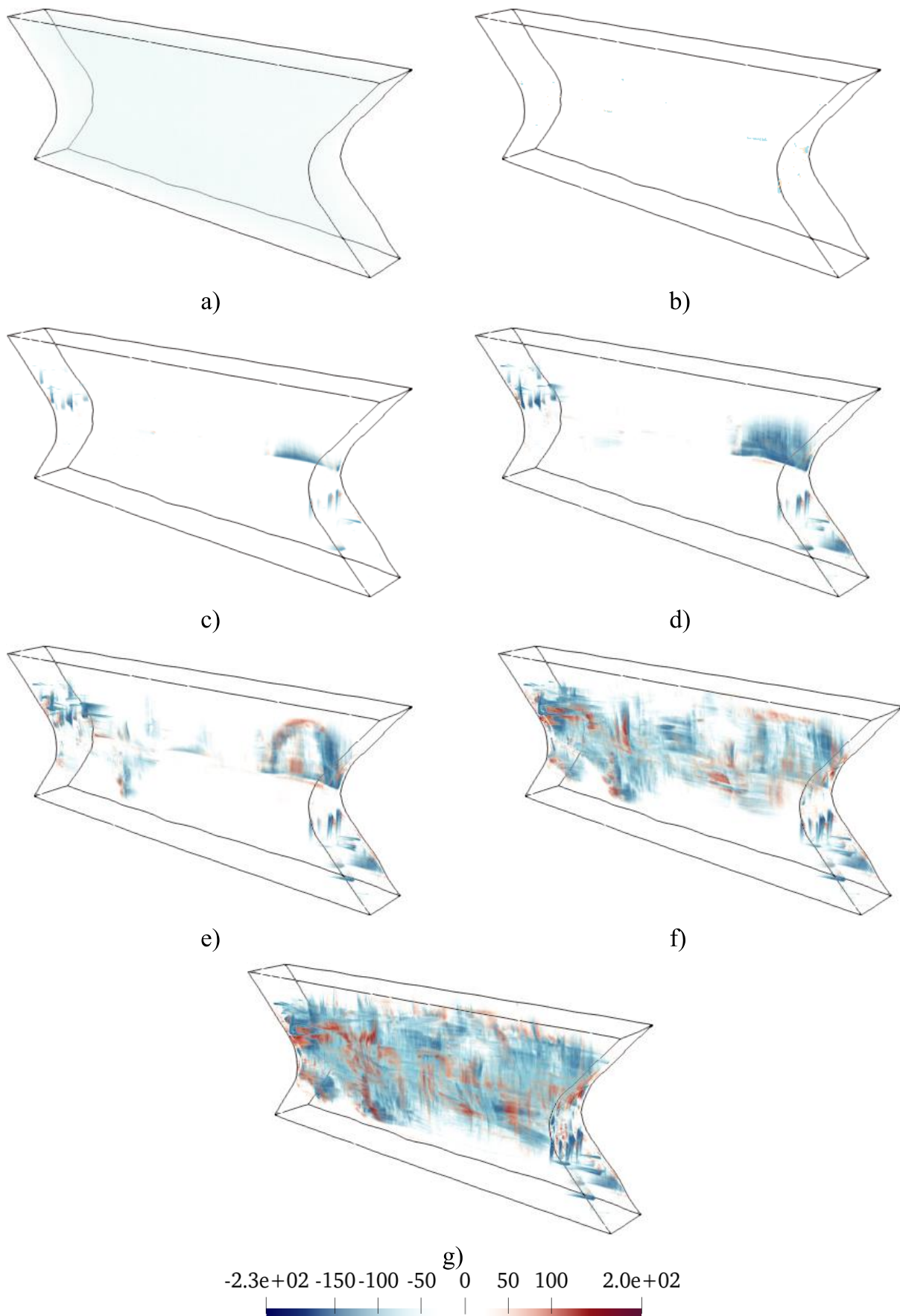
Naposljetku, Slika 123. prikazuje polja korelacijskih reziduala za cikličko smično ispitivanje izračunate DVC analizom. Na Slika 123. a) ne uočavaju se povišene vrijednosti korelacijskih reziduala. Nakon drugog ciklusa opterećivanja (Slika 123. b)) mogu se uočiti povišene vrijednosti reziduala uzrokovane izvlačenjem vlakna iz matrice. Na Slika 123. c) i d) zabilježena su veća područja povišenih reziduala, posebice u zonama vlačnog opterećenja (Slika 11.). Također, pomoću reziduala može se uočiti nastala delaminacija unutar ispitnog uzorka. Nakon petog ciklusa inicirala su se dodatna oštećenja što se može vidjeti na Slika 123. e). Nakon šestog i sedmog ciklusa oštećenja u ispitnom uzorku su značajna što se može vidjeti prema Slika 123. f) i g).



**Slika 121. Posmične deformacije po elementima izračunate DVC analizom pomoću *Correli 3.0* algoritma za cikličko ispitivanje.**



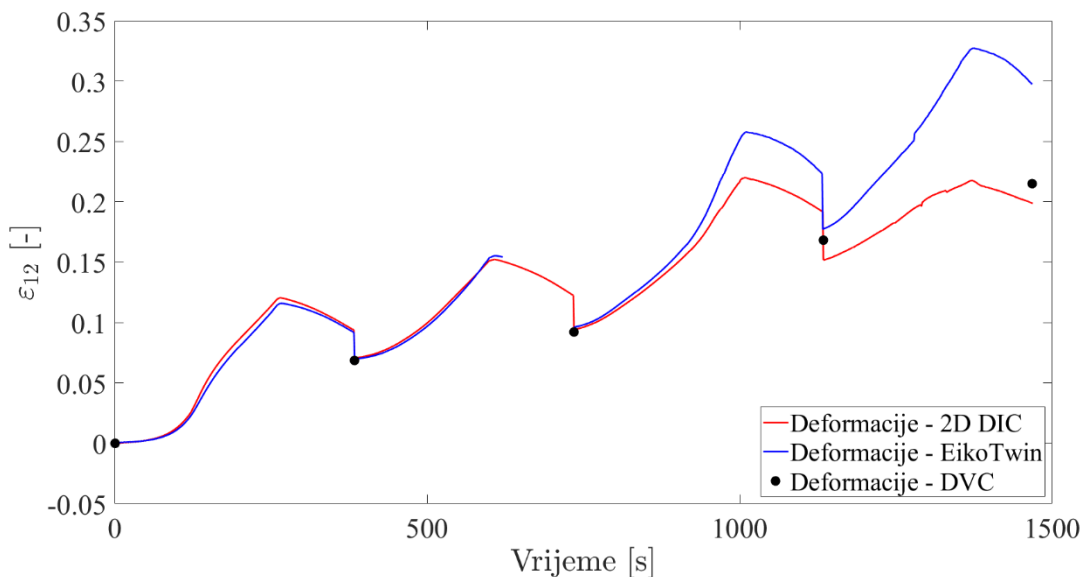
**Slika 122. Smične deformacije ograničene najmanjom i najvećom deformacijom od 0,06 i 0,15 za cikličko ispitivanje.**



**Slika 123. Korelacijski reziduali izračunati DVC analizom pomoću *Correli 3.0* algoritma za cikličko ispitivanje.**

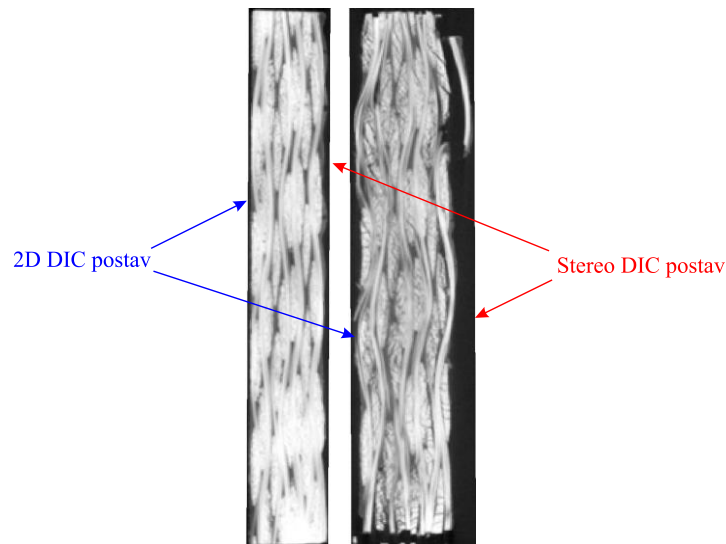
## 6. Diskusija

Nakon predstavljanja svih rezultata dobivenih 2D DIC, stereo DIC te DVC analizom provedena je usporedba vrijednosti deformacija. Slika 124. prikazuje dijagram u kojemu su usporedno prikazane izračunate posmične deformacije za sve tri korištene metode. Na dijagramu se može vidjeti vrlo dobro poklapanje deformacija tijekom prva dva ciklusa monotonog smičnog ispitivanja. Tijekom trećeg i četvrtog ciklusa nastupila je razlika koja ima nekoliko uzroka. Prvi uzrok je heterogenost mikrostrukture ispitivanog materijala. Za razliku od homogenih materijala s izotropnim mehaničkim svojstvima ispitivani kompozitni materijal ima anizotropna mehanička svojstva te nije za očekivati kako će odziv materijala biti jednak po različitim presjecima.



**Slika 124. Usporedba deformacija izračunatih 2D DIC, stereo DIC te DVC analizom za monotono ispitivanje.**

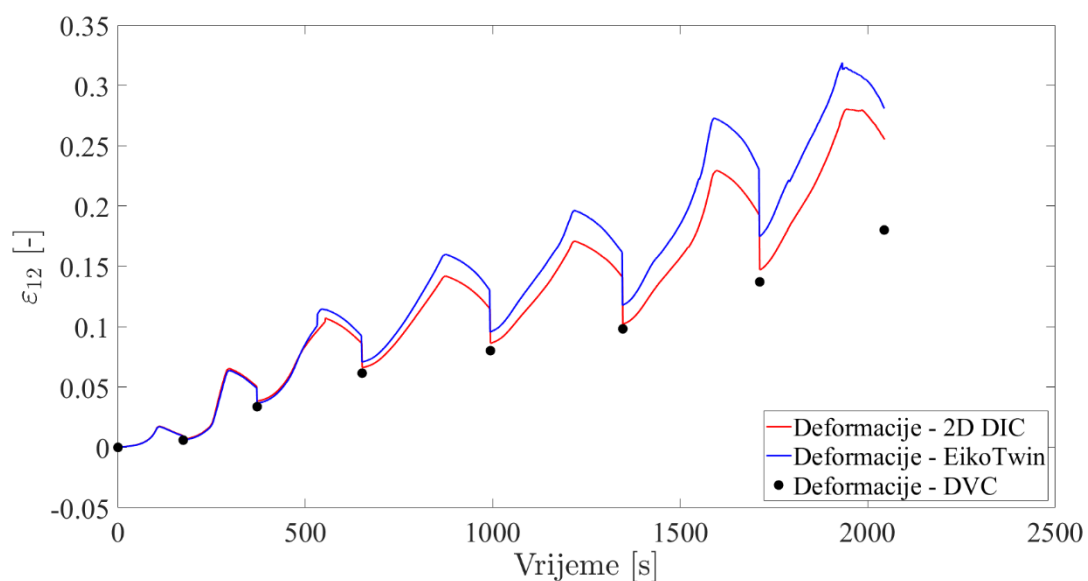
Nadalje, uslijed procesa proizvodnje kompozitne ploče iz koje su izrezani ispitni uzorci došlo je do različite raspodjele konstituenata po presjecima. Na Slika 125. prikazano je početno (lijevo) i konačno stanje (desno), ispitnog uzorka tijekom monotonog ispitivanja. Udio vlakana na donjem rubu početnog i konačnog stanja ispitnog uzorka je veći, a upravo slike te strane bilježio je stereo DIC postav. S obzirom da vlakna preuzimaju mehaničko opterećenje uslijed kojega se deformiraju, veća lokalizacija deformacija je zabilježena pomoću *EikoTwin* algoritma. Osim različitog udjela konstituenata uslijed proizvodnog postupka dobivene su površine različite kvalitete. Tako je površina promatrana stereo DIC optičkim postavom bila lošije kvalitete, što također ne treba zanemariti.



**Slika 125. Presjek ispitnog uzorka na početku i na kraju monotonog ispitivanja.**

Naposljetku, razlika koja se pojavila nakon trećeg i četvrtog ciklusa uzrokovana je i načinom računanja deformacija. Deformacije koje su izračunate 2D DIC i stereo DIC analizom su površinske deformacije dok DVC analiza uzima u obzir i volumenske deformacije. Budući da u unutrašnjem dijelu ispitnog uzorka vlada ravninsko stanje deformacija, kod računanja globalnih deformacija dolazi do smanjenja iznosa uslijed smanjenih deformacija unutar uzorka.

Slika 126. prikazuje usporedbu deformacija izračunatih 2D DIC, stereo DIC te DVC analizom za cikličko opterećenje. Slično kao kod monotonog ispitivanja tijekom prvih ciklusa uočeno je dobro poklapanje deformacija. Međutim, povećanjem mehaničkog opterećenja te degradacijom krutosti ispitnog uzorka uslijed znatnih oštećenja dolazi do povećanja razlika u izračunatim deformacijama.



**Slika 126. Usporedba deformacija izračunatih 2D DIC, stereo DIC te DVC analizom za cikličko ispitivanje.**



Na kraju, u Tablica 11. prikazane su korištene veličine elemenata i regularizacijske duljine. Može se primijetiti kako je veličina elemenata najmanja kod DVC analize dok je najveća kod stereo DIC analize. Regularizacijske duljine potrebno je izabrati tako da ne dođe do prevelikog povećanja krutosti izmjenjenog polja pomaka te izračunatog polja deformacija. Međutim, regularizacijska duljina stereo DIC analize morala je biti većeg iznos jer u suprotnom algoritam nije mogao konvergirati te izvršiti analizu. Različitu veličinu elemenata te različitu regularizacijsku duljinu potrebno je uzeti u obzir kao jedan od potencijalnih uzroka pojave razlika pri kasnijim stadijima ispitivanja.

**Tablica 11. Usporedba korištenih veličina elemenata i regularizacijskih duljina za provedene analize. Sve vrijednosti izražene su u milimetrima.**

	DIC	Stereo DIC	DVC
Veličina elementa	0,54	0,7	0,26
Regularizacijska duljina, $l_r$	1,25	12	4,1

## 7. Zaključak

U ovom diplomskom radu provedeno je monotono i cikličko smično ispitivanje vinilester smole ojačane staklenim pletenim vlaknima pomoću modificiranog Arcan prihvata. Korišteni leptirasti ispitni uzorci izrezani su iz kompozitne ploče debljine 3 mm koja je izrađena postupkom vakuumske infuzije. Ispitivanje je provedeno na kvazi-statičkoj kidalici Beta 50-5, *Messphysik* s brzinom opterećenja od 0,24 mm/min.

Cilj diplomskog zadatka bio je provesti sveobuhvatnu karakterizaciju mehaničkog ponašanja predloženog materijala primjenom 2D DIC te stereo DIC metoda. Osim toga, nakon svakog ciklusa opterećenja ispitni uzorak je skeniran primjenom računalne tomografije kako bi se promatralo oštećenje do kojeg dolazi unutar ispitnog uzorka. Pomoću stereo optičkog postava bilo je moguće izmjeriti izvanravninske pomake te se odredio njihov utjecaj na ravninsko mjerenje. Zaključeno je da su izvanravninski pomaci bili zanemarivi što je potvrđeno i analizom ravninskih polja pomaka koja su se približno poklapala. Iz izmjerenih polja pomaka izračunata su polja deformacija koja su služila za određivanje globalnog ponašanja materijala uslijed provedenih ispitivanja. Također, s obzirom da je korišten globalni DIC/DVC pristup iz provedenih analiza određena su polja korelacijskih reziduala na temelju kojih je praćena inicijacija i rast pukotina.

2D DIC i DVC analize provedene su pomoću *Correli 3.0* algoritma koji se temelji na globalnom pristupu korelacije digitalne slike te je implementiran u programskom jeziku *MATLAB*. Stereo DIC analize provedene su pomoću *EikoTwin DIC* korelacijskog algoritma. Prije analiza ispitivanja, provedena je analiza mjerne nesigurnosti iz slika/skenova zabilježenih u neopterećenom stanju radi određivanja optimalne veličine korištenih konačnih elemenata.

Analiza monotonog smičnog ispitivanja podijeljena je na linearno i nelinearno ponašanje WF materijala. U linearnom području nije došlo do iniciranja oštećenja. Vrijednosti deformacija nelinearnog područja veće su za jedan red veličine od deformacija ostvarenih u linearnom području. Također, u nelinearnom području zabilježeno je iniciranje prvih oštećenja oko vrhova V zarezova. Provedena je usporedba polja pomaka, najvećih glavnih deformacija i korelacijskih reziduala pri različitim režimima opterećenja. Analizom izmjerenih pomaka zaključeno je da su unatoč znatnom oštećenju, izvanravninski pomaci bili zanemarivi. Pri analizi cikličkog ispitivanja praćena su povećanja pomaka, najvećih glavnih deformacija i korelacijskih reziduala kako bi se detektirala nastala oštećenja. Jednako kao i za monotono ispitivanje uočeno je približno poklapanje polja pomaka tijekom cijelog ispitivanja.

Naposljetku, usporedbom izračunatih deformacija, uočeno je vrlo dobro poklapanje rezultata dobivenih DIC, stereo DIC te DVC analizom pri prvim ciklusima monotonog i cikličkog ispitivanja. Nastanak oštećenja uzrokovao je razliku između primijenjenih metoda za računanje deformacija. Međutim, iniciranje oštećenja je jedan od razloga razlici među izračunatim deformacijama. Prvenstveno, ispitivani materijal je heterogen te posjeduje anizotropna mehanička svojstva što znači da u različitim presjecima i smjerovima ima različita mehanička svojstva. Osim toga, proizvodni postupak rezultirao je različitim udjelima konstituenata po debljini uzorka. Veći udio staklenih vlakana na jednoj strani ispitnog uzorka rezultirao je većim deformacijama i krutošću te strane s obzirom da staklena vlakna preuzimaju opterećenje. Proizvodni postupak rezultirao je i različitim kvalitetama površina na kojima su bilježene slike. Nadalje, DIC metodama analizirane su samo površine deformacije dok su DVC analizama uzete u obzir i deformacije unutar ispitnog uzorka. Budući da je mogućnost deformiranja unutrašnjosti ispitnog uzorka vrlo ograničena, uzimanje u obzir tih deformacija dovodi do smanjenja prosječnog iznosa na promatranom području.

## 8. Literatura

- [1] Waghmare, S., Shelare, S.D., Aglawe, K.R., & Khope, P.B. (2021). A mini review on fibre reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*.
- [2] Li, W., Qiao, Y., Fenner, J.S., Warren, K.C., Salviato, M., Bažant, Z.P., & Cusatis, G. (2020). Elastic and fracture behavior of three-dimensional ply-to-ply angle interlock woven composites: Through-thickness, size effect, and multiaxial tests. *arXiv: Materials Science*.
- [3] Qiao, Y., & Salviato, M. (2019). Micro-computed tomography analysis of damage in notched composite laminates under multi-axial fatigue. *arXiv: Applied Physics*.
- [4] [https://www.fibreglast.com/product/vacuum-infusion-Guide/Learning\\_Center](https://www.fibreglast.com/product/vacuum-infusion-Guide/Learning_Center)  
[15.12.2021.]
- [5] McCormick, N., Lord, J.: Digital Image Correlation, National Physical Laboratory, Teddington, 2010.
- [6] Vrgoč, A., Tomičević Z., Smaniotto, B., Hild, F.: Application of different imaging techniques for the characterization of damage in fiber reinforced polymer. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, 2021, 150, pp.106576  
10.1016/j.compositesa.2021.106576 . hal-03300140
- [7] Zaplatić, A.: Razvoj mehaničkog i optičkog eksperimentalnog postava za ispitivanje tankih limova opterećeni na smicanje, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2019.
- [8] Beabier, B., Dufour, J.E., Hild, F., Roux, S., Lavernhe-Taillard, K.: CAD – Based Calibration and Shape Measurement with Stereo DIC, 2013.
- [9] Bilobrk, J.: Identifikacija oštećenja u kompozitima ojačanim staklenim vlaknima primjenom ex-situ mikro tomografskog ispitivanja, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2020.
- [10] Buljac, A.: Understanding, observation and quantification of ductile failure mechanism via 3D imaging. *Mechanical engineering [physics.class-ph]*. Université Paris-Saclay, 2017. English. NNT: 2017SACLN036 . tel-01617107
- [11] Čurčija, F.: Konstrukcija modularnog Arcan prihvata za višeosno opterećenje, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.
- [12] Zaplatić, A., Tomičević, Z., Čakmak, D., Hild, F.: Improvement of the Arcan setup for the investigation of thin sheet behavior under shear loading. *Experimental mechanics*, 13(2021), 1-20 doi:10.1007/s11340-021-00762-1

- [13] Buljac, A., Taillandier-Thomas, T., Helfen, L., Morgeneyer, T. F. and Hild, F. (2018c), "Evaluation of measurement uncertainties of digital volume correlation applied to laminography data", *J. Strain Analysis Eng. Des.*, 53(2), 49-65. <https://doi.org/10.1177/0309324717748097>.